REINFORCED CONCRETE DESIGN

การออกแบบอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็ก

วิธีหน่วยแรงใช้งาน ตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

ผศ.สมศักดิ์ คำปลิว

20 ปี

TUMCIVIL.COM
engfanatic CLUB

การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (WSD) โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ปรับปรุงใหม่ 2555

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ คำปลิว (เพื่อการศึกษา)

สงวนลิขสิทธิ์

พิมพ์ครั้งที่ 1

มกราคม 2556

ผู้จัดทำ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ คำปลิว
พิสูจน์อักษร : ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ คำปลิว และ นายอธิพัชร์ ศรเกตุ
ผู้ออกแบบปก : นายอธิพัชร์ ศรเกตุ
ควบคุมการพิมพ์โดย : นายอธิพัชร์ ศรเกตุ และ TumCivil.com Training Center

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ
ISBN : 978-616-321-465-2

จัดพิมพ์โดย
นายอธิพัชร์ ศรเกตุ และ TumCivil.com Training Center

นำเสนอโดย
TumCivil.com Training Center / www.tumcivil.com / ตั้มซีวิล โทร. 089-4990739

การออกแบบ
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผศ.สมศักดิ์ คำปลิว

คำนำในการพิมพ์ครั้งแรก

หนังสือการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเล่มนี้เป็นทั้งกึ่งตำราและกึ่งคู่มือ ซึ่งผู้เขียนนำมาจากประสบการณ์การคำนวณออกแบบงานจริง เพราะตำราวิชานี้ที่นิสิตนักศึกษาใช้เรียนตามหลักสูตรทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จะเน้นหนักทางทฤษฎีคือออกแบบโครงสร้างทีละอย่าง อาจารย์จะตั้งโจทย์ตุ๊กตาโดยใส่ LOAD มาให้เรียบร้อย เรามีหน้าที่คำนวณตามทฤษฎี ซึ่งตำราในลักษณะนี้เหมาะกับการเรียนและอ่านเพื่อสอบเท่านั้น เมื่อสำเร็จการศึกษาและได้รับแบบจากสถาปนิกสักหนึ่งแบบให้คำนวณ อาจต้องปวดหัวอยู่หลายวันเพราะไม่ทราบว่าจะเริ่มต้นออกแบบอย่างไร ต้องวิ่งหารายการคำนวณของวิศวกรรุ่นก่อนๆ ที่เขาทำไว้ ถ้าโชคดีเจอรายการคำนวณของผู้ที่ทำไว้อย่างละเอียด และเป็นระเบียบเข้าใจง่ายก็ดีไป แต่ถ้าได้ของวิศวกรรุ่นเดอะอาจจะพบว่าเวลาออกแบบคานมีรายการคำนวณเพียงบรรทัดเดียว บอกโมเมนต์แล้วเขียนหน้าตัดให้เลย อย่างนี้จะงงหนักเข้าไปอีก เพราะตำราดังกล่าวไม่ได้บอกวิธีเริ่มต้นเมื่อได้แบบสถาปัตยกรรม การออกแบบแต่ละชิ้นส่วนควรจะทำตัวไหนก่อนหลัง การคิดน้ำหนักลงโครงสร้างทำอย่างไร เมื่อเป็นเช่นนี้วิศวกรที่จบใหม่จึงอาจจะพลาดงานไปบ่อยๆ

ในหนังสือเล่มนี้ได้จัดเรียงเรียงเนื้อหาจากบทที่ 1 เป็นความรู้พื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นความรู้ทั่วๆ ไปเกี่ยวกับวัสดุต่างๆ บทที่ 2 ออกแบบคานซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญที่สุด โครงสร้างทุกชนิดถือว่าเป็นคานทั้งนั้น ยกเว้นเสาที่รับแรงตามแนวแกนอย่างเดียว (axial load) ถ้าเข้าใจบทนี้แล้วบทอื่นๆ จะง่ายขึ้นมาก ในบทที่ 3 เกี่ยวกับการออกแบบพื้น บทที่ 4 ออกแบบบันได บทที่ 5 ออกแบบเสา บทที่ 6 ออกแบบฐานราก ส่วนบทที่ 7 เป็นส่วนเสริมที่ควรจะทราบเกี่ยวกับการทำรายการคำนวณและการเขียนแบบเพื่อยื่นขออนุญาตจากทางราชการ และสุดท้ายภาคผนวกจะเป็นตารางที่จำเป็นในการออกแบบ

ในการออกแบบจริงนั้นควรจะเริ่มจากการออกแบบหลังคา ถ้าไม่มี (หลังคาเป็นดาดฟ้า คสล.) จะเริ่มจากการสเก็ตช์ผังคานและพื้นแต่ละชั้น ถ้าซ้ำกันก็ง่ายหน่อย เริ่มออกแบบแผ่นพื้น บันได ถ่ายน้ำหนักลงคาน ออกแบบคาน ถ่ายน้ำหนักจากคานลงเสา ออกแบบเสา ถ่ายน้ำหนักจากเสาลงฐานราก ออกแบบฐานราก เขียนใบปะหน้าซึ่งมีข้อกำหนดและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ออกแบบ ในเขตกรุงเทพมหานครใช้ $f_c' = 173$ ksc โดย $f_c = 0.375f_c'$ แต่ถ้าต่างจังหวัดควรจะใช้ $f_c' = 144$ ksc และ $f_c = 0.45f_c'$ ถ่ายเอกสารรายการคำนวณและเซ็นชื่อกำกับทุกแผ่น (ควรจะเป็นหมึกสีน้ำเงิน) ถ่ายเอกสารใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม เซ็นชื่อกำกับและระบุว่าเป็นงานใด ใครเป็นเจ้าของงาน วัน/เดือน/ปี เขียนใบรับรองของผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม รวบรวมเอกสารเพื่อให้เจ้าของงานไปยื่นขออนุญาต

จุดประสงค์ที่เขียนขึ้นมานั้น ผู้เขียนหวังจะเห็นวิศวกรยอดฝีมือมากๆ ในประเทศไทย และมีความเชื่อว่าศิษย์หรือผู้อ่านควรจะเก่งกว่าครู นั่นคือคลื่นลูกหลังควรจะแรงกว่าคลื่นลูกแรก ประเทศชาติของเราจึงจะต้องถูกพัฒนาให้เจริญได้

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าถ้าท่านผู้อ่านพบข้อผิดพลาดในหนังสือเล่มนี้ กรุณาแจ้งให้ผู้เขียนทราบด้วย เพื่อจะได้แก้ไขให้ถูกต้องสมบูรณ์และใช้เป็นหนังสือที่ถ่ายทอดความรู้แก่คนรุ่นหลังได้ดีขึ้น ผู้เขียนขอถือโอกาสนี้ขอบพระคุณอาจารย์วีระนนท์ ว่องไพฑูรย์ และคุณหญิงพัชรี ว่องไพฑูรย์ อดีตอาจารย์และผู้บังคับบัญชา ซึ่งให้การสนับสนุนผู้เขียนในการเขียนหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณ คุณอรวรรณ คำปลิว ซึ่งเป็นภรรยาของผู้เขียนเองในการดูแลสุขภาพของผู้เขียนเป็นอย่างดีในระหว่างเขียน ขอขอบคุณบริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด ในการจัดทำและเผยแพร่หนังสือ “การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก” ออกสู่ท่านผู้อ่าน

สมศักดิ์ คำปลิว

คำนำในการปรับปรุง พ.ศ.2555

เมื่อปี พ.ศ.2550 บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด ได้ยุติการพิมพ์หนังสือ “การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก” แต่ยังมีผู้ถามหาหนังสือเล่มนี้กันอยู่ ประจวบกับการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 โดยวิธีกำลังที่ให้ใช้ f_c' ไม่เกิน 150 ksc ทำให้ไม่ประหยัดเท่ากับวิธีหน่วยแรงใช้งาน หนังสือเล่มนี้จึงมีความจำเป็นอยู่ แต่วิทยาการมีความก้าวหน้าขึ้นมาก ผู้เขียนจึงถือโอกาสปรับปรุงเพิ่มเติมส่วนที่ยังขาดอยู่ และตัดส่วนที่ล้าสมัยไปแล้ว

ในส่วนของการออกแบบบันได ได้เพิ่มเติมการออกแบบบันไดชานพักลอย และรายละเอียดการออกแบบฐานรากได้เพิ่มเติมมากกว่ากรณีอื่นๆ

ผศ.สมศักดิ์ คำปลิว

สารบัญ

บทที่ 1 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีต (1) วัสดุผสมคอนกรีต (2) กำลังอัดของคอนกรีต (2) ค่าความยุบตัวของคอนกรีต (4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) (5) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (6) เหล็กเสริม (22) สัญลักษณ์แทนเหล็กเสริม (24)

บทที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

น้ำหนักบรรทุกบนคาน (25) การรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (29) การหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในคาน (31) การรับโมเมนต์ดัดในคานตามทฤษฎียืดหยุ่น (33) คานซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด (43) แรงเฉือนและแรงดึงทแยงในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (55) ความต้านทานต่อโมเมนต์บิด (69) คานแคบ คานลึก (81) การจัดและแสดงรายละเอียดในคานพิเศษ (87) แบบฝึกหัดบทที่ 2 (91)

บทที่ 3 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชนิดของแผ่นพื้น (95) การเกิดโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้น (96) พื้นระบบตง (116) การเจาะพื้น (121) การใช้ทรายถมเป็นแบบพื้นชั้นล่าง (122) แผ่นพื้นชั้นล่างวางบนดินถม (123) พื้นสองทางต่อเนื่องกับพื้นทางเดียว (124) รายละเอียดแผ่นพื้นสำเร็จรูป (125) แบบฝึกหัดบทที่ 3 (126)

บทที่ 4 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชนิดของบันได (127) บันไดแบบมีคานรับที่ปลาย (129) บันไดยื่น (156) บันไดแบบมีคานแม่บันไดสองข้าง (168) บันไดแบบยื่นจากคานกลาง (169) บันไดเวียน (171) บันไดชานพักลอย (199) แบบฝึกหัดบทที่ 4 (222)

บทที่ 5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

การถ่ายน้ำหนักจากคานและพื้นลงเสา (223) ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (226) เสาสั้นรับน้ำหนักตามแกน (228) ข้อกำหนดเกี่ยวกับเสา (231) เสาสั้นรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ (243) เสายาว (265)

บทที่ 6 ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

ฐานราก (277) แบบของฐานราก (278 การกระจายน้ำหนัก (280) เสาเข็ม (284) การรับน้ำหนักของเสาเข็ม (286) การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากผลการเจาะสำรวจดิน (299) ลักษณะการวิบัติของฐานราก (331) กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตในฐานราก (339) การเสริมเหล็กรับแรงดัดในฐานราก (340) ลักษณะการรับแรงของเสาเข็ม (361) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น (362) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น (382) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้น (399) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 4 ต้น (411) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 5 ต้น (418) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 6 ต้น (425) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 7 ต้น (434) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 8 ต้น (441) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 9 ต้น (448) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 10 ต้น (455) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 11 ต้น (462) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 12 ต้น (469) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 13 ต้น (476) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 14 ต้น (484) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 15 ต้น (492) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 16 ต้น (500) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 17 ต้น (508) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 18 ต้น(516) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 19 ต้น (524) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 20 ต้น (532)การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น (540)การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 22 ต้น (548) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 23 ต้น (556) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 24 ต้น (564) การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 25 ต้น (573) แบบฝึกหัด (582)

ภาคผนวก

ตาราง ผ-1 เนื้อที่หน้าตัด น้ำหนัก เส้นรอบวง ของเหล็กเสริมคอนกรีต (591) ตาราง ผ-2 เนื้อที่หน้าตัด เส้นรอบวง ของเหล็กเสริมในแผ่นพื้น (593) ตาราง ผ-3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ (596) ตาราง ผ-4 ระยะฝังและระยะทาบของเหล็กเสริม (599) ตาราง ผ-5 หน่วยแรงที่ยอมให้ (601) ตาราง ผ-6 กำลังของหน้าตัดคานขนาดต่างๆ (602) ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง (615) ตาราง ผ-8 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น (626) ตาราง ผ-9 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเกลียวแบบสั้น (644)

บรรณานุกรม (647)

1

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการนำเอาคอนกรีตหรือหินประดิษฐ์ซึ่งรับแรงอัดได้ดีรับแรงดึงได้ต่ำ มาประกอบกับเหล็กกล้าละมุนซึ่งรับทั้งแรงอัดและแรงดึงได้ดีแต่ราคาแพง ทำให้ได้โครงสร้างที่มีราคาเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง

1.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นหินที่ประดิษฐ์ขึ้นมาให้ได้รูปร่างที่ต้องการตามจุดประสงค์ โดยทำให้อยู่ในสภาพเหลวเพื่อให้มีรูปร่างตามแบบที่เตรียมเอาไว้ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวและนำแบบที่ใช้ออกไปจะได้หินตามรูปทรงที่ต้องการ ผิวคอนกรีตในทางสถาปัตยกรรมต้องการนั้นมีสองแบบคือ

(ก) คอนกรีตเปลือย เมื่อนำแบบหล่อออกไปแล้ว จะปล่อยให้ผิวคอนกรีตตามรูปแบบหล่อโดยตรง อาจจะมีการอุดรูพรุนที่เกิดขึ้นด้วยปูนทรายในกรณีโครงสร้างที่ไม่สำคัญ หรืออุดด้วยเรซินกำลังสูง เช่นซิลิกาท็อปในโครงสร้างที่สำคัญมาก เมื่อซ่อมแซมส่วนบกพร่องและปรับแต่งรูปร่างให้คล้ายแบบแล้วจะแต่งผิวขั้นสุดท้ายโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมทรายละเอียดที่ร่อนจากตะแกรงตาถี่ๆ ใส่น้ำเหลวมาก จากนั้นใช้แปรงไม้กวาดจุ่มปูนทรายทาตามผิวคอนกรีตแทนการทาสี ทรายและปูนซีเมนต์จะเข้าไปอุดรูพรุนเล็กๆ ทำให้ผิวเรียบไม่เปลืองสีรองพื้นที่จะทาทับลงไปในภายหลังทั้งยังแข็งแรงกว่าการทาสีรองพื้นหนา ในกรณีคอนกรีตเปลือยผิวนี้จำต้องทำแบบหล่ออย่างประณีตและแข็งแรง เช่น พื้นใช้ไม้อัดเป็นแบบ ตุ๊กตาที่เป็นไม้ค้ำยันต้องวางถี่ๆ ประมาณ 0.50 เมตร ไม่เช่นนั้นผิวพื้นจะเป็นคลื่นจากการแอ่นตัวของแบบหล่อ แบบคานต้องไสให้เรียบและทำร่องให้เป็นแนวสวยงาม

(ข) คอนกรีตฉาบผิวด้วยปูนทราย ในกรณีแบบหล่อไม่จำเป็นจะต้องประณีตแต่ต้องแข็งแรงเพื่อไม่ให้ลำบากต่อการฉาบในภายหลัง ผิวแบบหล่อควรจะหยาบเพื่อให้ปูนฉาบจับได้แน่นไม่หลุดล่อน ปูนฉาบประกอบด้วยทรายละเอียดร่อนพร้อมๆ กับปูนขาวหมักด้วยน้ำแล้วผสมกับปูนซีเมนต์ซิลิกา เช่น ตราเสือ ซึ่งจะแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์สำหรับโครงสร้างเช่น ตราช้าง นอกจากนี้ยังหดตัวน้อยผิวที่ฉาบแล้วจึงไม่แตกร้าว ปูนขาวทำให้ลื่นฉาบง่าย ตรงส่วนมุมของเสาหรือคานต้องใช้ปูนฉาบผสมปูนมากพิเศษทำสันตรงมุมให้ได้ระดับหรือแนวที่ถูกต้อง ทิ้งให้แข็ง 2-3 วันจึงจะฉาบให้เต็ม ใต้ท้องพื้นหรือกันสาดจะต้องใช้ปูนฉาบทำปุ่มเป็นระยะประมาณ 1.50 เมตร และจัดให้ระดับถูกต้องไว้อ้างอิงในการฉาบจริงอีกครั้ง

1.2 วัสดุผสมคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวของวัสดุผสมละเอียด เช่นทราย วัสดุผสมหยาบ เช่น หินหรือกรวด เพื่อให้วัสดุเหล่านี้ติดเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีการผลิตและชนิดของปูนซีเมนต์จะศึกษาได้จากตำราเทคนิควิทยาคอนกรีต หรือ คอนกรีตเทคโนโลยี

ทราย จะต้องเป็นทรายน้ำจืด เม็ดคมและสะอาด ทรายที่ใช้ผสมเป็นคอนกรีตของโครงสร้างหลัก เช่น ฐานราก เสา คาน พื้น จะใช้ทรายหยาบ สำหรับทรายละเอียดนั้นจะใช้ทำปูนฉาบเพื่อให้ผิวละเอียดเรียบ ไม่นิยมใช้ผสมคอนกรีต ทรายขี้เป็ดหรือทรายถมมีสีดำเนื่องจากมีสารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกต่างๆ ปะปนมาด้วย ใช้ในการถมที่ห้ามนำมาผสมคอนกรีต การทดสอบทรายอย่างง่ายๆ ให้เอาทรายประมาณหนึ่งกำมือใส่ในแก้วน้ำ เติมน้ำสะอาดแล้วกวนให้ทั่ว ถ้ามีสิ่งสกปรกจะเห็นแขวนลอยในน้ำ

หินย่อย กรวด หินย่อยได้มาจากการระเบิดหินปูนจาก๓เขาผ่านเครื่องบดหินและตะแกรงคัดขนาด ส่วนใหญ่จะมาจากแถบสระบุรี หินที่มีขนาด $\frac{1}{2}"-\frac{3}{4}"$ เรียกว่า **หินหนึ่ง** ใช้สำหรับผสมคอนกรีตเพื่อเทในที่แคบๆ หรือบริเวณที่เหล็กรียงถี่ๆ เช่น ครีบ พื้น จุดต่อระหว่างคานกับคาน หรือคานกับเสา ซึ่งบริเวณนี้เหล็กจะแน่นมาก ถ้าใช้หินใหญ่เกินไปจะเป็นโพรงทำให้โครงสร้างเสียกำลัง หินที่มีขนาด $\frac{3}{4}"-1\frac{1}{2}"$ เรียกว่า **หินสอง** ใช้ผสมคอนกรีตทั่วๆ ไป กรวด เป็นหินย่อยธรรมชาติเก็บจากแม่น้ำลำธาร จะมีบริเวณชนบทหรือต้นน้ำลำธาร ใช้ในกรณีที่หาหินย่อยไม่ได้หรือค่าขนส่งสูงเกินไป ขนาดของหินเป็นองค์ประกอบสำคัญในการประหยัดปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์มีราคาสูงกว่าหินมาก ในปริมาตรคอนกรีตที่เท่ากัน ***หินขนาดโตจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าหินขนาดเล็ก*** แต่หินยิ่งโตมากยิ่งทำให้เกิดโพรงมากยิ่งขึ้น ในงานอาคารจะใช้หินสองเว้นแต่บริเวณที่เหล็กแน่นจะใช้หินหนึ่ง

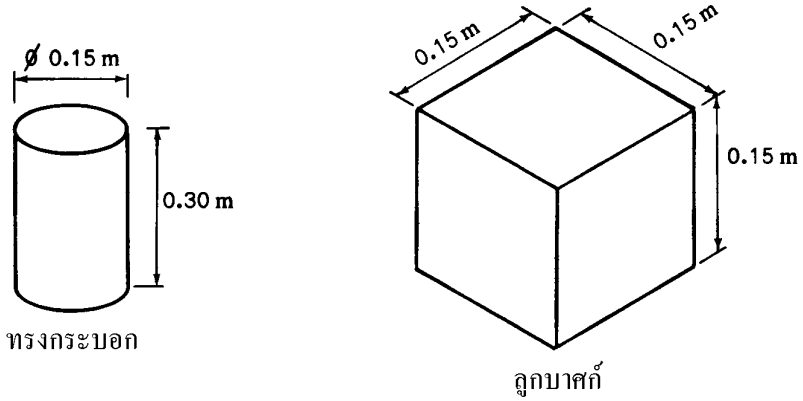
น้ำ เป็นสารที่ทำปฏิกิริยาเคมีไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์เป็นวุ้นไปเคลือบผิววัสดุผสมเช่นทรายและหินให้ยึดติดกันแน่น ดังนั้นน้ำต้องสะอาดเช่นน้ำประปา น้ำสะอาดที่ดื่มได้ใช้ผสมคอนกรีตได้

สารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อให้สมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป เช่น น้ำยากันซึมทำให้คอนกรีตเกิดการทึบน้ำสำหรับเทห้องน้ำห้องส้วม หรือห้องครัว ถังเก็บน้ำ ดาดฟ้า สารเคมีบางอย่างทำให้คอนกรีตก่อตัวช้าลงเพื่อให้ขนส่งและเทเข้าแบบได้ทัน สารบางอย่างคล้ายน้ำทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยลงแต่ไหลเข้าแบบได้ดี กำลังจึงสูงขึ้น เรื่องนี้ดูรายละเอียดในหนังสือคอนกรีตเทคโนโลยี

1.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ส่วนผสมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ดีนั้น จะขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของมวลรวมหยาบ และยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก การทำตัวอย่างทรงกระบอกคอนกรีตต้องทำอย่างน้อย 3 ตัวอย่างทุกวันที่มีการเทคอนกรีต หรือทุกๆ ปริมาตรคอนกรีต 100

ลูกบาศก์เมตร หรือพื้นที่ 500 ตารางเมตร ตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม สูง 30 ซม เท คอนกรีต 3 ชั้นชั้นละ 10 ซม กระทุ้งด้วยเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม ยาว 60 ซม ปลายมน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ปาดผิวบนให้เรียบทิ้งไว้จนหมาดใช้ลวดผูกเหล็กหรือตะปูเขียนชื่อสถานที่ก่อสร้างและวันที่ทำตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตแข็งดีแล้วหรือประมาณ 12-24 ชั่วโมง แกะแบบหล่อออกเอาตัวอย่างนั้นแช่ในน้ำจนครบ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ให้นำแท่งคอนกรีตไปทดสอบหากำลังอัดประลัยที่ห้องปฏิบัติการโยธาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งจะมีใบแสดงผลการทดสอบเป็นหลักฐานที่เชื่อถือได้



รูปที่ 1.1 แท่งคอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบหากำลังอัดประลัย

สำหรับตัวอย่างลูกบาศก์จะใช้สากสี่เหลี่ยมตำตามมาตรฐานของอังกฤษ กำลังอัดประลัยของตัวอย่างลูกบาศก์จะมากกว่ากำลังอัดประลัยของทรงกระบอก แต่กำลังอัดประลัยที่ใช้ตามกฎหมายไทยนั้นเป็นค่าของทรงกระบอก ไม่ใช่ลูกบาศก์ ความสัมพันธ์โดยประมาณของกำลังประลัยทั้งสองชนิดคือ

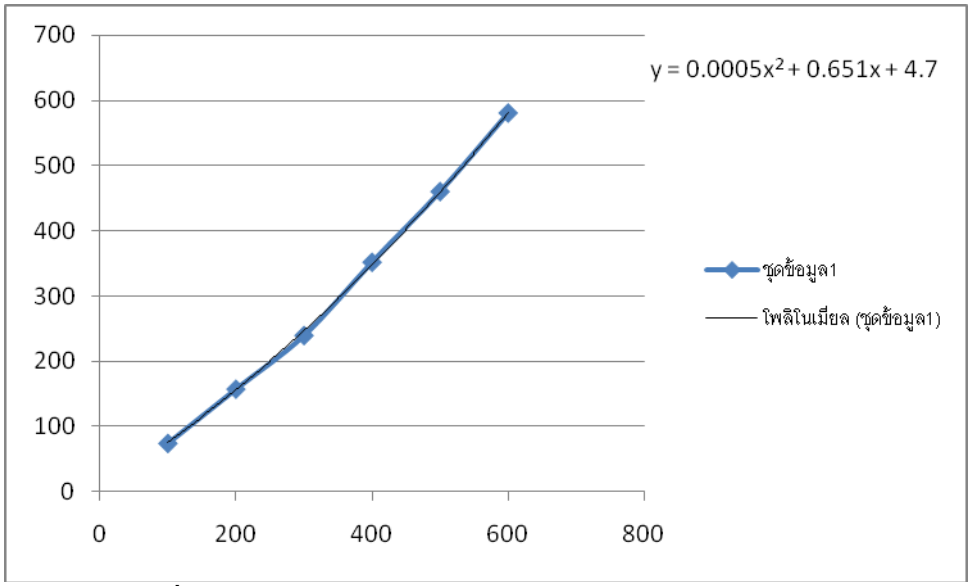
$$\text{กำลังอัดประลัยของทรงกระบอก} \approx \frac{5}{6} \text{ กำลังอัดประลัยของลูกบาศก์}$$

ค่าความสัมพันธ์ของกำลังประลัยทรงกระบอกและลูกบาศก์จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยทรงกระบอกและลูกบาศก์

f_c' ทรงกระบอก	75	158	240	352	460	580
f_c' ลูกบาศก์	100	200	300	400	500	600

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของลูกบาศก์กับทรงกระบอก อาจจะหาโดยใช้โปรแกรม Excel ที่ให้ค่าสมการของความสัมพันธ์ดังนี้



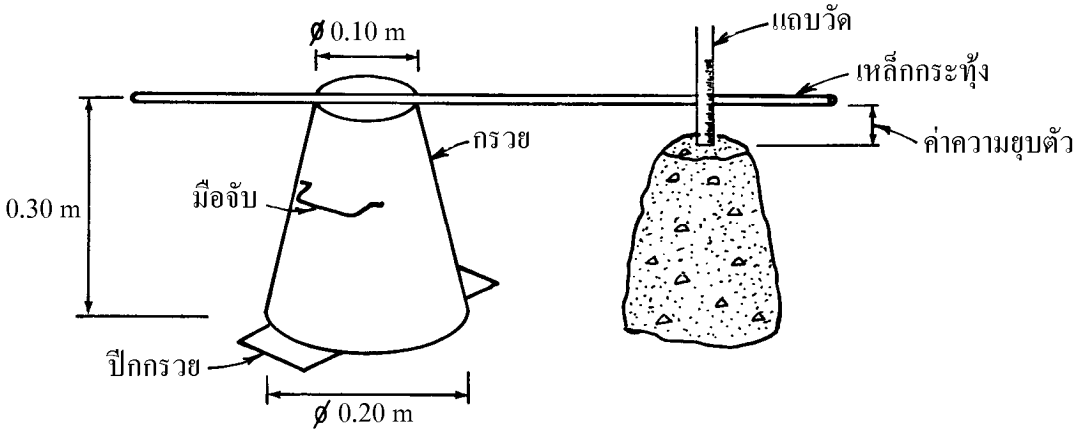
รูปที่ 1.2 รูปความสัมพันธ์ของกำลังอัดทรงกระบอกกับลูกบาศก์

1.4 ค่าความยุบตัวของคอนกรีต

เป็นการทดสอบความข้นเหลวของคอนกรีตเพื่อให้พอเหมาะในการเท เนื่องจากหากเหลวเกินไปน้ำปูนกับหินทรายจะแยกจากกันโดยหินจะไปกองด้านล่างน้ำปูนและทรายจะกองอยู่ด้านบน กำลังของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอแตกร้าวง่าย และถ้ามีรูรั่วน้ำปูนจะไหลออกจามรูรั่วทำให้เกิดโพรงตามตำแหน่งที่รั่วนั้น ในทางตรงกันข้ามถ้าคอนกรีตข้นเกินไปก็จะไหลเข้าแบบหล่อยาก เกิดโพรงมากเนื่องจากคอนกรีตไหลไปอุดช่องว่างได้ยากนั่นเอง

การทดสอบในสนามจะใช้กรวยสังกะสีหรือแผ่นเหล็กบางๆ ซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 1.2 เอากรวยนี้วางบนพื้นเรียบเช่น แผ่นสังกะสี เท้าเหยียบปีกฐานกรอกคอนกรีต 3 ชั้นๆ ละ 10 เซนติเมตร แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกลมปลายมนเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร จำนวน 25 ครั้ง เมื่อเต็มกรวยแล้วใช้เหล็กกระทุ้งปาดหน้าให้เรียบ เอาเท้าออกจากปีกฐานกรวยใช้มือจับหูของกรวยกระตุกขึ้นตรงๆ ช่วงสั้นๆ จนคอนกรีตหลุดจากกรวยแล้วยกขึ้นในแนวดิ่ง เอากรวยวางข้างๆ คอนกรีต เหล็กกระทุ้งวางบนยอดกรวย

ช่างควบคุมงานก่อสร้างและผู้กำหนดมาตรฐานในสัญญา มักจะให้ความสำคัญต่อการยุบตัวของคอนกรีตมากเกินความจำเป็น โดยเข้าใจว่าค่าความยุบตัวเป็นสิ่งที่ใช้กำหนดกำลังอัดประลัยคอนกรีต และคิดว่าค่าความยุบตัวยิ่งน้อยยิ่งดี ซึ่งเป็นการเข้าใจผิด เพราะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม ขนาดของหินล้วนแต่มีผลต่อค่าความยุบตัว จึงควรถือเป็นสิ่งที่ใช้ในการสังเกตโดยประมาณเท่านั้น จุดที่ควรควบคุมคืออัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดคอนกรีตที่สำคัญที่สุด ค่าความยุบตัวที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-15 เซนติเมตร ใช้แถบวัดจากยอดกรวยคอนกรีตถึงเหล็กกระทุ้งจะได้ค่าความยุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ 1.3 การทดสอบความข้นเหลวของคอนกรีตจากค่าความยุบตัว

ในกรณีของผู้รับเหมาก่อสร้างที่ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมหรือโม่ผสม จะใช้ปูนซีเมนต์ 1 ถุง (ปริมาตร 0.038 m^3 น้ำหนัก 50 kg) ทราย 0.076 m^3 (ประมาณ 4-5 บุ้งกี๋ น้ำหนัก $0.076 \times 1650 = 125.4$ kg) หิน 0.152 m^3 (ประมาณ 8-9 บุ้งกี๋ น้ำหนัก $0.152 \times 1600 = 243.2$ kg จะได้คอนกรีต 6 โม่/m^3 ใช้น้ำ 2-3 ถัง (สำหรับเทปูน) คอนกรีตจะมีกำลังอัดประลัยทรงกระบอกประมาณ 180-250 ksc ถ้าเปลี่ยนจากหินสอง (20-40 mm) ไปเป็นหินหนึ่ง (10-20 mm) ปริมาตรของคอนกรีตจะน้อยลงซึ่งอาจจะเป็น 8-11 โม่/m^3

1.5 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)

W/C คืออัตราส่วนของน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เป็นค่าที่ใช้กำหนดกำลังของคอนกรีตที่บ่มถูกต้องและมีอายุครบ 28 วัน

ตารางที่ 1.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C ต่างๆ กัน

$\frac{W}{C}$	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอายุ 28 วัน,ksc	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตมีฟองอากาศ
0.35	420	335
0.40	350	280
0.50	280	225
0.60	225	180
0.70	175	140
0.80	140	115

ตามกฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พ.ศ.2527 และข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2522 ข้อ 50 ให้ใช้หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีตไม่เกิน 0.375 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน และไม่เกิน 65 ksc ถ้าให้ $f_c = 0.375f_c'$ หรือ $65 = 0.375f_c'$ ดังนั้น $f_c' = \frac{65}{0.375} = 173.3$ ksc เมื่อดูจากตารางที่ 2 พบว่าต้องใช้ $\frac{W}{C} = 0.65$ ถ้าใช้อัตราส่วนผสม $1:2:4$ ในคอนกรีต 1 m3 จะใช้ปูนซีเมนต์ 6 ถุง ($50 \times 6 =$ 300 kg) ดังนั้นน้ำหนักน้ำที่ใช้ผสมเท่ากับ $0.65 \times 300 =$ 195 kg หรือประมาณ 195 ลิตร แต่มีข้อโต้เถียงระหว่างผู้ควบคุมงานกับผู้รับเหมาว่าจะใช้น้ำปริมาณนี้เต็มที่หรือต้องลดลง เพราะปกติหินที่ใช้ผสมนั้นคนงานจะโกยใส่บุ้งกี๋ยกจุ่มน้ำล้างเศษผง ทำให้มีน้ำจับที่ผิวของหินจนชุ่มรวมทั้งทรายที่ใช้ผสมนั้นมักจะเปียกน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำจริงในส่วนผสมเพิ่มขึ้นหรือ $\frac{W}{C}$ เพิ่มขึ้น (กำลังประลัยของคอนกรีตจะต่ำลง) ดังนั้นควรลดปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าไป แต่น่าจะลดจาก $\frac{W}{C} = 0.65$ เป็น $\frac{W}{C} = 0.55 - 0.60$ หรือน้ำหนักน้ำ $W = 165 - 180$ kg อย่าให้ต่ำกว่านี้จะทำให้คอนกรีตข้นเกินไป

1.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

E_c คืออัตราส่วนของหน่วยแรงต่อหน่วยการหดตัว แต่จากรูปที่ 1.3 จะพบว่ากราฟไม่มีช่วงที่เป็นเส้นตรงเลย จากรูปจะได้ว่า

E_c = initial modulus = $\tan\theta_1$

E_c = tangent modulus = $\tan\theta_1$ และ $\tan\theta_3$

E_c = secant modulus = $\tan\theta_2$

สำหรับ secant modulus ใช้ค่าหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 หรือ 0.3 %

มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

$$E_c = 4270 w^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad \text{ksc} \tag{1.1}$$

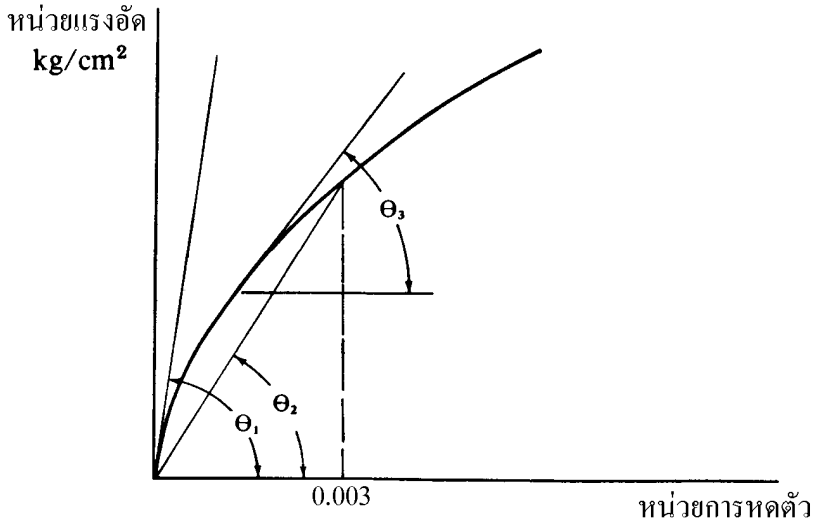
เมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, ksc

w = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด, T/m^3

f_c' = กำลังประลัยของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน, ksc

คอนกรีตที่ใช้ในประเทศไทย มีหินปูนเป็นส่วนผสมหยาบ จะมีหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด ประมาณ 2.323 T/m^3 เมื่อแทนค่าจะได้

$$E_c = 4270 \times 2.323^{1.5} \sqrt{f_c'} = 15{,}118\sqrt{f_c'} = 15{,}100\sqrt{f_c'} \tag{1.2}$$



รูปที่ 1.4 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

การคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

แม้ว่าการออกแบบส่วนผสมจะเป็นส่วนของวิชาคอนกรีตเทคโนโลยี แต่ก็ต้องมีการใช้งานอยู่บ่อยครั้ง ผู้เขียนจึงนำวิธีการที่ CPAC กำหนดไว้มานำเสนอซ้ำเพื่อให้สมบูรณ์ไม่ต้องวิ่งหาหลายๆ เล่ม

การออกแบบส่วนผสมต้องเผื่อกำลังประลัยให้มากกว่ากำลังประลัยระบุในแบบตามดังสมการต่อไปนี้

$$f_{cr} = f_c^{'} + ks \qquad (1.3)$$

เมื่อ f_{cr} = Target mean strength หรือกำลังอัดประลัยที่เผื่อแล้ว, ksc

$f_c^{'}$ = กำลังอัดประลัยที่ต้องการหรือที่กำหนดในแบบ, ksc

k = ค่าคงที่

s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่าหรือมากกว่า

ในการหาค่า k ให้ใช้ค่าตามตารางที่ 1.3 ถ้าให้ร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่าน้อย ค่า k จะยิ่งมาก ค่าที่แนะนำคือ 5 % ที่จะได้ค่า k = 1.645

ค่าความยุบตัวของคอนกรีตจะทำให้ความข้นเหลวเหมาะสมที่จะไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ไม่ใช่ค่าที่ทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงหรือต่ำ เว้นแต่แต่ค่าความยุบตัวน้อยเกินไปที่หมายถึงคอนกรีตแห้งจนเกิดโพรงหรือเนื้อคอนกรีตแห้งจนกำลังตก ค่าความยุบตัวจะขึ้นกับปริมาณน้ำ หากมากจะยุบตัวมาก น้อยก็ยุบตัวน้อย ค่าความยุบตัวที่เหมาะสมของโครงสร้างชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.3 ค่าคงที่ k สำหรับการเผื่อกำลังประลัยในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ค่าร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่า f_c'	ค่า k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.960
2	2.054
1	2.326
0	3.000

ตารางที่ 1.4 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตสำหรับการก่อสร้างประเภทต่างๆ

ประเภทของงาน	ค่าความยุบตัว, ซม	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

ตารางที่ 1.5 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ

ขนาดความหนาของโครงสร้าง ซม	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คาน ผนัง และเสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีตรับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม	นิ้ว	มม	นิ้ว	มม	นิ้ว	มม
5.0-15.0	$\frac{1}{2}-\frac{3}{4}$	12.5-20	$\frac{3}{4}$	20	$\frac{3}{4}-1$	20-25	$\frac{3}{4}-1\frac{1}{2}$	20-40
15.0-30.0	$\frac{3}{4}-1\frac{1}{2}$	20-40	$1\frac{1}{2}$	40	$1\frac{1}{2}$	40	$1\frac{1}{2}-3$	40-75
30.0-75.0	$1\frac{1}{2}-3$	40-75	3	75	$1\frac{1}{2}-3$	40-70	3	75
มากกว่า 75.0	$1\frac{1}{2}-3$	40-75	6	150	$1\frac{1}{2}-3$	40-75	3-6	75-150

ตารางที่ 1.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ
คอนกรีตที่ไม่มีสารกักกระจายฟองอากาศ

ค่าความยุบตัว	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม^3 สำหรับวัสดุผสมขนาดต่างๆ							
ซม	$\frac{3}{8}$ นิ้ว	$\frac{1}{2}$ นิ้ว	$\frac{3}{4}$ นิ้ว	1 นิ้ว	$1\frac{1}{2}$ นิ้ว	2 นิ้ว	3 นิ้ว	6 นิ้ว
	10 มม	12.5 มม	20 มม	25 มม	40 มม	50 มม	75 มม	150 มม
3-5	205	200	185	180	160	155	145	125
8-10	225	215	200	195	175	170	160	140
15-18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณฟองอากาศ								
(%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

ตารางที่ 1.7 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ
คอนกรีตที่มีสารกักกระจายฟองอากาศ

ค่าความยุบตัว	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม^3 สำหรับวัสดุผสมขนาดต่างๆ							
ซม	$\frac{3}{8}$ นิ้ว	$\frac{1}{2}$ นิ้ว	$\frac{3}{4}$ นิ้ว	1 นิ้ว	$1\frac{1}{2}$ นิ้ว	2 นิ้ว	3 นิ้ว	6 นิ้ว
	10 มม	12.5 มม	20 มม	25 มม	40 มม	50 มม	75 มม	150 มม
3-5	180	175	165	160	145	140	135	120
8-10	200	190	180	175	160	155	150	135
15-18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณฟองอากาศ								
(%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ 1.8 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้ สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลา หรือมีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำสลับกันบ่อยๆ (เฉพาะคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำทะเล หรือสัมผัสกับซัลเฟต
โครงสร้างบางๆ ที่มีเหล็กหุ้มบางกว่า 3 ซม	0.45	0.40*
โครงสร้างอื่นๆทั้งหมด	0.50	0.45*

* ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต อาจเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นี้ได้อีก 0.05

ตารางที่ 1.9 อัตราส่วนน้ำต่อซิเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน, ksc	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ใช้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม สูง 30 ซม ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20%

ตารางที่ 1.10 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดโตสุดของหิน		ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่างๆ กัน			
นิ้ว	มิลลิเมตร	2.40	2.60	2.80	3.00
$\frac{3}{8}$	10	0.50	0.48	0.46	0.44
$\frac{1}{2}$	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
$\frac{3}{4}$	20	0.66	0.64	0.62	0.60
1	25	0.71	0.69	0.67	0.65
$1\frac{1}{2}$	40	0.76	0.74	0.72	0.70
2	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3	75	0.81	0.79	0.77	0.75
6	150	0.87	0.85	0.83	0.81

หมายเหตุ ค่าที่กำหนดให้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆ ไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1.11 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ

ขนาดโตสุดของหิน		หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต, kg/m^3	
นิ้ว	มิลลิเมตร	คอนกรีตที่ไม่ใช้สารกักกระจายฟองอากาศ	คอนกรีตที่ใช้สารกักกระจายฟองอากาศ
$\frac{3}{8}$	10	2285	2190
$\frac{1}{2}$	12.5	2315	2235
$\frac{3}{4}$	20	2355	2280
1	25	2375	2315
$1\frac{1}{2}$	40	2420	2355
2	50	2445	2375
3	75	2465	2400
6	150	2505	2435

ตัวอย่างที่ 1.1 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c^{'} = 210$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3"}{4}\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}^{'} = f_c^{'} + ks = 210 + 1.645 \times 30 = 259.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}^{'} = 259.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}^{'}} = \frac{1.152}{e^{0.0025 \times 259.35}} = \frac{1.152}{e^{0.648375}} = \frac{1.152}{1.912430603} = 0.6024$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.6024} = 332 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg/m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{332}{3.15 \times 1000} = 0.1054 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70 \times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1054 + 0.3674 + 0.02 = 0.6928 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.6928 = 0.3072 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.3072 \times 2.60 \times 1000 = 798.72 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 210$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	332	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	798.72	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2322.72	kg

ตัวอย่างที่ 1.2 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 240$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3}{4}"\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}' = f_c' + ks = 240 + 1.645 \times 30 = 289.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f'_{ci} = 289.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f'_{ci}} = \frac{1.152}{e^{0.0025\times 289.35}} = \frac{1.152}{e^{0.723375}} = \frac{1.152}{2.061378637} = 0.5588$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.5588} = 357.88 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg}/\text{m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{357.88}{3.15\times 1000} = 0.1136 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70\times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1136 + 0.3674 + 0.02 = 0.701 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.701 = 0.299 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.299 \times 2.60 \times 1000 = 777.4 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 240$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	358	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	777	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2327	kg

ตัวอย่างที่ 1.3 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 250$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3"}{4}\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}' = f_c' + ks = 250 + 1.645 \times 30 = 299.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}' = 299.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}'} = \frac{1.152}{e^{0.0025\times 299.35}} = \frac{1.152}{e^{0.748375}} = \frac{1.152}{2.113562685} = 0.545051257$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.545051257} = 366.94 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg/m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{366.94}{3.15 \times 1000} = 0.1165 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70 \times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1165 + 0.3674 + 0.02 = 0.7039 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.7039 = 0.2961 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.2961 \times 2.60 \times 1000 = 769.86 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 250$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	367	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	770	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2329	kg

ตัวอย่างที่ 1.4 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 280$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3"}{4}\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}^{'} = f_{c}^{'} + ks = 280 + 1.645 \times 30 = 329.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}^{'} = 329.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}^{'}} = \frac{1.152}{e^{0.0025\times 329.35}} = \frac{1.152}{e^{0.823375}} = \frac{1.152}{2.27817572} = 0.505667754$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.505667754} = 395.52 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg/m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{395.52}{3.15\times 1000} = 0.1256 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70\times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1256 + 0.3674 + 0.02 = 0.713 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.713 = 0.287 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.287 \times 2.60 \times 1000 = 746.2 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 280$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	396	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	746	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2334	kg

ตัวอย่างที่ 1.5 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 300$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3"}{4}\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}' = f_c' + ks = 300 + 1.645 \times 30 = 349.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}' = 349.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}'} = \frac{1.152}{e^{0.0025 \times 349.35}} = \frac{1.152}{e^{0.873375}} = \frac{1.152}{2.394980287} = 0.481006046$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.481006046} = 415.80 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg/m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{415.80}{3.15 \times 1000} = 0.132 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70 \times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.132 + 0.3674 + 0.02 = 0.7194 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.7194 = 0.2806 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.2806 \times 2.60 \times 1000 = 729.56 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 300$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	416	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	730	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2338	kg

ตัวอย่างที่ 1.6 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 320$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3"}{4}\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}^{'} = f_{c}^{'} + ks = 320 + 1.645 \times 30 = 369.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}^{'} = 369.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}^{'}} = \frac{1.152}{e^{0.0025\times 369.35}} = \frac{1.152}{e^{0.923375}} = \frac{1.152}{2.517773552} = 0.457547105$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.457547105} = 437.11 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg}/\text{m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{437.11}{3.15\times 1000} = 0.1388 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70\times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1388 + 0.3674 + 0.02 = 0.7262 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.7262 = 0.2738 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.2738 \times 2.60 \times 1000 = 711.88$ kg

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 320$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	437	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	712	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2341	kg

ตัวอย่างที่ 1.7 ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังขณะอายุ 28 วัน $f_c' = 350$ ksc ทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm โดยให้โอกาสที่ก้อนตัวอย่างก้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ได้ไม่เกิน 5% (k = 1.645) และ s = 30 ksc ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15 มวลรวมขนาดโตที่สุด 20 mm $\left(\frac{3}{4}"\right)$ มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึม 0.5% หน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (รวมช่องว่างระหว่างก้อน) 1600 kg/m^3 มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 ค่าการดูดซึม 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.80

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการใช้ผลิต (เผื่อความคลาดเคลื่อนแล้ว)

$$f_{ci}' = f_c' + ks = 350 + 1.645 \times 30 = 399.35 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะงานเป็น ฐานราก ตอม่อ และคาน ดังนั้นใช้ค่ายุบตัว (slump test) 10 cm

ขั้นตอนที่ 3 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm และค่าการยุบตัว 8-10 cm ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ต้องการปริมาณน้ำ 200 ลิตร หรือ 200 kg

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้องการกำลังคอนกรีตที่ใช้ผลิต $f_{ci}' = 399.35$ ksc และไม่มีการกระจายฟองอากาศ ต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ

$$\frac{W}{C} = 1.152e^{-0.0025f_{ci}'} = \frac{1.152}{e^{0.0025 \times 399.35}} = \frac{1.152}{e^{0.998375}} = \frac{1.152}{2.713868208} = 0.424486346$$

ขั้นตอนที่ 5 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{200}{0.424486346} = 471.16 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.80 และขนาดของหิน 20 mm จะได้ปริมาณของหินที่แห้งและอัดแน่น 0.62 m^3/m^3 ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหินคลุก 1600 kg/m^3

น้ำหนักของหินที่ใช้ $= 1600 \times 0.62 = 992 \text{ kg/m}^3$ ของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาตรของน้ำ $V_w = \frac{200}{1000} = 0.200 \text{ m}^3$

ปริมาตรของซีเมนต์ $V_C = \frac{471.16}{3.15 \times 1000} = 0.1496 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเนื้อหินตัน $V_{ca} = \frac{992}{2.70 \times 1000} = 0.3674 \text{ m}^3$

ปริมาตรของฟองอากาศ $V_{ab} = 0.02 \times 1.0 = 0.02 \text{ m}^3$

ปริมาตรรวมยกเว้นทราย $V_1 = 0.200 + 0.1496 + 0.3674 + 0.02 = 0.737 \text{ m}^3$

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $V_s = 1.0 - 0.7262 = 0.263 \text{ m}^3$

น้ำหนักของทรายแห้ง $W_s = 0.263 \times 2.60 \times 1000 = 683.8 \text{ kg}$

สรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกรณี $f_c' = 350$ ksc

ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง	471	kg
น้ำ	200	kg
หินขนาด 20 mm	992	kg
ทรายหยาบ FM 2.80	684	kg
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2347	kg

1.7 เหล็กเสริม

เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้เพียงโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) คือกำลังรับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีต $f_r = 2.0\sqrt{f_c'}$ ละใช้งานจริงเพียง $1.6\sqrt{f_c'}$ ดังนั้นส่วนใดที่ต้องการให้รับแรงดึงจึงต้องใช้เหล็กกล้าละมุนที่รับได้ดีทั้งแรงดึงและแรงอัดมารับแรงดึงแทนโดยถือว่าคอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลย (ที่จริงรับได้แต่น้อย) ขนาดความยาวมาตรฐาน 10.0 เมตร แต่ในยุโรปมีความยาวมาตรฐาน 13 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นอยู่กับชนิดเหล็กดังนี้

เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round bar : RB) ชนิด SR-24 มีกำลังคราก $f_y = 2400$ ksc มีขนาดจากเล็กที่สุด RB 6 mm ต่อไป RB 9 mm, RB 12 mm, RB 15 mm, RB 19 mm, RB 25 mm ปัจจุบันมีเฉพาะขนาด RB 6 mm, RB 9 mm, RB 12 mm ส่วนขนาดอื่นเลิกผลิต

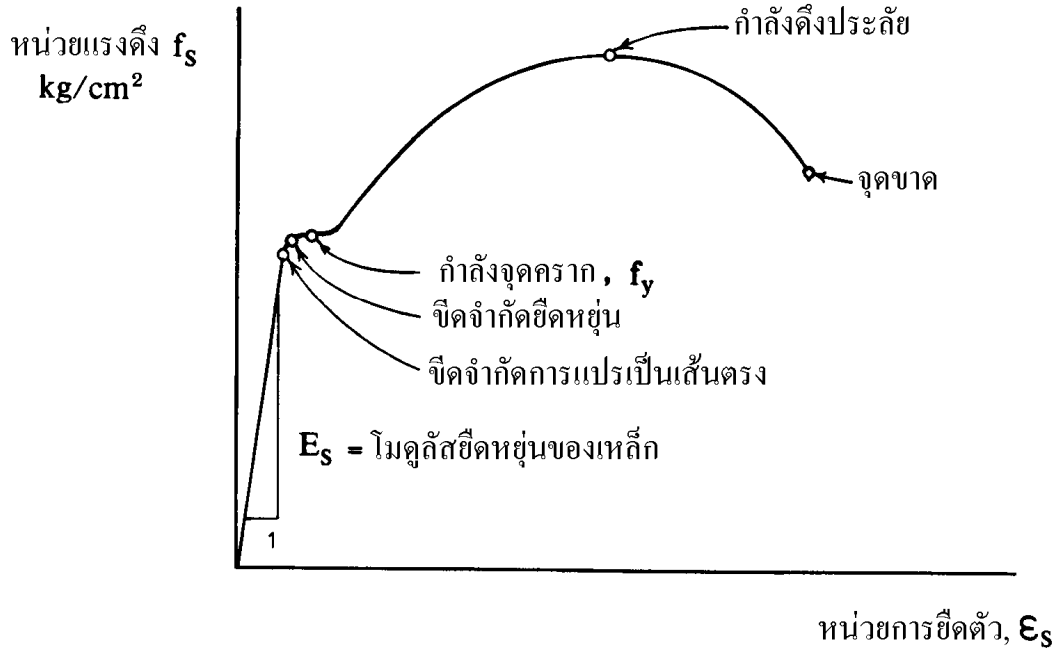
เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar : DB) **ชนิด SD-30** มีกำลังคราก $f_y = 3000$ ksc ขนาดเล็กที่สุด DB 10 mm ต่อไป DB 12 mm, DB 16 mm, DB 20 mm, DB 25 mm, DB 28 mm

เหล็กข้ออ้อยชนิด SD-40 มีกำลังคราก $f_y = 4000$ ksc ขนาดเล็กที่สุด DB 12 mm, DB 16 mm, DB 20 mm, DB 25 mm, DB 28 mm

เหล็กข้ออ้อยชนิด SD-50 มีกำลังคราก $f_y = 5000$ ksc ขนาดเล็กที่สุด DB 12 mm, DB 16 mm, DB 20 mm, DB 25 mm, DB 28 mm, DB 32 mm, DB 36 mm ในประเทศไทยไม่ค่อยพบขนาด DB 32 mm ขึ้นไป

เนื่องจากมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ให้เหล็กเสริมคอนกรีตมีกำลังครากไม่เกิน 5600 ksc เพื่อให้กรณีรับน้ำหนักจนวิบัตินั้นเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องครากก่อนที่คอนกรีตจะแตกที่หน่วยการหดตัว 0.003

กำลังดึงประลัยของเหล็กผิวเรียบ $f_u \geq 4100$ ksc ส่วนเหล็กข้ออ้อย $f_u \geq 4900$ ksc



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กกล้าละมุน

1.8 สัญลักษณ์แทนเหล็กเสริม

เหล็กเส้นกลมเรียบ (RB = Round Bar) อาจจะใช้สัญลักษณ์ ϕ แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่อาจจะยุ่งยากในการเขียนแบบ ปัจจุบันใช้อักษร RB ตามด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วตามด้วยหน่วย เช่น RB 6 mm หมายถึงเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

เหล็กข้ออ้อย (DB = Deformed Bar) ปัจจุบันนี้ใช้ DB ตามด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วตามด้วยหน่วย เช่น DB 20 mm หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในค่ายุโรปเช่น PROKON ใช้อักษร Y แทนเหล็กข้ออ้อย เช่น Y16 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

6-RB 12 mm หมายถึงให้ใช้เหล็กเส้นกลมเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จัดตามรูปหรือเรียงห่างเท่าๆ กัน

#-RB 9 mm @ 200 mm หรือ RB 9 mm @ 200 mm # หมายถึง ใช้เหล็กผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 มิลลิเมตร วางเป็นตะแกรงตั้งฉากกัน โดยแต่ละทิศทางระยะเรียง 200 มิลลิเมตร

2-ป-RB 9 mm @ 150 mm หรือ 2-Stirrup RB 9 mm @ 150 mm หมายถึง ใช้เหล็กลูกตั้ง (บางทีภาษาช่างเรียกว่าเหล็กปลอก) แต่ละชุดมี 2 วง ขนาดเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ระยะเรียง 150 มิลลิเมตร

10-DB 20 mm หมายถึง ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร จำนวน 10 เส้น จัดตามรูปหรือเรียงห่างเท่าๆ กัน

#-18 DB 25 mm หรือ 18-DB 25 mm # หมายถึง ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรวางเป็นตะแกรงตั้งฉากกัน แต่ละทิศทางใช้ 18 เส้น

#-DB 10 mm @ 250 mm ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร วางเป็นตะแกรงตั้งฉากกัน ระยะเรียงแต่ละทิศทาง 250 มิลลิเมตร

2

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

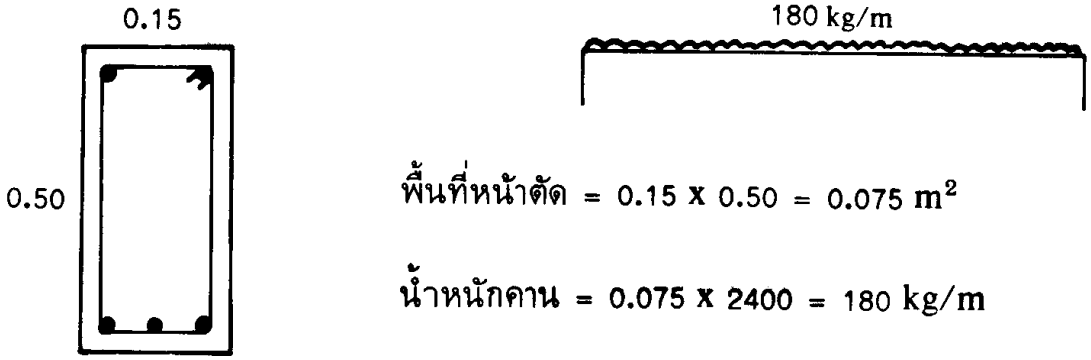
การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะเริ่มจากออกแบบพื้น บันได หลังคา แล้วถ่ายน้ำหนักลงคาน วิเคราะห์และออกแบบคาน ถ่ายน้ำหนักลงบนเสา ออกแบบเสา ถ่ายน้ำหนักลงบนเสาตอม่อ ออกแบบตอม่อและฐานราก แต่การออกแบบคานเป็นหลักการพื้นฐานที่จะนำไปใช้ในกรณีอื่นๆ ด้วย ดังนั้นจึงนำมากล่าวในที่นี้ก่อน

สิ่งที่ประสบปัญหาในระหว่างเรียนและทำงานใหม่ๆ คือการคำนวณน้ำหนักลงบนคานอย่างไร เมื่อเริ่มต้นไม่ได้ก็ออกแบบไม่ได้ จำเป็นต้องสอบถามผู้รู้ทำให้เสียเวลา จึงรวบรวมวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 น้ำหนักบรรทุกบนคาน

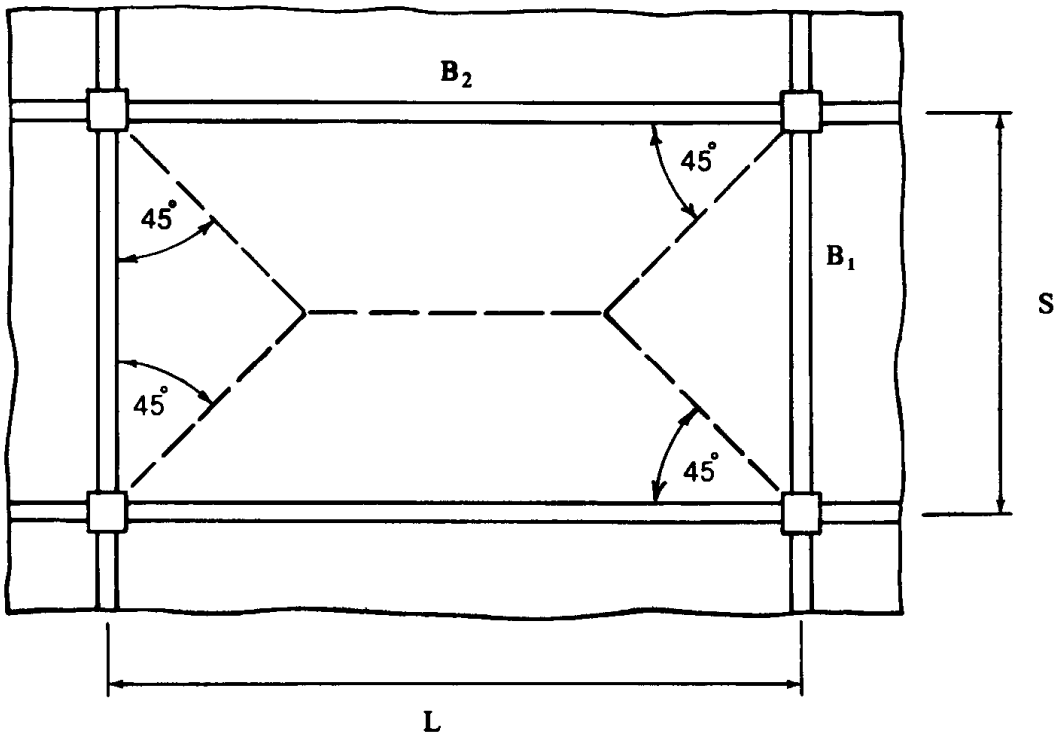
ในกรณีของคานอาจจะรับน้ำหนักเป็นจุดในหน่วย kg หรือ T จากปลายคานที่มาฝากหรือจากเสาที่มาฝาก ส่วนน้ำหนักแผ่นกระจายตามยาวในหน่วย kg/m หรือ T/m จากน้ำหนักตัวคานเอง น้ำหนักพื้นหรือบันได และน้ำหนักผนัง

น้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 2400 kg/m^3 ดังนั้นเมื่อประมาณขนาดหน้าตัดของคานได้แล้ว น้ำหนักแผ่เนื่องจากน้ำหนักของคานในหน่วย kg/m คือ 2400 คูณเนื้อที่หน้าตัดของคานเป็นตารางเมตร หรือ 2400bh ทั้ง b และ h ต้องมีหน่วยเป็นเมตร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การคิดน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การกระจายน้ำหนักจากแผ่นพื้นสองทาง พิจารณารูปที่ 2.2 เป็นแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง S ยาว L ถ้าให้น้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอจนแตกแล้วแนวแตกจะประมาณตามแนวเส้นประซึ่งเกิดจากลากเส้นทำมุม 45 องศากับขอบจากมุมทั้งสี่ไปตัดกับเส้นกึ่งกลางที่ขนานกับด้านยาว คาน B1 จะรับน้ำหนักจากพื้นเป็นรูปสามเหลี่ยม และคาน B2 จะรับน้ำหนักจากแผ่นพื้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 2.1 การกระจายน้ำหนักจากแผ่นพื้นลงคาน

มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดให้การกระจายน้ำหนักจากพื้นลงคานให้จำลองเป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอตลอดความยาว ดังนี้

น้ำหนักจากพื้นลงบนคานด้านสั้น $$w_S = \frac{wS}{3} \qquad (2.1ก)$$

น้ำหนักจากพื้นลงบนคานด้านยาว $$w_L = \frac{wS}{3} \cdot \frac{3 - m^2}{2} \qquad (2.1ข)$$

เมื่อ w = น้ำหนักทั้งหมดของแผ่นพื้น kg/m^2

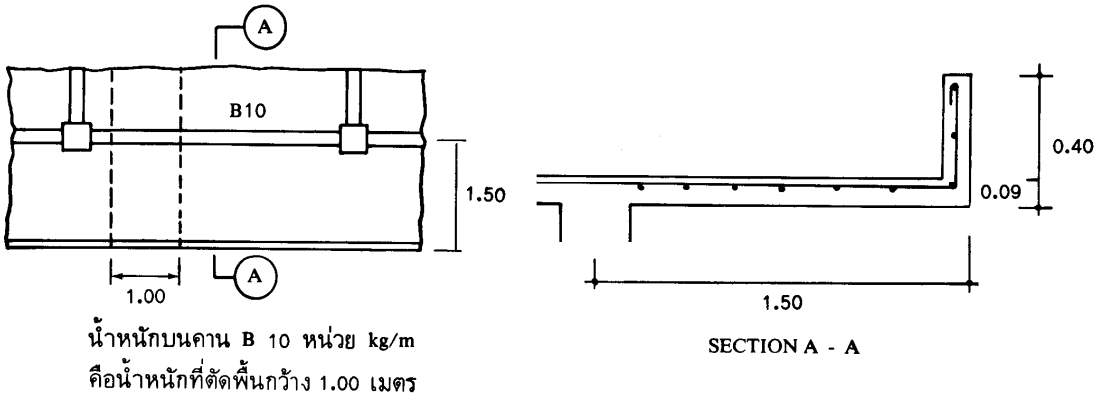
$m = \frac{S}{L}$ = อัตราส่วนความยาวขอบสั้นต่อความยาวขอบยาว โดย $1 \geq m \geq 0.5$

S = ความยาวขอบสั้นของพื้น, m

L = ความยาวขอบยาวของพื้น, m

น้ำหนักจากคานด้านสั้นถ่ายลงเสาที่ปลายทั้งสองข้างเพียง $\frac{wS^2}{8}$ และคานด้านยาวแบ่งลงบนเสา $\frac{1}{4}wS^2\left(\frac{2}{m}-1\right)$ แต่ถ้าคิดจากน้ำหนักแผ่กระจายในสมการ (2.1) จะได้จากคานสั้น $\frac{wS^2}{6}$ และจากคานยาว $\frac{1}{12}wSL\left(3-m^2\right)$ ซึ่งมากกว่าหรือต้องน้ำหนักในการคำนวณสูงขึ้น จึงอยู่ในด้านที่ปลอดภัยมากขึ้น

ข้อควรสังเกตประการหนึ่งคือ ถ้า $m < 0.5$ เรียกว่าแผ่นพื้นทางเดียว การกระจายน้ำหนักลงบนด้านสั้นยังคงเป็น $\frac{wS}{3}$ แต่ด้านยาวควรจะใช้ $\frac{wS}{2}$ แต่ในกรณีแผ่นพื้นยื่นในรูปที่ 2.2 ต้องใช้น้ำหนักทั้งหมดของแผ่นพื้นลงบนคาน



รูปที่ 2.2 การกระจายน้ำหนักจากแผ่นพื้นยื่นลงบนคาน

การกระจายน้ำหนักจากผนังหรือกำแพงลงบนคาน ใช้สมการ

$$w = w_1 h \qquad (2.2)$$

เมื่อ w = น้ำหนักลงบนคาน kg/m

w_1 = หน่วยน้ำหนักของผนังหรือกำแพง kg/m^2

h = ความสูงของกำแพง m

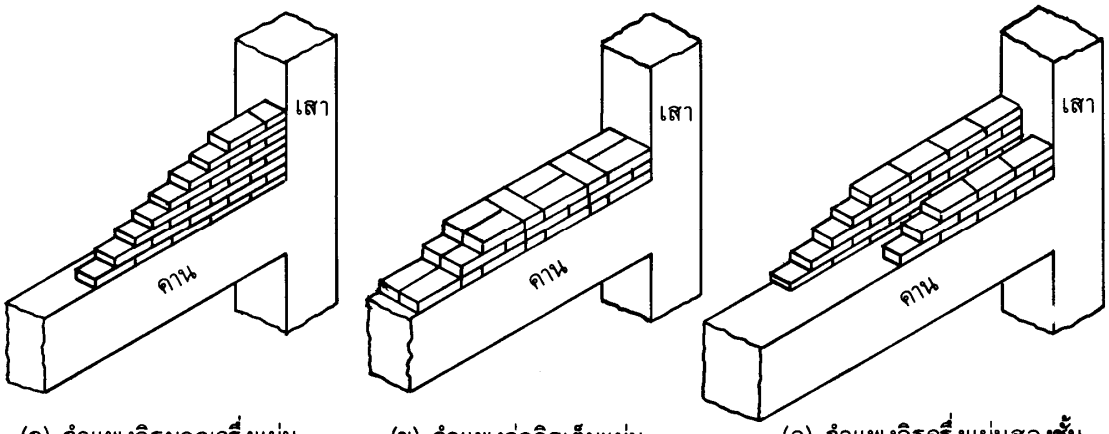
ค่า w_1 หาได้จากตารางที่ 2.1 เป็นน้ำหนักของผนังกำแพงต่อหน่วยพื้นที่ของผนังกำแพง และค่า h ให้ดูจากรูปแปลนอาคาร (อ่านสัญลักษณ์ว่าเป็นกำแพงอะไร) แล้วดูจากรูปด้านหรือรูปตัด ใช้ไม้สเกลวัดความสูงของกำแพงนั้นหรือดูจากตัวเลขความสูงระหว่างชั้นแล้วลบด้วยความลึกคานด้านบน

ผู้อ่านบางท่านอาจจะสงสัยเกี่ยวกับการก่ออิฐครึ่งแผ่นหรือเต็มแผ่นกันอย่างไร ขอให้ดูจากรูปที่ 2.3 จะเข้าใจได้ชัดเจน และขอเพิ่มเติมอีกประการหนึ่งคือ อิฐมอญก่อครึ่งแผ่นและฉาบปูนทั้งสองด้านจะได้กำแพงหนา 8-10 เซนติเมตร และถ้าก่อเต็มแผ่นฉาบปูนจะได้กำแพงหนา 15-18 เซนติเมตร ถ้าก่อผนังทึบตลอดใช้เป็นกำแพงกันไฟของตึกแถว ซึ่งทุกๆ 4 คูหาต้องมีกำแพงกันไฟ 1 แผงตลอด แต่บางแห่งจะทำเป็น

กำแพงก่ออิฐครึ่งแผ่นสองชั้น ระหว่างกำแพงเป็นช่องอากาศ หรือใส่โพลีสไตรีนโฟมเป็นฉนวนความร้อน เพื่อป้องกันความร้อนจากแสงแดดและประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศในอาคารสำนักงาน แต่วิธีนี้ก็จะทำให้คานใหญ่ขึ้นเพราะน้ำหนักมากขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักต่อพื้นที่ของกำแพงชนิดต่างๆ

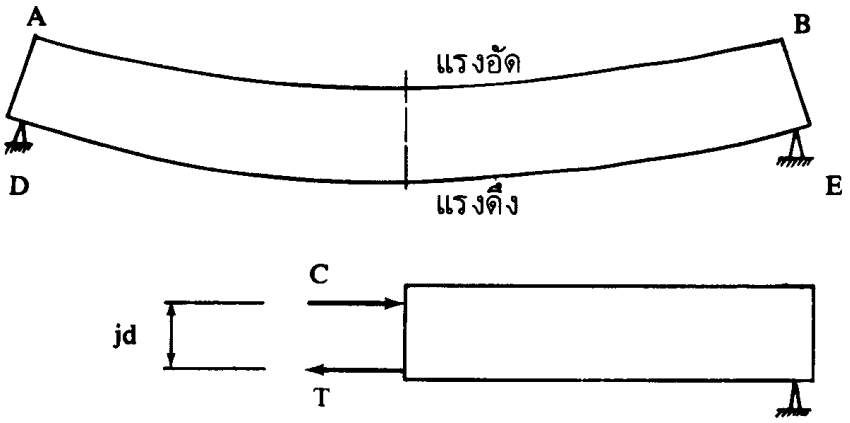
ชนิดผนัง กำแพง	$w_1, kg/m^2$
ผนังอิฐมอญก่อครึ่งแผ่นฉาบปูน	180
ผนังอิฐมอญก่อเต็มแผ่นฉาบปูน	360
ผนังคอนกรีตบล็อกหนา 7 ซม	120
ผนังคอนกรีตบล็อกหนา 9 ซม	160
ฝาไม้ ไม้อัด รวมเคร่า	12-30
ฝาเซลโลกรีตรวมเคร่า หรือแกนฟางอัด	30
ดินซีเมนต์ขนาดเท่าอิฐบล็อก แต่ตันทั้งแท่ง	170
ผนังอิฐ บ.ป.ก. (บางปลากด) ก่อครึ่งแผ่น	220
ผนังอิฐ บ.ป.ก. (บางปลากด) ก่อเต็มแผ่น	440



(ก) กำแพงอิฐมอญครึ่งแผ่น (ข) กำแพงก่ออิฐเต็มแผ่น (ค) กำแพงอิฐครึ่งแผ่นสองชั้น

รูปที่ 2.3 การก่ออิฐทำกำแพงแบบต่างๆ

2.2 การรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



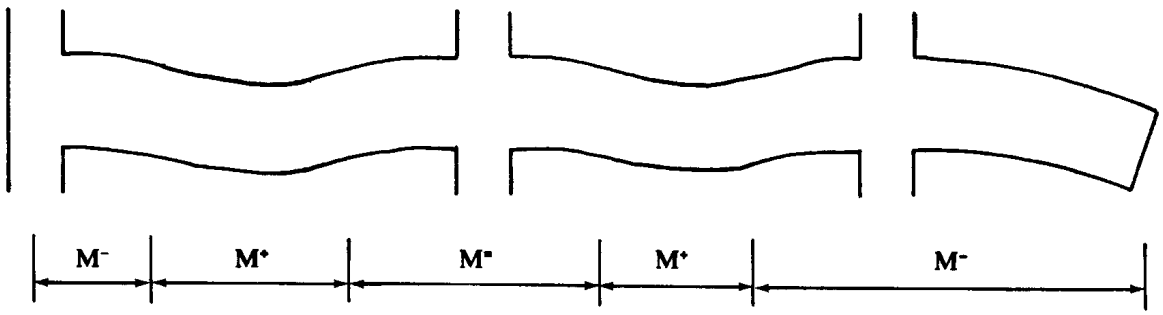
รูปที่ 2.4 ลักษณะโมเมนต์ดัดบวก

พิจารณารูปที่ 2.4 คานยาว L วางบนหมอนสองตัวที่ปลายทั้งสองข้าง น้ำหนักบรรทุกแผ่ w กระจายเต็มความยาว (ไม่ได้แสดงเอาไว้) คานจะโก่งงอลง ขอบ AB บนหลังคานจะหดสั้นลงและขอบ DE ที่ท้องคานจะยืดออก การที่ AB หดสั้นลงแสดงว่ามีแรงกดหรือแรงอัด และ DE ที่ยืดออกแสดงว่ามีแรงดึงเกิดขึ้น เมื่อตัดคานมาดูจะมีแรงดึง T จากเหล็กเสริมรับแรงดึง และแรงอัด C จากคอนกรีต โดย T = C ห่างกัน jd ประกอบเป็นโมเมนต์ดัดบวก รูปร่างการโก่งจะเหมือนกับกระทะวางหงายแล้วมองด้านข้าง

โมเมนต์ดัดบวก = โมเมนต์ที่ทำให้ขอบบนเกิดแรงอัดและขอบล่างเกิดแรงดึง

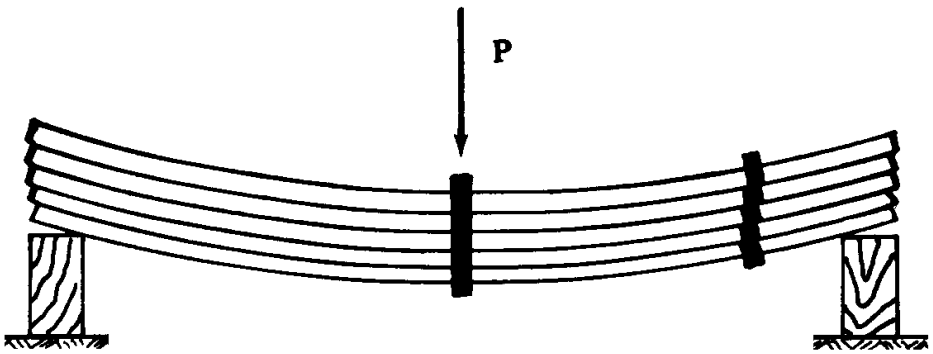
รูปที่ 2.5 เป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงละมีคานยื่นด้วย ลักษณะการโก่งงอของคานดังรูปที่แสดงเกินจริง (Exaggerate) ส่วนยื่นจะมีลักษณะกระทะคว่ำ ด้านบนรับแรงดึง ด้านล่างรับแรงอัด บริเวณหัวเสาจะคล้ายกับส่วนยื่นคือเหมือนกระทะคว่ำ เป็นโมเมนต์ลบ แต่กลางช่วงคานจะเป็นแบบกระทะหงายจึงเป็นโมเมนต์บวก

โมเมนต์ดัดลบ = โมเมนต์ที่ทำให้ขอบบนเป็นแรงดึงและขอบล่างเป็นแรงอัด



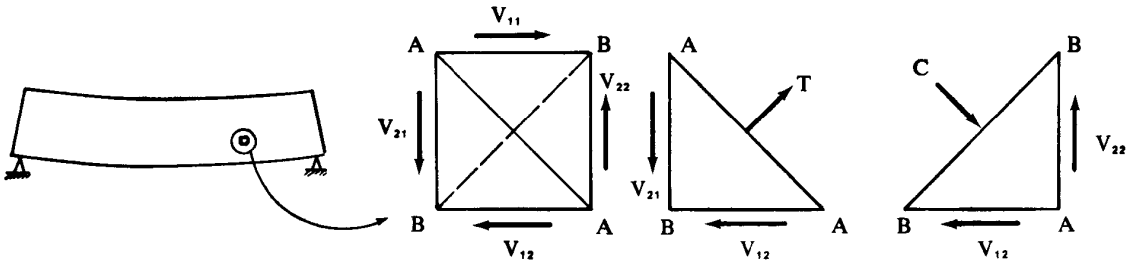
รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดโมเมนต์ดัดบวกและลบในคานต่อเนื่องและคานยื่น

ในรูปที่ 2.6 เอาแผ่นไม้กระดานหลายๆ แผ่นวางซ้อนกันบนสันไม้ที่ปลายทั้งสอง โดยเริ่มต้นให้ปลายไม้ยาวเท่าๆ กัน เมื่อใช้น้ำหนักแผ่ w (ไม่ได้แสดงเอาไว้) กดลงบนแผ่นไม้จนโก่งลง สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงจะพบว่าแผ่นไม้ที่ซ้อนกันอยู่จะเลื่อนจากกัน บริเวณกลางช่วงไม่มีการเลื่อน แต่บริเวณปลายทั้งสองจะเลื่อนมาก ถ้าเจาะรูแผ่นไม้แล้วเอาไม้เนื้ออ่อนมากๆ เช่น ปอกระเจาสอดไว้ในรูนั้น การเลื่อนของแผ่นไม้ที่ซ้อนกันอยู่จะเฉือนแกนปอกระเจาให้ขาดจากกัน ลักษณะการเฉือนแบบนี้เรียกว่า **การเฉือนทางนอน** (horizontal shear) ซึ่งเป็นผลมาจากโมเมนต์ดัดในคานทั้งชนิดโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบ ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีการเสริมเหล็กปลอก (หรือเหล็กลูกตั้ง) เพื่อรับแรงเฉือนชนิดนี้



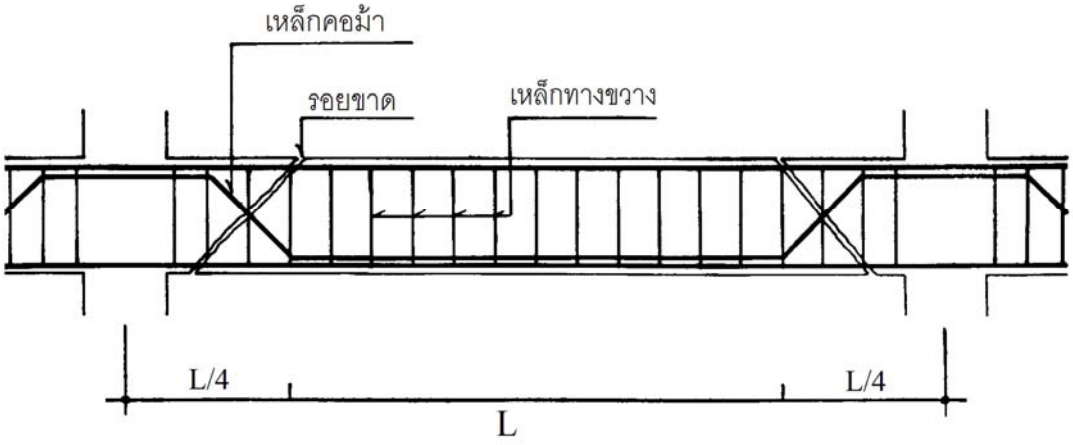
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดแรงเฉือนทางนอนจากโมเมนต์ดัด

ในรูปที่ 2.7 ถ้าเอาแท่งไม้ส่วนสั้นๆ เจาะรูร้อยเข้าด้วยกันด้วยแกนปอกระเจา ใช้มือหรือประแจหนีบไว้จับให้แน่นวางบนแท่นไม้ ความเสียดทานระหว่างผิวแท่งไม้จะทำให้แท่งไม้ไม่หลุดออกมา แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้มากพอ แท่งไม่จะเฉือนแกนปอจนขาด ลักษณะการเฉือนอยู่ในแนวดิ่ง เรียกว่า **แรงเฉือนทางดิ่ง** (vertical shear)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของแรงเฉือนที่ทำให้เกิดแรงดึงทแยง T และแรงอัดทแยง C

ในรูปที่ 2.8 เป็นผลรวมรูปที่ 2.6 กับรูปที่ 2.7 คานกำลังรับน้ำหนัก w แผ่กระจายเต็มคานทำให้เกิดโมเมนต์บวก เกิดแรงเฉือนทางนอนและแรงเฉือนทางดิ่งพร้อมๆ กัน ตัดคานเป็นแท่งสี่เหลี่ยมเล็กๆ มาพิจารณา แรงเฉือนที่กระทำบนแท่งสี่เหลี่ยมนี้จะมีแรงเฉือนทางนอน V_{11} และ V_{12} กับแรงเฉือนทางดิ่ง V_{21} และ V_{22} แรงทั้งหมดจะอยู่ในสภาพสมดุลจะได้ $V_{11} = V_{12} = V_{21} = V_{22}$ ต่อไปตัดตามแนวทแยง 45o เป็นแท่งปริซึมตามแนว A-A และ B-B นำมาพิจารณาจะเห็นว่าตัดแนว A-A ทำให้เกิดแรงดึงและตัดแนว B-B ทำให้เกิดแรงอัดในแนวตั้งฉากกับรอยตัด



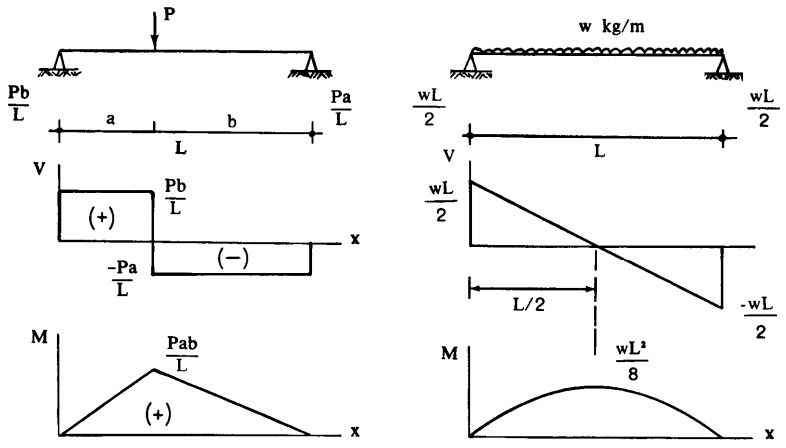
รูปที่ 2.9 ลักษณะการขาดของคานเนื่องจากแรงเฉือน การเสริมเหล็กคอม้า และเหล็กทางขวาง

รูปที่ 2.9 เป็นแนวโน้มที่คานจะขาดจากที่รองรับ เนื่องจากแรงเฉือนทำให้เกิดแรงดึงทแยงและคอนกรีตก็รับแรงดึงได้ไม่ดีด้วย จุดที่มีโอกาสขาดมากจะห่างจากแกนเสาประมาณ ¼ ของระยะระหว่างแกนเสา จึงอาจจะงอเหล็กคอม้าขึ้นมาช่วยรับและส่งให้เป็นเหล็กรับแรงดึงบริเวณหลังคาน ในกรณีที่ไม่มีการงอคอม้าก็จะอาศัยเหล็กทางขวางเป็นผู้หิ้วแขวนไม่ให้คานขาดออกไป

2.3 การหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในคาน

1. คานช่วงเดียววางบนฐานคมมีด พบบ่อยในกรณีคานฝากช่วงเดียว ลักษณะแผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์ดัดดังรูปที่ 2.10

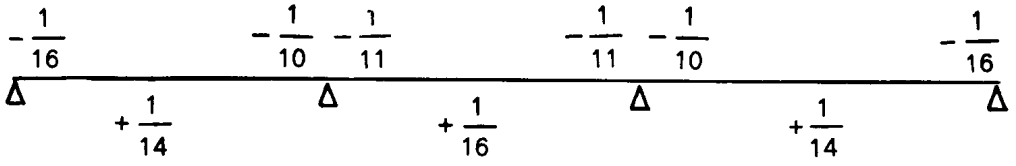
สังเกตรูปที่ 2.10(ก) กรณีที่พบบ่อยคือ $a = b = \frac{L}{2}$ จะได้ $V = \frac{P}{2}$ ทั้งสองปลาย และโมเมนต์ดัดสูงสุดกลางคานเป็น $\frac{PL}{4}$ และในรูปที่ 2.10(ข) แรงเฉือน $V = \frac{wL}{2}$ ที่ปลายคาน และโมเมนต์ดัดสูงสุดที่กลางช่วง $M = \frac{wL^2}{8}$ จะพบมากที่สุด



(ก) แรงเป็นจุด (ข) แรงกระจายสม่ำเสมอ

รูปที่ 2.10 แผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดบนคานชนิด simple beam

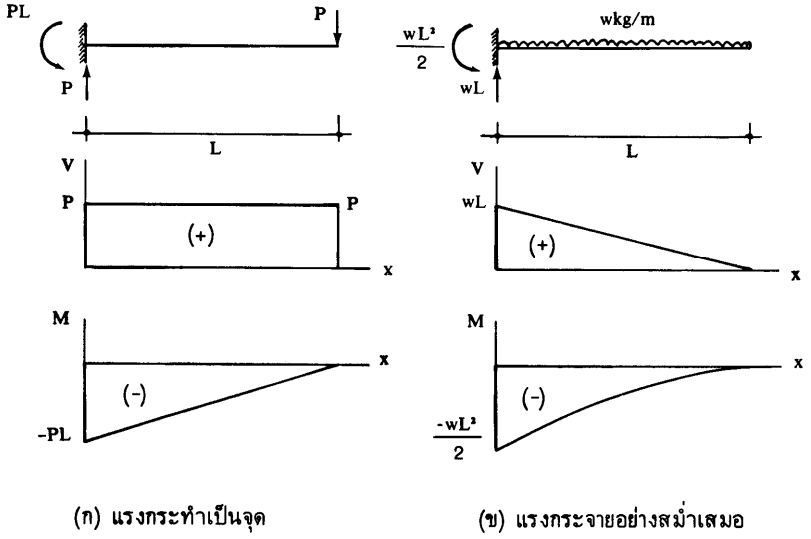
2. คานต่อเนื่องหลายช่วง การวิเคราะห์หาโมเมนต์อาจจะใช้ Three-moment method หรือ Slope-deflection method หรือ Moment distribution method หรือใช้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ตามคู่มือวิศวกรโยธา หรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ Finite-element method ในขั้นแรกจะยกคู่มือของ ว.ส.ท. มาอธิบายให้ดู รูปที่ 2.11 เป็นสัมประสิทธิ์ที่ใช้คูณหน้า wL2 สำหรับน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ w ค่าสัมประสิทธิ์จะมีเครื่องหมายบอกชนิดโมเมนต์ว่าเป็นบวกหรือเป็นลบ และเขียนบนด้านของคานที่เกิดแรงดึงในผิวของคาน ข้อควรสังเกตก็คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ลบจะมากกว่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บวก และค่าที่มากที่สุดคือ $-\frac{1}{11}$ แต่ในการออกแบบทั่วๆ ไปผู้เขียนแนะนำให้ใช้ $\pm\frac{1}{9}$ ทั้งโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบ โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบจึงเป็น $\frac{wL^2}{9}$ ค่าโมเมนต์สมดุลควรจะประมาณ $\frac{2}{3}$ ของโมเมนต์สูงสุดนี้ จึงจะได้คานที่แข็งแรงและประหยัด



รูปที่ 2.11 สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของคานต่อเนื่อง

3. คานยื่น ขอให้พิจารณาในรูปที่ 2.12 ลักษณะแผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ อาจจะผสมกันทั้งแบบ (ก) และ (ข)

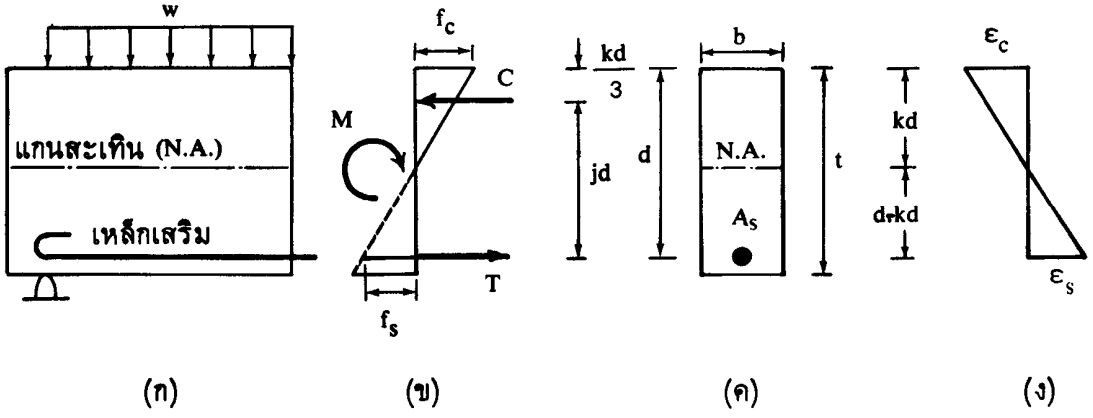
ในกรณีอื่นๆ ผู้อ่านอาจจะใช้ความรู้ทางกลศาสตร์วิศวกรรม กำลังวัสดุ ทฤษฎีโครงสร้างหรือการวิเคราะห์โครงสร้างมาคำนวณหาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคานก็ได้ แต่เฉพาะที่กล่าวมา 3 แบบนั้นก็เพียงพอสำหรับการคำนวณออกแบบทั่วๆ ไปแล้ว



รูปที่ 2.12 แผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์ดัดของคานยื่น

2.4 การรับโมเมนต์ดัดในคานตามทฤษฎียืดหยุ่น

คานที่รับโมเมนต์ดัดตามทฤษฎียืดหยุ่น หน้าตัดของคานก่อนรับโมเมนต์และภายหลังจากรับโมเมนต์แล้วยังคงเป็นระนาบไม่บิดงอ แสดงว่าหน่วยการยืดหดในคอนกรีตและเหล็กแปรเป็นเส้นตรง ให้คอนกรีตเป็นตัวรับแรงอัดบริเวณที่เป็นแรงดึงถือว่าคอนกรีตฉีกยกจนรับแรงดึงไม่ได้ จึงต้องให้เหล็กเสริมเป็นผู้รับแทน



รูปที่ 2.13 พฤติกรรมในการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปที่ 2.13(ก) เป็นซีกซ้ายของคานที่ตัดมาโดยน้ำหนัก w ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด M กระทำบนหน้าตัดคาน รูปที่ 2.13(ข) เป็นด้านข้างของหน้าตัดซึ่งกำลังสร้างโมเมนต์คู่ควบ เพื่อต้านกับ M แรงอัด C เกิดในเนื้อคอนกรีตซึ่งหน่วยแรงแปรเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ผิวบนมีค่า f_c และเป็น 0 ที่แกนสะเทิน (N.A. = Neutral Axis) ส่วน T เป็นแรงดึงในเหล็กรับแรงดึง จากสมการสมดุลของแรงพบว่า T = C และห่างกันเป็นระยะ jd เมื่อ d เป็นระยะจากจุดเซนทรอยด์ของกลุ่มเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงผิวที่รับหน่วยแรงอัดสูงสุด

ถ้าหน้าตัดคานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง b ลึก t ดังรูปที่ 2.13(ค) แล้ว การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเป็นรูปลิ่มทำให้แรงลัพธ์ C ซึ่งต้องผ่านจุดเซนทรอยด์ของลิ่ม ก็จะผ่านจุดเซนทรอยด์ของสามเหลี่ยมฐาน f_c ในรูปที่ 2.13(ข) ด้วย ดังนั้นแรง C จึงห่างจากผิวบนเป็นระยะ $\frac{kd}{3}$ เมื่อ kd เป็นระยะจากแกนสะเทินถึงผิวบนรับแรงอัด ค่า k จึงเรียกพารามิเตอร์แกนสะเทิน แขนโมเมนต์คู่ควบคือ $jd = d - \frac{kd}{3}$ จะได้โมเมนต์คูควบจากแรงอัด C หรือแรงดึง T ดังนี้

$$M = Cjd = Tjd$$

ต่อไปพิจารณารูปที่ 2.13(ง) แสดงหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต ε_c และหน่วยการยืดตัวของเหล็กรับแรงดึง ε_s ใช้ความรู้เรื่องกำลังวัสดุจะได้หน่วยแรงดึงของเหล็ก $f_s = E_s\varepsilon_s$ และหน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีต $f_c = E_c\varepsilon_c$ เมื่อ $E_s = 2{,}040{,}000$ ksc เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก ละ $E_c = 4270w^{1.5}\sqrt{f_c'} = 15{,}100\sqrt{f_c'}$ เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากรูปสามเหลี่ยมคล้ายในรูปที่ 2.13(ง) พบว่า

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{f_c}{f_s}\cdot\frac{E_s}{E_c} = \frac{nf_c}{f_s} = \frac{kd}{d-kd} = \frac{k}{1-k}$$

$$\frac{f_s}{nf_c} = \frac{1-k}{k} = \frac{1}{k} - 1$$

$$\frac{1}{k} = 1 + \frac{f_s}{nf_c}$$

กลับเศษส่วนได้

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} \qquad (2.3)$$

และเนื่องจาก $jd = d - \frac{kd}{3}$ หรือ

$$j = 1 - \frac{k}{3} \qquad (2.4)$$

สำหรับอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.0993377}{\sqrt{f_c'}}$$

อัตราส่วน n ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม ที่สมัยก่อนแนะนำให้ใช้ค่า n เป็นจำนวนเต็มเพื่อความสะดวกในการคำนวณโดยใช้ไม้บรรทัดคำนวณ (slide rule) ปัจจุบันเครื่องคำนวณสามารถคำนวณได้ละเอียด

แรงดึง T ในเหล็กคือ $f_s A_s$ แต่แรงอัด C ในคอนกรีตต้องเอาเนื้อที่รับแรงอัด $b \cdot kd$ คูณกับค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัด ซึ่งในกรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้านั้นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัดคอนกรีตคือ $\frac{1}{2} f_c$ ดังนั้น โมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้เมื่อพิจารณาจากแรงดึงในเหล็กรับแรงดึง

$$M = Tjd = f_s A_s jd$$

ดังนั้น

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} \tag{2.5}$$

และโมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้เมื่อพิจารณาจากแรงอัดในคอนกรีต

$$M = Cjd = \left(\frac{1}{2} f_c b \cdot kd\right)(jd) = \frac{1}{2} f_c kj \cdot bd^2 = Rbd^2$$

ดังนั้น

$$M = Rbd^2, \; d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} \tag{2.6}$$

เมื่อ

$$R = \frac{1}{2} f_c kj \tag{2.7}$$

ในกรณีกำหนดอัตราส่วนเหล็กรับแรงดึงต่อเนื้อที่คอนกรีตประสิทธิผล

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

จะได้ $T = f_s A_s = f_s \rho bd$ แต่ $T = C = \frac{1}{2} f_c kbd$ ดังนั้น

$$f_s \rho bd = \frac{1}{2} f_c kbd$$

$$\frac{f_s}{f_c} = \frac{k}{2\rho}$$

แต่เนื่องจาก $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{f_c}{f_s} \cdot \frac{E_s}{E_c} = \frac{nf_c}{f_s} = \frac{kd}{d - kd} = \frac{k}{1 - k}$ หรือ $\frac{f_s}{f_c} = \frac{n(1-k)}{k}$ ดังนั้น

$$\frac{k}{2\rho} = \frac{n(1-k)}{k}$$

$$k^2 = 2n\rho(1-k) = 2n\rho - 2n\rho k$$

$$k^2 + 2n\rho k - 2n\rho = 0$$

$$k = \frac{-2n\rho \pm \sqrt{(2n\rho)^2 - 4(1)(-2n\rho)}}{2(1)}$$

$$k = \frac{-2n\rho \pm \sqrt{4(n\rho)^2 + 4(2n\rho)}}{2}$$

$$k = \frac{2n\rho \pm 2\sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho}}{2}$$

$$k = -n\rho \pm \sqrt{2n\rho + (n\rho)^2}$$

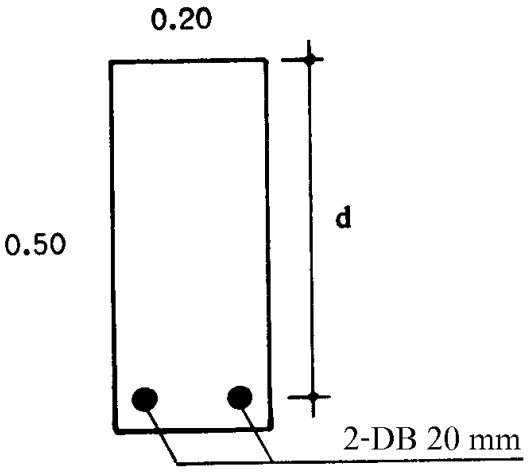
เนื่องจากพารามิเตอร์แกนสะเทิน k ต้องเป็นค่าบวกเสมอ ดังนั้น

$$k = \sqrt{2n\rho + (n\rho)^2} - n\rho \qquad (2.8)$$

สมการ (2.3) , (2.4) , (2.7) เป็นค่าเบื้องต้นที่จะต้องหา สมการ (2.5) ใช้หาเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง สมการ (2.6) ใช้ในการประมาณขนาดความลึกของหน้าตัดคาน ส่วนสมการ (2.8) ใช้สำหรับการวิเคราะห์หากำลังรับโมเมนต์ดัดของคานที่ทราบขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริม

ข้อกำหนดตามมาตรฐานที่สำคัญ ระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมวัดจากผิวคานถึงผิวนอกของเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กทางขวาง ระยะข้างบนและข้างล่างอย่างน้อย 4 ซม และทางซ้ายทางขวาอย่างน้อย 3.5 ซม

ตัวอย่างที่ 2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.20×0.50 m^2 เสริมเหล็กรับแรงดึง 2-DB 20 mm และเหล็กทางขวาง RB 6 mm อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น n = 9.32 มีโมเมนต์ดัด M = 3000 kg·m จงหาหน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริม การพิจารณาให้เป็นไปตามทฤษฎียืดหยุ่น



รูปตัวอย่างที่ 2.1

วิธีทำ

สังเกตว่าโจทย์ให้เฉพาะค่า n = 9.32 ไม่บอกค่า f_s และ f_c มาให้ ดังนั้นต้องใช้สมการ 2.8 ในการหาค่า k

ข้อบัญญัติ กทม. ข้อ 52(7) กำหนดระยะหุ้มของคอนกรีต 3 ซม แต่มาตรฐาน ว.ส.ท.ให้ระยะหุ้มบนล่างของคาน 4 ซม ซ้ายขวา 3.5 ซม จึงจะใช้ค่าตาม ว.ส.ท.

ความลึกประสิทธิผล d = ความลึกคาน h – ระยะหุ้ม 4 ซม – เหล็กทางขวาง 6 มม

– ครึ่งหนึ่งขนาดเหล็ก

$$d = 50 - 4 - 0.6 - \frac{2.0}{2} = 44.4 \text{ cm}$$

เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึง $A_s = 2 \times \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 2 \times 3.14 = 6.28 \text{ cm}^2$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{6.28}{20 \times 44.4} = 0.007072072$$

$$n\rho = 9.32 \times 0.007072072 = 0.065911711$$

$$2n\rho = 0.131823423$$

$$k = \sqrt{2n\rho + (n\rho)^2} - n\rho$$

$$k = \sqrt{0.131823423 + 0.065911711^2} - 0.065911711$$

$$k = \sqrt{0.136167777} - 0.065911711$$

$$k = 0.369009183 - 0.065911711$$

$$k = 0.303097471 \Rightarrow 0.303$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.303}{3} = 0.899$$

จากสมการ (2.5) $M = f_s A_s jd$

$$3{,}000 \times 100 = f_s \times 6.28 \times 0.899 \times 44.4$$

$$f_s = \frac{3{,}000 \times 100}{6.28 \times 0.899 \times 44.4} = 1{,}196.79 \Rightarrow 1{,}197 \text{ ksc}$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7)

$$M = Rbd^2 = \frac{1}{2} f_c kjbd^2$$

$$3{,}000 \times 100 = \frac{1}{2} f_c \times 0.303 \times 0.899 \times 20 \times 44.4^2$$

$$f_c = \frac{2 \times 3{,}000 \times 100}{0.303 \times 0.899 \times 20 \times 44.4^2}$$

$$f_c = 55.867 \Rightarrow 55.9 \text{ ksc}$$

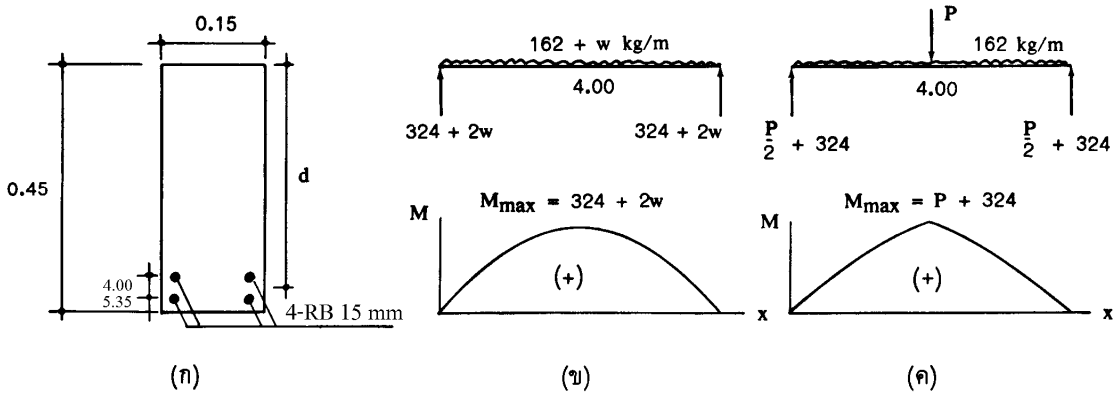
จากตัวอย่างนี้ หน่วยของโมเมนต์ M ต้องเป็น $\text{kg} \cdot \text{cm}$ และความกว้างกับความลึกประสิทธิผลต้องมีหน่วยเป็น cm

ตัวอย่างที่ 2.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดกว้าง 0.15 เมตร ความลึก 0.45 เมตร ช่วงคาน 4.00 เมตรช่วงเดียว กำหนด $f_c^{'} = 180$ ksc, $f_y = 2400$ ksc เหล็กเสริม 4-RB 15 mm เหล็กลูกตั้ง RB 6 mm ใช้กฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 แล้วหาค่า

(1) โมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้

(2) คานจะรับน้ำหนักแผ่กระจายได้สูงสุดเท่าใด

(3) คานจะรับน้ำหนักจุดเดียวที่กึ่งกลางคานได้สูงสุดเท่าใด



ตัวอย่างที่ 2.2

วิธีทำ

$$A_s = 4 \times \frac{\pi}{4} \times 1.5^2 = 7.069 \text{ cm}^2$$

การหาความลึกประสิทธิผล จะอยู่ที่กึ่งกลางช่องว่างระหว่างชั้น

$$d = 45 - 4 - 0.6 - 1.5 - \frac{2.5}{2} = 37.65 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{7.069}{15 \times 37.65} = 0.012517042$$

$$f_c^{'} = 180 \text{ ksc}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{180}} = 10.0697101$$

$$n\rho = 10.0697101 \times 0.012517042 = 0.126042993$$

$$2n\rho = 0.252085987$$

$$k = \sqrt{2n\rho + (n\rho)^2} - n\rho$$

$$k = \sqrt{0.252085987 + 0.126042993^2} - 0.126042993$$

$$k = \sqrt{0.267972823} - 0.126042993$$

$$k = 0.517660915 - 0.126042993$$

$$k = 0.391617922 \Rightarrow 0.392$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.391617922}{3} = 0.869460692 \Rightarrow 0.869$$

ตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 ให้ใช้กำลังคอนกรีต $f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc

$$f_c = 0.375 \times 180 = 67.5 > 65 \text{ ksc}$$ ใช้ $f_c = 65$ ksc

และกำลังที่ยอมให้ของเหล็กเสริมชนิด SR-24 คือ $f_s = 0.5f_y \le 1200$ ksc

$$f_s = 0.5 \times 2400 = 1200 \text{ ksc}$$

(ก) โมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับไว้ได้

เมื่อหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าสูงสุด $f_s = 1200$ ksc

$$M_s = f_s A_s jd = 1200 \times 7.069 \times 0.869 \times 37.65 = 277{,}538.978 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_s = 2{,}775.38978 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

เมื่อหน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าสูงสุด $f_c = 65$ ksc

$$M_c = \frac{1}{2} f_c kjbd^2 = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.392 \times 0.869 \times 15 \times 37.65^2 = 235{,}402.1497 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_c = 2{,}354.021497 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

พิจารณาจากค่าน้อย $M_c = 2{,}354.021497$ kg·m แสดงว่าเมื่อเพิ่มโมเมนต์ขึ้นเรื่อยๆ หน่วยแรงในคอนกรีตถึงขีดจำกัด $f_c = 65$ ksc ในขณะที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมยังไม่ถึงค่าสูงสุด $f_s = 1200$ ksc แต่เนื่องจากตัวเลขซ้ายสุดที่ไม่ใช่ 0 คือเลข 2 ไม่ใช่เลข 1 ต้องตอบนัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง (ถ้าเป็นเลข 1 ใช้ 4 ตำแหน่ง) กรณีนี้นับจาก 2 ไป 3 ตำแหน่งได้ 235 ถัดไปเป็นเลข 4 ตัดทิ้ง (ถ้าเป็น 5 ขึ้นไปให้ปัดขึ้น 1) ที่เหลือแทนด้วยเลข 0 ดังนั้นคำตอบของข้อนี้คือ

$$M = 2{,}350 \text{ kg} \cdot \text{m}$$ **ตอบ**

น้ำหนักของคาน $w_G = 2400bh = 2400 \times 0.15 \times 0.45 = 162$ kg/m

(ข) คานจะรับน้ำหนักแผ่กระจายได้สูงสุดเท่าใด

ให้น้ำหนักแผ่ที่ต้องรับ w kg/m รวมกับน้ำหนักคานได้น้ำหนักแผ่ w + 162 kg/m ความยาวช่วงคาน L = 4.00 เมตร ดังนั้น

$$M = \frac{(w + 162)L^2}{8}$$

$$2{,}354.021497 = \frac{(w + 162) \times 4.00^2}{8}$$

$$w + 162 = 1177.010895$$

$$w = 1015.010895 \Rightarrow 1{,}015 \text{ kg/m}$$ **ตอบ**

(ค) คานจะรับน้ำหนักจุดเดียวที่กึ่งกลางคานได้สูงสุดเท่าใด

คานมีน้ำหนักแผ่ $w = w_G = 162 \ \text{kg/m}$ และมีน้ำหนักจุด P กระทำที่กึ่งกลาง

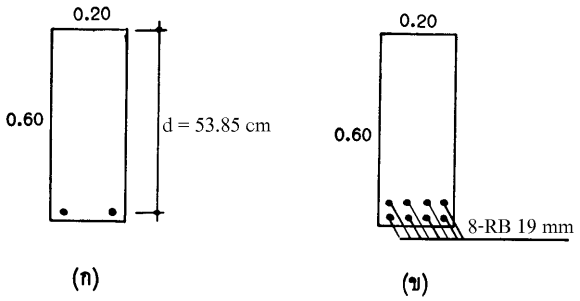
$$M = \frac{wL^2}{8} + \frac{PL}{4}$$

$$2{,}354.021497 = \frac{162 \times 4.00^2}{8} + \frac{P \times 4.00}{4}$$

$$P = 2030.021497 \ \text{kg}$$

$$P = 2{,}030 \ \text{kg}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2.3 คาน ค.ส.ล. หน้าตัดขนาด 0.20×0.60 อยู่ในสภาพหน้าตัดสมดุล จงหาโมเมนต์ดัดสมดุล M_R เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมสมดุลรับแรงดึง A_{sR} ให้ใช้ $f_c' = 210 \ \text{ksc}, f_y = 2400 \ \text{ksc}$ มาตรฐาน ว.ส.ท. และกฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6



รูปตัวอย่างที่ 2.3

วิธีทำ

คานที่มีหน้าตัดสมดุล หน่วยแรงในคอนกรีตถึงค่า f_c ละหน่วยแรงในเหล็กถึงค่า f_s พร้อมกัน

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{210}} = 9.32$$

$$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 2400 = 1200 \ \text{ksc}$$

ตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

$$f_c = 0.45 f_c' = 0.45 \times 210 = 94.5 \ \text{ksc}$$

ดังนั้น

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1200}{9.32 \times 94.5}} = 0.423$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.423}{3} = 0.859$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 94.5 \times 0.423 \times 0.859 = 17.169 \ \text{ksc}$$

เขียนรูป (ก) สมมติเหล็กรับแรงดึง RB 19 mm สองชั้น ระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 ซม จุดเซนทรอยด์ของกลุ่มเหล็กอยู่กึ่งกลางของช่องว่างนี้ เหล็กลูกตั้ง RB 6 mm ระยะหุ้ม 4 ซม ดังนั้นความลึกประสิทธิผล d ดังนี้

$$d = 60 - 4 - 0.6 - 1.9 - \frac{2.5}{2} = 52.25 \text{ cm}$$

โมเมนต์ดัดสมดุลคือ

$$M_R = Rbd^2 = 17.169 \times 20 \times 52.25^2 = 937,448.8613 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$
$$M_R = 9,374.488613 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

ก่อนตอบต้องพิจารณานัยสำคัญ ตัวเลขซ้ายสุดที่ไม่ใช่ 0 คือ 9 ใช้นัยสำคัญ 3 ตำแหน่งคือ 937 ถัดไปเป็นเลข 4 ยังไม่ถึง 5 ตัดทิ้งไปใส่ 0 แทน ดังนั้นคำตอบคือ

$$M_R = 9,370 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึง

$$A_{sR} = \frac{M_R}{f_s jd} = \frac{937,448.8613}{1,200 \times 0.859 \times 52.25} = 17.40551513 \text{ cm}^2$$

เหล็ก RB 19 mm มีเนื้อที่หน้าตัด 1 เส้น คือ $\frac{\pi d_b^2}{4} = \frac{\pi \times 1.9^2}{4} = 2.835 \text{ cm}^2$ ต้องใช้เหล็ก RB 19 mm จำนวน

$$N = \frac{17.40551513}{2.835} = 6.14 \Rightarrow 7 \Rightarrow 8 \text{ เส้น}$$

ถ้าจัดเหล็กตามรูป (ข) พิจารณาระยะช่องว่างระหว่างเส้นของเหล็กในแถวเดียวกัน โดยระยะหุ้มทางข้างของคานต้องไม่น้อยกว่า 3.5 ซม ระยะช่องว่างระหว่างเส้นต้องไม่น้อยกว่า 3.75 ซม ช่องว่างระหว่างเส้นจริงคือ

$$\text{clear} = \frac{20 - 3.5 - 3.5 - 0.6 - 0.6 - 4 \times 1.9}{4 - 1} = 1.4 \text{ cm} < 3.75 \text{ cm}$$

ถ้าจัดเป็น 3 ชั้นๆ 3 เส้น

$$\text{clear} = \frac{20 - 3.5 - 3.5 - 0.6 - 0.6 - 3 \times 1.9}{3 - 1} = 3.05 \text{ cm} < 3.75 \text{ cm}$$

ถ้าจัดเป็น 4 ชั้นๆ ละ 2 เส้น

$$\text{clear} = \frac{20 - 3.5 - 3.5 - 0.6 - 0.6 - 2 \times 1.9}{2 - 1} = 8 \text{ cm} > 3.75 \text{ cm}$$

ดังนั้นแต่ละชั้นจะต้องไม่เกิน 2 เส้น เมื่อจัดเป็น 4 ชั้นๆ ละ 2 เส้นรวมเป็น 8 เส้น จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างชั้นที่ 2 กับชั้นที่ 3 ดังนั้นความลึกประสิทธิผล d หาได้จาก

$$d = 60 - 4 - 0.6 - 1.9 - 2.5 - 1.9 - \frac{2.5}{2} = 47.85 \text{ cm}$$
$$M_R = Rbd^2 = 17.169 \times 20 \times 47.85^2 = 786,210.5741 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$
$$M_R = 7,862.105741 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

เหล็กเสริมรับแรงดึง

$$A_{sR} = \frac{M_R}{f_s jd} = \frac{786{,}210.5741}{1{,}200 \times 0.859 \times 47.85} = 15.94 \text{ cm}^2$$

จำนวนเส้นของเหล็ก RB 19 mm

$$N = \frac{15.94}{2.835} = 5.62 \Rightarrow 6 \text{ เส้น}$$

ดังนั้น จัดเหล็กรับแรงดึงเป็น 3 ชั้นๆ ละ 2 เส้น

$$d = 60 - 4 - 0.6 - 1.9 - 2.5 - \frac{1.9}{2} = 50.05 \text{ cm}$$

$$M_R = Rbd^2 = 17.169 \times 20 \times 50.05^2 = 860{,}167.7585 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_R = 8{,}601.677585 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

โมเมนต์ดัดที่รับได้ $M_R = 8{,}600 \text{ kg} \cdot \text{m}$

กรณีตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

$$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 210 = 78.75 \text{ ksc} > 65 \text{ ksc} \text{ ใช้ } f_c = 65 \text{ ksc}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}200}{9.32 \times 65}} = 0.335$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.335}{3} = 0.888$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.335 \times 0.888 = 9.6681 \text{ ksc}$$

สมมติจัดเหล็ก 3 ชั้นๆ ละ 2 เส้น ขนาด RB 19 mm

$$d = 60 - 4 - 0.6 - 1.9 - 2.5 - \frac{1.9}{2} = 50.05 \text{ cm}$$

$$M_R = Rbd^2 = 9.6681 \times 20 \times 50.05^2 = 484{,}372.2934 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$A_{sR} = \frac{M_R}{f_s jd} = \frac{484{,}372.2934}{1{,}200 \times 0.888 \times 50.05} = 9.082 \text{ cm}^2$$

จำนวนเหล็ก RB 19 mm ที่ต้องการคือ

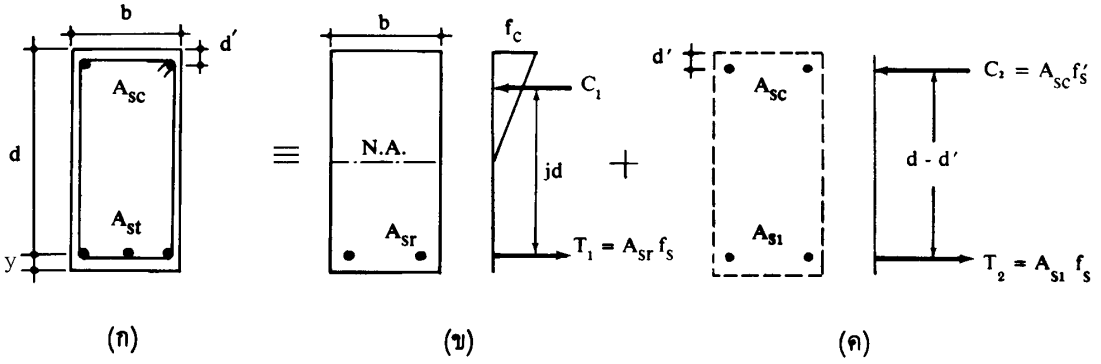
$$N = \frac{9.082}{2.835} = 3.203 \Rightarrow 4 \text{ เส้น}$$

จัดเหล็ก RB 19 mm สองชั้นๆ ละ 2 เส้น

2.5 คานซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

คานทั่วๆ ไปจะต้องมีเหล็กเสริมรับแรงอัดเพื่อใช้ยึดเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือน ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดเหล็กตามยาวต้องไม่เล็กกว่า 12 mm ยกเว้นในกรณีคานทับหลังใช้ RB 9 mm ได้เนื่องจากไม่ใช่โครงสร้างรับโมเมนต์ดัดโดยตรง

หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึงจะไม่เท่ากับคอนกรีต แต่ในส่วนเหล็กรับแรงอัดนั้น เหล็กจะหดตัวไปพร้อมๆ กับคอนกรีต ดังนั้นหน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ในกรณีส่วนรับแรงดึง หน่วยแรงในเหล็กเป็น n เท่าของหน่วยแรงในคอนกรีต แต่ในส่วนที่รับแรงอัด หน่วยแรงในเหล็กจะเป็น 2n เท่าของคอนกรีต แต่ต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงดึงของเหล็ก ดังนั้นในการแปลงเหล็กรับแรงอัดไปเป็นคอนกรีตจึงต้องเพิ่มมากกว่ากรณีของแรงดึง



รูปที่ 2.14 ลักษณะการรับโมเมนต์ดัดของคานที่มีทั้งเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

จากรูปที่ 2.14(ก) หน้าตัดคานที่กำลังรับโมเมนต์ดัดบวก ผิวบนเป็นแรงอัด มีเหล็กเสริมรับแรงอัด A_{sc} ระยะเซนทรอยด์ห่างจากผิวรับแรงอัดเป็น d' ที่คำนวณจากระยะหุ้ม 4 ซม เหล็กลูกตั้ง และระยะถึงเซนทรอยด์กลุ่มเหล็ก โดยคาดเดาขนาดเหล็กลูกตั้ง ขนาดเหล็กรับแรงอัด จำนวนชั้น ระยะระหว่างชั้น 2.5 ซม ส่วนเหล็กรับแรงดึง A_{st} ระยะเซนทรอยด์กลุ่มเหล็กห่างจากผิวรับแรงอัดของคาน (ในกรณีนี้คือผิวบน) เป็นระยะ d ที่คำนวณจากระยะหุ้ม 4 ซม เหล็กลูกตั้ง และระยะถึงเซนทรอยด์กลุ่มเหล็ก โดยคาดเดาขนาดเหล็กลูกตั้ง ขนาดเหล็กรับแรงดึง จำนวนชั้น ระยะระหว่างชั้น 2.5 ซม

แบ่งหน้าตัดเป็นส่วนรูป 2.14(ข) ที่แรงอัดของคอนกรีต $C_1 = \frac{1}{2} f_c kbd$ เท่ากับแรงดึงในเหล็กรับแรงดึงส่วนหนึ่งและเท่ากับ $T_1 = A_{sR} f_s$ โดยแรงทั้งสองห่างกัน $jd = \left(1 - \frac{k}{3}\right) d$ ดังนั้นโมเมนต์ดัดส่วนที่หนึ่งจึงเป็น

$$M_1 = C_1 jd = \frac{1}{2} f_c kbd \times jd = \frac{1}{2} f_c kjbd^2 = Rbd^2 = M_R$$

$$M_1 = M_R = T_1 jd = A_{sR} f_s jd$$

ดังนั้น

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}$$

$$j = 1-\frac{k}{3}$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj \tag{2.9}$$

$$M_R = Rbd^2 \tag{2.10}$$

$$A_{sR} = \frac{M_R}{f_s jd} \tag{2.11}$$

โมเมนต์ที่กระทำสูงสุดในคานคือ M ดังนั้นโมเมนต์ส่วนเกินที่เหล็กรับแรงดึง A_{s1} กับเหล็กรับแรงอัด A_{sc} จะต้องรับ คือ

$$M' = M - M_R = A_{sc}f_s^{'}(d-d') = A_{s1}f_s(d-d') \tag{2.12}$$

ดังนั้นเนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงอัดที่ต้องการคือ

$$A_{sc} = \frac{M-M_R}{f_s^{'}(d-d')} \tag{2.13}$$

เนื้อที่เหล็กรับแรงดึงที่ใช้รับโมเมนต์ส่วนเกิน

$$A_{s1} = \frac{M-M_R}{f_s(d-d')} \tag{2.14}$$

จากสมดุลของแรงในรูปที่ 2.14(ค)

$$A_{sc}f_s^{'} = A_{s1}f_s$$

ในช่วงยืดหยุ่นนั้นหน่วยแรงในเหล็กเสริมจะเป็นปฏิภาคกับระยะจากแกนสะเทิน

$$\frac{f_s}{f_s^{'}} = \frac{d-kd}{kd-d'}$$

$$f_s^{'} = f_s\frac{kd-d'}{d-kd} = f_s\frac{k-\frac{d'}{d}}{1-k}$$

แต่หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงอัดจะเป็น 2 เท่าของค่าที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. นั่นคือ

$$f_s^{'} = 2f_s\frac{k-\frac{d'}{d}}{1-k} \le f_s \tag{2.15}$$

ลำดับขั้นตอนการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'}$ = กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานที่อายุ 28 วัน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

$f_y = 2400$ ksc = กำลังครากของเหล็กกลมผิวเรียบ SR-24

$f_y = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย SD-30

$f_y = 4000$ ksc = กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย SD-40

$f_y = 5000$ ksc = กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย SD-50

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.0993377}{\sqrt{f_c^{'}}}$ ใช้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

$f_c = 0.45f_c^{'}$ = กำลังที่ยอมให้ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ว.ส.ท., ksc

$f_c = 0.375f_c^{'} \le 65$ ksc = กำลังที่ยอมให้ของคอนกรีตตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6, ksc

$f_s = 0.5f_y = 1200$ ksc = กำลังที่ยอมให้ของเหล็ก SR-24

$f_s = 0.5f_y = 1500$ ksc = กำลังที่ยอมให้ของเหล็ก SD-30

$f_s = 0.5f_y = 1700$ ksc = กำลังที่ยอมให้ของเหล็ก SD-40 และ SD-40 มาตรฐานให้ใช้ไม่เกิน 1700 ksc

$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์ตำแหน่งแกนสะเทิน

$j = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \frac{1}{2}f_c kj$ = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดหน้าตัดคาน ให้ดูจากแปลนสถาปัตยกรรมว่าช่วงคานที่ยาวที่สุดเท่าใด หาความลึกของหน้าตัดคาน h จากค่าต่อไปนี้

คานช่วงภายใน $h \ge \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$ เพื่อไม่ต้องคำนวณระยะโก่ง

ประหยัด $h \approx \frac{L}{10}$

คานยื่น $h \ge \frac{L}{8}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$ เพื่อไม่ต้องคำนวณระยะโก่ง

ประหยัด $h \ge \frac{L}{5}$

เมื่อ L = ช่วงความยาวของคานสูงสุด

จากนั้นเลือกความลึกคานที่คาดว่าเหมาะสม

ประมาณความกว้างคาน b โดยพิจารณาดังนี้

$b \geq \frac{h}{5}$ เป็นค่าแนะนำ ไม่ใช่มาตรฐานกำหนด

$b \geq \frac{L}{35}$ มาตรฐานกำหนดไว้

$b \geq 20$ cm สำหรับคานที่รับฝากคานอื่น เหล็กต้องฝังในคานหรือเสา ≥ 15 ซม

หาน้ำหนักคาน $w_G = 2400bh$ เป็น kg/m โดย b และ h ต้องเป็นเมตร

นำน้ำหนักคานไปรวมกับน้ำหนักอื่นเช่น น้ำหนักผนัง น้ำหนักจากพื้นหรือบันได แล้ววิเคราะห์หาโมเมนต์ M (ที่จริงต้องหาแรงเฉือน V ด้วย ซึ่งจะกล่าวต่อไป)

ขั้นตอนที่ 3 สมมติขนาดเหล็กลูกตั้ง ขนาดเหล็กรับแรงดึง จำนวนชั้น แล้วหาความลึกประสิทธิผล d ขนาดเหล็กรับแรงอัด จำนวนชั้น แล้วหาตำแหน่งของเหล็กรับแรงอัด d' หาหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ f_s'

$$f_s' = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} \leq f_s$$

หาโมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2$$

ขั้นตอนที่ 4 หาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง A_{st} และเหล็กเสริมรับแรงอัด A_{sc}

ถ้า $M \leq M_R$ แล้ว

$$A_{sc} = 0$$

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd}$$

ถ้า $M > M_R$ แล้ว

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s'(d-d')}$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d-d')}$$

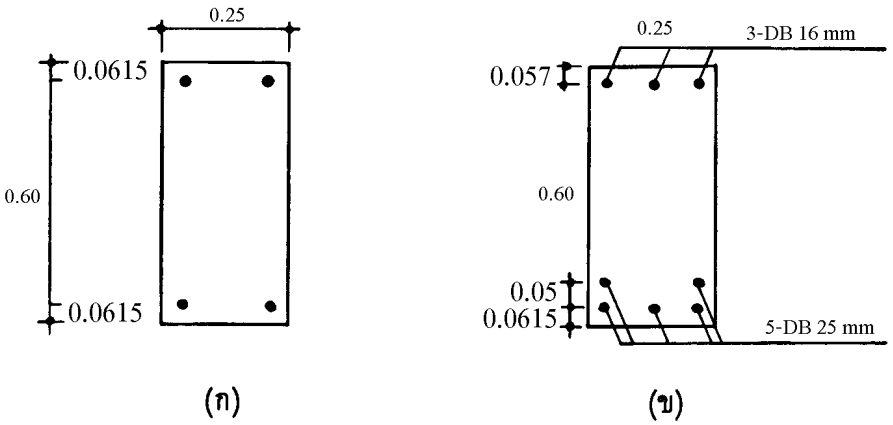
ถ้า $A_{sc} > A_{st}$ แสดงว่าหน้าตัดคานเล็กเกินไปให้เพิ่มขนาด แล้วออกแบบใหม่

ถ้า $A_{sc} \leq A_{st}$ แสดงว่าหน้าตัดรับน้ำหนักได้ จัดเหล็กลงหน้าตัดและตรวจสอบระยะ d และ d'

ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบรับแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 2.4 จงออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับโมเมนต์ดัด 16,500 kg·m สมมติขนาดหน้าตัด 0.25×0.60 m^2 กำลังของวัสดุ $f_c^{'}=250$ ksc, $f_y=3000$ ksc ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท.



ภาพตัวอย่างที่ 2.4

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$$f_c^{'}=250 \text{ ksc}$$

$$f_y=3000 \text{ ksc}$$

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{250}}=8.54$$

$$f_c=0.45f_c^{'}=0.45\times250=112.5 \text{ ksc}$$

$$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500 \text{ ksc}$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c^{'}}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.54\times112.5}}=0.390$$

$$j=1-\frac{0.390}{3}=0.870$$

$$R=\frac{1}{2}f_c kj=\frac{1}{2}\times112.5\times0.390\times0.870=19.086 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดคาน กรณีนี้ทราบขนาดแล้ว

$$h=60 \text{ cm}$$

$$b=25 \text{ cm}$$

$$w_G=2400bh=2400\times0.25\times0.60=360 \text{ kg/m}$$

ไม่ต้องวิเคราะห์ใดๆ เนื่องจากโจทย์ให้โมเมนต์มาแล้วว่า

$$M=16{,}500 \text{ kg}\cdot\text{m}=1{,}650{,}000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

ขั้นตอนที่ 3 สมมติขนาดเหล็กลูกตั้ง RB 9 mm เหล็กเสริมรับแรงดึง DB 25 mm หนึ่งชั้น และเหล็กเสริมรับแรงอัด DB 25 mm ชั้นเดียวเช่นกัน ระยะหุ้ม 4 cm

$$d = 60 - 4 - 0.9 - \frac{2.5}{2} = 53.85 \text{ cm}$$

$$d' = 4 + 0.9 + \frac{2.5}{2} = 6.15 \text{ cm}$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1500 \times \frac{0.390 - \frac{6.15}{53.85}}{1 - 0.390} = 1{,}356.36 \text{ ksc} < f_s = 1{,}500 \text{ ksc}$$

$$M_R = Rbd^2 = 19.086 \times 25 \times 53.85^2 = 1{,}383{,}650.3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง A_{st} และเหล็กเสริมรับแรงอัด A_{sc}

พบว่า $(M_R = 1{,}383{,}650.3 \text{ kg} \cdot \text{cm}) < (M = 1{,}650{,}000 \text{ kg} \cdot \text{cm})$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{1{,}650{,}000 - 1{,}383{,}650.3}{1{,}356.36 \times (53.85 - 6.15)} = 4.117 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{1{,}383{,}650.3}{1{,}500 \times 0.870 \times 53.85} + \frac{1{,}650{,}000 - 1{,}383{,}650.3}{1{,}500 \times (53.85 - 6.15)}$$

$$A_{st} = 19.689 + 3.723 = 23.412 \text{ cm}^2$$

ตรวจสอบพบว่า $A_{st} > A_{sc}$ ใช้ได้ จึงจัดเหล็กดังนี้

เหล็กรับแรงดึง ใช้ DB 25 mm มีเนื้อที่ $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \text{ cm}^2$ ดังนั้นจำนวนเส้นของเหล็กรับแรงดึงคือ $\frac{23.412}{4.909} = 4.77 \Rightarrow 5$ เส้น จัดเป็นสองชั้น ชั้นล่างสุด 3-DB 25 mm ชัดถัดขึ้นไป 2-DB 25 mm ระยะช่องว่างระหว่างเส้น $= \frac{25 - 3.5 - 3.5 - 0.9 - 0.9 - 3 \times 2.5}{3 - 1} = 4.35 \text{ cm} < 3.75 \text{ cm}$

ชั้นที่หนึ่งเหล็ก 3 เส้น ห่างขอบล่าง $4 + 0.9 + \frac{2.5}{2} = 6.15$ cm ชั้นที่สองเหล็ก 2 เส้น ห่างขอบล่าง $4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 11.15$ cm จุดเซนทรอยด์ของเหล็กห่างจากขอบล่างดังนี้

$$\bar{y} = \frac{3 \times 6.15 + 2 \times 11.15}{3 + 2} = 8.15 \text{ cm}$$

$$d = 60 - 8.15 = 51.85 \text{ cm}$$

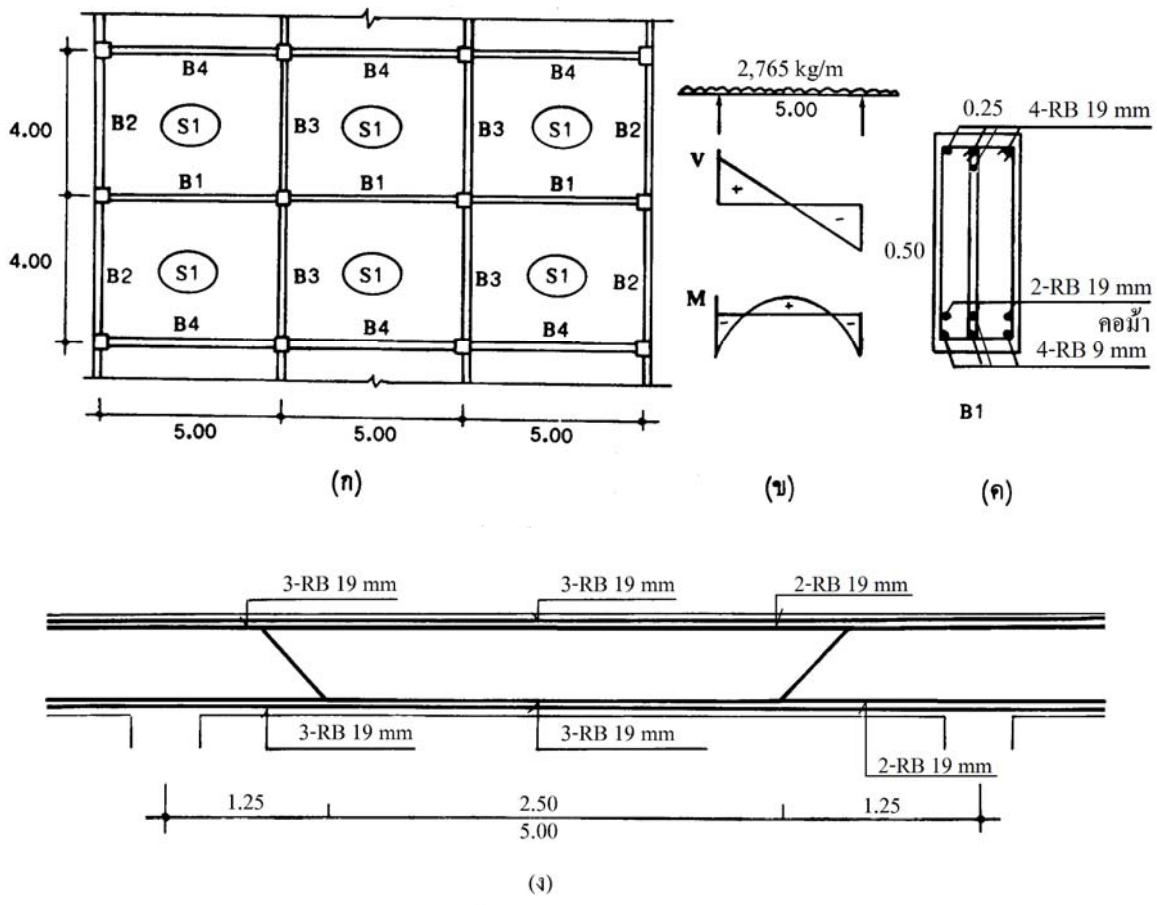
เหล็กรับแรงอัด ใช้ DB 16 mm มีเนื้อที่ $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \text{ cm}^2$ ดังนั้นจำนวนเส้นของเหล็กรับแรงอัดคือ $\frac{4.117}{2.01} = 2.05 \Rightarrow 3$ เส้น จัดเป็นชั้นเดียว

$$d' = 4 + 0.9 + \frac{1.6}{2} = 5.7 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบรับแรงเฉือน (ยังเว้นไว้ก่อน จะออกแบบในหัวข้อต่อไป)

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก รูป (ข) ยังขาดเหล็กทางขวาง

ตัวอย่างที่ 2.5 จากรูปแปลนพื้นและคาน จงออกแบบคาน B1 กำหนดให้แผ่นพื้น S1 หนา 0.10 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m^2 ผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่นเป็นผนังกันไฟสูง 3.00 เมตร ทึบตลอด กำหนดกำลังของคอนกรีตและของเหล็กเสริม ออกแบบเพื่อยื่นขออนุญาตก่อสร้าง



รูปตัวอย่างที่ 2.5

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c' = 240$ ksc = กำหนดกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

$f_y = 2400$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริมผิวเรียบ

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$f_c = 0.375f_c' = 0.375 \times 240 = 90$ ksc $\Rightarrow 65$ ksc ตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 2400 = 1200$ ksc

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1200}{8.72\times 65}} = 0.321$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = 1-\frac{0.321}{3} = 0.893$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2}\times 65\times 0.321\times 0.893 = 9.32 \ \text{ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดคาน

คานมีช่วงยาวสูงสุด L = 5.00 m ความลึกคานขั้นต่ำที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งงอคือ

$$h = \frac{L}{16}\left(0.4+\frac{f_y}{7000}\right) = \frac{5.00}{16}\left(0.4+\frac{2400}{7000}\right) = 0.232 \ \text{m}$$

ความลึกที่ประหยัดเหล็กเสริม

$$h = \frac{L}{10} = \frac{5.00}{10} = 0.50 \ \text{m}$$

เลือกความลึกคาน $h = 0.50 \ \text{m} = 50 \ \text{cm}$

ความกว้างคาน

$$b \geq \frac{h}{5} = \frac{0.50}{5} = 0.10 \ \text{m}$$

$$b \geq \frac{L}{35} = \frac{5.00}{35} = 0.142 \ \text{m}$$

$$b \geq 20 \ \text{cm}$$

เลือกใช้ความกว้างคาน $b = 0.25 \ \text{m} = 25 \ \text{cm}$

น้ำหนักคาน $w_G = 2400bh = 2400\times 0.25\times 0.50 = 300 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่น $w_w = 360H = 360\times 3.00 = 1{,}080 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักของพื้น S1 หนา 0.10 $= 2400h_f = 2400\times 0.10 = 240 \ \text{kg/m}^2$

น้ำหนักบรรทุกจร $= 200 \ \text{kg/m}^2$ รวมกับน้ำหนักพื้นเองได้ $w = 240+200 = 440 \ \text{kg/m}^2$

เนื่องจากคาน B1 เป็นขอบยาวของพื้นที่มีความยาวขอบสั้น S = 4.00 m ความยาวขอบยาว L = 5.00 m

อัตราส่วน $m = \frac{S}{L} = \frac{4.00}{5.00} = 0.8$ พื้น S1 อยู่สองข้างของคาน B1 ดังนั้นน้ำหนักจากพื้น S1 บนคาน B1 คือ

$$w_s = 2\times \frac{wS}{3}\frac{3-m^2}{2} = 2\times \frac{440\times 4.00}{3}\times \frac{3-0.8^2}{2} = 1{,}384.5 \approx 1{,}385 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกรวมบนคาน

$$w = 300+1{,}080+1{,}385 = 2{,}765 \ \text{kg/m}$$

วิเคราะห์คานต่อเนื่อง ในที่นี้จะใช้วิธี slope-deflection และถือเสมือนจุดรองรับหรือเสาเป็นจุดรองรับแบบคมมีดไม่มีโมเมนต์ในเสา (ความจริงมีแต่น้อย) ให้จุดรองรับเรียงจากซ้ายไปขวาเป็น A,B,C,D หน้าตัดคานเท่ากันตลอด ดังนั้นโมเมนต์อินเนอร์เชีย I จึงเท่ากันทุกช่วง

โมเมนต์ที่ปลายยึดแน่น (FEM : Fixed End Moment) ของคานที่รับน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวกทวนเข็มนาฬิกาเป็นลบ

$$FEM_{AB} = FEM_{BC} = FEM_{CD} = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{2{,}765 \times 5.00^2}{12} = -5{,}760.416667 \ \ kg \cdot m$$

$$FEM_{BA} = FEM_{CB} = FEM_{DC} = +\frac{wL^2}{12} = +\frac{2{,}765 \times 5.00^2}{12} = +5{,}760.416667 \ \ kg \cdot m$$

เขียนสมการ slope-deflection ดังนี้

$$M_{NF} = \frac{2EI}{L}\left(2\theta_N + \theta_F - 3\phi_{NF}\right) + FEM_{NF}$$

ช่วง AB

$$M_{AB} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_A + \theta_B - 3\phi_{AB}\right) - 5{,}760.416667 = 0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B - 5{,}760.416667$$

$$M_{BA} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_B + \theta_A - 3\phi_{BA}\right) + 5{,}760.416667 = 0.4EI\theta_A + 0.8EI\theta_B + 5{,}760.416667$$

ช่วง BC

$$M_{BC} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_B + \theta_C - 3\phi_{BC}\right) - 5{,}760.416667 = 0.8EI\theta_B + 0.4EI\theta_C - 5{,}760.416667$$

$$M_{CB} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_C + \theta_B - 3\phi_{CB}\right) + 5{,}760.416667 = 0.4EI\theta_B + 0.8EI\theta_C + 5{,}760.416667$$

ช่วง CD

$$M_{CD} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_C + \theta_D - 3\phi_{CD}\right) - 5{,}760.416667 = 0.8EI\theta_C + 0.4EI\theta_D - 5{,}760.416667$$

$$M_{DC} = \frac{2EI}{5.00}\left(2\theta_D + \theta_C - 3\phi_{DC}\right) + 5{,}760.416667 = 0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D + 5{,}760.416667$$

พิจารณาสมดุลของจุดรองรับ

จุด A $M_{AB} = 0$ .....(1)

จุด B $M_{BA} + M_{BC} = 0$ .....(2)

จุด C $M_{CB} + M_{CD} = 0$ .....(3)

จุด D $M_{DC} = 0$ .....(4)

แทนค่าโมเมนต์จากสมการ slope-deflection ลงในสมการสมดุล

จากสมการ (1)

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B - 5{,}760.416667 = 0$$

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667 \ \ .....(1)$$

จากสมการ (2)

$$0.4EI\theta_A + 0.8EI\theta_B - 5{,}760.416667 + 0.8EI\theta_B + 0.4EI\theta_C + 5{,}760.416667 = 0$$

$$0.4EI\theta_A + 1.6EI\theta_B + 0.4EI\theta_C = 0 .....(2)$$

จากสมการ (3)

$$0.4EI\theta_B + 0.8EI\theta_C - 5{,}760.416667 + 0.8EI\theta_C + 0.4EI\theta_D + 5{,}760.416667 = 0$$

$$0.4EI\theta_B + 1.6EI\theta_C + 0.4EI\theta_D = 0 \quad \text{.....(3)}$$

จากสมการ (4)

$$0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D + 5{,}760.416667 = 0$$

$$0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D = -5{,}760.416667 \quad \text{.....(4)}$$

รวมทั้งสี่สมการและจัดให้ตรงกัน

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(1)}$$

$$0.4EI\theta_A + 1.6EI\theta_B + 0.4EI\theta_C = 0 \quad \text{.....(2)}$$

$$0.4EI\theta_B + 1.6EI\theta_C + 0.4EI\theta_D = 0 \quad \text{.....(3)}$$

$$0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D = -5{,}760.416667 \quad \text{.....(4)}$$

$(1) - 2\times(2) \Rightarrow (2)$

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(1)}$$

$$-2.8EI\theta_B - 0.8EI\theta_C = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(2)}$$

$$0.4EI\theta_B + 1.6EI\theta_C + 0.4EI\theta_D = 0 \quad \text{.....(3)}$$

$$0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D = -5{,}760.416667 \quad \text{.....(4)}$$

$(2) + 7\times(3) \Rightarrow (3)$

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(1)}$$

$$-2.8EI\theta_B - 0.8EI\theta_C = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(2)}$$

$$+10.4EI\theta_C + 2.8EI\theta_D = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(3)}$$

$$0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D = -5{,}760.416667 \quad \text{.....(4)}$$

$(3) - 26\times(4) \Rightarrow (4)$

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(1)}$$

$$-2.8EI\theta_B - 0.8EI\theta_C = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(2)}$$

$$+10.4EI\theta_C + 2.8EI\theta_D = 5{,}760.416667 \quad \text{.....(3)}$$

$$-18EI\theta_D = 155{,}531.25 \quad \text{.....(4)}$$

จากสมการที่ (4)

$$-18EI\theta_D = 155{,}531.25$$

$$EI\theta_D = \frac{155{,}531.25}{-18} = -8{,}640.625001$$

แทนค่า $EI\theta_D = -8{,}640.625001$ ในสมการที่ (3)

$$10.4EI\theta_C + 2.8EI\theta_D = 5{,}760.416667$$

$$10.4EI\theta_C + 2.8\times(-8{,}640.625001) = 5{,}760.416667$$

$$EI\theta_C = \frac{5{,}760.416667 + 2.8\times 8{,}640.625001}{10.4} = 2{,}880.208334$$

แทนค่า $EI\theta_C = 2{,}880.208334$ ในสมการที่ (2)

$$-2.8EI\theta_B - 0.8EI\theta_C = 5{,}760.416667$$

$$-2.8EI\theta_B - 0.8\times 2{,}880.208334 = 5{,}760.416667$$

$$EI\theta_B = \frac{5{,}760.416667 + 0.8\times 2{,}880.208334}{-2.8} = -2{,}880.208334$$

แทนค่า $EI\theta_B = -2{,}880.208334$ ในสมการที่ (1)

$$0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B = 5{,}760.416667$$

$$0.8EI\theta_A + 0.4\times(-2{,}880.208334) = 5{,}760.416667$$

$$EI\theta_A = \frac{5{,}760.416667 + 0.4\times 2{,}880.208334}{0.8} = 8{,}640.625001$$

แทนค่าหาโมเมนต์ที่ปลายคานในสมการ slope-deflection ดังนี้

$$M_{AB} = 0.8EI\theta_A + 0.4EI\theta_B - 5{,}760.416667$$

$$M_{AB} = 0.8\times 8{,}640.625001 + 0.4\times(-2{,}880.208334) - 5{,}760.416667$$

$$M_{AB} = 0.0000002 \Rightarrow 0$$

$$M_{BA} = 0.4EI\theta_A + 0.8EI\theta_B + 5{,}760.416667$$

$$M_{BA} = 0.4\times 8{,}640.625001 + 0.8\times(-2{,}880.208334) + 5{,}760.416667$$

$$M_{BA} = 6{,}912.5 \ \text{kg}\cdot\text{m}$$

$$M_{BC} = 0.8EI\theta_B + 0.4EI\theta_C - 5{,}760.416667$$

$$M_{BC} = 0.8\times(-2{,}880.208334) + 0.4\times 2{,}880.208334 - 5{,}760.416667$$

$$M_{BC} = -6{,}912.500001 \Rightarrow -6{,}912.5 \ \text{kg}\cdot\text{m}$$

$$M_{CB} = 0.4EI\theta_B + 0.8EI\theta_C + 5{,}760.416667$$

$$M_{CB} = 0.4\times(-2{,}880.208334) + 0.8\times 2{,}880.208334 + 5{,}760.416667$$

$$M_{CB} = 6{,}912.500001 \Rightarrow 6{,}912.5 \ \text{kg}\cdot\text{m}$$

$$M_{CD} = 0.8EI\theta_C + 0.4EI\theta_D - 5{,}760.416667$$

$$M_{CD} = 0.8\times 2{,}880.208334 + 0.4\times(-8{,}640.625001) - 5{,}760.416667$$

$$M_{CD} = -6{,}912.5 \ \text{kg}\cdot\text{m}$$

$$M_{DC} = 0.4EI\theta_C + 0.8EI\theta_D + 5{,}760.416667$$

$$M_{DC} = 0.4\times 2{,}880.208334 + 0.8\times(-8{,}640.625001) + 5{,}760.416667$$

$$M_{DC} = -0.0000002 \Rightarrow 0$$

หาแรงเฉือนและโมเมนต์บวกกลางช่วง

$$V_{AB} = \frac{wL}{2} - \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L} = \frac{2{,}765\times 5.00}{2} - \frac{0 + 6{,}912.5}{5.00} = 5{,}530 \ \text{kg}$$

$$V_{BA} = \frac{wL}{2} + \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L} = \frac{2{,}765\times 5.00}{2} + \frac{0 + 6{,}912.5}{5.00} = 8{,}295 \ \text{kg}$$

$$M^{+}_{AB} = M_{AB} + \frac{V^2_{AB}}{2w} = 0 + \frac{5{,}530^2}{2 \times 2{,}765} = 5{,}530 \ \ kg \cdot m$$

$$V_{BC} = \frac{wL}{2} - \frac{M_{BC} + M_{CB}}{L} = \frac{2{,}765 \times 5.00}{2} - \frac{-6{,}912.5 + 6{,}912.5}{5.00} = 6{,}912.5 \ \ kg$$

$$V_{CB} = \frac{wL}{2} + \frac{M_{BC} + M_{CB}}{L} = \frac{2{,}765 \times 5.00}{2} + \frac{-6{,}912.5 + 6{,}912.5}{5.00} = 6{,}912.5 \ \ kg$$

$$M^{+}_{BC} = M_{BC} + \frac{V^2_{BC}}{2w} = -6{,}912.5 + \frac{6{,}912.5^2}{2 \times 2{,}765} = 1{,}728.125 \ \ kg \cdot m$$

$$V_{CD} = \frac{wL}{2} - \frac{M_{CD} + M_{DC}}{L} = \frac{2{,}765 \times 5.00}{2} - \frac{-6{,}912.5 + 0}{5.00} = 8{,}295 \ \ kg$$

$$V_{DC} = \frac{wL}{2} + \frac{M_{CD} + M_{DC}}{L} = \frac{2{,}765 \times 5.00}{2} + \frac{-6{,}912.5 + 0}{5.00} = 5{,}530 \ \ kg$$

$$M^{+}_{CD} = M_{CD} + \frac{V^2_{CD}}{2w} = -6{,}912.5 + \frac{8{,}295^2}{2 \times 2{,}765} = 5{,}530 \ \ kg \cdot m$$

คานรับโมเมนต์ดัดสูงสุด $M = 6{,}912.5 \ \ kg \cdot m = 691{,}250 \ \ kg \cdot cm$

คานขนาด $0.25 \times 0.50 \ m^2$ มี b = 25 cm , h = 50 cm พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล R = 9.32 ksc ให้เหล็กทางขวาง RB 6 mm เหล็กเสริมรับแรงดึง RB 19 mm สองชั้น เหล็กรับแรงอัด RB 19 mm ชั้นเดียว

$$d = 50 - 4 - 0.6 - 1.9 - \frac{2.5}{2} = 42.25 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.6 + \frac{1.9}{2} = 5.55 \ \ cm$$

$$M_R = Rbd^2 = 9.32 \times 25 \times 42.25^2 = 415{,}919.5625 \ \ kg \cdot cm < M = 691{,}250 \ \ kg \cdot cm$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1 - k} = 2 \times 1{,}200 \times \frac{0.321 - \frac{5.55}{42.25}}{1 - 0.321} = 670.3 \ \ ksc < f_s = 1{,}200 \ \ ksc$$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{691{,}250 - 415{,}919.5625}{670.3 \times (42.25 - 5.55)} = 11.192 \ \ cm^2$$

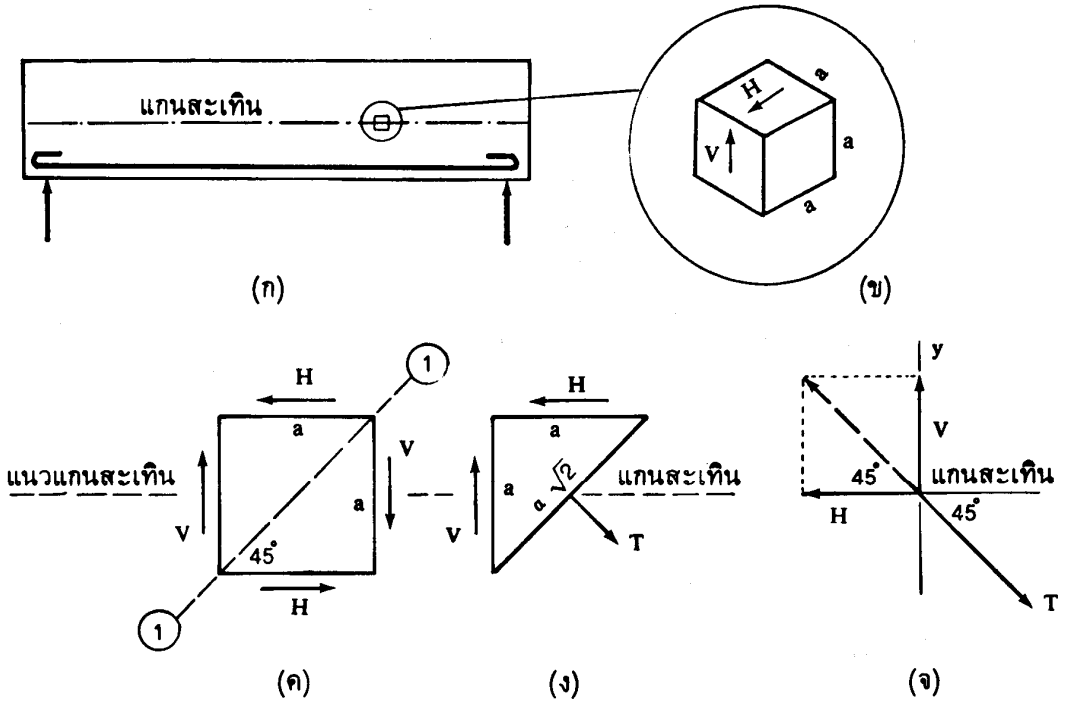
$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{415{,}919.5625}{1{,}200 \times 0.893 \times 42.25} + \frac{691{,}250 - 415{,}919.5625}{1{,}200 \times (42.25 - 5.55)}$$

$$A_{st} = 9.186 + 6.252 = 15.438 \ \ cm^2 > A_{sc} \quad \text{O.K.}$$

เหล็ก B 19 mm แต่ละเส้นมีเนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.9^2 = 2.835 \ \ cm^2$ ดังนั้นเหล็กรับแรงดึงต้องการจำนวน $\frac{15.438}{2.835} = 5.45 \Rightarrow 6$ เส้น จำนวนเหล็กรับแรงอัดที่ต้องการ $\frac{11.192}{2.835} = 3.95 \Rightarrow 4$ เส้น

เขียนรายละเอียดคานดังแสดง ปกติเหล็กโตกว่า 16 mm จะไม่นิยมงอคอม้า โดยอาจจะใช้การเสริมพิเศษซึ่งต้องให้เลยจุดที่ต้องการออกไป $b_w + d$

2.6 แรงเฉือนและแรงดึงทแยงในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับแรงดึงทแยง

พิจารณารูปที่ 2.15(ก) ถ้าตัดสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็กๆ บริเวณแกนสะเทินขนาดยาวด้านละ a โดย a เล็กมากจนเกือบเป็น 0 นำมาเขียนขยายดังรูปที่ 2.15(ข) เพื่อดูได้สะดวก สังเกตด้านดิ่งมีแรงเฉือน V และด้านบนมีแรงเฉือน H เมื่อมองด้านที่ไม่มีแรงเฉือนจะเห็นดังรูปที่ 2.15(ค) ในสมการสมดุลของแรงและโมเมนต์

$\left[\sum F_x = 0\right]$ $\quad H_{บน} = H_{ล่าง}$

$\left[\sum F_y = 0\right]$ $\quad V_{ซ้าย} = V_{ขวา}$

$\left[\sum M = 0\right]$ $\quad Va = Ha$ $\quad$ หรือ $V = H$

หน่วยแรงเฉือนทางดิ่งและทางนอนมีค่าเท่ากัน

ตัดตามแนว (1)-(1) เขียนดังรูปที่ 2.15(ง) ด้านทแยงมีเนื้อที่ = $a\left(a\sqrt{2}\right) = a^2\sqrt{2}$ และมีแรงดึง T กระทำ เขียนแผนภาพของแรงดังรูปที่ 2.15(จ) ใช้สมการสมดุล

$\left[\sum F = 0\right]$ $\quad T^2 = V^2 + H^2$

ถ้าให้ v เป็นหน่วยแรงเฉือน จะได้ว่า $V = va^2$ และ $H = va^2$ และให้ t เป็นหน่วยแรงดึงในแนวทแยง จะได้ $T = ta^2\sqrt{2}$ แทนค่าในสมการสมดุล

$$\left(ta^2\sqrt{2}\right)^2 = \left(va^2\right)^2 + \left(va^2\right)^2$$

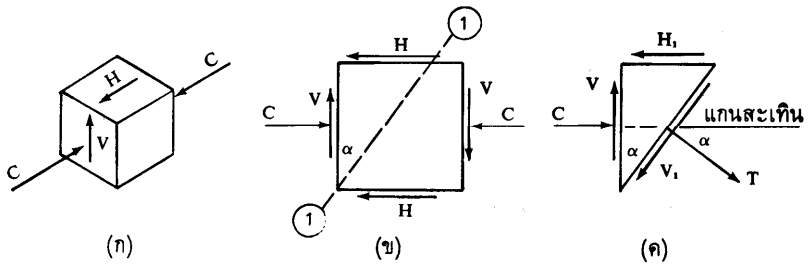
$$2t^2a^4 = v^2a^4 + v^2a^4$$

$$2t^2a^4 = 2v^2a^4$$

$$t^2 = v^2$$

$$t = v$$

แสดงว่าที่บริเวณแกนสะเทิน หน่วยแรงดึงทแยง t ในแนว 45 องศากับแกนสะเทิน จะเท่ากับหน่วยแรงเฉือน v ในแนวดิ่งและแนวนอน



รูปที่ 2.16 แรงเฉือนและแรงดึงทแยงเมื่อมีแรงอัด C

ในกรณีที่ตัดสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จากตำแหน่งอื่นนอกแกนสะเทิน จะมีแรงอัด C จากโมเมนต์ดัด หรือ C ทำให้เกิดหน่วยแรงดัด f อาศัยความรู้จากวิชากำลังวัสดุในเรื่องวงกลมของโมห์ จะได้หน่วยแรงดึงสูงสุด

$$t = \frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + v^2}$$

โดยทำมุม α กับแนวแกนคานหรือแกนสะเทิน หามุม α ได้จาก

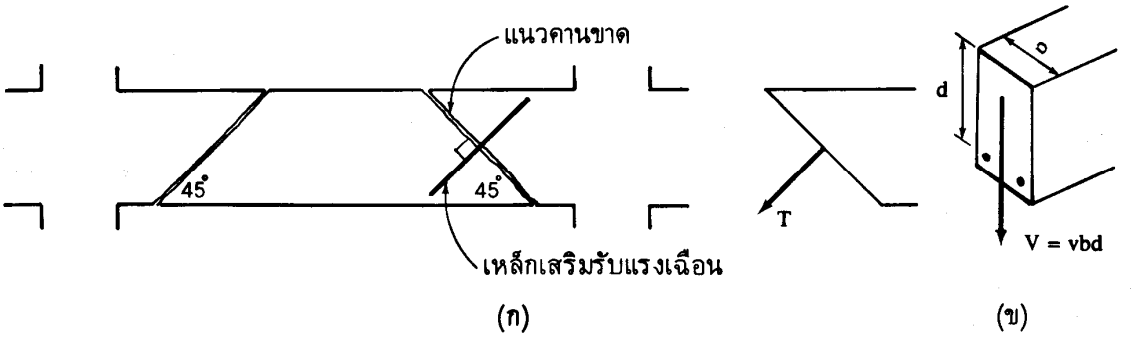
$$\tan 2\alpha = \frac{2v}{f}$$

จากการที่ v = t และคอนกรีตรับแรงดึงได้ไม่ดีจึงทำให้คานร้าวในแนวประมาณ 45 องศา ที่แกนสะเทิน ดังนั้นจึงต้องมีเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กทางขวาง หรือบางครั้งอาจจะเป็นเหล็กคอมม้าช่วยรับแรงดึงทแยงที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือนนี้

พิจารณารูปที่ 2.17(ก) เป็นสภาพการร้าวหรือคานขาดเนื่องจากแรงดึงทแยง แต่เนื่องจาก v = t ดังนั้นจึงต้องหาหน่วยแรงเฉือน v จากหน้าตัดคานตรงๆ โดยคิดเต็มความกว้างคาน b และถึงความลึกประสิทธิผล d ดังรูปที่ 2.17(ข) ตามสมการ

$$v = \frac{V}{bd} \quad \text{หรือ} \quad V = vbd \tag{2.16}$$

หน่วยแรงเฉือนรวมนี้ต้องไม่เกิน $v_{c2} = 1.32\sqrt{f_c'}$ โดยในส่วนของคอนกรีตจะรับหน่วยแรงเฉือนไปเพียง $v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c'}$



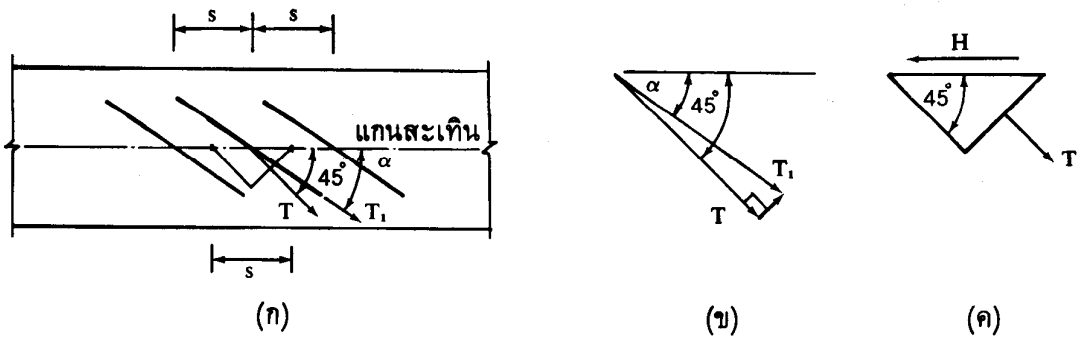
รูปที่ 2.17 การหาหน่วยแรงเฉือนทางดิ่งแทนหน่วยแรงดึงทแยง

2.7 การหาเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในคาน

ในกรณีแรงเฉือน V มากกว่าแรงเฉือนที่คอนกรีตรับไว้ได้หรือ $V_c = v_{c1}bd$ จะมีแรงเฉือนส่วนเกิน V' ที่ต้องใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยที่

$$V' = V - V_c$$

ตามความเป็นจริงนั้นเหล็กรับแรงเฉือนจะใช้รับแรงดึงทแยง ดังนั้นถ้าวางเอียงให้ตั้งฉากกับแนวที่คานขาดในรูปที่ 2.17(ก) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนจึงจะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก นิยมวางตั้งฉากกับแกนคาน



รูปที่ 2.18 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

สมมติให้ระยะเรียงของเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนห่างกัน s วัดตามแนวแกนสะเทินและเอียงทำมุม α กับแกนสะเทินดังรูปที่ 2.18(ก) แรงดึง T เป็นแรงดึงทแยงทำมุม 45 องศา แรงดึง T_1 เป็นแรงดึงในเหล็กลูกตั้ง ซึ่งแยกไปทำหน้าที่ T ดังรูปที่ 2.18(ข) ดังนั้น

$$T = T_1 \cos(45^\circ - \alpha)$$

$$T = T_1 (\cos 45^\circ \cos\alpha + \sin 45^\circ \sin\alpha)$$

$$T = T_1\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\cos\alpha + \frac{1}{\sqrt{2}}\sin\alpha\right)$$

$$T = \frac{T_1}{\sqrt{2}}(\cos\alpha + \sin\alpha)$$

แต่ $T_1 = A_v f_v$

$A_v =$ เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กลูกตั้งคิด 2 ขา, cm^2

$f_v = f_s =$ หน่วยแรงดึงของเหล็กลูกตั้ง, ksc

เหล็กเสริมห่างกัน s พิจารณาแท่งคอนกรีตสามเหลี่ยมกว้าง b ด้านตรงกันข้ามมุมฉากยาว s ดังรูปที่ 2.18(ค) จะพบว่า $H = v'bs$ เมื่อใช้สมการสมดุลจะได้

$$T = H\cos 45^o = \frac{v'bs}{\sqrt{2}}$$

โดย v' เป็นหน่วยแรงเฉือนส่วนเกิน หาได้จาก

อ

ดังนั้น $$T = \frac{V'}{bd}\times\frac{bs}{\sqrt{2}} = \frac{V's}{d\sqrt{2}}$$

แทนค่า T และ T_1

$$\frac{V's}{d\sqrt{2}} = \frac{A_v f_v}{\sqrt{2}}(\cos\alpha + \sin\alpha)$$

$$s = \frac{A_v f_v d}{V'}(\cos\alpha + \sin\alpha) \qquad (2.17)$$

ถ้ามุม $\alpha = 45^o$ $\cos\alpha + \sin\alpha = \cos 45^o + \sin 45^o = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}$

$$s = \frac{A_v f_v d\sqrt{2}}{V'} \qquad (2.18)$$

กรณีที่นิยมใช้เป็นเหล็กลูกตั้ง มุม $\alpha = 90^o$

$$\cos\alpha + \sin\alpha = \cos 90^o + \sin 90^o = 0 + 1 = 1$$

$$s = \frac{A_v f_v d}{V'} = \frac{A_v f_v d}{V - V_c} \qquad (2.19)$$

เหล็กตามยาวคานขนาด 20 mm ลงมาให้ใช้เหล็กลูกตั้งไม่เล็กกว่า RB 6 mm แต่ละวงจะมี 2 ขา ดังนั้นเนื้อที่หน้าตัดรับแรงเฉือน $A_v = 2\times\frac{\pi}{4}\times 0.6^2 = 0.565\ cm^2$ หากคำนวณหาระยะ s ตามสมการ (2.19) และถี่กว่า 0.075 เมตร ให้เพิ่มจำนวนวงในหนึ่งชุดมากขึ้น ระยะเรียงจะมากขึ้นตามจำนวนวง

เหล็กตามยาวคานตั้งแต่ 25 mm ขึ้นไปควรจะใช้เหล็กปลอก RB 9 mm แต่ละวงจะมี 2 ขา ดังนั้น เนื้อที่หน้าตัดรับแรงเฉือน $A_v = 2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 1.272 \text{ cm}^2$ หากคำนวณหาระยะ s ตามสมการ (2.19) และถี่กว่า 0.075 เมตร ให้เพิ่มจำนวนวงในหนึ่งชุดมากขึ้น ระยะเรียงจะมากขึ้นตามจำนวนวง

ข้อกำหนดสำคัญในการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

(1) หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนห่างขอบในของที่รองรับระยะ d เหล็กรับแรงเฉือนวงแรกห่างขอบที่รองรับไม่เกิน $\frac{s}{2}$ และไม่เกิน $\frac{d}{2}$ และไม่เกิน 30 cm

(2) หน่วยแรงเฉือนรวมไม่เกิน $1.32\sqrt{f_c'}$ ส่วนที่คอนกรีตรับ $v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c'}$

(3) ระยะเรียงสูงสุดไม่เกิน $s_{max} \le \frac{A_v}{0.0015b}$ รวมทั้งใช้ในกรณี $v \le v_{c1}$

กรณีที่ $0 \le v \le 0.795\sqrt{f_c'}$ ให้คำนวณระยะเรียงจาก

$$s = \frac{A_v f_v d}{V'}$$

$$s \le \frac{d}{2}$$

$$s \le 60 \text{ cm}$$

กรณีที่ $0.795\sqrt{f_c'} < v \le 1.32\sqrt{f_c'}$ ให้คำนวณระยะเรียงจาก

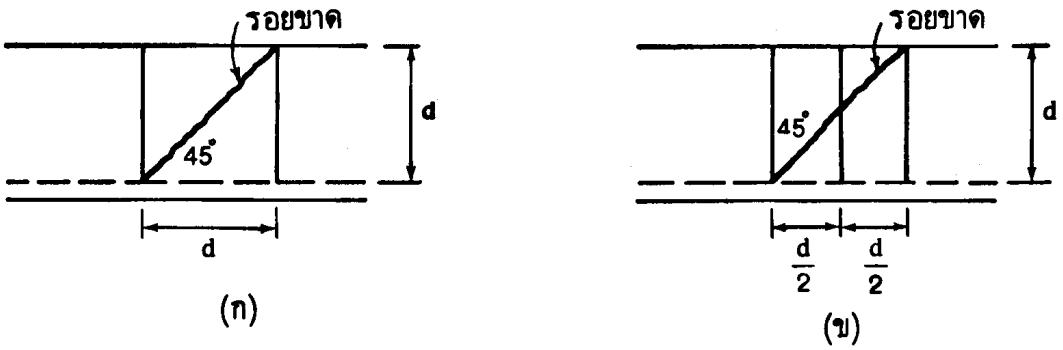
$$s = \frac{A_v f_v d}{V'}$$

$$s \le \frac{d}{4}$$

$$s \le 30 \text{ cm}$$

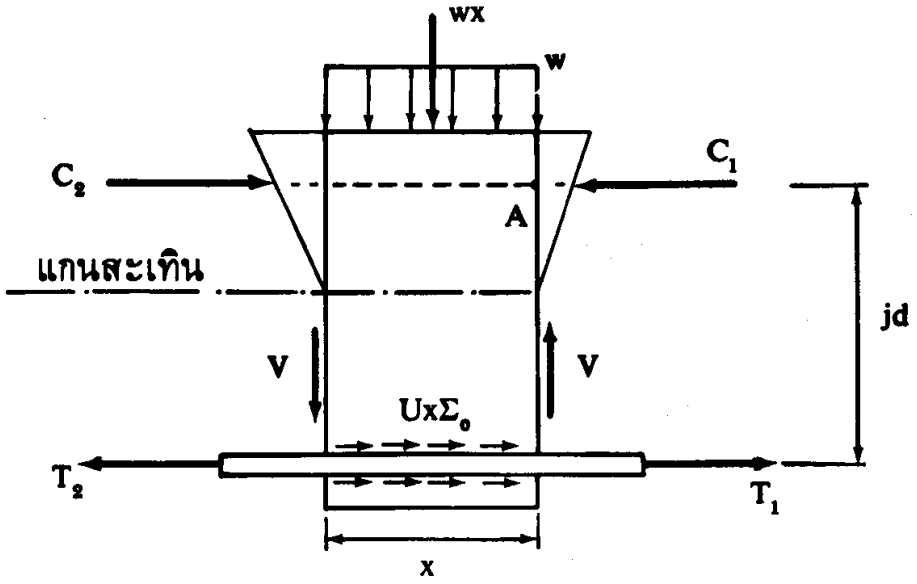
(4) เหล็กคอม้าให้พิจารณารับแรงเฉือนได้เพียง $\frac{3}{4}$ ของช่วงกลางส่วนที่เอียง

(5) เหล็กคอม้าที่ห่างจากฐานรองรับเท่ากัน ให้รับแรงเฉือน $V' = A_v f_v \sin\alpha$



รูปที่ 2.19 การเสริมเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนขวางทางรอยขาด

2.8 แรงยึดเหนี่ยว



รูปที่ 2.20 การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม

พิจารณารูปที่ 2.20 ตัดคานมายาว x ซึ่งเป็นขนาดสั้นมากๆ จนเกือบเป็น 0 ทำให้น้ำหนัก wx มีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ แรงเฉือน V ทั้งสองข้างจึงถือว่าเท่ากัน แต่แรงอัด C_1 กับ C_2 ไม่เท่ากัน แรงดึง T_1 กับ T_2 ต่างกันโดยมีแรงยึดเหนี่ยว $ux\sum O$ ช่วยยึดให้เหล็กไม่รูดออกจากเนื้อคอนกรีต ชิ้นส่วนของคานนี้อยู่ในสภาพสมดุล ให้จุด A ซึ่งอยู่ในแนวของแรง C_1 กับ C_2 เป็นจุดหมุน

$$\left[\sum M_A = 0\right] \qquad Vx - (T_2 - T_1)jd = 0$$

แต่เนื่องจาก $T_2 - T_1 = ux\sum O$

เมื่อ u = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้น, ksc

$\sum O$ = ผลรวมของเส้นรอบวงของเหล็กเสริม, cm

$x\sum O$ = เนื้อที่ผิวเหล็กเสริมที่คอนกรีตยึดเหนี่ยวอยู่, cm^2

แทนค่าในสมการสมดุลโมเมนต์รอบจุด A

$$Vx = ux\sum O \cdot jd$$

$$V = ujd\sum O$$

ดังนั้น

$$u = \frac{V}{\sum Ojd} \quad \text{หรือ} \quad \sum O = \frac{V}{ujd} \tag{2.20}$$

สังเกตว่า u จะมากในบริเวณที่มีแรงเฉือนมาก ถ้าผลรวมของเส้นรอบวง $\sum O$ มีค่าน้อยเหล็กจะรูดออกจากคอนกรีตและหากเป็นเหล็กข้ออ้อยส่วนของข้อจะดันเบ่งคอนกรีตปริแตก เปรียบเทียบเหล็กโตกับเหล็กเล็กซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากัน เหล็กโตจะมีเส้นรอบรูป $\sum O$ น้อยกว่าเหล็กเล็ก ดังนั้นบริเวณที่มีแรงเฉือนมากอย่างฐานรากนั้น การใช้เหล็กเล็กจะดีกว่าเหล็กโต

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ของคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย f_c' และเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง d_b หาได้จากสมการต่อไปนี้

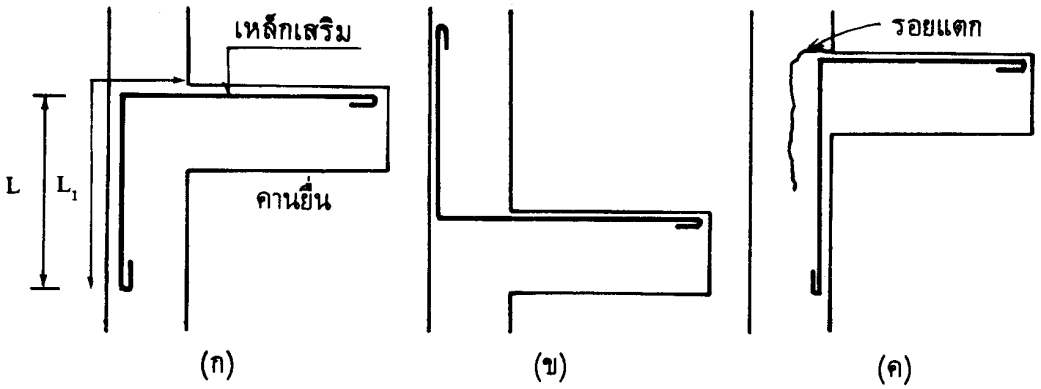
เหล็กบนรับแรงดึงผิวเรียบ $$u = \frac{2.29}{2}\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \quad (2.21)$$

เหล็กบนรับแรงดึงข้ออ้อย $$u = 2.29\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \quad (2.21)$$

เหล็กอื่นผิวเรียบ $$u = \frac{3.23}{2}\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \quad (2.21)$$

เหล็กอื่นข้ออ้อย $$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \quad (2.21)$$

เหล็กบน หมายถึงเหล็กที่มีคอนกรีตอยู่ข้างใต้ผิวลงไปไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร



รูปที่ 2.21 การล้วงเหล็กเพื่อให้ระยะฝังมากพอที่ยึดเหล็กไม่ให้รูด

รูปที่ 2.21(ก) และ (ข) เป็นการล้วงเหล็กเพิ่มระยะฝังโดยฝังเข้าภายในให้มากที่สุดแล้วล้วงเหล็กให้มากขึ้น แต่ถ้าล้วงเหล็กชิดผิวเสาด้านยื่นจะเกิดการฉีกร้าวในเสา แต่ปัจจุบันนี้การคำนวณระยะฝังแทนการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวจะให้คำตอบที่ใกล้เคียงผลการทดลองดีกว่า

ให้ d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม

เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริม $A_s = \frac{\pi d_b^2}{4}$

เส้นรอบวงเหล็กเสริม $\sum O = \pi d_b$

แรงดึงในเหล็กเสริมสูงสุด $A_s f_s = \frac{\pi d_b^2 f_s}{4}$

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต $u\sum OL_1 = \pi d_b u L_1$

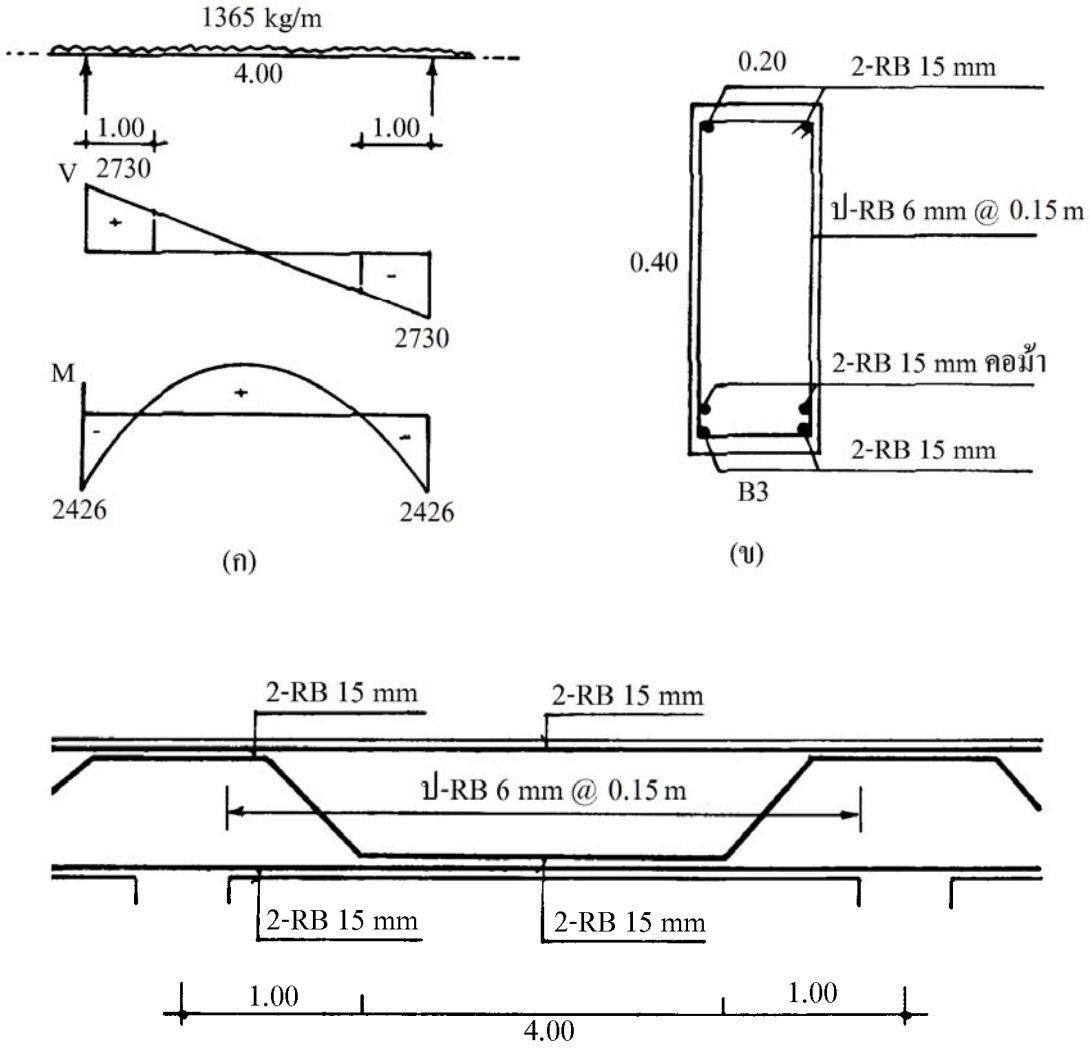
จากความสมดุลของแรง แรงดึงในเหล็กเท่ากับแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีต

$$\frac{\pi d_b^2 f_s}{4} = \pi d_b u L_1$$

ระยะฝัง
$$L_1 = \frac{d_b f_s}{4u} \qquad (2.22)$$

เหล็กข้ออ้อยระยะฝังไม่น้อยกว่า 30 cm และเหล็กผิวเรียบระยะฝังไม่น้อยกว่า 60 cm

ตัวอย่างที่ 2.6 จากตัวอย่างที่ 2.5 จงออกแบบคาน B3 ซึ่งรับเฉพาะพื้น S1 ไม่มีผนัง



รูปตัวอย่างที่ 2.6

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc = กำหนดกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

$f_y = 2400$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริมผิวเรียบ

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90$ ksc $\Rightarrow 65$ ksc ตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 2400 = 1200$ ksc

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1200}{8.72 \times 65}} = 0.321$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.321}{3} = 0.893$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.321 \times 0.893 = 9.32 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดคาน

คานมีช่วงยาวสูงสุด L = 4.00 m ความลึกคานขั้นต่ำที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งงอคือ

$$h = \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{4.00}{16}\left(0.4 + \frac{2400}{7000}\right) = 0.186 \text{ m}$$

ความลึกที่ประหยัดเหล็กเสริม

$$h = \frac{L}{10} = \frac{4.00}{10} = 0.40 \text{ m}$$

เลือกความลึกคาน $h = 0.40$ m $= 40$ cm

ความกว้างคาน

$$b \geq \frac{h}{5} = \frac{0.40}{5} = 0.08 \text{ m}$$

$$b \geq \frac{L}{35} = \frac{4.00}{35} = 0.114 \text{ m}$$

$b \geq 20$ cm

เลือกใช้ความกว้างคาน $b = 0.20$ m $= 20$ cm

น้ำหนักคาน $w_G = 2400bh = 2400 \times 0.20 \times 0.40 = 192$ kg/m

น้ำหนักของพื้น S1 หนา 0.10 $= 2400h_f = 2400 \times 0.10 = 240$ kg/m^2

น้ำหนักบรรทุกจร $= 200$ kg/m^2 รวมกับน้ำหนักพื้นเองได้ $w = 240 + 200 = 440$ kg/m^2

เนื่องจากคาน B3 เป็นขอบสั้นของพื้นที่มีความยาวขอบสั้น S = 4.00 m ความยาวขอบยาว L = 5.00 m

อัตราส่วน $m = \frac{S}{L} = \frac{4.00}{5.00} = 0.8$ พื้น S1 อยู่สองข้างของคาน B2 ดังนั้นน้ำหนักจากพื้น S1 บนคาน B3 คือ

$$w_s = 2 \times \frac{wS}{3} = 2 \times \frac{440 \times 4.00}{3} = 1{,}173 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวมบนคาน

$$w = 192 + 1{,}173 = 1{,}365 \ \ kg/m$$

วิเคราะห์คานโดยใช้สัมประสิทธิ์โมเมนต์สูงสุดที่บริเวณหัวเสา

$$M = \frac{1}{9} wL^2 = \frac{1}{9} \times 1{,}365 \times 4.00^2 = 2{,}427 \ \ kg \cdot m = 242{,}700 \ \ kg \cdot cm$$

สมมติเหล็กรับแรงเฉือน RB 6 mm เหล็กรับแรงดึง RB 15 mm สองชั้น เหล็กรับแรงอัด RB 15 mm หนึ่งชั้น ระยะหุ้มคอนกรีตบนล่าง 4 cm ดังนั้น

$$d = 40 - 4 - 0.6 - 1.5 - \frac{2.5}{2} = 32.65 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.6 + \frac{1.5}{2} = 5.35 \ \ cm$$

$$f_s^{'} = 2 f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1 - k} = 2 \times 1{,}200 \times \frac{0.321 - \frac{5.35}{32.65}}{1 - 0.321} = 555.43 \ \ ksc$$

$$M_R = Rbd^2 = 9.32 \times 20 \times 32.65^2 = 198{,}706.594 \ \ kg \cdot cm < M = 242{,}700 \ \ kg \cdot m$$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{242{,}700 - 198{,}706.594}{555.43 \times (32.65 - 5.35)} = 2.901 \ \ cm^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{198{,}706.594}{1{,}200 \times 0.893 \times 32.65} + \frac{242{,}700 - 198{,}706.594}{1{,}200 \times (32.65 - 5.35)}$$

$$A_{st} = 5.679 + 1.343 = 7.022 \ \ cm^2$$

เหล็ก RB 15 mm เนื้อที่หน้าตัดเส้นละ $A_{s1} = \frac{\pi \times 1.5^2}{4} = 1.767 \ \ cm^2$ เหล็กรับแรงดึงใช้จำนวนเส้น $N = \frac{7.022}{1.767} = 3.97 \Rightarrow 4$ เส้น ตรงตามที่สมมติไว้ เหล็กรับแรงอัดใช้จำนวนเส้น $N = \frac{2.901}{1.767} = 1.64 \Rightarrow 2$ เส้น ตรงตามที่สมมติไว้

ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน พิจารณาแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตตรงระยะ d จากขอบเสา ในกรณีนี้ไม่ทราบขนาดเสาจึงพิจารณาจากศูนย์กลางคาน

$$V = \frac{wL}{2} - wd = \frac{1{,}365 \times 4.00}{2} - 1{,}365 \times 0.3265 = 2{,}284.3275 \ \ kg$$

$$V_c = v_{c1} bd = 0.29 \sqrt{f_c^{'}} bd = 0.29 \sqrt{240} \times 20 \times 32.65 = 2{,}933.707425 \ \ kg > V$$

ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในขั้นต่ำ เมื่อใช้ RB 6 mm หนึ่งวงจะมี

$$A_v = 2\times\frac{\pi\times 0.6^2}{4} = 0.565 \ \text{cm}^2$$

$$s \le \frac{A_v}{0.0015b} = \frac{0.565}{0.0015\times 20} = 18.84 \ \text{cm}$$

$$s \le \frac{d}{2} = \frac{32.65}{2} = 16.325 \ \text{cm}$$

$$s \le 60 \ \text{cm}$$

เสริมเหล็กลูกตั้ง RB 6 mm @ 0.15 m

เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 2.7 จงออกแบบคาน RB10 ในรูป(ก) โดย RB9 เป็นกันสาดสูง 2.00 เมตร หนา 0.12 เมตร ฝากบนคาน RB10 พื้นคอนกรีต S12 หนา 0.10 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 100 kg/m^2 คาน RB8 เป็นจั่วขนาดใหญ่ 0.25×2.00 m^2 เสา C1 เป็นเสากลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร คาน RB7 อยู่ที่ระดับบนจั่วและต่างระดับกับ RB10 เหล็กจากคานให้ล้วงลงในเสา กำหนดระยะฝัง สมมติว่าขณะก่อสร้างนั้นช่างเหล็กลืมเสียบเหล็กของ RB10 ลงในเสาเอาไว้ หากจะแก้ปัญหานี้โดยไม่ต้องทุบเสาแล้วหล่อใหม่ ต้องทำอย่างไร

วิธีทำ หากเป็นการออกแบบทั้งระบบ ในแปลนนี้จะต้องออกแบบคาน RB9 แล้วจึงจะถ่ายน้ำหนักลงคาน RB10 ตัวอย่างนี้ออกแบบเฉพาะ RB10 เท่านั้น

แผ่นพื้น S12 หนา 0.10 เมตร น้ำหนักบรรทุกจร 100 kg/m^2 น้ำหนักรวมบนแผ่นพื้นคือ

$$w = 2400\times 0.10 + 100 = 340 \ \text{kg/m}^2$$

อัตราส่วน $m = \frac{S}{L} = \frac{1.50}{4.00} = 0.375$ คาน RB10 เป็นขอบสั้นของ S12 ละมีสองข้าง น้ำหนักจาก S12 ลงบนคาน RB10 คือ

$$w_s = 2\times\frac{wS}{3} = 2\times\frac{340\times 1.50}{3} = 340 \ \text{kg/m}$$

คาน RB9 เป็นขอบยาวของ S12 และมีอยู่ข้างเดียว น้ำหนักจาก S12 ลงบนคาน RB9 คือ

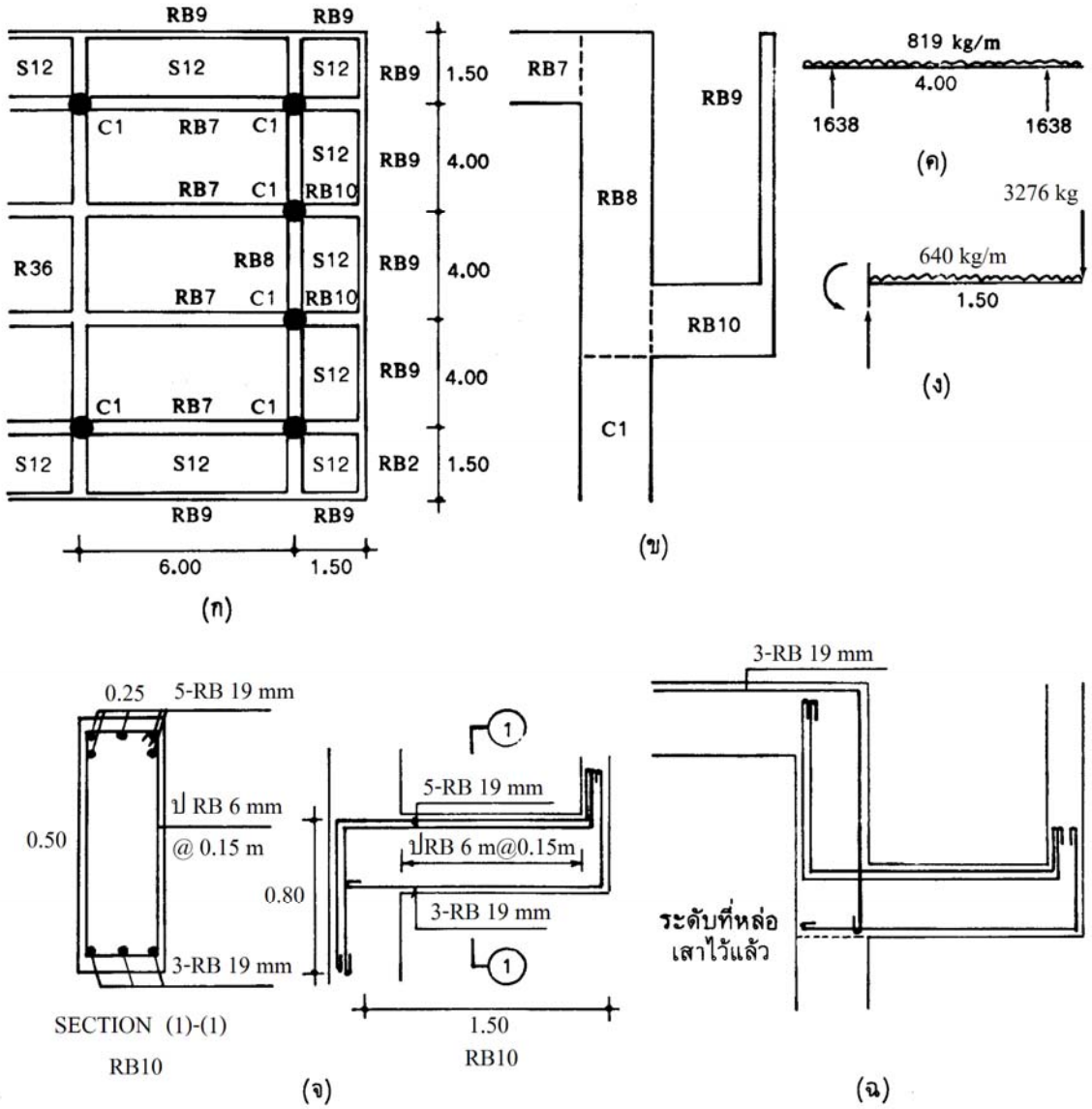
$$w_s = \frac{wS}{3}\frac{3-m^2}{2} = \frac{340\times 1.50}{3}\times\frac{3-0.375^2}{2} = 243 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักของคาน RB9 ซึ่งกว้าง 0.12 เมตร ลึก 2.00 เมตร คือ

$$w_G = 2400\times 0.12\times 2.00 = 576 \ \text{kg/m}$$

รวมน้ำหนักแผ่กระจายบนคาน RB9

$$w = 576 + 243 = 819 \ \text{kg/m}$$



รูปตัวอย่างที่ 2.7

เขียน RB9 ดังรูป (ค) แรงปฏิกิริยาจากคานช่วงเดียวคือ

$$V_1 = \frac{wL}{2} = \frac{819 \times 4.00}{2} = 1{,}638 \text{ kg}$$

คาน RB10 จะรับน้ำหนักแบบจุดจากคาน RB9 สองข้าง ดังนั้นน้ำหนักแบบจุดที่ปลายคานคือ

$$P = 2V_1 = 2 \times 1{,}638 = 3{,}276 \text{ kg}$$

เลือกคาน RB10 ขนาดกว้าง b = 0.25 m, h = 0.50 m ใช้เหล็กลูกตั้ง RB 6 mm เหล็กรับแรงดึง RB 19 mm สองชั้น เหล็กรับแรงอัด RB 19 mm ชั้นเดียว ระยะหุ้มบนล่าง 4 cm ดังนั้นความลึกประสิทธิผลและตำแหน่งเหล็กรับแรงอัดคือ

$$d = 50 - 4 - 0.6 - 1.9 - \frac{2.5}{2} = 42.25 \text{ cm}$$

$$d' = 4 + 0.6 + \frac{1.9}{2} = 5.55 \text{ m}$$

กำหนดกำลังอัดประลัยทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน $f_c' = 173$ ksc เหล็ก SR-24 มีกำลังคราก $f_y = 2{,}400$ ksc ดังนั้นพารามิเตอร์ในการออกแบบดังนี้

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{173}} = 10.27$$

$$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 173 = 64.875 \text{ ksc}$$

$$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 2{,}400 = 1{,}200 \text{ ksc}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}200}{10.27 \times 64.875}} = 0.357$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.357}{3} = 0.881$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 64.875 \times 0.357 \times 0.881 = 10.202 \text{ ksc}$$

$$v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{173} = 3.814 \text{ ksc}$$

$$v_{c2} = 0.59\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{173} = 6.971 \text{ ksc}$$

$$v_{c3} = 0.795\sqrt{f_c'} = 0.795\sqrt{173} = 10.456 \text{ ksc}$$

$$v_{c4} = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{173} = 17.362 \text{ ksc}$$

$$v_{c5} = 1.65\sqrt{f_c'} = 1.65\sqrt{173} = 21.702 \text{ ksc}$$

น้ำหนักของคาน RB10 คือ

$$w_G = 2400bh = 2400 \times 0.25 \times 0.50 = 300 \text{ kg/m}$$

น้ำหนักแผ่บนคาน RB10 จากพื้น S12 และน้ำหนักคานเอง คือ

$$w = 300 + 340 = 640 \text{ kg/m}$$

เขียนรูปคานดังรูป (ง) แล้ววิเคราะห์แรงเฉือนโมเมนต์ดัดดังนี้

$$M = PL + \frac{1}{2} wL^2$$

$$M = 3{,}276 \times 1.50 + \frac{1}{2} \times 640 \times 1.50^2$$

$$M = 5{,}634 \text{ kg} \cdot \text{m} = 563{,}400 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$V = P + wL - wd$$

$$V = 3276 + 640 \times 1.50 - 640 \times 0.4225$$

$$V = 3{,}965.6 \text{ kg}$$

$$M_R = Rbd^2 = 10.202 \times 25 \times 42.25^2 = 455,280.1906 \text{ kg.cm} < M$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1,200 \times \frac{0.357 - \frac{5.55}{42.25}}{1-0.357} = 842.2 \text{ ksc} < 1,200 \text{ ksc}$$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d-d')} = \frac{556,650 - 364,224.1525}{842.2 \times (42.25 - 5.55)} = 6.226 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d-d')}$$

$$A_{st} = \frac{455,280.1906}{1,200 \times 0.881 \times 42.25} + \frac{563,400 - 455,280.1906}{1,200 \times (42.25 - 5.55)}$$

$$A_{st} = 12.648 \text{ cm}^2$$

เหล็ก RB 19 mm มีเนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.9^2 = 2.835 \text{ cm}^2$ ดังนั้นเหล็กรับแรงดึงใช้จำนวน $\frac{12.648}{2.835} = 4.46 \Rightarrow 5$ เส้น จัด 3 เส้นหนึ่งชั้นและ 2 เส้นหนึ่งชั้น และเหล็กรับแรงอัดจำนวน $\frac{6.226}{2.835} = 2.2 \Rightarrow 3$ เส้นจัดชั้นเดียว ตรวจสอบระยะห่างระหว่างผิวเส้น โดยระยะหุ้ม 3.5 ซม

$$\text{ระยะห่างระหว่างเส้น} = \frac{25 - 3.5 \times 2 - 0.6 \times 2 - 1.9 \times 3}{3-1} = 8.083 \text{ cm} > 3.75 \text{ m} \text{ ใช้ได้}$$

$$V_c = v_{c1} bd = 3.814 \times 25 \times 42.25 = 4,028.54 \text{ kg} > V = 3,965.6 \text{ kg}$$

ต้องเสริมเหล็กปริมาณขั้นต่ำ $A_v = 0.0015bs$

$$s \le \frac{A_v}{0.0015b} = \frac{2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.6^2}{0.0015 \times 25} = 15.08 \text{ cm}$$

$$s \le \frac{d}{2} = \frac{42.25}{2} = 21.125 \text{ m}$$

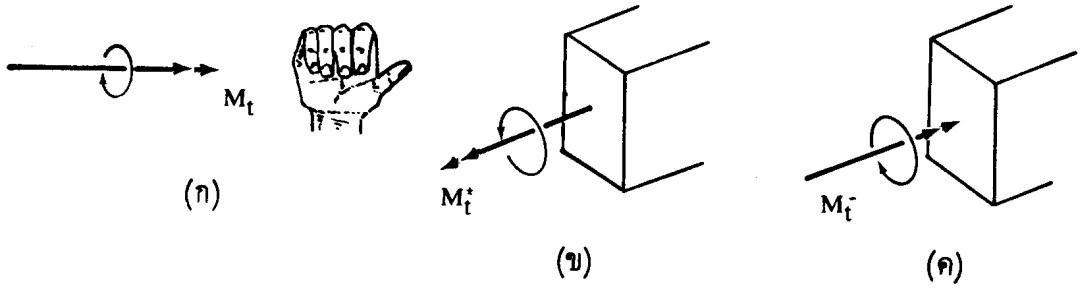
$$s \le 60 \text{ cm}$$

เขียนรายละเอียดโครงสร้างโดยเหล็กรับแรงดึงอยู่บนเหล็กรับแรงอัดอยู่ล่าง กรณีที่ลืมเสริมเหล็กคานล้วงลงเสาให้ใช้วิธีล้วงขึ้นดังรูป (ฉ) ละความล้วงเหล็กบนของคาน RB7 เพื่อป้องกันการพลิกของคาน RB8

ในการทำงานจริง จะทำการหล่อเสา C1 จนถึงท้องคาน RB10 ห่างลงมา 2.5 ซม เหล็ก 5-RB 19 mm จะต้องล้วงลงในเสาระยะ $12d_b = 12 \times 1.9 = 22.8 \text{ m} \Rightarrow 30 \text{ cm}$ ช่างมักจะลืมล้วงเหล็กหรือเสียบเหล็กเอาไว้ ให้แก้ไขโดยล้วงเหล็กขึ้นในคาน RB8 ดังรูป (ฉ)

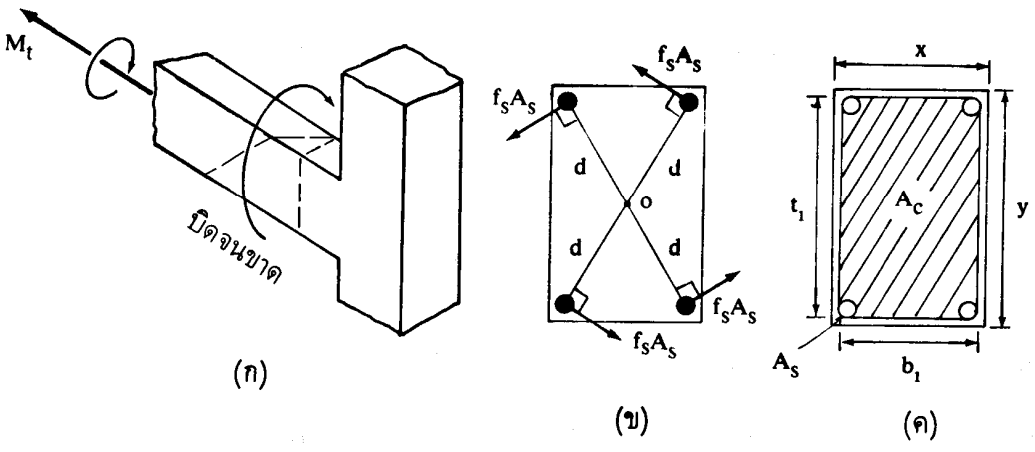
2.9 ความต้านทานต่อโมเมนต์บิด

ในบางกรณีโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องรับทั้งโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และโมเมนต์บิดพร้อมๆ กัน เช่นคานรองรับกันสาดหน้าตึกแถว คานโค้งในแนวราบ คานรับจั่วห้าท้ายอาคาร พร้อมทั้งกันสาดและแผงตั้งปลายกันสาด บันไดยื่นจากคานที่ฝังในกำแพง บันไดเวียน



รูปที่ 2.22 การกำหนดเวกเตอร์และเครื่องหมายของโมเมนต์บิด

โมเมนต์บิดมีลักษณะที่พยายามทำให้วัตถุบิดเป็นเกลียวรอบแกนกลาง ในขณะที่โมเมนต์ดัดพยายามทำให้วัตถุดัดโค้งโก่งงอ ในโมเมนต์บิดเป็นปริมาณเวกเตอร์กำหนดทิศทางตามกฎมือขวา ***กำมือขวาให้นิ้วหัวแม่มือเหยียดเต็มที่ชี้ตามลูกศรเวกเตอร์โมเมนต์บิด นิ้วทั้งสี่ที่กำนั้นจะชี้การวนของโมเมนต์บิดจากโคนนิ้ววนไปหาปลายนิ้ว*** ตามรูปที่ 2.22(ก) นอกจากนั้นควรมีข้อตกลงเรื่องเครื่องหมายโมเมนต์บิดว่า ***ถ้าเวกเตอร์โมเมนต์บิดชี้ออกจากหน้าตัดคานให้เป็นบวก*** ตามรูปที่ 2.22(ข) และถ้าชี้เข้าหาหน้าตัดคานให้เป็นลบ ตามรูปที่ 2.22(ค) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการถ่ายโมเมนต์บิดให้คานหรือเสาเป็นตัวรับไปอีกทอดหนึ่ง



รูปที่ 2.23 การรับโมเมนต์บิดโดยพิจารณาการขาดในระนาบหน้าตัด

ลักษณะการวิบัติของคานจากโมเมนต์บิดสำหรับวัสดุเปราะจะแตกในแนวทแยง ถ้าเป็นวัสดุเหนียวจะขาดตรงๆดังรูปที่ 2.23(ก) โมเมนต์บิดทำให้เหล็กเสริมมุมรับแรงเฉือน f_sA_s แล้วเกิดโมเมนต์บิด $4f_sA_sd$ แต่ในความเป็นจริงจะผสมกันโดยพิจารณาตามรูปที่ 2.23(ค) ค่า Ac เป็นแกนคอนกรีตภายในผิวนอกของเหล็กลูกตั้ง ดังนั้นเหล็กเสริมมุมแต่ละมุมหาได้จาก

$$A_{sa} = \frac{M_t z}{2A_c f_s} \tag{2.23}$$

เมื่อ $M_t =$ โมเมนต์บิดกระทำบนหน้าตัด , $kg \cdot cm$

$A_{sa} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมมุมแต่ละมุม, cm^2

$x =$ ด้านสั้นหรือด้านกว้างของหน้าตัดคาน, cm

$y =$ ด้านยาวหรือด้านลึกของหน้าตัดคาน, cm

$d_{bs} =$ ขนาดเหล็กลูกตั้ง, cm

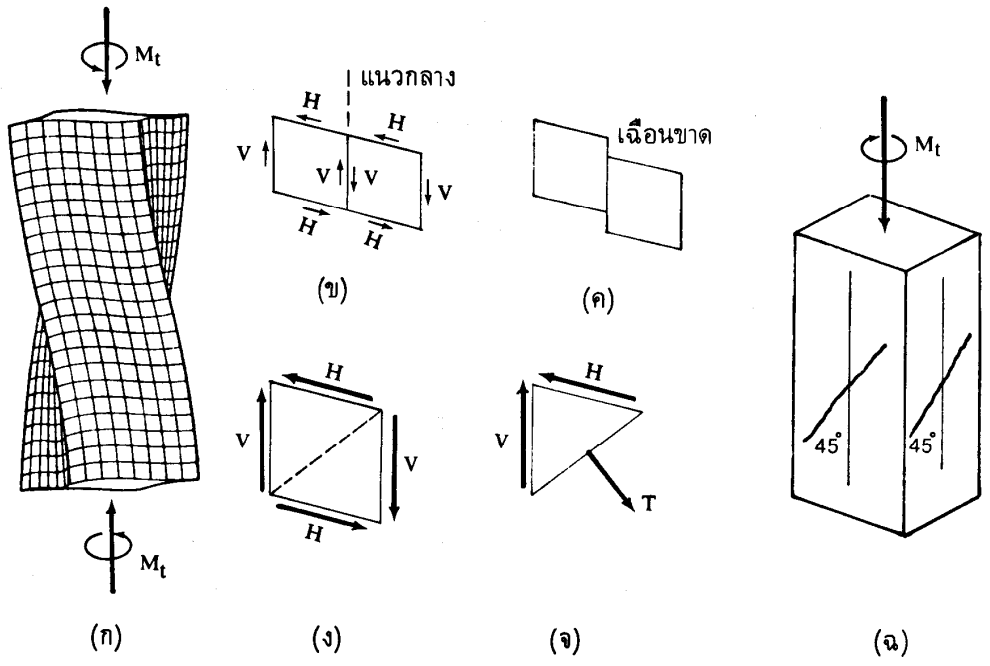
$b_1 = x - 3.5 - 3.5 = x - 7 =$ ระยะภายในผิวนอกเหล็กลูกตั้งทางกว้าง, cm

$t_1 = y - 4 - 4 = y - 8 =$ ระยะภายในผิวนอกเหล็กลูกตั้งทางลึก, cm

$A_c = b_1 t_1 =$ เนื้อที่หน้าตัดแกนคานภายในผิวนอกของเหล็กลูกตั้ง , cm^2

$z = \frac{b_1 + t_1}{2} - d_{bs} =$ ค่าเฉลี่ยระยะห่างของเหล็กเสริม, cm

$f_s = 0.5f_y =$ หน่วยแรงเฉือนของเหล็กเสริม, ksc



รูปที่ 2.24 การเกิดแรงดึงทแยงเนื่องจากโมเมนต์บิด

พิจารณารูปที่ 2.24(ก) เป็นแท่งยางที่ขีดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กๆ ทุกด้าน เมื่อให้โมเมนต์บิดที่ปลายทั้งสองจนแท่งยางบิดเบี้ยวไป พิจารณาการโย้ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่งต่างๆ จะพบว่าจัตุรัสที่กึ่งกลางของทุกด้านนั้นโย้ไปมากที่สุด แล้วลดลงจนไม่โย้เลยตรงมุมทั้งสี่ เอาจัตุรัสสองรูปติดกันตรงกึ่งกลางมาพิจารณาดังรูปที่ 2.24(ข) ลักษณะการโย้จะพยายามเฉือนให้จัตุรัสขาดจากกันตามรูปที่ 2.24(ค) แรงเฉือน H และ V ซึ่งเท่ากันจะทำให้เกิดแรงดึงทแยง T ดังรูปที่ 2.24(จ) ในขณะที่คอนกรีตเป็นวัสดุเปราะรับแรงดึงได้น้อยจึงเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงทแยงตามรูปที่ 2.24(ฉ) จำเป็นต้องเสริมเหล็กทางขวางรับแรงดึงทแยง แล้วยังต้องมีเหล็กเสริมตามยาวกระจายรอบๆ ผิวคานด้วย

(1) การคำนวณออกแบบให้รับหน่วยแรงเฉือน v_t จากโมเมนต์บิด M_t ให้ใช้ค่า M_t ที่ระยะ d จากขอบในของจุดรองรับ หน่วยแรงเฉือนตามสมการ

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} \tag{2.24}$$

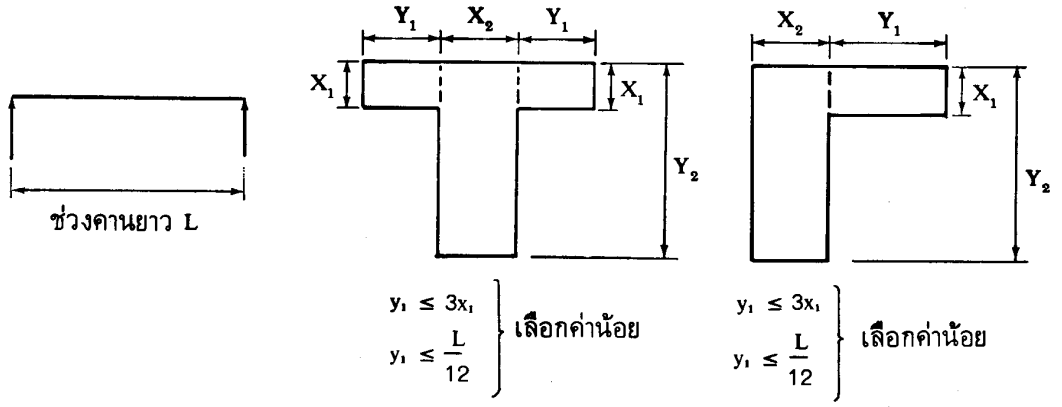
เมื่อ M_t = โมเมนต์บิดสูงสุดที่ระยะ d จากขอบในของที่รองรับ, $kg \cdot cm$

v_t = หน่วยแรงเฉือนที่กึ่งกลางความยาวของหน้าตัดคาน, ksc

x = ด้านสั้นของสี่เหลี่ยมผืนผ้าของหน้าตัด, cm

y = ด้านยาวของสี่เหลี่ยมผืนผ้าของหน้าตัด, cm

ในกรณีของคานรูปตัด T และ L ในรูปที่ 2.25 ความกว้างของปีกคานที่นำมาใช้คำนวณหา $\sum x^2 y$ จะต้องไม่เกิน 3 เท่าของความหนาของปีกคานและไม่เกิน $\frac{1}{12}$ ของช่วงคาน



รูปที่ 2.25 ข้อกำหนดระยะปีกคานในการคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์บิด

(2) หน่วยแรงเฉือน ตามสมการ (2.24) จะต้องไม่เกิน $1.32\sqrt{f'_c}$

(3) หน่วยแรงเฉือนรวมจากแรงเฉือนรวมกับโมเมนต์บิดต้องไม่เกิน $1.65\sqrt{f'_c}$

$$v = v_t + v_v = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} + \frac{V}{bd} \tag{2.25}$$

(4) หน่วยแรงเฉือนที่ต้อนทานโดยคอนกรีต $v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c'}$ ksc สำหรับคำนวณเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือน ที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.6

(5) เหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนจากโมเมนต์บิดที่พันครบรอบและเรียงชิดผิวพื้นที่สี่เหลี่ยม ไม่นับรวมเหล็กลูกตั้งที่อยู่ภายในที่รับเฉพาะแรงเฉือนหาได้จาก

$$A_t = \frac{M_t}{2A_c f_v} \text{ หรือ } \frac{2A_t}{s} = \frac{M_t}{A_c f_v} \qquad (2.26)$$

(6) เหล็กปลอกเกลียวสำหรับรับหน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์บิดเพียงอย่างเดียว หาได้จาก

$$A_t = \frac{M_t s}{2\sqrt{2}A_c f_v} \text{ หรือ } s = \frac{2\sqrt{2}A_t A_c f_v}{M_t} \qquad (2.27)$$

เมื่อ A_t = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กทางขวางรับแรงเฉือนขาเดียวขนาดไม่เล็กกว่า RB 9 mm, cm^2

$A_c = b_1 t_1 = (b-7)(h-8)$ = เนื้อที่แกนคอนกรีตภายในผิวนอกของเหล็กลูกตั้ง , cm^2

$f_v = 0.5f_y, f_y \le 4{,}200$ ksc หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของเหล็กทางขวาง, ksc

M_t = โมเมนต์บิดที่หน้าตัดวิกฤต, $kg \cdot cm$

s = ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง, cm

การออกแบบคานที่มีทั้งโมเมนต์ดัด แรงเฉือนและโมเมนต์บิด

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

f_c' = กำลังประลัยทรงกระบอกคอนกรีตที่อายุ 28 วัน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว = 2400 ksc (SR-24), = 3000 ksc (SD-30)
= 4000 ksc (SD-40) ไม่ใช้ SD-50 ในคาน จะมีใช้ในเสา

f_{sy} = กำลังครากของเหล็กทางขวางรับแรงเฉือน = 2400 ksc (SR-24), = 3000 ksc (SD-30)

$f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีตตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

$f_c = 0.45f_c'$ = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีตตาม ว.ส.ท. หรือ ACI, หน่วย ksc

$f_s = 0.5f_y \le 1700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริมตามยาวคาน

$f_v = 0.5f_{ys}$ = กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กทางขวาง, ksc

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.0993377}{\sqrt{f_c'}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \frac{1}{2}f_c kj$ = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

$v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับแรงเฉือนแบบคาน, ksc

$v_{c2} = 0.53\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับแรงเฉือนเจาะทะลุ, ksc

$v_{c3} = 0.795\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนที่ใช้ควบคุมระยะเรียงเหล็กทางขวาง , ksc

$v_{c4} = 1.32\sqrt{f_c'}$ = หน่วยรงเฉือนสูงสุดที่ยอมให้สำหรับกรณีไม่มีโมเมนต์บิด, ksc

$v_{c4} = 1.32\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับแรงเฉือนจากโมเมนต์บิด, ksc

$v_{c5} = 1.65\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเอนสูงสุดที่ยอมให้เมื่อรวมผลของแรงเฉือนและโมเมนต์บิด,ksc

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดคาน ความลึกคานให้ประมาณดังนี้

$h \geq \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$ สำหรับคานทั่วไป และ $h \geq \frac{L}{8}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$ สำหรับคานยื่น เป็นความลึกขั้นต่ำที่ไม่ต้องแสดงการตรวจสอบการโก่งตัว

$h \geq \frac{L}{10}$ สำหรับคานทั่วไป และ $h \geq \frac{L}{5}$ สำหรับคานยื่น เป็นความลึกที่ทำให้ประหยัดเหล็กเสริม

เลือกความลึก h ที่คาดว่าจะใช้ได้ ประมาณความกว้างคานโดยที่

$b \geq \frac{h}{3}$ คานที่ต้องรับโมเมนต์บิดด้วยควรกว้างมากกว่าคานทั่วๆไป

$b \geq \frac{L}{35}$ = คานที่ยาวและแบนจะบิดพลิกได้ง่าย

$b \geq 0.20$ m เผื่อความกว้างให้เหล็กของคานฝากฝังได้ไม่น้อยกว่า 15 ซม

ขั้นตอนที่ 3 ประมาณขนาดเหล็กลูกตั้ง (ในกรณีรับโมเมนต์บิดด้วยให้ใช้ค่าขั้นต่ำ RB 9 mm) ขนาดเหล็กรับแรงดึง และจำนวนชั้น (ควรประมาณที่ 2 ชั้นไว้ก่อน ระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 cm) ประมาณขนาดเหล็กรับแรงอัด และจำนวนชั้น (ตอนแรกให้เลือก 1 ชั้น) ระยะหุ้มบนล่าง 4 cm ระยะหุ้มซ้ายขวา 3.5 cm

ความลึกประสิทธิผล d = ความลึก h – ระยะหุ้ม 4 cm – ขนาดเหล็กลูกตั้ง 0.9 เm – เหล็กชั้นที่ 1 – ครึ่งหนึ่งของช่องว่างระหว่างชั้นที่หนึ่งกับชั้นที่สอง

ตำแหน่งเหล็กรับแรงอัด d'= ระยะหุ้ม 4 cm + ขนาดเหล็กลูกตั้ง 0.9 cm + ครึ่งหนึ่งของขนาดเหล็ก

ระยะในผิวนอกของเหล็กทางขวาง ทางกว้าง

$$x_1 = x - 3.5 - 3.5 = x - 7 = b - 7 \text{ cm}$$

ระยะในผิวนอกของเหล็กทางขวาง ทางลึก

$$y_1 = y - 4 - 4 = y - 8 = h - 8 \text{ cm}$$

พื้นที่แกนคอนกรีต

$$A_c = x_1 y_1$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณกำลังที่รับได้

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2 \quad \text{หน่วย } kg \cdot cm$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd \quad \text{หน่วย } kg$$

โมเมนต์บิดสูงสุดที่รับได้

$$M_{t,max} = 1.32\sqrt{f_c'}\,\frac{b^2h}{3} \quad \text{หน่วย } kg \cdot cm$$

ขั้นตอนที่ 5 หาน้ำหนักบรรทุกแล้ววิเคราะห์หาโมเมนต์ดัด M สูงสุดที่อาจจะเกิดกลางคานหรือบริเวณจุดรองรับ แรงเฉือนสูงสุด V และโมเมนต์บิดสูงสุด M_t ที่ระยะ d จากขอบของที่รองรับ (หากไม่ทราบขนาดที่รองรับให้หาที่ระยะ d จากศูนย์กลางที่รองรับ

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบกำลัง

ถ้าพบว่า $M_t > M_{t,max}$ หมายความว่าหน้าตัดที่เลือกมานั้นมีขนาดเล็กเกินไปให้ปรับขนาดคานโตขึ้นจนได้ $M_t \le \frac{2}{3}M_{t,max}$

ขั้นตอนที่ 7 ออกแบบรับโมเมนต์ดัด

กรณีที่ $M \le M_R$ คานต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง

$$A_{sc} = 0$$

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd}$$

กรณีที่ $M > M_R$ คานต้องมีทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

$$f_s' = 2f_s\,\frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} \le f_s$$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s'(d-d')}$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d-d')}$$

ถ้าพบว่า $A_{sc} > A_{st}$ แสดงว่าหน้าตัดคานเล็กเกินไปให้เพิ่มขนาดโดยเฉพาะความลึก h ให้มากขึ้นจนกว่าจะได้ $A_{sc} < A_{st}$

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน

หน่วยแรงเฉือนจากแรงเฉือน

$$v_v = \frac{V}{bd}$$

ถ้าตรวจพบว่า $v_v > 1.32\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าคานเล็กเกินไป ให้ปรับขนาดคานจนได้ $v_v > 0.795\sqrt{f_c'}$

หน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์บิด

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y}$$

ถ้าตรวจพบว่า $v_t > 1.32\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าหน้าตัดคานเล็กเกินไป ให้ปรับขนาดคานจนได้ $v_t < 1.32\sqrt{f_c'}$

รวมผลของ $v_v + v_t$ แล้วตรวจสอบผล หากพบว่า $v_v + v_t > 1.65\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าหน้าตัดคานเล็กเกินไป ให้เพิ่มขนาดขึ้นจน $v_v + v_t < 1.65\sqrt{f_c'}$

ขั้นตอนที่ 9 ออกแบบเหล็กทางขวางรับแรงเฉือน ในกรณีที่มีโมเมนต์บิดด้วยให้ใช้ขนาดเหล็กทางขวางเล็กสุดไม่เล็กกว่า RB 9 mm

ในส่วนของแรงเฉือน ให้หา $V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd$ เป็นแรงเฉือนส่วนที่คอนกรีตรับได้

ถ้า $V \le V_c$ ให้

$$\frac{A_v}{s} = 0$$

ถ้า $V > V_c$ ให้

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V - V_c}{f_v d}$$

ในส่วนของโมเมนต์บิด

$$\frac{2A_t}{s} = \frac{M_t}{A_c f_v}$$

รวมผลของเหล็กลูกตั้ง

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = \left(0 + \frac{M_t}{A_c f_v}\right) \text{ or } \left(\frac{V - V_c}{f_v d} + \frac{M_t}{A_c f_v}\right)$$

ปริมาณขั้นต่ำของ $\frac{A_v + 2A_t}{s}$ ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{3.5b}{f_{sy}}$ ถ้าน้อยกว่าให้ใช้ $\frac{A_v + 2A_t}{s} = \frac{3.5b}{f_{sy}}$

แทนค่า $A_v + 2A_t$ ด้วยเนื้อที่เหล็กทางขวาง 2 ขา เช่น RB 9 mm ดังนั้น

$$A_v + 2A_t = 2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 1.272 \text{ cm}^2$$

แล้วหาระยะเรียง s จากนั้นเลือกค่าที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 10 ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือนตามยาว (ดัดแปลงจากวิธี SDM)

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามยาวทั้งหมด A_ℓ

$$A_\ell = 2A_t \frac{x_1 + y_1}{s}$$

แต่ปริมาณขั้นต่ำคือ

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - 2A_t \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

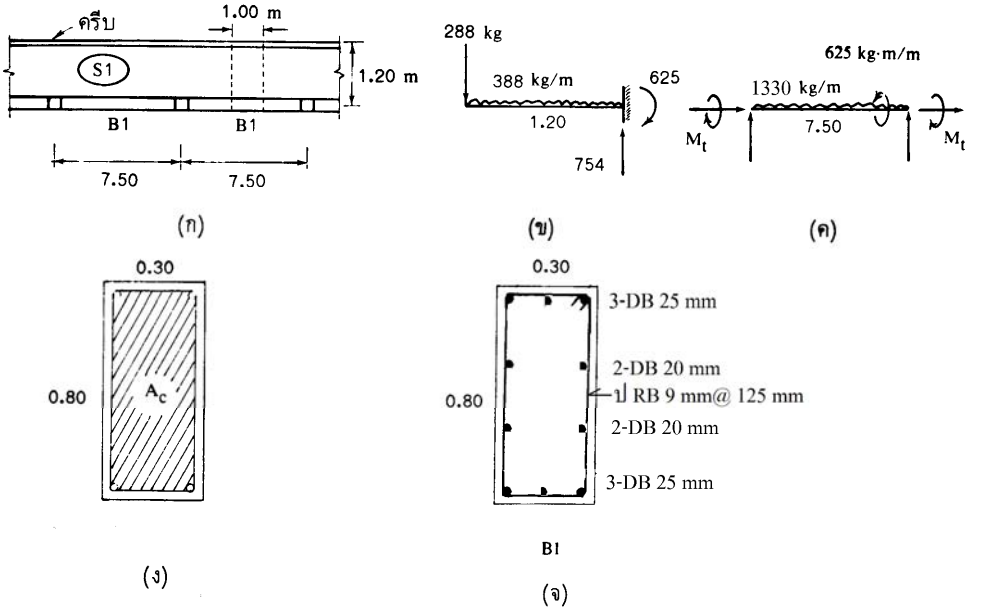
แต่ไม่ให้ใช้เกิน

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - \frac{3.5bs}{f_y} \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

โดย $C_t = \dfrac{bd}{\sum x^2 y}$

เมื่อได้ปริมาณเหล็กรับแรงเฉือนตามยาวให้แบ่งเป็นส่วนๆ ตามความลึกคาน โดยระยะห่างไม่เกิน 30 cm ส่วนที่ชิดบนและล่างนำไปรวมกับเหล็กรับโมเมนต์ ขนาดเหล็กเสริมตามยาวรับแรงเฉือนไม่เล็กกว่า RB 9 mm สำหรับเหล็กผิวเรียบ และไม่เล็กกว่า DB 10 mm สำหรับเหล็กข้ออ้อย

ตัวอย่างที่ 2.8 จงออกแบบคาน B1 ในรูป(ก) ซึ่งรับน้ำหนักจากหลังคา 400 kg/m กันสาด S1 หนา 0.12 m ครีบหนา 0.10 m สูง 1.20 m น้ำหนักบรรทุกจรลงบน S1 ให้คิด 100 kg/m^2



ตัวอย่างที่ 2.8

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$$f_c^{'} = 240 \ \text{ksc}$$

$$f_y = 3{,}000 \ \text{ksc}$$

$$f_{sy} = 2{,}400 \ \text{ksc}$$

$$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \ \text{ksc} \Rightarrow 65 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500 \ \text{ksc}$$

$$f_v = 0.5 f_{sy} = 0.5 \times 2{,}400 = 1{,}200 \ \text{ksc}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.908$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.908 = 8.086 \ \text{ksc}$$

$$v_{c1} = 0.29\sqrt{f_c^{'}} = 0.29\sqrt{240} = 4.493 \ \text{ksc}$$

$$v_{c2} = 0.53\sqrt{f_c^{'}} = 0.53\sqrt{240} = 8.211 \ \text{ksc}$$

$$v_{c3} = 0.795\sqrt{f_c^{'}} = 0.795\sqrt{240} = 12.316 \ \text{ksc}$$

$$v_{c4} = 1.32\sqrt{f_c^{'}} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \ \text{ksc}$$

$$v_{c5} = 1.65\sqrt{f_c^{'}} = 1.65\sqrt{240} = 25.562 \ \text{ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณขนาดคาน

$$h = \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{7.50}{16}\left(0.4 + \frac{3000}{7000}\right) = 0.39 \ \text{m}$$

$$h = \frac{L}{10} = \frac{7.50}{10} = 0.75 \ \text{m}$$

เลือกความลึกคาน $h = 0.80 \ \text{m} = 80 \ \text{cm}$ ประมาณความกว้างคาน

$$b \geq \frac{h}{3} = \frac{0.80}{3} = 0.27 \ \text{m}$$

$$b \geq \frac{L}{35} = \frac{7.50}{35} = 0.214 \ \text{m}$$

$$b \geq 0.20 \ \text{m}$$

เลือกความกว้างคาน $b = 0.30 \ \text{m} = 30 \ \text{cm}$

น้ำหนักคาน $w_G = 2400bh = 2400 \times 0.30 \times 0.80 = 576 \ \text{kg/m}$

ตัดครีบและพื้นกว้าง 1.00 เมตร นำมาเขียน Free-body diagram ดังรูป (ข) เพื่อคำนวณน้ำหนักและโมเมนต์ดัดถ่ายลงคานต่อไป

น้ำหนักครีบ $= 2400 \times 0.10 \times 1.20 = 288 \ \text{kg}$ เป็นน้ำหนักแบบจุดที่ปลายพื้น

น้ำหนักแผ่บนพื้น $= 2400 \times 0.12 + 100 = 388 \ \text{kg/m}$

แรงเฉือนของพื้นกลายเป็นน้ำหนักแผ่บนคาน $= 388 \times 1.20 + 288 = 753.6 \Rightarrow 754 \ \text{kg/m}$

โมเมนต์ดัดที่พื้นกลายเป็นโมเมนต์บิดที่คาน

$$m_t = 288 \times 1.20 + \frac{1}{2} \times 388 \times 1.20^2 = 624.96 \Rightarrow 625 \ \text{kg} \cdot \text{m/m}$$

ประมาณเหล็กทางขวาง RB 9 mm เหล็กเสริมเอก DB 25 mm สองชั้น เสริมเหมือนกันทั้งบนและล่าง เพื่อรับโมเมนต์บวกที่กลางช่วงคานและรับโมเมนต์ลบที่จุดรองรับ หาความลึกประสิทธิผลและตำแหน่งเหล็กรับแรงอัด

$$d = 80 - 4 - 0.9 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 71.35 \ \text{cm} = 0.7135 \ \text{m}$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 8.65 \ \text{cm}$$

หน้าตัดคานมีด้านแคบ $x = b = 30 \ \text{cm}$ และด้านยาว $y = h = 80 \ \text{cm}$

ระยะภายในผิวนอกของเหล็กทางขวางทางด้านสั้นจะมีระยะหุ้มซ้ายขวาข้างละ 3.5 cm ได้

$$x_1 = 30 - 3.5 - 3.5 = 23 \ \text{cm}$$

ระยะภายในผิวนอกของเหล็กทางขวางทางด้านยาวจะมีระยะหุ้มบนล่างข้างละ 4 cm ได้

$$y_1 = 80 - 4 - 4 = 72 \ \text{cm}$$

เนื้อที่ภายในแกนคอนกรีตคือ

$$A_c = x_1 y_1 = 23 \times 72 = 1{,}656 \ \text{cm}^2$$

ค่าเฉลี่ยของเหล็กเสริมที่มุม

$$z = \frac{x_1 + y_1}{2} = \frac{23 + 72}{2} = 47.5 \ \text{cm}$$

น้ำหนักบรรทุกแผ่รวมบนคาน

$$w = 754 + 576 = 1{,}330 \ \text{kg/m}$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่จุดรองรับเป็นโมเมนต์ลบ

$$M = \frac{1}{9} wL^2 = \frac{1}{9} \times 1{,}330 \times 7.50^2 = 8{,}312.5 \ \text{kg} \cdot \text{m/m} = 831{,}250 \ \text{kg} \cdot \text{cm/m}$$

หน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์บิดที่ระยะ d จากขอบที่รองรับ (ในตัวอย่างนี้ใช้ระยะจากศูนย์ที่รองรับ) โมเมนต์บิดสูงสุดคือ

$$M_t = m_t \left(\frac{L}{2} - d \right) = 625 \times \left(\frac{7.50}{2} - 0.7135 \right) = 1{,}897.8125 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 189{,}781.25 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตที่ระยะ d จากขอบที่รองรับ (ในตัวอย่างนี้ใช้ระยะจากศูนย์ที่รองรับ) แรงเฉือนสูงสุดคือ

$$V = w\left(\frac{L}{2} - d\right) = 1{,}330 \times \left(\frac{7.50}{2} - 0.7135\right) = 4{,}038.545 \ \text{kg}$$

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 8.086 \times 30 \times 71.35^2 = 1{,}234{,}931.722 \ \text{kg} \cdot \text{cm} > M = 831{,}250 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

แสดงว่าต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง

$$A_{sc} = 0$$

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd} = \frac{831{,}250}{1{,}500 \times 0.908 \times 71.35} = 8.717 \ \text{cm}^2$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับเอาไว้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd = 0.29 \times \sqrt{240} \times 30 \times 71.35 = 9{,}616.540189 \ \text{kg} > V = 4{,}038.545 \ \text{kg}$$

โมเมนต์บิดสูงสุดที่หน้าตัดนี้รับได้

$$M_{t\,max} = \frac{1.32\sqrt{f_c'}\sum x^2 y}{3.5}$$

$$M_{t\,max} = \frac{1.32\sqrt{240} \times 30^2 \times 80^2}{3.5}$$

$$M_{t\,max} = 420{,}672.3854 \ \text{kg} \cdot \text{cm} > M_t = 189{,}781.25 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

ต้องการเหล็กทางขวางในการรับโมเมนต์บิด แต่ไม่ต้องการเหล็กทางขวางในการรับแรงเฉือน

$$\frac{A_v}{s} = 0$$

$$\frac{2A_t}{s} = \frac{M_t}{A_c f_v} = \frac{189{,}781.25}{1{,}656 \times 1{,}200} = 0.095501836$$

$$\frac{A_v}{s} + \frac{2A_t}{s} = 0 + 0.095501836 = 0.095501836$$

แต่ปริมาณขั้นต่ำของ $\frac{A_v}{s} + \frac{2A_t}{s}$ คือ

$$\frac{A_v}{s} + \frac{2A_t}{s} = \frac{3.5b}{f_{sy}} = \frac{3.5 \times 30}{2{,}400} = 0.04375 < 0.095501836$$

เลือกเหล็ก RB 9 mm มีเนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \ \text{cm}^2$ ดังนั้น

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = \frac{2 \times 0.636}{s} = 0.095501836$$

$$s = \frac{2 \times 0.636}{0.095501836} = 13.319 \ \text{cm} \Rightarrow 12.5 \ \text{cm}$$

ใช้ ป-RB 9 mm @ 125 mm

ออกแบบเหล็กตามยาว

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามยาวทั้งหมด A_ℓ

$$A_\ell = 2A_t \frac{x_1 + y_1}{s} = \frac{2A_t}{s}(x_1 + y_1)$$

$$A_\ell = \frac{2 \times 0.636}{12.5} \times (23 + 72)$$

$$A_\ell = 9.6672 \ \text{cm}^2$$

$$C_t = \frac{bd}{\sum x^2 y} = \frac{30 \times 71.35}{30^2 \times 80} = 0.029729166$$

แต่ปริมาณขั้นต่ำคือ

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - 2A_t \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 12.5}{2{,}400} \times \frac{189{,}781.25}{189{,}781.25 + \frac{4{,}038.545}{3 \times 0.029729166}} - 2 \times 0.636 \right] \times \frac{23 + 72}{12.5}$$

$$A_\ell = 17.178 \ \text{cm}^2$$

แต่ไม่ให้ใช้เกิน

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - \frac{3.5bs}{f_y} \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 12.5}{2{,}400} \times \frac{189{,}781.25}{189{,}781.25 + \frac{4{,}038.545}{3 \times 0.029729166}} - \frac{3.5 \times 30 \times 12.5}{2{,}400} \right] \times \frac{23 + 72}{12.5}$$

$$A_\ell = 22.689 \ \text{cm}^2$$

ดังนั้นเนื้อที่หน้าตัดเหล็กตามยาวในการรับแรงเฉือน $A_\ell = 17.178 \ \text{cm}^2$ ถ้าแบ่งเป็นสามส่วนจะทำให้ระยะห่างระหว่างชุดเกิน 30 cm ดังนั้นต้องแบ่งเป็นสี่ส่วน แต่ละส่วนจะมีเนื้อที่หน้าตัด

$$= \frac{17.178}{4} = 4.2945 \ \text{cm}^2$$

แต่ละชุดใช้ $2 - \text{DB } 20 \text{ mm}$ มีเนื้อที่ $2 \times \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 6.283 \ \text{cm}^2 > 4.2945 \ \text{cm}^2$

สำหรับส่วนบนนำไปรวมกับเนื้อที่หน้าตัดจากโมเมนต์ซึ่งไม่มี ดังนั้นการใช้ 3-DB 25 mm ซึ่งเผื่อการรับโมเมนต์ลบที่จุดรองรับจึงใช้ได้ ส่วนล่างรวมกับเหล็กจากโมเมนต์ได้เนื้อที่

$$A_{st} = 8.717 + 4.2945 = 13.012 \ \text{cm}^2$$

ต้องการ DB 25 mm จำนวน $\frac{13.012}{4.909} = 2.65 \Rightarrow 3$ เส้น

2.10 คานแคบ คานลึก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่วงยาวมากกว่า 30 เท่าของความกว้างของคานให้ถือว่าเป็นคานแคบ จะต้องลดค่าหน่วยแรงดัดลงหรือรับโมเมนต์ดัดน้อยกว่าปกติ ความลึกที่ใช้คำนวณโมเมนต์ดัดต้องไม่เกิน 8 เท่าของความกว้างและให้เหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนทั้งหมด

รูปที่ 2.26 คานแคบ

สมการลดค่าหน่วยแรงดัด

$$r = 1.75 - \frac{L}{40b} \tag{2.28}$$

และต้องออกแบบให้เสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึงนั่นคือ

$$M \le M_R = rRbd^2 \tag{2.29}$$

สำหรับเหล็กรับแรงเฉือนให้คำนวณเหล็กทางตั้งจาก

$$s \le \frac{A_v f_v d}{V}$$

$$s \le \frac{A_v}{0.0015b} \tag{2.30}$$

$$s \le \frac{d}{5}$$

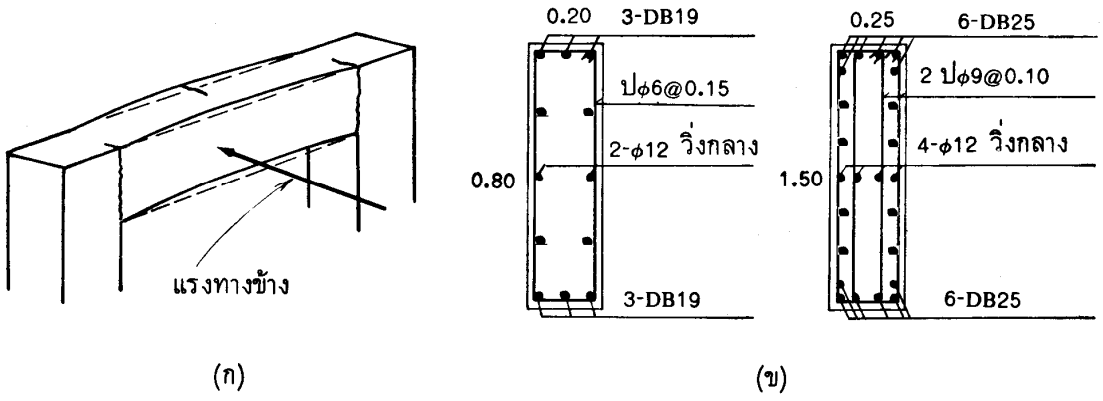
$$s \le 45 \ \text{cm}$$

เหล็กเสริมรับแรงเฉือนทางนอนหาได้จาก

$$s_2 \le \frac{A_{vh}}{0.0025b}$$

$$s_2 \le \frac{d}{3} \tag{2.31}$$

$$s \le 45 \ \text{cm}$$



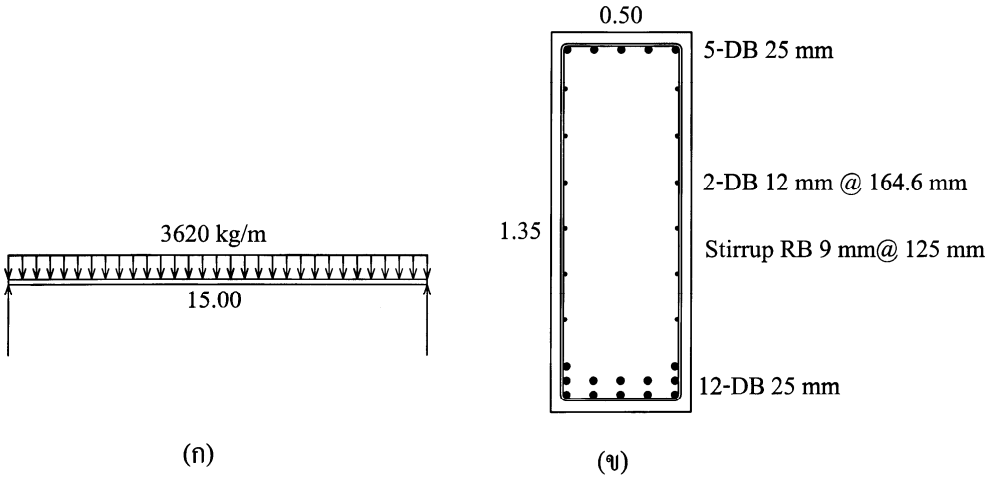
รูปที่ 2.27 คานลึกต้องมีเหล็กเสริมพิเศษวิ่งขอบข้างคาน

ในกรณีที่คานแคบหรือลึกมาก หากมีแรงทางข้างมากระทำดังรูปที่ 2.27(ก) คานจะโก่งด้านข้าง หน้าคานมีมีเหล็กทางยาวจะแตกร้าวทางตั้ง หรือในกรณีที่น้ำหนักไม่ลงตรงศูนย์กลางความกว้างคาน คานจะบิดพลิก จึงต้องมีเหล็กเสริมตามยาวระยะห่างไม่ควรจะเกิน 45 cm ตามรูป 2.27 ระยะห่างเหล็กประมาณ 20 cm เศษ

2.11 คานแบบคานเหล็ก

ในกรณีโมเมนต์ดัด M มีค่ามากกว่าโมเมนต์สมดุล M_R จนทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัด Asc มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับเหล็กรับแรงดึง Ast ให้ใช้เหล็กรับแรงดึงเท่ากับเหล็กรับแรงอัด แล้วเหล็กลูกตั้งคำนวณตามสมการ 2.30 และเหล็กทางนอนตามสมการ 2.31

ตัวอย่างที่ 2.9 จงออกแบบคานช่วงยาว 15.00 เมตร ความลึกคานไม่เกิน 1.00 เมตร น้ำหนักบรรทุกรวมบนคาน 2000 kg/m ไม่รวมน้ำหนักคาน $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 4000$ ksc, $f_{sy} = 2400$ ksc



วิธีทำ

เตรียมข้อมูล

$$f_c^{'} = 240 \ \text{ksc}$$

$$f_c = 0.375f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \ \text{ksc} \Rightarrow 65 \ \text{ksc}$$

$$f_y = 4000 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 4000 = 2000 \ \text{ksc} \Rightarrow 1700 \ \text{ksc}$$

$$n = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1700}{8.72 \times 65}} = 0.25$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.25}{3} = 0.917$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.25 \times 0.917 = 7.451 \ \text{ksc}$$

$$L = 15.00 \ \text{m}$$

ขนาดหน้าตัดคาน

ความลึกคาน

$$h \geq \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{15.00}{16}\left(0.4 + \frac{4000}{7000}\right) = 0.91 \ \text{m}$$

เลือกใช้ความลึกคาน $h = 1.00$ m ใช้เหล็กลูกตั้ง RB 9 mm เหล็กเสริม DB 25 mm จัดสี่ชั้น

$$d = 100 - 4 - 0.9 - 2.5 - 2.5 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 86.35 \ \text{cm}$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 13.65 \ \text{cm}$$

ความกว้างคาน

$$b \geq \frac{h}{5} = \frac{1.00}{5} = 0.20 \ \text{m}$$

$$b \geq \frac{L}{35} = \frac{15.00}{35} = 0.429 \ \text{m}$$

$$b \geq 0.20 \ \text{m}$$

เลือกความกว้างคาน $b = 0.40$ m $= 40$ cm ตรวจสอบความเป็นคานแคบ

$$\left(b = 0.40 \ \text{m}\right) < \left(\frac{L}{30} = \frac{15.00}{30} = 0.50 \ \text{m}\right)$$

น้ำหนักคาน

$$w_G = 2400bh = 2400 \times 0.40 \times 1.00 = 960 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = 2000 + 960 = 2960 \ \ kg/m$$

โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{2{,}960 \times 15.00^2}{8} = 83{,}250 \ \ kg \cdot m = 8{,}325{,}000 \ \ kg \cdot cm$$

แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V = w\left(\frac{L}{2} - d\right) = 2{,}960 \times \left(\frac{15.00}{2} - 0.8635\right) = 19{,}644.04 \ \ kg$$

เนื่องจากเป็นคานแคบต้องลดกำลังการรับโมเมนต์ดัดลงด้วยตัวคูณ r

$$r = 1.75 - \frac{L}{40b} = 1.75 - \frac{15.00}{40 \times 0.40} = 0.8125$$

โมเมนต์ดัดสมดุลที่คานรับได้คือ

$$M_R = rRbd^2 = 0.8125 \times 8.72 \times 40 \times 81.25^2 = 1{,}870{,}882.813 \ \ kg \cdot m$$

หน่วยแรงของเหล็กรับแรงอัด

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1700 \times \frac{0.25 - \frac{13.65}{81.25}}{1 - 0.25} = 371.73 \ \ ksc < 1700 \ \ ksc$$

เนื้อที่หน้าตัดเหล็กที่ต้องการ

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{8{,}325{,}000 - 1{,}870{,}882.813}{371.73(81.25 - 13.65)} = 256.84 \ \ cm^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{1{,}870{,}882.813}{1700 \times 0.917 \times 81.25} + \frac{8{,}325{,}000 - 1{,}870{,}882.813}{1700(81.25 - 13.65)}$$

$$A_{st} = 70.933 \ \ cm^2 << A_{sc} = 256.84 \ \ cm^2$$

คานมีหน้าตัดเล็กเกินไป ต้องเพิ่มความลึกจนกว่าจะได้ $A_{st} \geq A_{sc}$

เพิ่มความลึกคานเป็น $h = 1.25 \ \ m = 125 \ \ cm$ และความกว้างคานเป็น $b = 0.50 \ \ m = 50 \ \ cm$

$$d = 125 - 4 - 0.9 - 2.5 - 2.5 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 111.35 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 13.65 \ \ cm$$

$$w = 2000 + 2400 \times 0.50 \times 1.25 = 3{,}500 \ \ kg/m$$

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{3{,}500 \times 15.00^2}{8} = 98{,}437.5 \ \ kg \cdot m = 9{,}843{,}750 \ \ kg \cdot cm$$

$\frac{L}{b} = \frac{15.00}{0.50} = 30$ ดังนั้นไม่ต้องลดกำลังดัด $r = 1.00$

$$M_R = rRbd^2 = 1.00 \times 8.72 \times 50 \times 111.35^2 = 5{,}405{,}886.61 \ \ kg \cdot cm < M$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1700 \times \frac{0.25 - \frac{13.65}{111.35}}{1 - 0.25} = 577.608 \ \ ksc < f_s = 1700 \ \ ksc$$

หาเนื้อที่ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{9{,}843{,}750 - 5{,}405{,}886.61}{577.608 \times (111.35 - 13.65)} = 78.64 \ \ m^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{5{,}405{,}886.61}{1700 \times 0.917 \times 111.35} + \frac{9{,}843{,}750 - 5{,}405{,}886.61}{1700 \times (111.35 - 13.65)}$$

$$A_{st} = 57.862 \ \ cm^2 < A_{sc} = 78.64 \ \ cm^2$$

เพิ่มความลึกคานเป็น $h = 1.35 \ \ m = 135 \ \ cm$ และความกว้างคานเป็น $b = 0.50 \ \ m = 50 \ \ cm$

$$d = 135 - 4 - 0.9 - 2.5 - 2.5 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 121.35 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 13.65 \ \ cm$$

$$w = 2000 + 2400 \times 0.50 \times 1.35 = 3{,}620 \ \ kg/m$$

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{3{,}620 \times 15.00^2}{8} = 101{,}812.5 \ \ kg \cdot m = 10{,}181{,}250 \ \ kg \cdot cm$$

$\frac{L}{b} = \frac{15.00}{0.50} = 30$ ดังนั้นไม่ต้องลดกำลังดัด $r = 1.00$

$$M_R = rRbd^2 = 1.00 \times 8.72 \times 50 \times 121.35^2 = 6{,}420{,}458.61 \ \ kg \cdot cm < M$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1 - k} = 2 \times 1700 \times \frac{0.25 - \frac{13.65}{121.35}}{1 - 0.25} = 1{,}643.263 \ \ ksc < f_s = 1700 \ \ ksc$$

หาเนื้อที่ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{10{,}181{,}250 - 6{,}420{,}458.61}{1{,}643.263 \times (121.35 - 13.65)} = 21.25 \ \ m^2$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{6{,}420{,}458.61}{1700 \times 0.917 \times 121.35} + \frac{10{,}181{,}250 - 6{,}420{,}458.61}{1700 \times (121.35 - 13.65)}$$

$$A_{st} = 54.48 \ \ cm^2 > A_{sc} = 21.25 \ \ cm^2$$

จำนวนเส้น DB 25 mm เหล็กล่าง

$$= \frac{54.48}{4.909} = 11.1 \Rightarrow 12 \text{ เส้น หรือเหล็กล่างเป็น } 12 - DB \ \ 25 \ \ mm$$

จำนวนเส้น DB 25 mm เหล็กบน

$$= \frac{21.25}{4.909} = 4.32 \Rightarrow 5 \text{ เส้น}$$

เหล็กบนจัด 5-DB 25 mm ชั้นเดียว เหล็กล่างจัด 5-DB 25 mm สองชั้น และ 2-DB 25 mm ชั้นเดียว ช่องว่างระหว่างเส้นเหล็กแต่ละชั้น

$$cl = \frac{50 - 2 \times 3.5 - 2 \times 0.9 - 5 \times 2.5}{5 - 1} = 7.175 \ \ cm > 3.75 \ \ cm \quad \text{ใช้ได้}$$

ตำแหน่งเซนทรอยด์ของเหล็กรับแรงดึงจากผิวล่างคือ

เหล็กชั้นล่างสุด 5 เส้น ห่างผิวล่าง $y_1 = 4 + 0.9 + \frac{2.5}{2} = 6.15 \ \ cm$

เหล็กชั้นที่สอง 5 เส้น ห่างผิวล่าง $y_2 = 4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 11.15$ cm

เหล็กชั้นที่สาม 2 เส้น ห่างผิวล่าง $y_3 = 4 + 0.9 + 2.5 + 2.5 + 2.5 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 16.15$ cm

เหล็กรับแรงดึงห่างขอบล่างคานระยะ

$$y = \frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{5 \times 6.15 + 5 \times 11.15 + 2 \times 16.15}{5 + 5 + 2} = 9.9 \text{ cm}$$

ความลึกประสิทธิผล

$$d = 135 - 9.9 = 125.1 \text{ cm}$$

ตำแหน่งเหล็กรับแรงอัด

$$d' = 4 + 0.9 + \frac{2.5}{2} = 6.15 \text{ cm}$$

แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตระยะ d จากจุดรองรับ

$$V = w\left(\frac{L}{2} - d\right) = 3620 \times \left(\frac{15.00}{2} - 1.251\right) = 22{,}621.38 \text{ kg}$$

$$V_c = 0.29\sqrt{f'_c}bd = 0.29\sqrt{240} \times 50 \times 125.1 = 28{,}101.56 \text{ kg} > V$$

ต้องเสริมเหล็กปริมาณขั้นต่ำ โดยเลือก RB 9 mm มีเนื้อที่รับแรงเฉือนโดยคิดสองขาดังนี้

$$A_v = 2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 1.272 \text{ cm}^2$$

$$s \le \frac{A_v}{0.0015b} = \frac{1.272}{0.0015 \times 50} = 16.96 \text{ cm}$$

$$s \le \frac{d}{5} = \frac{121.35}{5} = 24.27 \text{ cm}$$

$$s \le 45 \text{ cm}$$

ใช้เหล็กทางตั้งเสริมรับแรงเฉือนเป็น ป-RB 9 mm @ 150 mm

เหล็กรับแรงเฉือนทางราบ 2-DB 12 mm มี

$$A_{vh} = 2 \times \frac{\pi}{4} \times 1.2^2 = 2.262 \text{ cm}^2$$

$$s \le \frac{A_{vh}}{0.0025b} = \frac{2.262}{0.0025 \times 50} = 18.096 \text{ cm}$$

$$s \le \frac{d}{3} = \frac{121.35}{3} = 40.45 \text{ cm}$$

$$s \le 45 \text{ cm}$$

ระยะระหว่างเหล็กบนกับเหล็กล่าง

$$h_1 = 135 - 2 \times 4 - 2 \times 0.9 - 4 \times 2.5 = 115.2 \text{ cm}$$

จำนวนช่อง

$$= \frac{115.2}{18.096} = 6.4 \Rightarrow 7 \text{ ช่อง มีเหล็ก} = 7 - 1 = 6 \text{ ชั้น}$$

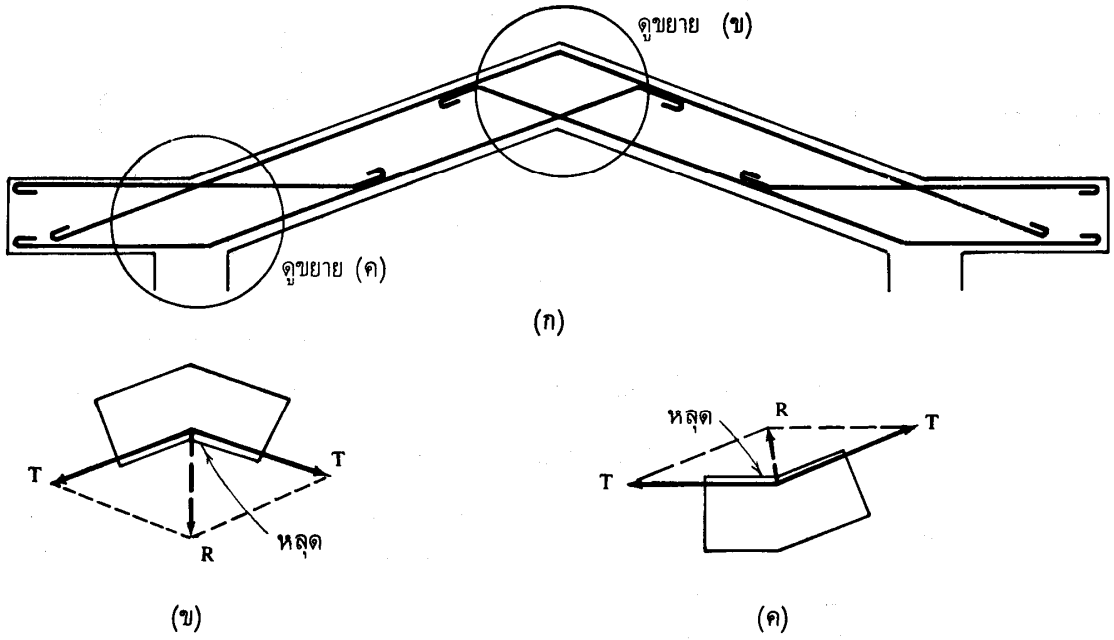
ระยะเรียงจริง

$$s_2 = \frac{115.2}{7} = 16.46 \text{ cm} = 164.6 \text{ mm}$$

เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กดังแสดง

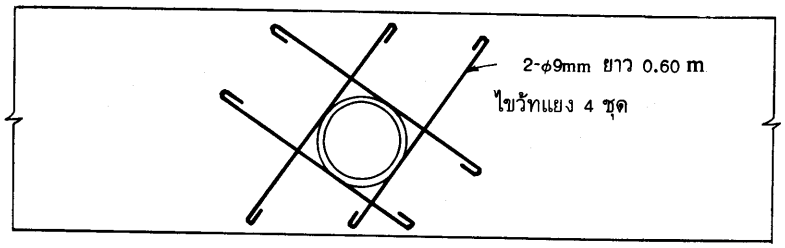
2.12 การจัดและแสดงรายละเอียดในคานพิเศษ

กรณีที่คานหักงอ เช่นคานจั่วหลังคาไม่มีเสารับตรงกลางดังรูปที่ 2.28(ก) เหล็กเสริมด้านในของมุมต้องพุ่งผ่านไปยังฝั่งตรงกันข้ามแล้วทาบไปตามเหล็กฝั่งตรงกันข้ามนั้น 12 เท่าของขนาดเหล็ก ถ้างอแนบตามมุมไปเลย แรงลัพธ์ R จาก T จะดึงเหล็กหลุดออกจากคอนกรีตดังรูป (ข) และรูป (ค)



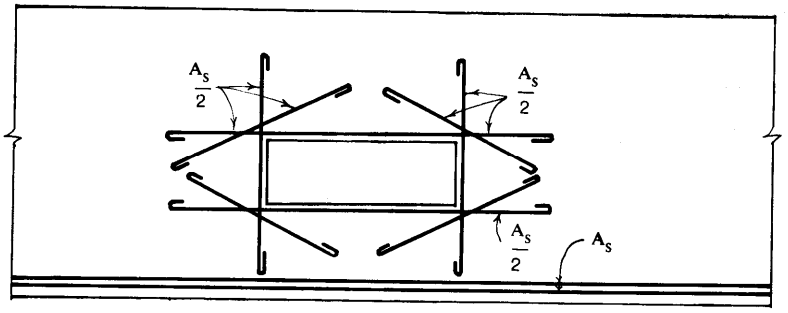
รูปที่ 2.28 การเสริมเหล็กในคานหักงอ

การฝังท่อเหล็กทะลุคาน ถ้าท่อที่จะฝังทะลุคานมีขนาดไม่เกิน 150 mm จะต้องไม่มีการตัดเหล็กเสริมเอกพร้อมทั้งใช้เหล็ก RB 9 mm หรือ DB 12 mm ยาว 0.60 m ไขว้ทแยงตามรูปที่ 2.29 ถ้าท่อเล็กลงอาจจะลดความยาวลงได้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 0.30 m แต่ถ้าท่อโตกว่า 150 mm ต้องคำนวณหน้าตัดและพิจารณาเสริมเหล็กให้มั่นคงแข็งแรง



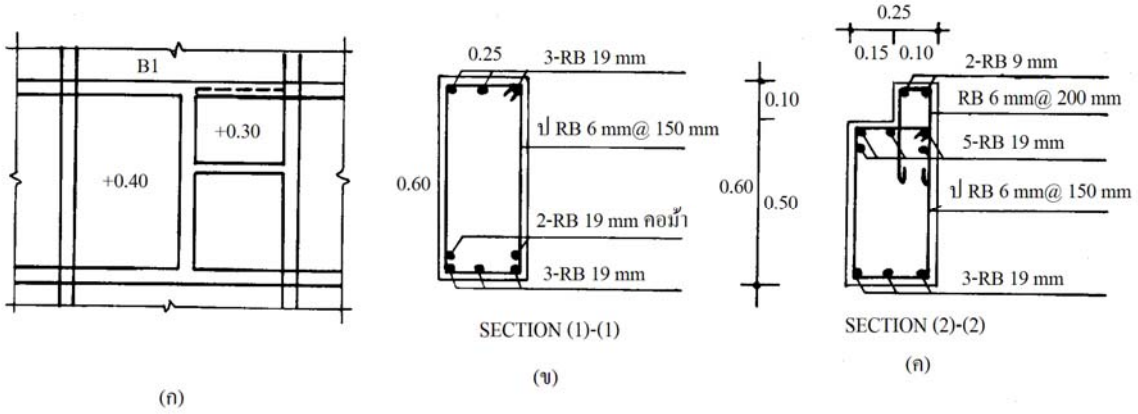
รูปที่ 2.29 การฝั่งท่อในคาน

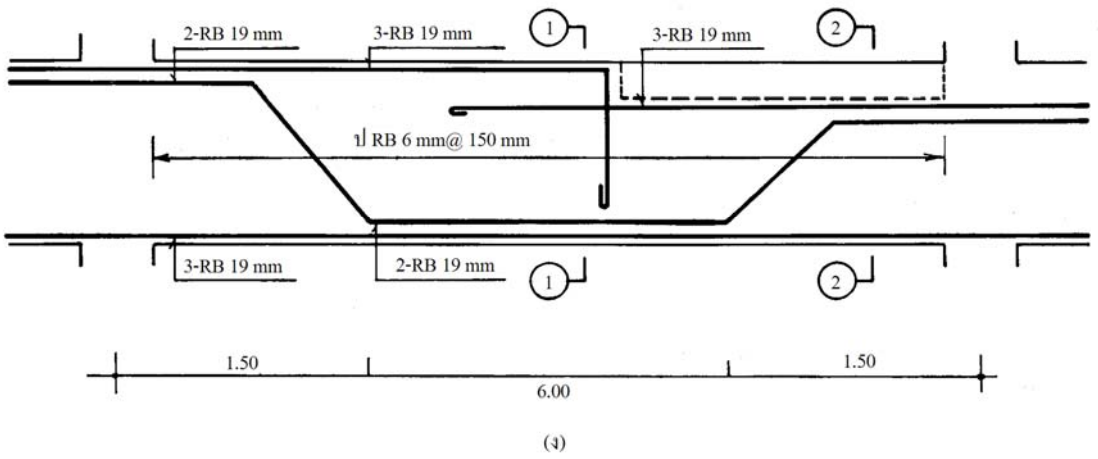
การเจาะคานสำหรับท่อปรับอากาศ กรณีที่คานลึกมากเพราะช่วงยาวทำให้ฝ้าเพดานติดกับท้องคาน ท่อลมปรับอากาศจำเป็นต้องเจาะทะลุคาน ควรเจาะบริเวณกลางคานและต่ำกว่าแกนสะเทิน เสริมเหล็กเพิ่มทุกด้านๆ ละครึ่งหนึ่งของเหล็กเสริมที่คำนวณจากคานเต็ม และที่มุมมีเหล็กไขว้ครึ่งหนึ่งของเหล็กเสริมคานเต็ม ระยะฝังแต่ละปลาย 0.60 m ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การเสริมเหล็กรอบรอยเจาะสำหรับท่อลมปรับอากาศ

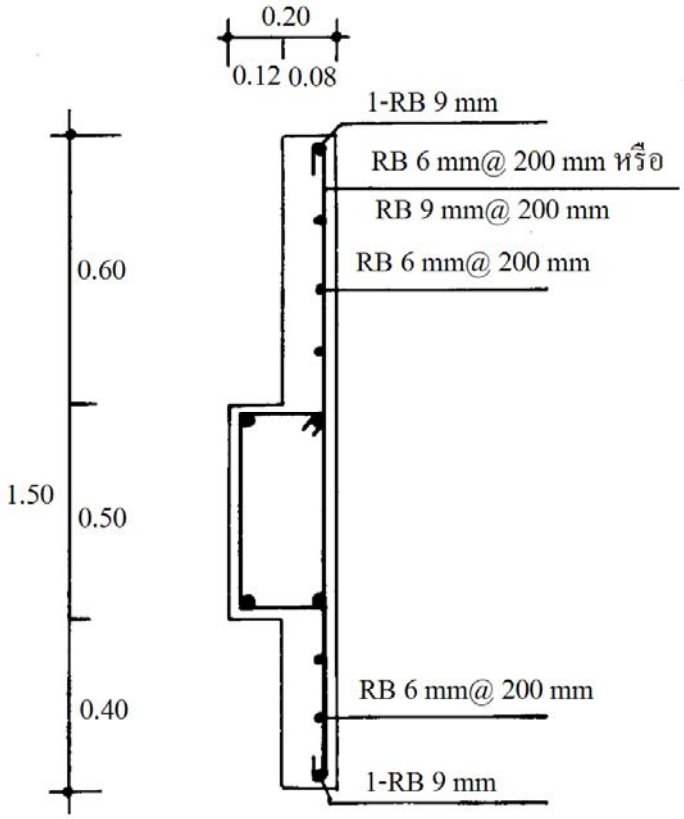
การลดระดับบริเวณห้องน้ำ ในบริเวณห้องน้ำจะลดระดับ 0.10 m จากพื้นด้านนอก เอไม่ให้น้ำจากห้องน้ำไหลมาเปรอะเปื้อน และแนวกำแพงชิดริมนอกของคาน ถ้าไม่ลดระดับคานลงตามจะมีสันเป็นขอบดูน่าเกลียด เมื่อลดระดับต้องคำนวณหน้าตัดคานใหม่ พร้อมทั้งเขียนรูปตัดทางยาวแสดงด้วย เช่นในรูปที่ 2.31





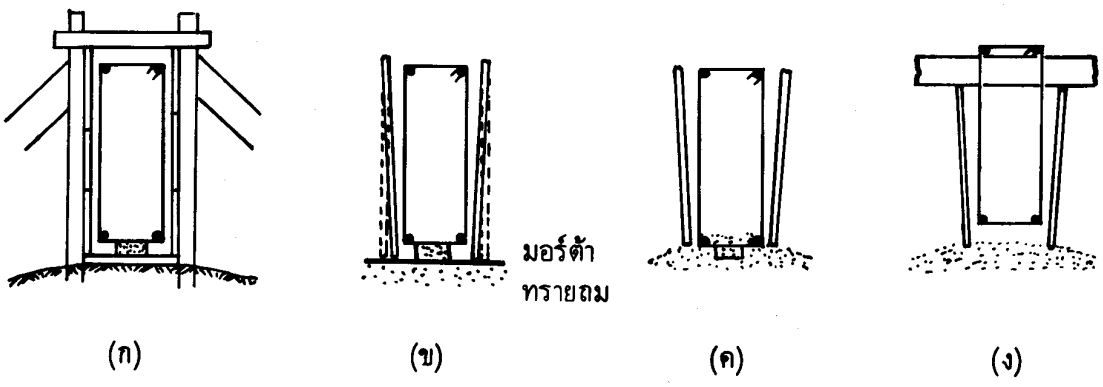
รูปที่ 2.31 การแสดงรายละเอียดคานที่ต้องลดระดับบริเวณห้องน้ำ

กรณีที่มีผนังหรือครีบ ค.ส.ล. ตั้งบนหรือห้อยจากคาน เหล็กทางตั้งในผนังหรือครีบควรจะเป็น RB 6 mm@ 200 mm หรือ RB 9 mm@ 200 mm เหล็กทางนอนใช้ RB 6 mm@ 200 mm ยกเว้นเส้นบนสุดและล่างสุดใช้ 1-RB 9 mm ตามรูปที่ 2.32

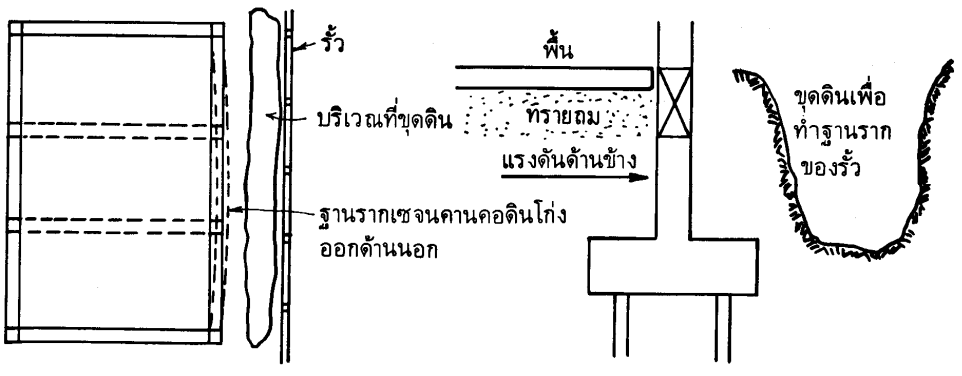


รูปที่ 2.32 การเสริมเหล็กในครีบหรือผนังที่ตั้งหรือห้อยจากคาน

คานดินหรือคานคอดิน เป็นคานชั้นที่ติดผิวดินลงไป มีหน้าที่รับผนังหรือพื้นในกรณีที่พื้นชั้นล่างฝากบนคาน ช่วยยึดตอม่อไม่ให้เซโดยเฉพาะกรณีที่ตอม่อยาว และใช้เสาเข็มไม้ตอกบนดินเหนียวหรือช่วยขังทรายถมไม่ให้ทะลักออกด้านข้าง การออกแบบคำนึงถึงน้ำหนักที่ฝากบนคานโดยถือว่าดินใต้ท้องคานไม่ช่วยรับน้ำหนักใดๆ เลย การแสดงรายละเอียดของเหล็กเสริมเหมือนคานทั่วไป ที่แปลกไปคือระยะหุ้มของคอนกรีตต้องไม่น้อยกว่า 5 cm เนื่องจากเป็นคานที่สัมผัสกับดินโดยตรง ปัญหาที่พบบ่อยเป็นเทคนิคก่อสร้างดูรูปที่ 2.33(ก) เป็นแบบคานคอนดินที่ดีที่สุดเนื่องจากใช้ไม้แบบทำท้องคาน แต่ช่างลืมหรือลืมกระทุ้งออกทำให้สูญเสียไม้แบบซึ่งราคาแพง รูปที่ 2.33(ข) ใช้ทรายถมเทมอตาร์ทับผิวเป็นท้องคานมีลูกปูนหนุน ช่างจะทำแบบหล่อด้านบนให้ได้ขนาดความกว้าง ส่วนด้านล่างสอบเข้าเล็กน้อย เมื่อเทคอนกรีตและสั่นด้วยเครื่องสั่นคอนกรีตเกิดแรงดันแบบด้านล่างแบะออกจนได้ขนาดซึ่งต้องคอยสังเกตขณะทำงานอย่าให้สั่นนานเกินไปจะแบะอ้าออก รูปที่ 2.33(ค) ใช้ทรายถมเป็นแบบเหล็กล่างจะกดลูกปูนจมทรายทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กไม่พอ รูปที่ 2.33(ง) วิธีแก้ปัญหาการจมของลูกปูนที่ทำให้เหล็กจมทราย หรือกรณีที่ลูกปูนไม่แข็งแรงถูกเหล็กกดแตก เหล็กจะชิดท้องคาน ให้ใช้ไม้ขนาด $1\frac{1}{2}$"×3" สอดขวางเหล็กบนหิ้วเหล็กกับแบบข้างคาน กรณีที่เหล็กชิดท้องคานและเป็นคานคอนดินซึ่งมองไม่เห็นอาจจะยังไม่ปรากฏการวิบัติในช่วงก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ แต่พอนานไปเหล็กเป็นสนิมจนขาดก็จะเกิดการวิบัติได้และแก้ไขยากด้วย

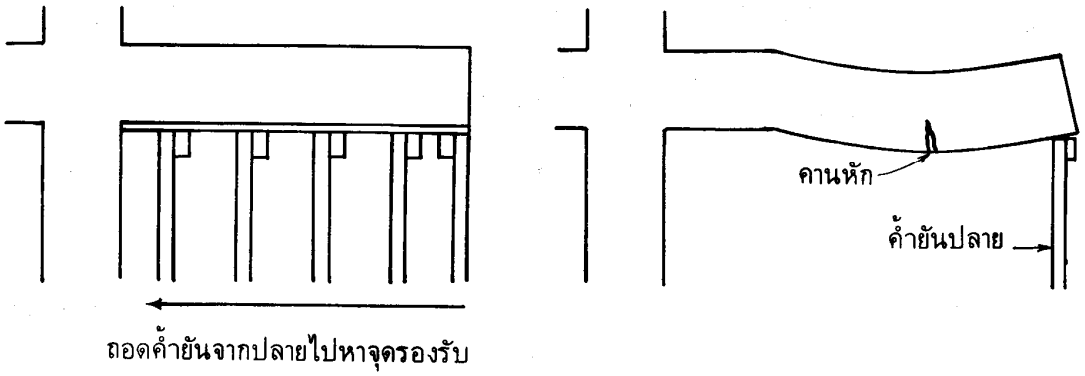


รูปที่ 2.33 การทำแบบหล่อคานคอดิน



รูปที่ 2.34 การทำแบบหล่อคานคอดินยึดไม่ดีอาจเกิดการโก่งทางข้างของคานคอดินได้

คานยื่น เป็นคานที่รับโมเมนต์ลบ เหล็กรับแรงดึงจะอยู่ชิดผิวบนและมีปริมาณมากกว่าเหล็กรับแรงอัดที่ผิวล่างปัญหาที่พบบ่อยคือเรื่องการถอดแบบท้องคานและค้ำยัน จะต้องถอดจากปลายคานไปหาโคนคานที่จุดรองรับ อย่าเหลือค้ำยันตรงปลายเผื่อไว้เป็นอันขาด คานอาจจะร้าวหรือหักในช่วงกลางจากโมเมนต์บวก หากผู้ควบคุมงานของผู้ว่าจ้างยืนยันจะมีค้ำยันเอาไว้ต้องไม่ยินยอม หากจะทำให้ได้ให้ถ่ายรูปและแจ้งเจ้าของงานให้ทราบ รวมทั้งรายงานไปที่สภาวิศวกรให้ทำการสอบสวนผู้ควบคุมงานผู้นั้น



รูปที่ 2.35 การถอดค้ำยันคานยื่นและผลจากการเหลือค้ำยันที่ปลายเอาไว้

แบบฝึกหัดบทที่ 2

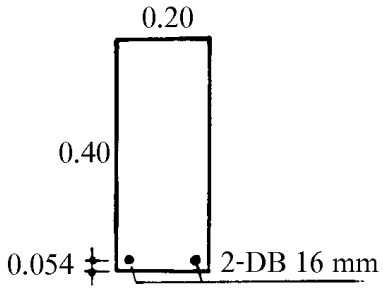
2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร ลึก 0.40 เมตร เสริมเหล็กรับแรงดึง 2-DB 16 mm มีโมเมนต์ดัดกระทำ 1500 $kg \cdot m$ กำลังคอนกรีต $f_c' = 280$ ksc จงหาหน่วยแรงสูงสุดในคอนกรีตและเหล็กเสริมรับแรงดึง

2.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกว้าง 0.30 เมตร ลึก 0.50 เมตร ช่วงคานยาว 4.50 เมตร ช่วงเดียว กำหนด $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3000$ ksc เหล็กเสริม 4-DB 20 mm จัดวางตามรูป ใช้กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 จงหา

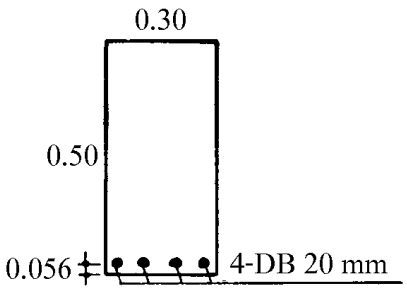
(ก) โมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานรับได้

(ข) คานจะรับน้ำหนักแผ่กระจายได้สูงสุดเท่าใด

(ค) ถ้าคานต้องรับน้ำหนักของผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่น จะก่ออิฐได้สูงกี่เมตร



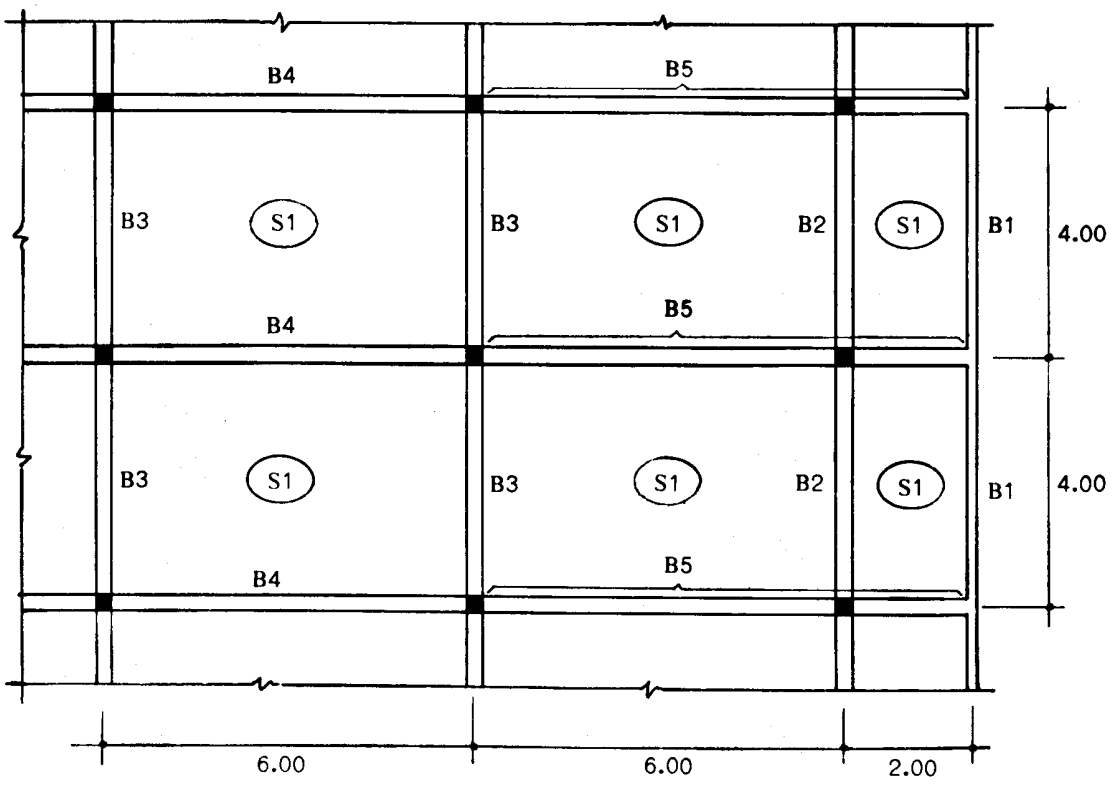
แบบฝึกหัด 2.1



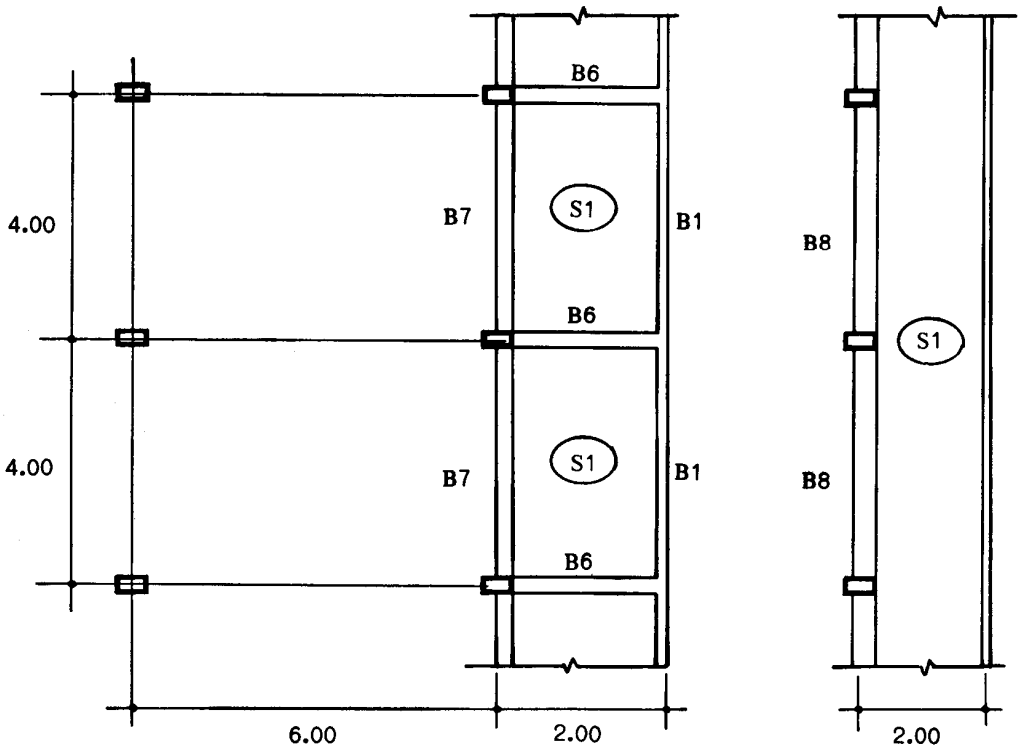
แบบฝึกหัด 2.2

2.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร ความลึก 0.60 เมตร ความลึกประสิทธิผล d = 54.15 cm กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 350$ ksc, $f_y = 4{,}000$ ksc ใช้ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. คานอยู่ในสภาพสมดุล จงหาโมเมนต์สมดุล M_R และเนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึง A_{sR}

2.4 จงออกแบบคาน ค.ส.ล ให้รับโมเมนต์ดัด 15,000 kg·m ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. คานช่วงยาว 6.00 เมตร ให้กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 210$ ksc กำลังครากของเหล็กตามยาวคาน $f_y = 3{,}000$ ksc กำลังครากของเหล็กลูกตั้ง $f_{sy} = 2{,}400$ ksc



2.5 จงออกแบบคาน B1, B2, B3, B4 และ B5 กำหนดแผ่นพื้น S1 หนา 0.12 m รับน้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m2 คาน B1 มีครีบหนา 0.08 เมตร ความลึกรวมคาน 0.80 เมตร คาน B2 มีผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นสูง 0.75 เมตร ส่วน B4 และ B5 มีอิฐมอญก่อครึ่งแผ่นสูง 3.50 เมตร ให้ออกแบบตามข้อบัญญัติ กทม.



แบบฝึกหัด 2.6

2.6 ในระดับที่ตรงกับชั้นลอยในอาคารเดียวกับข้อ 2.5 จำต้องทำกันสาดยื่นออกมาโดยใช้ B6 ฝากเสา ขนาดกว้าง 0.25 เมตร ลึก 0.60 เมตร จงออกแบบ B6 ให้ $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3{,}000$ ksc, $f_{sy} = 2{,}400$ ksc และกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

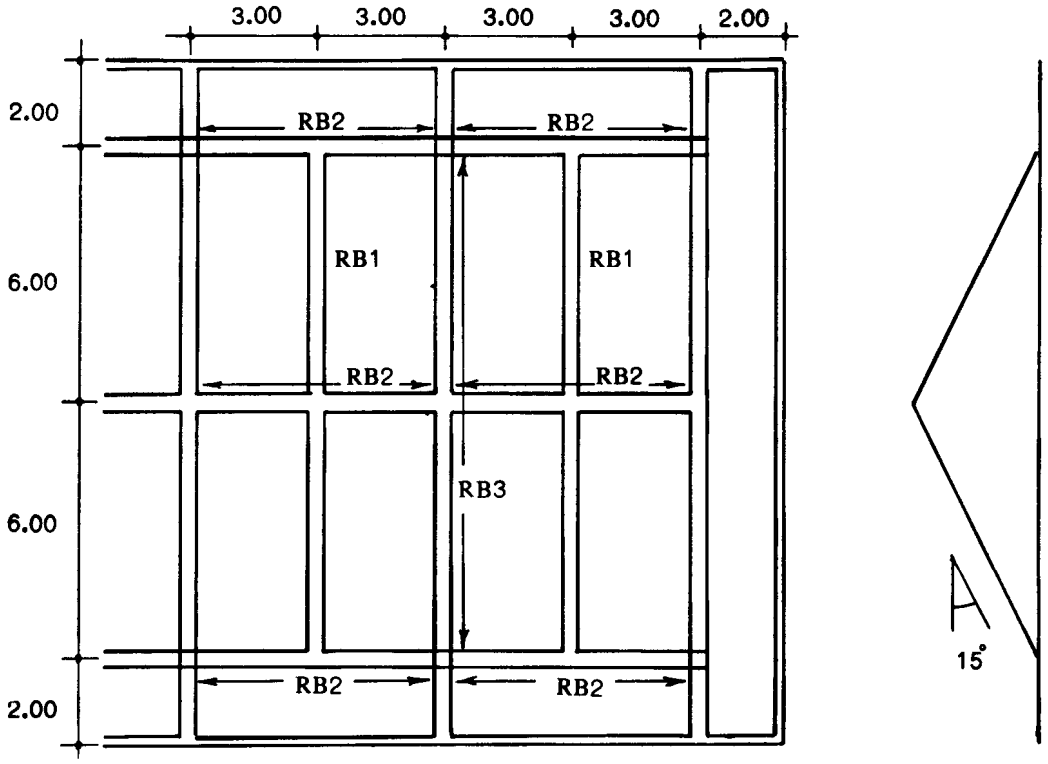
2.7 จากข้อ 2.6 ถ้าคาน B1 เปลี่ยนเป็นครีบหนา 0.08 เมตร สูง 0.80 เมตร และไม่มีคาน B6 แล้ว คาน B8 จะต้องรับโมเมนต์บิด จงออกแบบคาน B8 ให้ $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3{,}000$ ksc, $f_{sy} = 2{,}400$ ksc และกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

2.8 จงออกแบบคานช่วงเดียวยาว 12.00 เมตร น้ำหนักกระทำบนคาน 1500 kg/m ใช้ขนาดคานกว้าง 0.25 เมตร ลึก 1.20 เมตร ให้ $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3{,}000$ ksc, $f_{sy} = 2{,}400$ ksc และกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

2.9 จงออกแบบคานช่วงเดียวของหลังคาโรงภาพยนตร์ ระยะระหว่างเสา 25.00 เมตร ความลึกของคานไม่เกิน 1.50 เมตร หลังคาถ่ายน้ำหนักบนคาน 600 kg/m ให้ $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3{,}000$ ksc, $f_{sy} = 2{,}400$ ksc และกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

2.10 จงออกแบบคาน RB1, RB2 ซึ่งเป็นคานหลังคา ใช้แปเหล็กตัว [และกระเบื้องลอนคู่ ความลาดหลังคา 15 องศา ให้ $f_c' = 240$ ksc, $f_y = 3{,}000$ ksc, $f_{sy} = 2{,}400$ ksc และกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

2.11 จงออกแบบ RB3 ให้ครีบถ่ายน้ำหนักลงปลายคาน 4 ตัน ข้อมูลอื่นเหมือนข้อ 2.10

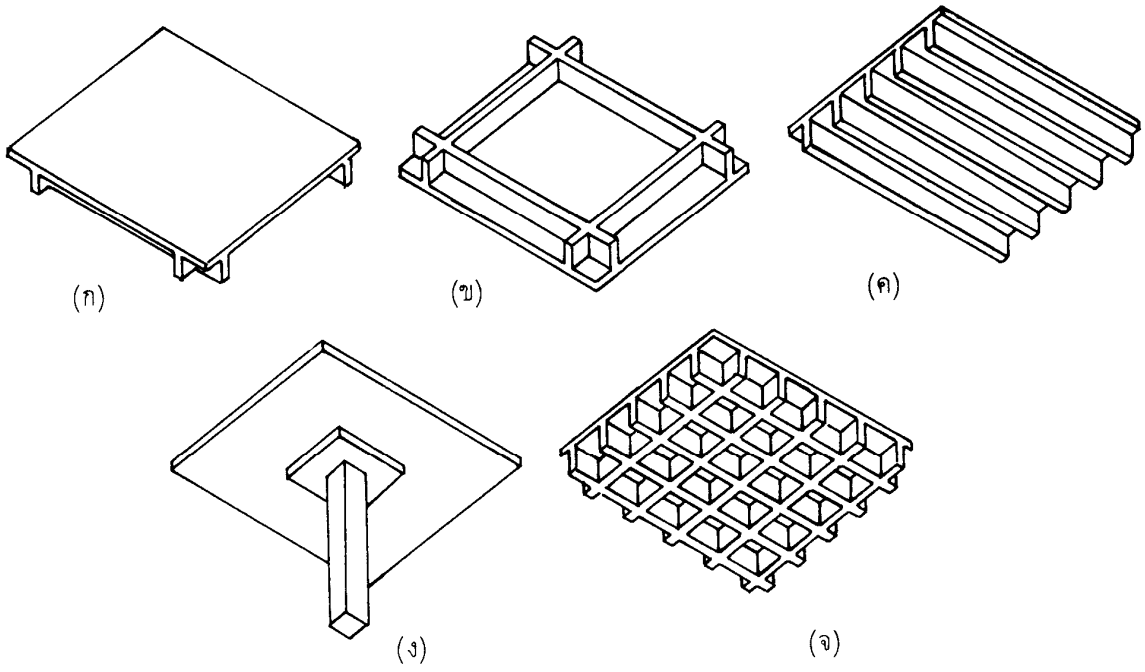


แบบฝึกหัด 2.10,2.11

3
พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 ชนิดของแผ่นพื้น

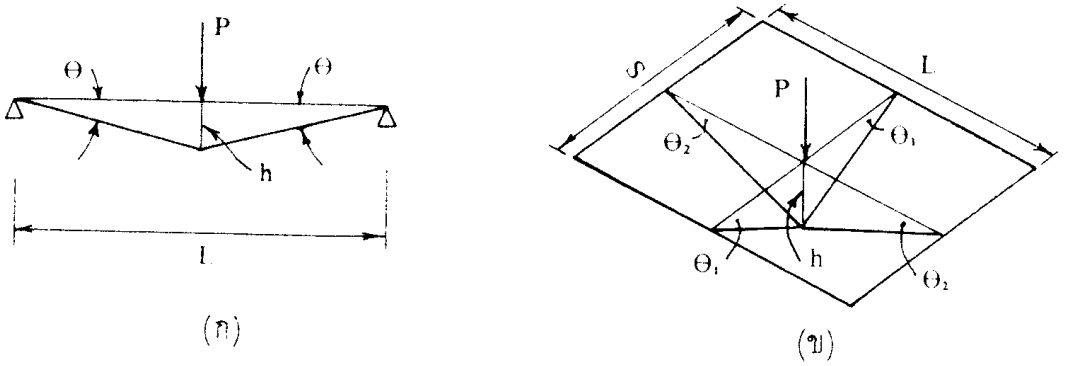
พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีคานรองรับสองด้านหรือสี่ด้าน โดยทั่วๆ ไปจะเป็นตามรูปที่ 3.1(ก) ชนิดหลังเรียบเสมอหลังคาน และตามรูปที่ 3.1(ข) ท้องเรียบเสมอท้องคาน (สำหรับกันสาดหรือหลังคา) ทั้งสองแบบเรียกว่า ***พื้นคอนกรีตแบบตัน*** ในกรณีรับน้ำหนักค่อนข้างมากออกแบบตามรูปที่ 3.1(ก) หรือ (ข) แล้วพื้นหนาเกินไปก็อาจจะใช้ตง (คานซอย) วางห่างกัน $\geq$ 0.75 เมตร ดังรูปที่ 3.1(ค) เรียก ***พื้นระบบตง*** ในกรณีที่ออกแบบให้พื้นถ่ายน้ำหนักลงบนเสาโดยตรงและไม่มีคานรองรับพื้นเลยเรียกว่า พื้นไร้คาน ดังรูปที่ 3.1(ง) ซึ่งต้องระวังเรื่องแรงเฉือนบริเวณหัวเสา พื้นไร้คานอีกแบบหนึ่งช่วงยาวมากเป็นพื้นระบบตงไขว้ฉาก ดังรูปที่ 3.1(จ) ลักษณะคล้ายขนมวัฟเฟิลหรือรังผึ้ง เรียกว่า ***พื้นแบบรังผึ้ง***



รูปที่ 3.1 แผ่นพื้นรูปแบบต่างๆ

3.2 การเกิดโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้น

พิจารณารูปที่ 3.2(ก) ถ้าคานรับแรง P ที่กึ่งกลาง สมมติคานยาว L จุดกึ่งกลางโก่งลงจากระดับเดิม h (มีค่าน้อยหากเทียบกับ L) มุมการหมุนของคานคือ $\theta \approx \tan\theta = \frac{h}{L/2} = \frac{2h}{L}$ โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางคานจะแปรตามมุม θ ถ้ามุม θ ยิ่งมากโมเมนต์ยิ่งมาก ค่ามุม θ ยิ่งมากหากความยาว L ยิ่งน้อย นั่นคือในระยะโก่ง h เหมือนกัน ความยาว L ยิ่งน้อยมุมหมุน θ ยิ่งมาก โมเมนต์ยิ่งมาก



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับมุมการโก่ง

พิจารณารูปที่ 3.2(ข) จำลองแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตรงกึ่งกลางพื้นโก่งลง h มุม θ_1 ของด้านขนานขอบสั้น S จะมากกว่ามุม θ_2 ของด้านขนานขอบยาว L ตามหลักการที่กล่าวถึงในรูปที่ 3.2(ก) ดังนั้นโมเมนต์ทางด้านสั้นจึงมากกว่าทางด้านยาว หรือ $M_S > M_L$

ในสภาพจริงการออกแบบพื้นจะเป็นการรับน้ำหนักแผ่กระจายเต็มพื้นที่ ไม่ใช่แรงกระทำเป็นจุด โมเมนต์ดัดที่กลางพื้นเป็นบวก คือโก่งแบบกระทะหงายแรงดึงผิวล่างแรงอัดผิวบน ส่วนที่หลังคานจะเป็นโมเมนต์ลบ คือโก่งแบบกระทะคว่ำแรงดึงผิวบนแรงอัดผิวล่าง เหล็กเสริมขนานขอบสั้นควรชิดผิวพื้นที่สุดถัดเข้าไปจึงเป็นเหล็กเสริมขนานขอบยาว การงอคอม้าจะนิยมงอเส้นเว้นเส้น ตำแหน่งงอคอม้าเป็นจุดดัดกลับ พื้นริมจะเป็นระยะ $\frac{S}{7}$ หรือ $\frac{L}{7}$ เหล็กเสริมพิเศษที่ระยะ $\frac{S}{4}$ หรือ $\frac{L}{4}$ ขอบพื้นที่ต่อเนื่องกับพื้นถัดไปจะงอคอม้าที่ระยะ $\frac{S}{4}$ หรือ $\frac{L}{4}$ และเสริมพิเศษระยะ $\frac{S}{3}$ หรือ $\frac{L}{3}$ การเขียนรูปตัดแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กอย่างน้อยแสดงการตัดขนานขอบสั้น

การออกแบบแผ่นพื้นวิธีที่ 2 ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. เมื่อมีคานรองรับทั้งสี่ขอบ และน้ำหนักบรรทุกจรไม่เกิน***สามเท่า***ของน้ำหนักบรรทุกคงที่ แผ่นพื้นรองรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายเต็มพื้นอย่างสม่ำเสมอ กำหนดให้

S = ความยาวขอบสั้นของพื้น

S = ค่าน้อยระหว่างระยะศูนย์กลางคานกับช่วงว่างบวกสองเท่าความหนาพื้น

L = ความยาวขอบยาวของพื้น

L = ค่าน้อยระหว่างระยะศูนย์กลางคานกับช่วงว่างบวกสองเท่าความหนาพื้น

$$m = \frac{S}{L}$$

ถ้า $0.5 < m \le 1.0$ เป็นแผ่นพื้นสองทาง

ถ้า $m \le 0.5$ เป็นแผ่นพื้นทางเดียว

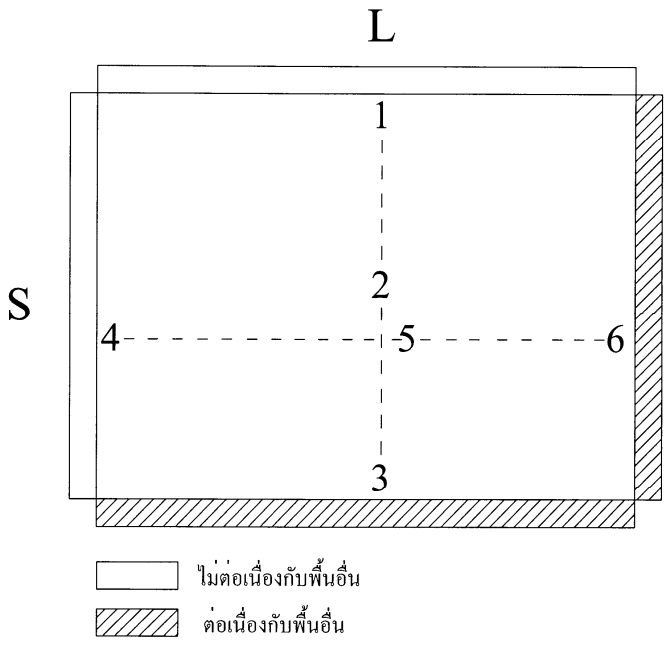
ความหนาของแผ่นพื้นทางเดียว $h \ge \frac{S}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$

ความหนาของแผ่นพื้นยื่น $h \ge \frac{S}{10}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right)$

ความหนาของแผ่นพื้นสองทาง $h \ge \frac{2S + 2L}{180} = \frac{S + L}{90}$

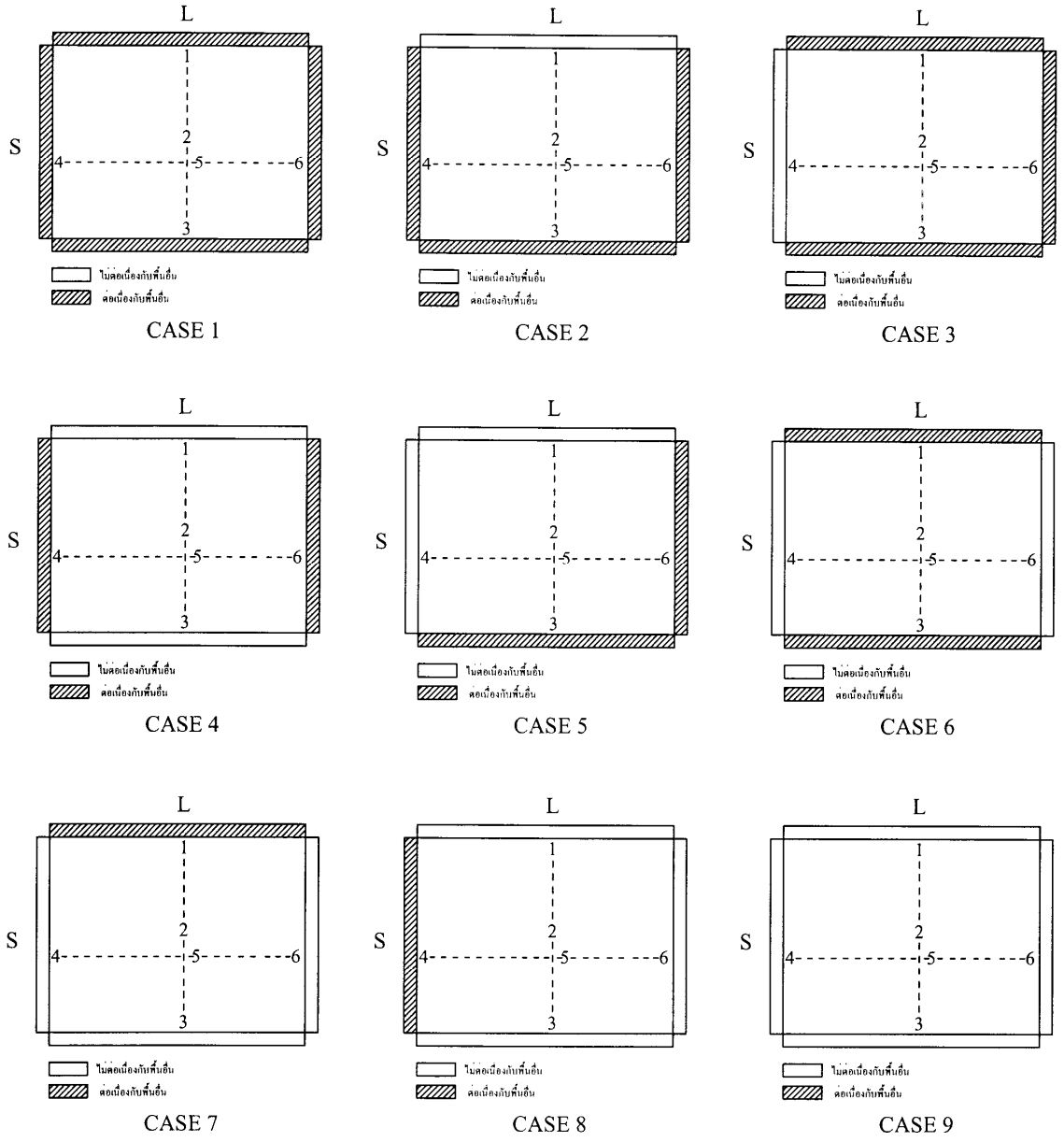
ระยะหุ้มของคอนกรีตในแผ่นพื้นอย่างน้อย 2 cm

สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของแผ่นพื้นสองทาง จะขึ้นกับลักษณะความต่อเนื่องกับแผ่นพื้นอื่น ขอบพื้นที่พิจารณานั้นจะถือว่าเป็นขอบต่อเนื่องเมื่อมีความต่อเนื่องกับแผ่นพื้นอื่นอย่างน้อย 70% ของความยาวของแผ่นพื้นที่พิจารณานั้น เช่น แผ่นพื้น S1 มีขอบหนึ่งติดกับแผ่นพื้น S2 ขอบที่ติดกันนี้ S1 ยาว 5.00 เมตร และ S2 ยาว 3.00 เมตร ถ้าพิจารณา S2 ขอบของ S2 ต่อเนื่องกับ S1 ตลอดความยาว 3.00 เมตรของ S2 เอง ขอบนี้ของ S2 เป็นขอบต่อเนื่อง แต่ถ้าพิจารณา S1 ขอบนี้ต่อเนื่องกับ S2 เป็นระยะ 3.00 เมตร หรือ $\frac{3.00}{5.00} = 0.60 = 60\ \% < 70\ \%$ ดังนั้นขอบนี้ของ S1 เป็นขอบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 3.3 แสดงการต่อเนื่องของขอบแผ่นพื้นที่พิจารณา

พิจารณารูปที่ 3.3 ขอบที่ต่อเนื่องจะแรเงา ขอบที่ไม่ต่อเนื่องปล่อยว่างไว้ แนว 1-2-3 เป็นแนวด้านสั้นหรือขนานของสั้นโดย 1 กับ 2 เป็นโมเมนต์ลบที่หลังคาน และ 3 เป็นโมเมนต์บวกที่กลางพื้น แนว 4-5-6 เป็นแนวด้านยาวหรือขนานขอบยาวโดย 4 กับ 6 เป็นโมเมนต์ลบที่หลังคาน และ 5 เป็นโมเมนต์บวกที่กลางพื้น ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ C ของทางด้านสั้นจะแปรตามค่าของ m ขณะที่ของทางด้านยาวไม่แปรตาม m ลักษณะความต่อเนื่องแบบต่างๆ จะมีทั้งหมด 9 แบบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กรณีความต่อเนื่องของขอบแผ่นพื้นทั้ง 9 กรณี

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ C ของแผ่นพื้น ด้านสั้น C จะแปรตามค่า m ส่วนด้านยาวอยู่ช่องขวาสุดไม่ขึ้นกับค่า m

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดัดในแผ่นพื้นสองทาง : C

แรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆ	ช่วงสั้น						ช่วงยาว
	ค่าต่างๆ ของอัตราส่วน m						
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5 และต่ำกว่า	สำหรับ m ทุกค่า
กรณีที่ 1 ช่วงพื้นภายใน							
แรงดัดลบ – ที่ด้านซึ่งต่อเนื่อง	0.033	0.040	0.048	0.055	0.063	0.083	0.033
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	-	-	-	-	-	-	-
แรงดัดบวกที่กึ่งกลางช่วง	0.025	0.030	0.036	0.041	0.047	0.062	0.025
กรณีที่ 2 ไม่ต่อเนื่องกันด้านเดียว							
แรงดัดลบ – ที่ด้านซึ่งต่อเนื่อง	0.041	0.048	0.055	0.062	0.069	0.085	0.041
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.021	0.024	0.027	0.031	0.035	0.042	0.021
แรงดัดบวกที่กึ่งกลางช่วง	0.031	0.036	0.041	0.047	0.052	0.064	0.031
กรณีที่ 3 ไม่ต่อเนื่องกันสองด้าน							
แรงดัดลบ – ที่ด้านซึ่งต่อเนื่อง	0.049	0.057	0.064	0.071	0.078	0.090	0.049
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.025	0.028	0.032	0.036	0.039	0.045	0.025
แรงดัดบวกที่กึ่งกลางช่วง	0.037	0.043	0.048	0.054	0.059	0.068	0.037
กรณีที่ 4 ไม่ต่อเนื่องกันสามด้าน							
แรงดัดลบ – ที่ด้านซึ่งต่อเนื่อง	0.058	0.066	0.074	0.082	0.090	0.098	0.058
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.029	0.033	0.037	0.041	0.045	0.049	0.029
แรงดัดบวกที่กึ่งกลางช่วง	0.044	0.050	0.056	0.062	0.068	0.074	0.044
กรณีที่ 5 ไม่ต่อเนื่องกันทั้งสี่ด้าน							
แรงดัดลบ – ที่ด้านซึ่งต่อเนื่อง	-	-	-	-	-	-	-
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.033	0.038	0.043	0.047	0.053	0.055	0.033
แรงดัดบวกที่กึ่งกลางช่วง	0.050	0.057	0.064	0.072	0.080	0.083	0.050

ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่งขอบหรือกลางแผ่นพื้นสองทางคือ

$$M = CwS^2 \qquad (3.1)$$

เมื่อ M = โมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่างๆ , $kg \cdot m$

C = สัมประสิทธิ์โมเมนต์จากตาราง 3.1

w = น้ำหนักบรรทุกแผ่บนพื้น , kg/m^2

S = ความยาวขอบสั้นของแผ่นพื้น, m

สังเกตว่าค่าโมเมนต์ M ไม่ว่าจะเป็นทางสั้นหรือทางยาวจะใช้ S เสมอ

เหล็กเสริมในแผ่นพื้นขนาดไม่เล็กกว่า 6 mm ระยะเรียงไม่เกิน 3 เท่าของความหนา

แผ่นพื้นต้องออกแบบให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 8 cm (แนะนำว่าให้ไม่หนาน้อยกว่า 10 cm จะประหยัดเหล็กเสริม) และต้องออกแบบให้ต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง นั่นคือ $M \le M_R$

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงขึ้นกับชนิดเหล็กดังนี้

เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ SR-24 ใช้ $A_{s\min} = 0.0025bh$

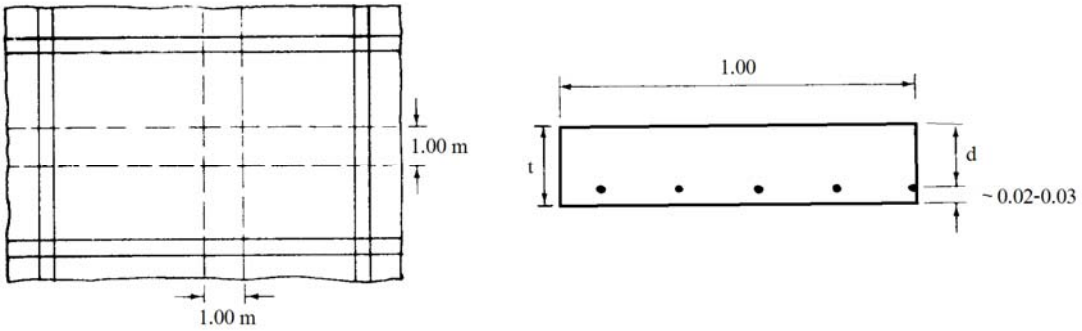
เหล็กข้ออ้อย SD-30 ใช้ $A_{s,\min} = 0.0020bh$

เหล็กตะแกรงสำเร็จรูป (wiremesh) ใช้ $A_{s\min} = 0.0018bh$

เมื่อ $b = 100$ cm = ความกว้างพื้นที่ตัดมาพิจารณากว้าง 1.00 เมตร ดังรูปที่ 3.5

h = ความหนาของแผ่นพื้น , cm

$A_{s\min}$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึงที่ต้องการ, cm^2



รูปที่ 3.5 การตัดแถบพื้นกว้าง 1.00 เมตรใช้ออกแบบเช่นคานแบน

ลำดับขั้นตอนออกแบบแผ่นพื้นยื่น

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

f_c' = กำลังประลัยทรงกระบอกคอนกรีต, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

$f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y \le 1700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$n = \dfrac{E_s}{E_c} = \dfrac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$k = \dfrac{1}{1+\dfrac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \dfrac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \frac{1}{2} f_c kj =$ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

$L =$ ระยะยื่นของแผ่นพื้นวัดจากขอบคาน (ถ้าไม่ทราบใช้ระยะจากศูนย์กลางคาน), m

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของแผ่นพื้น

$$h \geq \frac{L}{10}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) \geq 8 \text{ cm}$$ ความหนาที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งตัว

สมมติขนาดเหล็กเสริม เช่น RB 6 mm, RB 9 mm, DB 10 mm

โดยทั่วไปให้ระยะหุ้มของคอนกรีต 2 cm ดังนั้นความลึกประสิทธิ d หาได้จาก

$d =$ ความหนา $h -$ ระยะหุ้ม 2 cm - $\frac{1}{2}$ ของขนาดเหล็ก

เช่น L = 2.00 m และใช้เหล็ก RB 9 mm มี $f_y = 2400$ ksc

$$h \geq \frac{L}{10}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{2.00}{10}\left(0.4 + \frac{2400}{7000}\right) = 0.149 \text{ m}$$ ใช้ $h = 0.15$ m

$$d = 15 - 2 - \frac{0.9}{2} = 12.55 \text{ cm}$$

น้ำหนักแผ่ของพื้น

$$w_G = 2400bh = 2400 \times 1.00h$$ หน่วยเป็น kg/m^2

นำไปรวมกับน้ำหนักบรรทุกจรและอาจจะมีน้ำหนักวัสดุตกแต่งผิวด้วยเป็น w หน่วย kg/m^2

ถ้ามีคานหลอกให้คำนวณหาน้ำหนักเป็นแรงกระทำเป็นจุดที่ปลายพื้น P

โมเมนต์ดัดที่ขอบคาน

$$M = \frac{wL^2}{2} + PL$$ หน่วย $kg \cdot m/m$

โมเมนต์ดัดที่ภาวะสมดุล

$$M_R = Rbd^2$$

ถ้า $M > M_R$ แสดงว่าความหนาพื้นน้อยเกินไป ให้หาความหนาใหม่

$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}}$ แล้วเพิ่มความหนาอีกเล็กน้อย

ถ้า $M < M_R$ แสดงว่าความหนาพื้นเพียงพอ เลือกขนาดเหล็กเสริมแล้วหาระยะเรียงโดยหาเนื้อที่ที่ต้องการก่อนดังนี้

$$A_s = \frac{M}{f_s jd}$$ หน่วย cm^2/m

$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 =$ เนื้อที่เหล็กหนึ่งเส้น cm^2

$s = \frac{A_{s1}}{A_s} =$ ระยะเรียงของเหล็กเสริม m

ขั้นตอนที่ 3 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ลำดับขั้นตอนการออกแบบแผ่นพื้นทางเดียวและสองทาง

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'}$ = กำลังประลัยทรงกระบอกคอนกรีต, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

$f_c = 0.375f_c^{'} \le 65$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y \le 1700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \frac{1}{2}f_c kj$ = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

เขียนแปลนแผ่นพื้น แสดงขอบสั้น S ขอบยาว L และลักษณะความต่อเนื่อง ใส่แนว 1 2 3 ขนานขอบสั้น และแนว 4 5 6 ขนานขอบยาว

S = ความยาวขอบสั้นของแผ่นพื้น (ในขั้นตอนนี้ใช้ระยะศูนย์กลางคาน)

S = ค่าน้อยระหว่างระยะห่างศูนย์กลางคานกับระยะช่วงว่างบวกสองเท่าความหนาพื้น

L = ความยาวขอบยาวของแผ่นพื้น (ในขั้นตอนนี้ใช้ระยะศูนย์กลางคาน)

L = ค่าน้อยระหว่างระยะห่างศูนย์กลางคานกับระยะช่วงว่างบวกสองเท่าความหนาพื้น

$m = \frac{S}{L}$ = อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของพื้น ใช้ระบุชนิดแผ่นพื้นทางเดียวหรือสองทาง

ตรวจสอบชนิดแผ่นพื้น

ถ้า $m \le 0.5$ แผ่นพื้นนั้นเป็นแผ่นพื้นทางเดียว

ถ้า $m > 0.5$ แผ่นพื้นนั้นเป็นแผ่นพื้นสองทาง

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาและคำนวณน้ำหนักพื้น

แผ่นพื้นทางเดียว ต้องมีความหนา $h \ge \frac{S}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) \ge 0.08$ m แนะนำให้ใช้ความหนา 10 cm ขึ้นไป

แผ่นพื้นสองทาง ต้องมีความหนา $h \geq \frac{2S+2L}{180} = \frac{S+L}{90} \geq 0.08$ m แนะนำให้ใช้ความหนา 10 cm ขึ้นไป

น้ำหนักของแผ่นพื้นในหน่วย kg/m^2 ของแผ่นพื้นเอง คือ 2400h โดยความหนาพื้น h ต้องมีหน่วยเป็นเมตร

ประมาณความลึกประสิทธิผลทางด้านสั้นและทางด้านยาว เมื่อ d_b เป็นขนาดเหล็กเสริมหน่วย cm ทั้งสองทิศทาง ระยะหุ้ม 2 cm ขึ้นไป เหล็กขนานขอบสั้นชิดผิวคอนกรีตมากว่าเหล็กขนานขอบยาว

ความลึกประสิทธิผลทางด้านสั้น

$$d_S = h - 2 - \frac{d_b}{2}$$

ความลึกประสิทธิผลทางด้านยาว

$$d_L = h - 2 - d_b - \frac{d_b}{2}$$

โมเมนต์สมดุลทางด้านสั้น

$$M_{RS} = Rbd_S^2 = 100Rd_S^2 \quad \text{หน่วย } kg \cdot cm$$

โมเมนต์สมดุลทางด้านยาว

$$M_{RL} = Rbd_L^2 = 100Rd_L^2 \quad \text{หน่วย } kg \cdot cm$$

ขั้นตอนที่ 3 หาสัมประสิทธิ์โมเมนต์ คำนวณโมเมนต์และปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

จากตารางที่ 3.1 หาสัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านสั้น C_1, C_2, C_3 แล้วเลือกค่ามากเป็น C_s และหาสัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านยาว C_4, C_5, C_6 แล้วเลือกค่ามากเป็น C_L

คำนวณโมเมนต์สูงสุดทางด้านสั้นและด้านยาว

$$M_S = C_s wS^2 \text{ หน่วย } kg \cdot m/m \text{ คูณ 100 ให้เป็น } kg \cdot cm/m$$

$$M_L = C_L wS^2 \text{ หน่วย } kg \cdot m/m \text{ คูณ 100 ให้เป็น } kg \cdot cm/m$$

ตรวจสอบโมเมนต์สูงสุดกับโมเมนต์สมดุล แผ่นพื้นต้องออกแบบให้ต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง ซึ่งก็หมายความว่าต้องให้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าโมเมนต์สมดุลเสมอ นั่นคือ

$$M_S < M_{RS} \text{ และ } M_L < M_{RL}$$

ถ้า $M_S > M_{RS}$ หรือ $M_L > M_{RL}$ แสดงว่าความหนาของพื้นน้อยไป เพิ่มความหนามากขึ้นโดยเลือกค่ามากจาก

$$d_S = \sqrt{\frac{M_S}{Rb}}, \; h = d_S + 2 + \frac{d_b}{2}$$

$$d_L = \sqrt{\frac{M_L}{Rb}}, \; h = d_L + 2 + d_b + \frac{d_b}{2}$$

เมื่อ $M_S < M_{RS}$ และ $M_L < M_{RL}$ หาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

เหล็กเสริมขนานขอบสั้น

$$A_{sS} = \frac{M_S}{f_s jd_S} \text{ หน่วย } cm^2/m$$

เหล็กเสริมขนานขอบยาว

$$A_{sL} = \frac{M_L}{f_s jd} \text{ หน่วย } cm^2/m$$

หาระยะเรียงเหล็กในหน่วยเมตร โดยเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก 1 เส้นคือ

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$$

ระยะเรียงของเหล็กขนานขอบสั้น

$$s_S \le \frac{A_{s1}}{A_{sS}} \text{ หน่วยเมตร ใช้เป็นเลขลงตัวที่จัดง่าย เช่น 0.075, 0.100, 0.125,ฯลฯ}$$

ระยะเรียงของเหล็กขนานขอบยาว

$$s_L \le \frac{A_{s1}}{A_{sL}} \text{ หน่วยเมตร ใช้เป็นเลขลงตัวที่จัดง่าย เช่น 0.075, 0.100, 0.125,ฯลฯ}$$

ขั้นตอนที่ 4 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ให้ $S_u = S - b_w =$ ระยะช่วงว่างระหว่างขอบในของคานทิศทางขนานขอบสั้นพื้น

$L_u = L - b_w =$ ระยะช่วงว่างระหว่างขอบในของคานทิศทางขนานขอบยาวพื้น

$S, L =$ ระยะระหว่างศูนย์กลางคานทิศทางขนานขอบสั้นและขอบยาวตามลำดับ

$b_w =$ ความกว้างของคานในแต่ละทิศทาง ถ้าไม่เท่ากันให้หาครึ่งความกว้างแต่ละข้างมารวมกัน

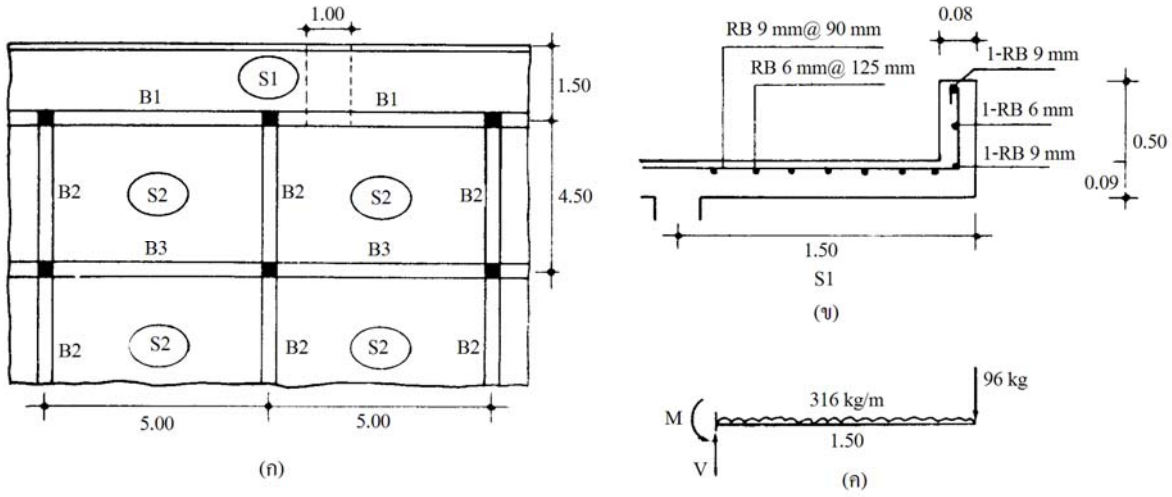
ตัดพื้นขนานขอบสั้นมาแสดง เหล็กขนานขอบสั้นจะเป็นเส้นทึบชิดผิวพื้น ส่วนเหล็กขนานขอบยาวจะเห็นเป็นจุดถัดเข้าไปในเนื้อพื้น เหล็กเสริมรับโมเมนต์บวกอยู่ชิดผิวล่างวางระยะห่าง s_S สำหรับเหล็กขนานขอบสั้นและระยะห่าง s_L สำหรับเหล็กขนานขอบยาว แล้วงอคอม้าเส้นเว้นเส้น ระยะห่างเหล็กทั้งเหล็กที่ไม่งอคอม้าและเหล็กที่งอคอม้าขึ้นไปชิดผิวบนจะห่าง $2s_S$ และ $2s_L$ แต่ในความเป็นจริงนั้นความต้องการระยะเรียง s_S และ s_L เป็นของเหล็กบนรับโมเมนต์ลบ จำเป็นต้องเสริมแทรกกลางเหล็กคอม้าเป็นเหล็กเสริมพิเศษ ทำให้ระยะเรียงของเหล็กบนเป็น s_S และ s_L ตามความต้องการจริง ตำแหน่งงอคอม้าและระยะปลายของเหล็กเสริมพิเศษให้พิจารณาดังนี้

คานริมไม่มีพื้นยื่น จุดงอคอม้าที่ระยะ $\frac{S_u}{7}$ หรือ $\frac{L_u}{7}$ จากขอบคาน หรือ $\frac{S_u}{7} + \frac{b_w}{2}$ หรือ $\frac{L_u}{7} + \frac{b_w}{2}$ จากศูนย์กลางคาน ปลายเหล็กเสริมพิเศษระหว่างคอม้าที่ระยะ $\frac{S_u}{4}$ หรือ $\frac{L_u}{4}$ จากขอบคาน หรือ $\frac{S_u}{4} + \frac{b_w}{2}$ หรือ $\frac{L_u}{4} + \frac{b_w}{2}$ จากศูนย์กลางคาน

คานในหรือคานริมที่มีพื้นยื่นด้วย จุดงอคอม้าที่ระยะ $\frac{S_u}{4}$ หรือ $\frac{L_u}{4}$ จากขอบคาน หรือ $\frac{S_u}{4}+\frac{b_w}{2}$ หรือ $\frac{L_u}{4}+\frac{b_w}{2}$ จากศูนย์กลางคาน ปลายเหล็กเสริมพิเศษระหว่างคอม้าที่ระยะ $\frac{S_u}{3}$ หรือ $\frac{L_u}{3}$ จากขอบคาน หรือ $\frac{S_u}{3}+\frac{b_w}{2}$ หรือ $\frac{L_u}{3}+\frac{b_w}{2}$ จากศูนย์กลางคาน

มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดว่าเหล็กเสริมรับโมเมนต์บวกที่เหลือจากงอคอม้าแล้ว ให้ฝังเข้าไปในที่รองรับซึ่งก็คือคาน อย่างน้อย 15 ซม เผื่อการงอขอและระยะหุ้มเหล็กอีกอย่างน้อย 5 ซม ***ทำให้ความกว้างของคานอย่างน้อย 20 ซม นี่คือเหตุผลที่ต้องกำหนดความกว้างของคานเอาไว้อย่างน้อย 20 ซม***

ตัวอย่างที่ 3.1 จงออกแบบพื้น S1 ซึ่งเป็นกันสาดยื่นจากศูนย์กลางคานออกไป 1.50 เมตร ปลายพื้นยกขอบเป็นคานหลอกหนา 0.08 เมตร สูง 0.50 เมตร ความกว้างคาน 0.20 เมตร ให้ $f_c^{'}=173$ ksc และ $f_y=2400$ ksc ออกแบบตามกฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6



ตัวอย่างที่ 3.1

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'}=173$ ksc

$f_y=2400$ ksc

$f_c^{'}=173$ ksc

$f_y=2400$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times173=64.875$ ksc <65 ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times2400=1200$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{173}}=10.271$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1200}{10.271\times 64.875}} = 0.357$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = 1-\frac{0.357}{3} = 0.881$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2}\times 64.875\times 0.357\times 0.881 = 10.202 \ \text{ksc}$$

คานกว้าง $b_w = 0.20$ m ดังนั้นระยะยื่นจากขอบคาน

$$L_u = L - \frac{b_w}{2} = 1.50 - \frac{0.20}{2} = 1.40 \ \text{m}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของแผ่นพื้น

$$h \geq \frac{L_u}{10}\left(0.4+\frac{f_y}{7000}\right) = \frac{1.40}{10}\left(0.4+\frac{2400}{7000}\right) = 0.104 \ \text{m}$$

ใช้ความหนาแผ่นพื้น $h = 0.11 \ \text{m} = 11 \ \text{cm}$

น้ำหนักแผ่นพื้น

$$w_G = 2400bh = 2400\times 1.00\times 0.11 = 264 \ \text{kg/m}^2$$

ตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับกันสาดไว้ที่ $w_L = 100 \ \text{kg/m}^2$ ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกแผ่รวมคือ

$$w = w_G + w_L = 264+100 = 364 \ \text{kg/m}^2$$

เมื่อตัดแผ่นพื้นกว้าง b = 1.00 m = 100 cm เหมือนคานแบน น้ำหนักบรรทุกจะมีหน่วยเป็น

$$w = 364 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\times 1.00 \ \text{m} = 364 \ \text{kg/m}$$

คานหลอกที่ปลายพื้นสูง 0.50 เมตรจากท้องพื้น ขณะที่พื้นหนา 0.11 เมตร ดังนั้นคานหลอกจึงลึกเพียง 0.50 – 0.11 = 0.39 m ส่วนความกว้าง 0.08 m น้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็ก 2400 kg/m^3 ดังนั้นน้ำหนักกระทำเป็นจุดกระทำที่ปลายพื้น

$$P = 2400\times 0.08\times 0.39 = 74.88 \Rightarrow 75 \ \text{kg}$$

สมมติเลือกเหล็กเสริมเอกเป็น RB 9 mm มี $d_b = 9 \ \text{mm}, A_{s1} = \frac{\pi}{4}\times 0.9^2 = 0.636 \ \text{cm}^2$ ดังนั้นความลึกประสิทธิผลเมื่อให้ระยะหุ้ม 2 cm คือ

$$d = h-2-\frac{d_b}{2} = 11-2-\frac{d_b}{2} = 11-2-\frac{0.9}{2} = 8.55 \ \text{cm}$$

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 10.202\times 100\times 8.55^2 = 74{,}579.1705 \ \text{kg}\cdot\text{m}$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ขอบคาน

$$M = \frac{wL_u^2}{2} + PL_u = \frac{364 \times 1.40^2}{2} + 75 \times 1.40$$

$$M = 461.72 \ \ kg \cdot m = 46{,}172 \ \ kg \cdot cm$$

ตรวจสอบพบว่า $M < M_R$ แสดงว่าความหนาแผ่นพื้นเพียงพอ ปริมาณเหล็กเสริมทางด้านสั้น

$$A_{sS} = \frac{M}{f_s jd} = \frac{46{,}172}{1{,}200 \times 0.881 \times 8.55} = 5.108 \ \ cm^2/m$$

ระยะเรียงของเหล็ก RB 9 mm ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ $A_{s1} = 0.636 \ \ cm^2$ คือ

$$s_S = \frac{A_{s1}}{A_{sS}} = \frac{0.636}{5.108} = 0.1245 \Rightarrow 0.12 \ \ m$$

เสริมเหล็กขนานขอบสั้น RB 9 mm@ 120 mm

ปริมาณเหล็กทางยาว เป็นปริมาณเหล็กกันร้าว สำหรับ SR-24 ปริมาณเหล็กขั้นต่ำหรือเหล็กกันร้าวคือ

$$A_{sL} = 0.0025bh = 0.0025 \times 100 \times 11 = 2.75 \ \ cm^2/m$$

ระยะเรียงของเหล็ก RB 9 mm ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ $A_{s1} = 0.636 \ \ cm^2$ คือ

$$s_L = \frac{A_{s1}}{A_{sL}} = \frac{0.636}{2.75} = 0.231 \Rightarrow 0.20 \ \ m$$

เสริมเหล็กขนานขอบยาว RB 9 mm@ 200 mm

แสดงรายละเอียดตามรูป (ข) แต่ในกรณีที่พื้น S1 ลดระดับจนท้องพื้นเสมอท้องคาน เหล็กเสริม RB 9 mm @ 120 mm จะต้องคำนวณระยะฝังซึ่งมีผลต่อความกว้างของคาน B1 ด้วยดังนี้

ระยะฝังพื้นฐานที่ต้องการ

$$\ell_d = \frac{0.08 d_b f_y}{\sqrt{f_c'}} = \frac{0.08 \times 0.9 \times 2400}{\sqrt{173}} = 13.14 \ \ cm$$

ระยะฝังจริง

$$L_d = b_w - c = 20 - 3.5 = 16.5 \ \ cm > \ell_d = 13.14 \ \ cm \ \ \text{ใช้ได้}$$

เหล็กเสริมวัดระยะเริ่มฝังจากขอบคานเข้าไปถึงจุดเริ่มโค้งที่เส้นผ่านศูนย์กลางโค้ง 6 เท่าของขนาดเหล็กหรือรัศมี 3 เท่าของขนาดเหล็ก แล้วโค้งไปหนึ่งในสี่ของวงกลม จากนั้นต้องยื่นปลายไปอีก 12 เท่าของขนาดเหล็ก

ระยะฝังจากขอบคานถึงจุดเริ่มโค้งจริงคือ

$$= 20 - 3.5 - \frac{0.9}{2} - 3 \times 0.9 = 13.35 \ \ cm$$

จากนั้นโค้งภายในรัศมี

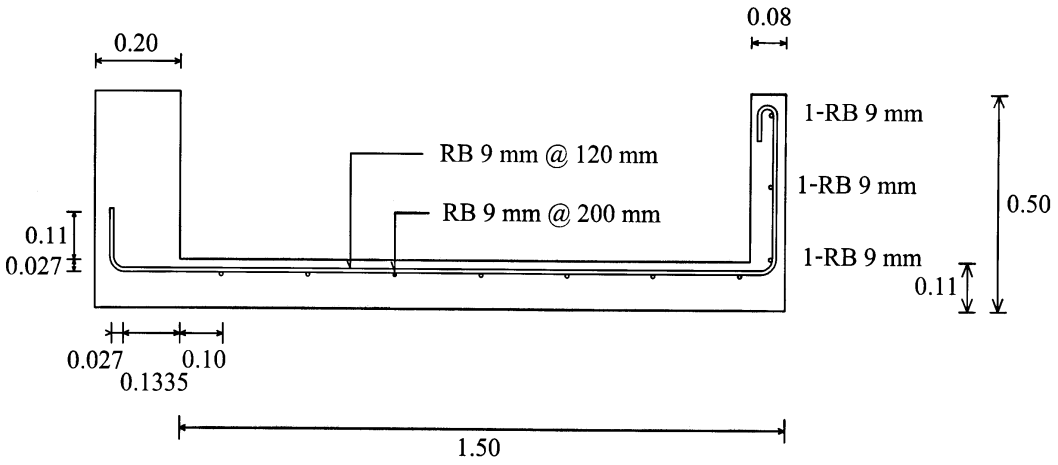
$$= 3 \times 0.9 = 2.7 \ \ cm$$

โค้งไปหนึ่งส่วนสี่ของวงกลมได้เป็นโค้งฉาก

ยื่นปลายขึ้นไปอีก

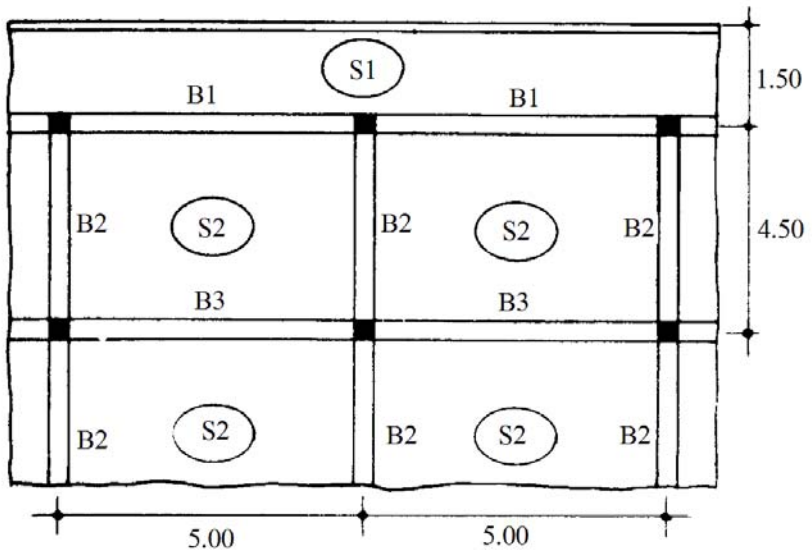
$$= 12 \times 0.9 = 10.8 \Rightarrow 11 \text{ cm}$$

รายละเอียดดังแสดง



รูปตัดพื้น S1 ที่ระดับต่างจาก S2

ตัวอย่างที่ 3.2 จงออกแบบแผ่นพื้น S2 รับน้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m^2 เมื่อพื้น S1 หนา 0.11 m ให้กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 173$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 2400$ ksc คานกว้าง 0.20 m



ตัวอย่างที่ 3.2

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'} = 173$ ksc

$f_y = 2400$ ksc

$f_c^{'} = 173 \ \ ksc$

$f_y = 2400 \ \ ksc$

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 173 = 64.875 \ \ ksc < 65 \ \ ksc$

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 2400 = 1200 \ \ ksc$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{173}} = 10.271$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1200}{10.271 \times 64.875}} = 0.357$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.357}{3} = 0.881$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 64.875 \times 0.357 \times 0.881 = 10.202 \ \ ksc$$

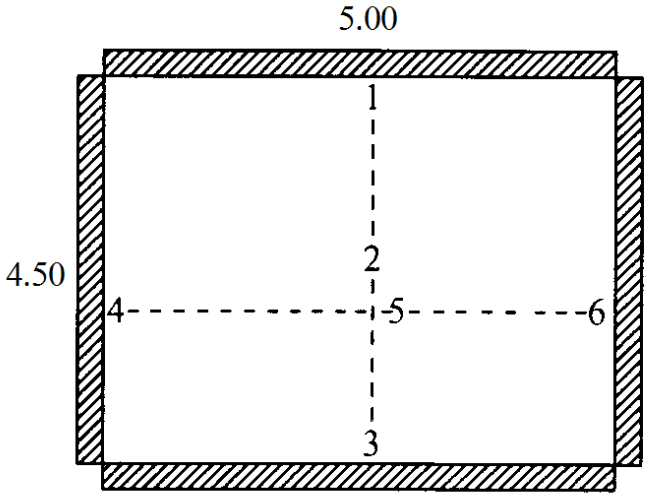
คานกว้าง $b_w = 0.20 \ \ m$

S = 4.50 m = ความยาวขอบสั้นระหว่างศูนย์กลางคาน

L = 5.00 m = ความยาวขอบยาวระหว่างศูนย์กลางคาน

$$m = \frac{S}{L} = \frac{4.50}{5.00} = 0.9 > 0.5$$ แสดงว่าเป็นแผ่นพื้นสองทาง

ขั้นตอนที่ 2 และ 3 หาความหนาและโมเมนต์ดัด เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก เขียนแปลนแสดงความยาวขอบและลักษณะความต่อเนื่องซึ่งต่อเนื่องทุกขอบ



ความหนาของแผ่นพื้นสองทางต้องไม่น้อยกว่า

$$h \geq \frac{2S + 2L}{180} = \frac{S + L}{90} = \frac{4.50 + 5.00}{90} = 0.106 \Rightarrow 0.11 \ \ m$$

ใช้ความหนา $h = 0.11 \ \ m = 11 \ \ cm$ หาน้ำหนัก ความหนาประสิทธิผลทางด้านสั้นและทางด้านยาว โดยให้ระยะหุ้มของคอนกรีต 2 cm ขนาดเหล็ก RB 9 mm ทั้งสองทิศทาง

น้ำหนักพื้น

$$w_G = 2400h = 2400 \times 0.11 = 264 \ \ kg/m^2$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_G + w_L = 264 + 200 = 464 \ \ kg/m^2$$

ความหนาประสิทธิผลด้านสั้น

$$d_S = h - c - \frac{d_b}{2} = 11 - 2 - \frac{0.9}{2} = 8.55 \ \ cm$$

ความหนาประสิทธิผลด้านยาว

$$d_L = h - c - d_b - \frac{d_b}{2} = 11 - 2 - 0.9 - \frac{0.9}{2} = 7.65 \ \ cm$$

ความยาวด้านสั้น เลือกจากค่าน้อยระหว่างระยะระหว่างศูนย์กลางคาน 4.50 เมตร กับระยะช่วงว่างบวกสองเท่าความหนา $4.50 - \frac{0.20}{2} - \frac{0.20}{2} + 2 \times 0.11 = 4.52 \ \ m$ ดังนั้น $S = 4.50 \ m$

ความยาวด้านยาว เลือกจากค่าน้อยระหว่างระยะระหว่างศูนย์กลางคาน 5.00 เมตร กับระยะช่วงว่างบวกสองเท่าความหนา $5.00 - \frac{0.20}{2} - \frac{0.20}{2} + 2 \times 0.11 = 5.02 \ \ m$ ดังนั้น $L = 5.00 \ m$

ดังนั้นค่า $m = \frac{S}{L} = \frac{4.50}{5.00} = 0.9$ สำหรับหาสัมประสิทธิ์โมเมนต์ C ต่างๆ ตามกรณีที่ 1 ต่อเนื่องทุกด้านในตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ด้านสั้นดูจากช่อง $m = 0.9$ ส่วนสัมประสิทธิ์ด้านยาวดูจากช่องขวาสุด ได้ค่าดังนี้

$C_1 = C_3 = 0.040$ และ $C_2 = 0.030$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านสั้นคือ $C_S = 0.040$

$C_4 = C_6 = 0.033$ และ $C_5 = 0.025$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านยาวคือ $C_L = 0.033$

โมเมนต์ดัดทางด้านสั้น

$$M_S = C_S w S^2 = 0.040 \times 464 \times 4.50^2$$
$$M_S = 375.84 \ \ kg \cdot m/m = 37{,}584 \ \ kg \cdot cm/m$$

โมเมนต์ดัดด้านยาว

$$M_L = C_L w S^2 = 0.033 \times 464 \times 4.50^2$$
$$M_L = 310.068 \ \ kg \cdot m/m = 31{,}006.8 \ \ kg \cdot cm/m$$

โมเมนต์ดัดสมดุลทางด้านสั้น

$$M_{RS} = Rbd_S^2 = 10.202 \times 100 \times 8.55^2$$
$$M_{RS} = 74{,}579.1705 \ \ kg \cdot cm/m > M_S = 37{,}584 \ \ kg \cdot cm/m \quad OK$$

โมเมนต์สมดุลทางด้านยาว

$$M_{RL} = Rbd_L^2 = 10.202 \times 100 \times 7.65^2$$

$$M_{RL} = 59{,}704.6545 \ \text{kg} \cdot \text{cm/m} > M_L = 31{,}006.8 \ \text{kg} \cdot \text{cm/m} \quad \text{OK}$$

ปริมาณเหล็กเสริมทางด้านสั้น

$$A_{sS} = \frac{M_S}{f_s j d_S} = \frac{37{,}584}{1{,}200 \times 0.881 \times 8.55} = 4.158 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

ปริมาณเหล็กเสริมทางด้านยาว

$$A_{sL} = \frac{M_L}{f_s j d_L} = \frac{31{,}006.8}{1{,}200 \times 0.881 \times 7.65} = 3.834 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

$$A_{s,min} = 0.0025bh = 0.0025 \times 100 \times 11 = 2.75 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

ตรวจสอบพบว่า $A_{sS} > A_{s,min}$ และ $A_{sL} > A_{s,min}$ ใช้ตามที่คำนวณได้ เหล็ก RB 9 mm มีเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก 1 เส้นเท่ากับ $A_{s1} = \frac{\pi d_b^2}{4} = \frac{\pi \times 0.9^2}{4} = 0.636 \ \text{cm}^2$ ดังนั้นระยะเรียงเหล็กทางขนานขอบสั้นละขนานขอบยาวหาได้ดังนี้

ระยะเรียงเหล็กขนานขอบสั้น

$$s_S = \frac{A_{s1}}{A_{sS}} = \frac{0.636}{4.158} = 0.152 \ \text{m} \Rightarrow 0.150 \ \text{m} = 150 \ \text{mmm}$$

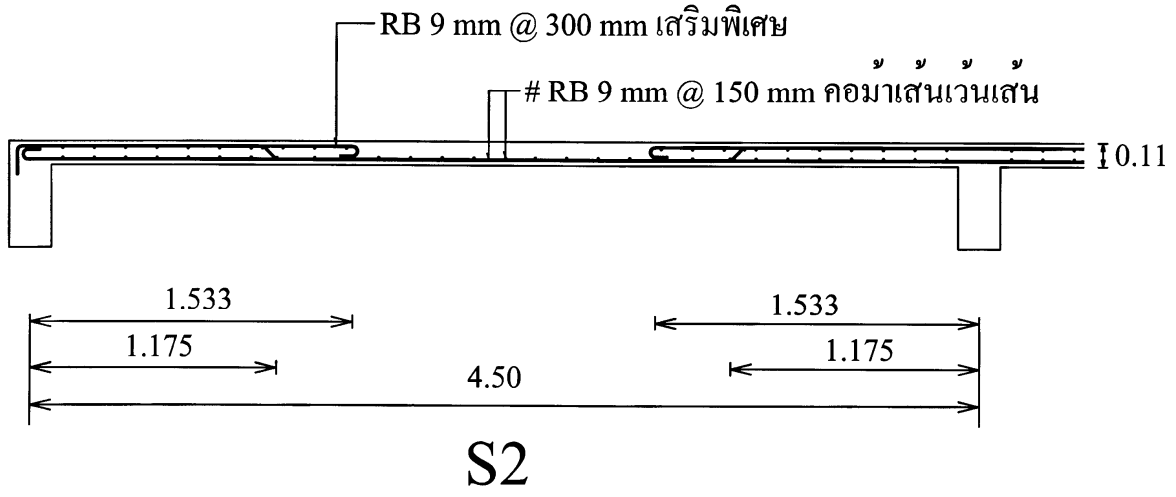
ระยะเรียงเหล็กขนานขอบยาว

$$s_L = \frac{A_{s1}}{A_{sL}} = \frac{0.636}{3.834} = 0.165 \ \text{m} = 0.150 \ \text{m} = 150 \ \text{mm}$$

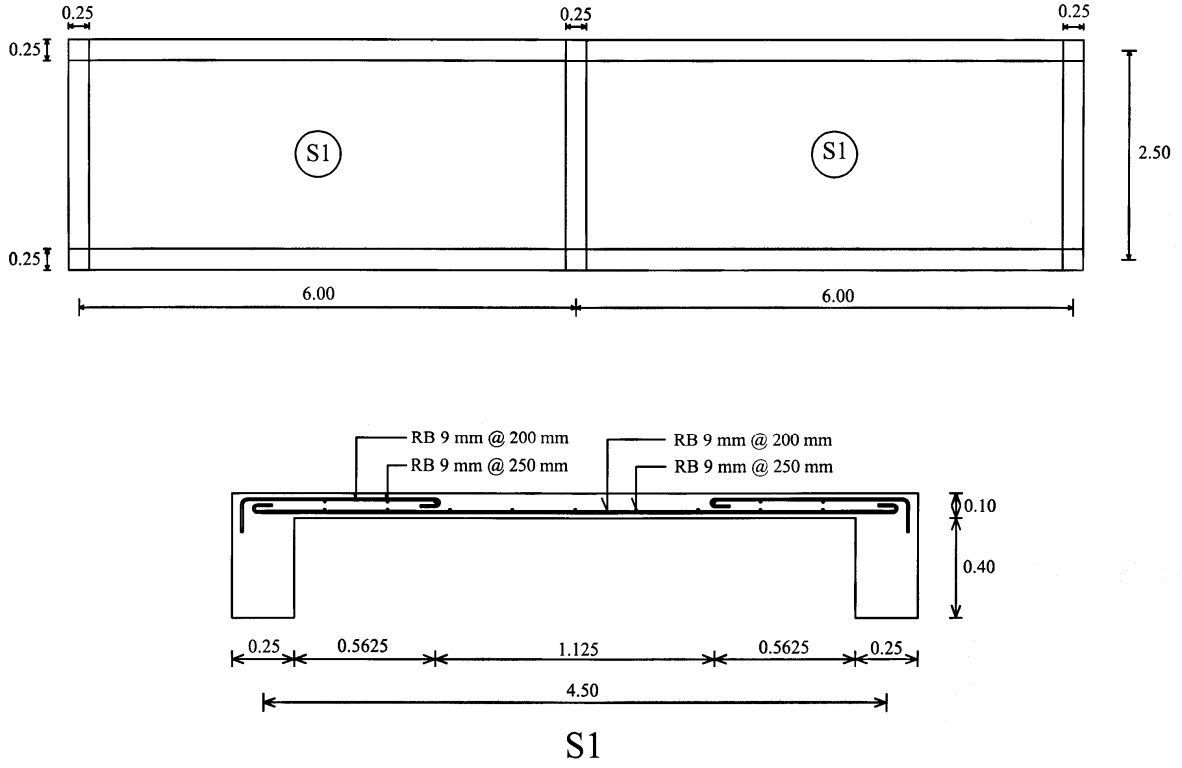
ขั้นตอนที่ 4 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก ด้านที่ติดกับ S1 เหล็กเสริมไม่ต่อเนื่องกัน แต่อาศัยสติฟเนสของคานในการให้ความต่อเนื่อง

ตำแหน่งงอคอม้าจึงเป็น $\frac{S - b_w}{4} + \frac{b_w}{2} = \frac{4.50 - 0.20}{4} + \frac{0.20}{2} = 1.175 \ \text{m}$

ตำแหน่งปลายเหล็กเสริมพิเศษ $\frac{S - b_w}{3} + \frac{b_w}{2} = \frac{4.50 - 0.20}{3} + \frac{0.20}{2} = 1.533 \ \text{m}$



ตัวอย่างที่ 3.3 จงออกแบบแผ่นพื้น S1 น้ำหนักบรรทุกจร 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร คานขนาด 0.25×0.60 m^2 ให้ $f_c^{'} = 240$ ksc, $f_y = 2400$ ksc



ตัวอย่างที่ 3.3

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$$f_y = 2400 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 2{,}400 = 1{,}200 \ \text{ksc}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}200}{8.72 \times 65}} = 0.321$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.321}{3} = 0.893$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.321 \times 0.893 = 9.316 \ \text{ksc}$$

$$S = 2.50 \ \text{m}$$

$$L = 6.00 \ \text{m}$$

$$m = \frac{S}{L} = \frac{2.50}{6.00} = 0.417 < 0.5$$

เป็นแผ่นพื้นทางเดียว และมีความต่อเนื่องขอบสั้นขอบเดียว

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของแผ่นพื้น

แผ่นพื้นทางเดียว

$$h \geq \frac{S}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{2.50}{20}\left(0.4 + \frac{2{,}400}{7{,}000}\right) = 0.093 \Rightarrow 0.10 \ \text{m} = 10 \ \text{cm}$$

น้ำหนักแผ่นพื้น

$$w_G = 2400h = 2400 \times 0.10 = 240 \ \text{kg/m}^2$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_G + w_L = 240 + 250 = 490 \ \text{kg/m}^2$$

ความลึกประสิทธิผล d เมื่อให้ระยะหุ้ม 2 cm และเหล็กเสริม RB 9 mm

$$d_S = h - 2 - \frac{d_b}{2} = 10 - 2 - \frac{0.9}{2} = 7.55 \ \text{cm}$$

$$d_L = h - 2 - d_b - \frac{d_b}{2} = 10 - 2 - 0.9 - \frac{0.9}{2} = 6.65 \ \text{cm}$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_{RS} = Rbd_S^2 = 8.72 \times 100 \times 7.55^2 = 49{,}706.18 \ \text{kg} \cdot \text{cm/m}$$

$$M_{RL} = Rbd_L^2 = 8.72 \times 100 \times 6.65^2 = 38{,}562.02 \ \text{kg} \cdot \text{cm/m}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาสัมประสิทธิ์โมเมนต์ และโมเมนต์สูงสุด

เมื่อ $m = 0.417 < 0.5$

สัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านสั้น $C_1 = C_3 = 0.049$ และ $C_2 = 0.074$ ดังนั้น $C_S = 0.074$

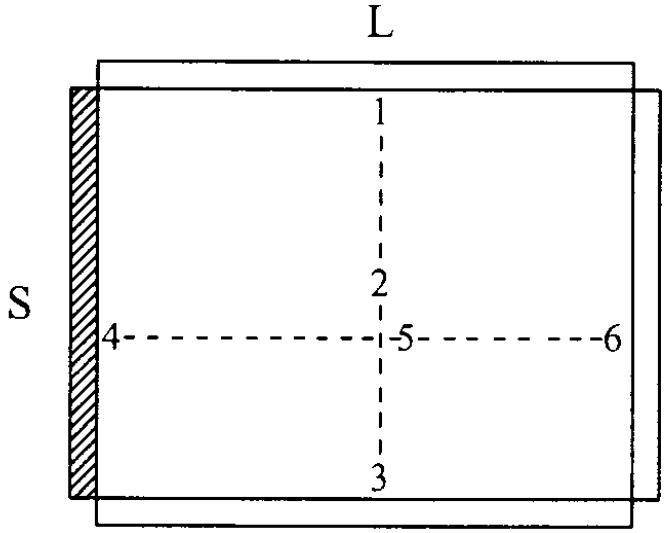
สัมประสิทธิ์โมเมนต์ด้านยาว $C_4 = 0.058, C_5 = 0.044, C_6 = 0.029$ ดังนั้น $C_L = 0.058$

โมเมนต์ดัดสูงสุดทางด้านสั้น

$$M_S = C_S wS^2 = 0.074 \times 490 \times 2.50^2$$

$$M_S = 226.625 \text{ kg} \cdot \text{m/m}$$

$$M_S = 22{,}662.5 \text{ kg} \cdot \text{cm/m} < M_{RS} = 49{,}706.18 \text{ kg} \cdot \text{cm/m}$$



โมเมนต์ดัดสูงสุดทางด้านยาว

$$M_L = C_L wS^2 = 0.058 \times 490 \times 2.50^2$$

$$M_L = 177.625 \text{ kg} \cdot \text{m} = 17{,}762.5 \text{ kg} \cdot \text{cm/m}$$

$$M_L < M_{RL} = 38{,}562.02 \text{ kg} \cdot \text{cm/m}$$

ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

$$A_{s,min} = 0.0025bh = 0.0025 \times 100 \times 10 = 2.5 \text{ cm}^2/\text{m}$$

เหล็กเสริมทางด้านสั้น

$$A_{sS} = \frac{M_S}{f_s jd_S} = \frac{22{,}662.5}{1{,}200 \times 0.893 \times 7.55} = 2.801 \text{ cm}^2/\text{m} > A_{s,min}$$

ระยะเรียงของเหล็ก RB 9 mm ซึ่งมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4}d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \text{ cm}^2/\text{m}$ คือ

$$s_S = \frac{A_{s1}}{A_{sS}} = \frac{0.636}{2.801} = 0.227 \text{ m} \Rightarrow 200 \text{ mm}$$

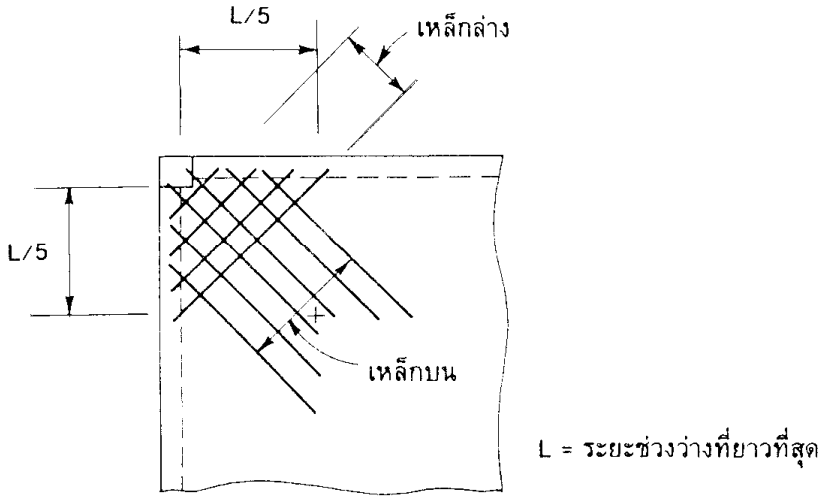
เหล็กเสริมทางด้านยาว

$$A_{sL} = \frac{M_L}{f_s jd_L} = \frac{17{,}762.5}{1{,}200 \times 0.893 \times 6.65} = 2.493 \text{ cm}^2/\text{m} \Rightarrow A_{s,min} = 2.5 \text{ cm}^2/\text{m}$$

ระยะเรียงของเหล็ก RB 9 mm ซึ่งมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4}d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \text{ cm}^2/\text{m}$ คือ

$$s_L = \frac{A_{s1}}{A_{sL}} = \frac{0.636}{2.5} = 0.254 \text{ m} \Rightarrow 250 \text{ mm}$$

ต้องตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมมุมที่ไม่ต่อเนื่อง ต้องไม่น้อยกว่าเหล็กเสริมรับโมเมนต์บวกสูงสุด



รูปแสดงการตรวจสอบปริมาณการเสริมเหล็กมุม

สัมประสิทธิ์โมเมนต์บวกสูงสุดคือ $C_2 = C_S = 0.074$ ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมมุมจึงไม่น้อยกว่าเหล็กด้านสั้นคือ $A_s^+ = A_{sS} = 2.801 \ \text{cm}^2/\text{m}$

เหล็กบนเสริมมุม

$$A_{sdiaT} = A_{s1}\left[\frac{S}{s_L\sqrt{S^2+L^2}} + \frac{L}{s_S\sqrt{S^2+L^2}}\right]$$

$$A_{sdiaT} = 0.636 \times \left[\frac{2.50}{0.25\sqrt{2.50^2+6.00^2}} + \frac{6.00}{0.15\sqrt{2.50^2+6.00^2}}\right]$$

$$A_{sdiaT} = 4.892 \ \text{cm}^2/\text{m} > A_s^+ = 2.801 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

เหล็กล่างเสริมมุม

$$A_{sdiaB} = \frac{A_{s1}}{2}\left[\frac{S}{s_L\sqrt{S^2+L^2}} + \frac{L}{s_S\sqrt{S^2+L^2}}\right]$$

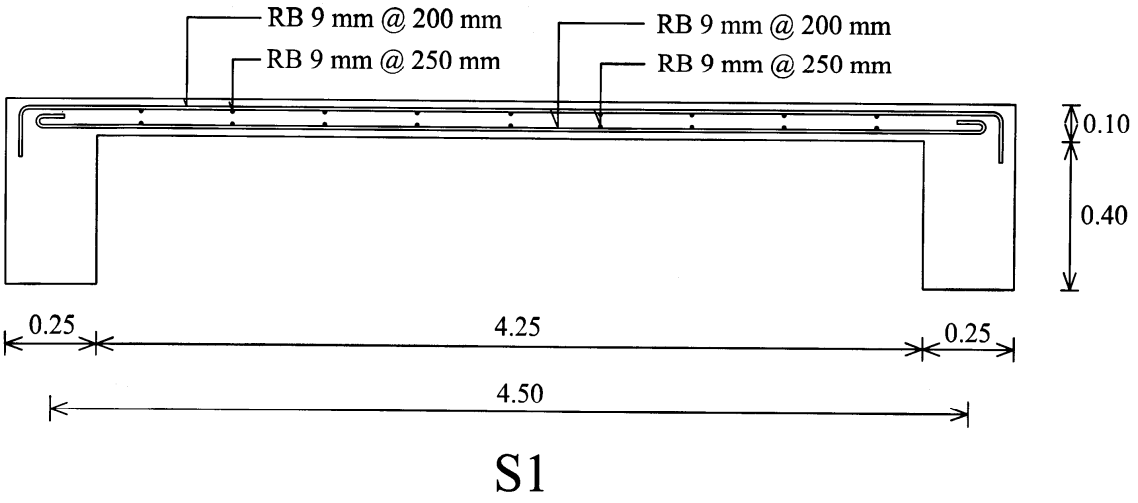
$$A_{sdiaB} = \frac{0.636}{2} \times \left[\frac{2.50}{0.25\sqrt{2.50^2+6.00^2}} + \frac{6.00}{0.15\sqrt{2.50^2+6.00^2}}\right]$$

$$A_{sdiaB} = 2.446 \ \text{cm}^2/\text{m} < A_s^+ = 2.801 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

ดังนั้นบริเวณมุมจึงไม่ต้องงอคอม้าเส้นเว้นเส้น แต่เสริมพิเศษที่ด้านบนทำให้ได้

$$A_{sdiaB} = A_{sdiaT} = 4.892 \ \text{cm}^2/\text{m} > A_s^+ = 2.801 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

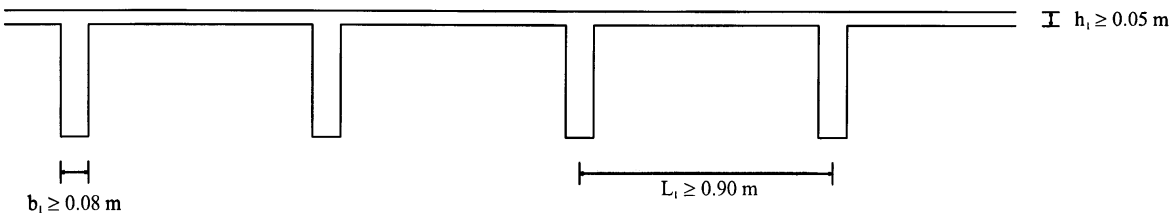
เนื่องจากเสริมเหล็กระยะ $\frac{L}{5} = \frac{6.00}{5} = 1.20$ เมตร สองข้างเกือบเต็มระยะ 2.50 เมตร ดังนั้นเสริมเหล็กเต็มทั้งบนและล่าง



การเสริมเหล็กสองชั้นเพื่อให้เหล็กเสริมมุมพื้นริมนอกเพียงพอ

3.4 พื้นระบบตง

การออกแบบแผ่นพื้นบนคานนิยมใช้ความหนาพื้นไม่เกิน 0.15 เมตร หากหนากว่านี้จะทำให้น้ำหนักของพื้นเองมากเกินไป อาจจะใช้พื้นระบบตงที่ช่วยให้พื้นบางลง การโก่งตัวน้อย ข้อเสียคือแพงที่ไม้แบบ การทำความสะอาดเพดาน การแขวนดวงโคมแสงสว่าง ที่ทำให้ในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยม แต่ควรศึกษาไว้เผื่อในกรณีจำเป็นจะได้ทำได้



รูปที่ 3.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับแผ่นพื้นระบบตง

ข้อกำหนดเกี่ยวกับพื้นระบบตงที่ควรทราบคือ

1. ความหนาของส่วนพื้นต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 5 ซม $(h_1 \geq 5 \text{ cm})$
2. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางตงต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.90 เมตร $(L_1 \geq 0.90 \text{ m})$
3. ความกว้างของตงต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.08 เมตร $(b_1 \geq 0.08 \text{ m})$
4. เหล็กเสริมตามยาวตงต้องไม่เล็กกว่า RB 12 mm หรือ DB 12 mm

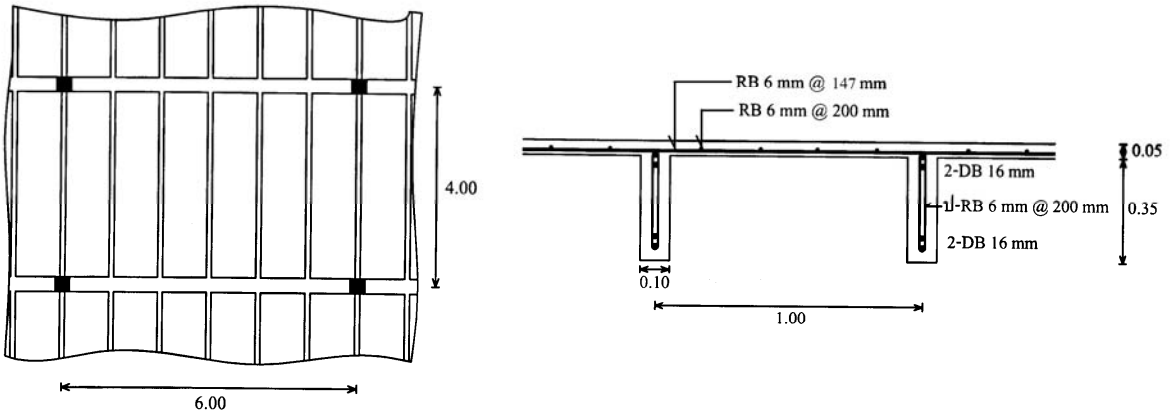
ขั้นตอนการคำนวณออกแบบพื้นระบบตง

(1) กำหนดระยะห่างตง ปกตินิยมใช้ 0.75, 1.00, 1.20 หรือระยะอื่นๆ ก็ได้โดยพยายามแบ่งช่วงให้ลงพอดีระยะระหว่างเสา

(2) ตัดแผ่นพื้นกว้าง 1.00 เมตร ในแนวตั้งฉากกับตงแล้วออกแบบเป็นแผ่นพื้นทางเดียวหรือแบบพื้นต่อเนื่องก็ได้ เหล็กเสริมตามยาวขนานตงให้คำนวณโดยใช้เหล็กกันร้าวคือ $0.0025bh_1$ ค่า b = 100 cm สำหรับเหล็ก SR-24 เช่น RB 6 mm ใช้ $0.0020bh_1$ สำหรับเหล็ก SD-30 เช่น DB 10 mm หรือ $0.0018bh_1$ สำหรับเหล็กตะแกรงสำเร็จรูป (wire mesh) เหล็กเสริมพื้นในทิศทางตั้งฉากตงควรอยู่ที่กึ่งกลางความหนาพื้นเพื่อให้ทำหน้าที่รับแรงดึงได้ทั้งกรณีรับโมเมนต์บวกและรับโมเมนต์ลบ

(3) ออกแบบตงแบบคานตัว T หรือจะให้ง่ายก็ออกแบบเป็นคานสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตัวอย่างที่ 3.4 จงออกแบบแผ่นพื้นขนาด 4.00×6.00 m^2 รับน้ำหนักบรรทุกจร 500 kg/m^2 กำหนดกำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc, กำลังครากของเหล็กผิวเรียบ $f_y=2400$ ksc กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย $f_y=3000$ ksc



วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตอายุ 28 วัน

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}}=8.72$$

$f_y=2{,}400$ ksc = กำลังครากของเหล็กผิวเรียบ

$f_s=0.5f_y=0.5\times2{,}400=1{,}200$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กผิวเรียบ

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}200}{8.72\times65}}=0.321=$$ พารามิเตอร์แกนสะเทินกรณีเหล็กผิวเรียบ

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.321}{3} = 0.893 = \text{ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์กรณีเหล็กผิวเรียบ}$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.321 \times 0.893 = 9.316 \text{ ksc} = \text{ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุลกรณีเหล็กผิวเรียบ}$$

$f_y = 3{,}000$ ksc = กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย SD-30

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้กรณีเหล็กข้ออ้อย

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274 = \text{ พารามิเตอร์แกนสะเทินกรณีเหล็กข้ออ้อย}$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909 = \text{ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์กรณีเหล็กข้ออ้อย}$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc} = \text{ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุลกรณีเหล็กข้ออ้อย}$$

$w_L = 500 \text{ kg/m}^2 =$ น้ำหนักบรรทุกจรบนพื้น

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาและออกแบบพื้น

แบ่งระยะระหว่างตง $L_1 = 1.00$ m ขนานกับแนว 4.00 เมตร จึงได้ 6 ช่องตามรูป ดังนั้นในพื้นระหว่างตงจะกว้าง S = 1.00 เมตร และยาว L = 4.00 เมตร อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว

$$m = \frac{S}{L} = \frac{1.00}{4.00} = 0.25 < 0.5 \text{ แสดงว่าเป็นแผ่นพื้นทางเดียวต่อเนื่องทุกด้าน}$$

ความหนาพื้นอย่างน้อย

$$h_1 = \frac{S}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{1.00}{20}\left(0.4 + \frac{2400}{7000}\right) = 0.037 \Rightarrow 0.05 \text{ m}$$

น้ำหนักพื้น $w_G = 2400 h_1 = 2400 \times 0.05 = 120 \text{ kg/m}^2$

น้ำหนักบรรทุกรวม $w = 120 + 500 = 620 \text{ kg/m}^2$

เปิดตาราง 3.1 ได้สัมประสิทธิ์โมเมนต์

ด้านสั้น $C_1 = C_3 = 0.083, C_2 = 0.062$ ดังนั้น $C_S = 0.083$

ด้านยาว $C_4 = C_6 = 0.033, C_5 = 0.025$ ดังนั้น $C_L = 0.033$

โมเมนต์ดัดด้านสั้น

$$M_S = C_s w S^2 = 0.083 \times 620 \times 1.00^2 = 51.46 \text{ kg} \cdot \text{m} = 5{,}146 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

โมเมนต์ด้านยาว

$$M_L = C_L w S^2 = 0.033 \times 620 \times 1.00^2 = 20.46 \text{ kg} \cdot \text{m} = 2{,}046 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

พื้นหนา 0.05 เมตร ให้เหล็กเสริมอยู่ที่กึ่งกลางความหนา ดังนั้นความลึกประสิทธิผล

$$d = 0.5 h_1 = 0.5 \times 5 = 2.5 \text{ cm}$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 9.316 \times 100 \times 2.5^2 = 5{,}822.5 \ \text{kg} \cdot \text{cm} > M_S > M_L$$

แสดงว่าความหนา 5 ซม นั้นเพียงพอแล้ว คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

$$A_{sS} = \frac{M_S}{f_s jd} = \frac{5{,}146}{1{,}200 \times 0.893 \times 2.5} = 1.921 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

$$A_{sL} = \frac{M_L}{f_s jd} = \frac{2{,}046}{1{,}200 \times 0.893 \times 2.5} = 0.764 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,min} = 0.0025 bh_1 = 0.0025 \times 100 \times 5.0 = 1.25 \ \text{cm}^2/\text{m} < A_{sL}$$

เลือก RB 6 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.6^2 = 0.283 \ \text{cm}^2$

เหล็กขวางตงมีระยะเรียง

$$s_S = \frac{A_{s1}}{A_{sS}} = \frac{0.283}{1.921} = 0.147 \ \text{m}$$

เหล็กขนานตงมีระยะเรียง

$$s_L = \frac{A_{s1}}{A_{s,min}} = \frac{0.283}{1.25} = 0.2264 \ \text{m} \Rightarrow 0.20 \ \text{m}$$

ออกแบบตง

ความลึกตง $h = \frac{4.00}{16}\left(0.4 + \frac{3000}{7000}\right) = 0.207 \ \text{m}$ ใช้ $h = 0.40 \ \text{m} = 40 \ \text{cm}$

ความกว้างตง $b_1 = \frac{h}{5} = \frac{40}{5} = 8 \ \text{cm} \Rightarrow 10 \ \text{cm}$

น้ำหนักตงไม่รวมพื้น $w_J = 2400 \times 0.10 \times (0.40 - 0.05) = 84 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักจากพื้นลงตงหนึ่งตัว $w_S = 620 \times 1.00 = 620 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักบรรทุกรวม $w = 84 + 620 = 704 \ \text{kg/m}$

สมมติเสริมเหล็ก 2-DB 16 mm ระยะหุ้ม 4 ซม เหล็กลูกตั้ง RB 6 mm ความลึกประสิทธิผล

$$d = 40 - 4 - 0.6 - 1.6 - \frac{2.5}{2} = 32.55 \ \text{cm}$$

ความลึกเหล็กรับแรงอัด

$$d' = 4 + 0.6 + 1.6 + \frac{2.5}{2} = 7.45 \ \text{cm}$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กรับแรงอัด

$$f_s^{'} = 2 f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1 - k} = 2 \times 1{,}500 \times \frac{0.274 - \frac{7.45}{32.55}}{1 - 0.274} = 186.45 \ \text{ksc}$$

โมเมนต์สูงสุด

$$M = \frac{1}{9} wL^2 = \frac{1}{9} \times 704 \times 4.00^2 = 1{,}251.56 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 125{,}156 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 10 \times 32.55^2 = 85{,}766.73 \ \ kg \cdot cm < M$$

เหล็กเสริมรับแรงอัด

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{125{,}156 - 85{,}766.73}{186.45 \times (32.55 - 7.45)} = 8.42 \ \ cm^2$$

เหล็กเสริมรับแรงดึง

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')} = \frac{85{,}766.73}{1{,}500 \times 0.909 \times 32.55} + \frac{125{,}156 - 85{,}766.73}{1{,}500(32.55 - 7.45)}$$

$$A_{st} = 2.979 \ \ cm^2 < A_{sc} = 8.42 \ \ cm^2$$

ต้องเพิ่มความลึกหรือลดระยะระหว่างตง กรณีนี้จะใช้การเพิ่มความลึก

$$d \geq \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{125{,}156}{8.095 \times 10}} = 39.32 \ \ cm$$

ความลึกประมาณ

$$h = d + d' = 39.32 + 7.45 = 46.77 \Rightarrow 50 \ \ cm$$

เปลี่ยนความลึกเป็น h = 50 cm ความกว้างคงเดิม

$$w = 2400 \times 0.10 \times (0.50 - 0.05) + 620 = 728 \ \ kg/m$$

$$M = \frac{1}{9} wL^2 = \frac{1}{9} \times 728 \times 4.00^2 = 1{,}294.22 \ \ kg \cdot m = 129{,}422 \ \ kg \cdot cm$$

$$d = 50 - 4 - 0.6 - 1.6 - \frac{2.5}{2} = 42.55 \ \ cm$$

$$d' = 7.45 \ \ cm$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1 - k} = 2 \times 1500 \times \frac{0.274 - \frac{7.45}{42.55}}{1 - 0.274} = 408.73 \ \ ksc < 1{,}500 \ \ ksc$$

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 10 \times 42.55^2 = 146{,}560.1774 \ \ kg \cdot m > M$$

$$A_{sc} = 0$$

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd} = \frac{129{,}422}{1{,}500 \times 0.909 \times 42.55} = 2.23 \ \ cm^2$$

$$V = w\left(\frac{L}{2} - d\right) = 728 \times \left[\frac{4.00}{2} - 0.4255\right] = 1{,}146.236 \ \ kg$$

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c^{'}}bd = 0.29\sqrt{240} \times 10 \times 42.55 = 1{,}911.6 \ \ kg > V$$

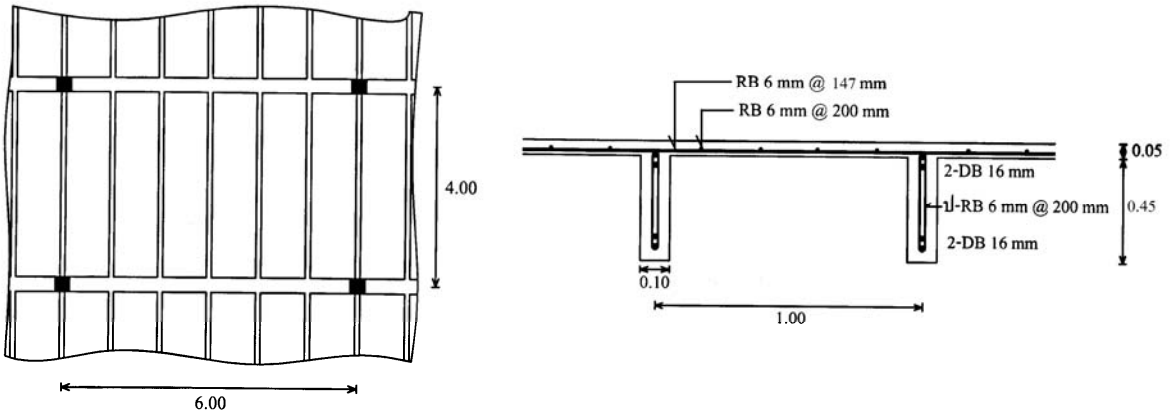
เลือกเหล็กลูกตั้ง RB 6 mm มี $A_v = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.6^2 = 0.565 \ \ cm^2$

$$s \leq \frac{A_v f_y}{3.5b} = \frac{0.565 \times 2400}{3.5 \times 10} = 38.776 \ \ cm$$

$$s \leq \frac{d}{2} = \frac{42.55}{2} = 21.275 \ \ cm$$

$$s \le 60 \text{ cm}$$

ใช้ ป-RB 6 mm @ 200 mm



3.5 การเจาะพื้น

ในบางครั้งเราอาจจะต้องเจาะพื้นเป็นรูสำหรับช่องแสงบริเวณหลังคาห้องน้ำ หรือเจาะรูทำปล่องให้ท่อประปาและท่อโสโครกผ่าน โดยปกติจะเจาะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปริมาณเหล็กที่หายไปต้องเสริมขนานขอบสี่เหลี่ยมและทแยงตรงมุมในปริมาณไม่น้อยกว่าเหล็กที่ถูกตัดไป และต้องคำนึงถึงระยะฝังของเหล็กให้เพียงพอด้วย ขนาดเหล็กที่เสริมพิเศษไม่ควรให้เล็กกว่า 12 mm

พิจารณารูปที่ 3.5(ก) ต้องการเจาะแผ่นพื้นหลังคาห้องน้ำ แล้วมีโคมพลาสติกปิดแบบโปร่งแสงเพื่อให้แสงอาทิตย์กระจายในห้องน้ำเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ขนาดรูเจาะ 0.60 × 0.60 เมตร ยกขอบหนา 0.10 เมตร โดยรอบสูง 0.60 เมตร เพื่อไม่ให้น้ำล้นเข้าทางรูที่เจาะตามรูปที่ 3.5(ข) จากการออกแบบได้เหล็กทางสั้น RB 9 mm @ 60 mm และเหล็กทางยาว RB 9 mm @ 90 mm ขณะก่อสร้างจะทำพื้นเต็มและวางเหล็กตามกำหนด แล้วใช้กรรไกรตัดเหล็กในช่วงเปิดงอขึ้นตามรูปที่ 3.5(ง) สังเกตว่ามีการใช้ RB 9 mm รัดรอบขอบให้แข็งแรงขึ้นพิจารณาขอบด้านสั้นที่มีการตัดเหล็กมากที่สุด

จำนวนเส้นเหล็กที่ถูกตัดด้านสั้น $= \dfrac{0.60 + 0.10 + 0.10}{0.06} = 13.33$ เส้น

เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก RB 9 mm ที่หายไปจำนวน 13.33 เส้นคือ

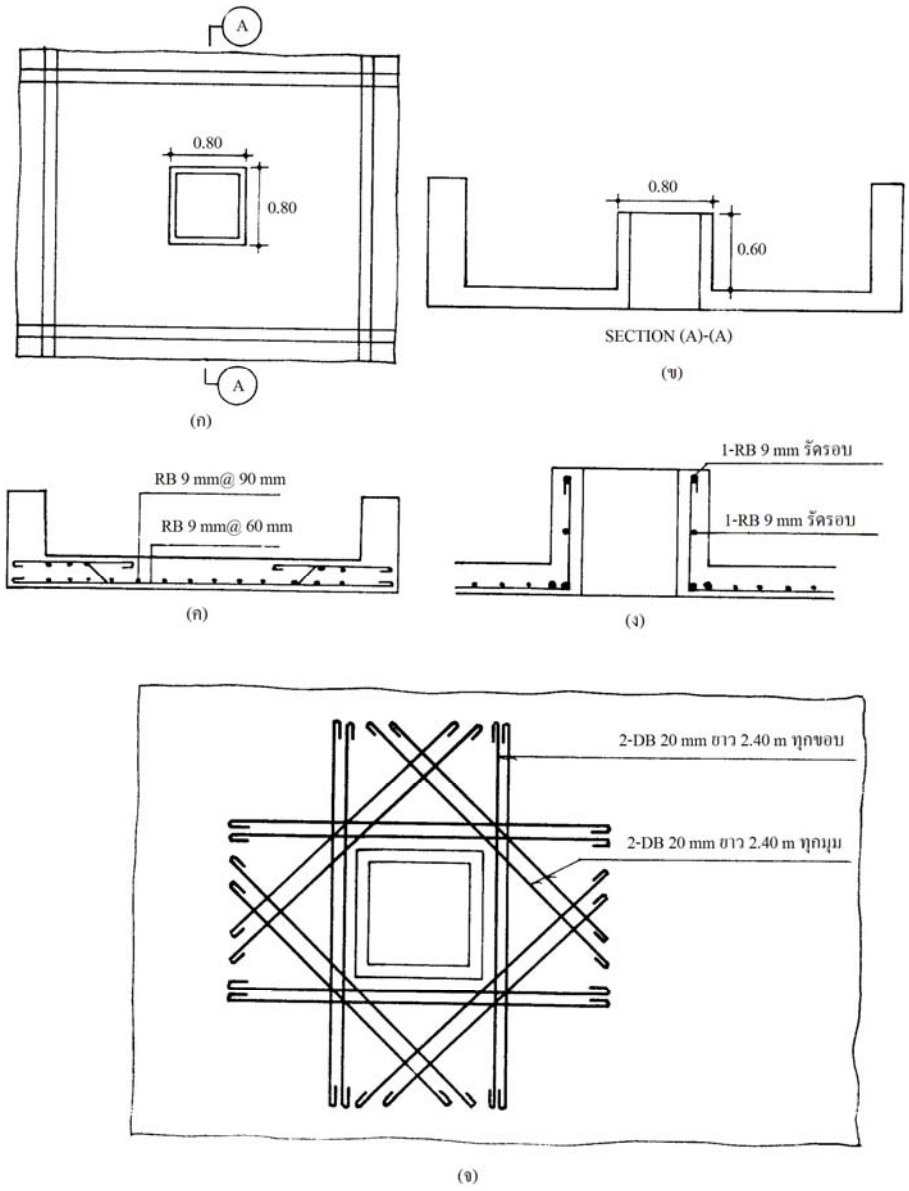
$$A_s = 13.33 \times 0.636 = 8.48 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 20 mm มีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ $A_{s1} = \dfrac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 3.14 \text{ cm}^2$ ดังนั้นต้องใช้

$$\text{จำนวนเหล็ก DB 20 mm} = \frac{8.48}{3.14} = 2.7 \Rightarrow 3 \Rightarrow 4 \text{ เส้นแบ่งข้างละ 2 เส้น}$$

จัดการเสริมเหล็กที่ขอบๆ ละ 2 เส้น และทแยงมุม 2 เส้นทุดมุมตามรูปที่ 3.5(จ)

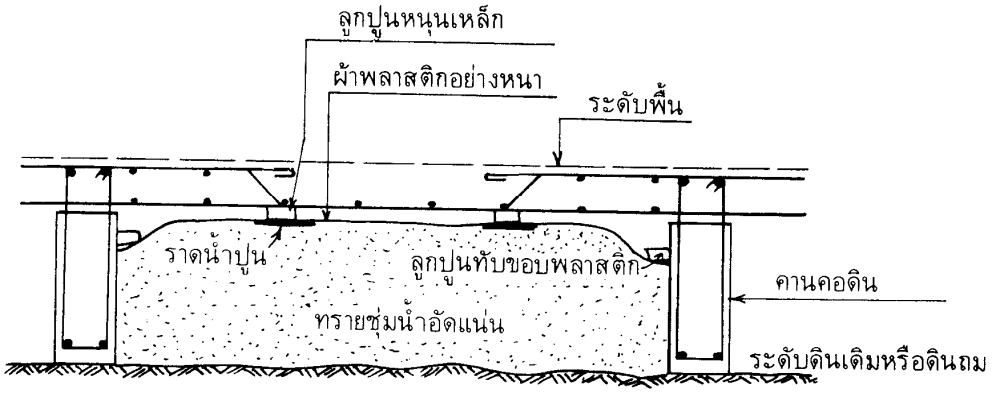
พื้นทั่วๆ ไป ช่างจะหนุนแบบตรงกลางให้สูงขึ้น S/300 ถึง S/250 เมื่อ S เป็นความยาวด้านสั้น เมื่อถอดแบบแล้วจะแอ่นลงมาจนเสมอหรือสูงกว่าแนวระดับเล็กน้อย แต่ถ้าเจาะรูให้ยก S/150 ถึง S/100



รูปที่ 3.5 การเสริมเหล็กพิเศษรัดรอบรูเจาะในแผ่นพื้น

3.6 การใช้ทรายถมเป็นแบบพื้นชั้นล่าง

ในกรณีออกแบบให้พื้นชั้นล่างฝากบนคาน ปกติจะใช้ไม้ทำแบบพื้นแล้วเปิดช่องสำหรับถอดแบบในภายหลัง แต่การสูญเสียไม้แบบสูงมากบางจุดต้องทิ้งไม้แบบไปเลย และยังทำให้การก่อสร้างในชั้นที่สองช้าไปอีกด้วยเพราะต้องใช้ค้ำยันฝากบนพื้นชั้นล่าง ผู้รับเหมาจะแก้ปัญหาโดยการใช้ทรายถมราดน้ำให้ชุ่มบดอัดจนแน่น และปูพลาสติกทำเป็นแบบดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การใช้ทรายถมเป็นแบบ

วิธีการนี้มีข้อควรระวังที่สำคัญคือ

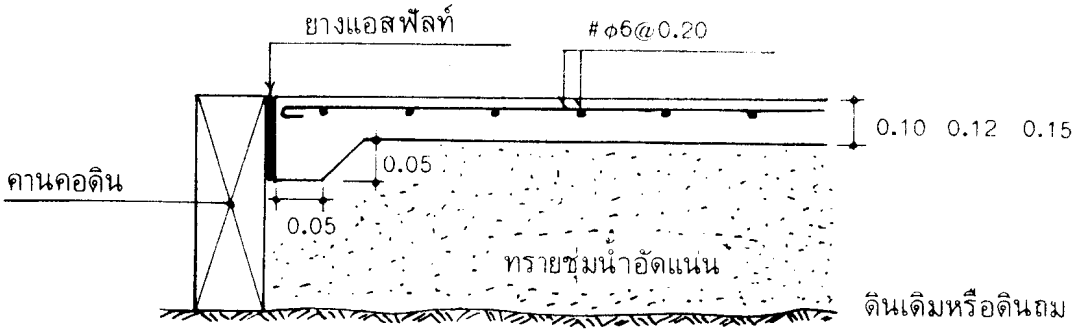
(1) ทรายต้องราดน้ำให้ชุ่มและบดอัดให้แน่น ตรงขอบติดคานทำให้เป็นร่องเพื่อไม่ให้ทรายขึ้นมากองบนผิวคานที่หล่อค้างเอาไว้ และน้ำที่ล้างทำความสะอาดก่อนเทคอนกรีตจะลงไปตามร่องแล้วซึมลงไปในทราย

(2) ตรงจุดที่จะหนุนลูกปูหรือขาไก่ควรราดน้ำปูนทิ้งไว้จนแข็ง ถ้าใช้ลูกปูนวางบนพลาสติกน้ำหนักจากเหล็กและคนงานเหยียบทำให้เหล็กจมลงชิดผิวล่าง ช่วงแรกที่ก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ อาจจะยังไม่มีปัญหาอะไร แต่นานไปเหล็กเกิดสนิมและดินทรุดตัวจะเกิดรอยแตกร้าวของพื้นได้

(3) ถ้าบดอัดทรายไม่แน่นพอ เมื่อเทคอนกรีต น้ำหนักคอนกรีตจะกดทรายยุบทำให้พื้นหนาเกินไปหรือเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมทั้งสิ้นเปลืองคอนกรีตมากขึ้น

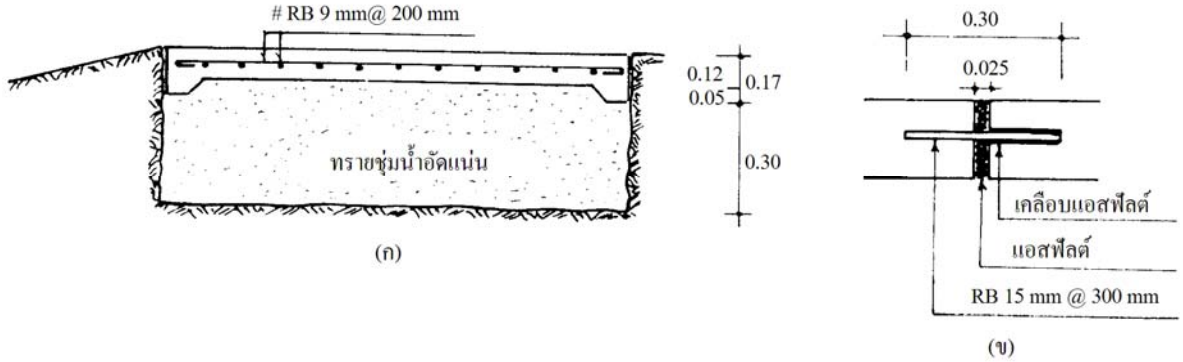
3.7 แผ่นพื้นชั้นล่างวางบนดินถม

พื้นอาคารที่มีอาณาเขตกว้าง เช่นโรงงานอุตสาหกรรม การออกแบบให้พื้นฝากบนคานจะสิ้นเปลืองทั้งคาน ตอม่อ และฐานราก หากสภาพดินแน่นพออาจจะออกแบบให้พื้นวางบนดินถมอัดแน่น ความหนาของคอนกรีตไม่ควรน้อยกว่า 0.10 เมตร เหล็กเสริม # RB 9 mm @ 250 mm จัดให้เหล็กอยู่ประมาณกึ่งกลางความหนาหรือชิดผิวบน ขอบของแผ่นพื้นทำให้หนาอีกสัก 0.05 เมตร ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเสริมเหล็กกับพื้นชั้นล่างวางบนทราย

ในบางครั้งที่น้ำหนักกดลงบนพื้นมากๆ จนพื้นทรุด อาจต้องเทคอนกรีตทับหน้าโดยใช้ตะแกรงเหล็กวางก่อน หรือถ้าดินถมเป็นโพรงเพราะมีน้ำขัง และมีเครื่องจักรวางบนพื้นอยู่ ย้ายออกแล้วจะเสียหาย แก้ไขโดยใช้สว่านเจาะคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรปลายเป็นทังสเตนคาร์ไบด์เจาะรูบริเวณที่ทรุดแล้วใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ อัด grouting agent แล้วจึงปรับระดับพื้นซึ่งถ้าแตกต่างกันไม่มากนักให้ใช้ nonshrink แทนคอนกรีต



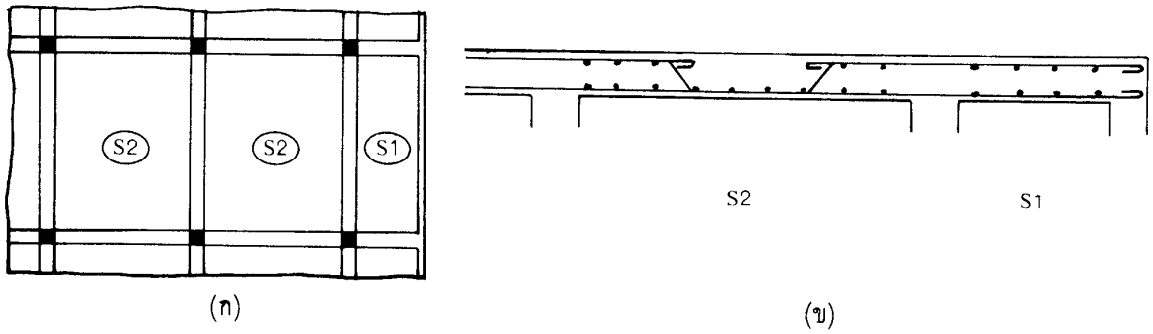
รูปที่ 3.8 รายละเอียดถนนภายในบริเวณบ้านพักอาศัย

ในรูปที่ 3.8(ก) เป็นการแสดงรายละเอียดถนนคอนกรีตสำหรับบ้านพักอาศัยทั่วๆ ไป ซึ่งมีเฉพาะรถยนต์นั่งวิ่งผ่านเท่านั้น แต่ถ้ามีรถหนักขึ้นวิ่งผ่านควรเพิ่มความหนาเป็น 0.15 หรือ 0.20 หรือ 0.25 เมตร แล้วแต่ความเหมาะสม ในรูปที่ 3.8(ข) เป็นรายละเอียดของรอยต่อระหว่างผืนคอนกรีตถนน (แต่ละผืนไม่ควรกว้าง 5.00×5.00 m) เหล็ก RB 15 mm @ 300 mm ด้านหนึ่งเสียบฝังอีกด้านหนึ่งเคลือบแอสฟัลต์ให้เลื่อนตามยาวได้ เหล็กนี้จะป้องกันการทรุดตัวแตกต่างกัน รายละเอียดการออกแบบถนนคอนกรีตอาจจะค้นคว้าเพิ่มเติมจากเรื่อง Pavement Design ในวิชา Highway Engineering

ในบางครั้งที่วิศวกรออกแบบให้พื้นวางบนทรายตามรูปที่ 3.7 แต่ผู้ควบคุมงานอาจจะสั่งเพิ่มเติมโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์คือ เพิ่มเหล็กยึดตามรูปที่ 3.8(ข) หรือเสียบเหล็กพื้นฝากบนคานเลย คานจะรับน้ำหนักพื้นซึ่งผิดจุดประสงค์ในการออกแบบของวิศวกร ผลที่เกิดขึ้นในภายหลังคือระบบทรุดตัว หรือคานทรุดตัวมากเกินไปจนผนังร้าว

3.8 พื้นสองทางต่อเนื่องกับพื้นทางเดียว

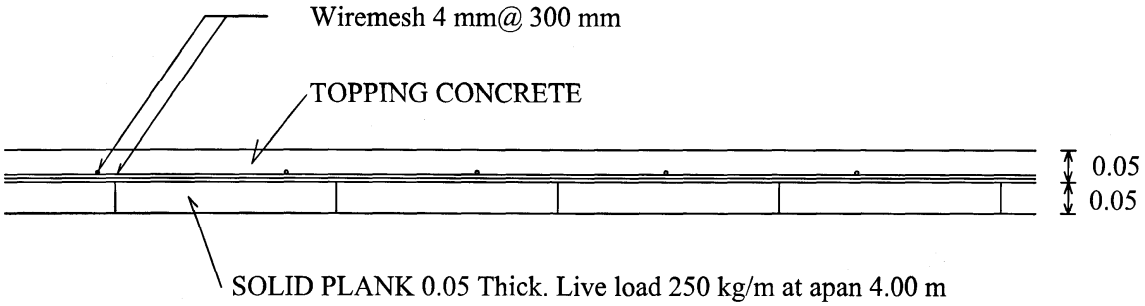
ในกรณีที่พื้นสองทางต่อเนื่องกับพื้นทางเดียวเช่น S2 กับ S1 ในรูปที่ 3.9(ก) โมเมนต์ลบที่ขอบพื้น S2 จะถ่ายไปตลอด S1 ดังนั้นเหล็กเสริมของ S2 ที่งอคอม้าขึ้นไปรวมกับเหล็กเสริมพิเศษต้องวางตลอด S1 ด้วย ดังรูปที่ 3.9(ข)



รูปที่ 3.9 แผ่นพื้นสองทางต่อเนื่องกับแผ่นพื้นทางเดียว

3.9 รายละเอียดแผ่นพื้นสำเร็จรูป

ปัจจุบันมีการใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูปคอนกรีตอัดแรงทั้งแบบสี่เหลี่ยมตันกว้าง 0.35 เมตร หนา 0.05 เมตร หรือแบบมีรูกลวง (Hollow Core) ที่มีความกว้าง 0.60 เมตร และ 1.20 เมตร ความหนา 120 mm, 150 mm, 200 mm, และ 250 mm เมื่อวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปบนคานแล้วจะมีการหนุนท้องพื้นให้เรียบเสมอกัน จากนั้นผู้ตะแกรงเหล็ก RB 6 mm @ 300 mm หรือ Wiremesh 4 mm @ 250 mm รูปที่ 3.10 เป็นตัวอย่างการเขียนรายละเอียดแผ่นพื้น สำหรับวิธีการออกแบบคอนกรีตอัดแรงให้ศึกษาจากตำราคอนกรีตอัดแรง เช่น ของ รศ.ดร.นเรศ พันธราธร

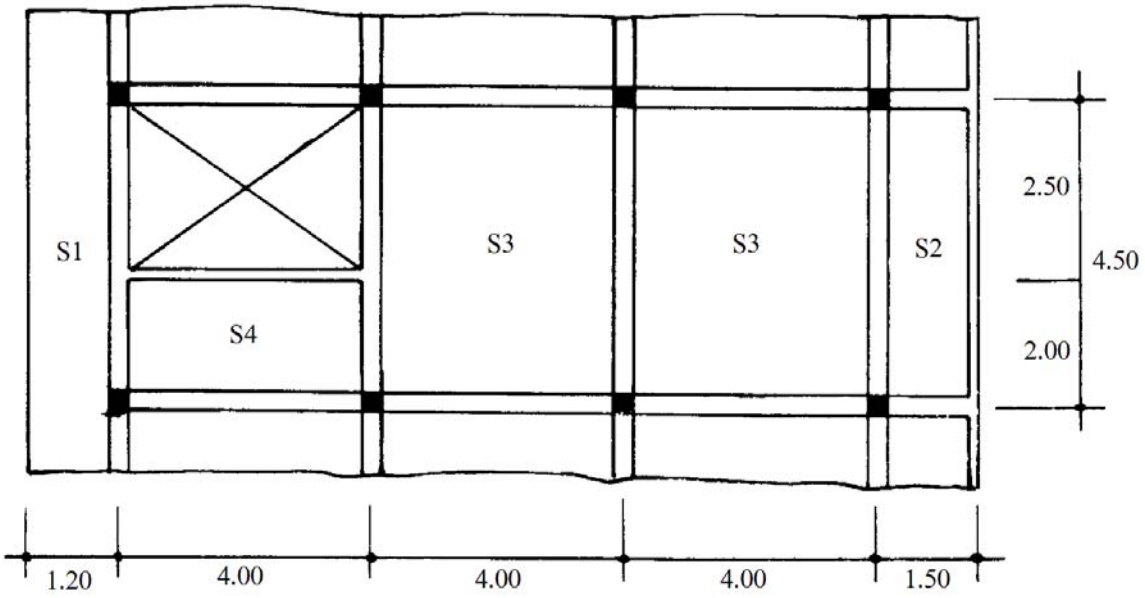


รูปที่ 3.10 รายละเอียดพื้นสำเร็จรูป solid plank

แบบฝึกหัดบทที่ 3

3.1 จงออกแบบพื้น S1, S2, S3, S4 ให้น้ำหนักบรรทุกจร $200\ kg/m^2$ กำลังประลัยของคอนกรีต $f_c^{'} = 250\ ksc$, กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 2{,}400\ ksc$

3.2 จงออกแบบพื้น S3 เป็นพื้นระบบตง ให้น้ำหนักบรรทุกจร $800\ kg/m^2$ กำลังประลัยของคอนกรีต $f_c^{'} = 250\ ksc$, กำลังครากของเหล็กเสริมพื้น $f_y = 2{,}400\ ksc$ กำลังครากของเหล็กเสริมตง $f_y = 3{,}000\ ksc$

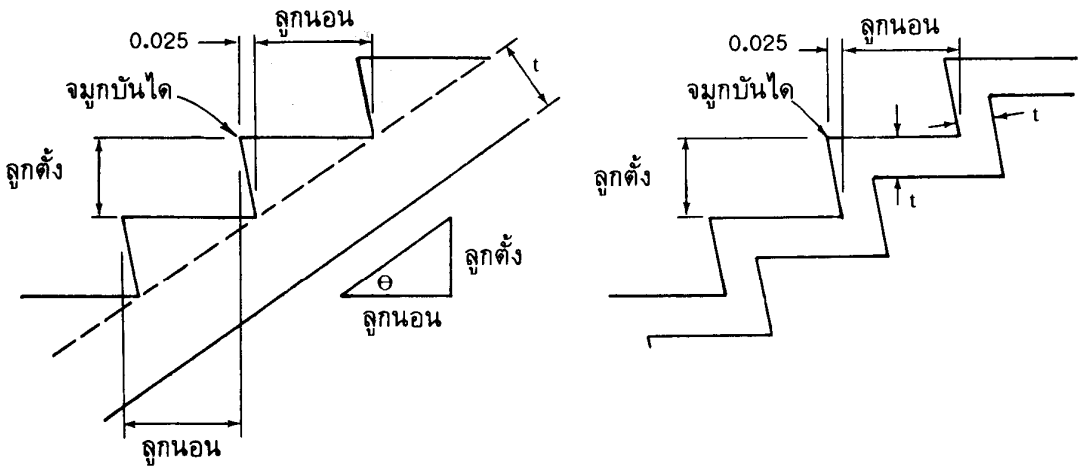


4

บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1 ชนิดของบันได

บันไดเป็นโครงสร้างที่สำคัญสำหรับเป็นทางติดต่อระหว่างชั้นต่างๆ ของอาคาร ในที่นี้จะอธิบายส่วนสำคัญของบันไดให้ทราบ



(ก) บันไดท้องแบน (ข) บันไดพับผ้า

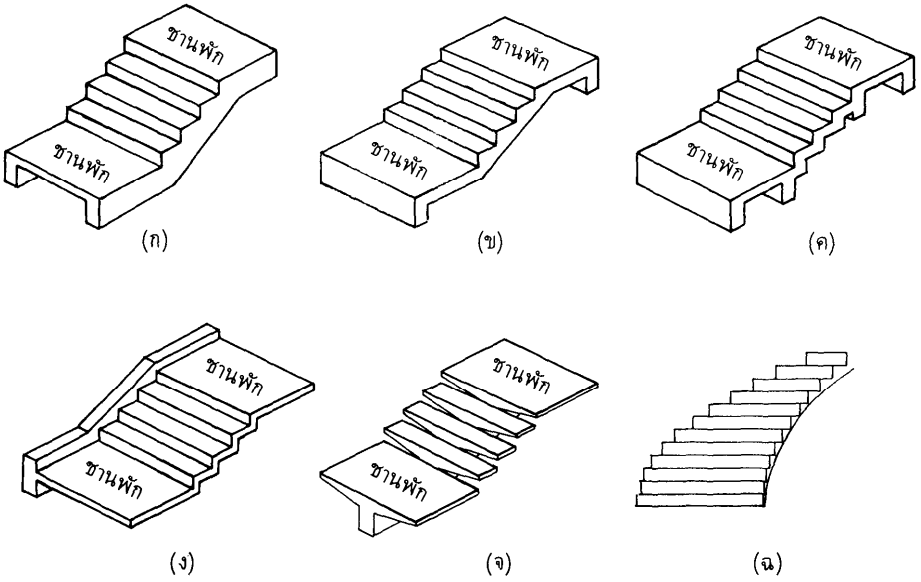
รูปที่ 4.1 ชนิดของขั้นบันได

พิจารณารูปที่ 4.1(ก) ท้องบันไดแบนเรียบ ความสูงของแต่ละขั้นเรียก ***ลูกตั้ง*** (riser) ตามกฎหมายห้ามสูงกว่า 0.20 เมตร สำหรับบ้านพักอาศัย และ 0.19 เมตร สำหรับอาคารสาธารณะ ค่าที่พอเหมาะคือ 0.175 เมตรจะทำให้เดินขึ้นลงสบายที่สุด แต่ถ้าเป็นโรงเรียนอนุบาลหรือบ้านพักคนชราควรจะเป็น 0.150 เมตร โดยปกติจะทำให้ขั้นบันไดยื่นตรง***จมูกบันได***ออกมา 2.5 เซนติเมตร เพื่อให้สวยงามและระยะทางราบของบันไดมากขึ้น เท้าจึงวางได้สะดวก ระยะทางราบจากจมูกบันไดถึงจมูกบันไดหรือจากส่วนลึกถึงส่วนลึกของขั้นบันไดเรียก ***ลูกนอน*** (tread) ซึ่งตามกฎหมายต้องไม่น้อยกว่า 0.22 เมตร สำหรับบ้านพักอาศัย และ 0.24 เมตร สำหรับอาคารสาธารณะ ค่าที่ทำให้เดินสบายคือ 0.25 เมตร (ที่รวมจมูกบันไดจะเป็น 27.5 ซม) หรือระยะ 0.275 เมตร (ที่รวมจมูกบันไดจะเป็น 30 ซม) หากกว้างเกินไปจะก้าวลำบาก ความชันของบันไดหาได้จาก

$$\text{ความชันบันได} = \tan\theta = \frac{\text{ลูกตั้ง}}{\text{ลูกนอน}}$$

บันไดจะมีลักษณะของแผ่นพื้นทางเดียว ดังนั้นการหาความหนาของบันไดจึงหาเหมือนแผ่นพื้นทางเดียวเท่านั้น ตัวขั้นบันไดเป็นน้ำหนักบรรทุกฝากบนพื้นทางเดียวนี่เอง

จากรูปที่ 4.1(ข) ขั้นบันไดจะหยักทั้งด้านบนและด้านล่างคล้ายผ้าที่พับแบบซิกแซ็ก จึงเรียกว่าบันไดพับผ้า ระยะต่างๆ เหมือนบันไดท้องแบนเว้นแต่ความหนา t ต้องพิจารณาทั้งทางตั้งและทางนอน ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมบันไดชนิดนี้เพราะทำเหล็กยากและหยากไย่เกาะตามท้องบันไดทำความสะอาดลำบาก



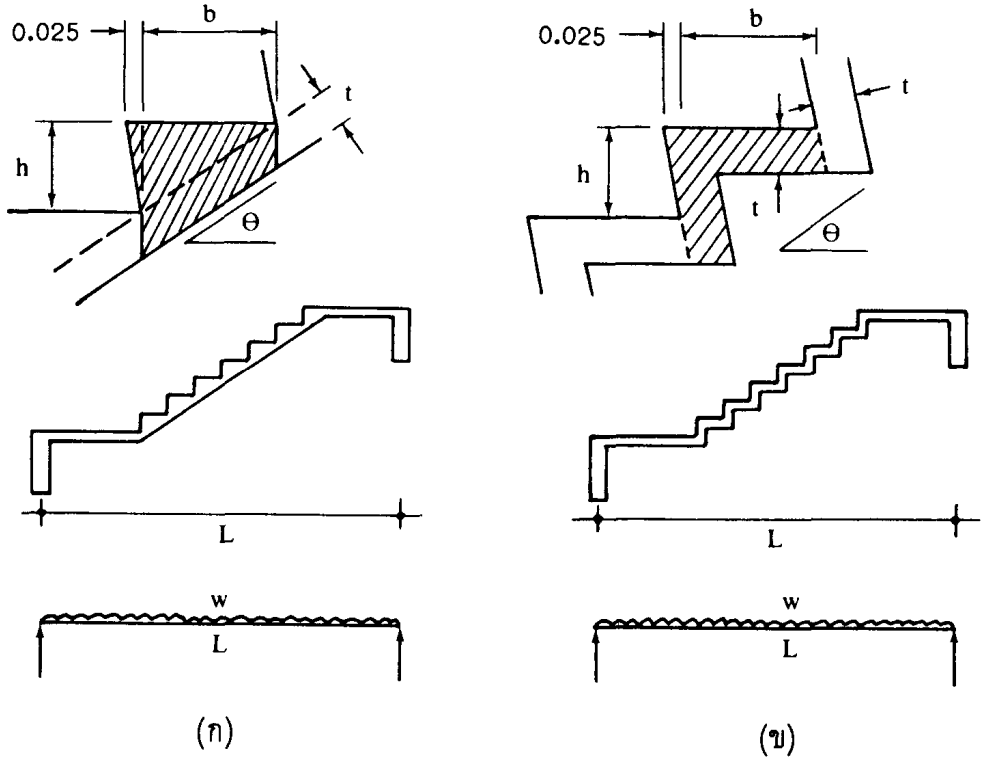
รูปที่ 4.2 ชนิดของบันได

พิจารณารูปที่ 4.2(ก) เป็นบันไดที่มีแม่บันไดอยู่สองข้างขนานขอบบันได นิยมใช้กับบันไดที่มีราวบันได ค.ส.ล. หรือวัสดุหนักอื่นตามขอบ เช่น บันไดโบสถ์ ศาลาการเปรียญ รูปที่ 4.2(ข) เป็นบันไดที่พาดบนคานหัวท้าย ถือเป็นแผ่นพื้นทางเดียวช่วงเดียวซึ่งง่ายทั้งการออกแบบและการก่อสร้าง แต่ระยะห่างระหว่างคานไม่ควรจะมากเกินไป (ไม่ควรจะเกิน 4.50 เมตร) รูปที่ 4.2(ค) เป็นบันไดที่พาดบนคานถึงสี่คาน จึงเป็นแผ่นพื้นทางเดียวต่อเนื่อง ความหนาของบันไดไม่มากนัก แต่การวิเคราะห์พื้นต่อเนื่องอาจจะยุ่งยากเล็กน้อย รูปที่ 4.2(ง) เป็นบันไดที่ยื่นจากคานซึ่งฝังในผนังหนา โดยออกแบบขั้นบันไดเป็นคานยื่นจากคานที่ฝังในผนัง โมเมนต์ดัดในขั้นบันไดแปรเป็นโมเมนต์บิดในคาน รูปที่ 4.2(จ) เป็นบันไดที่มีคานขนาดใหญ่ตรงกลางโดยขั้นบันไดไปเกาะอยู่ กรณีนี้อาจจะต้องพิจารณากรณีน้ำหนักบรรทุกจรไปอยู่ข้างใดข้างหนึ่งทำให้เกิดโมเมนต์บิดในคานกลางนั้น รูปที่ 4.2(ฉ) เป็นบันไดเวียนท้องแบน การออกแบบต้องคำนึงถึงแรงเฉือน โมเมนต์ดัด โมเมนต์บิด บันไดเวียนอาจจะเป็นคานกลางแล้วมีขั้นบันไดเกาะที่คานอีกที

กฎหมายกำหนดให้ความสูงช่วงที่มีขั้นบันไดจากพื้นถึงพื้น พื้นถึงชานพัก ชานพักถึงชานพัก และชานพักถึงพื้น ต้องไม่เกิน 3.00 เมตรในบ้านพักอาศัย และไม่เกิน 4.00 เมตร สำหรับอาคารสาธารณะ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยในกรณีที่มีการพลัดตกบันไดก็จะมีช่วงความสูงในการตกไม่มากเกินไป

4.2 บันไดแบบมีคานรับที่ปลาย

เป็นแผ่นพื้นทางเดียว การประมาณความหนาเหมือนเป็นพื้นทางเดียวทุกประการ น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับบันไดบ้านพักอาศัย $300\ kg/m^2$ ถ้าเป็นอาคารอื่นนอกจากอาคารสรรพสินค้า $400\ kg/m^2$ และสำหรับห้างสรรพสินค้า $500\ kg/m^2$ ในการพิจารณาจะตัดบันไดกว้าง 1.00 เมตร



รูปที่ 4.3 การคำนวณน้ำหนักของบันไดแบบท้องเรียบและพับผ้า

พิจารณารูปที่ 4.3(ก) บันไดท้องเรียบมีคานรับที่ปลาย ตัดบันไดมาพิจารณาหนึ่งขั้นตามรูป

$$\tan\theta = \frac{h}{b},\ \sin\theta = \frac{h}{\sqrt{b^2+h^2}},\ \cos\theta = \frac{b}{\sqrt{b^2+h^2}}$$

เนื้อที่หน้าตัดส่วนที่แรเงา

$$A = \frac{1}{2}(b+0.025)h + \frac{bt}{\cos\theta}$$

$$A = \frac{1}{2}(b+0.025)h + t\sqrt{b^2+h^2}$$

น้ำหนักของขั้นบันไดกว้าง 1.00 เมตร คือ

$$w_1 = 2400 \times \frac{1}{2}(b + 0.025)h + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}$$

น้ำหนักของบันไดต่อหน่วยความยาว

$$w_D = \frac{w_1}{b} = \frac{1200(b + 0.025)h + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}}{b} \text{ kg/m} \qquad (4.1)$$

น้ำหนักของบันไดในส่วนของชานพักที่หนา t เท่ากับบันไดนั้น

$$w_D = 2400t \qquad (4.2)$$

ทั้งนี้หน่วยของ b, h, t ต้องเป็นเมตรทั้งหมด

น้ำหนักบรรทุกจร $w_L = 300 \text{ kg/m}^2, 400 \text{ kg/m}^2, 500 \text{ kg/m}^2$ ตามชนิดของอาคาร ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกรวมคือ

$$w = w_D + w_L \qquad (4.3)$$

ในการออกแบบบันไดอาจจะคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกที่แยกส่วนบริเวณชานพักกับบริเวณขั้นบันได หรืออาจจะประมาณน้ำหนักบรรทุกคงที่ตามสมการ (4.1) กระจายเต็มช่วง L ของบันไดทำให้ได้โมเมนต์ดัดสูงสุดมากกว่าจริงไปบ้างแต่ก็ต้องออกแบบให้ปลอดภัยมากขึ้น

การออกแบบบันไดเหมือนออกแบบพื้นทางเดียวที่ต้องออกแบบให้ต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง นั่นคือโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินค่าโมเมนต์สมดุล ระยะหุ้มของคอนกรีตใช้ 2 cm เช่นเดียวกับพื้น ถ้า d_b เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเอกในหน่วย cm

ความหนาของบันไดอย่างน้อย

$$t \geq \frac{L}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) \geq 10 \text{ cm}$$

ความลึกประสิทธิผล

$$d = t - 2 - \frac{d_b}{2}$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีเป็นพื้นช่วงเดียว

$$M = \frac{wL^2}{8}$$

ทราบกำลังคอนกรีต f_c' กำลังครากเหล็กเสริม f_y หาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$f_c = 0.375f_c' \leq 65 \text{ ksc}$$

$$f_s = 0.5f_y \leq 1200 \text{ ksc}$$ ในกรณีเหล็กผิวเรียบ SR-24

$f_s = 0.5f_y \le 1500$ ksc ในกรณีเหล็กข้ออ้อย SD-30

$f_s = 0.5f_y \le 1700$ ksc ในกรณีเหล็กข้ออ้อย SD-40

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} =$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น ทศนิยมสามตำแหน่ง

$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} =$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน ทศนิยมสามตำแหน่ง

$j = 1 - \frac{k}{3} =$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์ ทศนิยมสามตำแหน่ง

$R = \frac{1}{2}f_c kj =$ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล ทศนิยมสามตำแหน่ง

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 100Rd^2$$

ถ้าพบว่า $M > M_R$ แสดงว่าเลือกความหนาน้อยไปให้ประมาณความหนาประสิทธิผลใหม่

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{M}{100R}}$$

$t = d + 2 + \frac{d_b}{2}$ เพิ่มความอีกเล็กน้อยให้เป็นจำนวนเต็ม

เมื่อคำนวณแล้ว $M < M_R$ คำนวณหาเนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึงที่ต้องการ

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} \ cm^2/m$$

ให้เนื้อที่หน้าตัดเหล็กหนึ่งเส้น $A_{s1} = \frac{\pi}{4}d_b^2$ ระยะเรียงของเหล็กเสริมเอก

$s = \frac{A_{s1}}{A_s}$ ปรับระยะให้เป็นค่าที่ก่อสร้างได้สะดวกและไม่เกิน 3t

เนื้อที่หน้าตัดเหล็กทางขวางบันไดเป็นเหล็กกันร้าว

$A_s = 0.0025bt = 0.25t$ เมื่อเป็นเหล็กผิวเรียบ SR-24

$A_s = 0.0020bt = 0.20t$ เมื่อเป็นเหล็กข้ออ้อย SD-30

$A_s = 0.0018bt = 0.18t$ เมื่อเป็นเหล็กข้ออ้อย SD-40

ให้เนื้อที่หน้าตัดเหล็กหนึ่งเส้น $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$ ระยะเรียงของเหล็กกันร้าว

$$s_t = \frac{A_{s1}}{A_s}$$ ปรับระยะให้เป็นค่าที่ก่อสร้างได้สะดวกและไม่เกิน 3t

รูปที่ 4.3(ข) เป็นบันไดพับผ้ามีคานรับที่ปลาย ตัดบันไดมาพิจารณา 1 ขั้น ตามรูป จะได้

$$\tan\theta = \frac{h}{b},\ \sin\theta = \frac{h}{\sqrt{b^2+h^2}},\ \cos\theta = \frac{b}{\sqrt{b^2+h^2}}$$

เนื้อที่หน้าตัดส่วนที่แรเงา

$$A = (h+t)(b+0.025) - h\left(b + 0.025 - \frac{t}{\cos\theta}\right)$$

$$A = hb + 0.025h + tb + 0.025t - hb - 0.025h + ht \times \frac{\sqrt{b^2+h^2}}{b}$$

$$A = tb + 0.025t + ht\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}$$

$$A = t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

น้ำหนักขั้นบันไดกว้าง 1.00 เมตร คือ

$$w_D = 2400A = 2400t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

น้ำหนักของบันไดต่อหน่วยความยาวคือ

$$w_D = \frac{w_1}{b} = 2400\frac{t}{b}\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right) \qquad (4.4)$$

น้ำหนักของบันไดในส่วนของชานพักที่หนา t เท่ากับบันไดนั้น

$$w_D = 2400t \qquad (4.5)$$

ทั้งนี้หน่วยของ b, h, t ต้องเป็นเมตรทั้งหมด

น้ำหนักบรรทุกจร $w_L = 300\ \text{kg/m}^2, 400\ \text{kg/m}^2, 500\ \text{kg/m}^2$ ตามชนิดของอาคาร ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกรวมคือ

$$w = w_D + w_L \qquad (4.6)$$

ในการออกแบบบันไดอาจจะคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกที่แยกส่วนบริเวณชานพักกับบริเวณขั้นบันได หรืออาจจะประมาณน้ำหนักบรรทุกคงที่ตามสมการ (4.1) กระจายเต็มช่วง L ของบันไดทำให้ได้โมเมนต์ดัดสูงสุดมากกว่าจริงไปบ้างแต่ก็ต้องออกแบบให้ปลอดภัยมากขึ้น

การออกแบบบันไดเหมือนออกแบบพื้นทางเดียวที่ต้องออกแบบให้ต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง นั่นคือโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินค่าโมเมนต์สมดุล ระยะหุ้มของคอนกรีตใช้ 2 cm เช่นเดียวกับพื้น ถ้า d_b เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเอกในหน่วย cm

ความหนาของบันไดอย่างน้อย

$$t \geq \frac{L}{20}\left(0.4+\frac{f_y}{7000}\right) \geq 10 \ \text{cm}$$

ความลึกประสิทธิผล

$$d = t - 2 - \frac{d_b}{2}$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีเป็นพื้นช่วงเดียว

$$M = \frac{wL^2}{8}$$

ทราบกำลังคอนกรีต $f_c^{'}$ กำลังครากเหล็กเสริม f_y หาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$f_c = 0.375f_c^{'} \leq 65 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 0.5f_y \leq 1200 \ \text{ksc}$$ ในกรณีเหล็กผิวเรียบ SR-24

$$f_s = 0.5f_y \leq 1500 \ \text{ksc}$$ ในกรณีเหล็กข้ออ้อย SD-30

$$f_s = 0.5f_y \leq 1700 \ \text{ksc}$$ ในกรณีเหล็กข้ออ้อย SD-40

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} =$$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น ทศนิยมสามตำแหน่ง

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} =$$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน ทศนิยมสามตำแหน่ง

$$j = 1 - \frac{k}{3} =$$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์ ทศนิยมสามตำแหน่ง

$$R = \frac{1}{2}f_c kj =$$ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล ทศนิยมสามตำแหน่ง

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 100Rd^2$$

ถ้าพบว่า $M > M_R$ แสดงว่าเลือกความหนาน้อยไปให้ประมาณความหนาประสิทธิผลใหม่

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{M}{100R}}$$

$t = d + 2 + \frac{d_b}{2}$ เพิ่มความอีกเล็กน้อยให้เป็นจำนวนเต็ม

เมื่อคำนวณแล้ว $M < M_R$ คำนวณหาเนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึงที่ต้องการ

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} \ cm^2/m$$

ให้เนื้อที่หน้าตัดเหล็กหนึ่งเส้น $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$ ระยะเรียงของเหล็กเสริมเอก

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s}$$ ปรับระยะให้เป็นค่าที่ก่อสร้างได้สะดวกและไม่เกิน 3t

การเสริมเหล็กเสริมเอกนั้นต้องม้วนเพื่อป้องกันแตก
เนื้อที่หน้าตัดเหล็กทางขวางบันไดเป็นเหล็กกันร้าว

$A_s = 0.0025bt = 0.25t$ เมื่อเป็นเหล็กผิวเรียบ SR-24

$A_s = 0.0020bt = 0.20t$ เมื่อเป็นเหล็กข้ออ้อย SD-30

$A_s = 0.0018bt = 0.18t$ เมื่อเป็นเหล็กข้ออ้อย SD-40

เหล็กทางขวางต้องเป็น RB 9 mm ที่เสริมตรงมุมและตรงม้วน หากปริมาณไม่เพียงพอให้เสริมระหว่างขั้นด้วย

ขั้นตอนการออกแบบบันไดชนิดวางพาดที่ปลายทั้งสองข้าง

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

f_c' = กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

$f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}200$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SR-24

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SD-30

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SD-40

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น ทศนิยมสองตำแหน่ง

$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \frac{1}{2} f_c kj$ = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล, ksc

H = ความสูงระหว่างชั้นที่ต้องการออกแบบ, เมตร

h = ความสูงของลูกตั้ง ต้องไม่เกิน 0.20 เมตรในบ้านพักอาศัย ไม่เกิน 0.19 เมตร ในอาคารสาธารณะ แต่ค่าแนะนำคือ 0.175 เมตร

b = ระยะลูกนอน ต้องไม่น้อยกว่า 0.22 เมตร ในบ้านพักอาศัย ไม่น้อยกว่า 0.24 เมตร ในอาคารสาธารณะ แต่ค่าแนะนำคือ 0.25 เมตร

L = ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับปลายบันได, เมตร

$N_1 = \frac{H}{h}$ = จำนวนขั้นลูกตั้งระหว่างชั้นล่างกับชั้นบน ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มควรเป็นเลขคู่

$h = \frac{H}{N_1}$ = ความสูงลูกตั้งที่จะใช้จริง

ในกรณีบ้านพักอาศัย หาก H > 3.00 เมตร จะต้องมีชานพักเพื่อแบ่งช่วงความสูงให้ไม่เกิน 3.00 เมตร และในกรณีอาคารสาธารณะ หาก H > 4.00 เมตร ต้องมีชานพักเพื่อแบ่งช่วงความสูงให้ไม่เกิน 4.00 เมตร เช่นในกรณีบ้านพักอาศัยที่มีความสูงจากชั้นล่างถึงชั้นบน H = 3.50 เมตร มากกว่า 3.00 เมตร จะต้องมีชานพัก 1 ชานพักและคาดว่าต้องใช้ความสูงลูกตั้ง h = 0.18 เมตร ดังนั้นจำนวนขั้นลูกตั้งจากชั้นล่างถึงชั้นบน

$$N_1 = \frac{H}{0.18} = \frac{3.50}{0.18} = 19.44 \Rightarrow 20 \text{ ขั้น}$$

ดังนั้นเมื่อใช้ชานพักแบ่งครึ่งความสูง จำนวนขั้นบันไดจากชั้นล่างถึงชานพัก และจากชานพักถึงชั้นบนช่วงละ 10 ขั้น ถ้าระยะระหว่างคานที่ปลายบันได $L = 3.50$ m ถ้าระยะลูกนอน $b = 0.25$ m ดังนั้นความกว้างของชานพัก

$$L_1 = 3.50 - (10-1) \times 0.25 = 1.25 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของบันได และคำนวณออกแบบ

ความหนาขั้นต่ำ $t \geq \frac{L}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) \geq 0.10$ m เลือกความหนาที่จะใช้ ระยะหุ้ม 2 cm ขนาดเหล็กเสริมที่จะใช้ d_b ความลึกประสิทธิผล

$$d = t - 2 - \frac{d_b}{2}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดท้องเรียบ

$$w_D = \frac{1200(b + 0.025)h + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}}{b} \text{ kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดพับผ้า

$$w_D = 2400\frac{t}{b}\left(b + 0.025 + h\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}\right) \text{ kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกจร $w_L = 300\ kg/m$ สำหรับบันไดบ้านพักอาศัย $w_L = 400\ kg/m$ สำหรับอาคารอื่นที่ไม่ใช่ห้างสรรพสินค้า $w_L = 500\ kg/m$ สำหรับห้างสรรพสินค้า

หาน้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_D + w_L$$

โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = \frac{wL^2}{8}\ kg \cdot m$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 100Rd^2\ kg \cdot cm$$

ตรวจสอบถ้าพบว่า $M > M_R$ แสดงว่าบันไดบางเกินไป ให้ประมาณใหม่โดย

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{M}{100R}}$$

$$t = d + 2 + \frac{d_b}{2}$$

แล้วย้อนกลับไปหาน้ำหนักบรรทุกมาใหม่ จนกว่า $M < M_R$ แล้วหาปริมาณเหล็กเสริม

$$A_s = \frac{M}{f_s jd}$$

หาระยะเรียงของเหล็กเสริม เมื่อเนื้อที่เหล็กหนึ่งเส้น

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$$

ระยะเรียงเหล็กเสริมเอก

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s}$$

ปริมาณเหล็กทางขวาง

$A_{sL} = 0.0025bt$ สำหรับเหล็ก SR-24

$A_{sL} = 0.0020bt$ สำหรับเหล็ก SD-30

$A_{sL} = 0.0018bt$ สำหรับเหล็ก SD-40

หาระยะเรียงของเหล็กเสริม เมื่อเนื้อที่เหล็กหนึ่งเส้น

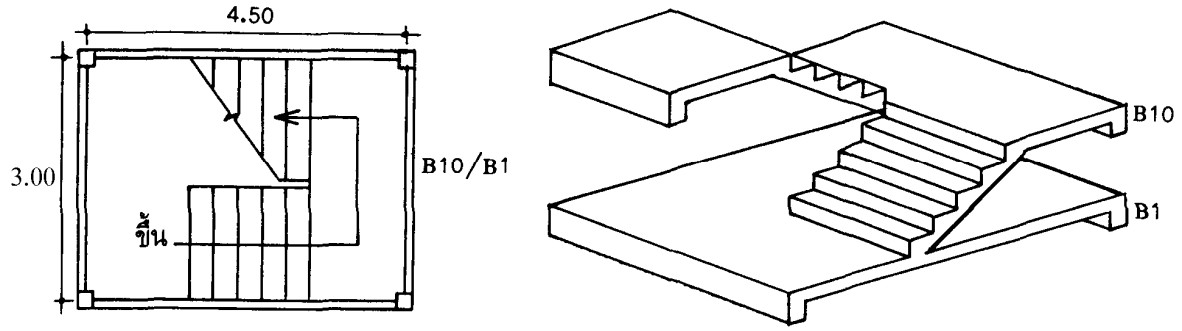
$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$$

ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s_1 = \frac{A_{s1}}{A_{sL}}$$

ขั้นตอนที่ 3 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 4.1 จงออกแบบบันได ให้ปล่องบันไดขนาด 3.00 × 4.50 ความสูงระหว่างชั้น 4.00 เมตร อาคารสำนักงาน ให้ออกแบบทั้งบันไดท้องเรียบและบันไดพับผ้า



ตัวอย่าง 4.1 บันไดพาดกับคานที่ปลายทั้งสองข้าง

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c' = 240$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีต กำหนดเอง

$f_y = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม กำหนดใช้เหล็ก SD-30

$f_c = 0.375f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72 =$$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274 =$$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909 =$$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095$$ ksc = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

$H = 4.00$ m = ความสูงระหว่างชั้น อาคารสาธารณะแม้จะอยู่ในช่วงที่กฎหมายกำหนดไม่ต้องมีชานพัก แต่จะจัดให้มีชานพัก 1 ชานพักเพื่อลดช่วงความยาว และใช้สอยได้สะดวก

$h \le 0.19$ m = ระยะลูกตั้งตามกฎหมายต้องไม่เกินค่านี้ แต่คาดว่าจะใช้ 0.18 เมตร

$b \ge 0.24$ m = ระยะลูกนอนตามกฎหมายต้องไม่น้อยกว่าค่านี้ คาดว่าจะใช้ 0.25 เมตร

$L = 4.50$ m = ระยะความยาวของบันได

$$N_1 = \frac{H}{h} = \frac{4.00}{0.19} = 21.05 \Rightarrow 22$$ ขั้น แบ่งครึ่งสำหรับแต่ละฟากของช่วงชานพัก

$$\frac{N_1}{2} = \frac{22}{2} = 11$$ ขั้น ให้ขนาดลูกนอน b = 0.25 เมตร

ความยาวทางราบในช่วงขั้นบันได

$$= (11-1)\times 0.25 = 2.50 \text{ m}$$

บันไดช่วงขึ้นและลงจากชานพักจะไม่ตรงแนบพอดี ต้องมีช่องว่างเล็กน้อย แต่อย่างน้อยต้อง 0.10 เมตร ความกว้างของบันไดจึงเป็น

$$= \frac{3.00-0.10}{2} = 1.45 \text{ m}$$

กฎหมายกำหนดให้ความกว้างของชานพักต้องไม่น้อยกว่าความกว้างของบันได ดังนั้นความยาวช่วงขั้นบันไดกับชานพักด้วยกันเท่ากับ

$$= 2.50 + 1.45 = 3.95 \text{ m}$$

เนื่องจากช่วงยาวของบันได L = 4.50 m จึงเหลือส่วนบันไดคล้ายชานพักเป็นระยะ

$$= 4.50 - 3.95 = 0.55 \text{ m}$$

ระยะลูกตั้งที่ใช้จริง

$$h = \frac{4.00}{22} = 0.1818 \Rightarrow 0.182 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของบันได และคำนวณออกแบบ

ความหนาขั้นต่ำ

$$t \geq \frac{L}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{4.50}{20}\left(0.4 + \frac{3000}{7000}\right) = 0.186 \Rightarrow 0.20 \text{ m}$$

ความลึกประสิทธิผล โดยให้ระยะหุ้ม 2 cm ขนาดเหล็กเสริม $d_b = 16$ mm

$$d = 20 - 2 - \frac{1.6}{2} = 17.2 \text{ cm}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดท้องเรียบ

$$w_D = \frac{1200(b+0.025)h + 2400t\sqrt{b^2+h^2}}{b}$$

$$w_D = \frac{1200\times(0.25+0.025)\times 0.182 + 2400\times 0.20\times\sqrt{0.25^2+0.182^2}}{0.25}$$

$$w_D = 833.96 \Rightarrow 834 \text{ kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดพับผ้า

$$w_D = 2400\frac{t}{b}\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 2400\times\frac{0.20}{0.25}\times\left(0.25 + 0.025 + 0.182\times\sqrt{1+\left(\frac{0.182}{0.25}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 960.23 \Rightarrow 961 \text{ kg/m}$$

บันไดนี้ใช้ในอาคารสำนักงาน ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกจรจึงเป็น

$$w_L = 400 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวมกรณีบันไดท้องเรียบ

$$w = w_D + w_L = 834 + 400 = 1234 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวมกรณีบันไดพับผ้า

$$w = w_D + w_L = 961 + 400 = 1361 \ \ kg/m$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีบันไดท้องเรียบ

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{1{,}234 \times 4.50^2}{8} = 3{,}123.5625 \ \ kg \cdot m = 312{,}356.25 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีบันไดพับผ้า

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{1{,}361 \times 4.50^2}{8} = 3{,}445.03125 \ \ kg \cdot m = 344{,}503.125 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์สมดุลของบันไดหนา 0.20 เมตร

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 100 \times 17.2^2 = 239{,}482.48 \ \ kg \cdot cm < M = 344{,}503.125$$

พบว่าความหนา 0.20 เมตร ยังไม่เพียงพอดังนั้นประมาณความหนาใหม่

$$d \geq \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{344{,}503.125}{8.095 \times 100}} = 20.63 \ \ cm$$

$$t = d + 2 + \frac{d_b}{2} = 20.63 + 2 + \frac{1.6}{2} = 23.4 \Rightarrow 27 \ \ cm$$

$$d = t - 2 - \frac{d_b}{2} = 27 - 2 - \frac{1.6}{2} = 24.2 \ \ cm$$

ที่จริงได้ทดลองความหนาหลายค่าจนใช้ได้เมื่อความหนา 27 cm

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดท้องเรียบ

$$w_D = \frac{1200(b + 0.025)h + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}}{b}$$

$$w_D = \frac{1200 \times (0.25 + 0.025) \times 0.182 + 2400 \times 0.27 \times \sqrt{0.25^2 + 0.182^2}}{0.25}$$

$$w_D = 1041.8 \Rightarrow 1042 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดพับผ้า

$$w_D = 2400\frac{t}{b}\left(b + 0.025 + h\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 2400 \times \frac{0.27}{0.25} \times \left(0.25 + 0.025 + 0.182 \times \sqrt{1 + \left(\frac{0.182}{0.25}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 1296.3 \Rightarrow 1{,}297 \ \ kg/m$$

บันไดนี้ใช้ในอาคารสำนักงาน ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกจรจึงเป็น

$$w_L = 400 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวมกรณีบันไดท้องเรียบ

$$w = w_D + w_L = 1{,}042 + 400 = 1{,}442 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวมกรณีบันไดพับผ้า

$$w = w_D + w_L = 1{,}297 + 400 = 1{,}697 \ \ kg/m$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีบันไดท้องเรียบ

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{1{,}442 \times 4.50^2}{8} = 3{,}650.0625 \ \ kg \cdot m = 365{,}006.25 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีบันไดพับผ้า

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{1{,}697 \times 4.50^2}{8} = 4{,}295.53125 \ \ kg \cdot m = 429{,}553.125 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์สมดุลของบันไดหนา 0.27 เมตร

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 100 \times 24.2^2 = 474{,}075.58 \ \ kg \cdot cm > M = 429{,}553.125$$

หาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องใช้สำหรับบันไดชนิดท้องเรียบ

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{365{,}006.25}{1{,}500 \times 0.909 \times 24.2} = 11.062 \ \ cm^2/m$$

หาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องใช้สำหรับบันไดชนิดพับผ้า

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{429{,}553.125}{1{,}500 \times 0.909 \times 24.2} = 13.018 \ \ cm^2/m$$

เหล็ก DB 16 mm มีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \ \ cm^2$$

ระยะเรียงของเหล็กสำหรับบันไดท้องเรียบ

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{2.01}{11.062} = 0.1817 \ m \Rightarrow 0.18 \ \ m$$

ระยะเรียงของเหล็กสำหรับบันไดพับผ้า

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{2.01}{13.018} = 0.1544 \ m \Rightarrow 0.15 \ \ m$$

เหล็กทางขวางเป็นเหล็กกันร้าว และใช้ RB 9 mm เป็นเหล็กชนิด SR-24 ดังนั้น

$$A_{stemp} = 0.0025bt = 0.0025 \times 100 \times 27 = 6.75 \ \ cm^2/m$$

เหล็ก RB 9 mm มีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \ \ cm^2$$

ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s = \frac{A_{s1}}{A_{stemp}} = \frac{0.636}{6.75} = 0.0942 \text{ m} \Rightarrow 0.09 \text{ m}$$

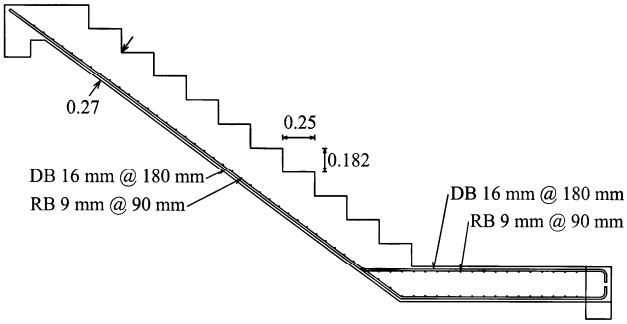
เหล็ก DB 12 mm มีเนื้อที่หน้าตัดเส้นละ

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.2^2 = 1.131 \text{ cm}^2$$

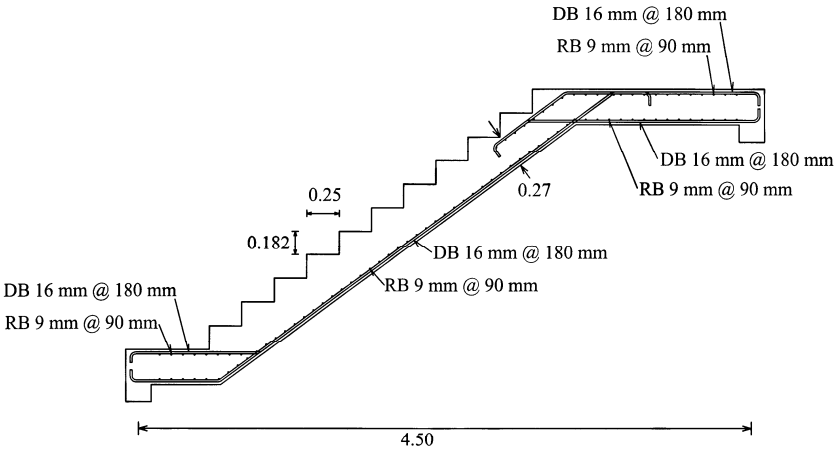
ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s = \frac{A_{s1}}{A_{stemp}} = \frac{1.131}{6.75} = 0.1676 \text{ m} \Rightarrow 0.15 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 3 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

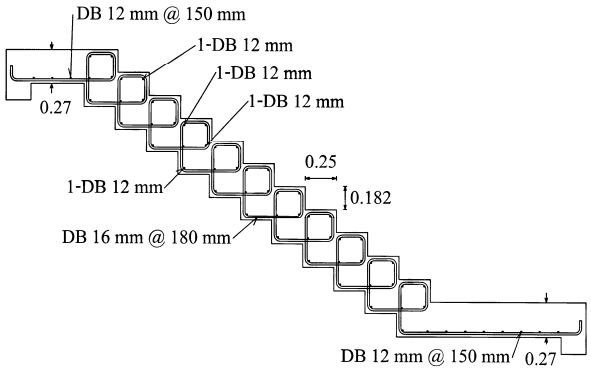


รายละเอียดบันไดจากชานพักถึงชั้นบน

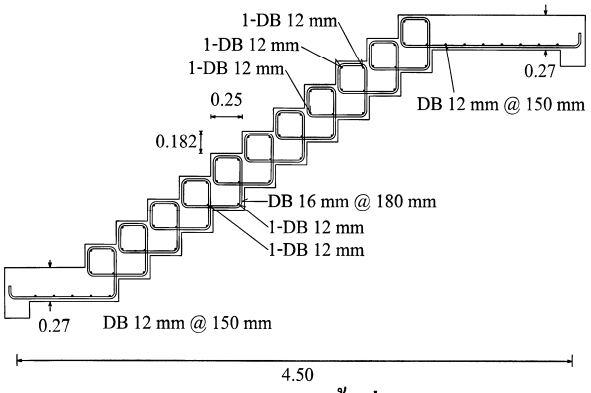


รายละเอียดบันไดจากชั้นล่างถึงชานพัก

บันไดแบบท้องเรียบ



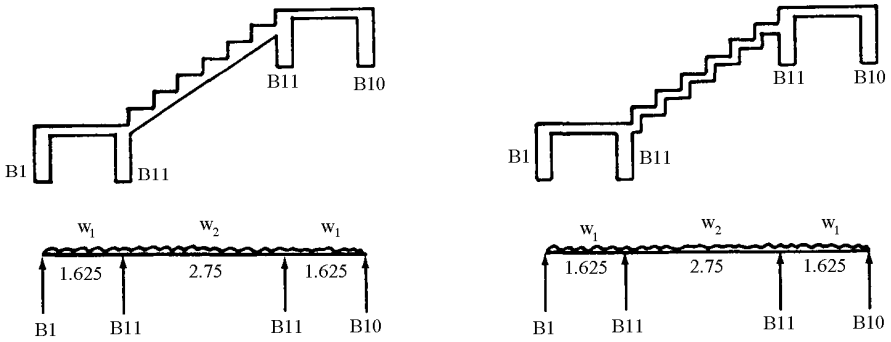
รายละเอียดบันไดจากชานพักถึงชั้นบน



รายละเอียดบันไดจากชั้นล่างถึงชานพัก

บันไดแบบพับผ้า

ตัวอย่างที่ 4.2 จงออกแบบบันได ให้ปล่องบันไดขนาด 3.00 × 6.00 ความสูงระหว่างชั้น 4.00 เมตร มีคานรองรับที่ชานพักรวมคานที่ปลายด้วยเป็นสี่คาน ชนิดอาคารสำนักงาน ให้ออกแบบทั้งบันไดท้องเรียบและบันไดพับผ้า



ตัวอย่างที่ 4.2

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีต กำหนดเอง

$f_y = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม กำหนดใช้เหล็ก SD-30

$f_c = 0.375f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72 =$$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274 =$$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909 =$$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095$$ ksc = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

$H = 4.00$ m = ความสูงระหว่างชั้น อาคารสาธารณะแม้จะอยู่ในช่วงที่กฎหมายกำหนดไม่ต้องมีชานพัก แต่จะจัดให้มีชานพัก 1 ชานพักเพื่อลดช่วงความยาว และใช้สอยได้สะดวก

$h \le 0.19$ m = ระยะลูกตั้งตามกฎหมายต้องไม่เกินค่านี้ แต่คาดว่าจะใช้ 0.18 เมตร

$b \ge 0.24$ m = ระยะลูกนอนตามกฎหมายต้องไม่น้อยกว่าค่านี้ คาดว่าจะใช้ 0.25 เมตร

$$N_1 = \frac{H}{h} = \frac{4.00}{0.19} = 21.05 \Rightarrow 22$$ ขั้น แบ่งครึ่งสำหรับแต่ละฟากของช่วงชานพัก

$$\frac{N_1}{2} = \frac{22}{2} = 11$$ ขั้น ให้ขนาดลูกนอน b = 0.25 เมตร

ความยาวทางราบในช่วงขั้นบันได ซึ่งเป็นความยาวช่วงกลาง

$$L_2 = 11 \times 0.25 = 2.75 \text{ m}$$

บันไดช่วงขึ้นและลงจากชานพักจะไม่ตรงแนบพอดี ต้องมีช่องว่างเล็กน้อย แต่อย่างน้อยต้อง 0.10 เมตร ความกว้างของบันไดจึงเป็น

$$= \frac{3.00 - 0.10}{2} = 1.45 \text{ m}$$

กฎหมายกำหนดให้ความกว้างของชานพักต้องไม่น้อยกว่าความกว้างของบันได ให้มีชานพักทั้งสองปลาย ดังนั้นความกว้างของชานพักคือ

$$L_1 = \frac{6.00 - 2.75}{2} = 1.625 \text{ m}$$

ระยะลูกตั้งที่ใช้จริง

$$h = \frac{4.00}{22} = 0.1818 \Rightarrow 0.182 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณความหนาของบันได และคำนวณออกแบบ

ความหนาขั้นต่ำ

$$t \geq \frac{L}{20}\left(0.4+\frac{f_y}{7000}\right)=\frac{2.75}{20}\left(0.4+\frac{3000}{7000}\right)=0.114 \Rightarrow 0.15 \ \text{m}$$

ความลึกประสิทธิผล โดยให้ระยะหุ้ม 2 cm ขนาดเหล็กเสริม $d_b = 12$ mm

$$d = 15-2-\frac{1.2}{2}=12.4 \ \text{cm}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดท้องเรียบ

$$w_D=\frac{1200(b+0.025)h+2400t\sqrt{b^2+h^2}}{b}$$

$$w_D=\frac{1200\times(0.25+0.025)\times 0.182+2400\times 0.15\times\sqrt{0.25^2+0.182^2}}{0.25}$$

$$w_D = 685.5 \Rightarrow 686 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของบันไดพับผ้า

$$w_D = 2400\frac{t}{b}\left(b+0.025+h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 2400\times\frac{0.15}{0.25}\times\left(0.25+0.025+0.182\times\sqrt{1+\left(\frac{0.182}{0.25}\right)^2}\right)$$

$$w_D = 720.17 \Rightarrow 721 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ในส่วนของชานพัก

$$w_D = 2400t = 2400\times 0.15 = 360 \ \text{kg/m}$$

บันไดนี้ใช้ในอาคารสำนักงาน ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกจรจึงเป็น

$$w_L = 400 \ \text{kg/m}$$

ให้ w_1 เป็นน้ำหนักในส่วนของชานพัก และ w_2 เป็นน้ำหนักในส่วนของขั้นบันได

น้ำหนักบรรทุกบนบันไดท้องเรียบ

$$w_1 = 360+400 = 760 \ \text{kg/m}$$
$$w_2 = 686+400 = 1{,}086 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกบนบันไดพับผ้า

$$w_1 = 360+400 = 760 \ \text{kg/m}$$
$$w_2 = 721+400 = 1{,}121 \ \text{kg/m}$$

ทำการวิเคราะห์บันไดเหมือนเป็นคานต่อเนื่อง ให้คานทั้งสี่เป็นจุดรองรับแบบคมมีดเรียง A, B, C, D จากซ้ายไปขวา ใช้วิธี Slope-deflection ที่ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นตรงกว่าวิธี Moment distribution

หาโมเมนต์ที่ปลายยึดแน่น ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก ทวนเข็มนาฬิกาเป็นลบ

ช่วง AB

$$FEM_{AB} = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{760 \times 1.625^2}{12} = -167.2395833$$

$$FEM_{BA} = +\frac{wL^2}{12} = +\frac{760 \times 1.625^2}{12} = 167.2395833$$

ช่วง BC กรณีบันไดท้องเรียบ

$$FEM_{BC} = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{1{,}086 \times 2.75^2}{12} = -684.40625$$

$$FEM_{CB} = +\frac{wL^2}{12} = +\frac{1{,}086 \times 2.75^2}{12} = 684.40625$$

ช่วง BC กรณีบันไดพับผ้า

$$FEM_{BC} = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{1{,}121 \times 2.75^2}{12} = -706.4635417$$

$$FEM_{CB} = +\frac{wL^2}{12} = +\frac{1{,}121 \times 2.75^2}{12} = 706.4635417$$

และช่วง CD

$$FEM_{CD} = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{760 \times 1.625^2}{12} = -167.2395833$$

$$FEM_{DC} = +\frac{wL^2}{12} = +\frac{760 \times 1.625^2}{12} = 167.2395833$$

เขียนสมการ slope-deflection

$$M_{NF} = \frac{2EI}{L}\left(2\theta_N + \theta_F - 3\phi_{NF}\right) + FEM_{NF}$$

ช่วง AB

$$M_{AB} = \frac{2EI}{1.625}\left(2\theta_A + \theta_B - 3\times 0\right) - 167.2395833$$

$$M_{AB} = \frac{4EI\theta_A}{1.625} + \frac{2EI\theta_B}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{BA} = \frac{2EI}{1.625}\left(2\theta_B + \theta_A - 3\times 0\right) + 167.2395833$$

$$M_{BA} = \frac{2EI\theta_A}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{1.625} + 167.2395833$$

ช่วง BC ท้องเรียบ

$$M_{BC} = \frac{2EI}{2.75}\left(2\theta_B + \theta_C - 3\times 0\right) - 684.40625$$

$$M_{BC} = \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} - 684.40625$$

$$M_{CB} = \frac{2EI}{2.75}\left(2\theta_C + \theta_B - 3\times 0\right) + 684.40625$$

$$M_{CB} = \frac{2EI\theta_B}{2.75} + \frac{4EI\theta_C}{2.75} + 684.40625$$

ช่วง BC พับผ้า

$$M_{BC} = \frac{2EI}{2.75}\left(2\theta_B + \theta_C - 3\times 0\right) - 706.4635417$$

$$M_{BC} = \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} - 706.4635417$$

$$M_{CB} = \frac{2EI}{2.75}\left(2\theta_C + \theta_B - 3\times 0\right) + 706.4635417$$

$$M_{CB} = \frac{2EI\theta_B}{2.75} + \frac{4EI\theta_C}{2.75} + 706.4635417$$

ช่วง CD

$$M_{CD} = \frac{2EI}{1.625}\left(2\theta_C + \theta_D - 3\times 0\right) - 167.2395833$$

$$M_{CD} = \frac{4EI\theta_C}{1.625} + \frac{2EI\theta_D}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{DC} = \frac{2EI}{1.625}\left(2\theta_D + \theta_C - 3\times 0\right) + 167.2395833$$

$$M_{DC} = \frac{2EI\theta_C}{1.625} + \frac{4EI\theta_D}{1.625} + 167.2395833$$

พิจารณาสมการสมดุล

ที่จุด A $M_{AB} = 0$ .....(1)

ที่จุด B $M_{BA} + M_{BC} = 0$ .....(2)

ที่จุด C $M_{CB} + M_{CD} = 0$ .....(3)

ที่จุด D $M_{DC} = 0$ .....(4)

แทนค่าจากสมการ slope-deflection

จากสมการ (1) $M_{AB} = \frac{4EI\theta_A}{1.625} + \frac{2EI\theta_B}{1.625} - 167.2395833 = 0$

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \text{.....(1)}$$

จากสมการ (2) แบบท้องเรียบ

$$\frac{2EI\theta_A}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{1.625} + 167.2395833 + \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} - 684.40625 = 0$$

$$\frac{2EI\theta_A}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} = 517.1666667$$

คูณตลอดด้วย 1.625×2.75

$$5.5EI\theta_A + 11EI\theta_B + 6.5EI\theta_B + 3.25EI\theta_C = 2311.088542$$

$$5.5EI\theta_A + 17.5EI\theta_B + 3.25EI\theta_C = 2311.088542 \quad \text{.....(2)}$$

จากสมการ (2) แบบพับผ้า

$$\frac{2EI\theta_A}{1.625}+\frac{4EI\theta_B}{1.625}+167.2395833+\frac{4EI\theta_B}{2.75}+\frac{2EI\theta_C}{2.75}-706.4635417=0$$

$$\frac{2EI\theta_A}{1.625}+\frac{4EI\theta_B}{1.625}+\frac{4EI\theta_B}{2.75}+\frac{2EI\theta_C}{2.75}=539.2239584$$

คูณตลอดด้วย 1.625×2.75

$$5.5EI\theta_A+11EI\theta_B+6.5EI\theta_B+3.25EI\theta_C=2409.657064$$

$$5.5EI\theta_A+17.5EI\theta_B+3.25EI\theta_C=2409.657064 \quad \text{.....(2)}$$

จากสมการ (3) แบบท้องเรียบ

$$\frac{2EI\theta_B}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{2.75}+684.40625+\frac{4EI\theta_C}{1.625}+\frac{2EI\theta_D}{1.625}-167.2395833=0$$

$$\frac{2EI\theta_B}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{1.625}+\frac{2EI\theta_D}{1.625}=-517.1666667$$

คูณตลอดด้วย 1.625×2.75

$$3.25EI\theta_B+6.5EI\theta_C+11EI\theta_C+5.5EI\theta_D=-2311.088542$$

$$3.25EI\theta_B+17.5EI\theta_C+5.5EI\theta_D=-2311.088542 \quad \text{……(3)}$$

จากสมการ (3) แบบพับผ้า

$$\frac{2EI\theta_B}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{2.75}+706.40625+\frac{4EI\theta_C}{1.625}+\frac{2EI\theta_D}{1.625}-167.2395833=0$$

$$\frac{2EI\theta_B}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{2.75}+\frac{4EI\theta_C}{1.625}+\frac{2EI\theta_D}{1.625}=-539.2239584$$

คูณตลอดด้วย 1.625×2.75

$$3.25EI\theta_B+6.5EI\theta_C+11EI\theta_C+5.5EI\theta_D=-2409.657064$$

$$3.25EI\theta_B+17.5EI\theta_C+5.5EI\theta_D=-2409.657064 \quad \text{……(3)}$$

จากสมการ (4)

$$M_{DC}=\frac{2EI\theta_C}{1.625}+\frac{4EI\theta_D}{1.625}+167.2395833=0$$

$$\frac{2EI\theta_C}{1.625}+\frac{4EI\theta_D}{1.625}=-167.2395883$$

คูณตลอดด้วย 1.625

$$EI\theta_C+2EI\theta_D=-135.8821655 \quad \text{.....(4)}$$

รวมสมการ (1) ถึง (4) สำหรับท้องเรียบ

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \text{.....(1)}$$

$$5.5EI\theta_A + 17.5EI\theta_B + 3.25EI\theta_C = 2311.088542 \quad \text{.....(2)}$$

$$3.25EI\theta_B + 17.5EI\theta_C + 5.5EI\theta_D = -2311.088542 \quad \text{……(3)}$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \text{.....(4)}$$

แก้สมการวิธี Gauss-Jordan Elimination กำจัดเทอมใต้แนวทแยง

สมการ (1) คงเดิม สมการ (2) เกิดจาก $5.5(1)-2(2)$ สมการ (3) คงเดิม และสมการ (4) คงเดิม

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \text{.....(1)}$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -3874.825196 \quad \text{.....(2)}$$

$$3.25EI\theta_B + 17.5EI\theta_C + 5.5EI\theta_D = -2311.088542 \quad \text{……(3)}$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \text{.....(4)}$$

สมการ (1) และ (2) คงเดิม สมการ (3) เกิดจาก $3.25(2)+29.5(3)$ สมการ (4) คงเดิม

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \text{.....(1)}$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -3874.825196 \quad \text{.....(2)}$$

$$495.125EI\theta_C + 162.25EI\theta_D = -80770.29388 \quad \text{……(3)}$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \text{.....(4)}$$

สมการ (1) สมการ (2) และสมการ (3) คงเดิม สมการ (4) เกิดจาก $(3)-495.125(4)$

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \text{.....(1)}$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -3874.825196 \quad \text{.....(2)}$$

$$495.125EI\theta_C + 162.25EI\theta_D = -80770.29388 \quad \text{……(3)}$$

$$-828EI\theta_D = -13491.63668 \quad \text{.....(4)}$$

จากสมการ (4)

$$EI\theta_D = \frac{-13491.63668}{-828} = 16.2942472$$

จากสมการ (3)

$$EI\theta_C = \frac{-80770.29388 - 162.25 \times 16.2942472}{495.125} = -168.4706599$$

จากสมการ (2)

$$EI\theta_B = \frac{-3874.825196 + 6.5(-168.4706599)}{-29.5} = 168.4706605$$

จากสมการ (1)

$$EI\theta_A = \frac{135.8821614 - 168.4706605}{2} = -16.29424956$$

แทนค่าในสมการ slope-deflection

$$M_{AB} = \frac{4EI\theta_A}{1.625} + \frac{2EI\theta_B}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{AB} = \frac{4(-16.29424956)}{1.625} + \frac{2(168.4706605)}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{AB} = -0.000000038 \Rightarrow 0$$

$$M_{BA} = \frac{2EI\theta_A}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{BA} = \frac{2(-16.29424956)}{1.625} + \frac{4(168.4706605)}{1.162} + 167.2395833$$

$$M_{BA} = 561.8821328$$

$$M_{BC} = \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} - 684.40625$$

$$M_{BC} = \frac{4(168.4706605)}{2.75} + \frac{2(-168.4706599)}{2.75} - 684.40625$$

$$M_{BC} = -561.8821328 = -M_{BA}$$

$$M_{CB} = \frac{2EI\theta_B}{2.75} + \frac{4EI\theta_C}{2.75} + 684.40625$$

$$M_{CB} = \frac{2(168.4706605)}{2.75} + \frac{4(-168.4706599)}{2.75} + 684.40625$$

$$M_{CB} = 561.8821341$$

$$M_{CD} = \frac{4EI\theta_C}{1.625} + \frac{2EI\theta_D}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{CD} = \frac{4(-168.4706599)}{1.625} + \frac{2(16.2942472)}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{CD} = -561.8821342 = -M_{CB}$$

$$M_{DC} = \frac{2EI\theta_C}{1.625} + \frac{4EI\theta_D}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{DC} = \frac{2(-168.4706599)}{1.625} + \frac{4(16.2942472)}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{DC} = -0.000005015 \Rightarrow 0$$

ช่วง AB

$$V_{AB} = \frac{w_1 L_1}{2} - \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_1}$$

$$V_{AB} = \frac{760 \times 1.625}{2} - \frac{0 + 561.8821328}{1.625} = 271.7263798 \text{ kg}$$

$$V_{BA} = V_{AB} - w_1 L_1 = 271.7263798 - 760 \times 1.625$$

$$V_{BA} = -963.2736202 \text{ kg}$$

$$M_{AB} = 0$$

$$M^{+}_{AB} = M_{AB} + \frac{V^2_{AB}}{2w_1} = 0 + \frac{271.7263798^2}{2 \times 760} = 48.57580624 \ \ kg \cdot m$$

$$M_{BA} = -561.8821328 \ \ kg \cdot m$$

ช่วง BC

$$V_{BC} = \frac{w_2 L_2}{2} - \frac{M_{BC} + M_{CB}}{L_2}$$

$$V_{BC} = \frac{1086 \times 2.75}{2} - \frac{-561.8821328 + 561.8821328}{2.75} = 1{,}493.25 \ \ kg$$

$$V_{CB} = V_{BC} - w_2 L_2 = 1{,}493.25 - 1{,}086 \times 2.75$$

$$V_{BA} = -1{,}493.25 \ \ kg$$

$$M_{BC} = -561.8821328$$

$$M^{+}_{BC} = M_{BC} + \frac{V^2_{BC}}{2w_2} = -561.8821328 + \frac{1{,}493.25^2}{2 \times 1{,}086} = 464.7272422 \ \ kg \cdot m$$

$$M_{CB} = -561.8821328 \ \ kg \cdot m$$

ช่วง CD

$$V_{CD} = \frac{w_1 L_1}{2} - \frac{M_{CD} + M_{DC}}{L_1}$$

$$V_{CD} = \frac{760 \times 1.625}{2} - \frac{-561.8821342 + 0}{1.625} = 963.2736202 \ \ kg$$

$$V_{DC} = V_{CD} - w_1 L_1 = 963.2736202 - 760 \times 1.625$$

$$V_{DC} = -271.7263798 \ \ kg$$

สำหรับบันไดท้องเรียบหนา 0.15 เมตร โมเมนต์สูงสุด

$$M = 56{,}188.21342 \ \ kg \cdot cm$$

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 100 \times 12.4^2 = 124{,}468.72 \ \ kg \cdot cm > M$$

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{56{,}188.21342}{1{,}500 \times 0.909 \times 12.4} = 3.323 \ \ cm^2 / m$$

เหล็กกันร้าว

$$A_{stemp} = 0.0020bt = 0.0020 \times 100 \times 15 = 3 \ \ cm^2 / m$$

สมมติใช้เหล็กเสริม DB 10 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.0^2 = 0.785 \ \ cm^2$

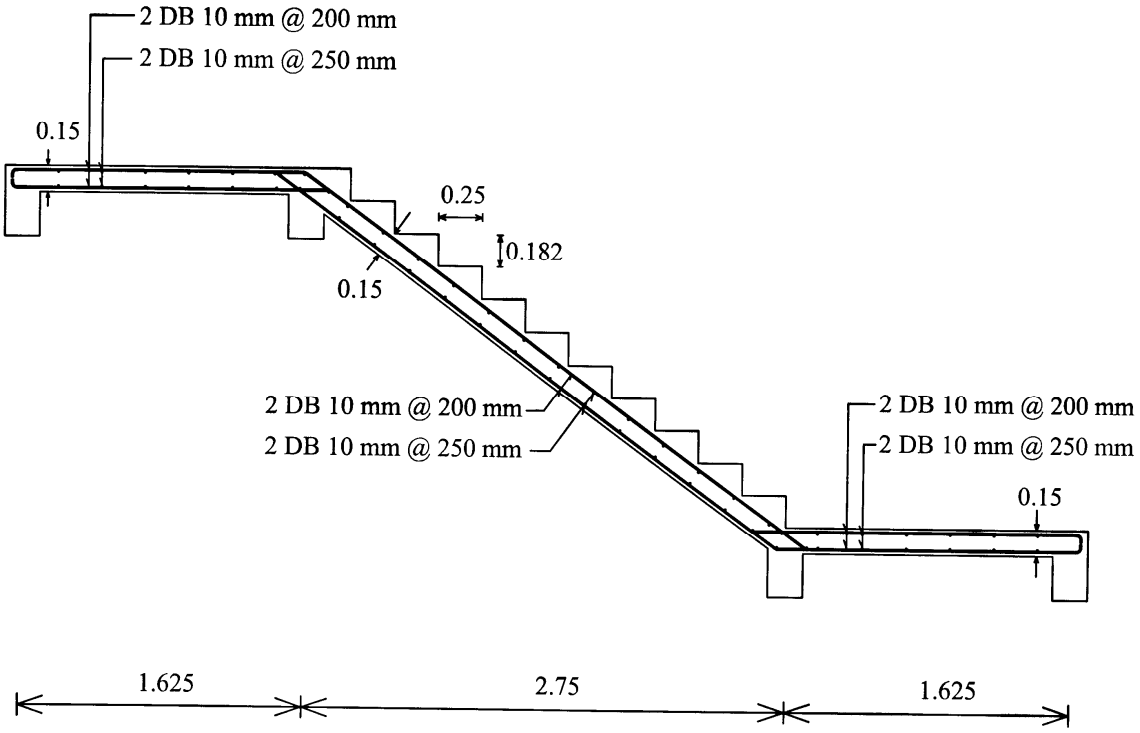
ระยะเรียงของเหล็กเสริมหลัก

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{0.785}{3.323} = 0.236 \ \ m \Rightarrow 0.20 \ \ m$$

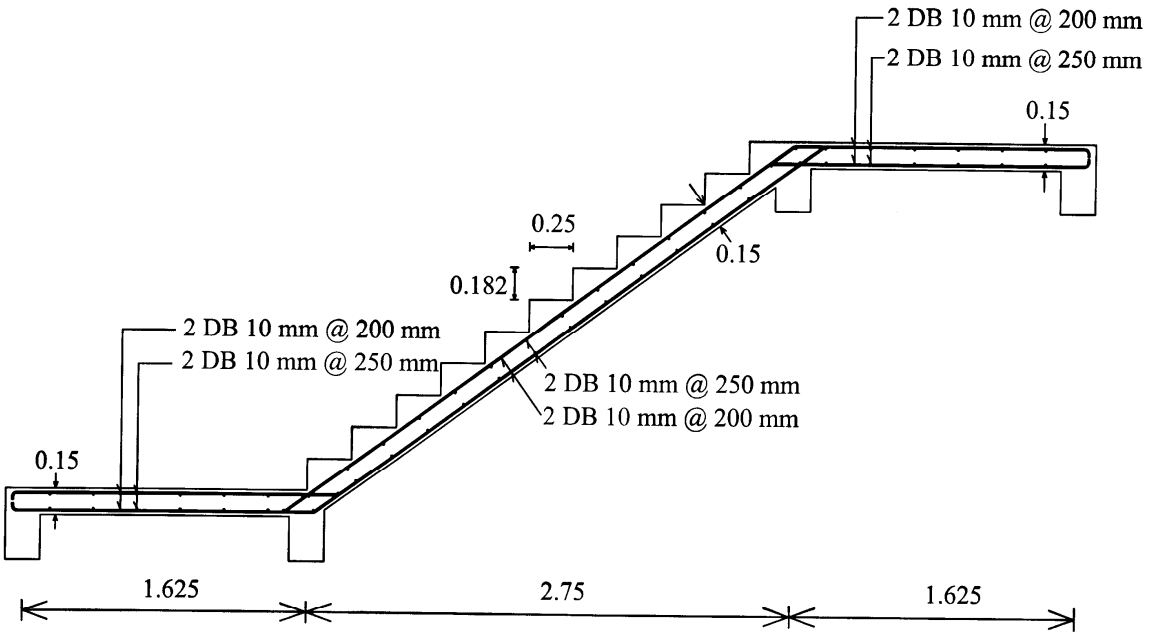
ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s_1 = \frac{A_{s1}}{A_{stemp}} = \frac{0.785}{3} = 0.262 \ \ m \Rightarrow 0.25 \ \ m$$

เขียนรายละเอียดบันไดดังนี้



รายละเอียดบันไดจากชานพักถึงชั้นบน



รายละเอียดบันไดจากชั้นล่างถึงชานพัก

รวมสมการ (1) ถึง (4) สำหรับบันไดพับผ้า

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$5.5EI\theta_A + 17.5EI\theta_B + 3.25EI\theta_C = 2409.657064 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$3.25EI\theta_B + 17.5EI\theta_C + 5.5EI\theta_D = -2409.657064 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

สมการ (1) คงเดิม สมการ (2) ได้จาก $5.5(1) - 2(2)$ สมการ (3) และ (4) คงเดิม

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -4071.96224 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$3.25EI\theta_B + 17.5EI\theta_C + 5.5EI\theta_D = -2409.657064 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

สมการ (1) และ (2) คงเดิม สมการ (3) ได้มาจาก $3.25(2) + 29.5(3)$ สมการ (4) คงเดิม

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -4071.96224 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$495.125EI\theta_C + 162.25EI\theta_D = -84{,}318.76067 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$EI\theta_C + 2EI\theta_D = -135.8821655 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

สมการ (1) , (2) และ (3) คงเดิม สมการ (4) ได้มาจาก $(3) - 495.125(4)$

$$2EI\theta_A + EI\theta_B = 135.8821614 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$-29.5EI\theta_B - 6.5EI\theta_C = -4071.96224 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$495.125EI\theta_C + 162.25EI\theta_D = -84{,}318.76067 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$-828EI\theta_D = -17{,}040.10348 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

จากสมการ (4)

$$EI\theta_D = \frac{-17{,}040.10348}{-828} = 20.57983512$$

จากสมการ (3)

$$EI\theta_C = \frac{-84{,}318.76067 - 162.25(20.57983512)}{495.125} = -177.0418357$$

จากสมการ (2)

$$EI\theta_B = \frac{-4{,}071.96224 + 6.5(-177.0418357)}{-29.5} = 177.0418363$$

จากสมการ (1)

$$EI\theta_A = \frac{135.8821614 - 177.0418363}{2} = -20.57983747$$

แทนค่าในสมการ slope deflection

ช่วง AB

$$M_{AB} = \frac{4EI\theta_A}{1.625} + \frac{2EI\theta_B}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{AB} = \frac{4(-20.57983747)}{1.625} + \frac{2(177.0418363)}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{AB} = -0.000000038 \Rightarrow 0$$

$$M_{BA} = \frac{2EI\theta_A}{1.625} + \frac{4EI\theta_B}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{BA} = \frac{2(-20.57983747)}{1.625} + \frac{4(177.0418363)}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{BA} = 577.705842 \ \ kg \cdot m$$

ช่วง BC

$$M_{BC} = \frac{4EI\theta_B}{2.75} + \frac{2EI\theta_C}{2.75} - 706.4635417$$

$$M_{BC} = \frac{4(177.0418363)}{2.75} + \frac{2(-177.0418357)}{2.75} - 706.4635417$$

$$M_{BC} = -577.7058421 \ \ kg \cdot m = -M_{BA}$$

$$M_{CB} = \frac{2EI\theta_B}{2.75} + \frac{4EI\theta_C}{2.75} + 706.4635417$$

$$M_{CB} = \frac{2(177.0418363)}{2.75} + \frac{4(-177.0418357)}{2.75} + 706.4635417$$

$$M_{CB} = 577.7058434 \ \ kg \cdot m$$

ช่วง CD

$$M_{CD} = \frac{4EI\theta_C}{1.625} + \frac{2EI\theta_D}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{CD} = \frac{4(-177.0418357)}{1.625} + \frac{2(20.57983512)}{1.625} - 167.2395833$$

$$M_{CD} = -577.7058434 \ \ kg \cdot m = -M_{CB}$$

$$M_{DC} = \frac{2EI\theta_C}{1.625} + \frac{4EI\theta_D}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{DC} = \frac{2(-177.0418357)}{1.625} + \frac{4(20.57953512)}{1.625} + 167.2395833$$

$$M_{DC} = -0.000005007 \Rightarrow 0$$

คำนวณแรงเฉือนและโมเมนต์บวกกลางช่วง

ช่วง AB

$$V_{AB} = \frac{w_1 L_1}{2} - \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_1}$$

$$V_{AB} = \frac{760 \times 1.625}{2} - \frac{0 + 577.705842}{1.625} = 261.9887126 \ \text{kg}$$

$$V_{BA} = V_{AB} - w_1 L_1 = 261.9887126 - 760 \times 1.625$$

$$V_{BA} = -973.0112874 \ \text{kg}$$

$$M_{AB} = 0$$

$$M^{+}_{AB} = M_{AB} + \frac{V^2_{AB}}{2w_1} = 0 + \frac{261.9887126^2}{2 \times 760} = 45.15663522 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{BA} = -577.705842 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

ช่วง BC

$$V_{BC} = \frac{w_2 L_2}{2} - \frac{M_{BC} + M_{CB}}{L_2}$$

$$V_{BC} = \frac{1{,}121 \times 2.75}{2} - \frac{-577.705842 + 577.7058434}{2.75} = 1{,}541.375 \ \text{kg}$$

$$V_{CB} = V_{BC} - w_2 L_2 = 1{,}541.375 - 1{,}121 \times 2.75$$

$$V_{BA} = -1{,}541.375 \ \text{kg}$$

$$M_{BC} = -577.705842$$

$$M^{+}_{BC} = M_{BC} + \frac{V^2_{BC}}{2w_2} = -577.705842 + \frac{1{,}541.375^2}{2 \times 1{,}121} = 481.9894705 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{CB} = -577.7058434 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

ช่วง CD

$$V_{CD} = \frac{w_1 L_1}{2} - \frac{M_{CD} + M_{DC}}{L_1}$$

$$V_{CD} = \frac{760 \times 1.625}{2} - \frac{-577.7058434 + 0}{1.625} = 973.0112882 \ \text{kg}$$

$$V_{DC} = V_{CD} - w_1 L_1 = 973.0112885 - 760 \times 1.625$$

$$V_{DC} = -261.9887118 \ \text{kg}$$

สำหรับบันไดพับผ้าหนา 0.15 เมตร โมเมนต์สูงสุด

$$M = 57{,}770.58434 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 100 \times 12.4^2 = 124{,}468.72 \ \text{kg} \cdot \text{cm} > M$$

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{57{,}770.58434}{1{,}500 \times 0.909 \times 12.4} = 3.417 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

เหล็กกันร้าว

$$A_{stemp} = 0.0020bt = 0.0020 \times 100 \times 15 = 3 \ \text{cm}^2/\text{m}$$

สมมติใช้เหล็กเสริม DB 10 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4}d_b^2 = \frac{\pi}{4}\times 1.0^2 = 0.785 \ \text{cm}^2$

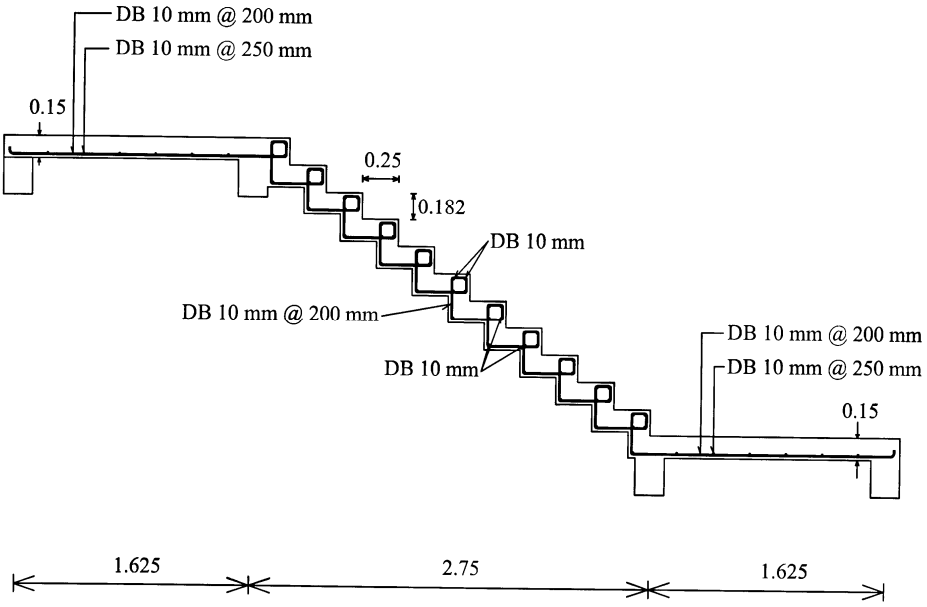
ระยะเรียงของเหล็กเสริมหลัก

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{0.785}{3.417} = 0.2397 \ \text{m} \Rightarrow 0.20 \ \text{m}$$

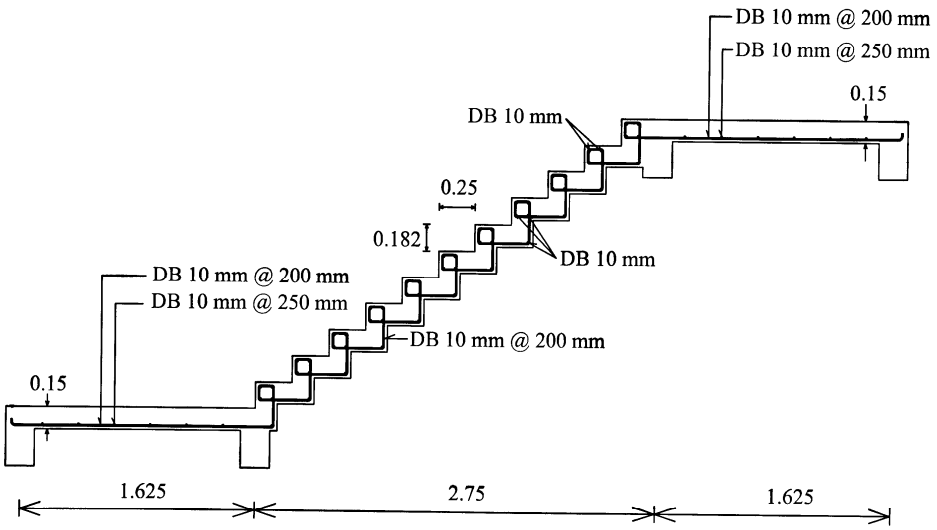
ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s_1 = \frac{A_{s1}}{A_{stemp}} = \frac{0.785}{3} = 0.262 \ \text{m} \Rightarrow 0.25 \ \text{m}$$

ขั้นตอนที่ 3 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

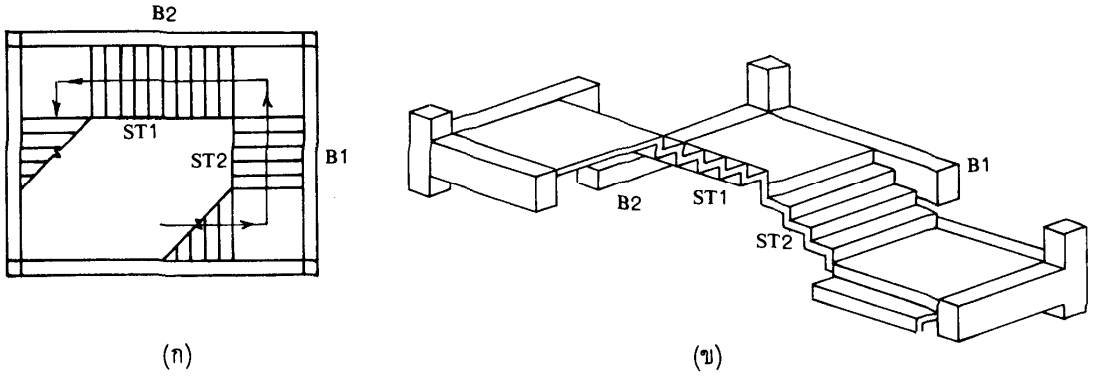


รายละเอียดบันไดจากชานพักถึงชั้นบน



รายละเอียดบันไดจากชั้นล่างถึงชานพัก

สังเกตการณ์เสริมเหล็กที่มุมเว้าเข้าต้องม้วนเหล็กเพื่อป้องกันเหล็กดึงคอนกรีตจนฉีกหลุดออกมา นอกจากนั้นยังต้องออกแบบคาน B10, B11 และ B1 ด้วย ซึ่งก็เหมือนกับการออกแบบคานธรรมดานั่นเอง



รูปที่ 4.4 บันไดแบบเวียนรอบโถงบันได

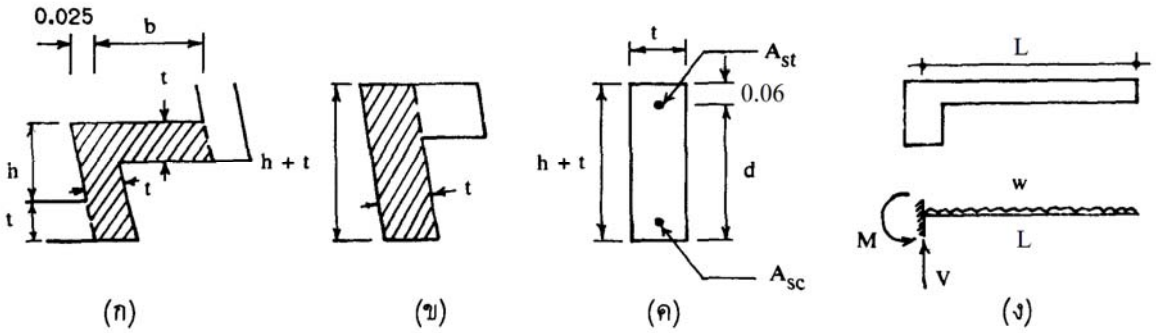
บางครั้งอาจจะทำชานพักเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยช่วงแรกมี 2-3 ขั้น ช่วงที่สองมีมากขึ้นดังรูปที่ 4.4 อาจจะให้บันได ST-1 ฝากบนคาน B1 แล้วให้ ST-2 ฝากบนชานพักอีกที การออกแบบให้คำนวณ ST-2 ก่อน แล้วจึงคำนวณ ST-1 ในภายหลัง โดยกระจายน้ำหนักของ ST-2 ลงบนชานพัก ถ้าจำนวนขั้นไม่มากนัก (ไม่เกิน 5 ขั้น) ก็ไม่จำเป็นต้องคิดน้ำหนักของ ST-2 ลงบนชานพัก เนื่องจากการหาค่าของ w_D ได้เผื่อเอาไว้แล้ว เหล็กเสริมในชานพักจะเป็นตะแกรงสองชั้นบน-ล่าง วิธีที่สองให้บันได ST-2 ฝากบนคาน B2 แล้วให้ ST-1 ฝากบนชานพัก การคำนวณให้ออกแบบ ST-1 ถึงกลางชานพัก กระจายน้ำหนัก ST-1 ลงบนชานพักแล้วออกแบบ ST-2 วิธีที่สามให้ชานพักฝากบน B1 และ B2 ออกแบบ ST-1 และ ST-2 แยกกันไปเลย แต่วิธีนี้แม้จะง่ายก็สิ้นเปลืองและก่อสร้างยาก

4.3 บันไดยื่น (Cantilever Stair)

พิจารณารูปที่ 4.2(ง) เป็นลักษณะที่ขั้นบันไดยื่นออกมาจากคานใหญ่ซึ่งฝังในผนัง การออกแบบบันไดชนิดนี้ให้คิดขั้นบันไดแต่ละขั้นเป็นคานเล็กยื่นจากคานใหญ่ ปัญหาที่นักศึกษาพบอยู่เสมอคือคิดน้ำหนักอย่างไร พิจารณาส่วนไหนเป็นคาน

พิจารณารูปที่ 4.5(ก) เป็นการตัดบันไดพับผ้ามาหนึ่งขั้น สมมติค่าความหนา t อยู่ระหว่าง 0.10 ถึง 0.15 เมตร เนื้อที่หน้าตัดขั้นบันได

$$A = t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2} \right) \text{ ตารางเมตร โดย b, h, t หน่วยเมตร}$$



รูปที่ 4.5 บันไดยื่นพับผ้า

น้ำหนักของบันไดหนึ่งขั้นคือ

$$w_G = 2400A = 2400t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2} \right) \text{ หน่วย kg/m}$$

น้ำหนักวัสดุแต่งผิวเช่น หินขัด กระเบื้องยาง แกรนิต แกรนิตโต้ ฯลฯ ต้องพิจารณาตามความเหมาะสม สมมติเป็นหินขัดหนาประมาณ 3 cm จะหนักประมาณ $2400 \times 0.03 = 72 \text{ kg/m}^2$ ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$w_D = w_G + 72b \text{ หน่วย kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกจร $w_L b$ หน่วย kg/m ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกรวมคือ

$$w = w_G + 72b + w_L b \text{ หน่วย kg/m}$$

จากรูปที่ 4.5(ง) แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่ศูนย์กลางคานคือ

$$V = wL \text{ หน่วย kg}$$

$$M = \frac{1}{2}wL^2 \text{ หน่วย } \text{kg}\cdot\text{m} \text{ คูณ 100 ให้เป็น } \text{kg}\cdot\text{cm}$$

รูปที่ 4.5(ข) ส่วนที่แรเงาทำหน้าที่เป็นคานซึ่งจำลองเป็นคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามรูปที่ 4.5(ค) ความกว้าง t ลึก h + t เหล็กรับแรงดึง A_{st} เส้นเดียวอยู่บน เหล็กรับแรงอัด A_{sc} เส้นเดียวอยู่ล่างส่วนเหล็กลูกตั้งจะเป็นขาเดียว (ไม่แสดงไว้) จุดศูนย์ถ่วงเหล็กห่างขอบขั้นบันไดประมาณ 6 cm ซึ่งเป็นระยะ d' ของ A_{sc} ด้วย เมื่อทราบข้อมูลเบื้องต้นแล้ว หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสมดุลที่รับได้ดังนี้

$$V_c = 0.29\sqrt{f'_c}td \text{ หน่วย kg}$$

$$M_R = Rtd^2 \text{ หน่วย } \text{kg}\cdot\text{cm}$$

พิจารณาปรับเพิ่มค่า t จน $V < V_c$ และ $M < M_R$ แล้วคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd} \text{ ไม่ควรจะเล็กกว่า DB 10 mm}$$

$$A_{sc} = \text{ ไม่ควรจะเล็กกว่า DB 10 mm}$$

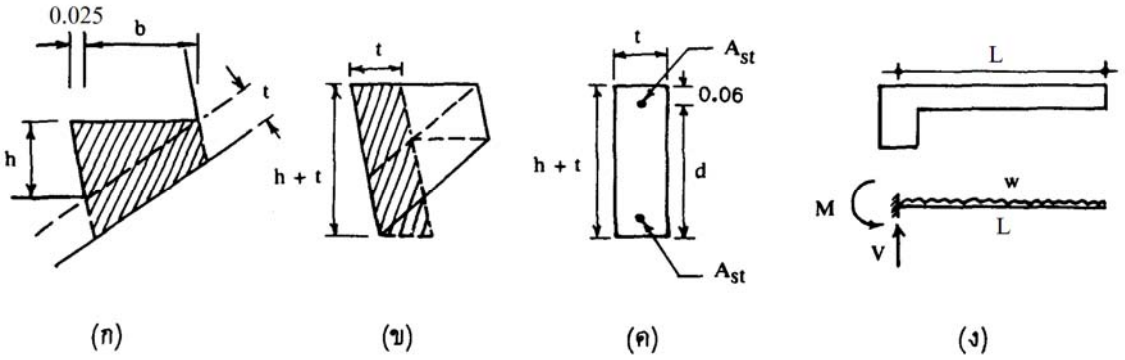
ระยะเรียงของเหล็กทางขวางใช้ปริมาณขั้นต่ำคือ

$$s \le \frac{A_v f_{sy}}{3.5t}$$

ระยะฝังของเหล็ก A_{st} เมื่องอฉากและห่างจากข้างคานใหญ่ 5 cm

$$\ell_d = \frac{0.08 d_b f_y}{\sqrt{f_c'}}$$

จากนั้นจึงออกแบบคานใหญ่ที่ฝังผนังโดยรับ V จากขั้นบันไดไปเป็นน้ำหนักแผ่นบนคานรวมกับน้ำหนักคานและผนัง และโมเมนต์ดัด M จากขั้นบันไดเป็นโมเมนต์บิดในคาน



รูปที่ 4.6 บันไดยื่นท้องเรียบ

รูปที่ 4.6 เป็นขั้นบันไดยื่นท้องเรียบ ความแตกต่างจากบันไดยื่นพับผ้าเพียงเนื้อที่หน้าตัดที่มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกคงที่ ส่วนอื่นๆ เหมือนกับบันไดพับผ้า

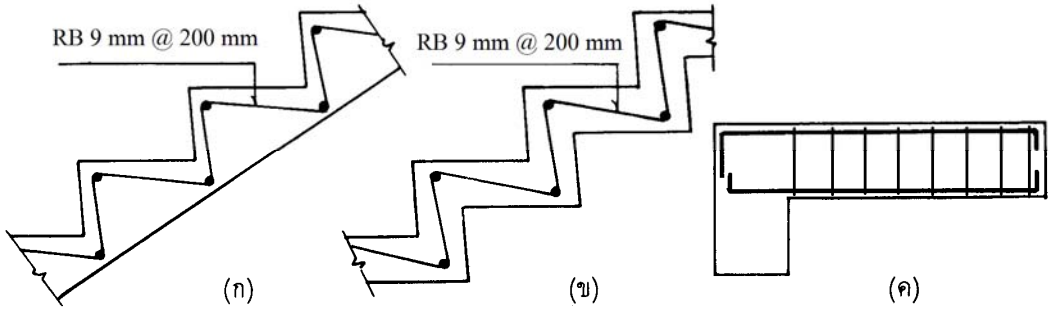
รูปที่ 4.6 (ก) พื้นที่แรเงาเป็นบันไดหนึ่งขั้น เนื้อที่แรเงาคือ

$$A = \frac{1}{2}h(b + 0.25) + t\sqrt{b^2 + h^2}$$ โดย b, h ,t มีหน่วยเป็นเมตร

น้ำหนักบรรทุกของขั้นบันไดรวมพื้นบันได

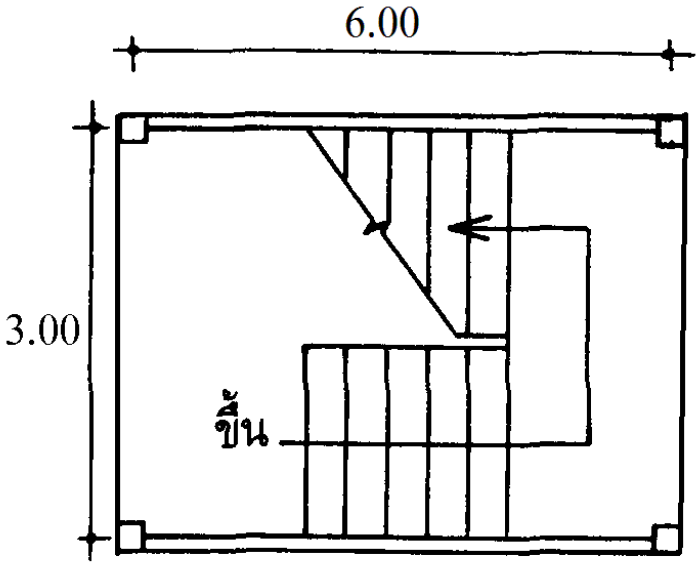
$$w_G = 2400A = 1200h(b + 0.025) + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}$$ หน่วย kg/m

ต่อจากนี้ก็เหมือนกับแบบพับผ้า



รูปที่ 4.7 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในขั้นบันไดยื่น

ตัวอย่างที่ 4.3 จงออกแบบบันได ให้ปล่องบันไดขนาด 3.00 × 6.00 เมตร ความสูงระหว่างชั้น 4.00 เมตร อาคารสำนักงาน ให้ออกแบบทั้งบันไดพับผ้าและบันไดท้องเรียบ ขั้นและชานพักบันไดฝากอยู่กับคานใหญ่ฝากในผนังโดยความกว้างคานไม่เกิน 0.30 เมตร



ตัวอย่างที่ 4.3 บันไดยื่นจากคานในผนัง

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c' = 240$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีต กำหนดเอง

$f_y = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม กำหนดใช้เหล็ก SD-30

$f_c = 0.375f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72 =$$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274 =$$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909 =$$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095$$ ksc = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

H = 4.00 m = ความสูงระหว่างชั้น อาคารสาธารณะแม้จะอยู่ในช่วงที่กฎหมายกำหนดไม่ต้องมีชานพัก แต่จะจัดให้มีชานพัก 1 ชานพักเพื่อลดช่วงความยาว และใช้สอยได้สะดวก

$h \le 0.19$ m = ระยะลูกตั้งตามกฎหมายต้องไม่เกินค่านี้ แต่คาดว่าจะใช้ 0.18 เมตร

$b \geq 0.24$ m = ระยะลูกนอนตามกฎหมายต้องไม่น้อยกว่าค่านี้ คาดว่าจะใช้ 0.25 เมตร

$L = 6.00$ m = ระยะความยาวของบันได

$N_1 = \frac{H}{h} = \frac{4.00}{0.19} = 21.05 \Rightarrow 22$ ขั้น แบ่งครึ่งสำหรับแต่ละฟากของช่วงชานพัก

$\frac{N_1}{2} = \frac{22}{2} = 11$ ขั้น ให้ขนาดลูกนอน b = 0.25 เมตร

ความยาวทางราบในช่วงขั้นบันได

$$= (11-1) \times 0.25 = 2.50 \text{ m}$$

บันไดช่วงขึ้นและลงจากชานพักจะไม่ตรงแนบพอดี ต้องมีช่องว่างเล็กน้อย แต่อย่างน้อยต้อง 0.10 เมตร ความกว้างของบันไดจึงเป็น

$$= \frac{3.50 - 0.10}{2} = 1.70 \text{ m}$$

กฎหมายกำหนดให้ความกว้างของชานพักต้องไม่น้อยกว่าความกว้างของบันได ถ้าให้มีส่วนของชานพักทั้งสองปลายของบันได ดังนั้นความกว้างของชานพักแต่ละข้างเท่ากับ

$$= \frac{6.00 - 2.50}{2} = 1.75 \text{ m} > 1.70 \text{ m}$$

ระยะลูกตั้งที่ใช้จริง

$$h = \frac{4.00}{22} = 0.1818 \Rightarrow 0.182 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบขั้นบันได สมมติให้ความหนา t = 0.15 เมตร

น้ำหนักขั้นบันไดแบบพับผ้า

$$w_G = 2400A = 2400t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

$$w_G = 2400 \times 0.15 \times \left(0.25 + 0.025 + 0.1818\sqrt{1 + \left(\frac{0.1818}{0.25}\right)^2}\right)$$

$$w_G = 179.9 \Rightarrow 180 \text{ kg/m}$$

น้ำหนักขั้นบันไดแบบท้องเรียบ

$$w_G = 2400A = 1200h(b + 0.025) + 2400t\sqrt{b^2 + h^2}$$

$$w_G = 1200 \times 0.1818 \times (0.25 + 0.025) + 2400 \times 0.15\sqrt{0.25^2 + 0.1818^2}$$

$$w_G = 171.27 \Rightarrow 172 \text{ kg/m}$$

เลือกน้ำหนักแบบพับผ้าซึ่งมากกว่ามาใช้ออกแบบ ทำผิวบันไดเป็นหินขัดหนา 3 cm อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2 ลูกนอน b = 0.25 เมตร ดังนั้น

$$w = w_G + 72b + 400b = 180 + 72 \times 0.25 + 400 \times 0.25 = 298 \text{ kg/m}$$

ความลึกรวม

$$h + t = 0.1818 + 0.15 = 0.3318 \text{ m} = 33.18 \text{ cm}$$

ความลึกประสิทธิผล

$$d = 33.18 - 6 = 27.18 \text{ cm} = 0.2718 \text{ m}$$

แรงเฉือนสูงสุด

$$V = w(L - d) = 298 \times (1.70 - 0.2718) = 425.6 \text{ kg}$$

กำลังรับแรงเฉือนของขั้นบันได

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}td = 0.29\sqrt{240} \times 15 \times 27.18 = 1{,}832 \text{ kg} >> V = 425.6 \text{ kg}$$

บันไดรับแรงเฉือนได้ปลอดภัย

โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = \frac{1}{2}wL^2 = \frac{1}{2} \times 298 \times 1.70^2 = 430.61 \text{ kg} \cdot \text{m} = 43{,}061 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rtd^2 = 8.095 \times 15 \times 27.18^2 = 89{,}703 \text{ kg} \cdot \text{cm} > M = 43{,}061 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

ปริมาณเหล็กรับแรงดึงที่ต้องการ

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd} = \frac{43{,}061}{1{,}500 \times 0.909 \times 27.18} = 1.162 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 16 mm มี $A_{st} = A_b = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \text{ cm}^2 > 1.162 \text{ cm}^2$ ใช้ทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

ระยะเรียงของเหล็กทางขวางใช้ปริมาณขั้นต่ำคือ

$$s \le \frac{A_v f_{sy}}{3.5t} = \frac{0.636 \times 2400}{3.5 \times 15} = 29.07 \text{ cm} \Rightarrow 25 \text{ cm}$$

นั่นคือเหล็กทางขวาง RB 9 mm @ 250 mm

ตรวจสอบระยะฝังของเหล็กรับแรงดึงเมื่องอฉาก

$$\ell_d = \frac{0.08 d_b f_y}{\sqrt{f_c'}} = \frac{0.08 \times 1.6 \times 3000}{\sqrt{240}} = 24.8 \Rightarrow 25 \text{ cm}$$

เผื่องอฉากและระยะหุ้ม 5 cm ดังนั้นความกว้างคานอย่างน้อย

$$b_w = \ell_d + 5 = 25 + 5 = 30 \text{ cm}$$

พื้นชานพักมีลักษณะพื้นทางเดียว ความหนาขั้นต่ำคือ

$$h_f = \frac{L}{20}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{3.50}{20}\left(0.4 + \frac{2400}{7000}\right) = 0.13 \Rightarrow 0.15 \text{ m}$$

แต่งผิวด้วยหินขัดหนา 3 cm น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

$$w = 2400h_f + 72b + 400b$$
$$w = 2400 \times 0.15 + 72 \times 0.25 + 400 \times 0.25$$
$$w = 478 \ kg/m$$

โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{478 \times 3.50^2}{8} = 731.9375 \ kg \cdot m/m = 73{,}193.75 \ kg \cdot cm/m$$

ให้ระยะหุ้มคอนกรีต 2 cm ใช้เหล็กเสริม DB 16 mm ความลึกประสิทธิผล

$$d = 15 - 2 - \frac{1.6}{2} = 12.2 \ cm$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 100 \times 12.2^2 = 120{,}485.98 \ kg \cdot cm/m > M$$

แสดงว่าความหนาที่เลือกมานั้นใช้ได้ ปริมาณเหล็กเสริม

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{73{,}193.75}{1{,}500 \times 0.909 \times 12.2} = 4.40 \ cm^2/m$$

เหล็ก DB 16 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \ cm^2$ ดังนั้นระยะเรียงของเหล็ก

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{2.01}{4.40} = 0.457 \ m$$

จะเห็นว่าเหล็กมีขนาดโตเกินไป เปลี่ยนไปใช้ DB 10 mm ที่มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.0^2 = 0.785 \ cm^2$ ระยะเรียงเหล็กคือ

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{0.785}{4.40} = 0.178 \ m \Rightarrow 0.175 \ m$$

ใช้เหล็กเสริมให้แผ่นพื้นชานพัก DB 10 mm @ 175 mm

ออกแบบคานฝังในผนัง

ความกว้างของคานที่ประมาณไว้ในครั้งออกแบบขั้นบันได $b_w = 0.30 \ m = 30 \ cm$

ความลึกคานขั้นต่ำ $h = \frac{L}{16}\left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) = \frac{6.00}{16}\left(0.4 + \frac{3000}{7000}\right) = 0.31 \ m$

ความลึกคานที่แนะนำ $h = \frac{L}{10} = \frac{6.00}{10} = 0.60 \ m$

เลือกใช้ความลึกของคาน $h = 0.60 \ m = 60 \ cm$

น้ำหนักคาน

$$w_G = 2400b_w h = 2400 \times 0.30 \times 0.60 = 432 \ kg/m$$

น้ำหนักจากขั้นบันได

$$w_s = \frac{w}{b} = \frac{425.6}{0.25} = 1{,}702.4 \Rightarrow 1{,}703 \ \ kg/m$$

ประมาณว่ามีผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่นสูง 2.50 เมตร น้ำหนักผนัง

$$w_w = 360h_w = 360 \times 2.50 = 900 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_G + w_s + w_w = 432 + 1{,}703 + 900 = 3{,}035 \ \ kg/m$$

สมมติระยะหุ้มบนล่าง 4 cm เหล็กลูกตั้ง RB 9 mm เหล็กเสริม DB 25 mm สองชั้นทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

$$d = 60 - 4 - 0.9 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 51.35 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 8.65 \ \ cm$$

โมเมนต์บิดจากขั้นบันได

$$m_t = \frac{430.61}{0.25} = 1{,}722.44 \Rightarrow 172{,}244 \ \ kg \cdot cm/m$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่กลางคาน

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{3{,}035 \times 6.00^2}{8} = 13{,}657.5 \ \ kg \cdot m = 1{,}365{,}750 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์สมดุลของหน้าตัด

$$M_R = Rb_w d^2 = 8.095 \times 30 \times 51.35^2 = 640{,}352.3441 \ \ kg \cdot cm < \frac{2}{3}M$$

เพิ่มความลึกคานเป็น $h = 0.80 \ \ m = 80 \ \ cm$ น้ำหนักคาน

$$w_G = 2400b_w h = 2400 \times 0.30 \times 0.80 = 576 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_G + w_s + w_w = 576 + 1{,}703 + 900 = 3{,}179 \ \ kg/m$$

สมมติระยะหุ้มบนล่าง 4 cm เหล็กลูกตั้ง RB 9 mm เหล็กเสริม DB 25 mm สองชั้นทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

$$d = 80 - 4 - 0.9 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 71.35 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 8.65 \ \ cm$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่กลางคาน

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{3{,}179 \times 6.00^2}{8} = 14{,}305.5 \ \ kg \cdot m = 1{,}430{,}550 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์สมดุลของหน้าตัด

$$M_R = Rb_w d^2 = 8.095 \times 30 \times 71.35^2 = 1{,}236{,}306.244 \ \ \text{kg} \cdot \text{cm} > \frac{2}{3}M$$

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กรับแรงอัด

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1{,}500 \times \frac{0.274 - \frac{8.65}{71.35}}{1 - 0.274} = 631.27 \ \ \text{ksc} < f_s = 1{,}500 \ \ \text{ksc}$$

เหล็กเสริมรับแรงดึง

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')}$$

$$A_{st} = \frac{1{,}236{,}306.244}{1{,}500 \times 0.909 \times 71.35} + \frac{1{,}430{,}550 - 1{,}236{,}306.244}{1{,}500 \times (71.35 - 8.65)}$$

$$A_{st} = 14.773 \ \ \text{cm}^2$$

เหล็กเสริมรับแรงอัด

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s^{'}(d - d')} = \frac{1{,}430{,}550 - 1{,}236{,}306.244}{631.27 \times (71.35 - 8.65)} = 4.908 \ \ \text{cm}^2$$

แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตซึ่งระยะ d = 0.7135 m จากปลายคาน

$$V = w\left(\frac{L}{2} - d\right) = 3{,}179 \times \left(\frac{6.00}{2} - 0.7135\right) = 7{,}268.7835 \ \ \text{kg}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c^{'}} b_w d = 0.29\sqrt{240} \times 30 \times 71.35 = 9{,}616.54 \ \text{kg} > V$$

ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V - V_c}{f_v d} \Rightarrow 0 \ \text{เป็น 0 เมื่อ} \ V_c > V$$

โมเมนต์บิดที่หน้าตัดสมดุลที่ระยะ d = 0.7135 m

$$M_t = m_t\left(\frac{L}{2} - d\right) = 172{,}244 \times \left(\frac{6.00}{2} - 0.7135\right) = 393{,}835.906 \ \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

หน้าตัดคานมีด้านสั้น $x = b_w = 30$ cm และด้านยาว $y = h = 80$ cm

ระยะทางสั้นของผิวนอกเหล็กลูกตั้ง

$$x_1 = x - 3.5 - 3.5 = 30 - 7 = 23 \ \ \text{cm}$$

ระยะทางยาวของผิวนอกเหล็กลูกตั้ง

$$y_1 = y - 4 - 4 = 80 - 8 = 72 \ \ \text{cm}$$

เนื้อที่หน้าตัดแกนคอนกรีต

$$A_c = x_1 y_1 = 23 \times 72 = 1{,}656 \ \ \text{cm}^2$$

โมเมนต์บิดสูงสุดที่คานรับได้

$$M_{t,max} = 1.32\sqrt{f_c'}\,\frac{b_w^2 h}{3} = 1.32\sqrt{240}\times\frac{30^2\times 80}{3} = 490{,}784.4496 \ \text{kg}\cdot\text{cm} > M_t$$

หน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์บิด

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} = \frac{3.5\times 393{,}835.906}{30^2\times 80} = 19.145 \ \text{ksc}$$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้จากโมเมนต์บิด

$$v_{ct} = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \ \text{ksc} > v_t = 19.145 \ \text{ksc}$$ ใช้ได้

เหล็กทางขวางรับโมเมนต์บิดเป็น RB 9 mm มี $A_t = \frac{\pi}{4}\times 0.9^2 = 0.636 \ \text{cm}^2$ มี $f_v = \frac{2{,}400}{2} = 1{,}200$ ksc

ดังนั้น

$$\frac{2A_t}{s} = \frac{M_t}{A_c f_v} = \frac{393{,}835.906}{1{,}656\times 1{,}200} = 0.1982 \ \text{cm}^2/\text{cm}$$

รวมผลของเหล็กรับแรงเฉือนและเหล็กรับโมเมนต์บิด

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = 0 + 0.1982 = 0.1982 \ \text{cm}^2/\text{cm}$$

ปริมาณขั้นต่ำของเหล็กรับแรงเฉือนและแรงบิด

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = \frac{3.5b_w}{f_{sy}} = \frac{3.5\times 30}{2{,}400} = 0.04375 \ \text{cm}^2/\text{cm} < 0.1982 \ \text{cm}^2/\text{cm}$$

สำหรับเหล็ก RB 9 mm มี

$$A_v + 2A_t = 2\times 0.636 = 1.272 \ \text{cm}^2$$

หาระยะเรียงของเหล็กรับแรงเฉือน

$$\frac{1.272}{s} = 0.1982$$

$$s = \frac{1.272}{0.1982} = 6.42 \ \text{cm}$$

น้อยเกินไป เปลี่ยนไปใช้ 2-RB 9 mm ทำให้ระยะเรียงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

$$s = 2\times 6.42 = 12.84 \ \text{cm} \Rightarrow 12.5 \ \text{cm} = 125 \ \text{mm}$$

ใช้เหล็กลูกตั้ง 2-ป RB 9 mm @ 125 mm

ออกแบบเหล็กตามยาว

เหล็กรับแรงเฉือนตามยาวทั้งหมด

$$A_\ell = 2A_t\,\frac{x_1 + y_1}{s} = \frac{2A_t}{s}(x_1 + y_1) = \frac{2\times 0.636}{12.5}\times(23 + 72) = 9.6672 \ \text{cm}^2$$

$$C_t = \frac{bd}{\sum x^2 y} = \frac{30\times 71.35}{30^2\times 80} = 0.029729166$$

แต่ปริมาณขั้นต่ำ

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - 2A_t \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 12.5}{2{,}400} \times \frac{393{,}835.906}{393{,}835.906 + \frac{7{,}268.7835}{3 \times 0.029729166}} - 2 \times 0.636 \right] \times \frac{23 + 72}{12.5}$$

$$A_\ell = 27.549 \ \text{cm}^2$$

แต่ไม่ควรใช้เกิน

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - \frac{3.5bs}{f_y} \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 12.5}{2{,}400} \times \frac{393{,}835.905}{393{,}835.906 + \frac{7{,}268.7835}{3 \times 0.029729166}} - \frac{3.5 \times 30}{2{,}400} \right] \times \frac{23 + 72}{12.5}$$

$$A_\ell = 27.217 \ \text{cm}^2$$

ดังนั้นต้องใช้ $A_\ell = 27.549 \ \text{cm}^2$ โดยแบ่งเป็นห้าส่วน มีหนึ่งส่วนที่นำไปรวมเหล็กรับแรงดึงด้านล่าง และหนึ่งส่วนไปรวมกับเหล็กรับแรงอัดด้านบน เหลืออีกสามส่วนนำมากระจายสองข้างคาน

$$\frac{A_\ell}{5} = \frac{27.217}{5} = 5.4434 \ \text{cm}^2$$

เหล็กรับแรงดึง

$$A_{st} = 14.773 + 5.4434 = 20.2164 \ \text{cm}^2$$

จำนวนเหล็ก DB 25 mm ซึ่งมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \ \text{cm}^2$ คือ

$$\frac{A_{st}}{A_{s1}} = \frac{20.2164}{4.909} = 4.12 \Rightarrow 5 \text{ เส้น}$$

เหล็กรับแรงอัด

$$A_{sc} = 4.908 + 5.4434 = 10.3514 \ \text{cm}^2$$

จำนวนเหล็ก DB 25 mm ซึ่งมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \ \text{cm}^2$ คือ

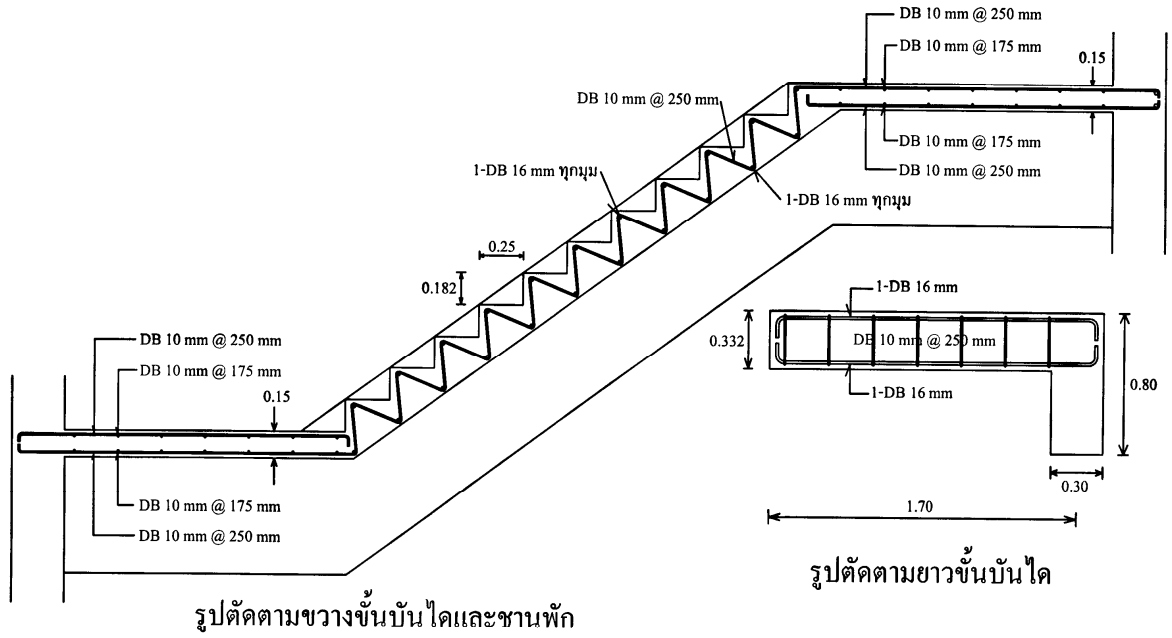
$$\frac{A_{sc}}{A_{s1}} = \frac{10.3514}{4.909} = 2.11 \Rightarrow 3 \text{ เส้น}$$

เหล็กสองข้างคานสามชั้นๆ ละสองเส้น ดังนั้นแต่ละเส้นจะมีเนื้อที่หน้าตัด

$$A_{sL} = \frac{5.4434}{2} = 2.7217 \ \ cm^2$$

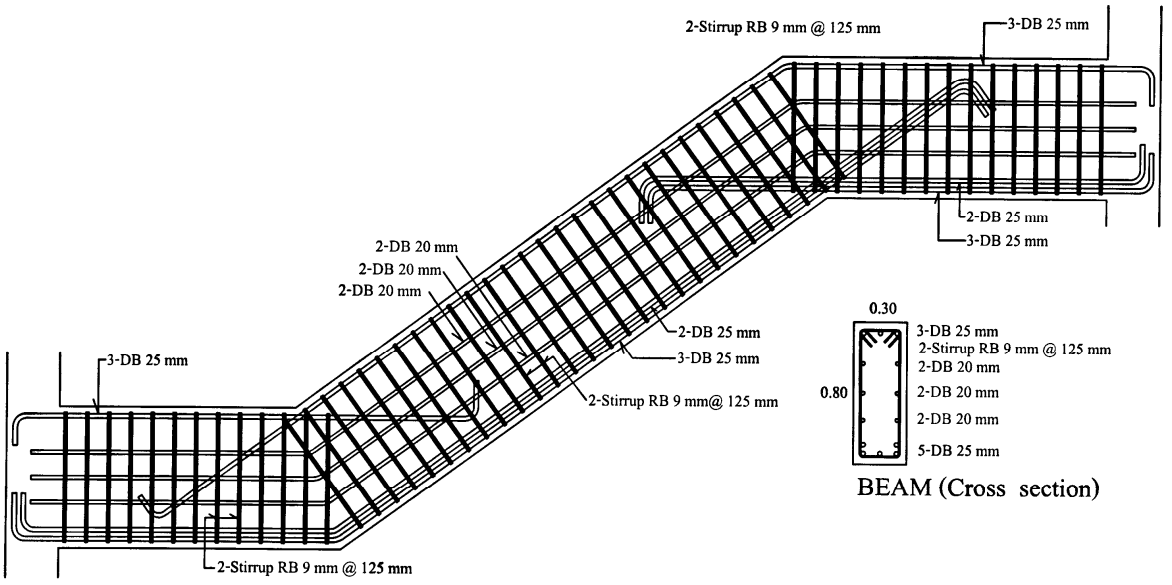
เหล็ก DB 20 mm มีเนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = \pi = 3.14 \ \ cm^2 > 2.7217 \ \ cm^2$ ดังนั้นแต่ละชั้นคือ 2-DB 20 mm จำนวนสามชั้น

เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก



รูปตัดตามขวางขั้นบันไดและชานพัก

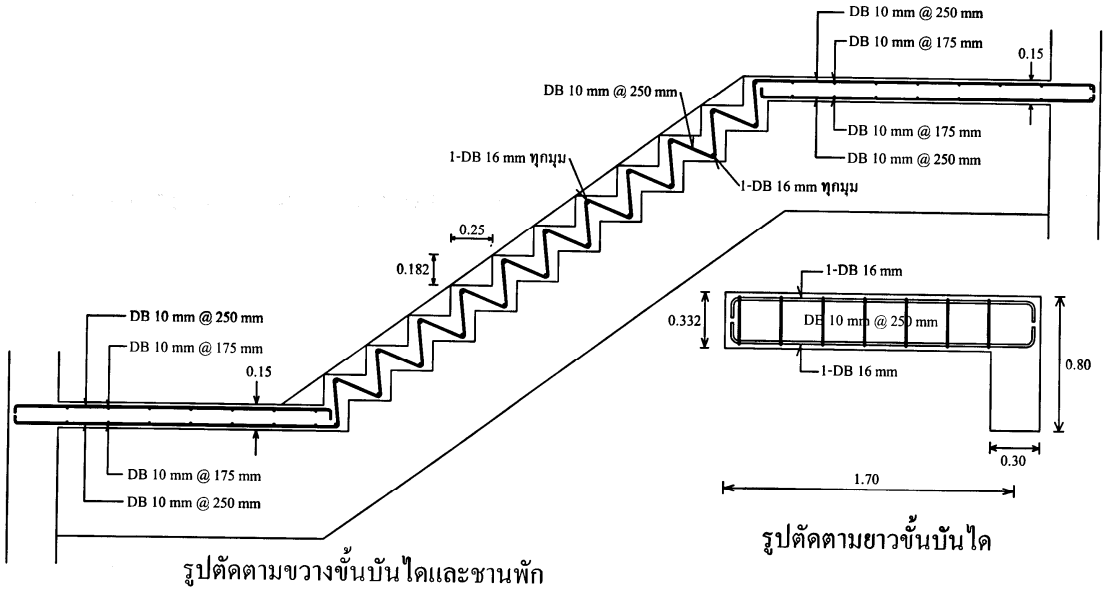
รูปตัดตามยาวขั้นบันได

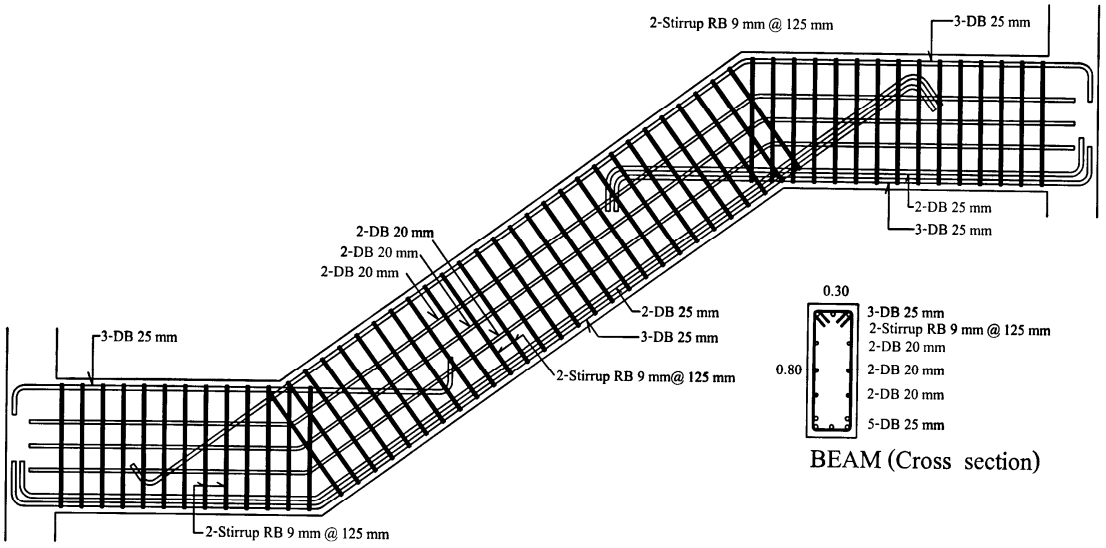


BEAM (Cross section)

BEAM (Longitudinal section)

ขั้นบันไดแบบท้องเรียบ

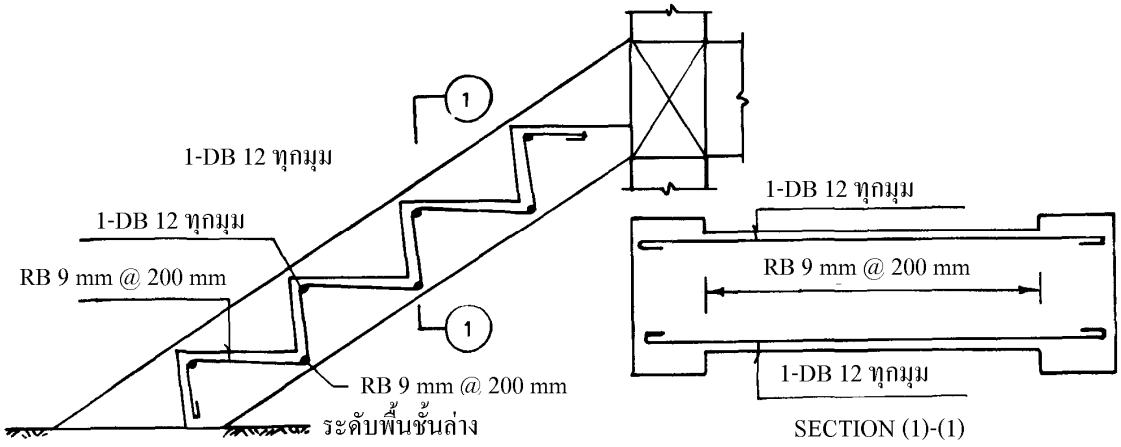




BEAM (Longitudinal section)

4.4 บันไดแบบมีคานแม่บันไดสองข้าง

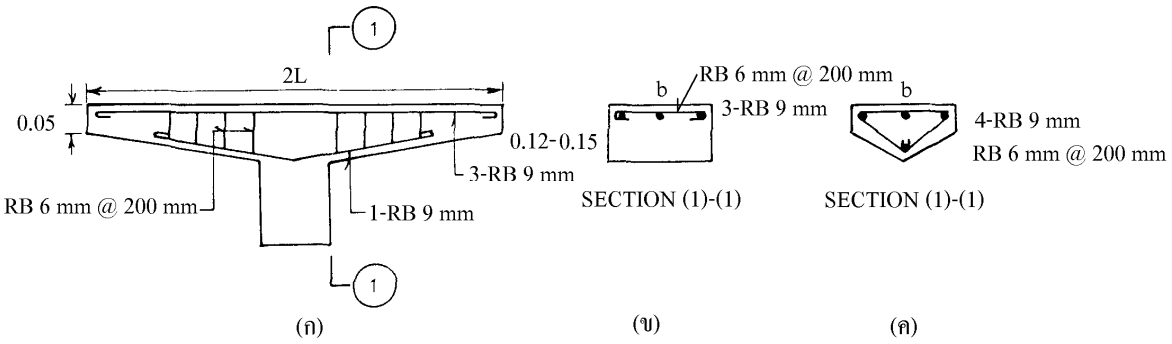
บันไดแบบนี้มักจะเป็นบันไดโบสถ์ วิหาร ศาลาการเปรียญ ที่ต้องทำราวบันไดน้ำหนักมากเช่น ราวบันไดนาค การคำนวณออกแบบให้บันไดแต่ละขั้นเป็นคานแบบบันไดยื่น โดยคิดโมเมนต์ที่กึ่งกลางเป็น $M = \frac{wL^2}{8}$ และให้ขั้นบันไดที่ติดชานพัก (ถ้ามีชานพัก) เป็นคานรับชานพักด้วย โมเมนต์ดัดของขั้นบันไดที่ตรงคานขอบมีขนาดน้อยจนไม่ต้องคิดเป็นโมเมนต์บิดในคานแม่บันได เหล็กเสริมบันไดอาจจะเป็น 1-DB 12 mm ที่มุมบนและล่าง ส่วนเหล็กที่ถักตามขั้นบันไดทำหน้าที่รับแรงเฉือนอาจจะเป็น RB 9 mm @ 200 mm



รูปที่ 4.8 บันไดแบบมีคานแม่บันไดสองข้าง

4.5 บันไดแบบยื่นจากคานกลาง

หากย้อนไปดูรูปที่ 4.2(จ) จะเป็นบันไดที่มีคานตรงกลางแล้วมีขั้นบันไดแต่ละขั้นฝากกับคานแล้วยื่นออกทั้งสองข้าง ขั้นบันไดจะรับโมเมนต์ลบสูงสุดที่ขอบคานกลาง แต่เพื่อความสะดวกจะพิจารณาตรงกึ่งกลางความกว้างของคานซึ่งในขั้นแรกจะยังไม่ทราบขนาดคานกลาง คานกลางอาจจะขึ้นตรงๆ หรือขดเป็นบันไดเวียนก็ได้ ลักษณะขั้นบันไดดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 บันไดแบบมีคานกลาง

รูปที่ 4.9(ก) เป็นรูปตัดตามยาวของขั้นบันได ปลายขั้นบันไดจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 5 cm และที่หน้าตัด (1)-(1) จะหนาประมาณ 12-15 cm แล้วแต่ความยาว 2L จะมากหรือน้อย หน้าตัดส่วนนี้อาจจะเป็นตามรูปที่ 4.9(ข) หรือ 4.9(ค) การคิดน้ำหนักขั้นบันไดให้ใช้ค่าเฉลี่ย เช่นลูกนอนกว้าง 0.25 เมตร ความหนาที่ปลาย 0.05 เมตร และที่โคนประมาณ 0.15 เมตร ดังนั้นความหนาเฉลี่ย $\frac{0.05+0.15}{2}=0.10$ เมตร ดังนั้นน้ำหนักขั้นบันได $w_D = 2400\times 0.25\times 0.10 = 60 \ \text{kg/m}$ สมมติให้ความกว้างบันได 2L = 2.00 เมตร

บันไดนี้เป็นอาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร $w_L = 400 \times 0.25 = 100 \ \text{kg/m}$ ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกรวม $w = w_D + w_L = 60 + 100 = 160 \ \text{kg/m}$ โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลาง

$$M = \frac{wL^2}{2} = \frac{160 \times 1.00^2}{2} = 80 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 8{,}000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

ถ้า $f_c' = 240 \ \text{ksc}, f_y = 2400 \ \text{ksc}$

$$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65 \ \text{ksc}$$
$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$
$$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 2400 = 1200 \ \text{ksc}$$
$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}200}{8.72 \times 65}} = 0.321$$
$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.321}{3} = 0.893$$
$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.321 \times 0.893 = 9.316 \ \text{ksc}$$

ความลึกประสิทธิผลเมื่อคิดเซนทรอยด์ของเหล็กห่างผิวขั้นบันได 3 cm ได้

$$d = t - 3 = 15 - 3 = 12 \ \text{cm}$$

โมเมนต์สมดุลของคานที่โคนขั้นบันไดติดขอบคาน

$$M_R = Rbd^2 = 9.316 \times 25 \times 12^2 = 33{,}537.6 \ \text{kg} \cdot \text{cm} >> M = 8{,}000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{8{,}000}{1{,}200 \times 0.893 \times 12} = 0.622 \ \text{cm}^2$$

ปริมาณเหล็กขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับ SR-24 คือ

$$A_{s,temp} = 0.0025bt = 0.0025 \times 25 \times 15 = 0.9375 \ \text{cm}^2$$

ใช้เหล็กเสริม 3-RB 9 mm มี $A_s = 3 \times \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 3 \times 0.636 = 1.908 \ \text{cm}^2 > 0.9375 \ \text{cm}^2$

โดยมีเหล็กลูกโซ่ RB 6 mm @ 200 mm ยึดไว้

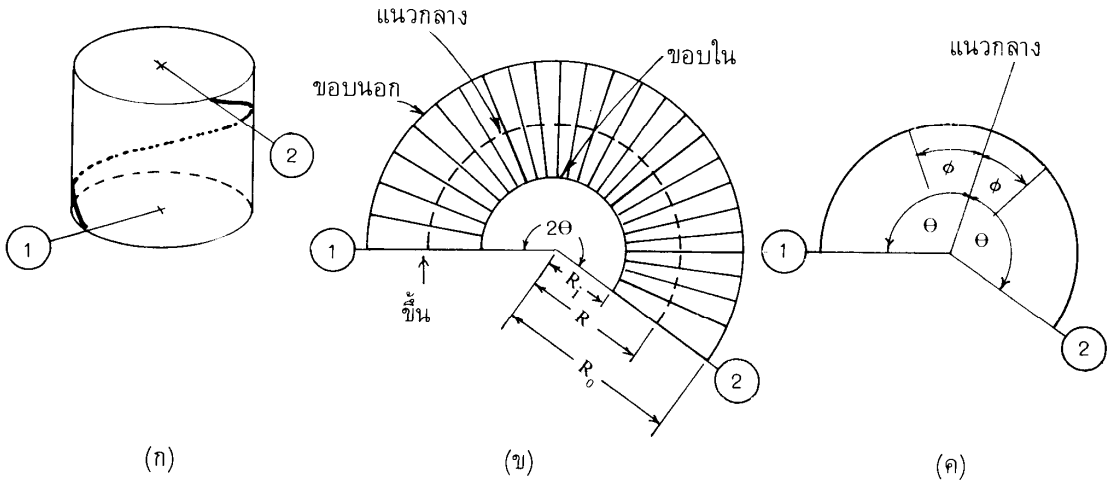
น้ำหนักที่ถ่ายลงคานคิดจากสองข้างหารด้วยลูกนอนคือ

$$w = \frac{2.00 \times 160}{0.25} = 1{,}280 \ \text{kg/m}$$

ถ่ายน้ำหนักลงคาน แล้วก็ออกแบบคานธรรมดา แต่ถ้าเป็นบันไดเวียนให้ออกแบบตามหัวข้อถัดไป

4.6 บันไดเวียน (Helical Stair)

บันไดเวียนอาจจะเป็นบันไดท้องเรียบดังรูปที่ 4.2(ฉ) หรือมีคานเวียนกลางแล้วมีขันบันไดเกาะอยู่ดังรูปที่ 4.2(จ) ข้อดีของบันไดแบบนี้คือความสวยงาม แต่ข้อเสียมีมากคือออกแบบและก่อสร้างยาก ใช้เหล็กเสริมปริมาณมาก ปลายของบันไดจะมีโมเมนต์ดัดถ่ายไปเป็นโมเมนต์บิดของคานรองรับ และโมเมนต์บิดจากบันไดถ่ายไปเป็นโมเมนต์ดัดของคานรองรับ



รูปที่ 4.10 บันไดเวียน

พิจารณารูปที่ 4.10(ก) ถ้ามีทรงกระบอกสวมตามแนวของเส้นกึ่งกลางของบันไดเวียนหรือแนวคานเวียน เส้น (1) หมายถึงแนวคานชั้นล่าง เส้น (2) หมายถึงแนวคานชั้นบน เมื่อขึ้นไปมองลงมาจากที่สูงจะเห็นดังรูปที่ 4.10(ข) เส้น (1) กับ (2) ทำมุม 2θ โดย $0 \le 2\theta \le 360^o$ หรือ $0 \le \theta \le 180^o$ หรือบันไดเวียนครบหนึ่งรอบ ในกรณีที่บันไดเวียนมี $2\theta > 360^o$ ให้ใช้คานยึดเป็นช่วงๆไม่ให้มุมเกินกว่าที่กำหนด เนื่องจากวิธีการคำนวณที่ใช้นั้นจำกัดช่วงมุมเอาไว้ หาก $2\theta > 360^o$ วิธีดังกล่าวจะใช้ไม่ได้ ในการพิจารณาออกแบบจะใช้มุมที่วัดจากแนวกึ่งกลางออกไปหาเส้น (1) และ (2) ในรูปที่ 4.10(ค) แสดงมุม ϕ วัดจากแนวกึ่งกลางของบันได

ย้อนไปที่รูปที่ 4.10(ข) รัศมีขอบใน R_i และรัศมีขอบนอก R_o ความกว้างของบันไดคือ $b_1 = R_o - R_i$ แนวกึ่งกลางบันไดมีรัศมี $R = \frac{R_i + R_o}{2}$ กฎหมายกำหนดให้ลูกนอนที่แคบที่สุดต้องไม่น้อยกว่า 10 cm หรือ 0.10 เมตร การแบ่งขั้นบันไดให้เริ่มจากความสูงระหว่างชั้นล่างกับชั้นบน เช่นความสูงระหว่างชั้นล่างกับชั้นบน 3.00 เมตร แนวคาน (1) กับ (2) ทำมุม $2\theta = 180^o$ หรือครึ่งวงกลม ลูกตั้งไม่เกิน 0.19 เมตร

จำนวนลูกตั้ง $= \frac{3.00}{0.19} = 15.8$ ขั้น ใช้ 20 ขั้น

ความสูงลูกตั้ง $= \frac{3.00}{20} = 0.15$ เมตร เป็นความสูงที่เดินสบายทุกวัย

จำนวนลูกนอนจะน้อยกว่าจำนวนลูกตั้ง 1 ขั้นเสมอ ดังนั้นจำนวนลูกนอนในกรณีนี้คือ 19 ขั้น โดยขอบในแต่ละลูกนอนต้องกว้าง 0.10 เมตรเป็นอย่างน้อย นั่นคือ

$$19 \times 0.10 = 2\theta R_i$$

แต่เนื่องจากมุม $2\theta = 180^o = \pi$ เรเดียน แทนค่าเพื่อหารัศมีขอบใน

$$19 \times 0.10 = \pi R_i$$

$$R_i = \frac{19 \times 0.10}{\pi} = 0.605 \text{ m}$$

เลือกใช้รัศมีขอบใน $R_i = 0.65$ m ถ้าความกว้างของบันได b = 1.50 เมตร ดังนั้นรัศมีขอบนอกบันไดคือ

$$R_o = R_i + b_1 = 0.65 + 1.50 = 2.15 \text{ m}$$

รัศมีแนวกึ่งกลางบันได

$$R = R_i + \frac{b_1}{2} = \frac{R_i + R_o}{2} = \frac{0.65 + 2.15}{2} = 1.40 \text{ m}$$

ทราบขนาดลูกตั้ง $h = 0.15$ m หาขนาดลูกนอนที่แนวกึ่งกลางบันได เพื่อใช้คำนวณน้ำหนักขั้นบันได แล้วนำไปรวมกับน้ำหนักของพื้นบันได จำนวนขั้นบันได $n = 20$ ขั้น

ลูกนอนที่ขอบใน $b_i = \frac{\theta \pi R_i}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 0.65}{90(20-1)} = 0.1075$ m

ลูกนอนที่กึ่งกลาง $b = \frac{\theta \pi R}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 1.40}{90(20-1)} = 0.2315$ m

ลูกนอนที่ขอบนอก $b_o = \frac{\theta \pi R_o}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 2.15}{90(20-1)} = 0.3555$ m

มุมเอียงของบันได β โดย $\tan\beta = \frac{0.15}{0.2315}$ โดย $\sin\beta = \frac{0.15}{\sqrt{0.15^2 + 0.2315^2}}$

$= 0.543777265$ และ $\cos\beta = \frac{0.2315}{\sqrt{0.15^2 + 0.2315^2}} = 0.839229578$

สมมติความหนาของพื้นบันได 0.20 เมตร

น้ำหนักขั้นบันได $= \dfrac{2400 \times \frac{1}{2} \times 0.2315 \times 0.15}{0.2315} \times 1.50 = 270 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักพื้นบันได $= \dfrac{2400 t b_1}{\cos\beta} = \dfrac{2400 \times 0.20 \times 1.50}{0.839229578} = 858 \ \text{kg/m}$

ให้เป็นอาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

น้ำหนักบรรทุกจร $= w_L b_1 = 400 \times 1.50 = 600 \ \text{kg/m}$

น้ำหนักบรรทุกรวม $w = 270 + 858 + 600 = 1{,}728 \ \text{kg/m}$

ดังนั้น

$$wR = 1{,}728 \times 1.40 = 2{,}419.2 \ \text{kg}$$

$$wR^2 = 1{,}728 \times 1.40^2 = 3{,}386.88 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

ค่าโมเมนต์ดัด โมเมนต์บิด และ แรงเฉือน ที่มีผลต่อการออกแบบคือ

(ก) โมเมนต์ดัด

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $M = wR^2(U\cos\phi - 1)$ (4.7)

ที่ $\phi = 0$ หรือแนวแบ่งกลาง $M_c = wR^2(U - 1)$ (4.8)

(ข) โมเมนต์บิด

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $M_t = wR^2\left(U\sin\phi - \dfrac{\pi\phi}{180}\right)$ (4.9)

ที่ $\phi = 0$ หรือแนวแบ่งกลาง $M_t = 0$ (4.10)

(ค) แรงเฉือนทางดิ่ง

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $V = \dfrac{\pi wR\phi}{180}$ (4.11)

เมื่อ ϕ = มุมจากเส้นแบ่งกลางมายังจุดที่พิจารณา, องศา

w = น้ำหนักต่อความยาวเส้นกลางบันได, kg/m

R = รัศมีกลางบันได, m

$$U = \frac{360(K+1)\sin\theta - 2\pi K\theta\cos\theta}{\pi\theta(K+1) - 180(K-1)\sin\theta\cos\theta}$$

θ = มุมแบ่งกลางระหว่างคานชั้นล่างกับคานชั้นบน, องศา

$K = \dfrac{EI}{GJ} \approx 2.35\dfrac{I}{J}$ = อัตราส่วนของสติฟเนสการดัดต่อสติฟเนสการบิด หาได้จากตาราง 4.1

b_1 = ความกว้างของบันไดหรือคานกลาง, m

t = ความหนาของบันไดหรือความลึกของคานกลาง, m

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง K กับ $\frac{b_1}{t}$ และ $\frac{t}{b_1}$ จะพบว่าช่วง $1.0 \le \frac{t}{b_1} \le 3.0$ และ $1.0 \le \frac{b_1}{t} \le 4.0$ การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งมีมาก แต่เมื่อ $\frac{b_1}{t} > 4.0$ เส้นกราฟเกือบเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะ interpolate หาค่าได้ง่าย และเมื่อ $\frac{t}{b_1} > 3.0$ เส้นกราฟมีความโค้งน้อย เมื่อทำการ interpolate จะได้ค่า K มากกว่าความจริงเล็กน้อย ขอให้พิจารณารูปที่ 4.11 ประกอบด้วย แต่ปัจจุบัน (พ.ศ.2555 ที่ทำการปรับปรุง) สามารถใช้ Excel หาสมการของเส้นโค้งได้โดยง่าย

ตารางที่ 4.1 ค่า K ตามค่า $\frac{b_1}{t}$ และ $\frac{t}{b_1}$

เมื่อ $b_1 > t$								เมื่อ $t > b_1$			
$\frac{b_1}{t}$	K	$\frac{b_1}{t}$	K	$\frac{b_1}{t}$	K	$\frac{b_1}{t}$	K	$\frac{b_1}{t}$	K	$\frac{b_1}{t}$	K
1.0	1.390	2.0	0.860	3.0	0.750	4.0	0.700	1.0	1.390	2.0	3.420
1.1	1.275	2.1	0.845	3.1	0.745	4.5	0.690	1.1	1.525	2.2	3.975
1.2	1.180	2.2	0.825	3.2	0.740	5.0	0.680	1.2	1.700	2.4	4.600
1.3	1.120	2.3	0.815	3.3	0.735	5.5	0.673	1.3	1.850	2.6	5.200
1.4	1.055	2.4	0.800	3.4	0.730	6.0	0.665	1.4	2.030	2.8	5.910
1.5	1.000	2.5	0.790	3.5	0.725	6.5	0.658	1.5	2.250	3.0	6.700
1.6	0.960	2.6	0.785	3.6	0.720	7.0	0.650	1.6	2.560	3.5	8.900
1.7	0.930	2.7	0.775	3.7	0.715	9.0	0.637	1.7	2.675	4.0	11.150
1.8	0.900	2.8	0.760	3.8	0.710	10.0	0.630	1.8	2.925	4.5	13.600
1.9	0.880	2.9	0.755	3.9	0.705	∞	0.59	1.9	3.175	5.0	16.850

เมื่อ $1.0 \le \frac{b_1}{t} \le 3.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 0.0783\left(\frac{b_1}{t}\right)^4 - 0.7693\left(\frac{b_1}{t}\right)^3 + 2.8686\left(\frac{b_1}{t}\right)^2 - 4.9211\left(\frac{b_1}{t}\right) + 4.1298 \qquad (4.12)$$

เมื่อ $3.0 \le \frac{b_1}{t} \le 10.0$ สมการสำหรับหาค่า K

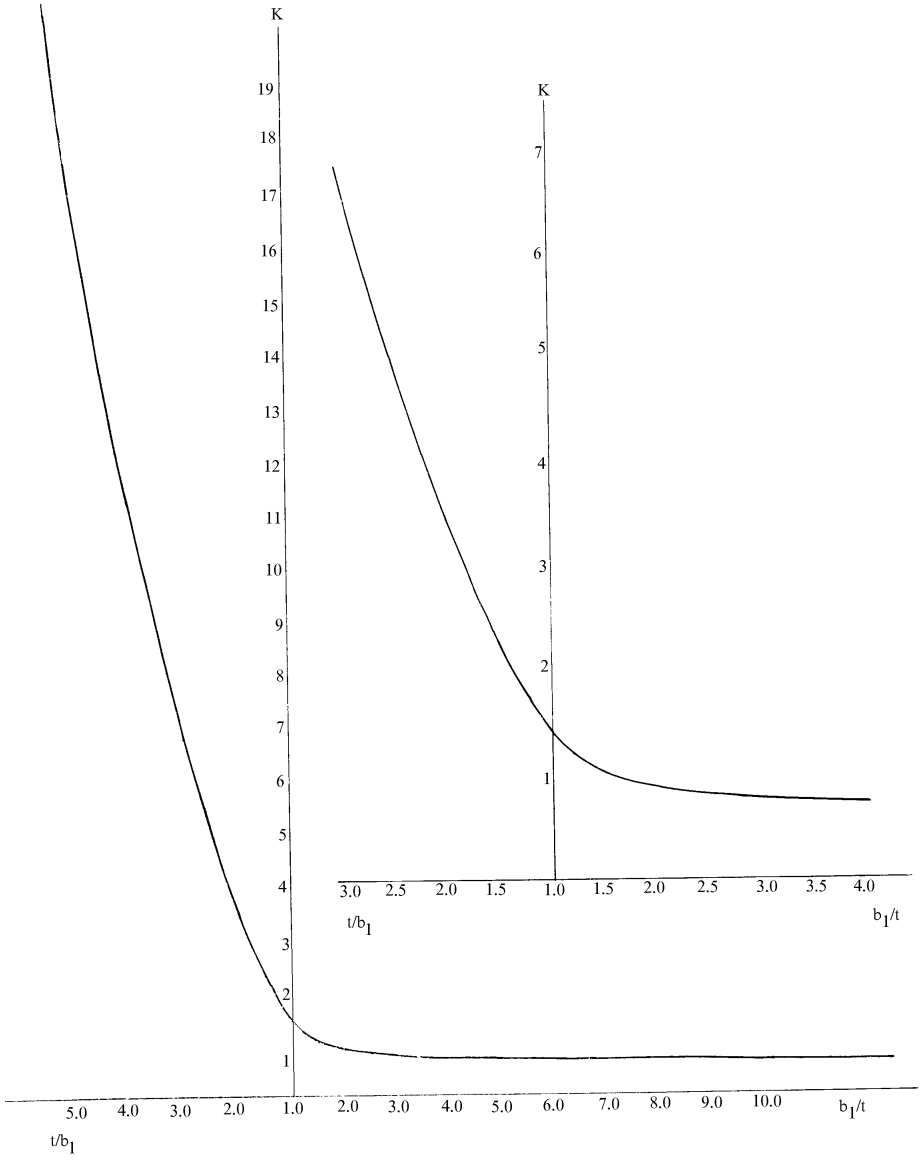
$$K = 0.0001\left(\frac{b_1}{t}\right)^4 - 0.0044\left(\frac{b_1}{t}\right)^3 + 0.0493\left(\frac{b_1}{t}\right)^2 - 0.2551\left(\frac{b_1}{t}\right) + 1.1796 \qquad (4.13)$$

เมื่อ $10.0 \le \frac{b_1}{t} \le 50.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 5.2732\left(\frac{b_1}{t}\right) - 2.7321 \tag{4.14}$$

เมื่อ $1.0 \le \frac{t}{b_1} \le 5.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 0.0139\left(\frac{t}{b_1}\right)^4 - 0.1597\left(\frac{t}{b_1}\right)^3 + 1.2257\left(\frac{t}{b_1}\right)^2 - 0.7262\left(\frac{t}{b_1}\right) + 1.0398 \tag{4.15}$$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ $\frac{b_1}{t}$ และ $\frac{t}{b_1}$

คำนวณหาค่า U สำหรับค่า K ในตารางที่ 4.1 ดังตารางที่ 4.2

$$U = \frac{360(K+1)\sin\theta - 2\pi K\theta\cos\theta}{\pi\theta(K+1) - 180(K-1)\sin\theta\cos\theta} \tag{4.16}$$

ตารางที่ 4.2 ค่า U สัมพันธ์กับ K และ θ

K	θ, องศา						
	0^o	30^o	60^o	90^o	120^o	150^o	180^o
0.590	1.000	1.044	1.159	1.273	1.266	1.070	0.742
0.630	1.000	1.044	1.159	1.273	1.273	1.092	0.773
0.637	1.000	1.044	1.159	1.273	1.275	1.096	0.778
0.650	1.000	1.044	1.158	1.273	1.277	1.103	0.788
0.658	1.000	1.044	1.158	1.273	1.278	1.107	0.794
0.665	1.000	1.044	1.158	1.273	1.280	1.111	0.799
0.673	1.000	1.044	1.158	1.273	1.281	1.115	0.805
0.680	1.000	1.044	1.158	1.273	1.282	1.118	0.810
0.690	1.000	1.044	1.158	1.273	1.284	1.123	0.817
0.700	1.000	1.044	1.158	1.273	1.286	1.128	0.824
0.705	1.000	1.044	1.158	1.273	1.287	1.131	0.827
0.710	1.000	1.044	1.158	1.273	1.287	1.133	0.830
0.715	1.000	1.044	1.158	1.273	1.288	1.135	0.834
0.720	1.000	1.044	1.157	1.273	1.289	1.138	0.837
0.725	1.000	1.044	1.157	1.273	1.290	1.140	0.841
0.730	1.000	1.044	1.157	1.273	1.291	1.142	0.844
0.735	1.000	1.044	1.157	1.273	1.291	1.145	0.847
0.740	1.000	1.044	1.157	1.273	1.292	1.147	0.851
0.745	1.000	1.044	1.157	1.273	1.293	1.149	0.854
0.750	1.000	1.044	1.157	1.273	1.294	1.151	0.857
0.755	1.000	1.044	1.157	1.273	1.295	1.154	0.860
0.760	1.000	1.044	1.157	1.273	1.295	1.156	0.864
0.775	1.000	1.044	1.157	1.273	1.298	1.163	0.873
0.785	1.000	1.044	1.157	1.273	1.299	1.167	0.880
0.790	1.000	1.044	1.157	1.273	1.300	1.169	0.883

ตารางที่ 4.2 ค่า U สัมพันธ์กับ K และ θ

K	θ, องศา						
	0^o	30^o	60^o	90^o	120^o	150^o	180^o
0.800	1.000	1.044	1.156	1.273	1.301	1.173	0.889
0.815	1.000	1.044	1.156	1.273	1.303	1.180	0.898
0.825	1.000	1.044	1.156	1.273	1.305	1.184	0.904
0.845	1.000	1.044	1.156	1.273	1.308	1.192	0.916
0.860	1.000	1.044	1.156	1.273	1.310	1.198	0.925
0.880	1.000	1.044	1.155	1.273	1.312	1.205	0.936
0.900	1.000	1.044	1.155	1.273	1.315	1.213	0.947
0.930	1.000	1.044	1.155	1.273	1.319	1.224	0.964
0.960	1.000	1.044	1.154	1.273	1.322	1.234	0.980
1.000	1.000	1.044	1.154	1.273	1.327	1.248	1.000
1.055	1.000	1.044	1.153	1.273	1.333	1.266	1.027
1.120	1.000	1.044	1.153	1.273	1.340	1.285	1.057
1.180	1.000	1.044	1.152	1.273	1.345	1.302	1.083
1.275	1.000	1.043	1.151	1.273	1.354	1.326	1.121
1.390	1.000	1.043	1.150	1.273	1.363	1.353	1.163
1.525	1.000	1.043	1.149	1.273	1.372	1.381	1.208
1.700	1.000	1.043	1.147	1.273	1.383	1.412	1.259
1.850	1.000	1.043	1.146	1.273	1.390	1.435	1.298
2.030	1.000	1.043	1.145	1.273	1.399	1.460	1.340
2.250	1.000	1.042	1.144	1.273	1.407	1.487	1.385
2.560	1.000	1.042	1.142	1.273	1.418	1.518	1.438
2.675	1.000	1.042	1.141	1.273	1.421	1.528	1.456
2.925	1.000	1.042	1.140	1.273	1.427	1.547	1.490
3.175	1.000	1.041	1.139	1.273	1.433	1.564	1.521
3.420	1.000	1.041	1.138	1.273	1.438	1.579	1.548
3.975	1.000	1.041	1.136	1.273	1.447	1.607	1.598
4.600	1.000	1.040	1.134	1.273	1.455	1.631	1.643
5.200	1.000	1.040	1.133	1.273	1.461	1.650	1.677

ตารางที่ 4.2 ค่า U สัมพันธ์กับ K และ θ

K	θ, องศา						
	0^o	30^o	60^o	90^o	120^o	150^o	180^o
5.910	1.000	1.039	1.131	1.273	1.467	1.667	1.711
6.700	1.000	1.039	1.130	1.273	1.472	1.683	1.740
8.900	1.000	1.037	1.127	1.273	1.482	1.713	1.798
11.150	1.000	1.036	1.125	1.273	1.488	1.732	1.835
13.600	1.000	1.035	1.123	1.273	1.492	1.746	1.863
16.850	1.000	1.035	1.122	1.273	1.496	1.759	1.888

สมการการออกแบบที่ใช้นี้ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดทั้งสองปลายมากกว่าค่าจริง แต่ก็ง่ายและทำให้ปลอดภัยมากขึ้น

ลำดับขั้นตอนการออกแบบบันไดเวียน

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c^{'}$ = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริมเอก, ksc

f_{sy} = กำลังครากของเหล็กรับแรงเฉือน,ksc

$f_c = 0.375f_c^{'} \le 65$ ksc = กำลังดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต, ksc

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}200$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SR-24

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SD-30

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็ก SD-40

$n = \dfrac{E_s}{E_c} = \dfrac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นเหล็กต่อคอนกรีต

$k = \dfrac{1}{1+\dfrac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \dfrac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$R = \dfrac{1}{2}f_c kj$ = พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล, ksc

$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c^{'}}$ = หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้, ksc

$v_{cbm} = 0.795\sqrt{f_c^{'}}$ = หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่แบ่งช่วงระยะเรียงของเหล็กรับแรงเฉือน,ksc

$v_{ct} = 1.32\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้จากโมเมนต์บิด หรือหน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้หากไม่มีโมเมนต์บิด, ksc

$v_{ct} = 1.65\sqrt{f_c'}$ = หน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้เมื่อรวมผลโมเมนต์บิด, ksc

H = ความสูงระหว่างชั้น, m

b_1 = ความกว้างของบันได

2θ = มุมระหว่างคานปลายบันไดเวียน, องศา

ขั้นตอนที่ 2

หาจำนวนลูกตั้ง n โดยความสูงลูกตั้งไม่เกิน 0.20 เมตร สำหรับอาคารพักอาศัย ไม่เกิน 0.19 เมตร สำหรับอาคารสาธารณะ แต่ความสูงลูกตั้งที่เดินสบายควรจะเป็น 0.175 เมตร และอาคารโรงเรียนอนุบาล และบ้านพักคนชราลูกตั้งไม่ควรเกิน 0.15 เมตร ในกรณีที่จะใช้ค่ากลางๆ คือ 0.18 เมตร

จำนวนลูกตั้ง $n = \frac{H}{0.18}$ โดยปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม

ความสูงลูกตั้ง $h = \frac{H}{n}$ หน่วยเมตร แปลงเป็นเซนติเมตรโดยคูณด้วย 100

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหารัศมีขอบใน โดยให้ลูกนอนในขอบในไม่น้อยกว่า 10 cm

$$0.1(n-1) = \frac{2\pi\theta R_i}{180}$$

รัศมีขอบใน $R_i \geq \frac{9(n-1)}{\pi\theta}$ หน่วยเมตร

รัศมีกลางบันได $R = R_i + \frac{b_1}{2}$ หน่วย เมตร

รัศมีขอบนอก $R_o = R + b_1$ หน่วย เมตร

ลูกนอนที่ขอบใน $b_i = \frac{\theta\pi R_i}{90(n-1)}$ หน่วย เมตร

ลูกนอนที่กลางพื้น $b = \frac{\theta\pi R}{90(n-1)}$ หน่วย เมตร

ลูกนอนที่ขอบนอก $b_o = \frac{\theta\pi R_o}{90(n-1)}$ หน่วยเมตร

มุมเอียงของบันได β โดย

$$\tan\beta = \frac{h}{b}$$

$$\sin\beta = \frac{h}{\sqrt{b^2 + h^2}}$$

$$\cos\beta = \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}}$$

ขั้นตอนที่ 4 สมมติความหนาของพื้นบันได t ในหน่วยเมตร

น้ำหนักขั้นบันได $w_{step} = \dfrac{2400 \times \frac{1}{2} bhb_1}{b} = 1200hb_1$ หน่วย kg/m

น้ำหนักพื้นบันได $w_{slab} = \dfrac{2400tb_1}{\cos\beta}$ หน่วย kg/m

น้ำหนักบรรทุกจร $w_{live} = w_L b_1$ หน่วย kg/m

น้ำหนักบรรทุกรวม $w = w_{step} + w_{slab} + w_{live}$ หน่วย kg/m

เตรียมค่า

wR

wR^2

เมื่อ $b_1 > t$ ซึ่งเป็นบันไดท้องเรียบไม่มีคานกลาง เตรียมค่า $\dfrac{b_1}{t}$ แต่ถ้ามีคานกลาง ความลึกตาน t จะมากกว่าความกว้างคาน b_1 กรณีนี้ให้เตรียมค่า $\dfrac{t}{b_1}$

เมื่อ $1.0 \le \dfrac{b_1}{t} \le 3.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 0.0783\left(\frac{b_1}{t}\right)^4 - 0.7693\left(\frac{b_1}{t}\right)^3 + 2.8686\left(\frac{b_1}{t}\right)^2 - 4.9211\left(\frac{b_1}{t}\right) + 4.1298 \qquad (4.12)$$

เมื่อ $3.0 \le \dfrac{b_1}{t} \le 10.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 0.0001\left(\frac{b_1}{t}\right)^4 - 0.0044\left(\frac{b_1}{t}\right)^3 + 0.0493\left(\frac{b_1}{t}\right)^2 - 0.2551\left(\frac{b_1}{t}\right) + 1.1796 \qquad (4.13)$$

เมื่อ $10.0 \le \dfrac{b_1}{t} \le 50.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 5.2732\left(\frac{b_1}{t}\right) - 2.7321 \qquad (4.14)$$

เมื่อ $1.0 \le \dfrac{t}{b_1} \le 5.0$ สมการสำหรับหาค่า K

$$K = 0.0139\left(\frac{t}{b_1}\right)^4 - 0.1597\left(\frac{t}{b_1}\right)^3 + 1.2257\left(\frac{t}{b_1}\right)^2 - 0.7262\left(\frac{t}{b_1}\right) + 1.0398 \qquad (4.15)$$

คำนวณหาค่า U จาก

$$U = \frac{360(K+1)\sin\theta - 2\pi K\theta\cos\theta}{\pi\theta(K+1) - 180(K-1)\sin\theta\cos\theta} \qquad (4.16)$$

ขั้นตอนที่ 5

ให้ระยะหุ้มของคอนกรีต 2 cm ขนาดเหล็กรับแรงเฉือน RB 9 mm ประมาณขนาดเหล็กเสริมเอกไม่เกิน DB 20 mm ดังนั้นความลึกประสิทธิผลของแผ่นพื้นบันได

$$d = t - 2 - 0.9 - \frac{2.0}{2} = t - 3.9 \quad cm$$

โดยความหนา t เป็น cm และให้ b_1 มีหน่วยเป็น cm ด้วย จะได้โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rb_1d^2 \qquad kg \cdot cm$$

คำนวณโมเมนต์ดัด แรงเฉือน โมเมนต์บิด จากสมการ (4.7) ถึง (4.11)

(ก) โมเมนต์ดัด

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $\quad M = wR^2(U\cos\phi - 1)$ (4.7)

ที่ $\phi = 0$ หรือแนวแบ่งกลาง $\quad M_c = wR^2(U-1)$ (4.8)

(ข) โมเมนต์บิด

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $\quad M_t = wR^2\left(U\sin\phi - \frac{\pi\phi}{180}\right)$ (4.9)

ที่ $\phi = 0$ หรือแนวแบ่งกลาง $\quad M_t = 0$ (4.10)

(ค) แรงเฉือนทางดิ่ง

ที่มุม ϕ จากแนวแบ่งกลาง $\quad V = \frac{\pi wR\phi}{180}$ (4.11)

ค่าต่างๆ จะติดในรูปมุม ϕ และมุม ϕ มากที่สุดเท่ากับ θ

ให้ตรวจสอบว่า $M_R \geq 3M_c$ โดยระวังเรื่องหน่วยให้มาก หากพบว่า $M_R < 3M_c$ แสดงว่าความหนา t น้อยเกินไป ให้ประมาณค่า t ใหม่โดย

$$d = \sqrt{\frac{3M_c}{Rb_1}}$$

$$t = d + 3.9$$

ขั้นตอนที่ 6

ที่ $\phi = \theta$ หาค่า $M_\theta, M_{t\theta}, V_\theta$ คำนวณปริมาณเหล็กเสริมเนื่องจากโมเมนต์ดัด

ที่ $\phi = 0$ กึ่งกลางบันได โมเมนต์ดัดบวก M_c ทำให้ต้องการเหล็กเสริมล่าง

$$A_s = \frac{M_c}{f_s jd}$$ เสริมตลอดความยาวบันได

ที่ $\phi = \theta$ ปลายบันได โมเมนต์ดัดลบ M_θ ทำให้ต้องการเหล็กเสริมบน

$$A_s^- = \frac{M_\theta}{f_s jd}$$ เสริมเลยจุดดัดกลับไป b_1 แล้วลดลงเหลือครึ่งเดียวตลอดกลาง

จุดดัดกลับอยู่ที่ $\phi_d = \cos^{-1}\left(\frac{1}{U}\right)$ หาก $\phi_d > \theta$ ให้เสริมเต็มความยาว

ขั้นตอนที่ 7

ตรงตำแหน่ง $\phi_d = \cos^{-1}\left(\frac{1}{U}\right)$ อาจจะทำให้เกิดโมเมนต์บิดสูงสุด

$$M_{t\phi_d} = wR^2\left(U\sin\phi_d - \frac{\pi\phi_d}{180}\right)$$

โมเมนต์บิดที่ปลายพื้นบันได

$$M_{t\theta} = wR^2\left(U\sin\theta - \frac{\pi\theta}{180}\right)$$

เลือกค่า ϕ ที่ทำให้เกิดโมเมนต์บิดสูงสุด $M_{t\,max}$ แล้วคำนวณแรงเฉือนในตำแหน่งเดียวกัน

$$V = \frac{\pi wR\phi}{180}$$

หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด

$$v_t = \frac{3.5M_{t\,max}}{b_1t^2}$$

ถ้าพบว่า $v_t > v_{ct} = 1.32\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าความหนา t น้อยเกินไป ให้เพิ่มค่า t มากขึ้นแล้วย้อนไปทำมาใหม่

หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงเฉือน

$$v_v = \frac{V}{b_1d}$$

โดยปกติแล้วหากความหนา t เพียงพอนั้นจะได้ $v_v < 0.29\sqrt{f_c'}$ ถ้าพบว่า $v_v > 0.29\sqrt{f_c'}$ ให้เพิ่มค่า t แล้วย้อนกลับไปทำมาใหม่

หน่วยแรงเฉือนรวม

$$v = v_t + v_v$$

ถ้าพบว่า $v > 1.65\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าความหนา t น้อยเกินไป ให้เพิ่มค่า t มากขึ้นแล้วย้อนไปทำมาใหม่

เลือกขนาดเหล็กทางขวาง เช่น RB 9 mm มี $A_t = \frac{\pi}{4}\times 0.9^2 = 0.636$ cm^2 และ $f_v = 0.5f_{sy} = 1200$ ksc

ระยะเรียงของทางขวางคือ

$$s \le \frac{2A_tA_cf_v}{M_t}$$

ขั้นตอนที่ 8

ค่าเฉลี่ยภายในเหล็กรับแรงเฉือน

$$z = \frac{(b_1 - 2\times 3.9) + (t - 2\times 3.9)}{2} = \frac{b_1 + t - 4\times 3.9}{2}$$

เนื้อที่แกนคอนกรีตภายในวงเหล็กรับแรงเฉือน

$$A_c = (b_1 - 2\times 3.9)(t - 2\times 3.9)$$

หาเหล็กเสริมมุมเพื่อนำไปรวมกับเหล็กบนและเหล็กล่าง

$$A_{scor} = \frac{M_t z}{2A_c f_s}$$

เหล็กบนและล่างต่างมีคนละสองมุม ดังนั้นต้องรวมเหล็กบนเหล็กล่างด้วย $2A_{scor}$

ขั้นตอนที่ 9 เขียนรายละเอียด โดยยึดแนวกลางบันไดยืดออกเป็นสองมิติ และแสดงรูปตัดขวางอย่างน้อยสองตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมบนต่างกัน ส่วนเหล็กยึดขั้นบันไดหากจะเสริมก็มีเหล็กเสริมมุมตรงจมูกบันได 1-RB 9 mm และเหล็กยึดตามขอบขั้นบันได RB 6 mm @ 200 mm

ในงานจริงจะมีแบบสถาปัตยกรรมที่ทำให้ทราบ R, θ, b_1, n จึงเริ่มจากการสมมติความหนาพื้นบันได อย่างไรก็ตามควรจะตรวจสอบลูกนอนขอบในไม่น้อยกว่า 0.10 เมตรด้วย

กรณีคานเวียนกลางบันได ตัวขั้นบันไดอาจจะเป็นขั้นแยกเป็นขั้นๆ ยื่นจากตัวคานกลาง หรือเป็นแบบพับผ้า หรือเป็นแบบท้องเรียบ คำนวณออกแบบขั้นบันไดแล้วถ่ายน้ำหนักลงคานกลาง คำนวณออกแบบคานกลางที่ต้องรับทั้งโมเมนต์ดัด แรงเฉือน โมเมนต์บิด โดยอาศัยค่า K และ U ในกรณีที่ $t > b_1$ ส่วนการออกแบบเหมือนคานที่ต้องรับโมเมนต์บิดด้วยนั่นเอง

ตัวอย่างที่ 4.4 จงออกแบบบันไดเวียนกว้าง 1.25 เมตร สำหรับบ้านพักอาศัย มุมระหว่างคานล่างและคานบนปลายบันได 180 องศา ความสูงระหว่างชั้นล่างกับชั้นบน 3.50 เมตร

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c' = 240$ ksc = กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานอายุ 28 วัน

$f_y = 3{,}000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริมเอก SD-30

$f_{sy} = 2{,}400$ ksc = กำลังครากของเหล็กรับแรงเฉือน

$f_c = 0.375f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมเอก

$f_v = 0.5f_{sy} = 0.5 \times 2{,}400 = 1{,}200$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กรับแรงเฉือน

$$n = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72 = \text{อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274 = \text{พารามิเตอร์แกนสะเทิน}$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909 = \text{พารามิเตอร์แขนโมเมนต์}$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc} = \text{ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล}$$

$$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{240} = 4.493 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้}$$

$$v_{cbm} = 0.795\sqrt{f_c'} = 0.795\sqrt{240} = 12.316 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนแบ่งระยะเรียง}$$

$$v_{ct} = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้จากโมเมนต์บิด}$$

$$v_{ct} = 1.65\sqrt{f_c'} = 1.65\sqrt{240} = 25.562 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้}$$

$$H = 3.50 \text{ m} = 350 \text{ cm} = \text{ ความสูงระหว่างชั้น}$$

$$b_1 = 1.25 \text{ m} = 125 \text{ cm} = \text{ ความกว้างบันได}$$

$$2\theta = 180^o = \text{ มุมระหว่างปลายบันไดทั้งสองปลาย}$$

$$\theta = \frac{180}{2} = 90^o = \text{ มุมจากแนวกึ่งกลางถึงปลายบันได}$$

ขั้นตอนที่ 2 อาคารพักอาศัย กฎหมายกำหนดให้ลูกตั้งไม่เกิน 20 cm แต่ลูกตั้งที่เดินสบายที่สุดสำหรับผู้ใหญ่ทั่วไปคือ 0.175 เมตร หาจำนวนลูกตั้ง n

$$n = \frac{H}{0.175} = \frac{3.50}{0.175} = 20 \text{ ขั้น}$$

ความสูงลูกตั้ง

$$h = \frac{H}{n} = \frac{3.50}{20} = 0.175 \text{ m} = 17.5 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณรัศมีและขนาดลูกนอน

รัศมีขอบใน

$$R_i \geq \frac{9(n-1)}{\pi\theta} = \frac{9(20-1)}{90\pi} = 0.605 \text{ m} \Rightarrow 1.00 \text{ m}$$

เลือกรัศมีขอบใน 1.00 เมตร รัศมีกลางบันได

$$R = R_i + \frac{b_1}{2} = 1.00 + \frac{1.25}{2} = 1.625 \text{ m}$$

รัศมีขอบนอก

$$R_o = R_i + b_1 = 1.00 + 1.25 = 2.25 \text{ m}$$

ลูกนอนที่ขอบใน

$$b_i = \frac{\theta\pi R_i}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 1.00}{90(20-1)} = 0.1653 \text{ m} > 0.10 \text{ m}$$

ลูกนอนที่กลางพื้น

$$b = \frac{\theta\pi R}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 1.625}{90(20-1)} = 0.2687 \text{ m} > 0.22 \text{ m}$$

ตามกฎหมายลูกนอนต้องไม่น้อยกว่า 0.22 เมตรในอาคารพักอาศัย และไม่น้อยกว่า 0.24 เมตรในอาคารสาธารณะ ดังนั้นลูกนอนที่กลางพื้นบันไดใช้ได้ดี

ลูกนอนที่ขอบนอก

$$b_o = \frac{\theta \pi R_o}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 2.25}{90(20-1)} = 0.37203 \ \text{m}$$

มุมเอียงของบันได

$$\tan\beta = \frac{h}{b} = \frac{0.175}{0.2687} = 0.651283959$$

$$\beta = \tan^{-1} 0.651283959 = 33.07555284^o$$

$$\sin\beta = 0.54574447$$

$$\cos\beta = 0.837951653$$

ขั้นตอนที่ 4 สมมติความหนาของแผ่นพื้น $t = 0.25 \ \text{m} = 25 \ \text{cm}$

น้ำหนักขั้นบันได

$$w_{step} = 1200hb_1 = 1200 \times 0.175 \times 1.25 = 262.5 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักพื้นบันได

$$w_{slab} = \frac{2400tb_1}{\cos\beta} = \frac{2400 \times 0.25 \times 1.25}{0.837951653} = 895 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกจรอาคารพักอาศัย $w_L = 300 \ \text{kg/m}^2$ คิดตามยาวแนวกลางบันได

$$w_{live} = w_L b_1 = 300 \times 1.25 = 375 \ \text{kg/m}$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = w_{step} + w_{slab} + w_{live} = 262.5 + 895 + 375 = 1{,}532.5 \ \text{kg/m}$$

เตรียมค่า

$$wR = 1{,}532.5 \times 1.625 = 2{,}490.3125 \ \text{kg}$$

$$wR^2 = 1{,}532.5 \times 1.625^2 = 4{,}046.757813 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

เนื่องจาก $(b_1 = 1.25 \ \text{m}) > (t = 0.20 \ \text{m})$ ดังนั้น

$$\frac{b_1}{t} = \frac{1.25}{0.25} = 5 > 3$$

$$K = 0.0001\left(\frac{b_1}{t}\right)^4 - 0.0044\left(\frac{b_1}{t}\right)^3 + 0.0493\left(\frac{b_1}{t}\right)^2 - 0.2551\left(\frac{b_1}{t}\right) + 1.1796$$

$$K = 0.0001 \times 5^4 - 0.0044 \times 5^3 + 0.0493 \times 5^2 - 0.2551 \times 5 + 1.1796$$

$$K = 0.6491$$

คำนวณค่า U

$$U = \frac{360(K+1)\sin\theta - 2\pi K\theta\cos\theta}{\pi\theta(K+1) - 180(K-1)\sin\theta\cos\theta}$$

$$U = \frac{360(0.6491+1)\sin 90^o - 2\pi(0.6491)(90)\cos 90^o}{\pi(90)(0.6491+1) - 180(0.6491-1)\sin 90^o \cos 90^o}$$

$$U = 1.27324$$

ขั้นตอนที่ 5 ความลึกประสิทธิผล

$$d = t - 3.9 = 25 - 3.9 = 21.1 \text{ cm}$$

โมเมนต์สมดุล

$$M_R = Rb_1d^2 = 8.095 \times 125 \times 21.1^2 = 450{,}496.8688 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

โมเมนต์ดัดที่มุม ϕ จากกึ่งกลางพื้นบันได โดย $0 \le \phi \le 135^o$

$$M = wR^2(U\cos\phi - 1) = 4{,}046.757813(1.27324\cos\phi - 1)$$

โมเมนต์บิดที่มุม ϕ จากกึ่งกลางพื้นบันได โดย $0 \le \phi \le 135^o$

$$M_t = wR^2\left(U\sin\phi - \frac{\pi\phi}{180}\right) = 4{,}046.757813\left(1.27324\sin\phi - \frac{\pi\phi}{180}\right)$$

แรงเฉือนที่มุม ϕ จากกึ่งกลางพื้นบันได โดย $0 \le \phi \le 135^o$

$$V = \frac{\pi wR\phi}{180} = \frac{2{,}490.3125\pi\phi}{180}$$

คำนวณค่าของ M, M_t, V จาก $\phi = 0$ ถึง $\phi = 90^o$ โดยเพิ่มคราวละ 5^o ดังนี้

ϕ^o	$M, \text{kg} \cdot \text{m}$	$M_t, \text{kg} \cdot \text{m}$	V, kg
0	1,105.74	0	0
5	1,086.13	95.92	217.32
10	1,027.46	188.43	434.64
15	930.17	274.12	651.96
20	795.00	349.67	869.28
25	622.99	411.81	1,086.60
30	415.43	457.37	1,303.92
35	173.92	483.33	1,521.25
40	-99.72	486.79	1,738.57
45	-403.39	465.05	1,955.89
50	-734.80	415.58	2,173.21
55	-1,091.41	336.07	2,390.53
60	-1,470.51	224.44	2,607.85
65	-1,869.22	78.84	2,825.17

ϕ^o	$M, kg \cdot m$	$M_t, kg \cdot m$	V, kg
70	-2,284.50	-102.29	3,042.49
75	-2,713.19	-320.27	3,259.81
80	-3,152.04	-576.12	3,477.13
85	-3,597.69	-870.60	3,694.45
90	-4,046.76	-1,204.14	3,911.77

โมเมนต์ดัดสูงสุดอยู่ที่ปลายบันได $M = 4{,}046.76 \ kg \cdot m = 404{,}676 \ kg \cdot cm < M_R$

ขั้นตอนที่ 6

ที่กึ่งกลางบันไดโมเมนต์บวกต้องการเหล็กรับแรงดึงเป็นเหล็กล่าง

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{110{,}574}{1{,}500 \times 0.909 \times 21.1} = 3.843 \ cm^2$$

ปริมาณเหล็กขั้นต่ำ

$$A_{stemp} = \frac{14}{f_y} b_1 d = \frac{14}{3000} \times 125 \times 21.1 = 12.308 \ cm^2$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \ cm^2$ ใช้เหล็กจำนวน $\frac{12.308}{2.01} = 6.12 \Rightarrow 7$ เส้น

ที่ปลายบันไดเป็นโมเมนต์ลบต้องการเหล็กรับแรงดึงเป็นเหล็กบน

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{404{,}676}{1{,}500 \times 0.909 \times 21.1} = 14.066 \ cm^2 > A_{stemp}$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \ cm^2$ ใช้เหล็กจำนวน $\frac{14.066}{2.01} = 6.998 \Rightarrow 7$ เส้น

ขั้นตอนที่ 7

โมเมนต์บิดสูงสุด $M_t = 120{,}414 \ kg \cdot cm$

หน่วยแรงเฉือนสูงสุดจากโมเมนต์บิด

$$v_t = \frac{3.5 M_t}{b_1 t^2} = \frac{3.5 \times 120{,}414}{125 \times 25^2} = 5.395 \ ksc < 1.32\sqrt{f_c'} = 20.449 \ ksc$$

แรงเฉือนสูงสุด $V = 3{,}911.77 \ kg$

หน่วยแรงเฉือนสูงสุดจากแรงเฉือน

$$v_v = \frac{V}{b_1 d} = \frac{3{,}911.77}{125 \times 21.1} = 1.483 \ ksc < 0.29\sqrt{f_c'} = 4.493 \ ksc$$

หน่วยแรงเฉือนรวม

$$v = v_v + v_t = 1.483 + 5.395 = 6.878 \ ksc < 1.65\sqrt{f_c'} = 25.562 \ ksc$$

เลือกเหล็กลูกตั้ง RB 9 mm มี $A_t = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \ \text{cm}^2$

ขั้นตอนที่ 8

$$z = \frac{b_1 + t - 4 \times 3.9}{2} = \frac{125 + 25 - 4 \times 3.9}{2} = 67.2 \ \text{cm}$$

เนื้อที่แกนคอนกรีตภายในวงเหล็กรับแรงเฉือน

$$A_c = (b_1 - 2 \times 3.9)(t - 2 \times 3.9) = (125 - 7.8)(25 - 7.8) = 2{,}015.84 \ \text{cm}^2$$

ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s \le \frac{2A_t A_c f_v}{M_t} = \frac{2 \times 0.636 \times 2{,}015.84 \times 1{,}200}{120{,}414} = 25.55 \ \text{cm} \Rightarrow 25 \ \text{cm}$$

หาเหล็กเสริมมุมไปรวมกับเหล็กรับโมเมนต์ดัด

$$A_{scor} = \frac{M_t z}{2A_c f_s} = \frac{120{,}414 \times 67.2}{2 \times 2{,}015.84 \times 1{,}500} = 1.34 \ \text{cm}^2$$

เหล็กล่างต้องการ

$$A_s = 3.843 + 2 \times 1.34 = 6.523 \ \text{cm}^2 < A_{stemp} = 12.308 \ \text{cm}^2$$

ดังนั้นเหล็กล่างยังคงใช้ 7-DB 16 mm

เหล็กบนต้องการ

$$A_s = 14.066 + 2 \times 1.34 = 16.746 \ \text{cm}^2 > A_{stemp} = 12.308 \ \text{cm}^2$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm จำนวน $\frac{16.746}{2.01} = 8.33 \Rightarrow 9$ เส้น

เพื่อความสะดวกและการเทคอนกรีตไม่เกิดโพรงได้ง่ายจึงใช้ 9-DB 16 mm ทั้งเหล็กบนและเหล็กล่าง

ขั้นตอนที่ 9 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กดังรูปในหน้าถัดไป

ตัวอย่างที่ 4.5 จงออกแบบบันไดเวียนกว้าง 1.50 เมตร สำหรับอาคารสาธารณะ มุมระหว่างปลายบันไดชั้นล่างกับชั้นบน 180 องศา ความสูงระหว่างชั้นล่างกับชั้นบน 4.20 เมตร ให้บันไดเป็นแบบพับผ้ามีคานกลาง

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$f_c' = 240 \ \text{ksc} =$ กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานอายุ 28 วัน

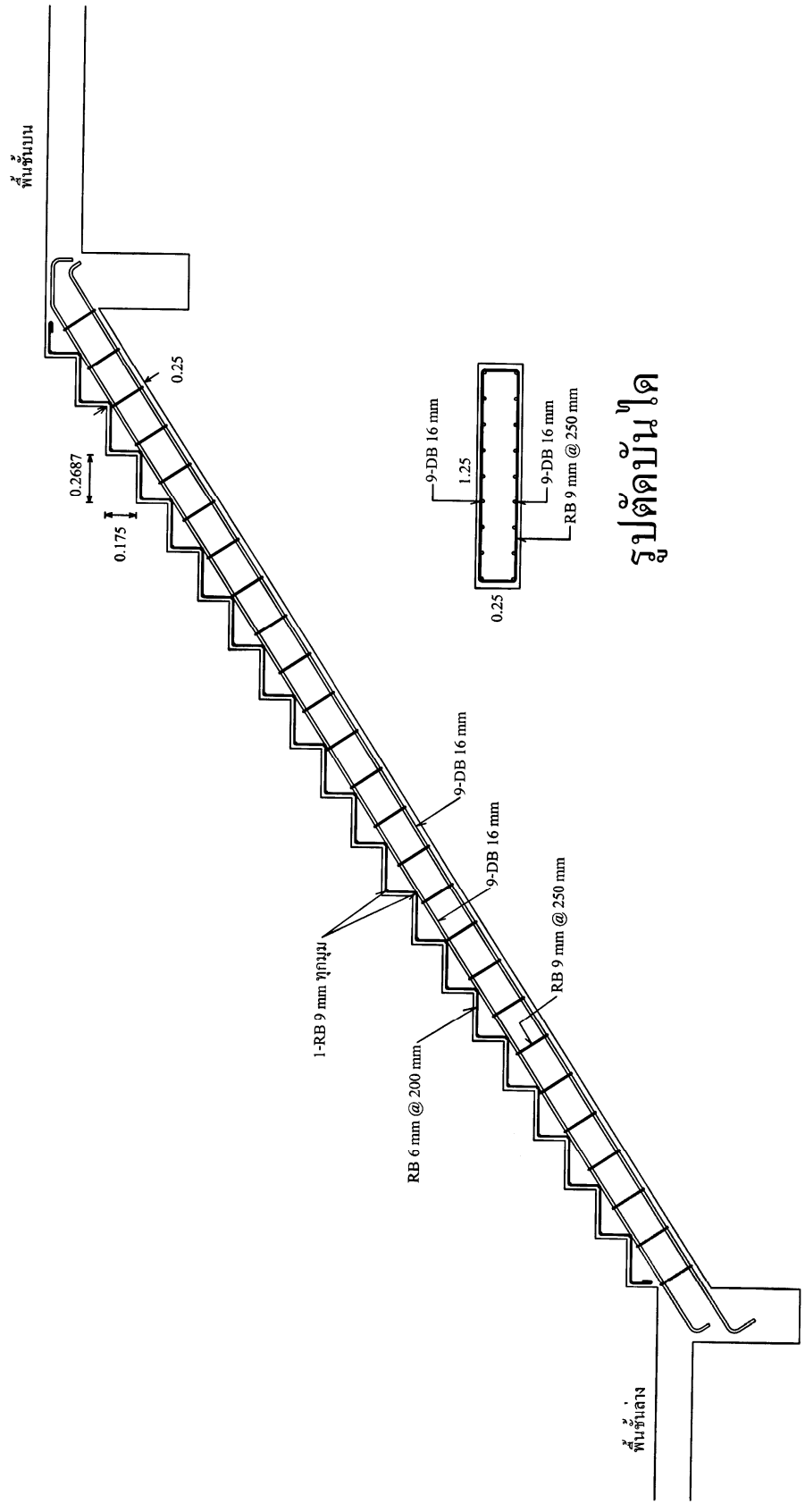
$f_y = 3{,}000 \ \text{ksc} =$ กำลังครากของเหล็กเสริมเอก SD-30

$f_{sy} = 2{,}400 \ \text{ksc} =$ กำลังครากของเหล็กรับแรงเฉือน

$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65 \ \text{ksc} =$ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500 \ \text{ksc} =$ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมเอก

$f_v = 0.5 f_{sy} = 0.5 \times 2{,}400 = 1{,}200 \ \text{ksc} =$ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กรับแรงเฉือน


พื้นชั้นบน
0.25
0.2687
0.175
9-DB 16 mm
1.25
9-DB 16 mm
RB 9 mm @ 250 mm
0.25
รูปตัดบันได
9-DB 16 mm
9-DB 16 mm
RB 9 mm @ 250 mm
1-RB 9 mm ทุกมุม
RB 6 mm @ 200 mm
พื้นชั้นล่าง

ตัวอย่างที่ 4.4

$$n = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72 = \text{ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น}$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times 65}} = 0.274 = \text{ พารามิเตอร์แกนสะเทิน}$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = 1-\frac{0.274}{3} = 0.909 = \text{ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์}$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2}\times 65\times 0.274\times 0.909 = 8.095 \text{ ksc} = \text{ พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล}$$

$$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{240} = 4.493 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้}$$

$$v_{cbm} = 0.795\sqrt{f_c'} = 0.795\sqrt{240} = 12.316 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนแบ่งระยะเรียง}$$

$$v_{ct} = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้จากโมเมนต์บิด}$$

$$v_{ct} = 1.65\sqrt{f_c'} = 1.65\sqrt{240} = 25.562 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้}$$

$$H = 4.20 \text{ m} = 420 \text{ cm} = \text{ ความสูงระหว่างชั้น}$$

$$b_1 = 1.50 \text{ m} = 150 \text{ cm} = \text{ ความกว้างบันได}$$

$$2\theta = 180^o = \text{ มุมระหว่างปลายบันไดทั้งสองปลาย}$$

$$\theta = \frac{180}{2} = 90^o = \text{ มุมจากแนวกึ่งกลางถึงปลายบันได}$$

ขั้นตอนที่ 2 อาคารสาธารณะ กฎหมายกำหนดให้ลูกตั้งไม่เกิน 19 cm แต่ลูกตั้งที่เดินสบายที่สุดสำหรับผู้ใหญ่ทั่วไปคือ 0.175 เมตร หาจำนวนลูกตั้ง n

$$n = \frac{H}{0.175} = \frac{4.20}{0.175} = 24 \text{ ขั้น}$$

ความสูงลูกตั้ง

$$h = \frac{H}{n} = \frac{4.20}{20} = 0.175 \text{ m} = 17.5 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณรัศมีและขนาดลูกนอน

รัศมีขอบใน

$$R_i \geq \frac{9(n-1)}{\pi\theta} = \frac{9(24-1)}{90\pi} = 0.732 \text{ m} \Rightarrow 1.00 \text{ m}$$

เลือกรัศมีขอบใน 1.00 เมตร รัศมีกลางบันได

$$R = R_i + \frac{b_1}{2} = 1.00 + \frac{1.50}{2} = 1.75 \text{ m}$$

รัศมีขอบนอก

$$R_o = R_i + b_1 = 1.00 + 1.50 = 2.50 \text{ m}$$

ลูกนอนที่ขอบใน

$$b_i = \frac{\theta \pi R_i}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 1.00}{90(24-1)} = 0.1366 \text{ m} > 0.10 \text{ m}$$

ลูกนอนที่กลางพื้น

$$b_m = \frac{\theta \pi R}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 1.75}{90(20-1)} = 0.23903 \text{ m} \approx 0.24 \text{ m}$$

ตามกฎหมายลูกนอนต้องไม่น้อยกว่า 0.22 เมตรในอาคารพักอาศัย และไม่น้อยกว่า 0.24 เมตรในอาคารสาธารณะ ดังนั้นลูกนอนที่กลางพื้นบันไดใช้ได้ดี

ลูกนอนที่ขอบนอก

$$b_o = \frac{\theta \pi R_o}{90(n-1)} = \frac{90\pi \times 2.50}{90(20-1)} = 0.34148 \text{ m}$$

มุมเอียงของบันได

$$\tan\beta = \frac{h}{b_m} = \frac{0.175}{0.23903} = 0.732125674$$

$$\beta = \tan^{-1} 0.732125674 = 36.20881588^o$$

$$\sin\beta = 0.590729824$$

$$\cos\beta = 0.806869428$$

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบขั้นบันไดแบบพับผ้า สมมติความหนา t = 0.10 เมตร

น้ำหนักขั้นบันไดแบบพับผ้า ขนาดลูกตั้ง h = 0.175 m ขนาดลูกนอน b = b_1 = 0.23903 m

$$w_G = 2400A = 2400t\left(b + 0.025 + h\sqrt{1+\left(\frac{h}{b}\right)^2}\right)$$

$$w_G = 2400 \times 0.10 \times \left(0.23903 + 0.025 + 0.175\sqrt{1+\left(\frac{0.175}{0.23903}\right)^2}\right)$$

$$w_G = 115.4 \Rightarrow 116 \text{ kg/m}$$

สมมติทำผิวหินขัดหนา 3 cm อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2 ขนาดลูกนอน b = b_1 = 0.23903 m

$$w = w_G + 72b + 400b$$

$$w = 115.4 + 72 \times 0.23903 + 400 \times 0.23903$$

$$w = 228.2 \text{ kg/m}$$

ความลึกรวม

$$h + t = 0.175 + 0.10 = 0.275 \text{ m} = 27.5 \text{ cm}$$

ความลึกประสิทธิผล

$$d = 27.5 - 6 = 21.5 \text{ cm} = 0.215 \text{ m}$$

แรงเฉือนสูงสุด

$$V = w\left(\frac{b_1}{2} - d\right) = 228.2\left(\frac{1.50}{2} - 0.215\right) = 122.087 \ \ kg$$

กำลังรับแรงเฉือนของขั้นบันได

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}td = 0.29\sqrt{240} \times 10 \times 21.5 = 965.9 \ kg >> V = 122.087 \ \ kg$$

บันไดรับแรงเฉือนได้โดยปลอดภัย

โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = \frac{1}{2}w\left(\frac{b_1}{2}\right)^2$$

$$M = \frac{1}{2} \times 228.2 \times \left(\frac{1.50}{2}\right)^2$$

$$M = 64.18125 \ \ kg \cdot m = 6{,}418.125 \ \ kg \cdot cm$$

โมเมนต์ดัดสมดุล

$$M_R = Rtd^2 = 8.095 \times 10 \times 21.5^2 = 37{,}419.1375 \ \ kg \cdot cm >> M$$

ปริมาณเหล็กรับแรงดึงที่ต้องการ

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{6{,}418.125}{1{,}500 \times 0.909 \times 21.5} = 0.219 \ \ cm^2$$

เลือก 1-DB 10 mm ทุกมุม มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.0^2 = 0.785 \ \ cm^2 > 0.219 \ \ cm^2$ และใช้ RB 6 mm @ 200 mm ถักซิกแซ็กตามขั้นบันไดแทนเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบคานกลาง เลือกคานกลางขนาดกว้าง b = 0.30 เมตร ลึก h = 0.60 เมตร

น้ำหนักจากขั้นบันได

$$w_{step} = \frac{wb_1}{b_m} = \frac{228.2 \times 1.50}{0.23903} = 1{,}432 \ \ kg/m$$

น้ำหนักจากคานกลาง

$$w_G = \frac{2400bh}{\cos\beta} = \frac{2400 \times 0.30 \times 0.60}{0.806869428} = 536 \ \ kg/m$$

น้ำหนักบรรทุกรวม

$$w = 1{,}432 + 536 = 1{,}968 \ \ kg/m$$

เนื่องจาก $(h = 0.60 \ \ m) > (b = 0.30 \ \ m)$ ดังนั้น

$$\frac{h}{b} = \frac{0.60}{0.30} = 2$$

$$K = 0.0139\left(\frac{h}{b}\right)^4 - 0.1597\left(\frac{h}{b}\right)^3 + 1.2257\left(\frac{h}{b}\right)^2 - 0.7262\left(\frac{h}{b}\right) + 1.0398$$

$$K = 0.0139(2)^4 - 0.1597(2)^3 + 1.2257(2)^2 - 0.7262(2) + 1.0398$$

$$K = 3.435$$

คำนวณหาค่า U จาก

$$U = \frac{360(K+1)\sin\theta - 2\pi K\theta\cos\theta}{\pi\theta(K+1) - 180(K-1)\sin\theta\cos\theta}$$

$$U = \frac{360(3.435+1)\sin 90^o - 2\pi \times 3.435 \times 90\cos 90^o}{\pi \times 90(3.435+1) - 180(3.435-1)\sin 90^o \cos 90^o}$$

$$U = 1.27324$$

ให้ระยะหุ้มบนล่าง 4 cm ซ้ายขวา 3.5 cm ได้ระยะต่างๆ ดังนี้

ระยะทางสั้นของหน้าตัด x = 30 cm ระยะทางยาวของหน้าตัด y = 60 cm

ระยะทางสั้นภายในเหล็กลูกตั้ง

$$x_1 = 30 - 3.5 - 3.5 = 23 \text{ cm}$$

ระยะทางยาวภายในเหล็กลูกตั้ง

$$y_1 = 60 - 4 - 4 = 52 \text{ cm}$$

ค่าเฉลี่ยระยะเหล็กเสริม

$$z = \frac{x_1 + y_1}{2} = \frac{23+52}{2} = 37.5 \text{ cm}$$

เนื้อที่แกนคอนกรีตภายในเหล็กลูกตั้ง

$$A_c = x_1 y_1 = 23 \times 52 = 1{,}196 \text{ cm}^2$$

สมมติใช้เหล็กลูกตั้ง RB 9 mm เหล็กเสริมเอก DB 25 mm สองชั้นทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

$$d = 60 - 4 - 0.9 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 51.35 \text{ cm}$$

$$d' = 4 + 0.9 + 2.5 + \frac{2.5}{2} = 8.65 \text{ cm}$$

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1{,}500 \times \frac{0.274 - \frac{8.65}{51.35}}{1 - 0.274} = 436.1 \text{ ksc} < f_s = 1{,}500 \text{ ksc}$$

$$M_R = Rbd^2 = 8.095 \times 30 \times 51.35^2 = 640{,}352.3441 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 6{,}403.523441 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$wR = 2{,}146 \times 1.75 = 3{,}755.5 \text{ kg}$$

$$wR^2 = 2{,}146 \times 1.75^2 = 6{,}572.125 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M = wR^2(U\cos\phi - 1) = 6{,}572.125(1.27324\cos\phi - 1)$$

$$M_t = wR^2\left(U\sin\phi - \frac{\pi\phi}{180}\right) = 6{,}572.125\left(1.27324\sin\phi - \frac{\pi\phi}{180}\right)$$

$$V = \frac{wR\pi\phi}{180} = \frac{3{,}755.5\pi\phi}{180}$$

คำนวณค่าของ M, M_t, V จาก $\phi = 0$ ถึง $\phi = 90^o$ โดยเพิ่มคราวละ 5^o ดังนี้

ϕ^o	$M, kg \cdot m$	$M_t, kg \cdot m$	V, kg
0	1,795.77	0	0
5	1,763.93	155.78	327.73
10	1,668.64	306.02	655.46
15	1,510.64	445.19	983.19
20	1,291.12	567.88	1,310.92
25	1,011.76	668.79	1,638.65
30	674.68	742.79	1,966.38
35	282.45	784.94	2,294.10
40	-161.95	790.57	2,621.83
45	-655.13	755.26	2,949.56
50	-1,193.35	674.92	3,277.29
55	-1,772.50	545.79	3,605.02
60	-2,388.18	364.49	3,932.75
65	-3,035.70	128.05	4,260.48
70	-3,710.14	-166.12	4,588.21
75	-4,406.36	-520.13	4,915.94
80	-5,119.06	-935.65	5,243.67
85	-5,842.82	-1,413.89	5,571.40
90	-6,572.125	-1,955.58	5,899.13

โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่กลางคาน $M = 1{,}795.77\ kg \cdot m$ โมเมนต์ลบสูงสุดที่ปลายคาน $M = 6{,}572.125\ kg \cdot m$ แรงเฉือนสูงสุดที่ปลายคาน $V = 5{,}899.13\ kg$

เหล็กเสริมที่กลางคาน $M = 179{,}577\ kg \cdot cm < M_R = 640{,}352.3441\ kg \cdot cm$

เหล็กบน

$$A_s^t = 0$$

เหล็กล่าง

$$A_s^b = \frac{M}{f_s jd} = \frac{179{,}577}{1{,}500 \times 0.909 \times 51.35} = 2.565\ cm^2$$

เหล็กเสริมที่ปลายคาน $M = 657{,}212.5 \ \text{kg}\cdot\text{cm} > M_R = 640{,}352.3441 \ \text{kg}\cdot\text{cm}$

เหล็กบน

$$A_s^t = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d - d')}$$

$$A_s^t = \frac{640{,}352.3441}{1{,}500 \times 0.909 \times 51.35} + \frac{657{,}212.5 - 640{,}352.3441}{1{,}500(51.35 - 8.65)}$$

$$A_s^t = 9.409 \ \text{cm}^2$$

เหล็กล่าง

$$A_s^b = \frac{M - M_R}{f_s'(d - d')} = \frac{657{,}212.5 - 640{,}352.3441}{436.1(51.35 - 8.65)} = 0.905 \ \text{cm}^2$$

แรงเฉือนสูงสุด $V = 5{,}899.13$ kg แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd = 0.29\sqrt{240} \times 30 \times 51.35 = 6{,}920.94 \ \text{kg} > V$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V - V_c}{f_v d} = 0 \text{ เนื่องจาก } V < V_c$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน

$$v_v = \frac{V}{bd} = \frac{5{,}899.13}{30 \times 51.35} = 3.829 \ \text{ksc} < 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{240} = 4.493 \ \text{ksc}$$

หน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์บิด

$$v_1 = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} = \frac{3.5 \times 195{,}558}{30^2 \times 60}$$

$$v_1 = 12.675 \ \text{ksc} < 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \ \text{ksc}$$

หน่วยแรงเฉือนรวม

$$v = v_v + v_t = 3.829 + 12.675 = 16.504 \ \text{ksc} < 1.65\sqrt{f_c'} = 25.562 \ \text{ksc}$$

เลือกเหล็กลูกตั้ง RB 9 mm มี $A_t = \frac{\pi}{4} \times 0.9^2 = 0.636 \ \text{cm}^2$ และ $f_v = 1{,}200$ ksc

$$\frac{2A_t}{s} = \frac{M_t}{A_c f_v} = \frac{195{,}558}{1{,}196 \times 1{,}200} = 0.13626$$

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = 0 + 0.13626$$

ปริมาณขั้นต่ำของเหล็กรับแรงเฉือนและแรงบิด

$$\frac{A_v + 2A_t}{s} = \frac{3.5b_w}{f_{sy}} = \frac{3.5 \times 30}{2{,}400} = 0.04375 < 0.13626$$

สำหรับเหล็ก RB 9 mm มี

$$A_v + 2A_t = 0 + 2 \times 0.636 = 1.272 \ \text{cm}^2$$

หาระยะเรียงของเหล็กรับแรงเฉือน

$$\frac{1.272}{s} = 0.13626$$

$$s = \frac{1.272}{0.13626} = 9.33 \text{ cm}$$

ระยะเรียงอาจจะน้อยเกินไป เพิ่มเป็น 2-RB 9 mm จะทำให้ระยะเรียงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าคือ

$$s = 2 \times 9.33 = 18.67 \Rightarrow 17.5 \text{ cm}$$

ใช้เหล็กลูกตั้ง 2-ป RB 9 mm @ 175 mm

ออกแบบเหล็กตามยาว

เหล็กรับแรงเฉือนตามยาวทั้งหมด

$$A_\ell = 2A_t \frac{x_1 + y_1}{s} = 2 \times (2 \times 0.636) \times \frac{23 + 52}{17.5} = 10.903 \text{ cm}^2$$

$$C_t = \frac{bd}{\sum x^2 y} = \frac{30 \times 51.35}{30^2 \times 60} = 0.028527777$$

แต่ปริมาณขั้นต่ำ

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - 2A_t \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 30}{2{,}400} \times \frac{195{,}558}{195{,}558 + \frac{5{,}899.13}{3 \times 0.028527777}} - 2 \times (2 \times 0.636) \right] \times \frac{23 + 52}{17.5}$$

$$A_\ell = 22.37 \text{ cm}^2$$

แต่ไม่ควรใช้เกิน

$$A_\ell = \left[\frac{28xs}{f_{sy}} \cdot \frac{M_t}{M_t + \frac{V}{3C_t}} - \frac{3.5bs}{f_{sy}} \right] \cdot \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$A_\ell = \left[\frac{28 \times 30 \times 30}{2{,}400} \times \frac{195{,}558}{195{,}558 + \frac{5{,}899.13}{3 \times 0.028527777}} - \frac{3.5 \times 30 \times 17.5}{2{,}400} \right] \times \frac{23 + 52}{17.5}$$

$$A_\ell = 29.991 \text{ cm}^2$$

ใช้เหล็กเสริมตามยาว $A_\ell = 22.37 \text{ cm}^2$ แบ่งเป็นสามชั้นๆ ละ $\frac{22.37}{3} = 7.457 \text{ cm}^2$ ชั้นบนรวมกับเหล็กบน และชั้นล่างรวมกับเหล็กล่าง ส่วนชั้นกลางใช้ 2-DB 25 mm ได้เนื้อที่ $2 \times 4.909 = 9.818 \text{ cm}^2$

เหล็กล่างเพิ่มที่กลางคาน

$$A_s^b = 2.565 + 7.457 = 10.022 \ \text{cm}^2$$

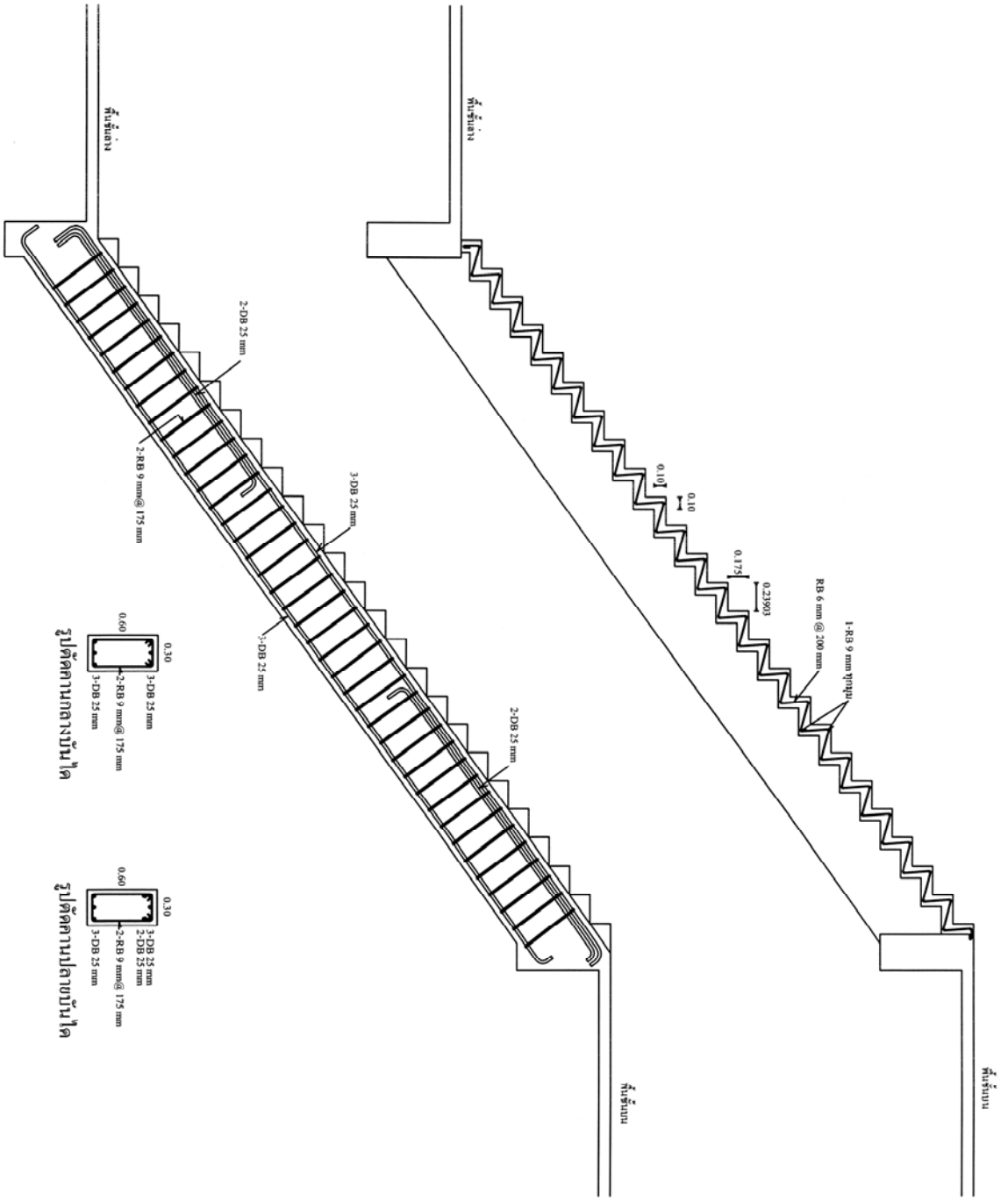
เสริมเหล็กล่าง 3-DB 25 mm มี $A_s^b = 3 \times 4.909 = 14.727 \ \text{cm}^2$ ตลอดความยาวคาน

เหล็กบนเพิ่มที่ปลายคาน

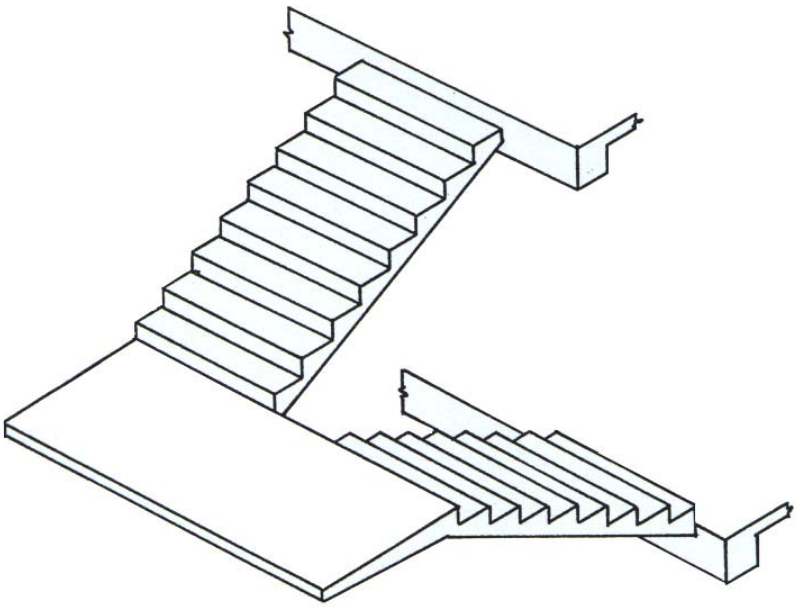
$$A_s^t = 9.409 + 7.457 = 16.866 \ \text{cm}^2$$

เสริมเหล็กบน 5-DB 25 mm มี $A_s^t = 5 \times 4.909 = 24.545 \ \text{cm}^2$ โดยเสริมถึงมุม $\phi = 30^o$ ในช่วงกลาง เสริม 3-DB 25 mm

เขียนรายละเอียดดังแสดงในหน้าถัดไป


2-DB 25 mm
2-RB 9 mm@ 175 mm
3-DB 25 mm
2-DB 25 mm
2-DB 25 mm
0.10
0.10
0.175
0.2393
1-RB 9 mm หุ้มปูน
RB 6 mm @ 200 mm
0.60
0.30
3-DB 25 mm
2-RB 9 mm@ 175 mm
3-DB 25 mm
รูปตัดตามแนวบันได
0.60
0.30
3-DB 25 mm
2-DB 25 mm
2-RB 9 mm@ 175 mm
3-DB 25 mm
รูปตัดตามแนวเอียงบันได

4.7 บันไดชานพักลอย (FREE-STANDING STAIR)



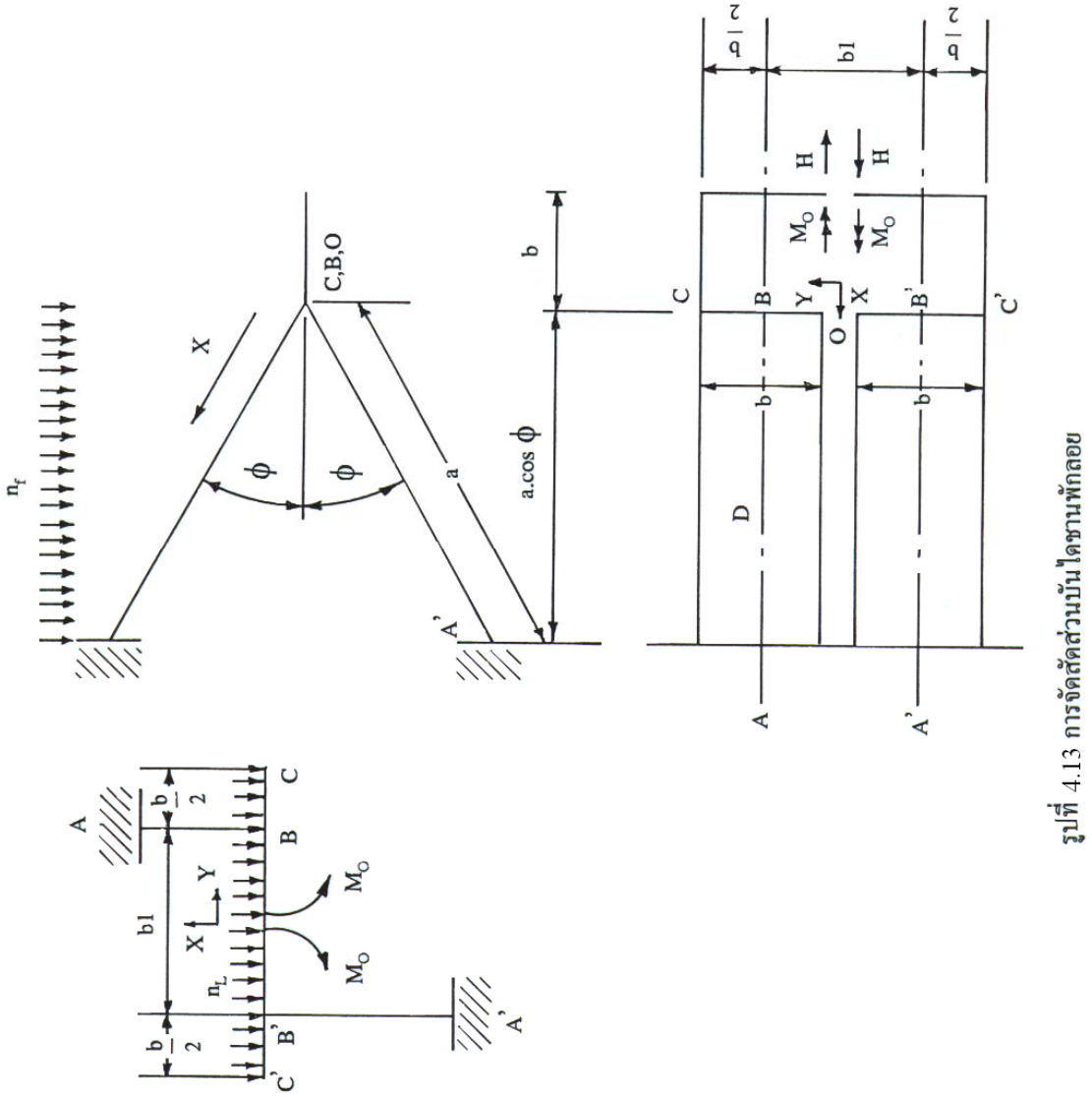
รูปที่ 4.12 บันไดชานพักลอย

รูปที่ 4.12 เป็นบันไดชานพักลอย (Free-standing stair) หากมองทางข้างจะคล้ายขาสุนัข ชานพักเป็นส่วนข้อศอกของขาสุนัข บางครั้งจึงเรียก dog-leg stair ในส่วนของชานพักไม่มีคานมารองรับ ตัวพื้นบันไดและชานพักจึงต้องเกาะเกี่ยวกันให้ทรงตัวอยู่ได้ ตัวขั้นบันไดเป็นส่วนที่มาเกาะอยู่กับพื้นบันไดเท่านั้น การวิเคราะห์หาแรงและโมเมนต์ทำได้ยากมาก ปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์จึงจะได้ค่าที่เชื่อถือได้ เช่น SAP 2000, ROBOT, ฯลฯ ในที่นี้จะอธิบายวิธีประมาณที่พอจะคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขวิทยาศาสตร์ดังนี้

Cusens และ Kuang สองท่านนี้ได้ใช้หลักการพลังงานความเครียด (strain-energy principle) หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดในแนวนอน H กับโมเมนต์ดัด M_o ตรงจุดกึ่งกลางของชานพักลอยนั้นๆ แล้วใช้ H กับ M_o ในการหาแรงและโมเมนต์ที่ตำแหน่งอื่นๆ ของบันไดต่อไป

เนื่องจากวิธีการของ Cusens และ Kuang นั้นยุ่งยากพอสมควร ถ้าตัดบางเทอมที่มีผลน้อยออกไปบ้าง จะทำให้สามารถหาค่าของ H และ M_o ได้โดยตรง และจากการทดลองวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าผลใกล้เคียงกันมาก และในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงแล้ว ผลการวิเคราะห์โดยวิธีประมาณนี้ถือว่ามีความละเอียดเพียงพอแล้ว

สำหรับบันไดชานพักลอยที่วิเคราะห์โดยวิธีประมาณนี้ มีข้อสังเกตและเป็นข้อจำกัดในการออกแบบบันไดชนิดนี้คือ



รูปที่ 4.13 การจัดสัดส่วนบันไดชานพักลอย

1. *ความกว้างของตัวบันไดกับความกว้างของชานพักจะต้องเท่ากัน*
2. *ช่วงขึ้นและลงจากชานพักจะต้องมีมุมเอียง ϕ เท่ากันและควรจะมีความยาวเท่ากันคือจำนวนขั้นบันไดเท่ากันทั้งช่วงขึ้นและลง หรือจำนวนลูกตั้งรวมเป็นเลขคู่เพื่อจะได้แบ่งครึ่งได้ แต่ถ้าไม่เท่ากันให้เลือกตัวยาวกว่ามาออกแบบ*

พิจารณารูปที่ 4.13 กำหนดให้

a = ความยาวตามแนวเอียงของส่วนที่เป็นขั้นบันไดจากขอบชานพักถึงคานยึด , เมตร

b = ความกว้างของบันได และความกว้างของชานพักเท่ากัน , เมตร

b_1 = ระยะห่างระหว่างแนวกึ่งกลางของบันได , เมตร

H = แรงในแนวราบที่กึ่งกลางของชานพัก ตามแนวแกน X , kg/m

M_0 = โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางชานพัก เวกเตอร์ตามแนวราบหรือแกน X , kg.m/m

h_f = ความหนาของพื้นรองรับส่วนที่เป็นขั้นบันได , เมตร

h_L = ความหนาของชานพัก , เมตร

M_h = โมเมนต์ดัดในแนวราบ , kg.m/m

M_v = โมเมนต์ดัดในแนวดิ่ง , kg.m/m

T = โมเมนต์บิด , kg.m/m

n_f = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวบนส่วนที่เป็นขั้นบันได , kg/m

n_L = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวบนชานพัก , kg/m

x = ระยะวัดตามแนวเอียงของบันไดจากขอบชานพักที่ B ไปทางคานยึด , เมตร

y = ระยะวัดตามแกน Y บนชานพัก วัดจากจุด O , เมตร

ϕ = ความเอียงของขั้นบันไดทำกับแนวราบ , องศา

สำหรับค่าของ n_f และ n_L อาจจะใช้หน่วย kg/m^2 แทน kg/m ก็ได้เพราะผลจะเหมือนกัน เนื่องจากหน่วย kg/m เป็นการมองเมื่อตัดบันไดมาพิจารณากว้าง 1.00 เมตร นั่นเอง

ต่อไปเป็นการคำนวณค่าของ H และ M_0 ที่จุดกึ่งกลางของชานพัก

ถ้าจุดยึดของบันไดที่ A และ A' เป็นแบบหมุนได้แล้ว

$$H=\frac{n_L(b_1+b)\left(1+\frac{1}{2}\frac{b}{a}\sec\phi\right)+n_f a\cos\phi}{2\tan\phi}$$

ถ้าจุดยึดของบันไดที่ A และ A' เป็นแบบตรึงแน่นแล้ว (การออกแบบทั่วไปจะเป็นแบบนี้)

$$H\cong\frac{n_L(b_1+b)\left(4+3\frac{b}{a}\sec\phi\right)+3n_f a\cos\phi}{2\tan\phi\left[4+\frac{3\left(\frac{b_1}{a}\right)^2}{\frac{0.72}{1+\left[\frac{h_f}{b}\right]^2}+\frac{1}{K}}\right]}$$

$$M_0=\frac{Hb_1\tan\phi-\frac{1}{4}n_L\left(b_1^2-b^2\right)}{2+\frac{1.44K}{1+\left(\frac{h_f}{b}\right)^2}}$$

เมื่อ $K=\left(\frac{h_f}{h_L}\right)^3\left(\frac{b_1}{a}\right)\sec^2\phi$

ในช่วง OB จุดใดๆ ที่ห่างจากจุด O เป็นระยะทาง y

$$M_v=-M_0-\frac{1}{2}n_L y^2$$
$$M_h=-Hy$$
$$T=-\frac{1}{2}n_L by$$

ในช่วง BC จุดใดๆ ที่ห่างจากจุด O เป็นระยะทาง y

$$M_v=-\frac{1}{2}n_L\left[\frac{1}{2}(b_1+b)-y\right]^2$$
$$M_h=0$$
$$T=-\frac{1}{2}n_L b\left[\frac{1}{2}(b_1+b)-y\right]$$

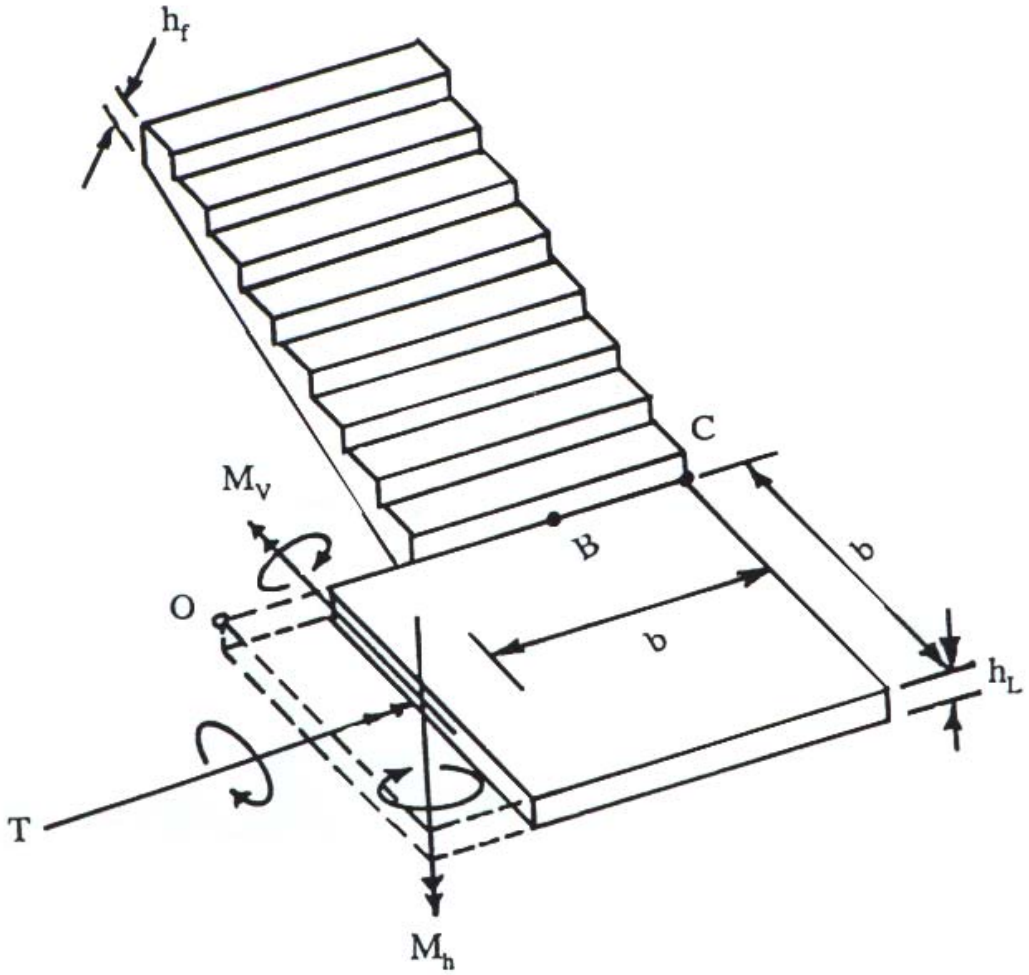
ในช่วง AB จุดใดๆ ที่ห่างจากจุด B เป็นระยะทาง x

$$M_v=Hx\sin\phi-\frac{1}{2}n_L(b_1+b)\left(x\cos\phi+\frac{1}{2}b\right)-\frac{1}{2}n_f x^2\cos^2\phi$$
$$M_h=-\frac{1}{2}Hb_1\cos\phi-\left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\sin\phi$$
$$T=-\frac{1}{2}Hb_1\sin\phi+\left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\cos\phi$$

วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณดังกล่าวนี้ กำหนดให้ใช้ G/E = 0.4 ตามข้อกำหนดมาตรฐานของอังกฤษ CP110 (มาตรฐาน BS-8110 ให้ใช้ G/E = 0.42 ซึ่งผลต่างกันไม่มากมายอะไร) และกำหนดค่า C เป็นครึ่งหนึ่งของค่า St. Venant สำหรับคอนกรีต และท่าน Cusens กับท่าน Kuang ประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหน้าตัดชานพักโดยคิดความกว้างชานพักเพียงครึ่งเดียว

ต่อไปเป็นการทำความเข้าใจกับทิศทางของโมเมนต์ M_v , M_h และ T ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งจะมีผลให้เราทราบถึงลักษณะการเสริมเหล็กที่ควรจะเป็นต่อไปด้วย

จากรูปที่ 4.13 พิจารณาช่วง OB ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงทิศทางบวกของแรงและโมเมนต์

M_v เป็นโมเมนต์ดัด กระทำกับคานแบนกว้าง b หนา h_L ทำให้เหล็กเสริมกระจายเต็มตลอดความกว้าง b ของชานพัก ซึ่งในการออกแบบแม้จะพยายามให้มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง (Singly reinforced design) แต่ในการปฏิบัติจริงจะนิยมเสริมเหล็กทั้งบนและล่างเท่ากัน ที่บอกว่า M_v เป็นโมเมนต์ในแนวดิ่ง ขอให้สังเกตระนาบการหมุนของ M_v จะอยู่ในแนวดิ่งหรือตั้งฉากกับพื้นชานพัก (ในขณะที่ตัวเวกเตอร์ของ M_v ขนานกับชานพัก) จึงเรียกโมเมนต์ดัดในแนวดิ่ง

M_h เป็นโมเมนต์ดัดที่ตัวเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวของชานพัก แต่ระนาบการหมุนจะอยู่ขนานกับผิวของชานพักจึงเรียกว่าเป็นโมเมนต์ดัดในแนวราบหรือแนวนอน ลักษณะจะคล้ายกับคานลึกคือกว้าง h_L ลึก b เหล็กเสริม (รับแรงดึง) จะไปรวมเป็นกระจุกที่ขอบนอกของชานพัก แต่เราจะคิดเหล็กรับแรงอัดเท่ากับเหล็กรับแรงดึงไปเลย จึงให้พื้นที่เหล็กที่คำนวณได้ไปอยู่ที่บริเวณจุด O และขอบนอกของชานพัก แนวของเหล็กเสริมจากผลของ M_v และ M_h จะวางตัวขนานขอบยาวของชานพักหรือขนานเส้นมิติ b_1

T เป็นโมเมนต์บิดที่พยายามทำให้ชานพักบิดโค้ง (Warping) คล้ายกับตัดกระดาษแข็งเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมยาว จับปลายทั้งสองข้างบิดสวนทางกัน การบิดงอของกระดาษจะเหมือนกับการบิดงอของชานพักและบันได เหล็กเสริมต้านโมเมนต์บิดจะมีสองส่วน ส่วนแรกเป็นเหล็กเสริมที่มุมทั้งสี่มุมไปรวมกับผลจาก M_v กับ M_h ส่วนที่สองเป็นเหล็กปลอกหรือเหล็กที่เสริมในระนาบของการหมุนซึ่งจะไปตั้งฉากกับเหล็กที่มุมในส่วนแรก

ในตัวบันได เวกเตอร์ M_v จะขนานกับพื้นบันได เวกเตอร์ของ M_h จะตั้งฉากกับพื้นบันได ส่วนเวกเตอร์ของ T จะขนานกับพื้นบันไดเพียงแต่จะชี้เข้าหรือออกจากหน้าตัดเท่านั้น หรือจะมองแบบชานพักก็ได้โดยจินตนาการวางบันไดให้อยู่ในแนวราบ แล้วดูเช่นเดียวกับชานพัก

อนึ่งเพื่อไม่ให้สับสนในเรื่องเวกเตอร์ของแรงกับเวกเตอร์ของโมเมนต์ มีหลายท่านไม่ทราบจึงขอเรียนอธิบายไว้ในที่นี้ กล่าวคือ *เวกเตอร์ของแรงจะเป็นลูกศรหัวเดียว* เช่น H ในรูปที่ 2 *ส่วนเวกเตอร์ของโมเมนต์จะเป็นลูกศรสองหัว* เช่น M_0 ในรูปที่ 4.13 ซึ่งการกำหนดทิศทางของเวกเตอร์โมเมนต์ (ลูกศรสองหัว) สัมพันธ์กับลักษณะการหมุนของโมเมนต์ตามกฎมือขวาที่ว่า

กำมือขวา ให้นิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง นิ้วก้อย สี่นิ้วชิดติดกัน และให้นิ้วหัวแม่มือเหยียดตรง ตั้งฉากกับระนาบของนิ้วทั้งสี่ที่กำอยู่นั้น ถ้าทิศการหมุนของโมเมนต์วนในทิศทางเช่นเดียวกับนิ้วทั้งสี่จากโคนนิ้วไปหาปลายนิ้วแล้ว นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของเวกเตอร์โมเมนต์นั้น

ในทางตรงกันข้าม เมื่อเห็นเวกเตอร์โมเมนต์ (ลูกศรสองหัว) และต้องการทราบการหมุนของโมเมนต์ว่าเป็นอย่างไร ให้กำมือขวารอบเวกเตอร์โมเมนต์นั้น (จินตนาการเอา) ให้หัวแม่มือชี้ไปตามทิศทางคือหัวลูกศรของเวกเตอร์ นิ้วทั้งสี่ที่กำนั้นจะบอกทิศทางการหมุนวนของโมเมนต์จากโคนนิ้วไปหาปลายนิ้ว สังเกตรูปที่ 4.14 ประกอบด้วยจะเข้าใจได้ดีขึ้น

ตัวอย่างที่ 4.6 จงออกแบบบันไดชานพักลอยสำหรับอาคารสาธารณะ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกจร 500 kg/m^2 ความสูงระหว่างชั้น 4.00 เมตร ขนาดลูกนอน 0.30 เมตร ส่วนขนาดลูกตั้งห้ามเกิน 0.18 เมตร ความกว้างบันไดและชานพัก 1.50 เมตร แนวศูนย์กลางบันไดห่างกัน 1.90 เมตร ประมาณความหนาบันไดในขั้นต้นนี้ 0.15 เมตร และความหนาที่ชานพัก 0.20 เมตร ให้ f_c' = 240 ksc., เหล็กข้ออ้อย SD-40 ออกแบบด้วยทฤษฎีอิลาสติก มาตรฐาน วสท.

วิธีทำ ออกแบบทางสถาปัตยกรรมก่อนเพื่อทราบขนาดของลูกตั้ง มุมเอียง ϕ และน้ำหนักบนบันไดกับชานพัก ขนาดลูกตั้งที่เดินสบายที่สุดคือ 0.175 เมตร และลูกนอนไม่ควรจะเล็กกว่า 0.25 เมตร แต่ตามโจทย์ให้ลูกนอน 0.30 เมตร ก็ถือว่าใช้ได้

ความสูงระหว่างชั้น = 4.00 เมตร

ขนาดลูกตั้งไม่เกิน = 0.18 เมตร

จำนวนลูกตั้ง $= \frac{4.00}{0.18} = 22.2$ ปัดขึ้นเป็น = 23 ขั้น

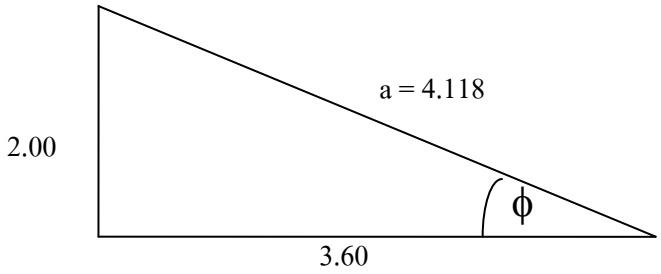
เนื่องจากบันไดต้องขึ้นลงจากชานพักเท่ากันหรือมุมเอียงเท่ากัน จำนวนขั้นบันไดควรจะเป็นเลขคู่เพื่อให้แบ่งได้เท่ากัน จำนวนขั้นบันไดจึงควรจะเป็น 24 ขั้น

แต่ละช่วงขึ้นลงมีจำนวนลูกตั้ง $= \frac{24}{2} = 12$ ขั้น

ขนาดลูกตั้ง $= \frac{4.00}{24} = 0.167$ เมตร

ระยะทางนอน $= 12 \times 0.30 = 3.60$ เมตร

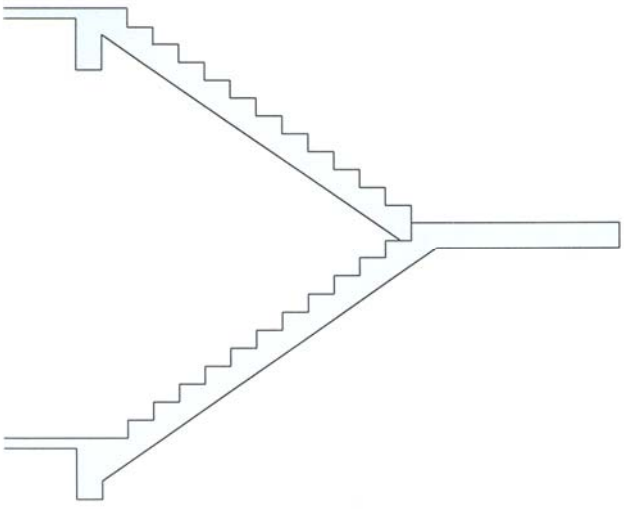
ระยะทางดิ่ง $= \frac{4.00}{2} = 2.00$ เมตร



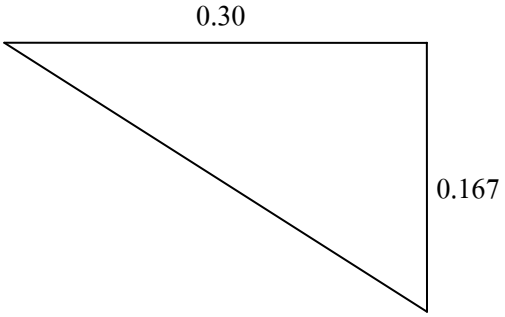
ความยาวบันได $a = \sqrt{2.00^2 + 3.60^2} = 4.118$ เมตร

มุมเอียงบันได $\phi = \tan^{-1}\frac{2.00}{3.60} = 29.055$ องศา

$\tan\phi = 0.5556$, $\sin\phi = 0.4856$, $\cos\phi = 0.8742$



รูปบันไดชานพักลอยตามตัวอย่างที่ 4.6



น้ำหนักของคอนกรีต 1 ขั้น $= \dfrac{2400 \times \frac{1}{2} \times 0.30 \times 0.167}{\sqrt{0.167^2 + 0.30^2}}$

$= 175 \quad kg/m^2$

บันไดหนา 0.20 เมตร หนัก $= 2400 \times 0.20$

$= 480 \quad kg/m^2$

น้ำหนักบรรทุกตายตัวของบันได $= 175 + 480$

$= 655 \quad kg/m^2$

ชานพักหนา 0.20 เมตร น้ำหนักตายตัว $= 2400 \times 0.20$

$= 480 \quad kg/m^2$

การวิเคราะห์ต้องทำเป็น 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1 มีน้ำหนักจรทั้งบนบันไดและชานพัก

กรณีที่ 2 มีน้ำหนักจรบนบันไดเท่านั้น

กรณีที่ 3 มีน้ำหนักจรบนชานพักเท่านั้น

สรุปข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์

$a = 4.118$ m. , $b = 1.50$ m. , $b_1 = 1.90$ m. , $h_f = 0.15$ m.

$h_L = 0.20$ m. , $\phi = 29.055$ องศา

$\tan\phi = 0.5556$, $\sin\phi = 0.4856$, $\cos\phi = 0.8742$

กรณีที่ 1 $n_f = 655 + 500 = 1155 \ kg/m^2$

$n_L = 480 + 500 = 980 \ kg/m^2$

กรณีที่ 2 $n_f = 655 + 500 = 1155 \ kg/m^2$

$n_L = 480 = 480 \ kg/m^2$

กรณีที่ 3 $n_f = 655 = 655 \ kg/m^2$

$n_L = 480 + 500 = 980 \ kg/m^2$

ค่าคงที่ $$K=\left(\frac{h_f}{h_L}\right)^3\left(\frac{b_1}{a}\right)\sec^2\phi=\left(\frac{0.20}{0.20}\right)^3\left(\frac{1.90}{4.118}\right)\frac{1}{0.8742^2}$$

$$K = 0.6037$$

พิจารณากรณีที่ 1 , $n_f = 1155$ kg/m^2 , $n_L = 980$ kg/m^2

$$H\cong\frac{n_L(b_1+b)\left(4+3\frac{b}{a}\sec\phi\right)+3n_f a\cos\phi}{2\tan\phi\left[4+\frac{3\left(\frac{b_1}{a}\right)^2}{\frac{0.72}{1+\left(\frac{h_f}{b}\right)^2}+\frac{1}{K}}\right]}$$

$$H\cong\frac{980(1.90+1.50)\left(4+3\times\frac{1.50}{4.118}\times\frac{1}{0.8742}\right)+3\times1155\times4.118\times0.8742}{2\times0.5556\times\left[4+\frac{3\times\left(\frac{1.90}{4.118}\right)^2}{\frac{0.72}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+\frac{1}{0.6037}}\right]}$$

$$H\cong6{,}725.41 \quad \text{kg/m}$$

$$M_0\cong\frac{Hb_1\tan\phi-\frac{1}{4}n_L\left(b_1^2-b^2\right)}{\frac{1.44K}{1+\left(\frac{h_f}{b}\right)^2}+2}$$

$$M_0\cong\frac{6{,}725.41\times1.90\times0.5556-\frac{1}{4}\times980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)}{\frac{1.44\times0.6037}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+2}$$

$$M_0\cong2{,}370.73 \quad \text{kg.m/m}$$

พิจารณาช่วง OB ระยะ y วัดจากจุด O

$$M_v=-M_0-\frac{1}{2}n_L y^2$$

$$M_h=-Hy$$

$$T=-\frac{1}{2}n_L by$$

ที่จุด O ค่า $y = 0$ ได้

$$M_v = -M_0 = -2{,}370.73 \quad kg \cdot m / m$$

$$M_h = 0$$

$$T = 0$$

ที่จุด B ค่า $y = \frac{b_1}{2} = \frac{1.90}{2} = 0.95 m.$

$$M_v = -2{,}370.73 - \frac{1}{2} \times 980 \times 0.95^2 = -2{,}812.96 \quad kg.m/m$$

$$M_h = -6{,}725.41 \times 0.95 = -6{,}389.14 \quad kg.m/m$$

$$T = -\frac{1}{2} \times 980 \times 1.50 \times 0.95 = -698.25 \quad kg.m/m$$

พิจารณาช่วง BC ระยะ y วัดจากจุด O

$$M_v = -\frac{1}{2} n_L \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - y \right]^2$$

$$M_h = 0$$

$$T = -\frac{1}{2} n_L b \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - y \right]$$

ที่จุด B ค่า $y = \frac{b_1}{2} = 0.95$ m.

$$M_v = -\frac{1}{2} n_L \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - \frac{b_1}{2} \right]^2 = -\frac{1}{8} n_L b^2 = -\frac{1}{8} \times 980 \times 1.50^2$$

$$M_v = -275.625 \quad kg \cdot m / m$$

$$M_h = 0$$

$$T = -\frac{1}{2} n_L b \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - \frac{b_1}{2} \right] = -\frac{1}{4} n_L b^2 = -\frac{1}{4} \times 980 \times 1.50^2$$

$$T = -551.25 \quad kg \cdot m / m$$

ที่จุด C ค่า $y = \frac{b_1}{2} + \frac{b}{2} = \frac{1}{2}(b_1 + b)$

$$M_v = -\frac{1}{2} n_L \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - \frac{1}{2}(b_1 + b) \right]^2 = 0$$

$$M_h = 0$$

$$T = -\frac{1}{2} n_L b \left[\frac{1}{2}(b_1 + b) - \frac{1}{2}(b_1 + b) \right] = 0$$

พิจารณาช่วง AB ระยะ x วัดจาก B

$$M_v = Hx\sin\phi - \frac{1}{2}n_L\left(b_1+b\right)\left(x\cos\phi+\frac{b}{2}\right) - \frac{1}{2}n_f x^2\cos^2\phi$$

$$M_h = -\frac{1}{2}Hb_1\cos\phi - \left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\sin\phi$$

$$T = -\frac{1}{2}Hb_1\sin\phi + \left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\cos\phi$$

$$M_v = 6{,}725.41x\times 0.4856 - \frac{1}{2}\times 980\times(1.90+1.50)\times\left(0.8742x+\frac{1.50}{2}\right)$$

$$-\frac{1}{2}\times 1155x^2\times 0.8742$$

$$M_v = 3{,}265.86x - 1{,}666(0.8742x+0.75) - 504.85x^2$$

M_h และ T ไม่ขึ้นกับระยะ x ดังนั้นค่าของ M_h และ T จะสม่ำเสมอตลอดความยาว

$$M_h = -\frac{1}{2}\times 6{,}725.41\times 1.90\times 0.8742 - \left[2370.73+\frac{1}{8}\times 980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)\right]\times 0.4856$$

$$M_h = -6{,}817.51 \quad kg\cdot m/m$$

$$T = -\frac{1}{2}\times 6{,}725.41\times 1.90\times 0.4856 + \left[2{,}370.73+\frac{1}{8}\times 980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)\right]\times 0.8742$$

$$T = -884.43 \quad kg.m/m$$

ที่จุด B ค่า x = 0

$$M_v = 3{,}265.86\times 0 - 1{,}666\times(0.8742\times 0+0.75) - 504.8\times 0^2 = -1249.5 \quad kg\cdot m/m$$

ที่จุด D ค่า $x = \frac{a}{2} = \frac{4.118}{2} = 2.059\,m$

$$M_v = 3{,}265.86x - 1{,}666(0.8742x+0.75) - 504.8x^2$$

$$M_v = 3{,}265.86\times 2.059 - 1{,}666\times(0.8742\times 2.059+0.75) - 504.8\times 2.059^2$$

$$M_v = 336.05 \quad kg\cdot m/m$$

ที่จุด A ค่า x = a = 4.118 m

$$M_v = 3{,}265.86x - 1{,}666(0.8742x+0.75) - 504.8x^2$$

$$M_v = 3{,}265.86\times 4.118 - 1{,}666\times(0.8742\times 4.118+0.75) - 504.8\times 4.118^2$$

$$M_v = -2{,}358.57 \quad kg\cdot m/m$$

สรุปผลเป็นตารางได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 , $n_f = 1155$ kg/m^2 , $n_L = 980$ kg/m^2

จุดที่พิจารณา		M_v kg.m/m	M_h kg.m/m	T kg.m/m
ช่วง OB	จุด O	-2,370.73	0	0
	จุด B	-2,812.96	-6,389.14	-698.25
	ค่าเฉลี่ย ที่ B	-1,544.29		
ช่วง BC	จุด B	-275.625	0	-551.250
	จุด C	0	0	0
ช่วง BA	จุด B	-1249.5	-6,817.51	-884.43
	จุด D	336.05	-6,817.51	-884.43
	จุด A	-2,358.57	-6,817.51	-884.43

ที่จุด B ช่วง OB กับ BC เฉลี่ย $= \dfrac{-2{,}812.96 - 275.625}{2} = -1{,}544.29$ kg.m/m

พิจารณากรณีที่ 2 , $n_f = 1{,}155$ kg/m^2 , $n_L = 480$ kg/m^2

$$H \cong \frac{480(1.90+1.50)\left(4+3\times\frac{1.50}{4.118}\times\frac{1}{0.8742}\right)+3\times1155\times4.118\times0.8742}{2\times0.5556\times\left[4+\frac{3\left(\frac{1.90}{4.118}\right)^2}{\frac{0.72}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+\frac{1}{0.6037}}\right]}$$

$$H \cong 2{,}971.76 \quad kg/m$$

$$M_0 \cong \frac{Hb_1\tan\phi - \frac{1}{4}n_L\left(b_1^2 - b^2\right)}{\frac{1.44K}{1+\left(\frac{h_f}{b}\right)^2}+2}$$

$$M_0 \cong \frac{2971.76\times1.90\times0.5556 - \frac{1}{4}\times480\times\left(1.90^2 - 1.50^2\right)}{\frac{1.44\times0.6037}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+2}$$

$M_0 \cong 1{,}041.96 \quad kg.m/m$

พิจารณาช่วง OB

จุด O , M_v = -1,041.96 kg.m/m

$M_h = 0$

$T = 0$

จุด B , $M_v = -1041.96 - \frac{1}{2} \times 480 \times 0.95^2 = -1{,}258.56 \quad kg \cdot m/m$

$M_h = -2971.96 \times 0.95 = -2{,}823.36 \quad kg \cdot m/m$

$T = -\frac{1}{2} \times 480 \times 1.50 \times 0.95 = -342 \quad kg \cdot m/m$

พิจารณาช่วง BC

จุด B , $M_v = -\frac{1}{8} \times 480 \times 1.50^2 = -135 \quad kg \cdot m/m$

$M_h = 0$

$T = -\frac{1}{4} \times 480 \times 1.50^2 = -270 \quad kg \cdot m/m$

จุด C , $M_v = 0$, $M_h = 0$, $T = 0$

พิจารณาช่วง BA

$$M_v = Hx\sin\phi - \frac{1}{2} n_L (b_1 + b)\left(x\cos\phi + \frac{b}{2}\right) - \frac{1}{2} n_f x^2 \cos^2\phi$$

$$M_h = -\frac{1}{2} Hb_1 \cos\phi - \left[M_0 + \frac{1}{8} n_L \left(b_1^2 - b^2\right)\right]\sin\phi$$

$$T = -\frac{1}{2} Hb_1 \sin\phi + \left[M_0 + \frac{1}{8} n_L \left(b_1^2 - b^2\right)\right]\cos\phi$$

$$M_v = 2971.76x \times 0.4856 - \frac{1}{2} \times 480 \times (1.90 + 1.50) \times \left(0.8742x + \frac{1.50}{2}\right)$$

$$- \frac{1}{2} \times 1155x^2 \times 0.8742$$

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x + 0.75) - 504.85x^2$$

$$M_h = -\frac{1}{2} \times 2971.76 \times 1.90 \times 0.8742 - \left[1041.96 + \frac{1}{8} \times 480 \times \left(1.90^2 - 1.50^2\right)\right] \times 0.4856$$

$M_h = -3{,}013.62 \quad kg \cdot m/m$

$$T = -\frac{1}{2} \times 2971.76 \times 1.90 \times 0.4856 + \left[1041.96 + \frac{1}{8} \times 480 \times \left(1.90^2 - 1.50^2\right)\right] \times 0.8742$$

$T = -388.72 \quad kg \cdot m/m$

ที่จุด B , x = 0

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x + 0.75) - 504.85x^2$$
$$M_v = 1{,}443.09 \times 0 - 816 \times (0.8742 \times 0 + 0.75) - 504.85 \times 0^2$$
$$M_v = -612 \ \ kg \cdot m / m$$

ที่จุด D , x = 2.059 m. กึ่งกลางระยะ AB พอดี

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x + 0.75) - 504.85x^2$$
$$M_v = 1{,}443.09 \times 2.059 - 816(0.8742 \times 2.059 + 0.75) - 504.85 \times 2.059^2$$
$$M_v = -1{,}249.76 \ \ kg \cdot m / m$$

ที่จุด A , x = 4.118 m.

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x + 0.75) - 504.85x^2$$
$$M_v = 1{,}443.09 \times 4.118 - 816 \times (0.8742 \times 4.118 + 0.75) - 504.85 \times 4.118^2$$
$$M_v = -6{,}168.13 \ \ kg \cdot m / m$$

สรุปผลเป็นตารางได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 n_f = 1,155 kg/m^2 , n_L = 480 kg/m^2

จุดที่พิจารณา		M_v kg.m/m	M_h kg.m/m	T kg.m/m
<u>ช่วง OB</u>	จุด O	-1,041.96	0	0
	จุด B	-1,258.56	-2,823.36	-342
	*ค่าเฉลี่ย*ที่ B	-696.78		
<u>ช่วง BC</u>	จุด B	-135	0	-270
	จุด C	0	0	0
<u>ช่วง BA</u>	จุด B	-612	-3,013.62	-388.72
	จุด D	-1,249.76	-3,013.62	-388.72
	จุด A	-6,168.13	-3,013.62	-388.72

ที่จุด B ช่วง OB กับ BC เฉลี่ย $M_v = \frac{-1{,}258.56 - 135}{2} = -696.78 \ \ kg \cdot m / m$

พิจารณากรณีที่ 3 , $n_f = 655\ kg/m^2$, $n_L = 980\ kg/m^2$

$$H \cong \frac{980\times(1.90+1.50)\left(4+3\times\frac{1.50}{4.118}\times\frac{1}{0.8742}\right)+3\times 655\times 4.118\times 0.8742}{2\times 0.5556\times\left[4+\frac{3\times\left(\frac{1.90}{4.118}\right)^2}{\frac{0.72}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+\frac{1}{0.6037}}\right]}$$

$$H \cong 5{,}177.43\ \ kg/m$$

$$M_0 \cong \frac{Hb_1\tan\phi-\frac{1}{4}n_L\left(b_1^2-b^2\right)}{\frac{1.44K}{1+\left(\frac{h_f}{b}\right)^2}+2}$$

$$M_0 \cong \frac{5177.43\times 1.90\times 0.5556-\frac{1}{4}\times 980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)}{\frac{1.44\times 0.6037}{1+\left(\frac{0.20}{1.50}\right)^2}+2}$$

$$M_0 \cong 1{,}798.19\ \ kg\cdot m/m$$

พิจารณาช่วง OB

จุด O , M_v = -1,798.19 kg.m/m

$M_h = 0$

$T = 0$

จุด B , $M_v = -1798.19-\frac{1}{2}\times 980\times 0.95^2 = -2{,}240.42\ \ kg\cdot m/m$

$M_h = -5177.43\times 0.95 = -4{,}918.56\ \ kg\cdot m/m$

$T = -\frac{1}{2}\times 980\times 1.50\times 0.95 = -698.25\ \ kg\cdot m/m$

พิจารณาช่วง BC

จุด B , $M_v = -\frac{1}{8}\times 980\times 1.50^2 = -275.63\ \ kg\cdot m/m$

$M_h = 0$

$T = -\frac{1}{4}\times 980\times 1.50^2 = -551.25\ \ kg\cdot m/m$

จุด C , $M_v = 0$, $M_h = 0$, $T = 0$

พิจารณาช่วง BA

$$M_v = Hx\sin\phi - \frac{1}{2}n_L(b_1+b)\left(x\cos\phi+\frac{b}{2}\right) - \frac{1}{2}n_f x^2\cos^2\phi$$

$$M_h = -\frac{1}{2}Hb_1\cos\phi - \left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\sin\phi$$

$$T = -\frac{1}{2}Hb_1\sin\phi + \left[M_0+\frac{1}{8}n_L\left(b_1^2-b^2\right)\right]\cos\phi$$

$$M_v = 5177.43x\times 0.4856 - \frac{1}{2}\times 980\times(1.90+1.50)\times\left(0.8742x+\frac{1.50}{2}\right)$$

$$-\frac{1}{2}\times 655x^2\times 0.8742$$

$$M_v = 1{,}443.09x - 1{,}666(0.8742x+0.75) - 286.3x^2$$

$$M_h = -\frac{1}{2}\times 5177.43\times 1.90\times 0.8742 - \left[1798.19+\frac{1}{8}\times 980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)\right]\times 0.4856$$

$$M_h = -5{,}253.91 \quad kg\cdot m/m$$

$$T = -\frac{1}{2}\times 5177.43\times 1.90\times 0.4856 + \left[1798.19+\frac{1}{8}\times 980\times\left(1.90^2-1.50^2\right)\right]\times 0.8742$$

$$T = -670.83 \quad kg\cdot m/m$$

ที่จุด B ช่วง OB กับ BC เฉลี่ย $M_v = \frac{-2{,}240.42-275.63}{2} = -1{,}258.03 \quad kg\cdot m/m$

ที่จุด B , x = 0

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x+0.75) - 286.3x^2$$

$$M_v = 1{,}443.09\times 0 - 816\times(0.8742\times 0+0.75) - 286.3\times 0^2$$

$$M_v = -612 \quad kg\cdot m/m$$

ที่จุด D , x = 2.059 m. กึ่งกลางระยะ AB พอดี

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x+0.75) - 286.3x^2$$

$$M_v = 1{,}443.09\times 2.059 - 816(0.8742\times 2.059+0.75) - 286.3\times 2.059^2$$

$$M_v = -323.22 \quad kg\cdot m/m$$

ที่จุด A , x = 4.118 m

$$M_v = 1{,}443.09x - 816(0.8742x+0.75) - 286.3x^2$$

$$M_v = 1{,}443.09\times 4.118 - 816\times(0.8742\times 4.118+0.75) - 286.3\times 4.118^2$$

$$M_v = -2{,}461.97 \quad kg\cdot m/m$$

สรุปผลได้ดังตารางต่อไปนี้

ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 3, n_f = 655 kg/m^2 , n_L = 980 kg/m^2

จุดที่พิจารณา		M_v kg.m/m	M_h kg.m/m	T kg.m/m
ช่วง OB	จุด O	-1,798.19	0	0
	จุด B	-2,240.42	-4,918.56	-698.25
	ค่าเฉลี่ย	-1,258.03		
ช่วง BC	จุด B	-275.63	0	-551.25
	จุด C	0	0	0
ช่วง BA	จุด B	-612	-5,253.91	-670.83
	จุด D	-323.22	-5,253.91	-670.83
	จุด A	-2,461.97	-5,253.91	-670.83

เปรียบเทียบทั้งสามกรณีแล้ว

ชานพัก จุด O , M_v = -2,370.73 kg.m/m

M_h = 0 , T = 0

จุด B , M_v = -1,544.29 kg.m/m

M_h = -6,389.14 kg.m/m

T = -698.25 kg.m/m

จุด C , M_v = 0 , M_h = 0 , T = 0

บันได จุด B , M_v = -1,249.5 kg.m/m

M_h = -6,817.51 kg.m/m

T = -884.43 kg.m/m

จุด D , M_v = 1,249.76 kg.m/m

M_h = -6,817.51 kg.m/m

T = -884.4 kg.m/m

จุด A , M_v = -6,168.13 kg.m/m

M_h = -6,817.51 kg.m/m

T = -884.43 kg.m/m

ในชานพักออกแบบให้รับค่าโมเมนต์

M_v = -2,370.73 kg.m/m

M_h = -6,389.14 kg.m/m

T = -884.43 kg.m/m

ในบันไดออกแบบให้รับค่าโมเมนต์

M_v = -6,168.13 kg.m/m

M_h = -6,817.51 kg.m/m

T = -884.43 kg.m/m

แต่เนื่องจากทั้งบันไดและชานพักต่างก็กว้าง 1.50 เมตร ค่าโมเมนต์จึงต้องคูณด้วยความกว้างดังกล่าว นั่นคือ

ในชานพัก

M_v = -1.50 × 2,370.73 = -3,556.10 kg.m

M_h = -1.50 × 6,389.14 = -9,583.71 kg.m

T = -1.50 × 884.43 = -1,326.65 kg.m

ในบันได

M_v = -1.50 × 6,168.13 = -9,252.20 kg.m

M_h = -1.50 × 6,817.51 = -10,226.27 kg.m

T = -1.50 × 884.43 = -1,326.65 kg.m

คำนวณพารามิเตอร์ในการออกแบบ

กำหนด f_c' = 240 ksc

f_y = 4000 ksc

f_c = $0.45f_c'$ ksc

f_c = 0.45 × 240 = 108 ksc

$v_c(\text{beam}) = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{240} = 4.493$ ksc

$v_c(\text{punching}) = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{240} = 8.211$ ksc

$v_c(\text{torsion}) = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{240} = 20.449$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{240}} = 8.72$$

$f_s = 0.5f_y \leq 1700$ ksc

f_s = 0.5 × 4000 = 2000 > 1700 ksc ใช้ f_s = 1700 ksc

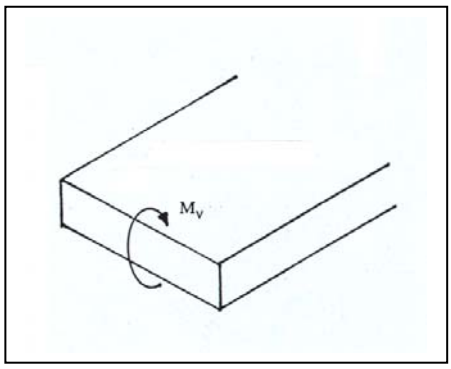
$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1700}{8.72\times 108}} = 0.356$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.356}{3} = 0.881$$

$$R=\frac{1}{2}f_c kj=\frac{1}{2}\times 108\times 0.356\times 0.881=16.936 \quad ksc$$

<u>ออกแบบชานพัก</u>

ผลของ M_v เป็นคานแบนกว้าง 1.50 เมตร ลึก 0.20 เมตร ความลึกประสิทธิผล d = 0.20 - 0.04 = 0.16 m และ d' = 0.04 m



$M = M_v = 3,556.10$ kg.m

$M_R = M_c = Rbd^2 = 16.936 \times 1.50 \times 16^2$

$M_R = 6,503.424$ kg.m > M

$$f_s^{'}=2f_s\frac{k-\frac{d'}{d}}{1-k}\le f_s$$

$$f_s^{'}=2\times 1700\times\frac{0.356-\frac{4}{16}}{1-0.356}=559.63 \quad ksc$$

$$A_{st}=\frac{M}{f_s jd}=\frac{355,610}{1700\times 0.881\times 16}=14.834 \ cm^2$$

$$A_{sc}=0$$

สำหรับชานพักต้องตรวจสอบ M_h = -9,583.71 kg.m เป็นคานกว้าง 0.20 m. (ขนาดใหม่) ลึก 1.50 m. , d = 1.40 m. , d' = 0.10 m.

$M_R = 16.936 \times 0.20 \times 140^2 = 66,389.12$ kg.m >> 9,583.71 kg.m OK

$$A_{st}=\frac{M}{f_s jd}=\frac{958,371}{1700\times 0.881\times 140}=4.571 \ cm^2$$

นำผลไปรวมโดยคิดเพียงครึ่งเดียวคือ

$$A_{st}=14.834+\frac{4.571}{2}=17.119 \ cm^2$$ ใช้เหมือนกันทั้งเหล็กบนและล่าง

ผลของ T จะต้องพิจารณาแรงเฉือน

$$v_t=\frac{3.5M_t}{\sum x^2 y}=\frac{3.5\times 132,665}{20^2\times 150}= \quad 7.739 \quad ksc.$$

$v_c(torsion) = 1.32\sqrt{f_c^{'}}=1.32\sqrt{240}= \quad 20.449$ ksc. > 7.739 ksc. OK

หาเหล็กเสริมแต่ละมุม

$$A_s=\frac{M_t z}{2A_c f_s}$$

$M_t = T = 132,665$ kg.cm

$z = \frac{(20-4-4)+(150-4-4)}{2} = 77$ cm.

$A_c = (20-4-4)(150-4-4) = 1{,}704$ cm^2

$f_s = 1700$ ksc.

$A_s = \frac{132{,}665 \times 77}{2 \times 1{,}704 \times 1{,}700} = 1.763$ cm^2

รวมผลกับเหล็กเสริมจากโมเมนต์ดัด

$$A_s = 17.119 + 2 \times 1.763 = 20.645 \ cm^2$$

เลือก DB 16 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01$ cm^2 จึงใช้จำนวน $\frac{20.645}{2.01} = 10.27 \Rightarrow 11$ เส้น ระยะเรียงโดยประมาณ $\frac{150}{11} = 13.64$ cm เสริมเหล็ก 11-DB 16 mm ทั้งสองชั้น

สำหรับเหล็กทางขวางของชานพักจะเกิดจากเหล็กตามยาวของตัวบันได แต่อาจจะคำนวณออกแบบเผื่อไว้ก่อนดังนี้

สมมติใช้ DB 12 mm เป็นเหล็กทางขวางของตัวชานพัก

$$A_v = \frac{\pi}{4} \times 1.2^2 = 1.131 \ cm^2$$

$f_v = 1700$ ksc

$A_c = (20-4-4)(150-4-4) = 1{,}704$ cm^2

$M_t = 132{,}665$ $kg_{\cdot cm}$

ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

$$s = \frac{2\sqrt{2}A_v A_c f_v}{M_t} = \frac{2\sqrt{2} \times 1.131 \times 1{,}704 \times 1{,}700}{132{,}665} = 69.85 \text{ cm} >> 15 \text{ cm}$$

ออกแบบพื้นบันได

ผลของ $M_v = 925{,}220 \ kg \cdot cm$ เป็นคานแบนกว้าง $b = 150$ m หนา $h_f = 20$ cm ความลึกประสิทธิผล $d = 16$ cm และความลึกเหล็กรับแรงอัด $d' = 4$ cm

$$M_R = Rbd^2 = 16.936 \times 150 \times 16^2 = 650{,}342 \ kg \cdot m < M$$

$$f_s' = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1700 \times \frac{0.356 - \frac{4}{16}}{1 - 0.356} = 559.63 \text{ ksc} < f_s = 1{,}700 \text{ ksc}$$

$$A_{st} = \frac{M_R}{f_s jd} + \frac{M - M_R}{f_s(d-d')} = \frac{650{,}342}{1{,}700 \times 0.881 \times 16} + \frac{925{,}220 - 650{,}342}{1{,}700(16-4)}$$

$$A_{st} = 40.614 \ cm^2$$

$$A_{sc} = \frac{M - M_R}{f_s'(d-d')} = \frac{925{,}220 - 650{,}342}{559.63(16-4)} = 40.932 \ cm^2 > A_{st}$$

การที่ $A_{sc} > A_{st}$ แสดงว่าแผ่นพื้นส่วนบันไดเล็กเกินไป แต่เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงไม่คำนวณใหม่ แต่จะเพิ่มความหนาเป็น 22 cm ทั้งชานพักและตัวบันได (ถ้าเปลี่ยนความหนาขึ้นมาก น้ำหนักแผ่นพื้นจะเปลี่ยนไปมากควรจะคำนวณใหม่)

ผลของ $M_h = 1{,}022{,}627 \ \text{kg}\cdot\text{cm}$ เป็นคานวางตัวแนวนอน กว้าง $b = 22 \ \text{cm}$ ลึก $h = 150 \ \text{m}$ ความลึกประสิทธิผล d = 146 cm ความลึกของเหล็กรับแรงอัด d' = 4 cm

$$f_s^{'} = 2f_s \frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} = 2 \times 1{,}700 \times \frac{0.356 - \frac{4}{146}}{1 - 0.356} = 1{,}735 \ \text{ksc} \Rightarrow f_s = 1{,}700 \ \text{ksc}$$

$$M_R = Rbd^2 = 16.936 \times 22 \times 146^2 = 7{,}942{,}171 \ \text{kg}\cdot\text{cm} >> M = 1{,}022{,}627 \ \text{cm}^2$$

ดังนั้น

$$A_{sc} = 0$$

$$A_{st} = \frac{M}{f_s jd} = \frac{1{,}022{,}627}{1{,}700 \times 0.881 \times 146} = 4.677 \ \text{cm}^2$$

นำผลเพียงครึ่งเดียวไปรวมกับผลของโมเมนต์ดัด M_v

$$A_s = 40.932 + \frac{4.677}{2} = 43.27 \ \text{cm}^2$$

ผลของโมเมนต์บิด $M_t = T = 132{,}665 \ \text{kg}\cdot\text{cm}$ ต้องพิจารณาแรงเฉือน

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} = \frac{3.5 \times 132{,}665}{22^2 \times 150} = 6.396 \ \text{ksc} < 1.32\sqrt{f_c^{'}} = 1.32\sqrt{240} = 20.449 \ \text{ksc}$$

หาเหล็กเสริมแต่ละมุม

$$A_s = \frac{M_t z}{2A_c f_s}$$

$$M_t = T = 132{,}665 \ \text{kg}\cdot\text{cm}$$

$$z = \frac{(22-4-4)+(150-4-4)}{2} = 78 \ \text{cm}$$

$$A_c = (22-4-4)(150-4-4) = 1{,}988 \ \text{cm}^2$$

$$f_s = 1{,}700 \ \text{ksc}$$

$$A_s = \frac{132{,}665 \times 78}{2 \times 1{,}988 \times 1{,}700} = 1.531 \ \text{cm}^2$$

นำไปรวมกับผลของโมเมนต์ดัดโดยคิดสองมุม

$$A_s = 43.27 + 2 \times 1.531 = 46.332 \ \text{cm}^2$$

เลือก DB 16 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01 \ \text{cm}^2$ ใช้จำนวนเส้น $= \frac{46.332}{2.01} = 23.05 \Rightarrow 24$ เส้น ระยะเรียง $s = \frac{150}{24} = 6.25 \ \text{cm}$ ซึ่งค่อนข้างถี่ แต่คอนกรีตยังเทผ่านได้

สมมติใช้ DB 12 mm เป็นเหล็กทางขวางของตัวพื้นบันได

$$A_v = \frac{\pi}{4} \times 1.2^2 = 1.131 \ \text{cm}^2$$

$$f_v = 1700 \ \text{ksc}$$

$$A_c = (22 - 4 - 4)(150 - 4 - 4) = 1{,}988 \ \text{cm}^2$$

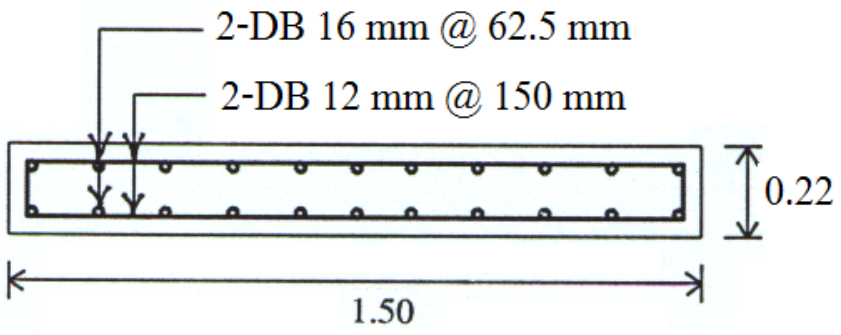
$$M_t = 132{,}665 \ \text{kg}_{\cdot\text{cm}}$$

ระยะเรียงของเหล็กทางขวาง

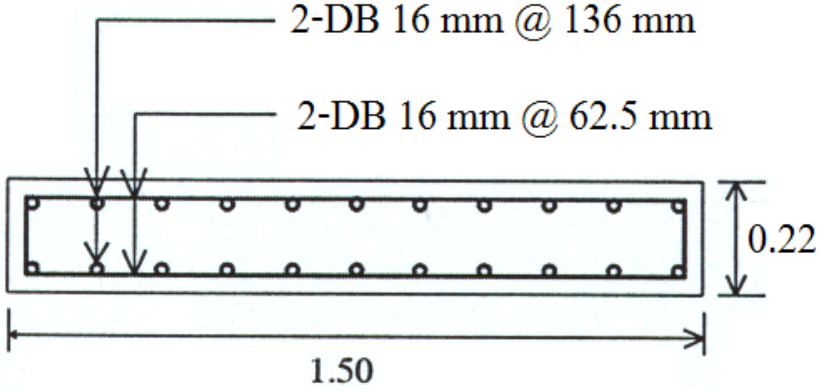
$$s = \frac{2\sqrt{2} A_v A_c f_v}{M_t} = \frac{2\sqrt{2} \times 1.131 \times 1{,}988 \times 1{,}700}{132{,}665} = 81.49 \ \text{cm} >> 15 \ \text{cm}$$

เหล็กทางขวางพื้นบันได DB 12 mm @ 150 mm

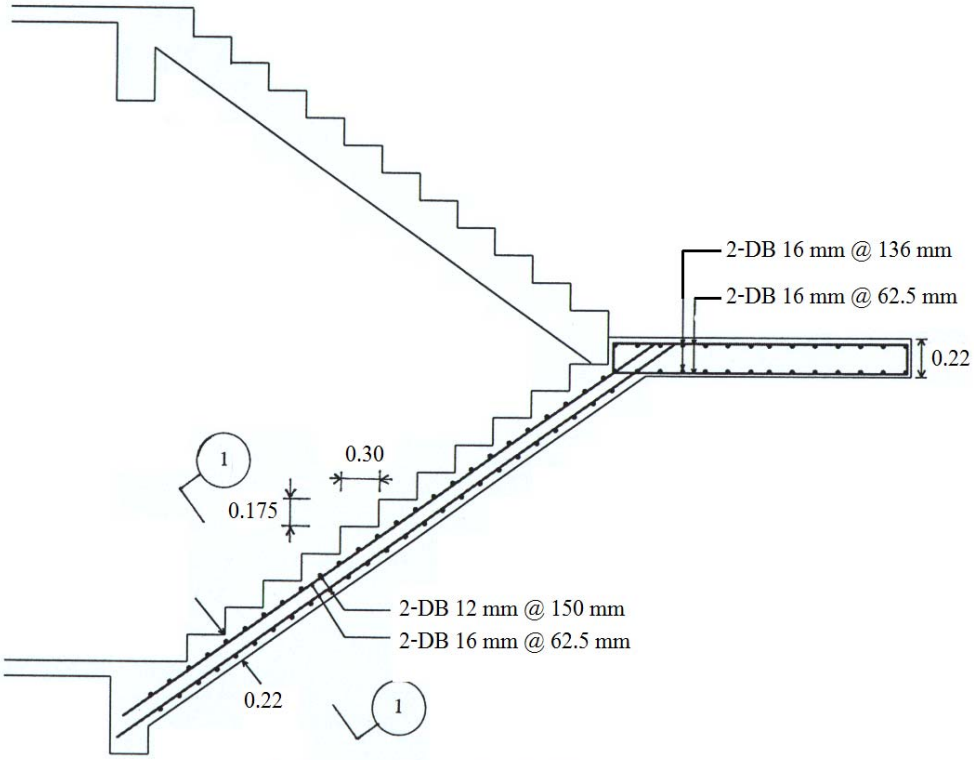
แสดงรายละเอียดโครงสร้างดังรูป



รูปตัดแสดงรายละเอียดส่วนพื้นบันได



รูปตัดแสดงรายละเอียดส่วนชานพัก



รูปตัดตามยาว บันไดชานพักลอย

แบบฝึกหัดบทที่ 4

ในการออกแบบบันไดต่อไปนี้ให้ออกแบบตามมาตรฐาน วสท. โดยให้กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานอายุ 28 วัน $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม SD-30 , $f_y = 3{,}000$ ksc เหล็กทางขวางอาจจะเลือก SR-24 , $f_{sy} = 2{,}400$ ksc

[1] ให้ออกแบบบันไดท้องเรียบวางพาดบนคานที่ปลายทั้งสองข้าง ความสูงระหว่างชั้น 3.50 เมตร ช่วงยาวบันได ความกว้างสุทธิของบันได 1.50 เมตร ช่องว่างระหว่างตัวบันไดที่กลางชานพัก 0.20 เมตร ความกว้างของเสา 0.30 เมตร ทำให้ปล่องบันไดกว้าง 3.50 เมตร วัดระหว่างศูนย์กลางเสา ความยาวของบันไดระหว่างคานที่พาดปลายบันได 4.00 เมตร คานปลายบันได กว้าง 0.25 เมตรทั้งสองปลาย ขนาดลูกตั้ง 0.175 เมตร ลูกนอน 0.25 เมตร มี 1 ชานพัก อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

[2] ให้ออกแบบบันไดพับผ้าวางพาดบนคานที่ปลายทั้งสองข้าง ความสูงระหว่างชั้น 3.50 เมตร ช่วงยาวบันได ความกว้างสุทธิของบันได 1.50 เมตร ช่องว่างระหว่างตัวบันไดที่กลางชานพัก 0.20 เมตร ความกว้างของเสา 0.30 เมตร ทำให้ปล่องบันไดกว้าง 3.50 เมตร วัดระหว่างศูนย์กลางเสา ความยาวของบันไดระหว่างคานที่พาดปลายบันได 4.00 เมตร คานปลายบันได กว้าง 0.25 เมตรทั้งสองปลาย ขนาดลูกตั้ง 0.175 เมตร ลูกนอน 0.25 เมตร มี 1 ชานพัก อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

[3] ให้ออกแบบบันไดแบบมีคานกลาง ความกว้างบันได 2.00 เมตร ความสูงระหว่างชั้น 3.50 เมตร ลูกตั้ง 0.175 เมตร ลูกนอน 0.25 เมตร มีชานพักทั้งสองปลายความยาวบันได 5.25 เมตร อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

[4] ให้ออกแบบบันไดแบบยื่นจากคานในผนัง ความกว้างบันได 1.50 เมตร ความสูงระหว่างชั้น 3.50 เมตร ลูกตั้ง 0.175 เมตร ลูกนอน 0.25 เมตร มีชานพักทั้งสองปลายความยาวบันได 5.25 เมตร อาคารสาธารณะ น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m^2

[5] ให้ออกแบบบันไดแบบมีแม่บันไดสองข้าง ความกว้างบันได 3.00 เมตร ราวบันไดก่ออิฐหนา 0.30 เมตรสูง 1.00 เมตร น้ำหนัก 720 kg/m น้ำหนักบรรทุกจร 500 kg/m^2 ความสูง 1.35 เมตร ลูกตั้ง 0.15 เมตร ลูกนอน 0.30 เมตร ไม่มีชานพัก

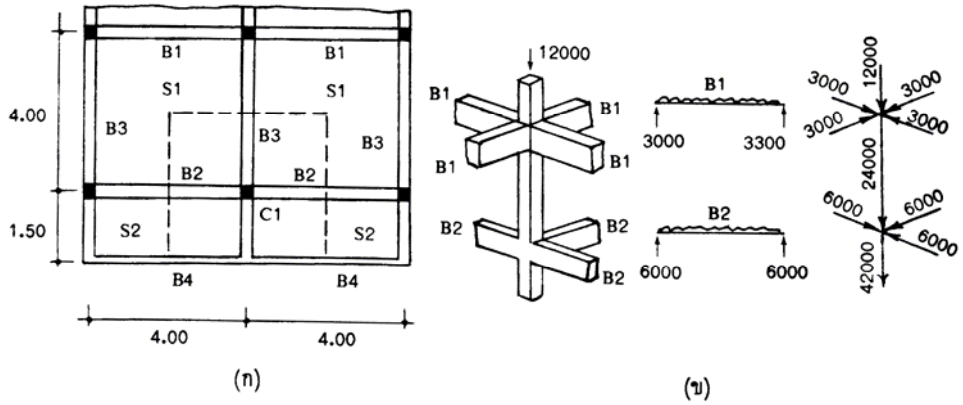
[6] ให้ออกแบบบันไดเวียนกว้าง 1.50 เมตร ความสูงระหว่างชั้น 3.50 เมตร ทั้งแบบท้องเรียบ และแบบมีคานกลาง น้ำหนักบรรทุกจร 300 kg/m^2 มุมระหว่างคานล่างกับคานบน 120 องศา

5

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.1 การถ่ายน้ำหนักจากคานและพื้นลงเสา

เสาเป็นองค์อาคารที่รับน้ำหนักในแนวดิ่ง แรงเฉือนจากแรงทางข้างเช่นแรงลม แผ่นดินไหว โมเมนต์ดัด และส่วนน้อยจากโมเมนต์บิดที่เกิดจากการไม่สมมาตรของรูปทรงอาคารทำให้เกิดการบิดตัวขณะรับแรงทางข้าง ในขั้นต้นจะเสนอแนะวิธีถ่ายน้ำหนักแนวดิ่งจากคานและพื้นลงเสาซึ่งมีสองวิธีตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การถ่ายน้ำหนักจากคานและพื้นลงเสา

วิธีแบ่งพื้นที่เป็นวิธีแรกที่นิยมใช้ดังรูปที่ 5.1(ก) โดยโยงเส้นแบ่งครึ่งระหว่างแนวเสาตามแนวเส้นประ โดยไม่แบ่งระหว่างคาน B2 กับ B4 เนื่องจาก B4 ไม่สามารถทรงตัวลอยในอากาศได้ต้องฝากผ่านคาน B3 ไปไว้ที่เสา C1 พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง $\frac{4.00}{2}+1.50=3.50$ m ยาว $\frac{4.00}{2}+\frac{4.00}{2}=4.00$ m คาน B2 และ B4 ยาว 4.00 เมตร คาน B3 ยาว 3.50 เมตร น้ำหนักทั้งหมดในสี่เหลี่ยมนี้จะถ่ายลงเสา C1 ถ้าพื้น S1 และ S2 หนา 0.10 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m^2 คาน B2 และ B3 มีขนาด 0.20×0.50 โดยมีผนังอิฐมอญครึ่งแผ่นสูง 2.50 เมตร คาน B4 ขนาด 0.20×0.40 มีครีบขนาด 0.10×0.70 ตั้งอยู่โดยไม่รวมความลึกของคาน หาน้ำหนักลงเสา C1 ได้ดังนี้

พื้น S1 และ S2 ต่างมีความหนา 0.10 เมตร น้ำหนักของคอนกรีตพื้นเอง $2400\times0.10=240$ kg/m^2 น้ำหนักบรรทุกจรอีก 200 kg/m^2 รวมเป็น 440 kg/m^2 พื้นที่กว้าง 3.50 เมตร ยาว 4.00 เมตร น้ำหนักลงเสา C1 จากพื้นคือ

$$w_s = 440 \times (3.50 \times 4.00) = 6{,}160 \text{ kg}$$

คาน B2 ยาว 4.00 เมตร กว้าง 0.20 เมตร ลึก 0.50 เมตร ผนังอิฐมอญครึ่งแผ่นสูง 2.50 เมตร มีน้ำหนักลงเสา C1 คือ

$$w_{B2} = 2400 \times 0.20 \times 0.50 \times 4.00 + 180 \times 2.50 \times 4.00 = 2{,}760 \text{ kg}$$

คาน B3 ยาว 3.50 เมตร กว้าง 0.20 เมตร ลึก 0.50 เมตร มีผนังอิฐมอญครึ่งแผ่นสูง 2.50 เมตร มีน้ำหนักลงเสา C1 คือ

$$w_{B3} = 2400 \times 0.20 \times 0.50 \times 3.50 + 180 \times 2.50 \times 3.50 = 2{,}415 \text{ kg}$$

คาน B4 ยาว 4.00 เมตร กว้าง 0.20 เมตร ลึก 0.40 เมตร มีครีบ คสล. หนา 0.10 เมตร สูง 0.70 เมตร น้ำหนักลงเสา C1 คือ

$$w_{B4} = 2400 \times 0.20 \times 0.40 \times 4.00 + 2400 \times 0.10 \times 0.70 \times 4.00 = 1{,}400 \text{ kg}$$

รวมน้ำหนักลง C1

$$P_{C1} = 6{,}160 + 2{,}760 + 2{,}415 + 1{,}440 = 12{,}775 \text{ kg}$$

วิธีนี้แม้จะดูยุ่งยากและใช้เวลามาก ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่คำนึงถึงการกระจายซ้ำแล้ว มีประโยชน์ในอาคารสูงหลายๆ ชั้น ที่ข้อบัญญัติอนุญาตให้ลดน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อเป็นการประหยัดฐานราก

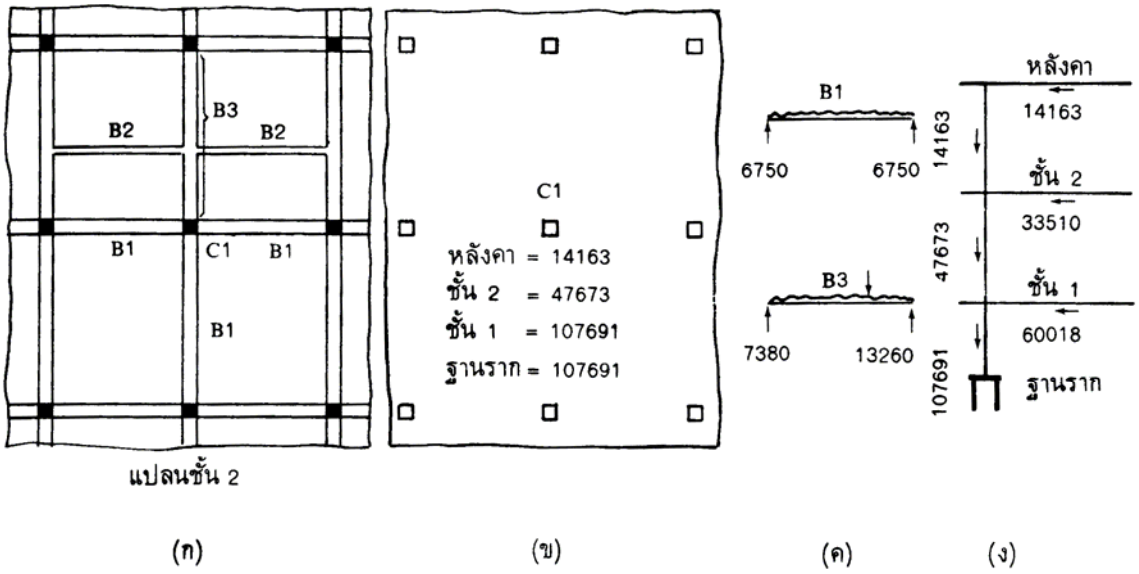
วิธีที่สองตามรูปที่ 5.1(ข) น้ำหนักจากเส้าชั้นบนถ่ายรวมกันลงมา 12,000 kg มีคาน B1 สี่ตัวมาฝากเสา (โดยดูจากแปลนของแต่ละชั้นที่ออกแบบไว้แล้ว) จากรายการคำนวณได้แรงปฏิกิริยาที่ปลายคาน B1 เป็น 3,000 kg เสาชั้นล่างมีคาน B2 สามตัวมาฝากที่เสา แรงปฏิกิริยาที่ปลายคาน B2 เป็น 6,000 kg ขียนแผนภาพการถ่ายน้ำหนักดังรูปขวาสุด น้ำหนักลงเสา 24,000 kg ได้มาจาก 12,000 + 4×3,000 และน้ำหนัก 42,000 kg ได้มาจาก 24,000 + 3×6,000 สังเกตว่าไม่ได้คิดน้ำหนักของตัวเสาเนื่องจากน้ำหนักที่เสาจะต้องรับมากกว่าน้ำหนักของตัวเสาเองและค่าที่นำมาคำนวณก็เป็นค่าที่มากเกินจริงอยู่บ้างแล้ว วิธีนี้เร็วกว่าวิธีแรกและสื่อความหมายดีกว่า ตรวจสอบง่ายกว่า

ในการปฏิบัติงานจริงนั้นทั้งสองวิธีก็ยังช้า แต่ถ้าจะให้ได้ผลจริงควรใช้ทั้งสองวิธีผสมกันและดัดแปลงอีกเล็กน้อยดังนี้

1. หลังจากวิเคราะห์ออกแบบพื้นและคานรวมทั้งโครงหลังคาเรียบร้อยแล้ว ขณะนี้มีแปลนโครงสร้างในกระดาษลอกลายทุกชั้นแล้ว มีรายการคำนวณออกแบบพื้น คาน บันได ครีบ ห้องมั่นคง ถังเก็บน้ำ ฯลฯ ให้ใช้กระดาษลอกลายทาบบนแบบ ลอกเฉพาะหัวเสาทุกต้นที่มี ควรจะลอกจากแบบชั้นล่างสุด จะมีหัวเสาครบทุกต้น

2. เอาแปลนหัวเสาเทียบกับแปลนแต่ละชั้นโดยเริ่มจากหลังคาลงมา ในแปลนแต่ละชั้นจะมีคานต่างๆ ไปฝากเสาที่กำลังพิจารณา ดูรายการคำนวณของคานที่ฝากเสาอยู่นั้นจะมีแรงปฏิกิริยา หรืออาจจะระบุแรงเฉือนที่ต้องแปลงเครื่องหมายให้เป็นแรงปฏิกิริยา รวมน้ำหนักจากปลายคานลงเสาเขียนไว้ใต้หรือข้างๆ

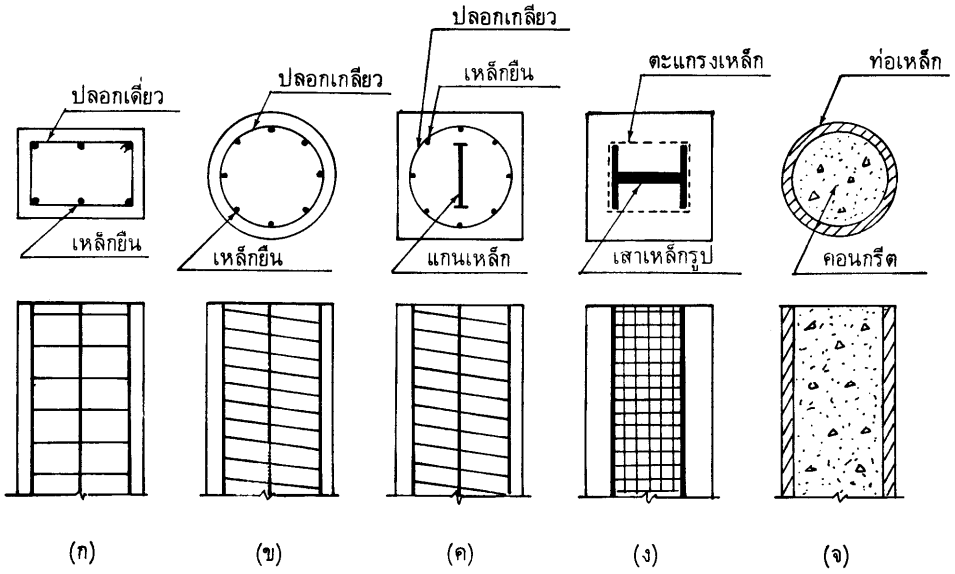
3. ในเสาชั้นถัดลงไป เมื่อรวมน้ำหนักจากปลายคานแล้ว ให้รวมกับน้ำหนักในเสาบนด้วย ทำจนถึงฐานราก เสร็จแล้วจึงจะทำการคำนวณออกแบบเสาต่อไป



รูปที่ 5.2 การถ่ายน้ำหนักลงเสา

พิจารณารูปที่ 5.2(ก) เป็นแปลนชั้นสองของอาคารหลังหนึ่ง ต้องกาหาน้ำหนักลงบนเสา ในรูปที่ 5.2(ข) เป็นแปลนหัวเสาไม่แสดงคาน ย้อนกลับไปดูรูปที่ 5.2(ก) เสา C1 มีคาน B1 สามตัว และคาน B3 หนึ่งตัวมาฝาก รูปที่ 5.2(ค) ได้จากรายการคำนวณคาน สมมติชั้นหลังคามีน้ำหนักลงเสา C1 จำนวน 14,163 kg เขียนในรูปที่ 5.2(ข) และ (ง) เสาระหว่างชั้นสองกับหลังคาเป็นผู้รับเอาไว้ รูป 5.2(ก) น้ำหนักจากคาน B1 และ B3 ถ่ายลงเสา C1 คือ $3\times 6{,}750+13{,}260=33{,}510$ kg รวมกับน้ำหนักหลังคาเป็น 14,163 + 33,510 = 47,673 kg .สังเกตคาน B3 ในรูปที่ 5.2(ก) มีคาน B2 มาฝากค่อนมาทาง C1 เมื่อดูที่รูป 5.2(ค) จึงใช้น้ำหนัก 13,216 kg แทนที่จะใช้ 7,380 kg เขียนน้ำหนักชั้น 2 ในรูปที่ 5.2(ข) เป็น 47,673 kg เสาระหว่างชั้นสองกับชั้นหนึ่งเป็นผูรับน้ำหนักชั้นสองดังรูปที่ 5.2(ง) ทำเช่นเดียวกันนี้กับชั้นหนึ่ง สมมติน้ำหนักจากคานชั้นหนึ่งถ่ายลงเสา C1 เป็น 60,018 kg ตามรูปที่ 68(ง) รวมกับน้ำหนักระหว่างเสาชั้นหนึ่งกับชั้นสองเป็น 60,018 + 47,673 = 107,691 kg เขียนในแปลนหัวเสาตามรูปที่ 5.2(ข) โดยตอม่อระหว่างฐานรากกับชั้นหนึ่งเป็นผู้รับไว้ดังรูปที่ 5.2(ง) ในกรณีตัวอย่างนี้ไม่มีชั้นใต้ดินหรือถังเก็บน้ำใต้ดิน จึงเขียนน้ำหนักลงฐานรากเป็น 107,691 kg ตามรูปที่ 5.2(ข) เสาต้นอื่นๆ ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน

5.2 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 5.3 ประเภทของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

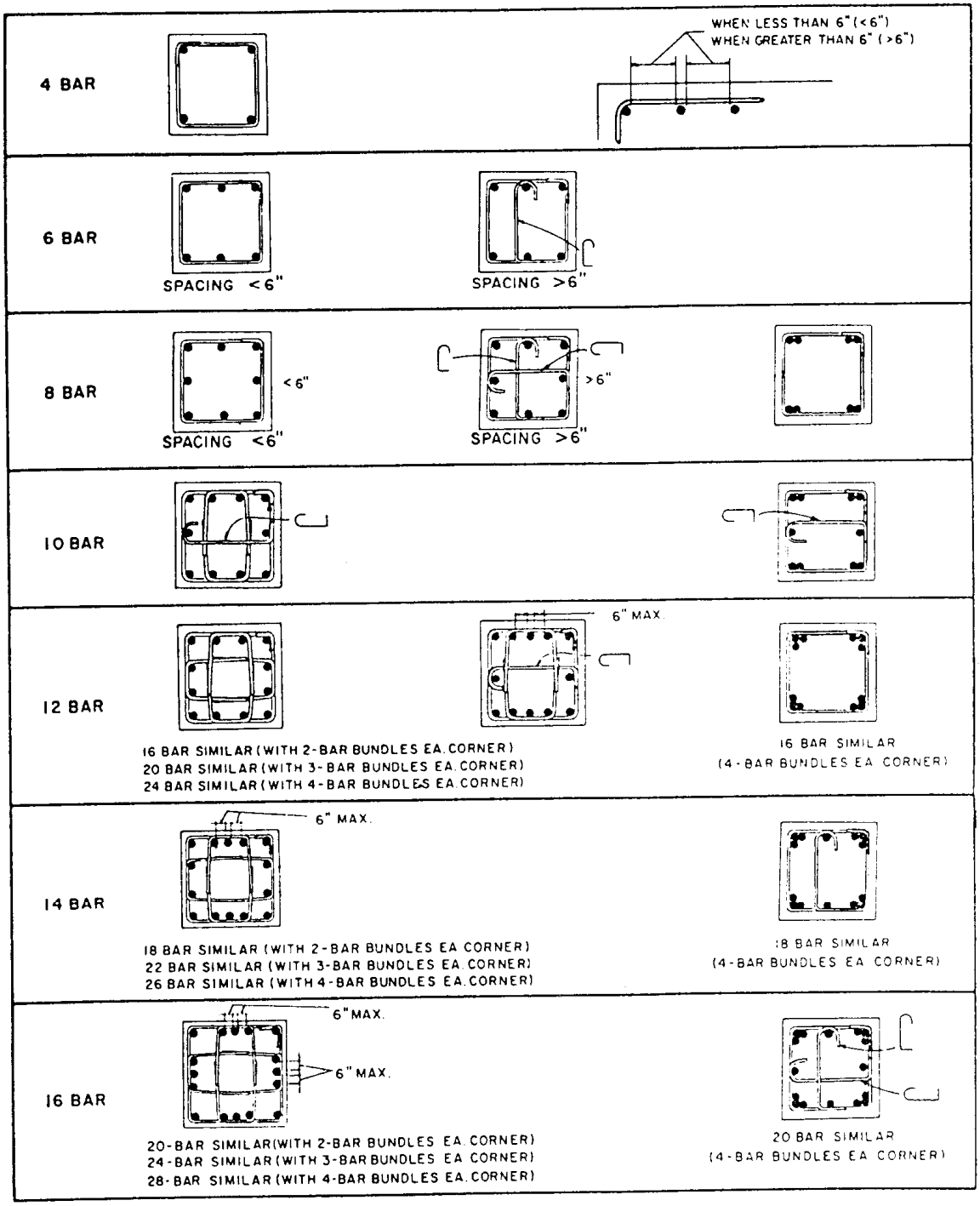
เสาปลอกเดี่ยว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยืนโดยมีปลอกรัดเป็นวงๆ เหล็กปลอกที่รัดอาจจะเป็นวงเดียวหรือหลายๆ วงก็ได้ ลักษณะของเหล็กปลอกควรจะงอฉากคล้องเหล็กยืน โดยที่เหล็กยืนห่างกันไม่เกิน 15 cm ให้คล้องอย่างน้อยเส้นเว้นเส้น แต่ถ้าห่างเกิน 15 cm ต้องคล้องเหล็กยืนทุกเส้น ใช้ในงานอาคารทั่วไป ดังรูปที่ 5.3(ก)

เสาปลอกเกลียว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยืนมีปลอกเป็นเกลียวรัดต่อเนื่อง เสาแบบนี้รับน้ำหนักได้มากกว่าเสาปลอกเดียวประมาณ 15 % นิยมใช้กับเสากลมหรือเสาหลายเหลี่ยม ที่แกนในเป็นทรงกระบอก ดังรูปที่ 5.3(ข)

เสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5.3(ค) เหมือนเสาปลอกเกลียว แต่มีเหล็กรูปพรรณ H เสริมแกนกลาง เนื้อที่หน้าตัดแกนเหล็กจะมีขนาดไม่มากนักหากเทียบกับหน้าตัดเสา แต่ถ้าเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณมีขนาดโตมากพอๆ กับขนาดเสา จะเป็นเสาเหล็กโดยมีคอนกรีตเป็นวัสดุหุ้มกันไฟและสนิม เสาชนิดนี้นิยมใช้กับการที่ต้องการลดขนาดหน้าตัดเสาให้เหมาะกับรูปแบบทางสถาปัตยกรรม

เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ดังรูปที่ 5.3(ง) คล้ายกับเสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็ก แต่เสาเหล็กที่เป็นแกนนิยมประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กหนา (built-up section) พันรอบด้วยตะแกรงเหล็กเบอร์ 10 AS&W Gage และมีคอนกรีตกำลังสูงหุ้มไม่น้อยกว่า 6 cm ที่ใช้วิธีพ่นคอนกรีตหุ้ม เสาชนิดนี้นิยมใช้ในกรณีต้องการหน้าตัดเล็กแต่รับน้ำหนักมากๆ

เสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก ดังรูปที่ 5.3(จ) เป็นเสาที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น ค้ำยันชายคา ปลายล่างที่ฝังในพื้นคอนกรีตหรือฐานรากต้องมีแผ่นเหล็กนาไม่น้อยกว่า 9 mm เชื่อมติดเพื่อกระจายน้ำหนักหรือแรงเฉือนเจาะทะลุให้พอเหมาะ



รูปที่ 5.4 ลักษณะการจัดเหล็กในเสา

รูปที่ 5.4 แสดงการจัดเหล็กยืนในเสาแบบต่างๆ สังเกตว่าเหล็กปลอกจะงอฉากคล้างเหล็กทุกเส้น หากห่างกันเกิน 15 cm แต่จะเส้นเว้นเส้นถ้าห่างกันไม่เกิน 15 cm รวมทั้งการรวบเป็นกำ (bundle)

5.3 เสาสั้นรับน้ำหนักตามแกน

ในอาคารขนาดเล็กหรืออาคารที่มีความกว้างยาวมากแต่ความสูงน้อย เช่นห้างสรรพสินค้าสูง 1-3 ชั้น ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสามีค่าน้อย ขนาดหน้าตัดโตพอที่จะมีความชะลูดไม่มากเกินขีดจำกัด ถือว่าเป็นเสาสั้น น้ำหนักตามแกนที่เสารับได้ดังนี้

เสาปลอกเกลียว

$$P = A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_t\right) = 0.25A_gf_c^{'} + f_sA_{st} \qquad (5.1)$$

เสาปลอกเดี่ยว

$$P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_t\right) = 0.2125A_gf_c^{'} + 0.85f_sA_{st} \qquad (5.2)$$

เมื่อ $P =$ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแนวแกน, kg

$A_g =$ เนื้อที่หน้าตัดเสาคอนกรีต (ไม่รวมปูนฉาบ) , cm^2

$f_c^{'} =$ กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน , ksc

$A_{st} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนทั้งหมด, cm^2

$\rho_t = \dfrac{A_{st}}{A_g} =$ อัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนต่อหน้าตัดเสา โดยต้อง $0.01 \le \rho_t \le 0.08$

ในกรณีที่ $\rho_t < 0.01$ ให้ลด A_g เหลือเพียง $\dfrac{A_g}{2}$ แล้วคำนวณใหม่

$f_s = 0.4f_y \le 2100$ ksc $=$ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเหล็กยืน

$f_s = 1200$ ksc สำหรับเหล็กผิวเรียบ SR-24

ในการออกแบบนั้นจะสมมติค่า $\rho_t = 0.04$ แทนค่า P ด้วยน้ำหนักที่ลงเสา แล้วหาค่าหน้าตัดเสา A_g แล้วจัดหน้าตัดให้มีเนื้อที่หน้าตัดมากกว่า A_g จะทำให้ได้ $\rho_t < 0.04$ เมื่อนำไปหาหน้าตัดเหล็กจะทำให้เหล็กไม่แน่นเกินไป จัดง่าย เช่นน้ำหนักลงเสา 248 ตัน $f_c^{'} = 280$ ksc, $f_y = 5000$ ksc ออกแบบเสาปลอกเดี่ยว

ให้ $\rho_t = 0.04$ ค่า $f_s = 0.4f_y = 0.4 \times 5{,}000 = 2{,}000$ ksc $< 2{,}100$ ksc

$$P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_t\right)$$

$$248{,}000 = 0.85A_g\left(0.25 \times 280 + 2{,}000 \times 0.04\right) = 127.5A_g$$

$$A_g = \frac{248{,}000}{127.5} = 1{,}945 \text{ cm}^2$$

$$b = t = \sqrt{1{,}945} = 44.1 \text{ cm}$$

ถ้าอาคารอยู่ในบริเวณแผ่นดินไหว ขนาดด้านแคบของคานและเสาห้ามเล็กกว่า 0.30 เมตร (UBC-1997)

เลือกหน้ากว้างเสา 0.40 เมตร ดังนั้นด้านลึกอย่างน้อย $\frac{1,945}{40} = 48.625$ cm ใช้ 0.50 เมตร

$$A_g = 40 \times 50 = 2,000 \text{ cm}^2$$

$$248,000 = 0.85 \times 2,000(0.25 \times 280 + 2,000\rho_t)$$

$$\rho_t = \frac{1}{2,000}\left(\frac{248,000}{0.85 \times 2,000} - 0.25 \times 280\right)$$

$$\rho_t = 0.037941176$$

$$0.01 < \rho_t < 0.08$$

$$A_{st} = \rho_t A_g = 0.037941176 \times 2,000 = 75.882 \text{ cm}^2$$

เหล็ก DB 25 mm แต่ละเส้นมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \text{ cm}^2$ ต้องใช้จำนวน $\frac{75.882}{4.909} = 15.45 = 16$ เส้น ควรเป็นเลขที่หารด้วย 4 ลงตัว หรืออย่างน้อยหารด้วย 2 ลงตัว

เหล็กยืนขนาดไม่เล็กกว่า 12 mm เหล็กปลอกเดี่ยวใช้ขนาดไม่เล็กกว่า 6 mm เมื่อเหล็กยืนไม่เกิน 20 mm ถ้าเกินกว่านั้นเหล็กปลอกต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 9 mm

เสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็ก นิยมใช้กับเสาที่มีแป้นหูช้าง เป็นเสาปลอกเกลียวธรรมดา เสริมเหล็กหล่อหรือเหล็กรูปเป็นแกนกลางเสา กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ดังสมการ

$$P = 0.225A_g f_c' + f_s A_{st} + f_r A_r \qquad (5.3)$$

เมื่อ $P =$ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน, kg

$A_g =$ เนื้อที่หน้าตัดเสาส่วนที่เป็นคอนกรีต , cm^2

$A_{st} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืน , cm^2

$A = A_g + A_{st} + A_r =$ เนื้อที่หน้าตัดเสา , cm^2

$A_r \le 0.2A =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กแกนเสา , cm^2

$f_s = 0.4f_y =$ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเหล็กยืน , ksc

$f_s = 1,200$ ksc สำหรับเหล็กผิวเรียบ SR-24

$f_s = 0.4f_y \le 2,100$ ksc สำหรับเหล็กข้ออ้อย

$f_r = 1,250$ ksc $=$ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กแกน ASTM A36

$f_r = 1,100$ ksc $=$ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กแกน ASTM A7

$f_r = 700$ ksc $=$ หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กแกนที่เป็นเหล็กหล่อ

ต้องให้เสามีสมบัติตามสมการ 5.3 ตลอดทั้งต้น ส่วนที่เป็นคอนกรีตเสริมเหลกต้องออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกจากแป้นหูช้างที่เชื่อมติดกับเหล็กแกน โดยหน่วยแรงของส่วนนี้ไม่เกิน $0.35f_c'$ เมื่อเทียบกับหน้าตัด A_g

เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมแกนต้องไม่เกิน 20% ของหน้าตัดเสา หรือ $A_r \le 0.2A$ ถ้าแกนเป็นท่อกลวงต้องเทคอนกรีตให้เต็ม ช่องว่างระหว่างเหล็กปลอกเกลียวกับเหล็กเสริมแกนต้องมากกว่า 7.5 cm แต่ถ้าเหล็กเสริมแกนเป็นตัว H ช่องว่างส่วนที่แคบที่สุดต้องมากกว่า 5 cm แป้นหูช้างเชื่อมติดกับเหล็กเสริมแกนด้านบนให้ตรงกับกึ่งกลางความหนาของพื้น เหล็กเสริมแกนต้องรับน้ำหนักต่างๆ ระหว่างการก่อสร้างได้อย่างปลอดภัยก่อนเทคอนกรีตหุ้ม

เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เป็นเสาเหล็กรูปที่มีคอนกรีตหุ้มไม่น้อยกว่า 6 cm (ไม่รวมหัวหมุดย้ำหรือ strut) คอนกรีตต้องมีกำลัง $f_c' > 200$ ksc ที่ระยะ 2.5 m จากผิวคอนกรีตต้องเสริมตาข่ายเบอร์ 10 AS&W Gage รอบเสาและเหลื่อมซ้อนกันมากกว่า 40 เท่าของขนาดลวด เหล็กที่พันรอบเสาห่างกันไม่เกิน 10 cm เหล็กยืนห่างกันไม่เกิน 20 cm ศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง ต้องออกแบบเหล็กรูปให้รับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ได้อย่างปลอดภัยก่อนเทคอนกรีตหุ้ม กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้สำหรับเสาประเภทนี้คือ

$$P = A_r f_r' \left(1 + \frac{A_g}{100 A_r} \right) \tag{5.4}$$

เมื่อ P = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้, kg

A_r = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรูป, cm^2

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา, cm^2

f_r' = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กรูป ตามสมการ (5.6)

เสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก เป็นเสาที่รับน้ำหนักไม่มากนัก โดยเทคอนกรีตลงในท่อให้เต็ม ปลายล่างมีแผ่นเหล็กหนา 6-10 mm แผ่น้ำหนักแบกทานแก่คอนกรีตได้อย่างปลอดภัย กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาประเภทนี้คือ

$$P = 0.25 f_c' A_c \left[1 - \frac{1}{40{,}000} \left(\frac{h}{K_c} \right)^2 \right] + f_r' A_r \tag{5.5}$$

เมื่อ

$$f_r' = 1{,}195 - 0.0342 \left(\frac{h}{K_s} \right)^2 \tag{5.6}$$

โดยที่ต้องให้ $\dfrac{h}{K_s} < 120$

f_c' = กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

h = ความยาวของเสา, cm

K_c = รัศมีไจเรชันของส่วนที่เป็นคอนกรีต, cm

K_s = รัศมีไจเรชันของท่อเหล็กหรือเหล็กรูป, cm

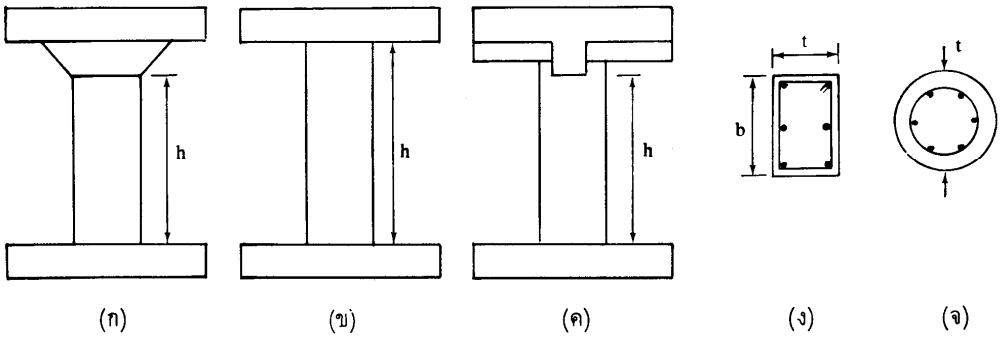
f_r' = หน่วยแรงที่ยอมให้ของท่อเหล็กหรือเหล็กรูป, ksc

A_c = เนื้อที่หน้าตัดเสาส่วนที่เป็นคอนกรีต, cm^2

A_r = เนื้อที่หน้าตัดท่อหรือเหล็กรูปส่วนที่เป็นเหล็ก, cm^2

P = กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสา, kg

5.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับเสา

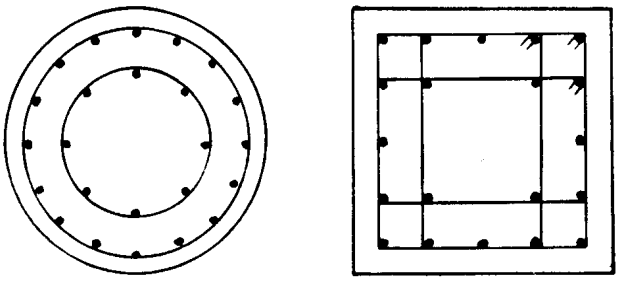


รูปที่ 5.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับเสา

(1) อัตราส่วน $\frac{h}{t}$ ของความยาวปราศจากการยึดรั้งต่อด้านแคบของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมหรือต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาหน้าตัดกลม ต้องไม่เกิน 15 ถ้าเกิน 15 จะเป็นเสายาวต้องลดกำลังรับน้ำหนักของเสาลง

(2) เนื้อที่หน้าตัดรวมของเหล็กยืนต้องไม่น้อยกว่า 0.01 และไม่มากกว่า 0.08 ของเนื้อที่หน้าตัดเสา เหล็กยืนต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 12 mm (ยกเว้นเสาเอ็น คานทับหลัง และเสารั้ว) เสาสี่เหลี่ยมต้องมีเหล็กยืนไม่น้อยกว่า 4 เส้น ส่วนเสากลมต้องมีเหล็กยืนไม่น้อยกว่า 6 เส้น

(3) ช่องว่างระหว่างเหล็กยืนของเสาต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเหล็กยืน หรือ 1.34 เท่าของหินที่โตที่สุด หรือ 4 cm และระยะมากสุดของช่องว่างระหว่างเหล็กยืนไม่เกิน 15 cm ในกรณีเหล็กแน่นมากอาจจะจัดเหล็กเป็นสองชั้นตามรูปที่ 5.6 แต่ควรใช้ในกรณีจำเป็นจริงๆ เท่านั้น



รูปที่ 5.6 การจัดเหล็กในเสาเป็นสองชั้นเมื่อเหล็กแน่นมาก

(4) เสาปลอกเกลียวหรือเสาปลอกเดี่ยว คอนกรีตหุ้มที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับแกนคอนกรีตต้องหนาไม่น้อยกว่า 3.5 cm หรือ 1.34 เท่าของหินที่โตที่สุด

(5) เหล็กปลอกของเสาปลอกเดี่ยวต้องไม่เล็กกว่า 6 mm สำหรับเหล็กยืนไม่เกิน 20 mm และขนาดไม่เล็กกว่า 9 mm สำหรับเหล็กยืน 25 mm กับ 28 mm และไม่เล็กกว่า 12 mm สำหรับเหล็กยืน 32 mm , 36 mm, 40 mm และเหล็กมัดรวมเป็นกำ ระยะห่างของเหล็กปลอกไม่เกิน 16 เท่าของขนาดเหล็กยืน ไม่เกิน 48 เท่าของขนาดเหล็กปลอก และไม่เกินด้านแคบของหน้าตัดเสาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสา ในกรณีเหล็กยืนตั้งแต่ 25 mm ขึ้นไป ระยะเรียงเหล็กปลอกไม่เกิน 15 cm ต้องจัดให้เหล็กปลอกงอฉากคล้องเหล็กยืนทุกเส้นที่ระยะห่างระหว่างเหล็กยืนเกิน 15 cm และคล้องเส้นเว้นเส้นเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กยืนไม่เกิน 15 cm

(6) เสาปลอกเดี่ยวขนาดใหญ่มากเนื่องจากข้อกำหนดทางสถาปัตยกรรม ทำให้ค่า $\rho_t < 0.01$ ให้ลดเนื้อที่หน้าตัดเสาเหลือเพียง $0.5A_g$ แล้วคำนวณใหม่ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนที่ได้ให้เพิ่มเป็นสองเท่าแล้วกระจายเต็มเนื้อที่หน้าตัดเสา

เหล็กปลอกเกลียวต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 9 mm พันต่อเนื่องสม่ำเสมอ ระยะเรียงของเกลียวไม่เกิน 7 cm และไม่น้อยกว่า 3 cm หรือ 1.34 เท่าของหินที่โตที่สุด ปริมาตรของเหล็กปลอกเกลียวต้องไม่น้อยกว่า

$$\rho_s = 0.45\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)\frac{f_c'}{f_{sy}} \qquad (5.7)$$

ให้ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสา, cm

$c = 3.5 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มคอนกรีตจากผิวนอกเสาถึงผิวนอกเหล็กปลอก

$d_{bs} =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก, cm

$D_c = D - 2c - d_{bs} =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตที่อยู่ในแนวศูนย์กลางเหล็กปลอก,cm

$A_g = \frac{\pi}{4}D^2 =$ เนื้อที่หน้าตัดเสา ,cm^2

$A_c = \frac{\pi}{4}D_c^2 =$ เนื้อที่หน้าตัดแกนคอนกรีต ,cm^2

$V_{sp} = \pi D_c \times \frac{\pi}{4}d_{bs}^2 =$ ปริมาตรของเหล็กปลอกเกลียวในหนึ่งวงรอบ ,cm^3

$V_{co} = A_c s = \frac{\pi}{4}D_c^2 s =$ ปริมาตรแกนคอนกรีตในหนึ่งวงรอบ ,cm^3

$$\rho_s = \frac{V_{sp}}{V_{co}} = \frac{\pi D_c \times \frac{\pi}{4}d_{bs}^2}{\frac{\pi}{4}D_c^2 s} = \frac{\pi d_{bs}^2}{D_c s} = \text{ อัตราส่วนปริมาตรเหล็กปลอกต่อปริมาตรแกนคอนกรีต}$$

$f_c' =$ กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน ,ksc

f_{sy} = กำลังครากของเหล็กปลอกเกลียว , ksc

$\frac{A_g}{A_c} = \frac{\frac{\pi}{4}D^2}{\frac{\pi}{4}D_c^2} = \left(\frac{D}{D_c}\right)^2$ = อัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดเสาต่อหน้าตัดแกนคอนกรีต

ดังนั้นแทนค่าได้

$$\frac{\pi d_{bs}^2}{D_c s} = 0.45\left[\left(\frac{D}{D_c}\right)^2 - 1\right]\frac{f_c'}{f_{sy}} = 0.45\frac{D^2 - D_c^2}{D_c^2}\frac{f_c'}{f_{sy}}$$

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c\left(D^2 - D_c^2\right)f_c'} \le 7 \text{ cm และ } s \ge 3 \text{ cm}$$

เช่นเสาปลอกเกลียวเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 50$ cm ใช้เหล็กปลอกเกลียว RB 9 mm มีกำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc และกำลังครากของเหล็กปลอกเกลียว $f_{sy} = 2400$ ksc ระยะหุ้ม $c = 3.5$ cm ดังนั้น

$$D_c = D - 2c - d_{bs} = 50 - 2\times 3.5 - 0.9 = 42.1 \text{ cm}$$

ระยะเรียงเหล็กปลอกเกลียว

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c\left(D^2 - D_c^2\right)f_c'} = \frac{\pi\times 0.9^2\times 42.1^2\times 2400}{0.45\times 42.1\times\left(50^2 - 42.1^2\right)\times 240} = 3.27 \text{ cm}$$

ถ้าเปลี่ยนไปใช้เหล็กปลอกเกลียว DB 10 mm มี $f_{sy} = 3000$ ksc ข้อมูลอื่นคงเดิม

$$D_c = D - 2c - d_{bs} = 50 - 2\times 3.5 - 1.0 = 42 \text{ cm}$$

ระยะเรียงเหล็กปลอกเกลียว

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c\left(D^2 - D_c^2\right)f_c'} = \frac{\pi\times 1.0^2\times 42^2\times 3000}{0.45\times 42\times\left(50^2 - 42^2\right)\times 240} = 4.98 \text{ cm}$$

ตัวอย่างที่ 5.1 จงออกแบบเสาปลอกเกลียวรับน้ำหนักตามแกน 200 ตัน ความยาวเสา 6.00 เมตร

วิธีทำ

กำหนด $f_c' = 210$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน

$f_y = f_{sy} = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กยืนและเหล็กปลอกเกลียว

ข้อจำกัดการเป็นเสาสั้นคือ

$$\frac{h}{t} = \frac{h}{D} \le 15$$

$$D \ge \frac{h}{15} = \frac{6.00}{15} = 0.40 \text{ m ใช้ } D = 50 \text{ cm}$$

จากสมการเสาสั้นปลอกเกลียว

$$P = A_g\left(0.25f_c' + f_s\rho_t\right) = 0.25f_c'A_g + f_sA_{st}$$

$$200{,}000 = 0.25 \times 210 \times \frac{\pi}{4} \times 50^2 + 0.4 \times 3{,}000 A_{st}$$

$$A_{st} = 80.764 \ \text{cm}^2$$

สมมติใช้เหล็กยืน DB 25 mm แต่ละเส้นมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \ \text{cm}^2$ ดังนั้นต้องใช้เหล็กยืนจำนวน

$$= \frac{80.764}{4.909} = 16.45 \Rightarrow 17 \Rightarrow 18 \text{ เส้น}$$

$$A_{st} = 18 \times 4.909 = 88.362 \ \text{cm}^2$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{88.362}{\frac{\pi}{4} \times 50^2} = 0.045 < 0.08$$

เส้นผ่านศูนย์กลางที่ศูนย์กลางเหล็กยืน $= 50 - 2 \times 3.5 - 2 \times 1.0 - 2.5 = 38.5 \ \text{cm}$ เมื่อใช้เหล็กปลอกเกลียว DB 10 mm ระยะช่องว่างระหว่างเส้นเหล็กยืน

$$= \frac{\pi \times 38.5 - 18 \times 2.5}{18} = 4.22 \ \text{cm} > 4 \ \text{cm}$$

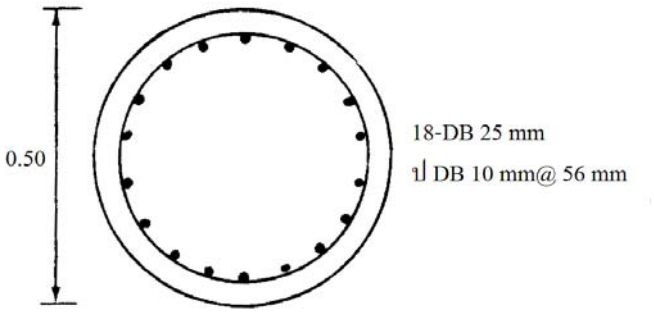
เส้นผ่านศูนย์กลางแกนคอนกรีตที่ศูนย์กลางเหล็กปลอกเกลียว

$$D_c = D - 2c - d_{bs} = 50 - 2 \times 3.5 - 1.0 = 42 \ \text{cm}$$

ระยะเรียงของเหล็กปลอกเกลียว

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c \left(D^2 - D_c^2\right) f_c'}$$

$$s = \frac{\pi \times 1.0^2 \times 42^2 \times 3000}{0.45 \times 42 \times \left(50^2 - 42^2\right) \times 210} = 5.69 \ \text{cm}$$



ตัวอย่างที่ 5.2 จงออกแบบเสาปลอกเกลียวรับน้ำหนักปลอดภัย 60 ตัน เสายาว 4.00 เมตร กำลังประลัยของคอนกรีต $f_c^{'} = 210$ ksc เหล็กข้ออ้อย SD-40 มีกำลังคราก $f_y = 4{,}000$ ksc เหล็กปลอกเกลียว RB 9 mm มีกำลังคราก $f_{sy} = 2400$ ksc

วิธีทำ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้นต่ำที่ยังมีสภาพเป็นเสาสั้นคือ

$$D \geq \frac{h}{15} = \frac{4.00}{15} = 0.27 \text{ m ใช้ } D = 0.30 \text{ m}$$

กำลังรับน้ำหนักของเสาปลอกเกลียว

$$P = A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_t\right) = 0.25f_c^{'}A_g + f_sA_{st}$$

$$60{,}000 = 0.25 \times 210 \times \frac{\pi}{4} \times 30^2 + 0.4 \times 4{,}000A_{st}$$

$$A_{st} = 14.306 \text{ cm}^2$$

สมมติใช้เหล็กยืน DB 20 mm แต่ละเส้นมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 3.14 \text{ cm}^2$ ดังนั้นต้องใช้เหล็กยืนจำนวน

$$= \frac{14.306}{3.14} = 4.56 \Rightarrow 5 \Rightarrow 6 \text{ เส้น}$$

$$A_{st} = 6 \times 3.14 = 18.84 \text{ cm}^2$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{18.84}{\frac{\pi}{4} \times 30^2} = 0.0266 < 0.08$$

เส้นผ่านศูนย์กลางที่ศูนย์กลางเหล็กยืน $= 30 - 2 \times 3.5 - 2 \times 0.9 - 2.0 = 19.2$ cm เมื่อใช้เหล็กปลอกเกลียว RB 9 mm ระยะช่องว่างระหว่างเส้นเหล็กยืน

$$= \frac{\pi \times 19.2 - 6 \times 2.0}{6} = 8.053 \text{ cm} > 4 \text{ cm}$$

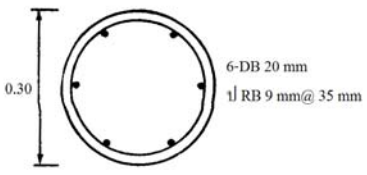
เส้นผ่านศูนย์กลางแกนคอนกรีตที่ศูนย์กลางเหล็กปลอกเกลียว

$$D_c = D - 2c - d_{bs} = 30 - 2 \times 3.5 - 0.9 = 22.1 \text{ cm}$$

ระยะเรียงของเหล็กปลอกเกลียว

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45D_c\left(D^2 - D_c^2\right)f_c^{'}}$$

$$s = \frac{\pi \times 0.9^2 \times 22.1^2 \times 2400}{0.45 \times 22.1 \times \left(30^2 - 22.1^2\right) \times 210} = 3.47 \text{ cm} \Rightarrow 3.5 \text{ cm}$$



ตัวอย่างที่ 5.3 จงออกแบบเสาปลอกเดี่ยวรับน้ำหนักตามแกน 150 ตัน ความยาวเสาแต่ละชั้น 3.50 เมตร

วิธีทำ

กำหนด $f_c^{'} = 240$ ksc = กำลังประลัยทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน

$f_y = 3000$ ksc = กำลังครากของเหล็กยืน

กำลังรับน้ำหนักของเสาปลอกเดี่ยว

$$P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_t\right) = 0.2125A_g f_c^{'} + 0.34A_{st}f_y$$

สมมติให้ $\rho_t = 0.04$

$$150{,}000 = 0.85A_g\left(0.25\times 240 + 0.4\times 3000\times 0.04\right)$$

$$A_g = 1{,}634 \text{ cm}^2$$

เลือกหน้าตัดเสากว้าง 40 cm ลึก 50 cm มี $A_g = 40\times 50 = 2000 \text{ cm}^2$ และ

$$\frac{h}{t} = \frac{3.50}{0.40} = 8.75 < 15$$ ใช้ได้ และเป็นเสาสั้น

หาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$150{,}000 = 0.85\times 2000\times\left(0.25\times 240 + 0.4\times 3000\times\frac{A_{st}}{2000}\right)$$

$$A_{st} = \frac{2000}{0.4\times 3000}\left(\frac{150{,}000}{0.85\times 2000} - 0.25\times 240\right)$$

$$A_{st} = 47.06 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็กยืน DB 20 mm แต่ละเส้นมี $A_{s1} = \frac{\pi}{4}\times 2.0^2 = 3.14 \text{ cm}^2$ ดังนั้นใช้เหล็กยืนจำนวน

$$= \frac{47.06}{3.14} = 14.99 \Rightarrow 15 \Rightarrow 16$$ เส้น

ขนาดเหล็กยืน 20 mm ใช้เหล็กปลอก RB 6 mm ดังนั้นระยะเรียงของเหล็กปลอกไม่เกิน

16 เท่าเหล็กยืน

$$s = 16\times 2.0 = 32 \text{ cm}$$

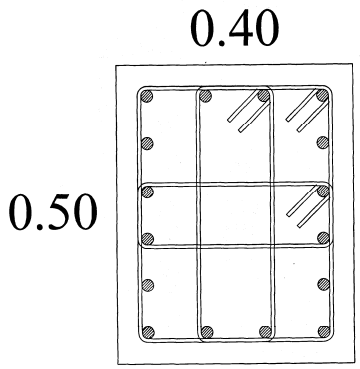
48 เท่าของเหล็กปลอก

$$s = 48\times 0.6 = 28.8 \text{ cm}$$

ด้านแคบของหน้าตัดเสา

$$s = 40 \text{ cm}$$

ค่าที่น้อยสุดคือ $s = 28.8$ cm ใช้จริง 3-ป RB 6 mm @ 250 mm



ตัวอย่างที่ 5.4 จงออกแบบเสาปลอกเดี่ยวให้รับน้ำหนักตามแนวแกน 69 ตัน ให้ $f_c' = 210$ ksc, $f_y = 3000$ ksc เสายาว 6.00 เมตร

วิธีทำ ใช้ข้อกำหนดความชะลูดในการหาด้านแคบของหน้าตัดเสา

$$\frac{h}{t} = \frac{6.00}{t} \le 15$$

$$t \ge \frac{6.00}{15} = 0.40 \text{ m}$$

สมมติเสาขนาดหน้าตัด 0.40×0.40 m^2 หาปริมาณเหล็กเสริม

$$P = 0.85A_g\left(0.25f_c' + f_s\rho_t\right)$$

$$69{,}000 = 0.85 \times (40 \times 40) \times (0.25 \times 210 + 0.4 \times 3000\rho_t)$$

$$\rho_t = \frac{1}{0.4 \times 3000} \times \left(\frac{69{,}000}{0.85 \times 40 \times 40} - 0.25 \times 210 \right)$$

$$\rho_t = -0.001470588$$

การที่ได้ ρ_t เป็นลบนั้นแสดงว่าทางทฤษฎีนั้นคอนกรีตรับน้ำหนักได้มากเกินพอ (แต่ต้องมีเหล็กยืนและเหล็กปลอกอยู่ด้วย) ในกรณีนี้จะเลือกใช้ค่า ρ_t ขั้นต่ำคือ 0.01 หาปริมาณเหล็กยืนได้

$$A_{st} = \rho_t A_g = 0.01 \times (40 \times 40) = 16 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 16 mm เนื้อที่หน้าตัดแต่ละเส้น $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 1.6^2 = 2.01$ cm^2 จำนวนเส้นของเหล็กยืนคือ

$$\frac{16}{2.01} = 7.96 \Rightarrow 8 \text{ เส้น}$$

เลือกใช้ ป-RB 6 mm หาระยะเรียงได้จาก

16 เท่าขนาดเหล็กยืน

$$s = 16d_b = 16 \times 1.6 = 25.6 \text{ cm}$$

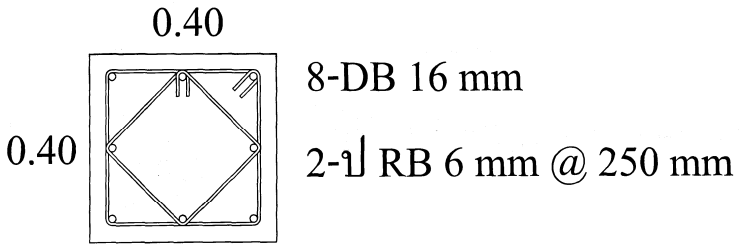
48 เท่าของเหล็กปลอก

$$s = 48d_{bs} = 48 \times 0.6 = 28.8 \text{ cm}$$

ขนาดด้านแคบของหน้าตัด

$$s = 40 \text{ cm}$$

ใช้เสาขนาด 0.40×0.40 m^2 เหล็กยืน 8-DB 16 mm เหล็กปลอก 2-RB 6 mm@ 250 mm เนื่องจากเหล็กห่างกันเกิน 15 cm ต้องคล้องฉากทุกเส้น



ตัวอย่างที่ 5.5 จงออกแบบเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีเหล็กรูปเสริมแกน รับน้ำหนักปลอดภัยตามแนวแกน 150 ตัน แกนเหล็กเป็น H ชนิด ASTM A36 เหล็กยืน SD-30 มีกำลังคราก $f_y = 3000$ ksc เหล็กปลอก SR-24 มีกำลังคราก $f_{sy} = 2400$ ksc กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc

วิธีทำ

เปิดตารางเหล็กปีกกว้างเลือก $W - 150 \times 150 \times 7 \times 10 \times 11 \text{ mm} \times 31.5 \text{ kg/m}$ มีเนื้อที่หน้าตัด 40.14 cm^2 เหล็ก ASTM A36 มี f_r = 1250 ksc มาตรฐานกำหนดว่าเนื้อที่หน้าตัดเหล็กรูปต้องไม่เกิน 0.2 เท่าของเนื้อที่หน้าตัดเสา

$$A_r \le 0.2A$$

$$A \ge \frac{A_r}{0.2} = \frac{40.14}{0.2} = 200.7 \text{ cm}^2$$

เลือกขนาดเสา 0.35×0.35 m^2 มีเนื้อที่หน้าตัดเต็ม $A = 35 \times 35 = 1225 \text{ cm}^2 >> 200.7 \text{ cm}^2$ เนื้อที่หน้าตัดส่วนที่เป็นคอนกรีต

$$A_g = A - A_r - A_{st} = 1{,}225 - 40.14 - A_{st} = 1{,}184.86 - A_{st} \text{ cm}^2$$

เหล็กยืนมี $f_y = 3{,}000$ ksc หน่วยแรงที่ยอมให้

$$f_s = 0.4f_y = 0.4 \times 3{,}000 = 1{,}200 \text{ ksc} < 2{,}100 \text{ ksc}$$

กำลังรับน้ำหนักของเสาลอกเกลียวแกนเหล็กรูป

$$P = 0.225f_c^{'}A_g + f_sA_{st} + f_rA_r$$

$$150{,}000 = 0.225 \times 240 \times (1{,}184.86 - A_{st}) + 1{,}200A_{st} + 1{,}250 \times 40.14$$

$$150{,}000 = 63{,}982.44 - 54A_{st} + 1{,}200A_{st} + 50{,}175$$

$$1{,}146A_{st} = 35{,}842.56$$

$$A_{st} = \frac{35{,}842.56}{1{,}146} = 31.28 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็กยืน DB 20 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 3.14 \text{ cm}^2$ ดังนั้นต้องใช้เหล็กจำนวน

$$= \frac{31.28}{3.14} = 9.96 \Rightarrow 10 \text{ เส้น}$$

มาตรฐานกำหนดให้เสาชนิดนี้มีระยะหุ้มจากผิวนอกที่ใกล้สุดของเสาถึงศูนย์กลางของเหล็กปลอก 6 cm ดังนั้น กำหนดให้

$d_{bs} = 0.9 \text{ cm} =$ ขนาดเหล็กปลอกเกลียว

$D = 35 \text{ cm} =$ เส้นผ่านศูนย์กลางเสากลม

$D_c = D - (2c + d_{bs}) = 35 - 6 - 6 = 23 \text{ cm} =$ เส้นผ่านศูนย์กลางแกนคอนกรีตในปลอกเกลียว

$f_c^{'} = 240 \text{ ksc} =$ กำลังประลัยทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน

$f_{sy} = 2{,}400 \text{ ksc} =$ กำลังครากของเหล็กปลอกเกลียว

ดังนั้นระยะเรียงของเหล็กปลอกเกลียว

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c \left(D^2 - D_c^2\right) f_c^{'}}$$

$$s = \frac{\pi \times 0.9^2 \times 23^2 \times 2{,}400}{0.45 \times 23 \times \left(35^2 - 23^2\right) \times 240}$$

$$s = 1.87 \text{ cm} < 3 \text{ cm}$$

เปลี่ยนใช้ 2-RB 9 mm จะทำให้ระยะเรียงเพิ่มเป็นสองเท่า

$$s = 2 \times 1.87 = 3.74 \text{ cm}$$

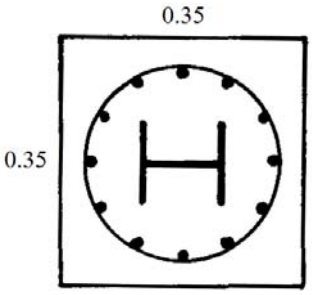
เปลี่ยนไปใช้ DB 10 mm จะมี $d_{bs} = 1.0 \text{ cm}, f_{sy} = 3{,}000 \text{ ksc}$

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c \left(D^2 - D_c^2\right) f_c^{'}}$$

$$s = \frac{\pi \times 1.0^2 \times 23^2 \times 3{,}000}{0.45 \times 23 \times \left(35^2 - 23^2\right) \times 240}$$

$$s = 2.88 \text{ cm} < 3 \text{ cm}$$

เลือกใช้ 2ป-RB 9 mm @ 37 mm



WF-150✕150 mm ASTM A36
12-DB 25 mm
ป RB 9 mm@ 40 mm

ตัวอย่างที่ 5.6 จงออกแบบเสาเหล็กรูปหุ้มด้วยคอนกรีต ความยาวเสา 4.00 เมตร รับน้ำหนักปลอดภัย 75 ตัน เหล็กรูปพรรณ ASTM A36 กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc

วิธีทำ การออกแบบเสาชนิดนี้จะลองเลือกหน้าตัดเหล็กรูปจนระยะห่างจากผิวเสาถึงผิวเหล็กไม่น้อยกว่า 2.5 cm และไม่ควรจะมากกว่า 7.5 cm

จากตารางเหล็กของ บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด

เลือก $W-150\times150\times7\times10\times11$ mm $\times 31.5$ kg/m มีเนื้อที่หน้าตัด $A_r = 40.14$ cm^2 รัศมีไจเรชันที่น้อยที่สุด $K_s = i_y = 3.75$ cm ความยาวของเสา $h = 400$ m จากสมการ (5.6) หาหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็ก

$$\frac{h}{K_s} = \frac{400}{3.75} = 106.7 < 120$$

$$f_r = 1{,}195 - 0.0342\left(\frac{h}{K_s}\right)^2$$

$$f_r = 1{,}195 - 0.0342\times106.7^2$$

$$f_r = 805.88 \text{ ksc}$$

จากสมการ (5.4)

$$P = A_r f_r'\left(1+\frac{A_g}{100A_r}\right)$$

$$75{,}000 = 40.14\times805.88\times\left(1+\frac{A_g}{100\times40.14}\right)$$

$$1+\frac{A_g}{4{,}014} = \frac{75{,}000}{40.14\times805.88} = 2.318534259$$

$$A_g = 4{,}014(2.318534259-1) = 5{,}293 \text{ cm}^2$$

$$b = t = \sqrt{5{,}293} = 72.75 \text{ cm}$$

เมื่อเลือก $W-150\times150\times7\times10\times11$ mm $\times 31.5$ kg/m ต้องใช้เสาหน้าตัด 0.75×0.75 m^2 ดังนั้นระยะจากหน้าตัดเหล็กถึงขอบเสายาว

$$= \frac{75-15}{2} = 30 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$$

แสดงว่าเลือกหน้าตัดเหล็กเล็กเกินไป เลือกใหม่

เลือก $W-200\times200\times8\times12\times13$ mm $\times 49.9$ kg/m มีเนื้อที่หน้าตัด $A_r = 63.53$ cm^2 รัศมีไจเรชันที่น้อยที่สุด $K_s = i_y = 5.02$ cm ความยาวของเสา $h = 400$ m จากสมการ (5.6) หาหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็ก

$$\frac{h}{K_s} = \frac{400}{5.02} = 79.681 < 120$$

$$f_r^{'} = 1{,}195 - 0.0342\left(\frac{h}{K_s}\right)^2$$

$$f_r^{'} = 1{,}195 - 0.0342 \times 79.681^2$$

$$f_r^{'} = 977.86 \ \text{ksc}$$

จากสมการ (5.4)

$$P = A_r f_r^{'}\left(1 + \frac{A_g}{100A_r}\right)$$

$$75{,}000 = 63.53 \times 977.86 \times \left(1 + \frac{A_g}{100 \times 63.53}\right)$$

$$1 + \frac{A_g}{6{,}353} = \frac{75{,}000}{63.53 \times 977.86} = 1.207273663$$

$$A_g = 6{,}353(1.207273663 - 1) = 1{,}316.8 \ \text{cm}^2$$

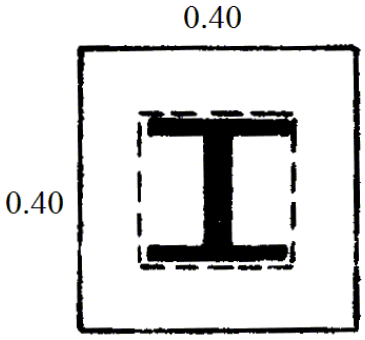
$$b = t = \sqrt{1{,}316.8} = 36.29 \ \text{cm} \Rightarrow 40 \ \text{cm}$$

เมื่อเลือก $W - 200 \times 200 \times 8 \times 12 \times 13$ mm $\times$ 49.9 kg/m ต้องใช้เสาหน้าตัด 0.40×0.40 m^2 ดังนั้น ระยะจากหน้าตัดเหล็กถึงขอบเสายาว

$$= \frac{40 - 20}{2} = 10 \ \text{cm}$$

แสดงว่าเลือกหน้าตัดเหล็กพอสมควร ใช้ได้แล้ว

เขียนรายละเอียดหน้าตัดเสา



W-200x200x8x12x13 mmx 49.9 kg/m
ASTM A36
Wiremesh No.10

ตัวอย่างที่ 5.7 จงออกแบบเสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก ให้รับน้ำหนักปลอดภัย 10 ตัน เสายาว 4.00 เมตร การเทคอนกรีตลงในเสาอาจจะได้คุณภาพไม่ดีนักจึงใช้ $f_c' = 100$ ksc

วิธีทำ การออกแบบเสาคอนกรีตในท่อเหล็กต้องคำนึงถึงการเทคอนกรีตว่าสามารถเทได้หรือไม่ ขนาดของท่อที่จะเทคอนกรีตได้ไม่ควรจะเล็กกว่า 4 นิ้ว

จากตารางท่อของสามชัย สตีล อินดัสทรี ท่อขนาด 4 นิ้ว หนา 3.2 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 114.3 mm หนัก 8.77 kg/m เนื้อที่หน้าตัด $A_r = 11.17$ cm^2 รัศมีไจเรชัน $K_s = 3.93$ cm ตรวจสอบขีดจำกัดในการใช้งาน

$$\frac{h}{K_s} = \frac{400}{3.93} = 101.78 < 120 \text{ ใช้ได้}$$

$$f_r' = 1{,}195 - 0.0342\left(\frac{h}{K_s}\right)^2 = 1{,}195 - 0.0342 \times 101.78^2 = 840.71 \text{ ksc}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางแกนคอนกรีต

$$D_c = D - 2t_p = 114.3 - 2 \times 3.2 = 107.9 \text{ mm} = 10.79 \text{ cm}$$

เนื้อที่หน้าตัดแกนคอนกรีต

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_c'^2 = \frac{\pi}{4} \times 10.79^2 \text{ cm}^2$$

รัศมีไจเรชันแกนคอนกรีต

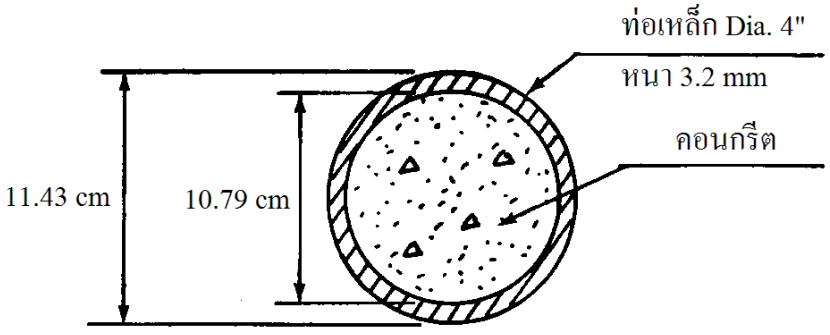
$$K_c = \frac{D_c}{4} = \frac{10.79}{4} = 2.6975 \text{ cm}$$

น้ำหนักที่เสารับได้หรือกำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก

$$P = 0.25 f_c' A_c \left[1 - \frac{1}{40000}\left(\frac{h}{K_c}\right)^2\right] + f_r' A_r$$

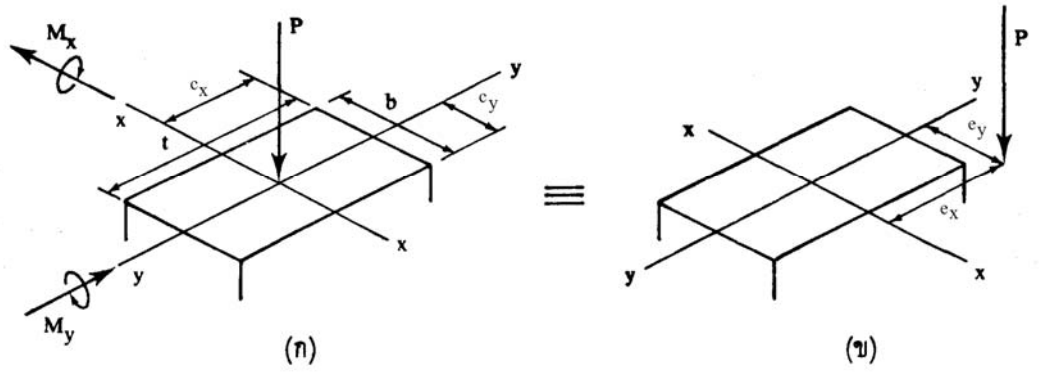
$$P = 0.25 \times 100 \times \frac{\pi}{4} \times 10.79^2 \times \left[1 - \frac{1}{40000} \times \left(\frac{400}{2.6975}\right)^2\right] + 840.71 \times 11.17$$

$$P = 10{,}420 \text{ kg} > 10{,}000 \text{ kg}$$



5.5 เสาสั้นรับน้ำหนักเยื้องศูนย์

เสาอาคารทั่วไปมักจะรับน้ำหนักเยื้องศูนย์หรือรับทั้งน้ำหนักตามแกนและโมเมนต์ดัด ส่วนของโมเมนต์ดัดส่วนมากเกิดจากแรงทางข้างเช่นแรงลมหรือแผ่นดินไหว แรงทางดิ่งที่ทำให้เกิดโมเมนต์ที่พบมากเช่นแรงจากหูช้างในโรงงาน



รูปที่ 5.7 เสาสั้นรับน้ำหนักเยื้องศูนย์

พิจารณารูปที่ 5.7(ก) เป็นเสาสั้นรับแรงตามแนวแกน P ความกว้าง b ขนานแกน x ความลึก t ขนานแกน y จุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดตรงกุบจุดศูนย์ถ่วงพลาสติกของหน้าตัดเนื่องจากการพิจารณาของเสาอยู่ในช่วงอิลาสติก โมเมนต์ M_x และ M_y ทำให้เกิดระยะเยื้องศูนย์ e_x และ e_y และระยะจากแกน x และ y ถึงขอบของหน้าตัดเป็น c_x ละ c_y โดย

$$c_x = \frac{t}{2}, c_y = \frac{b}{2} \quad \text{และ} \quad e_x = \frac{M_x}{P}, e_y = \frac{M_y}{P}$$

เมื่อเสาต้องรับน้ำหนักเยื้องศูนย์หรือแรงตามแกนร่วมกับโมเมนต์ จะเกิดหน่วยแรงทั้งจากแรง P และโมเมนต์ M_x กับ M_y แต่จะรวมหน่วยแรงแบบพีชคณิตไม่ได้เนื่องจากค่าที่ยอมให้จากแรงตามแกนและจากโมเมนต์ไม่เหมือนกัน สิ่งที่จะใช้ตรวจสอบจึงเป็นการรวมผลของอัตราส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ ผลรวมต้องน้อยกว่า 1.0 จึงจะปลอดภัย ถ้าผลรวมอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 1.0 ถือว่าเสาเกิดการวิบัติ

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \le 1.0 \qquad (5.8)$$

เมื่อ $f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{P}{bt} =$ หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้น, ksc

$F_a = 0.34(1+\rho_t m)f'_c =$ หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่ยอมให้, ksc

$f_{bx} = \frac{M_x c_x}{I_x} = \frac{Pe_x c_x}{I_x} =$ หน่วยแรงดัดรอบแกน x ที่เกิดขึ้น , ksc

$F_{bx} = 0.45f_c^{'} =$ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกน x, ksc

$f_{by} = \frac{M_y c_y}{I_y} = \frac{Pe_y c_y}{I_y} =$ หน่วยแรงดัดรอบแกน y ที่เกิดขึ้น, ksc

$F_{by} = 0.45f_c^{'} =$ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกน y, ksc

$f_c^{'} =$ กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน , ksc

$f_y =$ กำลังครากของเหล็กยืน, ksc

$A_{st} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนของเสา, cm^2

$A_s = A_s^{'} = \frac{A_{st}}{2} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด, cm^2

$m = \frac{f_y}{0.85f_c^{'}} =$ อัตราส่วนกำลังของเหล็กยืนต่อกำลังคอนกรีต

b = ความยาวขอบที่ขนานแกน x ของหน้าตัดเสา, cm

t = ความยาวขอบที่ขนานแกน y ของหน้าตัดเสา, cm

$I_x = \frac{bt^3}{12} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอบแกน x

$I_y = \frac{tb^3}{12} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอบแกน y

$\rho_t = \frac{A_{st}}{bt} =$ อัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อคอนกรีต

$d' = co = 3.5 + d_{bs} + \frac{d_b}{2} =$ ระยะจากผิวเสาไปยังศูนย์กลางเหล็กยืน, cm

$d_x = t - co =$ ความลึกประสิทธิผลของการดัดรอบแกน x, cm

$d_y = b - co =$ ความลึกประสิทธิผลของการดัดรอบแกน y, cm

$\rho = \frac{A_s}{bd_x} = \frac{A_s}{td_y} =$ อัตราส่วนเหล็กรับแรงดึงต่อคอนกรีตประสิทธิผล

$\rho' = \frac{A_s^{'}}{bd_x} = \frac{A_s^{'}}{td_y} =$ อัตราส่วนเหล็กรับแรงอัดต่อคอนกรีตประสิทธิผล

ระยะเยื้องศูนย์สมดุล ถ้าแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเท่ากับค่าที่ยอมให้ทั้งเหล็กและคอนกรีตตามลำดับ เรียกว่า ***สภาพสมดุล*** ระยะเยื้องศูนย์ e_{bx} และ e_{by} เป็นระยะเยื้องศูนย์สมดุลซึ่งคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เสริมเหล็กสองด้านเหมือนกัน

เสาปลอกเกลียว $e_{bx} = e_{by} = 0.43\rho_t m D_s + 0.14t$ (5.9)

เสาปลอกเดี่ยว $e_{bx} = e_{by} = (0.67\rho_t m + 0.17)(t - d')$ (5.10)

หน้าตัดกลม เสริมเหล็กกระจายสม่ำเสมอ

เสาปลอกเกลียว $$e_{bx} = e_{by} = 0.43\rho_t m D_s + 0.14D \quad (5.11)$$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กสองด้านเหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว $$e_{bx} = (0.67\rho_t m + 0.17)(t - d') \quad (5.12ก)$$

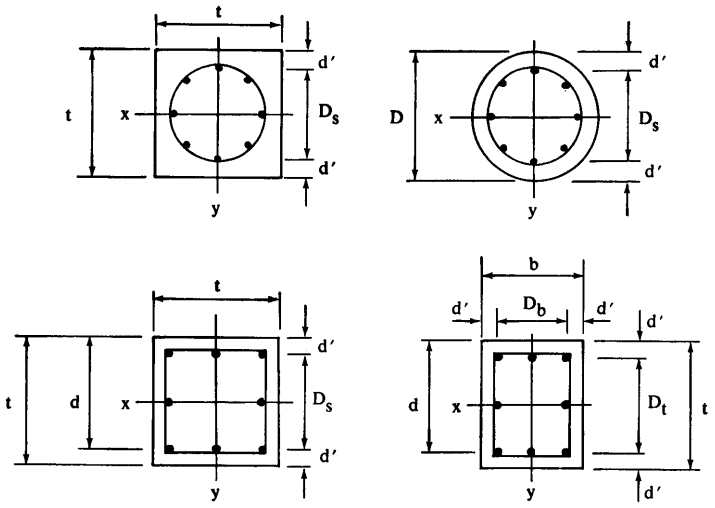
$$e_{by} = (0.67\rho_t m + 0.17)(b - d') \quad (5.12ข)$$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กสองด้านไม่เหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว $$e_{bx} = \frac{\rho' m(t - 2d) + 0.1(t - d')}{(\rho' - \rho)m + 0.6} \quad (5.13ก)$$

$$e_{by} = \frac{\rho' m(b - 2d) + 0.1(b - d')}{(\rho' - \rho)m + 0.6} \quad (5.13ข)$$

สมบัติของหน้าตัด ตามรูปที่ 5.8 สมบัติของหน้าตัดแบบต่างๆ



รูปที่ 5.8 สมบัติของหน้าตัด

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กยืนเป็นวงกลม

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $$I_x = I_y = \frac{t^4}{12} + (2n - 1)A_{st}\frac{D_s^2}{8}$$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $$A_g = t^2 \text{ ระยะ } c_x = c_y = \frac{t}{2}$$

หน้าตัดวงกลม เรียงเหล็กยืนเป็นวงกลม

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $$I_x = I_y = \frac{\pi D^4}{64} + (2n - 1)A_{st}\frac{D_s^2}{8}$$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = \frac{\pi}{4}D^2$ ระยะ $c_x = c_y = \frac{D}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กเท่ากันทุกด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = I_y = \frac{t^4}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{6}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = t^2$ ระยะ $c_x = c_y = \frac{t}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงเหล็กเท่ากันทุกด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = \frac{bt^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_t^2}{6}$

$I_y = \frac{tb^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_b^2}{6}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = bt$ ระยะ $c_x = \frac{t}{2}, c_y = \frac{b}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงเหล็กต่างกันสองด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = \frac{bt^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_t^2}{4}$

$I_y = \frac{tb^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_b^2}{4}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = bt$ ระยะ $c_x = \frac{t}{2}, c_y = \frac{b}{2}$

ในกรณีหน้าตัดเป็นอย่างอื่น ให้แปลงหน้าตัดเหล็ก $A_t = (2n-1)A_{st}$ แล้วพิจารณาคำนวณตามความเหมาะสม กรณีนี้พบยาก

เมื่อ $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}}$

$d' = co = 3.5 + d_{bs} + \frac{d_b}{2} =$ ระยะจากผิวเสาไปยังศูนย์กลางเหล็กยืน, cm

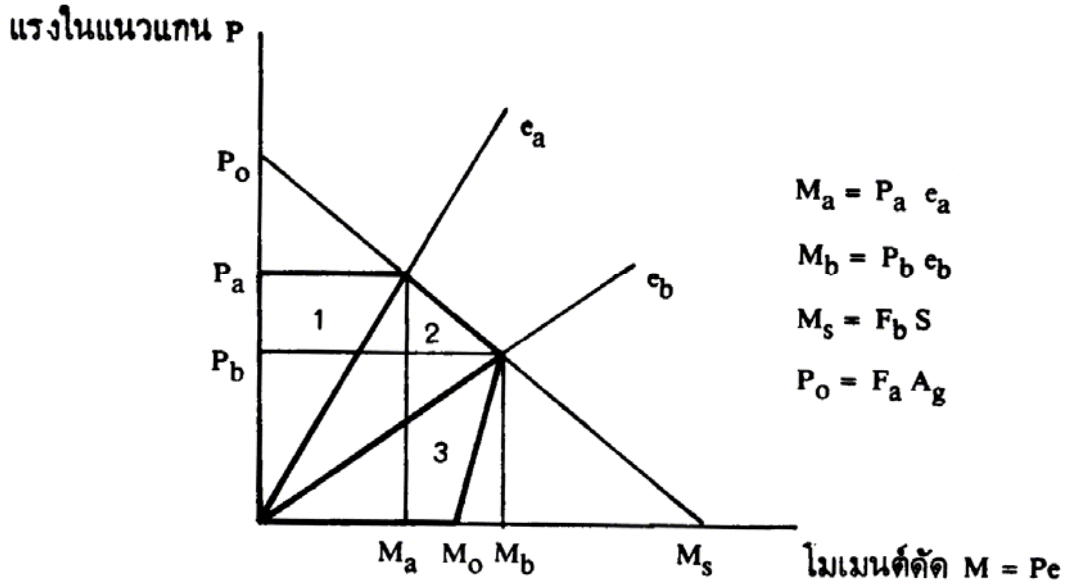
$D_s = t - 2d' = D - 2d'$

$D_t = t - 2d'$

$D_b = b - 2d'$

ขอบเขตในการออกแบบเสา เมื่อเสามีน้ำหนักตามแกน P และโมเมนต์ดัดกระทำ M ระยะเยื้องศูนย์ $e = \frac{M}{P}$ แบ่งการพิจารณาออกแบบเสาเป็นสามช่วงดังรูปที่ 5.9

ช่วงที่ 1 เมื่อ $e < e_a$ ให้ออกแบบเสารับน้ำหนักตามแกนอย่างเดียวตามสมการ (5.1) หรือ (5.2) ทั้งนี้มี



รูปที่ 5.9 ขอบเขตการออกแบบเสารับโมเมนต์

ระยะเยื้องศูนย์ $$e_a = M_s\left(\frac{1}{P_a} - \frac{1}{P_o}\right) \quad (5.14)$$

$P_a = P$ ตามสมการ (5.1) หรือ (5.2)

$$P_o = F_a A_g \quad (5.15)$$

$$M_s = F_b S \quad (5.16)$$

โมดูลัสหน้าตัด $$S = \frac{I}{c}$$

ช่วงที่ 2 เมื่อ $e_a < e < e_b$ เป็นช่วงแรงอัดเป็นหลัก ให้ออกแบบโดยใช้สมการ (5.8) ระยะเยื้องศูนย์สมดุล e_b คำนวณจากสมการ (5.9) ถึง (5.13)

ช่วงที่ 3 เมื่อ $e \geq e_b$ ให้ออกแบบโยมีแรงดึงเป็นหลัก ค่าโมเมนต์ M ให้ถือว่าเป็นสัดส่วนกับ M_o (ที่ $P = 0$) และค่า $M_b = P_b e_b$ ระยะเยื้องศูนย์สมดุล e_b คำนวณจากสมการ (5.9) ถึง (5.13) ค่า P_b คำนวณจากสมการ (5.8) ส่วนค่า M_o คำนวณจากสมการต่อไปนี้

เสาหน้าตัดกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหล็กยืนเรียงกลมปลอกเกลียว

$$M_{ox} = M_{oy} = 0.12 A_{st} f_y D_s \quad (5.17)$$

เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลอกเดี่ยว

$$M_{ox} = 0.40A_s f_y(t - 2d') \tag{5.18}$$

$$M_{oy} = 0.40A_s f_y(b - 2d') \tag{5.19}$$

เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลอกเกลียวเหล็กสองด้านไม่เหมือนกัน

$$M_{ox} = 0.40A_s f_y j_x(t - d') \tag{5.20}$$

$$M_{oy} = 0.40A_s f_y j_y(b - d') \tag{5.21}$$

เมื่อ A_{st} = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนทั้งหมด, cm^2

A_s = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนรับแรงดึง, cm^2

$j_x = j_y = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

ในกรณีที่มีทั้ง M_x และ M_y เสาทุกแบบต้องสอดคล้องกับสมการ

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \le 1.0 \tag{5.22}$$

ลำดับขั้นตอนออกแบบเสารับโมเมนต์ดัด

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

P = น้ำหนักตามแนวแกน, kg

M_x = โมเมนต์ดัดรอบแกน x , $kg \cdot cm$

M_y = โมเมนต์ดัดรอบแกน y, $kg \cdot m$

f_c' = กำลังอัดประลัยตัวอย่างทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กยืน, ksc

f_{sy} = กำลังครากของเหล็กปลอก, ksc

$f_c = 0.45f_c'$ = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต, ksc

$f_s = 0.5f_y \le 1700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กยืน

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}}$ = อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น

$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}}$ = พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$j = 1 - \frac{k}{3} =$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบขั้นต้นโดยเพิ่มน้ำหนักตามแกนขึ้นอีก 20% คือคูณ P ด้วย 1.2 แล้วออกแบบเสารับแรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นนั้น โดยให้ $\rho_t = 0.04$

เสาปลอกเกลียว สมการ (5.1)

$$1.2P = A_g\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right)$$

$$A_g = \frac{1.2P}{0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t}$$

เสาปลอกเดี่ยว สมการ (5.2)

$$1.2P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right)$$

$$A_g = \frac{1.2P}{0.85\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right)}$$

จัดหน้าตัดเสาที่เหมาะสม ปกติให้เนื้อที่หน้าตัดมากกว่า A_g ที่คำนวณได้ข้างต้น จากนั้นหาปริมาณเหล็กเสริม

เสาปลอกเกลียวสมการ (5.1)

$$1.2P = A_g\left(0.25f_c^{'} + \frac{0.4f_yA_{st}}{A_g}\right)$$

$$A_{st} = \frac{A_g}{0.4f_y}\left(\frac{1.2P}{A_g} - 0.25f_c^{'}\right)$$

เสาปลอกเดี่ยว

$$1.2P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + \frac{0.4f_yA_{st}}{A_g}\right)$$

$$A_{st} = \frac{A_g}{0.4f_y}\left(\frac{1.2P}{0.85A_g} - 0.25f_c^{'}\right)$$

จัดเหล็กลงหน้าตัด จะมีข้อมูลต่อไปนี้

b = ด้านแคบหน้าตัดเสาเหลี่ยม, cm

t = ด้านลึกของหน้าตัดเสาเหลี่ยม, cm

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสากลม, cm

$A_g = bt = \frac{\pi}{4}D^2 =$ เนื้อที่หน้าตัดเสา, cm^2

$A_{st} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืน, cm^2

$d_b =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยืน, cm

$d_{bs} =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก, cm

$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{P}{bt} =$ หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้น, ksc

$F_a = 0.34(1+\rho_t m)f_c^{'} =$ หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่ยอมให้, ksc

$f_{bx} = \frac{M_x c_x}{I_x} = \frac{Pe_x c_x}{I_x} =$ หน่วยแรงดัดรอบแกน x ที่เกิดขึ้น , ksc

$F_{bx} = 0.45f_c^{'} =$ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกน x, ksc

$f_{by} = \frac{M_y c_y}{I_y} = \frac{Pe_y c_y}{I_y} =$ หน่วยแรงดัดรอบแกน y ที่เกิดขึ้น, ksc

$F_{by} = 0.45f_c^{'} =$ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกน y, ksc

$A_s = A_s^{'} = \frac{A_{st}}{2} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด, cm^2

$m = \frac{f_y}{0.85f_c^{'}} =$ อัตราส่วนกำลังของเหล็กยืนต่อกำลังคอนกรีต

$I_x = \frac{bt^3}{12} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอบแกน x

$I_y = \frac{tb^3}{12} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอบแกน y

$\rho_t = \frac{A_{st}}{bt} =$ อัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อคอนกรีต

$d' = co = 3.5 + d_{bs} + \frac{d_b}{2} =$ ระยะจากผิวเสาไปยังศูนย์กลางเหล็กยืน, cm

$d_x = t - co =$ ความลึกประสิทธิผลของการดัดรอบแกน x, cm

$d_y = b - co =$ ความลึกประสิทธิผลของการดัดรอบแกน y, cm

$\rho = \frac{A_s}{bd_x} = \frac{A_s}{td_y} =$ อัตราส่วนเหล็กรับแรงดึงต่อคอนกรีตประสิทธิผล

$\rho' = \frac{A_s^{'}}{bd_x} = \frac{A_s^{'}}{td_y} =$ อัตราส่วนเหล็กรับแรงอัดต่อคอนกรีตประสิทธิผล

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เสริมเหล็กสองด้านเหมือนกัน

เสาปลอกเกลียว $e_{bx} = e_{by} = 0.43\rho_t m D_s + 0.14t$ (5.9)

เสาปลอกเดี่ยว $e_{bx} = e_{by} = (0.67\rho_t m + 0.17)(t - d')$ (5.10)

หน้าตัดกลม เสริมเหล็กกระจายสม่ำเสมอ

เสาปลอกเกลียว $e_{bx} = e_{by} = 0.43\rho_t m D_s + 0.14D$ (5.11)

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กสองด้านเหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว $e_{bx} = (0.67\rho_t m + 0.17)(t - d')$ (5.12ก)

$e_{by} = (0.67\rho_t m + 0.17)(b - d')$ (5.12ข)

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กสองด้านไม่เหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว $$e_{bx} = \frac{\rho' m(t-2d)+0.1(t-d')}{(\rho'-\rho)m+0.6} \quad (5.13ก)$$

$$e_{by} = \frac{\rho' m(b-2d)+0.1(b-d')}{(\rho'-\rho)m+0.6} \quad (5.13ข)$$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กยืนเป็นวงกลม

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = I_y = \frac{t^4}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{8}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = t^2$ ระยะ $c_x = c_y = \frac{t}{2}$

หน้าตัดวงกลม เรียงเหล็กยืนเป็นวงกลม

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = I_y = \frac{\pi D^4}{64} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{8}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = \frac{\pi}{4}D^2$ ระยะ $c_x = c_y = \frac{D}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กเท่ากันทุกด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = I_y = \frac{t^4}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{6}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = t^2$ ระยะ $c_x = c_y = \frac{t}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงเหล็กเท่ากันทุกด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = \frac{bt^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_t^2}{6}$

$I_y = \frac{tb^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_b^2}{6}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = bt$ ระยะ $c_x = \frac{t}{2}, c_y = \frac{b}{2}$

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงเหล็กต่างกันสองด้าน

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I_x = \frac{bt^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_t^2}{4}$

$I_y = \frac{tb^3}{12} + (2n-1)A_{st}\frac{D_b^2}{4}$

เนื้อที่หน้าตัดเสา $A_g = bt$ ระยะ $c_x = \frac{t}{2}, c_y = \frac{b}{2}$

$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}}$

$d' = co = 3.5 + d_{bs} + \frac{d_b}{2} =$ ระยะจากผิวเสาไปยังศูนย์กลางเหล็กยืน, cm

$D_s = t - 2d' = D - 2d'$

$D_t = t - 2d'$

$D_b = b - 2d'$

ขอบเขตในการออกแบบเสา เมื่อเสามีน้ำหนักตามแกน P และโมเมนต์ดัดกระทำ M ระยะเยื้องศูนย์ $e = \frac{M}{P}$ แบ่งการพิจารณาออกแบบเสาเป็นสามช่วงดังรูปที่ 5.9

ช่วงที่ 1 เมื่อ $e < e_a$ ให้ออกแบบเสารับน้ำหนักตามแกนอย่างเดียวตามสมการ (5.1) หรือ (5.2) ทั้งนี้มี

ระยะเยื้องศูนย์ $$e_a = M_s\left(\frac{1}{P_a} - \frac{1}{P_o}\right) \quad (5.14)$$

$P_a = P$ ตามสมการ (5.1) หรือ (5.2)

$$P_o = F_a A_g \quad (5.15)$$

$$M_s = F_b S \quad (5.16)$$

โมดูลัสหน้าตัด $S = \frac{I}{c}$

ช่วงที่ 2 เมื่อ $e_a < e < e_b$ เป็นช่วงแรงอัดเป็นหลัก ให้ออกแบบโดยใช้สมการ (5.8) ระยะเยื้องศูนย์สมดุล e_b คำนวณจากสมการ (5.9) ถึง (5.13)

ช่วงที่ 3 เมื่อ $e \geq e_b$ ให้ออกแบบโยมีแรงดึงเป็นหลัก ค่าโมเมนต์ M ให้ถือว่าเป็นสัดส่วนกับ M_o (ที่ $P = 0$) และค่า $M_b = P_b e_b$ ระยะเยื้องศูนย์สมดุล e_b คำนวณจากสมการ (5.9) ถึง (5.13) ค่า P_b คำนวณจากสมการ (5.8) ส่วนค่า M_o คำนวณจากสมการต่อไปนี้

เสาหน้าตัดกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหล็กยืนเรียงกลมปลอกเกลียว

$$M_{ox} = M_{oy} = 0.12 A_{st} f_y D_s \quad (5.17)$$

เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลอกเดี่ยว

$$M_{ox} = 0.40 A_s f_y (t - 2d') \quad (5.18)$$

$$M_{oy} = 0.40 A_s f_y (b - 2d') \quad (5.19)$$

เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลอกเกลียวเหล็กสองด้านไม่เหมือนกัน

$$M_{ox} = 0.40A_s f_y j_x (t - d') \tag{5.20}$$

$$M_{oy} = 0.40A_s f_y j_y (b - d') \tag{5.21}$$

เมื่อ A_{st} = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนทั้งหมด, cm^2

A_s = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนรับแรงดึง, cm^2

$j_x = j_y = 1 - \frac{k}{3}$ = พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

ในกรณีที่มีทั้ง M_x และ M_y เสาทุกแบบต้องสอดคล้องกับสมการ

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \le 1.0 \tag{5.22}$$

ขั้นตอนที่ 3 หากเงื่อนไขไม่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมให้ ก็ขยายขนาดเสาโตขึ้นแล้วย้อนไปตรวจสอบมาใหม่ หากตรวจสอบผ่านก็เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 5.8 จงออกแบบเสากลมให้รับน้ำหนักตามแนวแกน 30 ตัน และโมเมนต์ดัด 1.5 ตัน·เมตร ให้ใช้กำลังอัดประลัยของคอนกรีต $f_c' = 145$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc แล้วเขียนแผนภาพแสดงสมบัติของหน้าตัด

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$P = 30{,}000$ kg = น้ำหนักตามแนวแกน

$M = 150{,}000$ kg·cm = โมเมนต์ดัด

$f_c' = 145$ ksc = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีต

$f_y = 3{,}000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม

$f_c = 0.45f_c' = 0.45 \times 145 = 65.25$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{145}} = 11.22$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{11.22 \times 65.25}} = 0.328$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.328}{3} = 0.891$$

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบเสาโดยเพิ่มน้ำหนักตามแกนประมาณ 15% เสาปลอกเกลียว ให้ $\rho_t = 0.04$

$$1.15P = A_g\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right)$$

$$A_g = \frac{1.15P}{0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t}$$

$$A_g = \frac{1.15\times 30{,}000}{0.25\times 145 + 0.4\times 3{,}000\times 0.04}$$

$$A_g = 409.5 \ \text{cm}^2 = \frac{\pi}{4}D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4\times 409.5}{\pi}} = 22.8 \ \text{cm} \Rightarrow 25 \ \text{cm}$$

เลือกใช้เสากลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 25 \ \text{cm} = 0.25 \ \text{m}$

$$A_g = \frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi}{4}\times 25^2 = 490.87 \ \text{cm}^2$$

$$1.15P = A_g\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right) = 0.25f_c^{'}A_g + 0.4f_yA_{st}$$

$$1.15\times 30{,}000 = 0.25\times 145\times 490.87 + 0.4\times 3{,}000A_{st}$$

$$A_{st} = \frac{1.15\times 3{,}000 - 0.25\times 145\times 490.87}{0.4\times 3{,}000} = 13.922 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็กยืนขนาด DB 20 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4}\times 2.0^2 = 3.14 \ \text{cm}^2$ จำนวนเส้น

$$= \frac{13.922}{3.14} = 4.43 \Rightarrow 5 \Rightarrow 6 \text{ เส้น}$$

เหล็กยืน 6-DB 20 mm

$$A_{st} = 6\times 3.14 = 18.84 \ \text{cm}^2$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{18.84}{490.87} = 0.03838 < 0.08$$

ทราบ $d_b = 2.0 \ \text{cm}$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืน

$d_{bs} = 0.9 \ \text{cm}$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก

$$d' = 3.5 + 0.9 + \frac{2.0}{2} = 5.4 \ \text{cm}$$

$$D_s = D - 2d' = 25 - 2\times 5.4 = 14.2 \ \text{cm}$$

หาสมบัติของหน้าตัด

$$I = \frac{\pi D^4}{64} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{8}$$

$$I = \frac{\pi\times 25^4}{64} + (2\times 11.22 - 1)\times 18.84\times\frac{14.2^2}{8}$$

$$I = 29{,}356 \ \text{cm}^4$$

$$c_x = c_y = \frac{D}{2} = \frac{25}{2} = 12.5 \text{ cm}$$

ระยะเยื้องศูนย์

$$e = \frac{M}{P} = \frac{150{,}000}{30{,}000} = 5 \text{ cm}$$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{30{,}000}{490.87} = 61.116 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น}$$

$$m = \frac{f_y}{0.85f_c'} = \frac{3{,}000}{0.85 \times 145} = 24.341$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = 0.03838$$

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{150{,}000 \times 12.5}{29{,}356} = 63.871 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น}$$

$$F_a = 0.34(1 + \rho_t m)f_c' = 0.34 \times (1 + 0.03838 \times 24.341) \times 145 = 95.356 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้}$$

$$F_b = 0.45f_c' = 0.45 \times 145 = 65.25 \text{ ksc} = \text{ หน่วยแรงดัดที่ยอมให้}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{61.116}{95.356} + \frac{63.871}{65.25} = 1.62 > 1.0 \text{ ใช้ไม่ได้}$$

เขียนรูปแสดงสมบัติของหน้าตัด

หาระยะเยื้องศูนย์สมดุล

$$e_b = 0.43\rho_t m D_s + 0.14D = 0.43 \times 0.03838 \times 24.341 \times 14.2 + 0.14 \times 25 = 9.204 \text{ cm}$$

$$S = \frac{I}{c} = \frac{29{,}356}{12.5} = 2348.48 \text{ cm}^3$$

$$M_s = F_b S = 65.25 \times 2348.48 = 153{,}238.32 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 1{,}532.38 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$P_o = F_a A_g = 95.356 \times 490.87 = 46{,}807.4 \text{ kg}$$

$$P_a = A_g(0.25f_c' + 0.4f_y\rho_t) = 490.87(0.25 \times 145 + 0.4 \times 3{,}000 \times 0.03838)$$

$$P_a = 40{,}401.5 \text{ kg}$$

ให้ $P = P_b$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{P_b}{490.87} \text{ ksc}$$

$$F_a = 95.356 \text{ ksc}$$

$$f_b = \frac{P_b e_b c}{I} = \frac{P_b \times 9.204 \times 12.5}{29{,}356}$$

$$F_b = 65.25 \text{ ksc}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{P_b}{490.87 \times 95.356} + \frac{P_b \times 9.204 \times 12.5}{29{,}356 \times 65.25} = 1$$

$$0.000021364\ P_b + 0.000060063\ P_b = 1$$

$$0.000081427P_b = 1$$

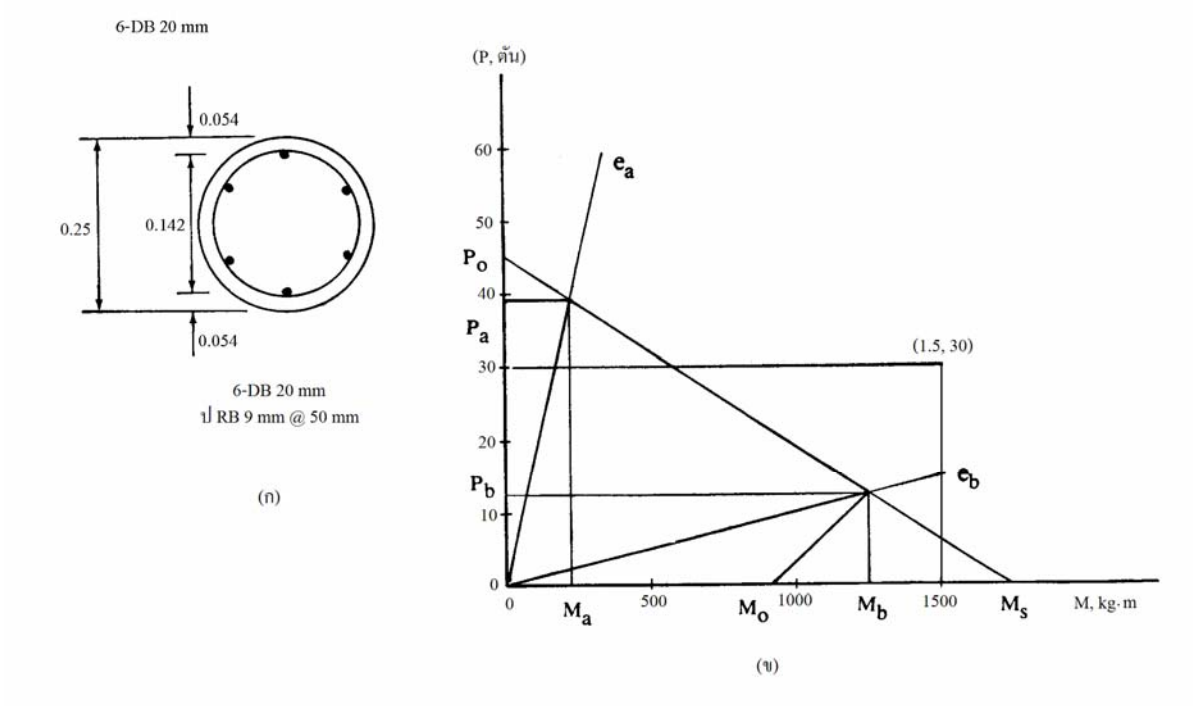
$$P_b = \frac{1}{0.000081427} = 12{,}280.9 \ \text{kg}$$

$$M_b = P_b e_b = 12{,}280.9 \times 9.204 = 113{,}033.1 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 1{,}130.33 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$e_a = M_s\left(\frac{1}{P_a} - \frac{1}{P_o}\right) = 153{,}238.32\left(\frac{1}{40{,}401.5} - \frac{1}{46{,}807.4}\right) = 0.519 \ \text{cm}$$

$$M_a = P_a e_a = 40{,}401.5 \times 0.519 = 20{,}971.67 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 209.72 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$M_o = 0.12 A_{st} f_y D_s = 0.12 \times 18.84 \times 3{,}000 \times 14.2 = 96{,}310.08 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 963.1 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$



ตัวอย่างที่ 5.8

จะเห็นว่าจุด (1.5,30) อยู่นอกขอบเขตของกราฟเสาเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm จึงรับน้ำหนักบรรทุกนี้ไม่ได้ ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 , 0.35 , 0.40 , 0.45 , จนกระทั่งรับน้ำหนักได้

เสาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร

$$P = 30{,}000 \ \text{kg}$$

$$M = 150{,}000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$f_c^{'} = 145 \ \text{ksc}$$

$$f_y = 3{,}000 \ \text{ksc}$$

$$f_c = 65.25 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 3{,}000 \ \text{ksc}$$

$$n = 11.22$$

$$k = 0.328$$

$$j = 0.891$$

$$D = 30 \ \text{cm}$$

$$A_g = \frac{\pi}{4} \times 30^2 = 706.86 \ \text{cm}^2$$

$$A_{st} = \frac{1.5P - 0.25f_c^{'}A_g}{0.4f_y} = \frac{1.5 \times 30{,}000 - 0.25 \times 145 \times 706.86}{0.4 \times 3{,}000} = 16.147 \ \text{cm}^2$$

เลือก 6-DB 20 mm มี

$$A_{st} = 6 \times \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 18.85 \ \text{cm}^2$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{18.85}{706.86} = 0.026667232 > 0.01 < 0.08$$

$$d_b = 2.0 \ \text{cm}$$

$$d_{bs} = 0.9 \ \text{cm}$$

$$d' = 3.5 + 0.9 + \frac{2.0}{2} = 5.4 \ \text{cm}$$

$$D_s = D - 2d' = 30 - 2 \times 5.4 = 19.2 \ \text{cm}$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{8} = \frac{\pi \times 30^4}{64} + (2 \times 11.22 - 1) \times 18.85 \times \frac{19.2^2}{8} = 58{,}383.7 \ \text{cm}^4$$

$$c_x = c_y = \frac{D}{2} = \frac{30}{2} = 15 \ \text{cm}$$

$$e = \frac{M}{P} = \frac{150{,}000}{30{,}000} = 5 \ \text{cm}$$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{30{,}000}{706.86} = 42.441 \ \text{ksc}$$

$$m = \frac{f_y}{0.85f_c^{'}} = \frac{3000}{0.85 \times 145} = 24.341$$

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{150{,}000 \times 15}{58{,}383.7} = 38.538 \ \text{ksc}$$

$$F_a = 0.34(1 + \rho_t m)f_c^{'} = 0.34(1 + 0.026667232 \times 24.341) \times 145 = 81.301 \ \text{ksc}$$

$$F_b = 0.45f_c^{'} = 0.45 \times 145 = 65.25 \ \text{ksc}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{42.441}{81.301} + \frac{38.538}{65.25} = 1.113 > 1.0 \ \text{ใช้ไม่ได้}$$

เตรียมข้อมูลสำหรับเขียนกราฟ

$$e_b = 0.43\rho_t m D_s + 0.14D = 0.43 \times 0.026667232 \times 24.341 \times 19.2 + 0.14 \times 30$$

$$e_b = 9.559 \ \text{cm}$$

$$S = \frac{I}{c} = \frac{58{,}383.7}{15} = 3{,}892.25 \ \text{cm}^3$$

$$M_s = F_b S = 65.25 \times 3{,}892.25 = 253{,}969 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 2{,}539.69 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$P_o = F_a A_g = 81.301 \times 706.86 = 57,468.4 \ \text{kg}$$

$$P_a = A_g\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_t\right) = 706.86\left(0.25 \times 145 + 0.4 \times 3,000 \times 0.026667232\right)$$

$$P_a = 48,243.7 \ \text{kg}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{P_b}{A_g F_a} + \frac{P_b e_b c}{I F_b} = P_b\left(\frac{1}{A_g F_a} + \frac{e_b c}{I F_b}\right) = 1$$

$$P_b\left(\frac{1}{706.86 \times 81.301} + \frac{9.559 \times 15}{58,383.7 \times 65.25}\right) = 1$$

$$P_b = 18,168.84 \ \text{kg}$$

$$M_b = P_b e_b = 18,168.84 \times 9.559 = 173,675.9 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 1,736.759 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$e_a = M_s\left(\frac{1}{P_a} - \frac{1}{P_o}\right) = 253,969\left(\frac{1}{48,243.7} - \frac{1}{57,468.4}\right) = 0.845 \ \text{cm}$$

$$M_a = P_a e_a = 48,243.7 \times 0.845 = 40,766.54 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 407.66 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$M_o = 0.12 A_{st} f_y D_s$$

$$M_o = 0.12 \times 18.85 \times 3,000 \times 19.2 = 130,291.2 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 1,302.912 \ \text{kg} \cdot \text{m}$$

เสาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร

$$P = 30,000 \ \text{kg}$$

$$M = 150,000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$f_c^{'} = 145 \ \text{ksc}$$

$$f_y = 3,000 \ \text{ksc}$$

$$f_c = 65.25 \ \text{ksc}$$

$$f_s = 3,000 \ \text{ksc}$$

$$n = 11.22$$

$$k = 0.328$$

$$j = 0.891$$

$$D = 35 \ \text{cm}$$

$$A_g = \frac{\pi}{4} \times 35^2 = 962.11 \ \text{cm}^2$$

$$A_{st} = \frac{1.5P - 0.25f_c^{'}A_g}{0.4f_y} = \frac{1.5 \times 30,000 - 0.25 \times 145 \times 962.11}{0.4 \times 3,000} = 8.436 \ \text{cm}^2$$

เลือก 6-DB 20 mm มี

$$A_{st} = 6 \times \frac{\pi}{4} \times 2.0^2 = 18.85 \ \text{cm}^2$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{18.85}{962.11} = 0.019592354 > 0.01 < 0.08$$

$d_b = 2.0 \ \text{cm}$

$d_{bs} = 0.9 \ \text{cm}$

$d' = 3.5 + 0.9 + \frac{2.0}{2} = 5.4 \ \text{cm}$

$D_s = D - 2d' = 35 - 2 \times 5.4 = 24.2 \ \text{cm}$

$I = \frac{\pi D^4}{64} + (2n-1)A_{st}\frac{D_s^2}{8} = \frac{\pi \times 35^4}{64} + (2 \times 11.22 - 1) \times 18.85 \times \frac{24.2^2}{8} = 103{,}247 \ \text{cm}^4$

$c_x = c_y = \frac{D}{2} = \frac{35}{2} = 17.5 \ \text{cm}$

$e = \frac{M}{P} = \frac{150{,}000}{30{,}000} = 5 \ \text{cm}$

$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{30{,}000}{962.11} = 31.181 \ \text{ksc}$

$m = \frac{f_y}{0.85f_c'} = \frac{3000}{0.85 \times 145} = 24.341$

$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{150{,}000 \times 17.5}{103{,}247} = 25.424 \ \text{ksc}$

$F_a = 0.34(1 + \rho_t m)f_c' = 0.34(1 + 0.019592354 \times 24.341) \times 145 = 72.811 \ \text{ksc}$

$F_b = 0.45f_c' = 0.45 \times 145 = 65.25 \ \text{ksc}$

$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{31.181}{72.811} + \frac{25.424}{65.25} = 0.818 < 1.0$ ใช้ได้

เตรียมข้อมูลสำหรับเขียนกราฟ

$e_b = 0.43\rho_t m D_s + 0.14D = 0.43 \times 0.019592354 \times 24.341 \times 24.2 + 0.14 \times 35$

$e_b = 9.863 \ \text{cm}$

$S = \frac{I}{c} = \frac{103{,}247}{17.5} = 5{,}899.83 \ \text{cm}^3$

$M_s = F_b S = 65.25 \times 5{,}899.83 = 384{,}964 \ \text{kg} \cdot \text{cm} = 3{,}849.64 \ \text{kg} \cdot \text{m}$

$P_o = F_a A_g = 72.811 \times 962.11 = 70{,}052.2 \ \text{kg}$

$P_a = A_g(0.25f_c' + 0.4f_y\rho_t) = 962.11(0.25 \times 145 + 0.4 \times 3{,}000 \times 0.019592354)$

$P_a = 57{,}496.5 \ \text{kg}$

$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{P_b}{A_g F_a} + \frac{P_b e_b c}{I F_b} = P_b\left(\frac{1}{A_g F_a} + \frac{e_b c}{I F_b}\right) = 1$

$P_b\left(\frac{1}{962.11 \times 72.811} + \frac{9.863 \times 17.5}{103{,}247 \times 65.25}\right) = 1$

$P_b = 25{,}065.4 \ \text{kg}$

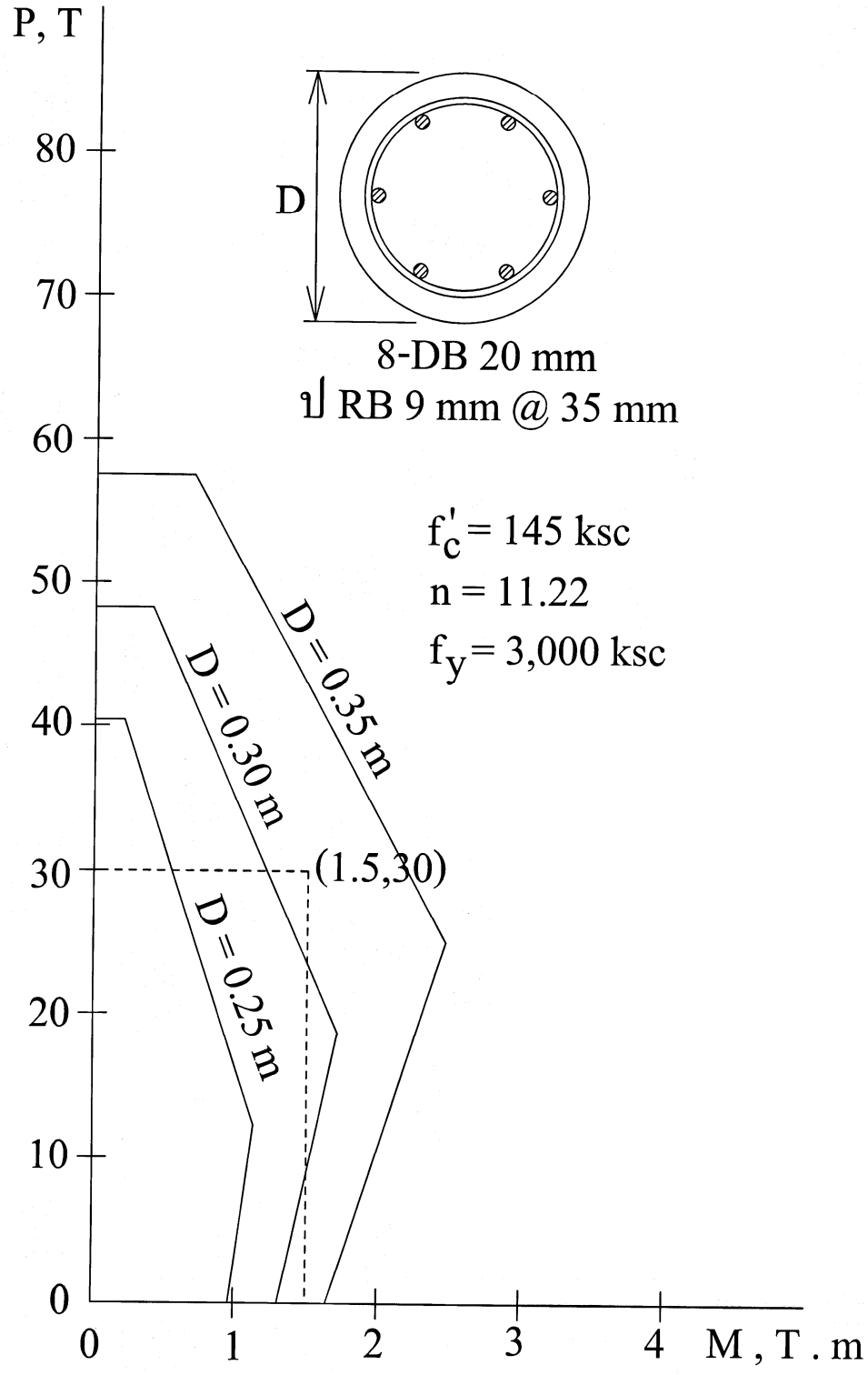
$M_b = P_b e_b = 25{,}065.4 \times 9.863 = 247{,}220 \ \text{kg}$

$$e_a = M_s\left(\frac{1}{P_a}-\frac{1}{P_o}\right) = 247{,}220\left(\frac{1}{57{,}496.5}-\frac{1}{70{,}052.2}\right) = 0.7707 \text{ cm}$$

$$M_a = P_a e_a = 57{,}496.5\times 0.7707 = 44{,}310 \text{ kg}\cdot\text{cm} = 443.1 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

$$M_o = 0.12 A_{st} f_y D_s$$

$$M_o = 0.12\times 18.85\times 3{,}000\times 24.2 = 164{,}221.2 \text{ kg}\cdot\text{cm} = 1{,}642.212 \text{ kg}\cdot\text{m}$$



ออกแบบเหล็กปลอก

$$D = 35 \text{ cm}$$

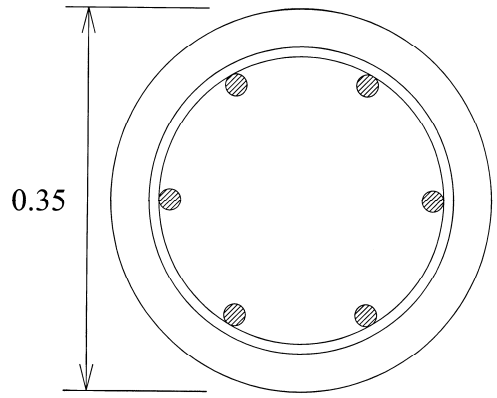
$$d_{bs} = 0.9 \text{ cm}$$

$$D_c = 35 - 2\times 3.5 - 0.9 = 27.1 \text{ cm}$$

$$f_{sy} = 2400 \text{ ksc}$$

$$s = \frac{\pi d_{bs}^2 D_c^2 f_{sy}}{0.45 D_c \left(D^2 - D_c^2\right) f_c'} = \frac{\pi \times 0.9^2 \times 27.1^2 \times 2400}{0.45 \times 27.1 \times \left(35^2 - 27.1^2\right) \times 145} = 5.17 \text{ cm}$$

เขียนรายละเอียดเสา



8-DB 20 mm
ปRB 9 mm @ 50 mm

ตัวอย่างที่ 5.9 จงออกแบบเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับน้ำหนักตามแกน 150 ตัน โมเมนต์ดัดรอบแกนหลัก 3 ตัน.เมตร โมเมนต์ดัดรอบแกนรอง 1.8 ตัน.เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 280$ ksc กำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4{,}000$ ksc กำลังครากเหล็กปลอก $f_{sy} = 2{,}400$ ksc

วิธีทำ

ประมาณอัตราส่วนเหล็กต่อคอนกรีต $\rho_t = 0.01$

$$P = 0.85 A_g \left(0.25 f_c' + 0.4 f_y \rho_t\right)$$

$$150{,}000 = 0.85 A_g \left(0.25 \times 280 + 0.4 \times 4{,}000 \times 0.01\right)$$

$$A_g = \frac{150{,}000}{0.85 \times \left(0.25 \times 280 + 0.4 \times 4{,}000 \times 0.01\right)} = 2052 \text{ cm}^2$$

$$b = t = \sqrt{A_g} = \sqrt{2052} = 45.3 \text{ cm}$$

เลือกใช้ความกว้าง $b = 45$ cm และความลึก $t = 75$ cm

$P = 150{,}000$ kg = น้ำหนักตามแกน

$M_x = 3{,}000 \text{ kg}\cdot\text{m} = 300{,}000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

$M_y = 1{,}800 \text{ kg}\cdot\text{m} = 180{,}000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

$f_c^{'} = 280 \ \text{ksc}$

$f_y = 4{,}000 \ \text{ksc}$

$f_c = 0.45 f_c^{'} = 0.45 \times 280 = 126 \ \text{ksc}$

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 4{,}000 = 2{,}000 \Rightarrow 1{,}700 \ \text{ksc}$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{280}} = 8.074$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}700}{8.074 \times 126}} = 0.374$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.374}{3} = 0.875$$

$b = 45 \ \text{cm}$

$t = 90 \ \text{cm}$

$A_g = bt = 45 \times 90 = 4{,}050 \ \text{cm}^2$

สมมติปริมาณเหล็กเสริมมากพอที่จะให้ $\rho_t = 0.04$

$A_{st} = \rho_t A_g = 0.04 \times 4{,}050 = 162 \ \text{cm}^2$

กำหนด $d_b = 2.5 \ \text{cm}$

$d_{bs} = 0.9 \ \text{cm}$

$$d' = 3.5 + 0.9 + \frac{2.5}{2} = 5.65 \ \text{cm}$$

$d_x = 90 - 5.65 = 84.35 \ \text{cm}$

$d_y = 45 - 5.65 = 39.35 \ \text{cm}$

เลือกเหล็กยืน DB 25 mm มี $A_{s1} = \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 = 4.909 \ \text{cm}^2$ จำนวนเส้นที่ต้องการโดยประมาณ

$$= \frac{162}{4.909} = 33 \Rightarrow 34 \ \text{เส้น}$$

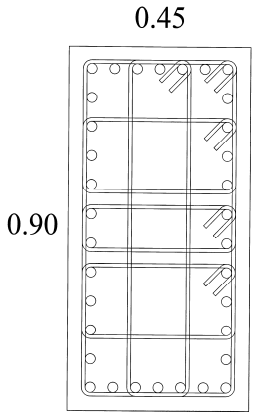
เขียนรูปตัดเสากว้าง 0.45 เมตร ลึก 0.90 เมตร ระยะหุ้ม 3.5 cm ทุกด้าน เหล็กปลอก 9 mm ใส่เหล็กที่มุมทั้งสี่ก่อน เหลือเหล็ก 30 เส้น แบ่งครึ่งสำหรับด้านแคบหนึ่งด้านและด้านยาวหนึ่งด้าน เหลือครึ่งละ 15 เส้น ด้านยาว 2 เท่าของด้านสั้นรวมเป็น 3 เท่า ดังนั้นด้านสั้นใส่เหล็กอีก 15/3 = 5 เส้น ด้านยาว 10 เส้น

$A_{st} = 34 \times 4.909 = 166.906 \ \text{cm}^2$

$$A_s = A_s^{'} = \frac{A_{st}}{2} = \frac{166.906}{2} = 83.453 \ \text{cm}^2$$

$$I_x = \frac{bt^3}{12} = \frac{45 \times 90^3}{12} = 2{,}733{,}750 \ \text{cm}^4$$

$$I_y = \frac{tb^3}{12} = \frac{90 \times 45^3}{12} = 683{,}437.5 \ \text{cm}^4$$



34-DB 25 mm
5-ปRB 9 mm @ 150 mm

$$\rho_x = \frac{A_s}{bd_x} = \frac{83.453}{45 \times 84.35} = 0.021985905$$

$$\rho_y = \frac{A_s}{td_y} = \frac{83.453}{90 \times 39.35} = 0.023564308$$

$$\rho_x^{'} = \frac{A_s^{'}}{bd_x} = \frac{83.453}{45 \times 84.35} = 0.021985905$$

$$\rho_y^{'} = \frac{A_s^{'}}{td_y} = \frac{83.453}{90 \times 39.35} = 0.023564308$$

$$e_x = \frac{M_x}{P} = \frac{300{,}000}{150{,}000} = 2.0 \text{ cm}$$

$$e_y = \frac{M_y}{P} = \frac{180{,}000}{150{,}000} = 1.2 \text{ cm}$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{166.906}{4{,}050} = 0.041211358$$

$$m = \frac{f_y}{0.85f_c^{'}} = \frac{4{,}000}{0.85 \times 280} = 16.80672269$$

$$c_x = \frac{t}{2} = \frac{90}{2} = 45 \text{ cm}$$

$$c_y = \frac{b}{2} = \frac{45}{2} = 22.5 \text{ cm}$$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{150{,}000}{4{,}050} = 37.03703704 \text{ ksc}$$

$$F_a = 0.34\left(1 + \rho_t m\right)f_c^{'} = 0.34 \times \left(1 + 0.041211358 \times 16.80672269\right) \times 280$$

$$F_a = 161.1381728 \text{ ksc}$$

$$f_{bx} = \frac{M_x c_x}{I_x} = \frac{300{,}000 \times 45}{2{,}733{,}750} = 4.938271605 \text{ ksc}$$

$$f_{by} = \frac{M_y c_y}{I_y} = \frac{180{,}000 \times 22.5}{683{,}437.5} = 5.925925926 \text{ ksc}$$

$$F_{bx} = F_{by} = 0.45f_c^{'} = 0.45 \times 280 = 126 \text{ ksc}$$
$$e_{bx} = (0.67\rho_t m + 0.17)(t - d')$$
$$e_{bx} = (0.67 \times 0.041211358 \times 16.80672269 + 0.17)(90 - 5.65)$$
$$e_{bx} = 54.48301751 \text{ cm}$$
$$e_{by} = (0.67\rho_t m + 0.17)(b - d')$$
$$e_{by} = (0.67 \times 0.041211358 \times 16.80672269 + 0.17)(45 - 5.65)$$
$$e_{by} = 24.95028736 \text{ cm}$$
$$M_{ox} = 0.40A_s f_y (t - 2d') = 0.40 \times 83.453 \times 4000 \times (90 - 2 \times 5.65)$$
$$M_{ox} = 11{,}262{,}816.88 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 112{,}628.1688 \text{ kg} \cdot \text{m}$$
$$M_{oy} = 0.40A_s f_y (b - 2d') = 0.40 \times 83.453 \times 4000 \times (45 - 2 \times 5.65)$$
$$M_{oy} = 4{,}499{,}785.76 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 44{,}997.8576 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

ตรวจสอบ

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} = 1.0$$
$$\frac{37.03703704}{161.1381728} + \frac{4.938271605}{126} + \frac{5.925925926}{126} = 1.0$$
$$0.31607024 < 1.0 \qquad \text{OK}$$

และตรวจสอบโมเมนต์

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \le 1.0$$
$$\frac{3{,}000}{112{,}628.1688} + \frac{1{,}800}{44{,}997.8576} \le 1.0$$
$$0.066638224 \le 1.0 \quad \text{OK}$$

ระยะเรียงของเหล็กปลอก

$$s = 16d_b = 16 \times 2.5 = 40 \text{ cm}$$
$$s = 48d_{bs} = 48 \times 0.9 = 43.2 \text{ cm}$$
$$s = b = 45 \text{ cm}$$

ใช้ระยะเรียง s = 150 mm

เสาขนาด $0.45 \times 0.90 \text{ m}^2$ เหล็กยืน $34 - \text{DB } 25 \text{ mm}$ เหล็กปลอก 5-ป RB 9 mm @ 150 mm

5.6 เสายาว

ที่ผ่านมานั้นได้มีการศึกษาเรื่องเสาสั้นโดยกำหนดว่า ถ้า h เป็นความสูงของเสาที่ปราศจากการยึดรั้งด้วยโครงสร้างแข็งแรงเช่นคาน แกงแนง t เป็นด้านแคบของหน้าตัดเสาเหลี่ยม หรือ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเสากลม เสานั้นจะเป็นเสาสั้นถ้า

$$\frac{h}{t} \le 15 \text{ หรือ } \frac{h}{D} \le 15$$

ดังนั้นถ้า $\frac{h}{t} > 15$ หรือ $\frac{h}{D} > 15$ นั้น ถือว่าเป็นเสายาว ต้องลดกำลังรับน้ำหนักของเสาลงไปจากกำลังของเสาสั้น ค่าความชะลูด (slenderness ratio : SR) ของเสาวัดจาก

$$SR = \frac{h}{r}$$

เมื่อ $h =$ ความสูงของเสาปราศจากการยึดรั้งตามรูปที่ 5.5, cm

$t =$ หน้ากว้างรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบที่พิจารณา, cm

$b =$ ด้านตั้งฉากกับ t ของเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสากลม, cm

$I = \frac{bt^3}{12} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm^4

$I = \frac{\pi D^4}{64} =$ โมเมนต์อินเนอร์เชียของเสาหน้าตัดกลม, cm^4

$A = bt =$ เนื้อที่หน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm^2

$A = \frac{\pi D^2}{4} =$ เนื้อที่หน้าตัดเสากลม, cm2

$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{bt^3}{12bt}} = \frac{t}{2\sqrt{3}} = 0.288675134t \approx 0.3t =$ รัศมีไจเรชันของเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า,cm

$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi D^4}{64} \times \frac{4}{\pi D^2}} = \frac{D}{4} = 0.25D =$ รัศมีไจเรชันของเสากลม, cm

ความยาวประสิทธิผล เสาที่มีความยาวอิสระ h และมีสิ่งยันทางข้างอย่างเพียงพอ เช่นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (กำแพงอิฐไม่นับเป็นสิ่งค้ำยันทางข้าง) แกงแนง คสล. ให้ถือว่า

$$\text{ความยาวประสิทธิผล } h' = h$$

แต่เมื่อการยันทางข้างไม่ดีพอ ต้องหาความยาวประสิทธิผล h' โดยคำนวณจากตัวคูณของจุดต่อ r_j' ซึ่งเป็นอัตราส่วนของผลรวมสติฟเนสของเสาต่อผลรวมสติฟเนสของคานบนระนาบพิจารณา ณ จุดต่อ j

$$r_j' = \frac{\sum K_c}{\sum K_b} \tag{5.23}$$

เมื่อ r_j' = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล

$\sum K_c = \sum \frac{2EI_c}{h}$ = ผลรวมสติฟเนสของเสาที่อยู่เหนือและใต้จุด j

$\sum K_b = \sum \frac{2EI_b}{L}$ = ผลรวมของสติฟเนสของคานซ้ายขวาของจุด j

h = ความสูงปราศจากการยึดรั้งของเสา, cm

L = ความยาวของคาน, cm

$E = 15{,}100\sqrt{f_c'}$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, ksc

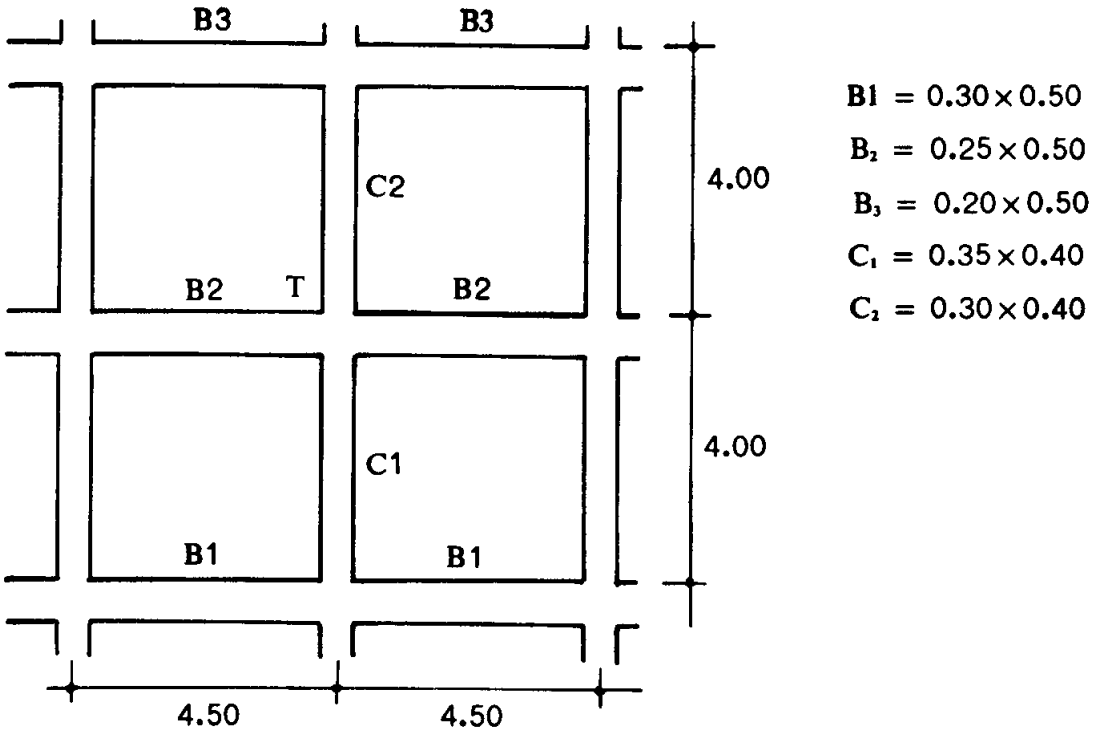
$I = Ar^2$ = โมเมนต์อินเนอร์เชียของเสาและคาน

r = 0.3t = รัศมีไจเรชันของเสาและคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

r = 0.25D = รัศมีไจเรชันของเสาหน้าตัดกลม, cm

t = ขนาดหน้าตัดคานด้านที่เห็นในระนาบการดัด, cm

D = เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดเสากลม, cm



รูปที่ 5.10 การหาความยาวประสิทธิผล h'

รูปที่ 5.10 แสดงรูปตัดที่แสดงเสาและคาน ต้องการหา r_T' ของจุดหัวเสา T คาน B2 มีความกว้าง b = 25 cm ความลึก t = 50 cm โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = \frac{bt^3}{12} = \frac{25 \times 50^3}{12} = 260{,}416.6667 \text{ cm}^4$ ความยาว L = 4.50 m = 450 cm มีคานซ้ายขวา

$$\sum \frac{2EI_b}{L} = \frac{2E \times 260{,}416.6667}{450} + \frac{2E \times 260{,}416.6667}{450} = 1{,}157.407408(2E)$$

เสา C1 มีความกว้าง b = 35 cm ความลึก t = 40 cm โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = \frac{bt^3}{12} = \frac{35 \times 40^3}{12} =$ $186{,}666.6667 \text{ cm}^4$ ความยาว h = 4.00 – 0.50 = 3.50 m = 350 cm

เสา C2 มีความกว้าง b = 30 ความลึก t = 30 cm โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = \frac{bt^3}{12} = \frac{30 \times 30^3}{12} =$ $67{,}500 \text{ cm}^4$ ความยาว h = 4.00 – 0.50 = 3.50 m = 350 cm

$$\sum \frac{2EI_c}{h} = \frac{2E \times 186{,}666.6667}{350} + \frac{2E \times 67{,}500}{350} = 726.1904763(2E)$$

ดังนั้นตัวคูณ

$$r_T' = \frac{\sum \frac{2EI_c}{h}}{\sum \frac{2EI_b}{L}} = \frac{726.1904763(2E)}{1{,}157.407408(2E)} = 0.627 < 1.0$$

ถ้าทราบค่า r_T' ของปลายบนของเสา และ r_B' ของปลายล่างเสา จะได้ค่าเฉลี่ย

$$r' = \frac{1}{2}\left(r_T' + r_B'\right) \qquad (5.24)$$

ถ้าได้ $r' < 25$ ให้ถือว่าปลายเสามีสภาพยึดหมุน (ไม่รับโมเมนต์)

$r' = 0$ หรือ 1 ในทางปฏิบัติให้ถือว่าปลายเสามีสภาพยึดแน่น (รับโมเมนต์)

การลดกำลังของเสาเนื่องจากความชะลูด ในกรณีเสายาวมีความชะลูด $\frac{h'}{r}$ จะต้องลดความสามารถในการรับน้ำหนักและโมเมนต์ของเสาสั้นลงโดยมีตัวคูณลดกำลัง R ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $\frac{h'}{r}$ และ $R \le 1.0$ โดยที่

$$P_{LC} = RP_{SC} \qquad (5.25ก)$$

$$M_{LC} = RM_{SC} \qquad (5.25ข)$$

เมื่อ P_{LC} = กำลังรับน้ำหนักตามแกนของเสายาว, kg

P_{SC} = กำลังรับน้ำหนักตามแกนของเสาสั้น, kg

M_{LC} = กำลังรับโมเมนต์ดัดของเสายาว, $\text{kg} \cdot \text{m}$

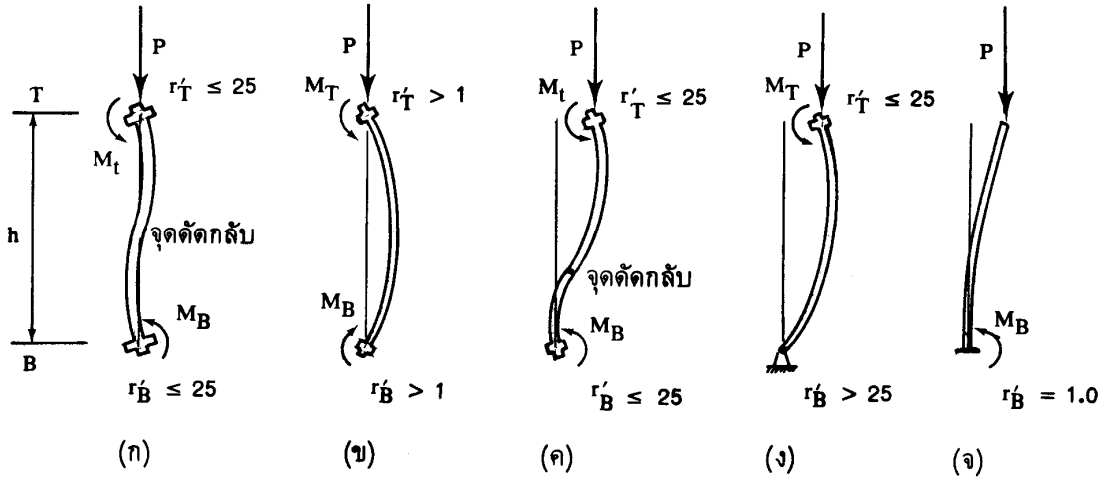
M_{SC} = กำลังรับโมเมนต์ดัดของเสาสั้น, $\text{kg} \cdot \text{m}$

R = ตัวคูณลดกำลัง ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

(1) เมื่อเสารับน้ำหนักตามแนวแกนอย่างเดียว หรือ P กับ M อยู่ในบริเวณที่ 1 ตามรูปที่ 5.9 หรือ $e < e_a$

$$R = 1.07 - 0.008\frac{h}{r} \tag{5.26}$$

(2) เมื่อรับแรงอัดเป็นหลัก หรือ P กับ M อยู่ในช่วงที่ 2 ตามรูปที่ 5.9 หรือ $e_a < e < e_b$ ให้พิจารณาตัวคูณลดกำลัง R ตามรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ลักษณะการโก่งตัวที่มีผลต่อตัวคูณลดกำลัง R

จากรูปที่ 5.11(ก) ปลายเสาไม่เซ เสาโก่งสองทาง (M_T และ M_B ทิศเหมือนกัน)

$$R = 1.0 \text{ เมื่อ } \frac{h}{r} < 60 \tag{5.27ก}$$

$$R = \left(1.32 - 0.006\frac{h}{r}\right) < 1.0 \text{ เมื่อ } 60 < \frac{h}{r} < 100 \tag{5.27ข}$$

จากรูปที่ 5.11(ข) ปลายเสาไม่เคลื่อน เสาโก่งทางเดียว (M_T และ M_B ทิศสวนทางกัน)

$$R = \left(1.07 - 0.008\frac{h}{r}\right) < 1.0 \tag{5.28}$$

จากรูปที่ 5.11(ค) ปลายเสาเคลื่อน เสาโก่งสองทาง (M_T และ M_B ทิศสวนทางกัน)

$$R = \left(1.07 - 0.008\frac{h'}{r'}\right) < 1.0 \qquad (5.29ก)$$

เมื่อ $h' = (0.78 + 0.22r')h > h$ (5.29ข)

และ $r' = \frac{1}{2}\left(r_T^{'} + r_B^{'}\right)$ (5.29ค)

จากรูปที่ 5.11(ง) ปลายเสามีการเซ เสาโก่งทางเดียว)

$$R = \left(1.07 - 0.008\frac{h'}{r}\right) < 1.0 \qquad (5.30ก)$$

$$h' = 2h\left(0.78 + 0.22r_T^{'}\right) > 2h \qquad (5.30ข)$$

จากรูปที่ 5.11(จ) ปลายเสามีการเซ โก่งแบบเสายื่น

$$R = \left(1.07 - 0.008\frac{h'}{r}\right) < 1.0 \qquad (5.31ก)$$

$$h' = 2h \qquad (5.31ข)$$

(3) เมื่อรับแรงดึงเป็นหลัก หรือ P กับ M อยู่ในช่วงที่ 3 ตามรูปที่ 5.9 หรือ $e > e_b$ ตัวคูณลดค่า R' จะแปรเป็นเส้นตรงกับแรงตามแนวแกน จากสภาพสมดุลจนเป็น 1.0 เมื่อแรงตามแนวแกนเป็นศูนย์ คือ

$$R' = 1 - (1 - R)\frac{e_b}{e} > R \qquad (5.32)$$

เมื่อ R' = ตัวคูณลดกำลังเนื่องจากความชะลูด เมื่อแรงดึงเป็นหลัก

R = ตัวคูณลดกำลังเนื่องจากความชะลูด เมื่อแรงอัดเป็นหลัก ตามสมการ 5.27 ถึง 5.31

e_b = ระยะเยื้องศูนย์สมดุล

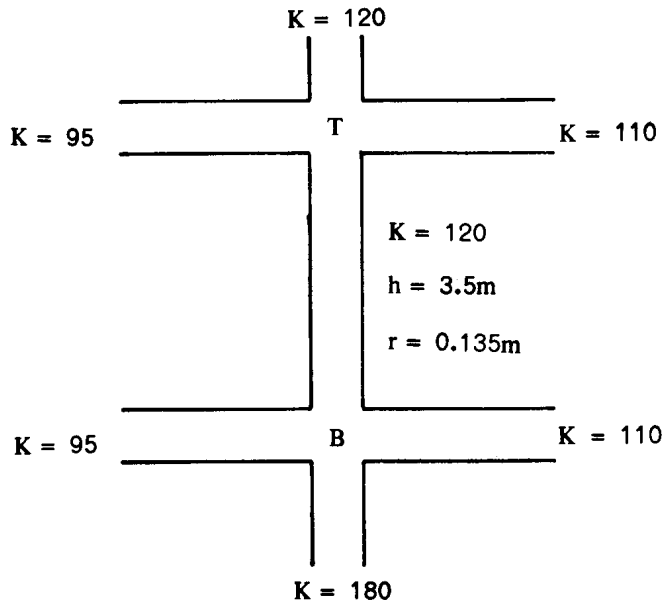
$e = \frac{M}{P}$ = ระยะเยื้องศูนย์จริง

ตัวอย่างที่ 5.10 จงหาค่าตัวคูณลดกำลังของเสา R ของเสาที่แสดง เสาโก่งสองทาง ปลายเสาเซได้

วิธีทำ

ที่ปลายบนของเสามี $r_T^{'} = \frac{\sum K_c}{\sum K_b} = \frac{95+110}{120+120} = 0.854 < 25$

ที่ปลายล่างของเสามี $r_B^{'} = \frac{\sum K_c}{\sum K_b} = \frac{95+110}{120+180} = 0.683 < 25$



แบบฝึกหัดที่ 5.10

ปลายเสามีการเซ เสาโก่งสองทางตามรูปที่ที่ 5.11(ค) สมการ 5.29

$$r' = \frac{1}{2}\left(r_T' + r_B'\right) = \frac{1}{2} \times \left(0.854 + 0.683\right) = 0.7685$$

$$h' = h\left(0.78 + 0.22r'\right) = 3.50 \times \left(0.78 + 0.22 \times 0.7685\right) = 3.321745 \text{ m} < h$$

ใช้ $h' = h = 3.50$ m

$$R = 1.07 - 0.008\frac{h'}{r'} = 1.07 - 0.008 \times \frac{3.50}{0.7685} = 1.034 > 1.0$$

ใช้ $R = 1.0$

5.7 การคำนวณแรงลม

การคำนวณแรงลมตามกฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พ.ศ.2527 และข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร เป็นค่าขั้นต่ำที่ต้องใช้ ต่อมาปี พ.ศ.2550 กรมโยธาธิการและผังเมืองได้มีมาตรฐาน มยผ.1311 ออกมาใช้บังคับ ทำให้การคำนวณออกแบบแรงลมมีความชัดเจนมากขึ้น

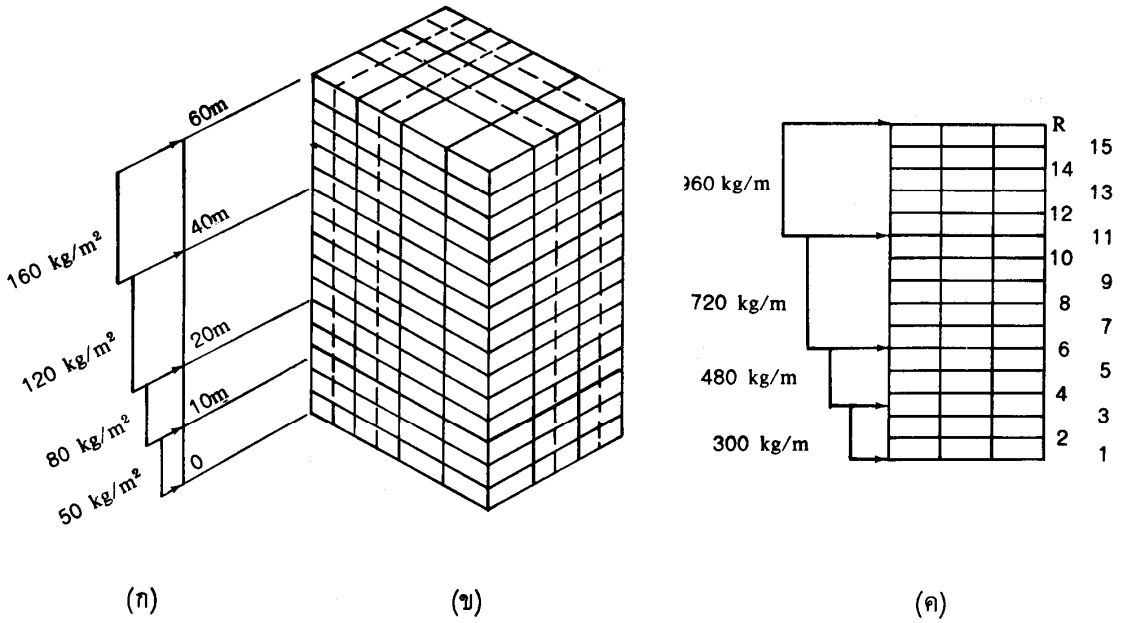
ตารางที่ 5.1 เป็นแรงดันของลมตามความสูงจากพื้นดินตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

พิจารณาจากรูปที่ 5.12(ข) เป็นอาคารสูง 15 ชั้น แต่ละชั้นสูง 4.00 เมตร ด้านหน้ามีสามช่วงเสา แต่ละช่วงห่าง 5.00 เมตร ด้านลึกมีสี่ช่วง แต่ละช่วงยาว 6.00 เมตร รูปที่ 5.12(ก) เป็นแผนภาพของแรงลมที่กระทำกับอาคารโดย 10 เมตรแรกมีแรงดัน 50 kg/m^2 (ถึง $1\frac{1}{2}$ ชั้น) ช่วง 10 เมตรถึง 20 เมตร มีแรงดัน 80 kg/m^2 ช่วง 20 เมตร ถึง 40 เมตร มีแรงดัน 120 kg/m^2 และช่วง 40 เมตร ถึง 60 เมตร มีแรงดัน 160 kg/m^2 แรง

ดันของลมอาจจะกระทำด้านข้างหรือด้านหน้าด้านหลังก็ได้ เมื่อตัดระนาบแบ่งครึ่งช่วงเสาด้านข้างเป็นระนาบขนานด้านหน้า เนื้อที่รับลมด้านข้างจะกว้าง 6.00 เมตร แรงดันด้านข้างคือ $50\times6.00=300$ kg/m , $80\times6.00=480$ kg/m , $120\times6.00=720$ kg/m , $160\times6.00=960$ kg/m โครงด้านนี้จะอ่อนแอกว่าโครงที่ตัดด้วนระนาบซึ่งขนานด้านข้าง จึงนำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.12(ค)

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดของแรงลมต่ำสุด ตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6

ความสูงของอาคารหรือส่วนอาคาร	หน่วยแรงดันลมต่ำสุด, kg/m^2
ส่วนของอาคารจากพื้นดินจนถึงความสูง 10 เมตร	50
ส่วนของอาคารที่สูง 10 เมตร ถึง 20 เมตร	80
ส่วนของอาคารที่สูง 20 เมตร ถึง 40 เมตร	120
ส่วนของอาคารที่สูง 40 เมตร ขึ้นไป	160

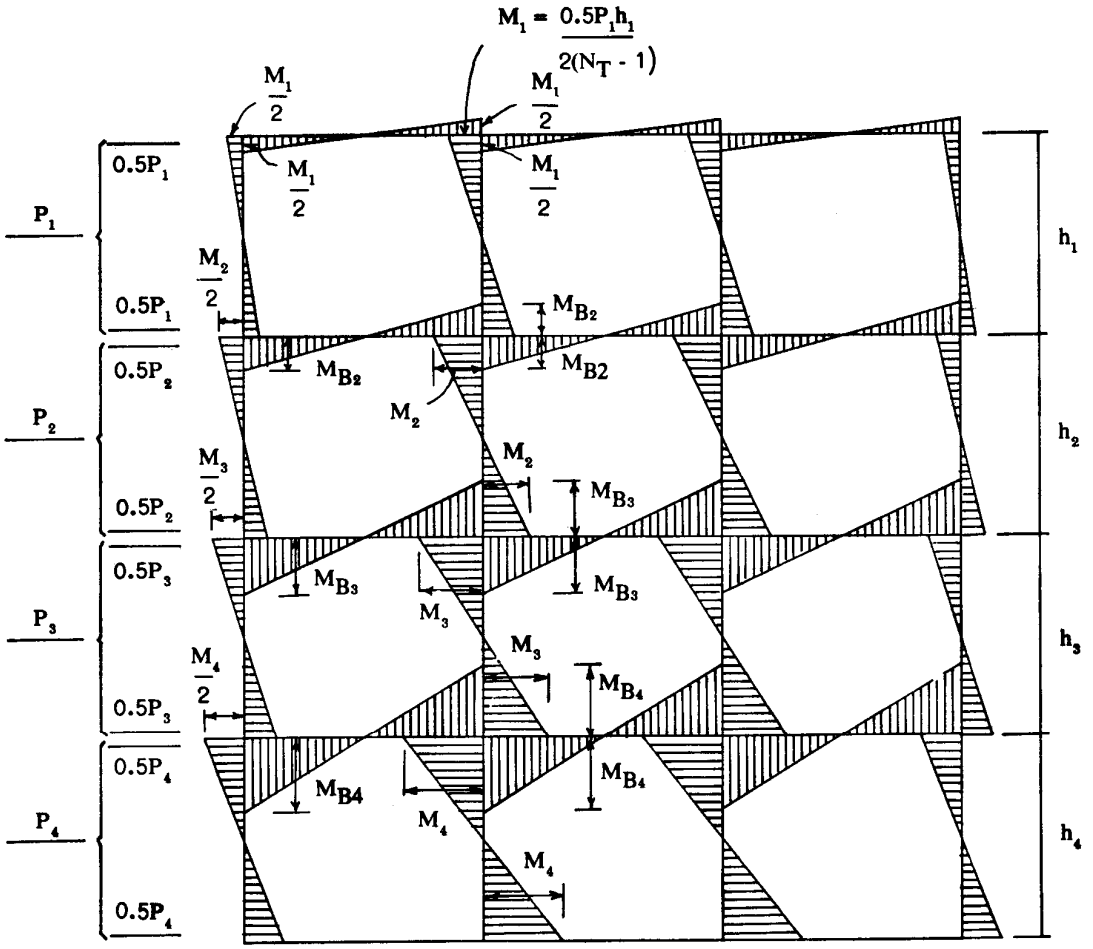


รูปที่ 5.12 การคิดแรงลมตามกฎกระทรวงฯ

เมื่อทราบขนาดแรงลมที่กระทำต่อโครงแต่ละชุด เช่น รูปที่ 5.12(ค) แล้วต้องหาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในเสาและคาน วิธีหามีหลายวิธี Stiffness, Slope deflection, Moment distribution สามวิธีต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ วิธี Stiffness ถือว่าให้ผลลัพธ์ถูกต้องที่สุด อีกสองวิธีคือ Portal และ Cantilever ใช้เครื่องคำนวณธรรมดาก็ได้

วิธีที่เสนอในที่นี้คือ Portal ซึ่งถือว่าจุดดัดกลับของเสาอยู่ที่จุดกึ่งกลางของความสูงของเสาแต่ละชั้น (แต่ชั้นล่างๆ ชั้น 1 หรือ 2 จุดดัดกลับจะอยู่เหนือจุดกึ่งกลาง และบางครั้งอยู่เหนือปลายบนของเสาขึ้น

ไป) พิจารณารูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการคำนวณแรงลมวิธี Portal

สมมติฐาน เสาต้นริมนอกจะรับแรงเฉือนและโมเมนต์ได้เพียงครึ่งหนึ่งของเสาต้นใน

N_T = จำนวนเสาของโครงแต่ละชั้น

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} P_i + \frac{1}{2}P_n}{N_T - 1}\left(\frac{h_n}{2}\right)$$ โมเมนต์สูงสุดในเสาในชั้นที่ n นับจากชั้นบนลงมา

$$M_{Bn} = \frac{1}{2}\left(M_n + M_{n+1}\right)$$ โมเมนต์สูงสุดในคานชั้นที่ n ตรงจุดต่อกับเสา

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} P_i + \frac{1}{2}P_n}{N_T - 1}$$ แรงเฉือนสูงสุดที่กลางเสา

ในรูปที่ 5.13 แสดงแผนภาพโมเมนต์ของเสาและคานรับแรงลม มีข้อสังเกตดังนี้

(1) เนื้อที่ของแผนภาพโมเมนต์จะอยู่บนผิวคานและเสาด้านที่รับแรงอัดซึ่งเป็นวิธีที่ไทยคุ้นเคย แต่ปัจจุบันจะอยู่ด้านรับแรงดึง

(2) โมเมนต์ดัดของเสาชั้นบนจะมีค่าน้อย แล้วมากขึ้นในชั้นล่างๆ ลงมา

(3) โมเมนต์ดัดของเสาที่อยู่ขอบนอกทั้งด้านรับลมและด้านที่หลังลมเหมือนกัน และมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของเสาต้นใน

(4) โมเมนต์ดัดในคานแต่ละชั้นเหมือนกันทุกช่วง และพิจารณาจากเสาต้นในโดยมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของผลบวกของโมเมนต์ในเสาที่อยู่เหนือและอยู่ใต้คาน

เมื่อหาแรงลมและและตัดโครงมาพิจารณาเช่นในรูปที่ 5.12(ค) ให้แบ่งแรงที่กระทำต่อหัวเสาและโคนเสาดังรูปที่ 5.13 หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดทีละครึ่งชั้นจากหลังคาลงมาข้างล่างโดย

$$\text{แรงเฉือนเสาต้นใน} = \frac{\text{แรงลมทั้งหมดเหนือจุดกึ่งกลางเสา}}{\text{จำนวนเสาในชั้น - 1}}$$

$$\text{แรงเฉือนเสาต้นนอก} = \frac{1}{2}\times \text{ แรงเฉือนเสาต้นใน}$$

$$\text{โมเมนต์ดัดเสาต้นใน} = \text{แรงเฉือนเสาต้นใน} \times \frac{1}{2}\times \text{ความยาวของเสา}$$

$$\text{โมเมนต์ดัดของเสาต้นนอก} = \frac{1}{2}\times \text{ โมเมนต์ดัดของเสาต้นใน}$$

$$\text{โมเมนต์ดัดในคาน} = \frac{1}{2}\times (\text{โมเมนต์ดัดโคนเสาเหนือคาน + โมเมนต์ดัดโคนเสาใต้คาน}) \text{ ของต้นใน}$$

ตัวอย่างที่ 5.11 จากรูปที่ 5.12 ถ้าอาคารสูง 7 ชั้น จงเขียนแผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคานและเสา

วิธีทำ

จากรูปที่ (ก) เป็นแผนภาพของแรงลมกระทำด้านข้างของอาคาร เขียนแผนภาพแรงเฉือนดังรูป (ข) โดยแบ่งแรงลมดังนี้

ชั้น 7-หลังคา แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2}\times 0.720\times 4 = 1.44$ ตัน

ชั้น 6-ชั้น 7 แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2}\times 0.720\times 4 = 1.44$ ตัน

ชั้น 5-ชั้น 6 แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2}\times 0.480\times 4 = 0.96$ ตัน

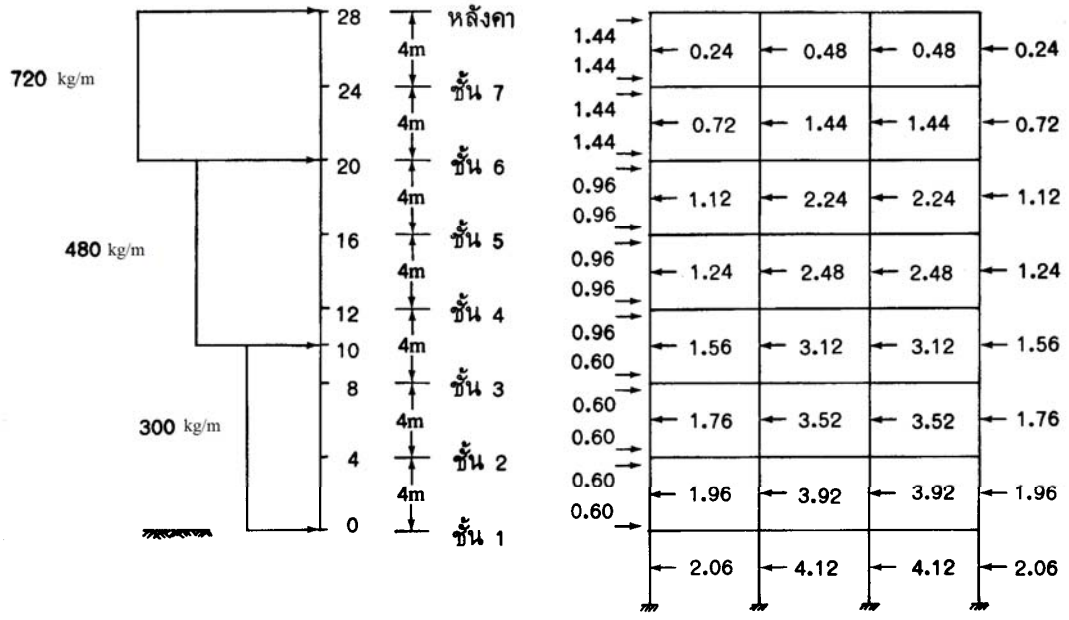
ชั้น 4-ชั้น 5 แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2}\times 0.480\times 4 = 0.96$ ตัน

ชั้น 3-ชั้น 4 แรงลมที่ปลายเสา $= 0.480(12-10) = 0.96$ ตัน

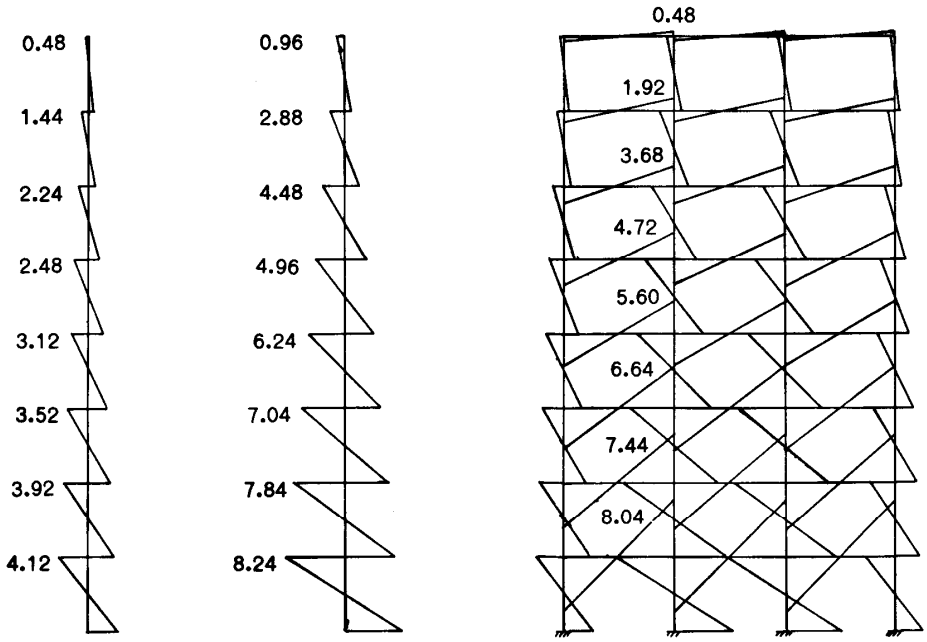
แรงลมที่โคนเสา $= 0.300(10-8) = 0.60$ ตัน

ชั้น 2-ชั้น 3 แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2}\times 0.300\times 4 = 0.60$ ตัน

ชั้น 1-ชั้น 2 แรงลมที่ปลายเสาและโคนเสา $= \frac{1}{2} \times 0.300 \times 4 = 0.60$ ตัน



(ก) (ข)



(ค) (ง)

ตัวอย่าง 5.11 การคำนวณแรงลมอาคาร 7 ชั้น

หาแรงเฉือนจากหลังคาลงมาโดยคิดแรงลมเหนือจุดกึ่งกลางเสาขึ้นไป จำนวนเสาแต่ละชั้น 4 ต้น ต้นริมสองข้างรับเพียงครึ่งเดียว ดังนั้นเสมือนว่ามีเสารับแรงเฉือนเพียง 4-1 = 3 ต้นใน

ชั้น 7-หลังคา แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{1.44}{4-1} = 0.48$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 0.48 = 0.24$ ตัน

ชั้น 6-ชั้น 7 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{1.44+1.44+1.44}{4-1} = 1.44$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 1.44 = 0.96$ ตัน

ชั้น 5-ชั้น 6 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 0.96}{4-1} = 2.24$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 2.24 = 1.12$ ตัน

ชั้น 4-ชั้น 5 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 3 \times 0.96}{4-1} = 2.48$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 2.48 = 1.24$ ตัน

ชั้น 3-ชั้น 4 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 5 \times 0.96}{4-1} = 3.12$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 3.12 = 1.56$ ตัน

ชั้น 2-ชั้น 3 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 5 \times 0.96 + 2 \times 0.60}{4-1} = 3.52$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 3.52 = 1.76$ ตัน

ชั้น 1-ชั้น 2 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 5 \times 0.96 + 4 \times 0.60}{4-1} = 3.92$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 3.92 = 1.96$ ตัน

ฐานราก-ชั้น 1 แรงเฉือนเสาต้นใน $= \frac{4 \times 1.44 + 5 \times 0.96 + 5 \times 0.60}{4-1} = 4.12$ ตัน

แรงเฉือนเสาต้นนอก $= \frac{1}{2} \times 4.12 = 2.06$ ตัน

เขียนแผนภาพแสดงค่าแรงเฉือนของเสาแต่ละชั้นดังรูป (ข) ค่าแรงเฉือนตามวิธีนี้จะใกล้เคียงกับวิธี Stiffness เมื่อออกแบบเสาแต่ละชั้นและหาแรงเฉือนจากแรงลมได้แล้ว หาเหล็กปลอกเดี่ยวของเสาโดยโดยถือว่าเหล็กปลอกเป็นผู้รับแรงลมทั้งหมด เช่นในตัวอย่างนี้เสาระหว่างชั้น 1 กับชั้น 2 รับแรงเฉือน 3.92 ตัน ขนาดเสา 0.60×0.60 m^2 ถ้าใช้เหล็กปลอก RB 9 mm หาระยะเรียงเหล็กปลอก

$$s = \frac{A_v f_v d}{V} = \frac{(2 \times 0.636) \times 1200 \times (60-6)}{3{,}920} = 21 \text{ cm}$$

ใช้ 2-ป RB 9 mm@ 200 mm

หาโมเมนต์ดัดในเสาแต่ละชั้นจากหลังคาลงมา โดยเอาแรงเฉือนของแต่ละชั้นคูณความยาวครึ่งหนึ่งของเสาในชั้นนั้น สำหรับข้อนี้ $\frac{h}{2}=\frac{4.00}{2}=2.00$ เมตร ทุกชั้น และเนื่องจากแรงเฉือนในเสาต้นนอกเป็นครึ่งหนึ่งของเสาต้นใน โมเมนต์ดัดจึงเป็นครึ่งหนึ่งด้วยดังรูป (ค) เป็นโมเมนต์ดัดของเสาต้นนอก และรูป (ง) เป็นโมเมนต์ดัดของเสาต้นใน นำไปเขียนแผนภาพของโมเมนต์ในรูป (จ)

$$M=\frac{Vh}{2}$$

ตำแหน่งเสา	โมเมนต์เสานอก	โมเมนต์เสาต้นใน
ชั้น 7-หลังคา	$0.24\times 2.00=0.48\ \text{T}\cdot\text{m}$	$0.48\times 2.00=0.96\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 6-ชั้น 7	$0.72\times 2.00=1.44\ \text{T}\cdot\text{m}$	$1.44\times 2.00=2.88\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 5-ชั้น 6	$1.12\times 2.00=2.24\ \text{T}\cdot\text{m}$	$2.24\times 2.00=4.48\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 4-ชั้น 5	$1.24\times 2.00=2.46\ \text{T}\cdot\text{m}$	$2.48\times 2.00=4.96\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 3-ชั้น 4	$1.56\times 2.00=3.12\ \text{T}\cdot\text{m}$	$3.12\times 2.00=6.24\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 2-ชั้น 3	$1.76\times 2.00=3.52\ \text{T}\cdot\text{m}$	$3.52\times 2.00=7.04\ \text{T}\cdot\text{m}$
ชั้น 1- ชั้น 2	$1.96\times 2.00=3.92\ \text{T}\cdot\text{m}$	$3.92\times 2.00=7.84\ \text{T}\cdot\text{m}$
ฐานราก-ชั้น 1	$2.06\times 2.00=4.12\ \text{T}\cdot\text{m}$	$4.12\times 2.00=8.24\ \text{T}\cdot\text{m}$

ตำแหน่งคาน	โมเมนต์เสาเหนือคาน ตัน·เมตร	โมเมนต์เสาใต้คาน ตัน·เมตร	โมเมนต์คาน ตัน·เมตร
คานหลังคา	0	0.96	$\frac{1}{2}(0+0.96)=0.48$
คานชั้น 7	0.96	2.88	$\frac{1}{2}(0.96+2.88)=1.92$
คานชั้น 6	2.88	4.48	$\frac{1}{2}(2.88+4.48)=3.68$
คานชั้น 5	4.48	4.96	$\frac{1}{2}(4.48+4.96)=4.72$
คานชั้น 4	4.96	6.24	$\frac{1}{2}(4.96+6.24)=5.60$
คานชั้น 3	6.24	7.04	$\frac{1}{2}(6.24+7.04)=6.64$
คานชั้น 2	7.04	7.84	$\frac{1}{2}(7.04+7.84)=7.44$
คานชั้น 1	7.84	8.24	$\frac{1}{2}(7.84+8.24)=8.04$

นำผลลัพธ์ของโมเมนต์ที่ได้เขียนแผนภาพโมเมนต์ดังรูป (จ)

6

ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

6.1 ฐานราก

ฐานรากเป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่ใต้ผิวดินเพื่อทำหน้าที่รับน้ำหนักจากเสาถ่ายลงดิน ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมมากเนื่องจากก่อสร้างได้สะดวก กำลังรับน้ำหนักสูง และทนทานต่อดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าไม้ การออกแบบเกี่ยวกับฐานรากจำเป็นต้องมีความรู้ทางปฐพีกลศาสตร์เข้ามาประกอบด้วยจึงจะสมบูรณ์ ถ้าพื้นที่ทำการก่อสร้างอยู่บนภูเขาซึ่งชั้นดินลึกเพียงเล็กน้อยก็ถึงหินภูเขาเลย ให้ทำฐานรากฝากบนหิน แต่ถ้าบริเวณนั้นอยู่บนที่ราบเชิงเขาหรือมีดินลูกรังมาก เช่น ทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดินจะแน่นรับแรงกดได้สูง บางครั้งสูงเกิน 30 ตันต่อตารางเมตร ข้อควรระวังสำหรับดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่เม็ดดินมีลักษณะแบนๆ อาจจะไหลไปกับน้ำใต้ดินจนเกิดโพรงใต้ฐานรากเป็นเหตุให้ทรุดตัวได้ บริเวณภาคใต้ของไทยรวมทั้งมาเลเซียมีสภาพดินแน่นมาก รับน้ำหนักได้สูงมากด้วย มีการทดสอบสภาพดินที่หาดใหญ่เพื่อก่อสร้างอาคารสูง 13 ชั้น พบว่าดินรับแรงกดได้เกิน 35 ตันต่อตารางเมตร ในกรณีที่ชั้นดินแข็งอยู่ตื้นจะทำเป็นฐานรากแผ่หรือฐานรากตื้น (shallow footing) ถ่ายน้ำหนักลงดินโดยตรง แรงกดปลอดภัยของดินสำหรับบริเวณภาคตะวันออกประมาณ 6 ตันต่อตารางเมตร ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือประมาณ 8 ตันต่อตารางเมตร ภาคใต้อาจจะ 10-15 ตันต่อตารางเมตร

พื้นที่ภาคกลางบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา-บางปะกงตั้งแต่อยุธยาลงมาถึงทะเลนั้น สันนิษฐานว่าเป็นทะเลมาก่อนและเกิดการทับถมของดินเหนียวและทรายสลับกันเป็นชั้นๆ ลักษณะของชั้นดินคล้ายกับสปริงที่เคยเข้าใจว่าช่วยลดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว แต่เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เม็กซิโกซิตีซึ่งมีชั้นดินคล้ายกรุงเทพมหานครแล้วเมืองทั้งเมืองแทบถล่มทลาย จึงต้องปรับความเข้าใจใหม่ว่าชั้นดินลักษณะนี้เป็นตัวขยายแรงแผ่นดินไหว การออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหวตามกฎกระทรวงฯ ฉบับ 49 ต่อมาได้ยกเลิกและออกใหม่ปี 2550 กรมโยธาธิการและผังเมือง ออกมาตรฐาน มยผ. 1302 มีข้อเสนอแนะวิธีการออกแบบที่มีประโยชน์มาก บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเคยมีระดับสูงจากน้ำทะเลปานกลางไม่เกิน 1.50 เมตร ปัจจุบันบางบริเวณเสมอหรือต่ำกว่าระดับน้ำทะเลแล้ว ระดับน้ำใต้ดินต่ำสุดลึกไม่เกิน 2 เมตรจากผิวดิน ซึ่งเสาเข็มไม้จะต้องแช่ในน้ำตลอดเวลาจึงจะคงทน (ในอิตาลีมีอายุเป็นพันปี) แต่ถ้าเปียกสลับแห้งจะผุพังเร็วมาก ดินลึก 0-2 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อนที่แปรเปลี่ยนไปตามท้องที่ซึ่งบางที่ถึงกับเป็น

เลนเหลว ความลึก 2 ถึง 14 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อนอุ้มน้ำมาก ความลึก 14 ถึง 21 เมตรเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง และจาก 21 เมตรลงไปเป็นดินปนทรายซึ่งรับน้ำหนักได้มาก เมื่อลึกลงไปอีกเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากสลับกับชั้นทราย ชั้นดินเหนียวน้ำจะซึมผ่านยากในขณะที่ชั้นทรายน้ำซึมง่าย ในชั้นทรายบางชั้นเป็นน้ำจืดที่ขุดเจาะทำน้ำบาดาล แต่บางชั้นจะเป็นน้ำเค็มจัด บางครั้งที่ใช้เสาเข็มตอกหยั่งจะให้ถึงชั้นทรายกลับพบชั้นเปลือกหอยขวางตอกไม่ลง แต่ก็รับน้ำหนักไม่ได้ตามต้องการเนื่องจากชั้นเปลือกหอยเป็นชั้นหินผุ สำหรับความหนาของชั้นทรายจากปลายเสาเข็มถึงรอยต่อกับชั้นดินเหนียวแข็ง ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่าสามเท่าของขนาดเสาเข็ม ซึ่งดูได้จากผลการเจาะสำรวจดิน

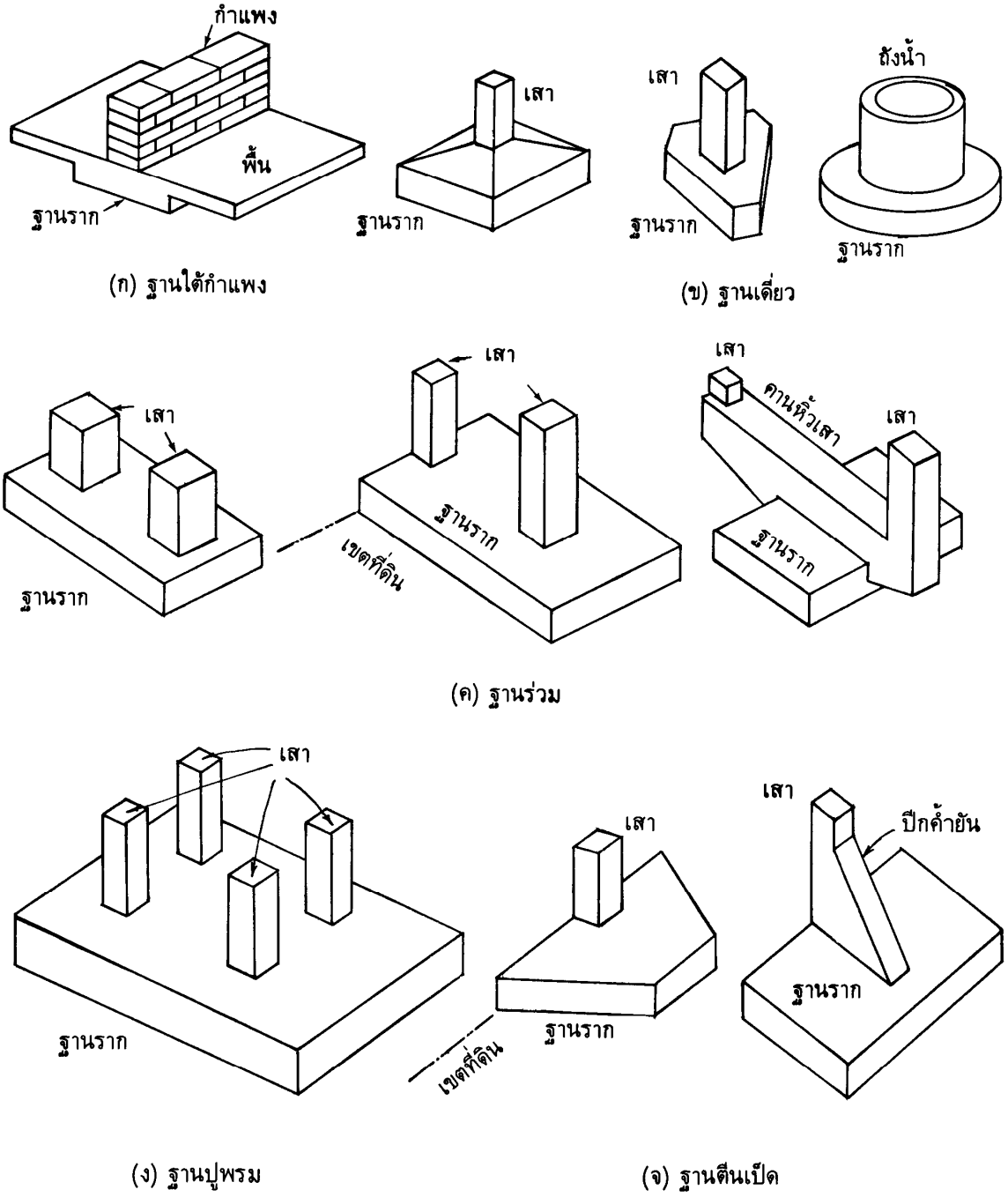
เสาเข็มที่ใช้รับน้ำหนักของฐานรากมีสองชนิดคือ เสาเข็มสั้นซึ่งมีความยาว 4, 6, 7, 8, 10, 12, 14 เมตร ทั้งเสาเข็มไม้ และคอนกรีตอัดแรง ดินรับน้ำหนักจากเสาเข็มโดยอาศัยความเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม อีกชนิดคือ เสาเข็มยาว จะมีความยาว 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 เมตร เมื่อตอกลงไปในดินจนปลายเสาเข็มจิกกับชั้นทรายที่ความลึกประมาณ 21 เมตรหรือมากกว่าแล้ว เสาเข็มจะรับน้ำหนักโดยอาศัยความเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม ร่วมกับ แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ถ้าแรงเสียดทานมากกว่าแรงแบกทานเรียกเสาเข็มนั้นว่า เสาเข็มเสียดทาน (friction pile) แต่ถ้าแรงแบกทานมากกว่าแรงเสียดทานเรียกเสาเข็มนั้นว่า เสาเข็มแบกทาน (bearing pile)

อัตราการทรุดตัวของฐานรากทั่วๆ ไปทั้งชนิดฐานรากตื้นและฐานรากลึกหรือฐานรากบนเสาเข็ม ในขณะรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานจะทรุดลงอย่างรวดเร็วในสองปีแรก จากนั้นจะทรุดลงอย่างช้าๆ เสาเข็มสั้นจะทรุดมากและเร็วกว่าเสาเข็มยาว ทั้งนี้ยังขึ้นกับอัตราส่วนน้ำหนักลงฐานรากต่อกำลังต้านทานของฐานราก ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ถ้ามากกว่า 1 ฐานรากจะวิบัติ ควรพยายามออกแบบให้มีค่าใกล้เคียงกันเพื่อให้อัตราการทรุดตัวใกล้เคียงกัน อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากจะมีอัตราการทรุดตัวมากกว่าที่มีค่าน้อย จึงเกิดการทรุดตัวต่างกันเป็นเหตุให้อาคารแตกร้าวได้ นอกจากนี้ ห้ามใช้เสาเข็มที่มีความยาวแตกต่างกันมากในอาคารหลังเดียวกัน เนื่องจากทำให้มีการทรุดตัวแตกต่างกันมากจนอาคารแตกร้าวได้ แต่ก็ยกเว้นกรณีไหล่เขาที่มีชั้นหินอยู่ลึกลงไป เสาเข็มที่ใช้ต้องมีการติดหัวเหล็ก (shoe) ที่ใช้จิกกับชั้นหินไม่ให้เลื่อนไหลไปกับความเอียง ความยาวของเสาเข็มอาจจะแตกต่างกันได้

6.2 แบบของฐานราก

ฐานรากทั้งชนิดฐานตื้นและฐานรากบนเสาเข็ม อาจจะแบ่งได้หลายแบบตามรูปร่าง การใช้งาน ขอบเขตที่ดิน และสภาพฐานรากของอาคารเดิมที่ขุดออกไม่ได้ ล้วนแล้วแต่มีผลต่อการออกแบบฐานราก พิจารณาฐานรากในรูปที่ 6.1

1. ฐานใต้กำแพง (Wall Footing) รูปที่ 6.1(ก) เป็นฐานรากต่อเนื่องตามความยาวของกำแพง ความกว้างของฐานรากมากกว่าความกว้างของกำแพง นิยมใช้กับกำแพงหรือถ้าเป็นบริเวณที่ดินแข็งมาก เช่น ภาคใต้ของไทยและมาเลเซีย บ้านชั้นเดียวจะทำฐานรากแบบนี้บนผิวดินและให้ตัวฐานรากเป็นพื้นไปในตัว



รูปที่ 6.1 ฐานรากชนิดต่างๆ

2. ฐานเดี่ยว (isolated footing) รูปที่ 6.1(ข) ในกรณีที่เสาห่างๆ กัน หรือเสาด้านในของอาคาร เมื่อออกแบบแยกเสาละหนึ่งฐานรากแล้วนำไปเขียนแบบลงในแปลนฐานรากแล้วฐานรากไม่เกยกัน ก็จะแยกเสาหนึ่งต้นกับฐานรากหนึ่งฐาน รูปร่างอาจจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม หกเหลี่ยม แปดเหลี่ยม หรือฐานรากกลม สำหรับฐานรากกลมมักจะเป็นฐานรากของไซโล หอสูงเก็บน้ำ

3. ฐานรากร่วม (combined footing) รูปที่ 6.1(ค) เป็นฐานรากที่ใช้รับน้ำหนักจากเสาสองต้น หรือเสามากกว่าสองต้นแต่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน สังเกตว่าจะออกแบบเป็นฐานรากชนิดนี้เมื่อพบว่าออกแบบฐานรากเดี่ยวสำหรับเสาแต่ละต้นแล้วเขียนลงในแปลนฐานรากพบว่าฐานรากมีการเกยกันในแนวเส้นตรง หรือกรณีที่เสาตอม่อชิดเขตที่ดิน (ปัจจุบันกฎหมายไม่อนุญาตให้ก่อสร้างชิดเขตที่ดินแล้ว) หรืออาจจะชิดอาคารเดิมในเขตที่ดินเดียวกัน จำเป็นต้องก่อสร้างให้เป็นฐานรากร่วม ทั้งแบบมีคาน (strap beam) หรือไม่มีคาน ในบางกรณีเสาไปตรงกับตำแหน่งของฐานรากเก่าที่ทุบทิ้งไม่ได้ ก็อาจจะตอกเข็มทำฐานรากในช่องว่างระหว่างฐานรากและทำคานยื่นไปรับเสาทั้งสองข้างเอาไว้ กรณีหลังนี้ต้องมีอาคารเดิมประคองเอาไว้ไม่ให้พลิกล้ม เช่นการต่อเติมตึกแถวเพื่อทำห้องมั่นคงของธนาคารสาขาที่ซื้อตึกแถวมาดัดแปลง

4. ฐานรากปูพรม (mat footing) หรือฐานเสื่อ (mat = เสื่อ) รูปที่ 6.1(ง) เป็นฐานรากที่มีเสาตั้งแต่ 3 ต้นขึ้นไปและอาจจะมีปล่องลิฟต์อยู่ด้วย โดยเสาและปล่องลิฟต์ไม่ได้วางตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เกิดจากการที่ออกแบบแยกเป็นฐานรากเดี่ยว และเขียนแบบลงในแปลนฐานรากแล้วพบว่าฐานรากเกยกันไปหลายๆ ฐาน พบในอาคารสูง การวิเคราะห์ออกแบบใช้หลักการว่า หาจุดศูนย์ถ่วงของกลุ่มน้ำหนักแล้วจัดฐานรากให้ศูนย์ถ่วงไปตรงกับศูนย์ถ่วงของน้ำหนัก ความหนาฐานรากใช้เท่ากับความหนาสูงสุดของฐานรากเดี่ยวที่เคยออกแบบไว้แล้ว เหล็กเสริมใช้เหมือนกับฐานรากเดี่ยวที่เสริมเหล็กถี่ที่สุดแล้วจัดเป็นสองชั้นเหมือนกัน วิธีนี้จะสิ้นเปลืองบ้างแต่ปลอดภัย ถ้าต้องการให้ประหยัดต้องวิเคราะห์ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่น SAFE หรือ MIDAS หรือโปรแกรมอื่นๆ ที่สามารถวิเคราะห์แบบ thick plate ได้

5. ฐานตีนเป็ด รูปที่ 6.1(จ) เป็นฐานรากที่รับน้ำหนักจากเสาต้นเดียวริมขอบฐานราก ทำให้เกิดการเยื้องศูนย์ เช่น ฐานรากรับกำแพงรั้วชิดเขตที่ดิน ฐานรากรับหลังคารถแบบหลังคายื่น ฐานรากแบบนี้รับน้ำหนักไม่มากนักจึงไม่ควรใช้กับอาคารทั่วไป เนื่องจากเสาตอม่ออาจจะหักได้ ยกเว้นว่าจะทำตอม่อลึกเท่ากับความกว้างฐานราก ค่าโมเมนต์ดัดจากการเยื้องศูนย์จะไปถ่ายให้คานคอดินเป็นโมเมนต์ลบ การทำปีกค้ำยันดังแสดงก็ไม่ช่วยป้องกันการหักของตอม่อได้ สำหรับฐานรากรั้วแบบตีนเป็ดให้มีการฝังมากพอที่ดินถมมีน้ำหนักถ่วงการพลิกล้มของกำแพงได้

6.3 การกระจายน้ำหนัก

ฐานแผ่ รูปที่ 6.2 เมื่อฐานรากวางบนดินและรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนตอม่อ ฐานรากมีความหนามากพอที่จะไม่โก่งตัวมาก ฐานรากจะกดลงในดินประมาณว่าสม่ำเสมอตลอดฐานราก แรงต้านทานของดินก็จะสม่ำเสมอ (แต่ถ้าฐานรากบางจะโก่งที่ขอบมาก จึงกดดินน้อย แรงต้านของดินจะมากตรงตอม่อและน้อยที่สุดตรงขอบฐานราก) โดยที่

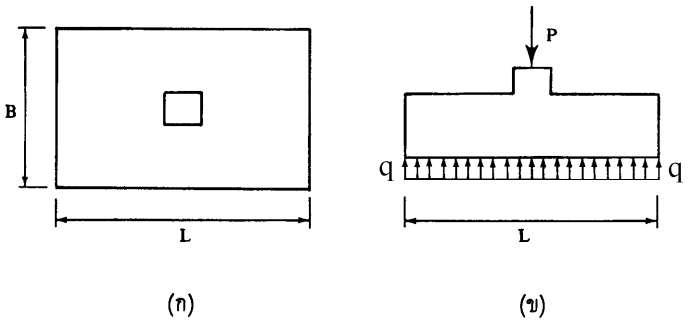
$$q = \frac{P}{BL} \tag{6.1}$$

P = น้ำหนักบรรทุกลงตามแกนเสาตอม่อ, kg

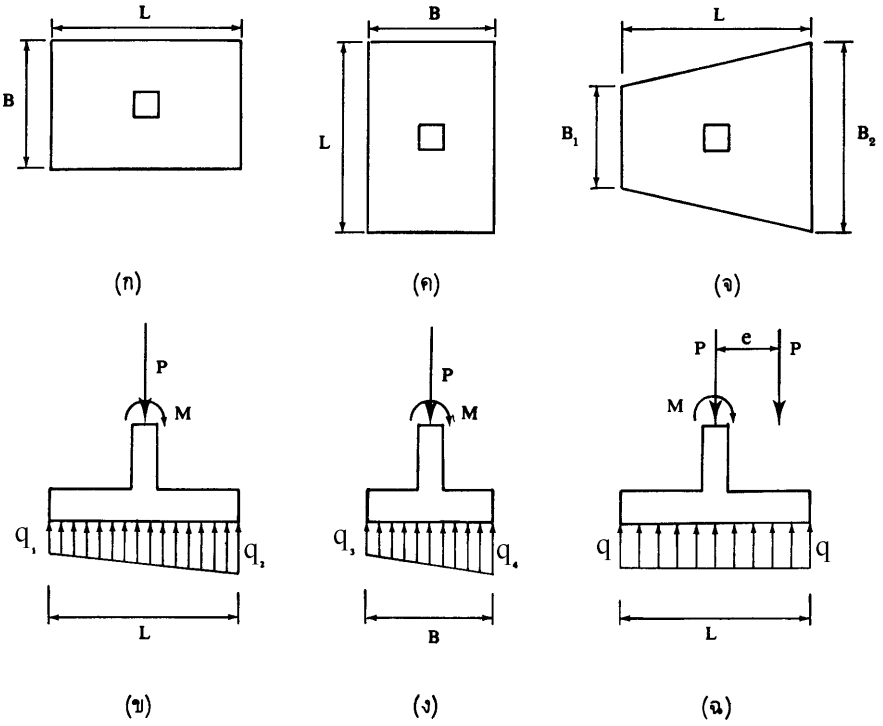
B = ด้านกว้างของฐานราก, m

L = ด้านยาวของฐานราก, m

q = แรงต้านเฉลี่ยของดิน, kg/m2



รูปที่ 6.2 ฐานรากแผ่รับน้ำหนักตามแนวแกน



รูปที่ 6.3 ฐานรากแผ่รับน้ำหนักเยื้องศูนย์

ในกรณีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตอม่อรับน้ำหนักบรรทุกตามแกน P และโมเมนต์ดัด M จากแรงทางข้าง ซึ่งทิศทางไม่แน่นอน หน่วยแรงแบกทานจากดินดันขึ้นจะไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 6.3(ก) และ (ข) ได้

$$q_1 = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{BL^2} \quad (6.2)$$

$$q_2 = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{BL^2} \quad (6.2)$$

$$P = \frac{1}{2}BL(q_1 + q_2) \quad (6.2)$$

$$M = \frac{1}{12}BL^2(q_2 - q_1) \quad (6.2)$$

จากรูปที่ 6.3(ค) และ (ง)

$$q_3 = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{LB^2} \quad (6.3)$$

$$q_4 = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{LB^2} \quad (6.3)$$

$$P = \frac{1}{2}BL(q_3 + q_4) \quad (6.3)$$

$$M = \frac{1}{12}LB^2(q_4 - q_3) \quad (6.3)$$

ในกรณีที่ตอม่อรับน้ำหนักตามแนวแกนกับโมเมนต์ดัดที่แน่นอน อาจจะออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูโดยระยะเยื้องศูนย์ $e = \frac{M}{P}$ ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงฐานรากตรงกับระยะเยื้องศูนย์ ทำให้ความดันของดินสม่ำเสมอ ถ้าฐานรากยาว L กว้าง B_1 กับ B_2 ตามรูปที่ 6.3(จ) และ (ฉ) จะได้

$$P = \frac{1}{2}qL(B_1 + B_2) \quad (6.4)$$

$$M = \frac{1}{12}qL^2(B_2 - B_1) \quad (6.4)$$

$$e = \frac{M}{P} = \frac{L}{6} \cdot \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1} \quad (6.4)$$

ค่าแรงแบกทาน q จากสมการ 6.1 ค่า q_2 จากสมการ 6.2 และค่า q_4 จากสมการ 6.3 ต้องไม่เกินค่าในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 กำลังแบกทานปลอดภัยของดิน

บริเวณ	กำลังแบกทานปลอดภัย T/m^2
กรุงเทพมหานคร, ลุ่มน้ำเจ้าพระยา-บางปะกง,ริมฝั่งแม่น้ำที่เป็นดินเหนียว	2
พื้นที่ทั่วๆ ไป ยกเว้นที่ลุ่มภาคกลาง	6-12
บริเวณดินแข็งใกล้ภูเขา มาเลเซียตอนบน	12-15

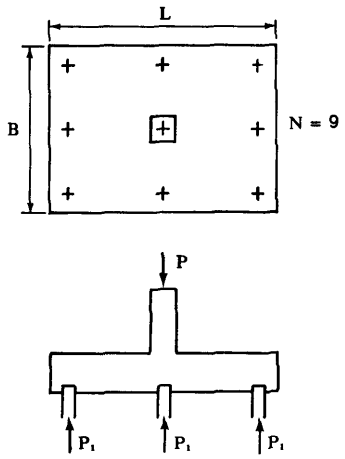
ฐานรากบนเสาเข็ม เป็นฐานรากลึก หากความหนาของฐานรากมากเพียงพอจนการโก่งตัวน้อยมาก ถือว่าฐานรากทรุดตัวเท่ากันทุกจุด เสาเข็มจึงรับน้ำหนักจากฐานรากเท่าๆ กัน ดังรูปที่ 6.4

$$q = \frac{P}{N} \tag{6.5}$$

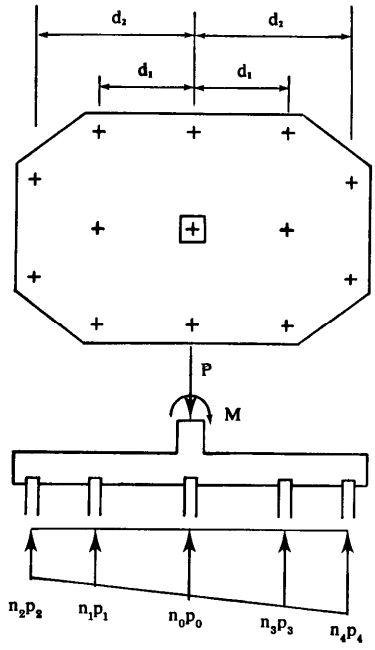
เมื่อ P = น้ำหนักจากฐานรากถ่ายลงเสาเข็ม, kg

N = จำนวนเสาเข็ม, ต้น

q = แรงแบกทานของเสาเข็ม, kg/ต้น



รูปที่ 6.4 ฐานรากบนเสาเข็มรับน้ำหนักตามแกน



รูปที่ 6.5 ฐานรากบนเสาเข็มรับน้ำหนักเยื้องศูนย์

ในกรณีฐานรากรับน้ำหนักตามแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด ดังรูปที่ 6.5 เสาเข็มจะรับน้ำหนักไม่เท่ากัน ในการออกแบบให้พยายามออกแบบให้เสาเข็มรับแรงกดทั้งหมด ถ้ามีกรณีที่เป็นแรงดึงและเสาเข็มเป็นเสาเข็มเสียดทาน (แรงเสียดทานรอบผิวมากกว่าแรงแบกทานที่ปลาย เป็นเสาเข็มยาว) กำลังต้านทานของเสาเข็มในการรับแรงถอนไม่เกินครึ่งหนึ่งของกำลังแบกทานรับแรงกด

$$q_i = \frac{P}{N} \pm \frac{Md_i}{\sum_{i=1}^{N} d_i^2} \qquad (6.6)$$

เมื่อ P = น้ำหนักตามแนวแกน, kg

M = โมเมนต์ดัดรอบแกนผ่านศูนย์กลางตอม่อ, $kg \cdot m$

N = จำนวนเสาเข็ม, ต้น

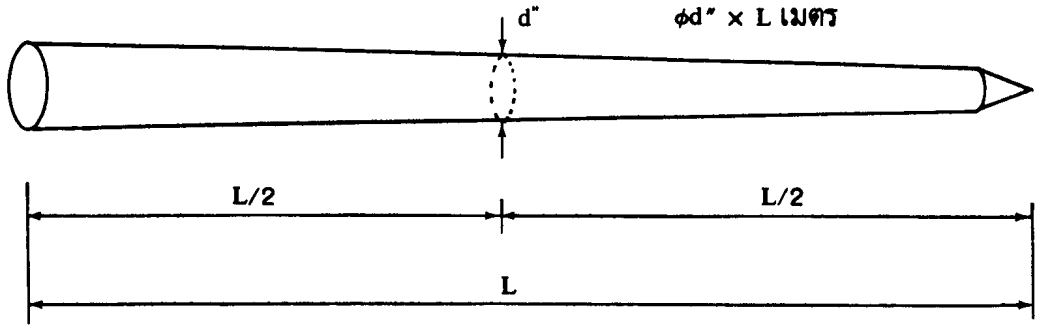
d_i = ระยะตั้งฉากจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงแกนหมุน, m

q_i = แรงแบกทานของเสาเข็มแต่ละต้น ถ้าเป็นลบหมายถึงแรงถอน, kg

6.4 เสาเข็ม

เสาเข็มที่ใช้รับน้ำหนักจากฐานรากมีหลายชนิด เช่น เสาเข็มไม้ เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เสาเข็มเจาะ เสาเข็มแรงเหวี่ยง (spun pile) เสาเข็มเหล็ก (HP) ปัจจุบันเสาเข็มไม้ไม่นิยมทำฐานรากอาคารแต่จะใช้งานชั่วคราว เช่นแผงกันดินตื้นๆ

เสาเข็มไม้ เป็นไม้เบญจพรรณหรือไม้สน เมื่อลอกเปลือกแล้วต้องไม่คดงอหรือแตกร้าว การระบุขนาดจะกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางต้นเป็นนิ้ว และบอกความยาวเป็นเมตร เช่น ϕ2"×2.00 m , ϕ3"×3.00 m, ϕ4"×4.00 m, ϕ5"×5.00 m, ϕ6"×6.00 m, และ ϕ8"×8.00 m ขนาดที่นิยมใช้คือ ϕ4"×4.00 m ถึง ϕ6"×6.00 m สำหรับขนาด ϕ8"×8.00 m ปัจจุบันหาไม่ได้แล้ว



รูปที่ 6.6 เสาเข็มไม้และการบอกขนาด

เดินนั้นเสาเข็มไม้มีราคาถูกกว่าเสาเข็มคอนกรีตครึ่งต่อครึ่ง แต่มีปัญหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดที่ระบุในแบบ โดยความยาวได้ตามระบุ ในกรณีนี้ให้ยืนยันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต้องได้ตามแบบส่วนความยาวจะมากกว่าเป็นผลดี เสาเข็มรับน้ำหนักได้มากขึ้น ระดับฐานรากจะต้องระบุให้เพียงพอที่เสาเข็มจะจมในน้ำตลอดเวลา เช่นในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จะกำหนดให้หัวเสาเข็ม (ซึ่งคือท้องฐานราก) ต้องให้หัวเสาเข็มต่ำกว่าระดับดินเดิม (ไม่รวมดินถม) ประมาณ 2 เมตร ซึ่งเป็นระดับน้ำใต้ดินต่ำสุด ถ้าเสาเข็มไม้เปียกสลับแห้งจะผุพังอย่างรวดเร็วและรับน้ำหนักไม่ได้

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เป็นเสาเข็มที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ผลิตโดยวิธี pre-tension หรือดึงเหล็กก่อน หล่อคอนกรีตจนมีกำลังประมาณ 80 % ของกำลังที่ออกแบบแล้วตัดเหล็กให้อัดกลับ ถ้าใช้คอนกรีตก่อตัวเร็วก็จะใช้เวลาเพียง 7 วันก็นำไปใช้งานได้ กำลังคอนกรีตที่ใช้ในคอนกรีตอัดแรงต้องสูงมากกว่าคอนกรีตที่ใช้งานทั่วไป เนื่องจากธรรมชาติของคอนกรีตอัดแรงที่ถ้าใช้คอนกรีตกำลังต่ำก็จะไม่ได้ประโยชน์จากการอัดแรง เหตุที่ทำเป็นคอนกรีตอัดแรงเพื่อประโยชน์ในการขนส่งและยกขึ้นตอก เหล็กปลอกในเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงทำหน้าที่สลายพลังงานจากการตอก ซึ่งจะมีมากบริเวณหัวเสาเข็มทั้งที่ถูกตอกและที่แทรกลงดิน เหล็กปลอกจึงถี่บริเวณปลายเสาเข็ม ส่วนช่วงกลางจะไม่ถี่มาก เสาเข็มที่ส่งถึงสถานที่ก่อสร้างหากพบที่ร้าว คดงอ ให้ขนกลับทันที อย่ารับฝากทิ้งไว้เพราะมักไม่นำกลับคืน

รูปที่ 6.7 รูปตัดเสาเข็มที่มีใช้งาน

รูปที่ 6.7 เป็นรูปตัดเสาเข็มที่เคยผลิตขาย บางรูปตัดก็เลิกผลิตไปแล้ว รูป (ก) สี่เหลี่ยมตัน รูป (ข) สี่เหลี่ยมมีรูกลวงข้างใน รูป (ค) เป็นเสาเข็ม DH หรือ Double Halfmoon ตอนนี้เลิกผลิตไปแล้ว รูป (ง) เสาเข็ม I ยังคงนิยมใช้ รูป (จ) รูป Y เลิกผลิตไปนานมากเนื่องจากรูปทรงนี้เสียหายจากการขนส่งมาก รูป (ฉ) หกเหลี่ยมกลวง (HP) มักจะเป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก รูป (ช) หน้าตัดกลมตัน ปัจจุบันไม่นิยมเนื่องจากผลิตยากต้นทุนสูง รูป (ซ) เสากลมกลวง มักจะเป็นเสาเข็มแรงเหวี่ยง เมื่อหมุนแบบด้วยความเร็วสูงเนื้อคอนกรีตจะแน่นมาก หยุดหมุนแกะแบบหล่อได้เลยทำให้ผลิตได้รวดเร็ว รูป (ญ) เป็นเสาเข็มเขื่อนที่มีบ่ารับแผงคอนกรีต ใช้ทำเขื่อนกันดินริมคลองหรือแม่น้ำ

เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อขึ้นใช้เอง ความยาวไม่เกิน 10 เมตร การคำนวณต้องคำนึงถึงจุดยก ซึ่งอยู่ประมาณ 0.207 ของความยาวเสาจากปลายเสา ป้องกันการหักระหว่างยกขึ้นตอก ปริมาณเหล็กเสริมควรอยู่ที่ร้อยละ 4 ของหน้าตัดเสา เหล็กปลอกปลายเสาทั้งสองข้างใช้ ป-RB 9 mm @ 50 mm ระยะ 1.00 เมตรจากปลายเสา ช่วงกลาง ป-RB 9 mm @ 150 mm

เสาเข็มเจาะ (bore pile) มีหน้าตัดวงกลมขนาดใหญ่ วิธีการทำมีสองรูปแบบ คือแบบเจาะแห้งสำหรับพื้นที่ไกลจากแหล่งน้ำ และความลึกไม่มากนัก ตอกปลอกเหล็กด้วยสามขา (tri-pod) และขุดเอาดินในปลอกเหล็กออก ต่อปลอกแล้วตอกลงไปอีก ทำซ้ำๆ จนถึงระดับชั้นดินเหนียวแข็งก็ใช้วิธีขุดดินขึ้นมา แต่พอถึงชั้นทรายหนาที่จะให้เป็นปลายเสาเข็มอาจจะมีน้ำทะลักขึ้นมา ใช้หินคลุกผสมซีเมนต์แบบแห้งเทลงไปและตำด้วยลูกตุ้มอย่างรวดเร็ว หย่อนเหล็กเสริมที่เตรียมไว้ ความยาวประมาณ 10 เมตรและขัดไว้ไม่ให้หล่นลงไป เทคอนกรีตโดยใช้ท่อผ้าใบลดการแยกตัว เมื่อเทคอนกรีตถึงระดับปลอกเหล็กให้ถอนปลอกพร้อมกับเทคอนกรีตประสานอย่างสอดคล้องกันจนเต็มหลุม แบบที่สองเรียกว่า แบบเจาะเปียก เป็นเสาเข็มที่ยาวมาก อาจจะถึง 60 เมตร แนวการเจาะผ่านชั้นทรายหลายชั้นที่มักจะพังทลายไปทำให้เสาเข็มสั้นกว่าที่ต้องการหรืออุดรูเจาะไปหมด วิธีป้องกันจะใช้สารละลายเบนโทไนต์ที่ผลิตจากแร่แบไรต์ เป็นสารละลายที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจึงมีแรงยันผนังดินและทรายไม่ให้ทลายได้ ระหว่างการเจาะจะมีดินและทรายปนเข้าไปในสารละลายจึงต้องมีการสูบขึ้นมากรองและตรวจสอบความถ่วงจำเพาะ และคอยเติมผงแบไรต์อยู่เสมอ หลังจากเจาะถึงระดับที่ต้องการแล้ว หย่อนท่อเทคอนกรีตลงไปให้อยู่เหนือก้นหลุมประมาณ 0.60 เมตร ใส่ลูกบอลสำหรับไล่น้ำลงไปแล้วเทคอนกรีตๆ จะกดลูกบอลไล่น้ำหรือเบนโทไนต์จนหลุดออกที่ก้นหลุมและลอยขึ้นด้านบนปากหลุม ส่วนคอนกรีตก็เข้าไปเต็มท่อและไหลออกทางปลายเรื่อยๆ พร้อมกันนั้นก็ค่อยๆ ยกท่อเทคอนกรีตขึ้น เบนโทไนต์ที่ลอยขึ้นมาก็สูบกลับไปกรองเก็บในถัง จังหวะที่จะถอดท่อให้ปลายท่อจมในคอนกรีตเล็กน้อยคอนกรีตจะหยุดไหล รีบถอดท่อออกและเทคอนกรีตต่อไป จนถึงระดับที่ต้องการจึงหยุดการเท คอนกรีตที่ด้านบนจะเป็นคอนกรีตที่ผสมดิน ทราย และเบนโทไนต์ จึงเป็นคอนกรีตคุณภาพต่ำต้องสกัดออก บางครั้งต้องสกัดออกยาวถึง 2 เมตรก็มี

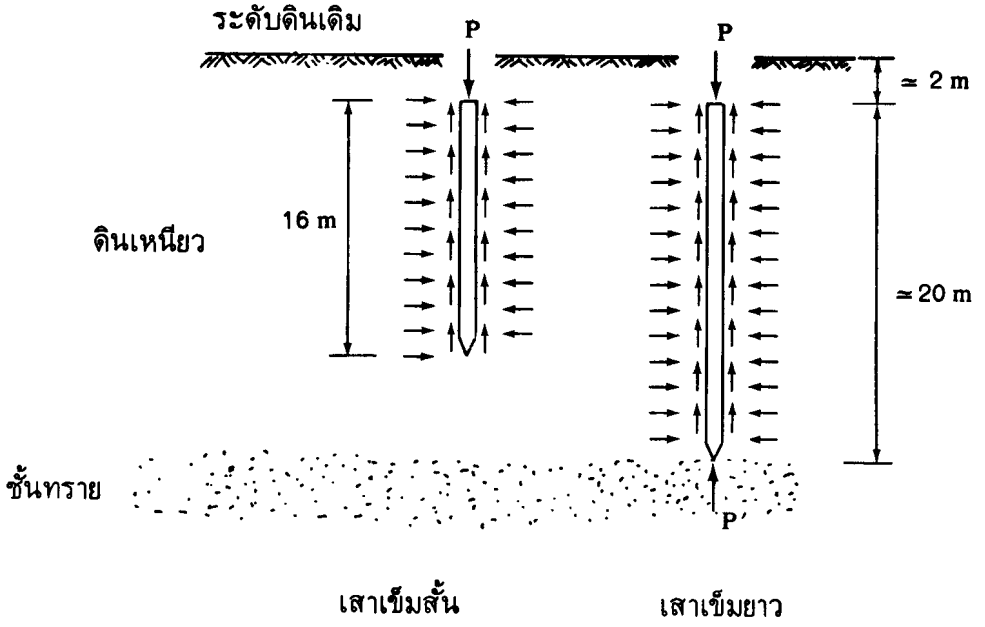
การเจาะเสาเข็มเจาะมีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้น จึงมีกฎเหล็กว่าเมื่อเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะเสร็จใหม่ ห้ามทำให้เกิดการสั่นสะเทือนใกล้ๆ จึงมักจะรอให้คอนกรีตเซ็ตตัวก่อนอย่างน้อย 8 ชั่วโมง แล้วจึงเจาะต้นต่อไปและให้ห่างจากต้นที่หล่อใหม่นั้นไม่น้อยกว่า 7 เท่าของขนาดเสาเข็ม หรือไม่น้อยกว่า 4 เมตร

เสาเข็มเหล็ก (HP) เป็นหน้าตัดรูปตัว H ที่ความหนามากกว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป ราคาแพงมาก เหมาะกับกรณีที่ต้องการเสาเข็มยาวมากและความรวดเร็วในการตอกเสาเข็ม ความหนาที่มากพอทำให้การกัดกร่อนใต้ดินที่เกิดขึ้นช้ามาก อายุการใช้งานประมาณ 50 ปีหรือมากกว่า

6.5 การรับน้ำหนักของเสาเข็ม

เสาเข็มสั้นจะอาศัยความเสียดทานของดินรอบๆ เสาเข็มเป็นตัวรับน้ำหนัก ถ้าในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา-บางประกง ความยาวเสาเข็มที่ปลายจิกลงชั้นทรายที่เป็นชั้นรับน้ำหนักได้มากจะมีแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มเพิ่มเข้ามา โดยบริเวณชัยนาทลงมาอยุธยาจะลึกประมาณ 11-17 เมตร กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี จะอยู่ที่ความลึกประมาณ 21 เมตร ส่วนด้านล่างไปยังอ่าวไทยเช่น บางนา บางพลี จังหวัด

สมุทรปราการ อาจจะลึกถึง 30 เมตร น้ำหนักที่เสาเข็มรับได้จึงได้มาจากแรงเสียดทานรอบๆ เสาเข็ม ร่วมกับแรงแบกทานที่ปลายล่างของเสาเข็ม



รูปที่ 6.8 การรับน้ำหนักของเสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาว

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม สามารถคำนวณจากผลการเจาะสำรวจดินบริเวณไซต์งาน (Boring log) แล้วทดสอบกำลังที่อาจจะใช้ การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต (Static pile load test) หรือ การทดสอบแบบจลน์ (Dynamic pile load test) แบบสถิตให้ค่าที่แม่นตรงกว่าแบบจลน์ แต่ราคาก็แพงกว่ามาก ในขั้นแรกจะอธิบายค่าประมาณที่ยังไม่มีผลการเจาะสำรวจดิน

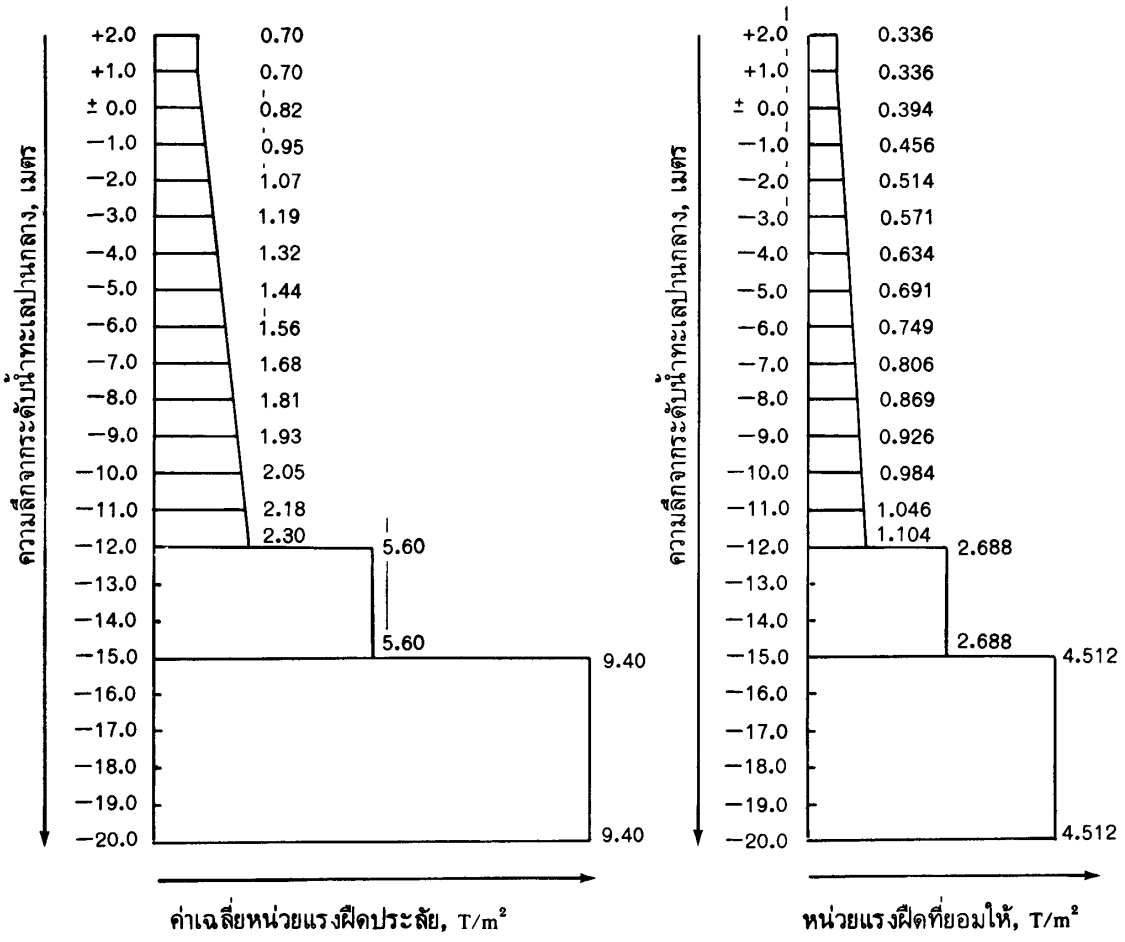
ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร ข้อ 67 กำหนดความฝืดของดินที่ยอมให้ดังนี้

(1) ดินที่อยู่ในระดับลึกไม่เกิน 7 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (กรุงเทพมหานครสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 1 เมตร ดังนั้นความลึกจากผิวดินประมาณ 8 เมตรคือกรณีนี้) ใช้หน่วยแรงฝืดของดินไม่เกิน 600 kg/m^2

(2) ดินที่อยู่ในระดับลึกเกินกว่า 7 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ให้คำนวณหน่วยแรงฝืดของดินเฉพาะส่วนที่ลึกเกินกว่า 7 เมตรลงไป ดังนี้

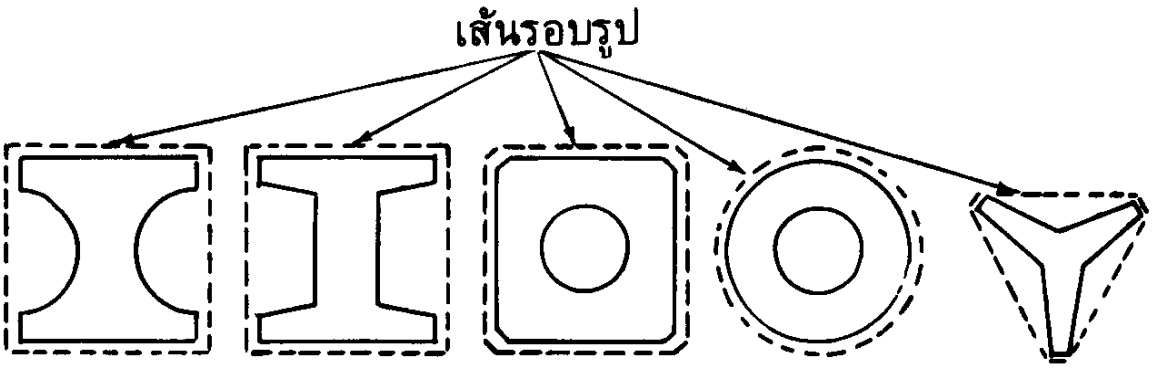
$$\text{หน่วยแรงฝืด} = 800 + 200\ell \ , \text{kg/m}^2$$

เมื่อ $\ell =$ ความยาวของเสาเข็มส่วนที่เกินกว่า 7 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง



ค่าหน่วยแรงฝืดเฉลี่ยของดินบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

รูปที่ 6.9



รูปที่ 6.10 เส้นรอบรูปของเสาเข็มคอนกรีต

ในการคำนวณหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยอาศัยความเสียดทานของดินให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$P = fpL$$

เมื่อ P = กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม, kg หรือ tone

f = หน่วยแรงฝืดเฉลี่ยที่ยอมให้, kg/m^2 หรือ T/m^2 ตามรูปที่ 6.9 หรือข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร

p = ความยาวเส้นรอบรูป (perimeter) ของเสาเข็มตามรูปที่ 6.10, m

L = ความยาวของเสาเข็มในช่วงของ f ที่คำนวณ, m

สำหรับเสาเข็มไม้ให้ใช้ค่า p เป็นเส้นรอบวงของเสาที่กึ่งกลางความยาว แต่ถ้าเป็นเสาเข็มคอนกรีตให้เอาเชือกพันรอบหน้าตัดเสาเข็มแล้วคลี่ออกจะเป็น p ตามรูปที่ 6.10

ตัวอย่างที่ 6.1 จงหากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มไม้ทุกขนาดตั้งแต่ ϕ2"×2.00 m, ϕ3"×3.00 m, ϕ4"×4.00 m, ϕ5"×5.00 m, ϕ6"×6.00 m, ϕ8"×8.00 m พื้นที่ดินบริเวณกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มต้องจมลงใต้ระดับผิวดิน 2.00 เมตร

วิธีทำ

เลือกใช้การคำนวณตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร และรูปที่ 6.9

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ2"×2.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{2\times 2.54}{100}\right) = 0.1596 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 4.00 เมตร น้อยกว่า 8.00 เมตร ดังนั้นหน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวของเสาเข็ม L = 2.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600\times 0.1596\times 2.00 = 191.5 \text{ kg} = 0.192 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 $tonne/m^2$ ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 4.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.514 $tonne/m^2$ ความยาวเสาเข็ม L = 2.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394+0.514}{2}\times 0.1596\times 2.00 = 0.145 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ3"×3.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{3\times 2.54}{100}\right) = 0.2394 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 5.00 เมตร น้อยกว่า 8.00 เมตร ดังนั้นหน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวของเสาเข็ม L = 3.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600 \times 0.2394 \times 3.00 = 430.92 \text{ kg} = 0.431 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 tonne/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 5.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.571 tonne/m^2 ความยาวเสาเข็ม L = 3.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394 + 0.571}{2} \times 0.2394 \times 3.00 = 0.347 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ4"×4.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{4 \times 2.54}{100}\right) = 0.3192 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 6.00 เมตร น้อยกว่า 8.00 เมตร ดังนั้นหน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวของเสาเข็ม L = 4.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600 \times 0.3192 \times 4.00 = 766.08 \text{ kg} = 0.766 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 tonne/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 6.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.634 tonne/m^2 ความยาวเสาเข็ม L = 4.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394 + 0.634}{2} \times 0.3192 \times 4.00 = 0.656 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ5"×5.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{5 \times 2.54}{100}\right) = 0.399 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 7.00 เมตร น้อยกว่า 8.00 เมตร ดังนั้นหน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวของเสาเข็ม L = 5.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600 \times 0.399 \times 5.00 = 1{,}197 \text{ kg} = 1.197 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 tonne/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 7.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.691 tonne/m^2 ความยาวเสาเข็ม L = 5.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394 + 0.691}{2} \times 0.399 \times 5.00 = 1.082 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ6"×6.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{6 \times 2.54}{100}\right) = 0.4788 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 8.00 เมตร เท่ากับ 8.00 เมตร พอดี ดังนั้นหน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวของเสาเข็ม L = 6.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600 \times 0.4788 \times 6.00 = 1{,}724 \text{ kg} = 1.724 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 tonne/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 8.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.749 tonne/m^2 ความยาวเสาเข็ม L = 6.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394 + 0.749}{2} \times 0.4788 \times 6.00 = 1.641 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้ขนาด ϕ8"×8.00 m

$$p = \pi D = \pi\left(\frac{6 \times 2.54}{100}\right) = 0.4788 \text{ m}$$

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 10.00 เมตร มากกว่า 8.00 เมตร ส่วนแรกยาว L = 6.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 600 kg/m^2 ความยาวที่เหลือ L = 8.00 – 6.00 = 2.00 m หน่วยแรงฝืดช่วงบนคือ 800 kg/m^2 และที่ปลายเสาเข็มจะมีหน่วยแรงฝืด

$$f = 800 + 200 \times 2.00 = 1200 \text{ kg/m}^2$$

$$P = fpL = 600 \times 0.4788 \times 6.00 + \frac{800 + 1200}{2} \times 0.4788 \times 2.00$$

$$P = 2{,}681 \text{ kg} = 2.681 \text{ tonne}$$

ตามรูปที่ 6.9 หัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร คือระดับ 0.00 หน่วยแรงฝืด f = 0.394 tonne/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ลึก 10.00 เมตร หน่วยแรงฝืด f = 0.869 tonne/m^2 ความยาวเสาเข็ม L = 8.00 m กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = \frac{0.394 + 0.869}{2} \times 0.4788 \times 8.00 = 2.419 \text{ tonne}$$

เสาเข็มไม้มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เช่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าที่ระบุไว้ ดังนั้นควรใช้กำลังประมาณ 78% ของค่าที่คำนวณได้ ตารางต่อไปนี้แสดงกำลังของเสาเข็มโดยที่ P_1 เป็นกำลังของเสาเข็มตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานครซึ่งมีค่าสูงกว่า P_2 ที่ได้จากรูปที่ 15 ส่วน P_3 เป็นกำลังของเสาเข็มไม้ที่แนะนำให้ใช้

ขนาดเสาเข็ม	เส้นรอบรูป cm	P_1 ตัน	P_2 ตัน	P_3 ตัน
ø 2" x 2.00 เมตร	16.0	0.192	0.145	0.113
ø 3" x 3.00 เมตร	23.9	0.430	0.346	0.270
ø 4" x 4.00 เมตร	31.9	0.765	0.656	0.750
ø 5" x 5.00 เมตร	39.9	1.017	1.082	1.000
ø 6" x 6.00 เมตร	47.9	1.724	1.642	1.500
ø 8" x 8.00 เมตร	63.8	3.250	3.220	2.500

รูปที่ 6.11 กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มไม้

ในการผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจะใช้คอนกรีตกำลังสูงถึง $f_c' = 350$ ksc ส่วนคอนกรีตฐานรากกลับน้อยกว่ามากเช่นเพียง $f_c' = 210$ ksc แรงแบกทานระหว่างผิวท้องฐานรากกับหัวเสาเข็มจะทำให้คอนกรีตป่นเป็นผงได้ โดยหัวเสาเข็มรับแรงแบกทานเต็มหน้าตัดของเสาเข็ม แต่ท้องฐานรากรับแรงแบกทานไม่เต็มหน้าตัดของท้องฐานราก จึงมีกำลังต่างกันต้องตรวจสอบด้วย

รหัส	รูปตัด	ชนิดเข็ม	พื้นที่หน้าตัด cm^2	เส้นรอบรูป cm	น้ำหนัก kg/m	รับน้ำหนักปลอดภัย Ton
I-18		0.18 x 0.18 x 12.00 m 0.18 x 0.18 x 14.00 m 0.18 x 0.18 x 16.00 m 0.18 x 0.18 x 18.00 m 0.18 x 0.18 x 21.00 m	235	83	57	7.5 12.0 15.0 15.0 15.0
I-22		0.22 x 0.22 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.22 x 0.22 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.22 x 0.22 x 21.00 m	332	105	80	22 22 22
I-26		0.26 x 0.26 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.26 x 0.26 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.26 x 0.26 x 21.00 m	460	126	110	30 30 30
I-30		0.30 x 0.30 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.30 x 0.30 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.30 x 0.30 x 21.00 m 0.30 x 0.30 x 21.00 m	570 570 570 660	154 154 154 141	137 137 137 158	37 37 37 43
I-35		0.35 x 0.35 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.35 x 0.35 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.35 x 0.35 x 21.00 m	880	165	211	57 57 57
I-40		0.40 x 0.40 x 21.00 - 24.00 m	1235	180	296	70 - 80
S-16		0.16 x 0.16 x 2.00 m 0.16 x 0.16 x 3.00 m 0.16 x 0.16 x 4.00 m 0.16 x 0.16 x 5.00 m 0.16 x 0.16 x 6.00 m	256	64	61	0.58 0.93 1.32 1.74 2.19
S-18		0.18 x 0.18 x 3 a 7.00 = 21.00 m 0.18 x 0.18 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.18 x 0.18 x 21.00 m 0.18 x 0.18 x 16.00 m 0.18 x 0.18 x 18.00 m	324	72	78	21 21 21 15.5 21
S-22		0.22 x 0.22 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.22 x 0.22 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.22 x 0.22 x 21.00 m 0.22 x 0.22 x 16.00 m 0.22 x 0.22 x 18.00 m	484	88	116	30 30 30 19 26

รูปที่ 6.12 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

รหัส	หน้าตัด	ชนิดเข็ม	พื้นที่หน้าตัด cm^2	เส้นรอบรูป cm	น้ำหนัก kg/m	รับน้ำหนักปลอดภัย ตัน
S-26		0.26 x 0.26 x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.26 x 0.26 x 2 a 10.5 m = 21.00 m 0.26 x 0.26 x 21.00 m	676	104	160	43 43 43
S-30		0.30 x 0.30x 3 a 7.00 m = 21.00 m 0.30 x 0.30 x 2 a 7.00 m = 21.00 m 0.30 x 0.30 x 21.00 m	900	120	216	50 50 50
S-35		0.35 x 0.35 x 21.00 - 26.00 m	1225	140	294	60 - 80
S-40		0.40 x 0.40 x 21.00 - 26.00 m	1600	160	384	70 - 100
SO-40		สี่เหลี่ยมกลวง 0.40 x 0.40 x 21.00 - 26.00 m	1286	160	309	60 - 80
SO-525		สี่เหลี่ยมกลวง 0.525 x 0.525 x 21.00 - 26.00 m	2650	210	492	80 - 120
H_p-15		หกเหลี่ยมกลวง 0.15 x 0.15 x 3.00 m 0.15 x 0.15 x 4.00 m 0.15 x 0.15 x 5.00 m 0.15 x 0.15 x 6.00 m	138	50	33	 0.72 1.03 1.35 1.71

รูปที่ 6.12 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (ต่อ)

พิจารณารูปที่ 6.14 เป็นลักษณะการถ่ายน้ำหนักจากตอม่อลงฐานรากหรือการต้านทานของเสาเข็มต่อฐานราก เนื้อที่ A_2 จะเป็น 4 เท่าของ A_1 สมมติเสาเข็มสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.40×0.40 m^2 ข้อมูลทั่วไปมีดังนี้

$P = 1.7 \times 80 = 136$ tonne $= 136{,}000$ kg = แรงต้านทานจากเสาเข็ม ตัวคูณ 1.7 สำหรับน้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากไม่มีข้อมูลแบ่งแยกว่าน้ำหนักบรรทุกคงที่เท่าใด น้ำหนักบรรทุกจรเท่าใด จึงเลือกตัวคูณของน้ำหนักบรรทุกจรที่มากกว่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ตัวคูณ 1.4)

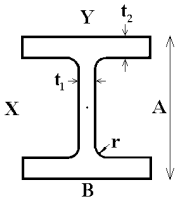
$A_1 = 1600$ cm^2 = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$A_2 = 4A_1 = 6400$ cm^2 = เนื้อที่กระจายแรงแบกทานในฐานราก สำหรับเสาเข็มต้นริม

$f'_{cc} = 350$ ksc = กำลังของคอนกรีตในเสาเข็ม

$f'_{cf} = 210$ ksc = กำลังคอนกรีตของฐานราก

$\phi = 0.70$ = ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงแบกทาน



Heavy Pile Sections : HP

(Metric Series)

ดัชนีหน้าตัด	น้ำหนัก	ความลึก (A)	ความกว้างปีก (B)	ความหนา		รัศมีส่วนพอก (r)	เนื้อที่หน้าตัด	โมเมนต์อินเนอร์เชีย		รัศมีไจเรชัน		โมดูลัสหน้าตัด	
				แผ่นตั้ง (t_1)	ปีก (t_2)			I_x	I_y	r_x	r_y	S_x	S_y
mm	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm^2	cm^4	cm^4	cm	cm	cm^3	cm^3
90	930	538	477	90	90	22	1,185	472,000	165,000	20.0	11.8	17,600	6,920
85	1,170	608	472	85	125	22	1,488	737,000	221,000	22.3	12.2	24,300	9,360
75	758	508	462	75	75	22	965.7	358,000	125,000	19.3	11.4	14,100	5,390
70	953	568	457	70	105	22	1,214	551,000	168,000	21.3	11.8	19,400	7,360
60	804	538	447	60	90	22	1,024	433,000	135,000	20.6	11.5	16,100	6,030
	593	478	447	60	60	22	755.4	260,000	90,000	18.6	10.9	10,900	4,030
50	658	508	437	50	75	22	838.7	331,000	105,000	19.9	11.2	13,000	4,790
45	740	538	432	45	90	22	942.9	414,000	121,000	21.0	11.3	15,400	5,610
	605	498	432	45	70	22	770.1	298,000	94,400	19.7	11.1	12,000	4,370
	435	448	432	45	45	22	554.1	177,000	60,800	17.9	10.5	7,900	2,810
40	518	478	427	40	60	22	659.8	242,000	78,100	19.1	10.9	10,100	3,660
	384	438	427	40	40	22	489.0	152,000	52,100	17.6	10.3	6,950	2,440
35	466	468	422	35	55	22	593.7	214,000	69,000	19.0	10.8	9,130	3,270
	334	428	422	35	35	22	424.9	129,000	44,000	17.4	10.2	6,030	2,080
30	480	478	417	30	60	22	612.0	233,000	72,600	19.5	10.9	9,740	3,480
	415	458	417	30	50	22	528.6	187,000	60,500	18.8	10.7	8,170	2,900
	284	418	417	30	30	22	361.8	107,000	36,400	17.2	10.0	5,120	1,740
25	332	438	412	25	40	22	423.3	142,000	46,700	18.3	10.5	6,470	2,270
20	283	428	407	20	35	22	360.7	119,000	39,400	18.2	10.4	5,570	1,930

รูปที่ 6.13 ตารางเสาเข็มเหล็กรูปตัด H

หน่วยแรงแบกทานในเสาเข็ม

$$\frac{P}{A_1} \le 0.85\phi f'_{cc}$$

$$\frac{136{,}000}{1600} \le 0.85 \times 0.70 \times 350$$

$$85 \le 208.25$$

พบว่าเป็นจริง การวิบัติจากแรงแบกทานจะไม่เกิดขึ้นที่หัวเสาเข็ม

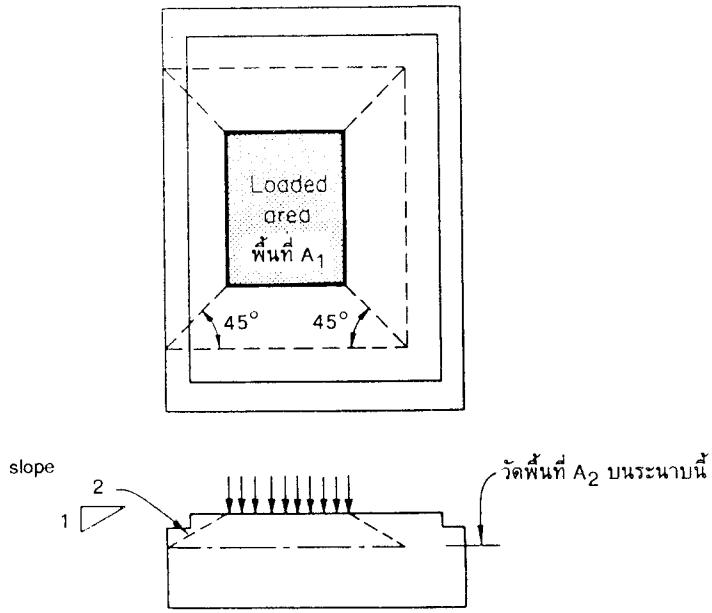
หน่วยแรงแบกทานที่ท้องฐานราก

$$\frac{P}{A_1} \le 0.85\phi f'_{cf}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 1.70\phi f'_{cf}$$

$$\frac{136{,}000}{1600} \le 0.85\times 0.70\times 210\sqrt{\frac{6400}{1600}} \le 1.70\times 0.70\times 210$$

$$85 \le 249.9 \le 249.9$$

พบว่าเป็นจริง การวิบัติจากแรงแบกทานจะไม่เกิดขึ้นที่ท้องฐานราก



รูปที่ 6.14 พื้นที่รับการกระจายของแรงแบกทานในเสากับฐานรากหรือพื้น

ตัวอย่างที่ 6.2 จงหากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มของเสาเข็ม $S-0.40\times 0.40\times 23$ m โดยใช้ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร และกำลังประลัยตามรูปที่ 6.9 แล้วใช้ส่วนปลอดภัย 2.5 ในการหากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเข็ม $f'_{cc} = 350$ ksc และกำลังอัดประลัยคอนกรีตฐานราก $f'_{cf} = 280$ ksc

วิธีทำ สมมติหัวเสาเข็มจมอยู่ใต้ระดับดินเดิม 2 เมตร จะอยู่ใต้ระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร ส่วนที่จมใต้ระดับน้ำทะเลปานกลาง 7.00 เมตร จึงยาว 7-1 = 6 เมตร ความยาวที่จมลึกกว่าคือ 23 – 6 = 17 เมตร

จากสมการกำลังเสาเข็ม

$$P = fpL$$

เส้นรอบรูปเสาเข็ม $p = 160$ cm $= 1.6$ m

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร ช่วงความยาว L = 6 เมตร มีหน่วยความฝืด f = 600 kg/m^2 ที่เหลือ 17 เมตร หน่วยความฝืดปลายบน 800 kg/m^2 และหน่วยความฝืดปลายล่าง

$$f = 800 + 200L = 800 + 200 \times 17 = 4200 \ \ kg/m^2$$

หน่วยความฝืดเฉลี่ย $f = \dfrac{800 + 4200}{2} = 2500 \ \ kg/m^2$

กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ของเสาเข็มคือ

$$P = fpL = 600 \times 1.6 \times 6.00 + 2500 \times 1.6 \times 17 = 73{,}760 \ \ kg = 73.76 \ \ tonne$$

จากรูปที่ 6.9 จากระดับ ± 0.00 ลึกจากผิวดิน 2 เมตร มีหน่วยกำลังฝืดประลัย 0.82 T/m^2 จนถึงความลึก 12 เมตร มีหน่วยกำลังฝืดประลัย 2.30 T/m^2 เฉลี่ยค่าได้

$$f = \frac{0.82 + 2.30}{2} = 1.56 \ \ T/m^2$$

โดยความช่วงนี้ L = 12 m เหลือความยาวอีก = 23 – 12 = 11 m ช่วงลึกลงไปอีก L = 3 เมตร มีหน่วยกำลังฝืดประลัย f = 5.60 T/m^2

เหลือความยาว L = 11 – 3 = 8 m มีหน่วยกำลังฝืดประลัย f = 9.40 T/m^2

กำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็ม

$$P_u = fpL = 1.56 \times 1.6 \times 12.00 + 5.60 \times 1.6 \times 3.00 + 9.40 \times 1.6 \times 8.00 = 177.152 \ \ tonne$$

ส่วนปลอดภัย FS = 2.5 ดังนั้นกำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้

$$P = \frac{P_u}{FS} = \frac{177.152}{2.5} = 70.86 \ \ tonne$$

กำลังรับแรงแบกทานของคอนกรีตเสาเข็ม

$$\frac{P_u}{A_1} \le 0.85 \phi f'_{cc}$$

$$\frac{P_u}{1600} \le 0.85 \times 0.70 \times 350$$

$$P_u \le 1600 \times 0.85 \times 0.70 \times 350 = 333{,}200 \ \ kg = 333.2 \ \ tonne$$

$$P = \frac{P_u}{FS} = 133.28 \ \ tonne$$

กำลังรับแรงแบกทานของฐานราก

$$\frac{P_u}{A_1} \le 0.85\phi f'_{cf}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 1.70\phi f'_{cf}$$

$$\frac{P_u}{1600} \le 0.85\times 0.70\times 280\sqrt{\frac{6400}{1600}} \le 1.70\times 0.70\times 280$$

$$\frac{P_u}{1600} \le 333.2 \le 333.2$$

$$P_u \le 1600\times 333.2 = 533{,}120 \text{ kg} = 533.12 \text{ tonne}$$

$$P = \frac{P_u}{FS} = \frac{533.12}{2.5} = 213.25 \text{ tonne}$$

กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้เลือกจากค่าน้อยคือ 70.86 ตัน

6.6 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักจากผลการเจาะสำรวจดิน

กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มบนดินไม่ยึดเหนี่ยว (Bearing Capacity for Cohesionless Soil)

กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Pile or Pier) สมการของเตอซากิเมื่อสมมติว่าหน้าตัดเสาเข็มเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (B=L) และแรงยึดเหนี่ยว c = 0 เช่น ทราย และกรวด กำลังรับแรงแบกทานประลัย q_{ult} คือ

$$q_{ult} = \frac{Q_p}{B^2} = 0.4\gamma_t BN_\gamma + \gamma_t D_f N_q$$

ความกว้าง B ของหน้าตัดเสาเข็มน้อยกว่าความลึกปลายเสาเข็ม D_f อย่างมาก ดังนั้นพจน์ $0.4\gamma_t BN_\gamma$ น้อยกว่าพจน์ $\gamma_t D_f N_q$ จนอาจจะตัดพจน์ $0.4\gamma_t BN_\gamma$ ทิ้งไปได้

พจน์ $\gamma_t D_f$ คือหน่วยแรงทางดิ่ง σ_v ตรงปลายเสาเข็ม สำหรับดินไม่ยึดเหนี่ยวและใช้การวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลนั้น ต้องพิจารณาผลของระดับน้ำใต้ดิน ดังนั้นต้องใช้หน่วยแรงทางดิ่งประสิทธิผล σ'_v แทนค่าของ σ_v สมการของเตอซากิจึงลดรูปลงเป็น

เมื่อเสาเข็มมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$q_{ult} = \frac{Q_p}{B^2} = \sigma'_v N_q$$

เมื่อเสาเข็มมีหน้าตัดเป็นวงกลม

$$q_{ult} = \frac{Q_p}{\pi r_2} = \sigma'_v N_q$$

เมื่อ q_{ult} = กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม, T/m^2

Q_p = แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม, tone

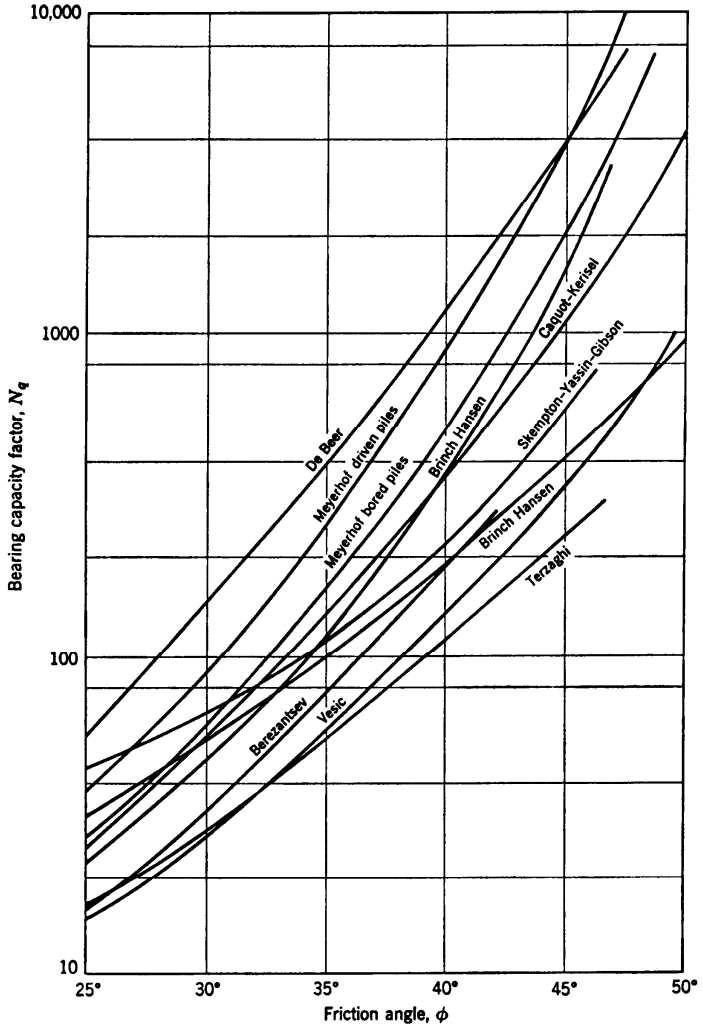
B = ความกว้างของหน้าตัดเสาเข็มจัตุรัส, m

r = รัศมีของเสากลม, m

σ'_v = หน่วยแรงอัดทางดิ่งประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็ม , T/m^2

N_q = ตัวประกอบกำลังแบกทาน, ไม่มีหน่วย

เสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มแบบเจาะเสียบ ค่าของ N_q ขึ้นกับมุมเสียดทาน ϕ ของกรวดหรือทรายที่ปลายเสาเข็ม แต่เสาเข็มตอกค่า N_q ต้องหาจากรูปที่ 6.15 โดย Vesic' (1967) จัดทำขึ้น ค่าของ N_q จะบอกเป็นช่วง เช่นขณะ $\phi = 30^o$ ค่า N_q อยู่ระหว่าง 30 ถึง 150 และขณะ $\phi = 40^o$ ค่า N_q อยู่ระหว่าง 100 ถึง 1000 อย่างไรก็ตามค่าในรูปที่ 6.15 ยังเป็นทฤษฎี



Bearing capacity factor N_q as recommended by various researchers for deep foundations. (*From Vesić, 1967; reproduced from Lambe and Whitman, 1969.*)

รูปที่ 6.15 ตัวประกอบกำลังแบกทานที่เสนอแนะจากนักวิจัยหลายท่าน

มีความเชื่อว่าเสาเข็มตอกหน้าตัดตันทำให้ตัวประกอบกำลังแบกทาน N_q มีค่ามากกว่าเสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มที่มีรูกลวง เนื่องจากการตอกจะอัดให้ทรายแน่นขึ้นทั้งจากการแทนที่และการสั่นสะเทือนในการตอกทำให้เม็ดทรายเรียงอัดตัวแน่นขึ้น

ตัวอย่างที่ 6.3 เสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ยาว 6.00 เมตร ตอกลงในทรายปนร่วนที่มีค่าแรงเฉือนเป็น $c = 0, \phi' = 30^o$ ระดับน้ำใต้ดินลึก 3 เมตรจากผิวดิน หน่วยน้ำหนักของดินส่วนที่อยู่เหนือน้ำใต้ดิน 1900 kg/m^3 และหน่วยน้ำหนักลอยตัวของดินใต้ระดับน้ำใต้ดิน $\gamma_b = 990\ \text{kg/m}^3$ ให้ใช้ค่าตามสมการของเตอซากิในรูปที่ 6.15 หากำลังแบกทานที่ยอมให้ที่ปลายเสาเข็ม โดยใช้ส่วนปลอดภัยเท่ากับ 3

วิธีทำ หน่วยแรงทางดิ่งประสิทธิผล σ_v' ที่ปลายเสาเข็ม

$$\sigma_s' = (3\ \text{m})(1900\ \text{kg/m}^3) + (3\ \text{m})(990\ \text{kg/m}^3) = 8670\ \text{kg/m}^2$$

จากรูปที่ 6.15 ใช้กราฟความสัมพันธ์ของเตอซากิ เมื่อ $\phi = \phi' = 30^o$ เส้นกราฟทางตั้งเป็นสเกลล็อกการิธึมจะได้ตัวประกอบกำลังแบกทาน $N_q = 30$

เสาเข็มมีหน้าตัดกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร รัศมี $r = \dfrac{0.30}{2} = 0.15\ \text{m}$

$$q_{ult} = \frac{Q_p}{\pi r^2} = \sigma_v' N_q$$

$$Q_p = \pi r^2 \sigma_v' N_q = \pi \times 0.15^2 \times 8670 \times 30 = 18{,}385\ \text{kg}$$

เมื่อใช้ส่วนปลอดภัย FS = 3 จะได้กำลังแบกทานที่ยอมให้ตรงปลายเสาเข็มเท่ากับ

$$Q_{ba} = \frac{Q_p}{FS} = \frac{18{,}385}{3} = 6{,}128\ \text{kg}$$

กำลังรับแรงเสียดทานของผิวรอบเสาเข็ม ที่เห็นชัดคือเสาเข็มที่รับแรงถอนจะอาศัยแรงเสียดทานรอบๆ เสาเข็มเพียงอย่างเดียว ขณะเดียวกันเสาเข็มที่รับแรงกดก็จะมีทั้งแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม ค่ากำลังเสียดทานประลัย (q_{ult}) ได้ดังนี้

สำหรับเสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$q_{ult} = \frac{Q_s}{4BL} = \sigma_h' \tan\phi_w = \sigma_v' k \tan\phi_w$$

สำหรับเสาเข็มหน้าตัดกลม

$$q_{ult} = \frac{Q_s}{2\pi rL} = \sigma_h' \tan\phi_w = \sigma_v' k \tan\phi_w$$

เมื่อ q_{ult} = กำลังเสียดทานประลัยเฉลี่ยรอบผิวเสาเข็ม, kg/m^2 หรือ T/m^2

Q_s = แรงเสียดทานประลัยรอบผิวเสาเข็ม, kg หรือ T

B = ความกว้างของเสาเข็มจัตุรัส, m

r = รัศมีของเสาเข็มกลม, m

L = ความยาวของเสาเข็ม, m

σ_h' = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงทางราบประสิทธิผลตลอดความยาวของเสาเข็ม, kg/m^2 หรือ T/m^2

σ_v' = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงทางดิ่งประสิทธิผลตลอดความยาวของเสาเข็ม, kg/m^2 หรือ T/m^2

$k = \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'}$ = มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 สำหรับเสาเข็มตอกให้ใช้ k = 1

ϕ_w = มุมความเสียดทานระหว่างทรายกับผิวเสาเข็ม หากเป็นเสาเข็มไม้กับเสาเข็มคอนกรีตให้ใช้

$\phi_w = \frac{3}{4}\phi$ แต่ถ้าเป็นเสาเข็มเหล็กให้ใช้ $\phi_w = 20^o$

ตัวอย่างที่ 6.4 จากตัวอย่างที่ 6.3 เสาเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ยาว 6.00 เมตร ตอกลงในทรายปนร่วนที่มีค่าแรงเฉือนเป็น $c = 0, \phi' = 30^o$ ระดับน้ำใต้ดินลึก 3 เมตรจากผิวดิน หน่วยน้ำหนักของดินส่วนที่อยู่เหนือน้ำใต้ดิน 1900 kg/m^3 และหน่วยน้ำหนักลอยตัวของดินใต้ระดับน้ำใต้ดิน $\gamma_b = 990\ kg/m^3$ ให้ใช้ค่าตามสมการของเตอซากิในรูปที่ 6.15 หากำลังเสียดทานที่ยอมให้รอบๆ ผิวเสาเข็ม โดยใช้ส่วนปลอดภัยเท่ากับ 3 ทั้งนี้เสาเข็มตอกให้ใช้ k = 1

วิธีทำ เนื่องจากการหาความเสียดทานรอบผิวเสาเข็มจะหาค่าเฉลี่ยที่ถือว่าแปรเป็นเส้นตรง ดังนั้นช่วงบนที่ลึก 0-3 เมตร จะพิจารณาที่ความลึก $\frac{0+3}{2} = 1.5$ เมตร และช่วงล่างความลึก 3-6 เมตร จะพิจารณาที่ความลึก $\frac{3+6}{2} = 4.5$ เมตร โดยคิดผลของ 3 เมตรด้านบน รวมกับผลของด้านล่างอีก 1.5 เมตร ดังนี้

ที่ระดับ 1.50 เมตรจากผิวดิน

$$\sigma_v = (1.5\ m)(1900\ kg/m^3) = 2{,}850\ kg/m^2$$

ที่ระดับ 4.50 เมตรจากผิวดิน

$$\sigma_v' = (3\ m)(1900\ kg/m^3) + (1.5\ m)(990\ kg/m^3) = 7{,}185\ kg/m^2$$

สำหรับเสาเข็มคอนกรีตนั้น $\phi_w = \frac{3}{4}\phi = \frac{3}{4} \times 30 = 22.5^o$

เสาเข็มหน้าตัดกลม $q_{ult} = \frac{Q_s}{2\pi rL} = \sigma_h' \tan\phi_w = \sigma_v' k \tan\phi_w$

$$Q_s = 2\pi rL\sigma_v' k \tan\phi_w$$

โดย $r = \frac{0.30}{2} = 0.15 \text{ m}$

$k = 1$

$\phi_w = 22.5^o$

ช่วงความลึก 0-3 เมตร มีความยาว $L = 3.00 \text{ m}$, $\sigma_v' = \sigma_v = 2{,}850 \text{ kg/m}^2$

$$Q_s = 2\pi(0.15)(3.00)(2{,}850)(1)\tan 22.5^o = 3{,}338 \text{ kg}$$

ช่วงความลึก 3-6 เมตร มีความยาว $L = 3.00 \text{ m}$, $\sigma_v' = 7{,}185 \text{ kg/m}^2$

$$Q_s = 2\pi(0.15)(3.00)(7{,}185)(1)\tan 22.5^o = 8{,}415 \text{ kg}$$

ดังนั้นเสาเข็มรับความเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม

$$Q_s = 3{,}338 + 8{,}415 = 11{,}753 \text{ kg}$$

ส่วนปลอดภัย FS = 3 ดังนั้นกำลังเสียดทานที่ยอมให้คือ

$$Q_{sa} = \frac{Q_s}{FS} = \frac{11{,}753}{3} = 3{,}918 \text{ kg}$$

เสาเข็มตามตัวอย่างที่ 6.3 รับแรงแบกทานที่ปลายได้ $Q_{ba} = 6{,}128 \text{ kg}$ และตัวอย่างที่ 6.4 รับแรงเสียดทานรอบเสาเข็มได้ $Q_{sa} = 3{,}918 \text{ kg}$ กำลังของเสาเข็มทั้งสองอย่างรวมกันคือ

$$Q_a = Q_{ba} + Q_{sa} = 3{,}918 + 6{,}128 = 10{,}046 \text{ kg}$$

กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มบนดินเหนียว (Bearing Capacity for Cohesive Soil)

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวหาได้ยากกว่าบนทราย มาตรฐาน AASHTO, 1996 ให้ข้อสังเกตในการพิจารณาดังนี้

เสาเข็มกลุ่มจะรับน้ำหนักเฉลี่ยต่อต้นน้อยกว่าเสาเข็มเดี่ยว

ต้องคำนึงถึงการทรุดตัวของเสาเข็มที่จมในชั้นดินเหนียว

คลื่นสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจะกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ ดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวชุ่มน้ำจะเกิดการบุ๋มตัวตามเสาเข็ม

ดินด้านบนที่เคยชุ่มน้ำ พอแห้งจะหดตัวลงและรูดเสาเข็มลงเรียกว่า Negative skin friction ทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลง

มีแรงยกขึ้นจากการพองตัวของดินเหนียวเมื่อดูดซึมน้ำ

กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวลดลงเนื่องจากเทคนิคก่อสร้าง เช่นสภาพดินเหนียวที่ถูกรบกวน การเพิ่มของความดันหยดน้ำระหว่างเม็ดดินจากการตอกเสาเข็ม หากตอกเสาเข็มในดินเหนียวไม่เสร็จทิ้งข้ามวันแล้วมาตอกต่ออาจจะตอกไม่ลง เนื่องจากระหว่างการตอกอยู่นั้นดินเหนียวถูกเขย่าและปล่อยให้เสาเข็มแทรกลงไปได้ พอหยุดเขย่าดินก็จะเคลื่อนตัวมาจับผิวเสาเข็มจนแน่น ดังนั้นการตอกเสาเข็มต้องตอกให้เสร็จทั้งต้น

ระดับน้ำใต้ดินที่แปรเปลี่ยนไปนั้นทำให้การวิเคราะห์กำลังเสาเข็มในดินเหนียวโดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผลจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง

การวิเคราะห์หน่วยแรงทั้งหมด (Total Stress Analysis) วิธีนี้เหมาะกับเสาเข็มในดินเหนียว เนื่องจากน้ำหนักวิกฤตบนเสาเข็มที่เกิดจากแรงลมหรือแผ่นดินไหวจะเป็นแรงกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ กำลังรับแรงเฉือนแบบน้ำยังไม่ออกจากดิน (undrained shear strength) s_u หรือค่ายึดเหนี่ยว c ที่ได้จากการทดลองสามแกน (unconsolidated undrained triaxial compression test) ซึ่งเป็นภาวะที่ $\phi = 0$

กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มในดินเหนียว ได้จากผลรวมแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็มและแรงยึดเหนี่ยวประลัยรอบๆ ผิวเสาเข็ม

การหาแรงแบกทานประลัยของเสาเข็ม จะพิจารณาจากสมการ

$$q_{ult} = cN_c\left(1+0.3\frac{B}{L}\right)+0.4\gamma_t BN_\gamma+\gamma_t D_f N_q$$

เมื่อ B = L มุม $\phi = 0$ ทำให้ $N_c = 5.5, N_\gamma = 0$ และ $N_q = 1$ (ดูจากรูปที่ 10) พจน์ $\gamma_t D_f N_q = \gamma_t D_f$ เนื่องจาก $\phi = 0$ แล้ว $N_q = 1$ ค่านี้จะพอๆ กับน้ำหนักเสาเข็มจึงตัดพจน์นี้ออกไป พจน์ $cN_c\left(1+0.3\frac{B}{L}\right)$ $= 1.3cN_c = 1.3c(5.5) = 7.2c$ หรือเทียบเคียงว่า $N_c = 7.2$ แต่ค่าที่แนะนำให้ใช้คือ $N_c = 9$ ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มในดินเหนียวคือ

$$Q_{ult} = \text{แรงแบกทานที่ปลาย} + \text{แรงยึดเหนี่ยวรอบเสาเข็ม}$$

$$Q_{ult} = cN_c\,(\text{เนื้อที่ปลายเสาเข็ม}) + c_A\,(\text{เนื้อที่ผิวรอบๆ เสาเข็ม})$$

$$Q_{ult} = c9\left(\pi R^2\right)+c_A\left(2\pi Rz\right) = 9\pi cR^2 + 2\pi c_A Rz$$

เมื่อ Q_{ult} = กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม , T

c = ค่าความยึดเหนี่ยวของดินเหนียวที่ปลายเสาเข็ม, T/m^2

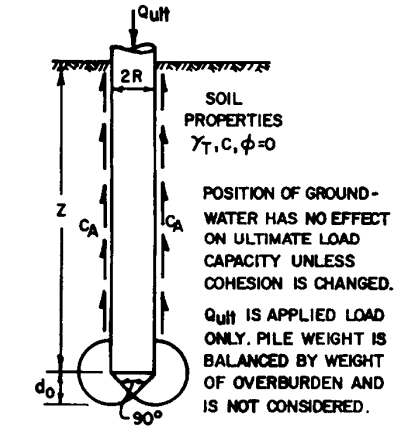
R = รัศมีของเสาเข็ม ถ้าที่ปลายเสาเข็มมีกระเปาะ หรือเสี้ยมปลาย รัศมีที่ปลายก็จะต่างจากรัศมีของตัวเสาเข็ม, m

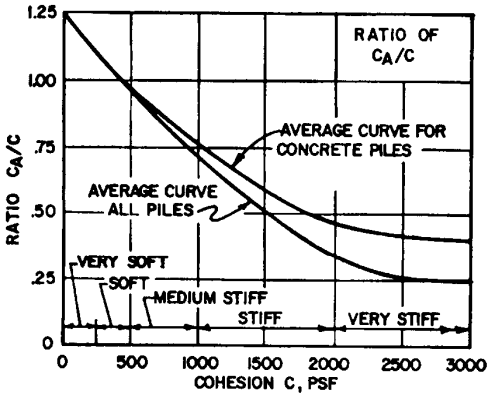
z = ความยาวที่เสาเข็มจมในดิน, m

c_A = ความยึดเหนี่ยวระหว่างดินกับผิวรอบๆเสาเข็มที่แยกตามสภาพชั้นดินและชนิดเสาเข็ม, T/m^2

เมื่อเสาเข็มยกตัวจากการดูดซึมน้ำของดินเหนียวแล้วพองตัว แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะไม่มี เหลือแต่แรงเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม

$$T_{ult} = 2\pi c_A Rz$$





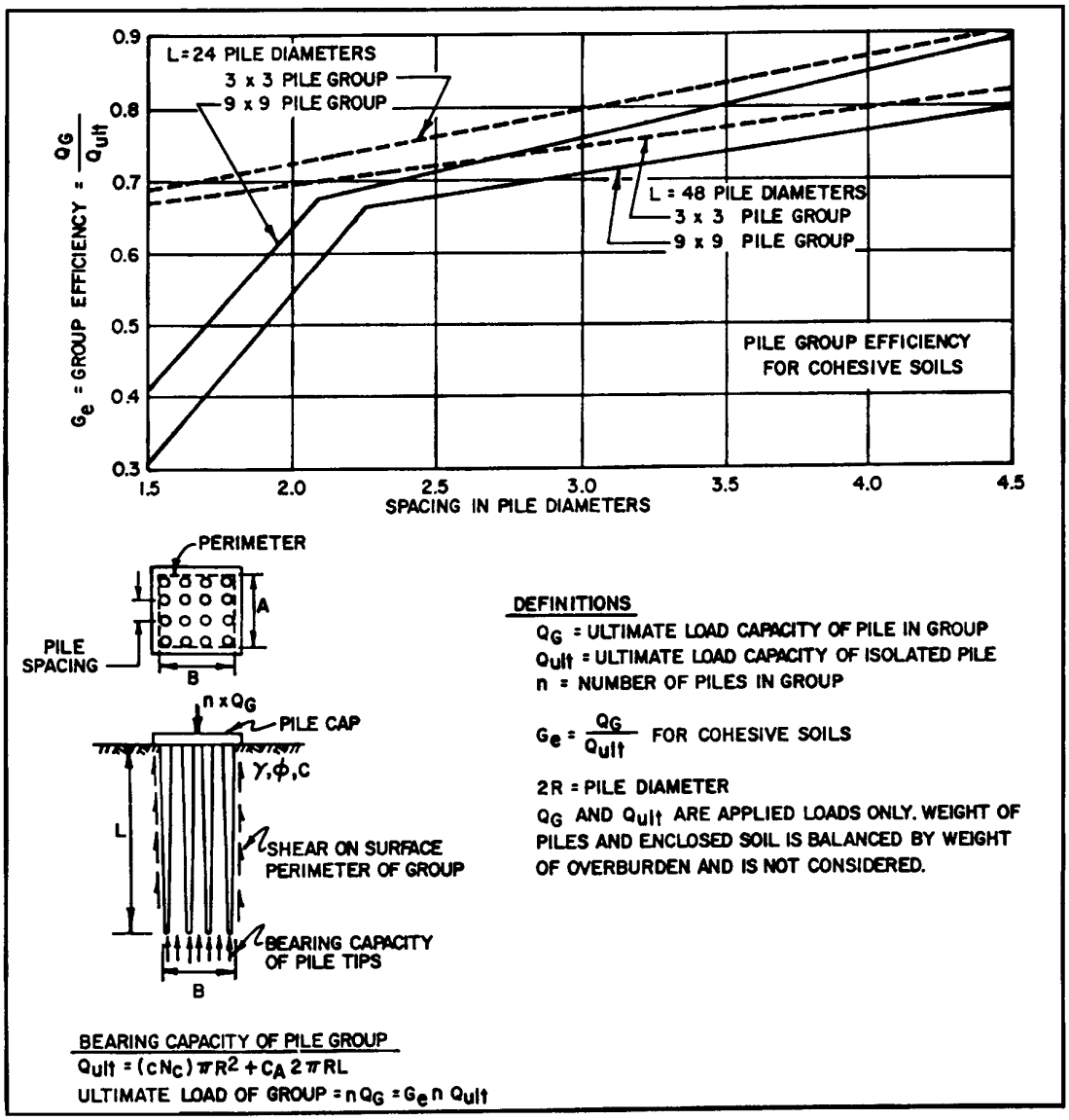
RECOMMENDED VALUES OF ADHESION

PILE TYPE	CONSISTENCY OF SOIL	COHESION, C PSF	ADHESION, C_A PSF
TIMBER AND CONCRETE	VERY SOFT	0 - 250	0 - 250
	SOFT	250 - 500	250 - 480
	MED. STIFF	500 - 1000	480 - 750
	STIFF	1000 - 2000	750 - 950
	VERY STIFF	2000 - 4000	950 - 1300
STEEL	VERY SOFT	0 - 250	0 - 250
	SOFT	250 - 500	250 - 460
	MED. STIFF	500 - 1000	460 - 700
	STIFF	1000 - 2000	700 - 720
	VERY STIFF	2000 - 4000	720 - 750

ULTIMATE LOAD CAPACITY IN TENSION
$T_{ult} = C_A 2\pi RZ$

Ultimate capacity for a single pile or pier in cohesive soil. (*Reproduced from NAVFAC DM-7.2, 1982.*)

รูปที่ 6.16 กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเดี่ยวในดินเหนียวและทรายปนเหนียว



Ultimate capacity of a pile group in cohesive soil. (*Developed by Whitaker 1957, reproduced from NAVFAC DM-7.2, 1982.*)

รูปที่ 6.17 กำลังรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มในดินเหนียวและทรายปนเหนียว

การหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากรายงานเจาะสำรวจดิน

การคำนวณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานราก ทำได้หลายวิธีตามลักษณะของชั้นดิน การระบายน้ำของดิน ทั้งแบบไม่ระบายน้ำ (ในดินเม็ดละเอียด เช่น ดินเหนียว) และแบบระบายน้ำ (ดินเม็ดหยาบ เช่น ทราย) เพื่อความง่ายในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินทั้งฐานรากตื้นและฐานรากลึกดังนี้

ดินเม็ดละเอียด (ดินเหนียว ดินตะกอนแบบทรายปนที่มีความเหนียว) วิเคราะห์หน่วยแรงรวม (Total stress analysis) โดย $c = S_u, \phi = 0$

ดินเม็ดหยาบ (ทรายป่นไม่เหนียว ทราย กรวด) วิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis) มีค่า $c = c' = 0, \phi = \phi'$

วิธีการทดสอบหาคุณสมบัติของดิน ดินเหนียวอ่อนที่สามารถเก็บตัวอย่างคงสภาพ (undisturbed sample) ทำการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) ทำให้ได้ S_u จากความสัมพันธ์

$$S_u = \frac{q_u}{2}$$

ดินเหนียวแข็งและทราย ไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ ทดสอบได้จากการตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test : SPT) ในสนามได้ค่า SPT หรือค่า N ที่นำมาใช้หาค่า Su ของดินเหนียว และค่า ϕ' ของทรายด้วยใช้กราฟต่างๆ โดยสรุปสูตรที่ใช้คำนวณดังนี้

การรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากตื้น (Spread Footing)

1. ดินเม็ดละเอียด เช่นดินเหนียว (clay) ดินตะกอนหรือทรายป่นมีความเหนียว (plastic silt)

ค่าน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ระบายน้ำ (undrained)

ในสถานะ $\phi = 0$

$$q_u = N_c S_u + \gamma_t D_f \qquad T/m^2$$

เมื่อ q_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดิน, T/m^2

S_u = ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength), T/m^2

เฉลี่ยของชั้นดินที่ระดับฐานรากถึงความลึก $\frac{2}{3} - 1$ เท่าของความกว้างฐานราก

$S_u = \frac{1}{2}$ ของหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compressive strength, q_u), T/m^2

N_c = ตัวประกอบกำลังแบกทาน (bearing capacity factor) มีค่า = 5.7 เมื่อ $\phi = 0$

D_f = ความลึกของท้องฐานรากจากผิวดิน, m

γ_t = หน่วยน้ำหนักของดิน, T/m^3

ในกรณีที่ไม่ได้เก็บตัวอย่างดินมาทดลอง ให้สมมติค่า γ_t ดังนี้

ดินเหนียวอ่อน $\gamma_t = 1.5 - 1.6 \ T/m^3$

ดินเหนียวแข็ง $\gamma_t = 1.7 - 1.9 \ T/m^3$

ทราย $\gamma_t = 2.0 - 2.2 \ T/m^3$

ค่า S_u ของดินเม็ดละเอียด อาจจะแปลงค่าจากค่าของ N และ N_c ดังนี้

$$S_u = \frac{N}{1.5}$$

$$N = \frac{N_c}{1.5}$$

เมื่อ S_u = ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength), T/m^2

N = ค่าทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน SPT , ครั้ง/30 ซม

N_c = ค่าทดสอบตอกทะลวงแบบพลศาสตร์ (dynamic cone penetration test), ครั้ง/30 ซม

2. ดินเม็ดหยาบ เช่น ดินตะกอนหรือทรายป่นไม่เหนียว (non plastic silt) ทราย (sand) กรวด (gravel)

2.1 สูตรเชิงประสบการณ์ (empirical formula) จากการทดสอบ SPT (Mayerhof, 1956)

ฐานรากตื้น ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้

เมื่อความกว้าง $B < 1.20$ m

$$q_a = 49.21 N S_a \qquad T/m^2$$

เมื่อความกว้าง $B \geq 1.20$ m

$$q_a = 109.36 N S_a \frac{(B + 0.09)^2}{B} \qquad T/m^2$$

เมื่อ q_a = กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน , T/m^2

S_a = ค่าทรุดตัวที่ยอมให้ 0.0127-0.0254 เมตร

N = ค่าทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT), ครั้ง/30 ซม

B = ความกว้างฐานราก, เมตร

2.2 ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากวิธีสถิตศาสตร์

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

$$Q_u = Q_s + Q_b - W$$

เมื่อ Q_u = น้ำหนักบรรทุกประลัย, ตัน

Q_s = น้ำหนักบรรทุกประลัยเสียดทาน (shaft friction), ตัน

Q_b = น้ำหนักแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (end bearing) , ตัน

W = น้ำหนักของเสาเข็ม, ตัน

น้ำหนักบรรทุกประลัยเสียดทาน (Shaft friction)

ดินเหนียว (Clay) และทรายป่นเหนียว (Plastic silt) ใช้วิธีหน่วยแรงทั้งหมด (Total stress analysis) โดย $\phi = 0, c = S_u$

$$Q_s = p\sum q_s$$
$$q_s = \sum \alpha S_u (\Delta L)$$

เมื่อ Q_s = น้ำหนักบรรทุกประลัยเสียดทาน, ตัน

ΔL = ความยาวเสาเข็มช่วงที่นำมาคำนวณ, เมตร

p = เส้นรอบรูปเสาเข็ม (perimeter), เมตร

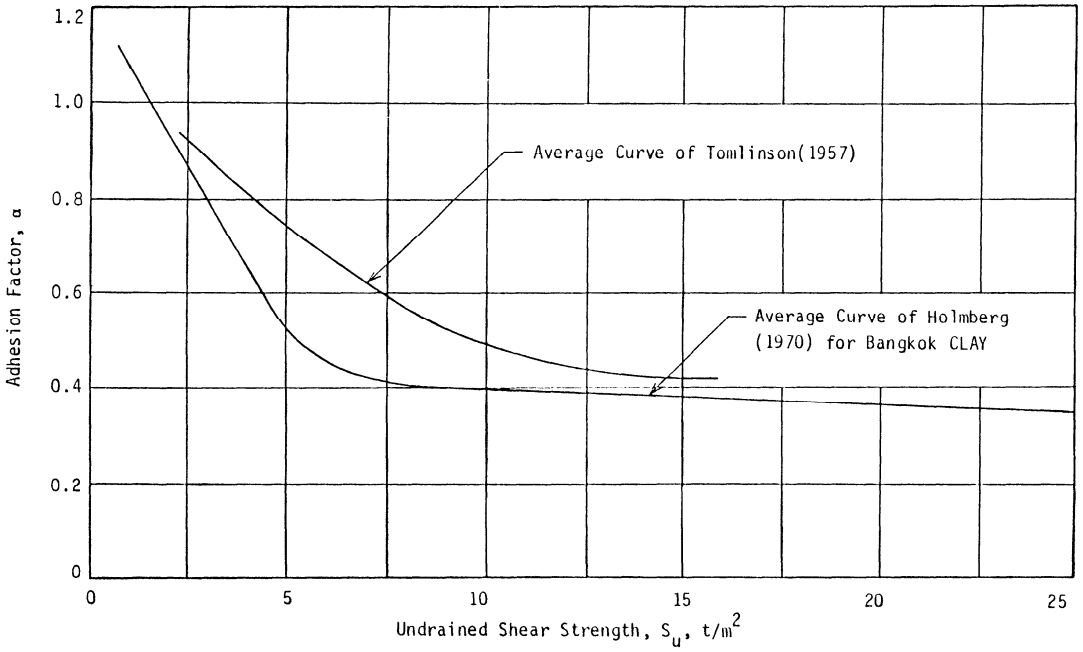
α = องค์ประกอบยึดเกาะ (adhesion factor) ดูรูปที่ 6.24

S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength), T/m^2

$S_u = \frac{1}{2} q_u$

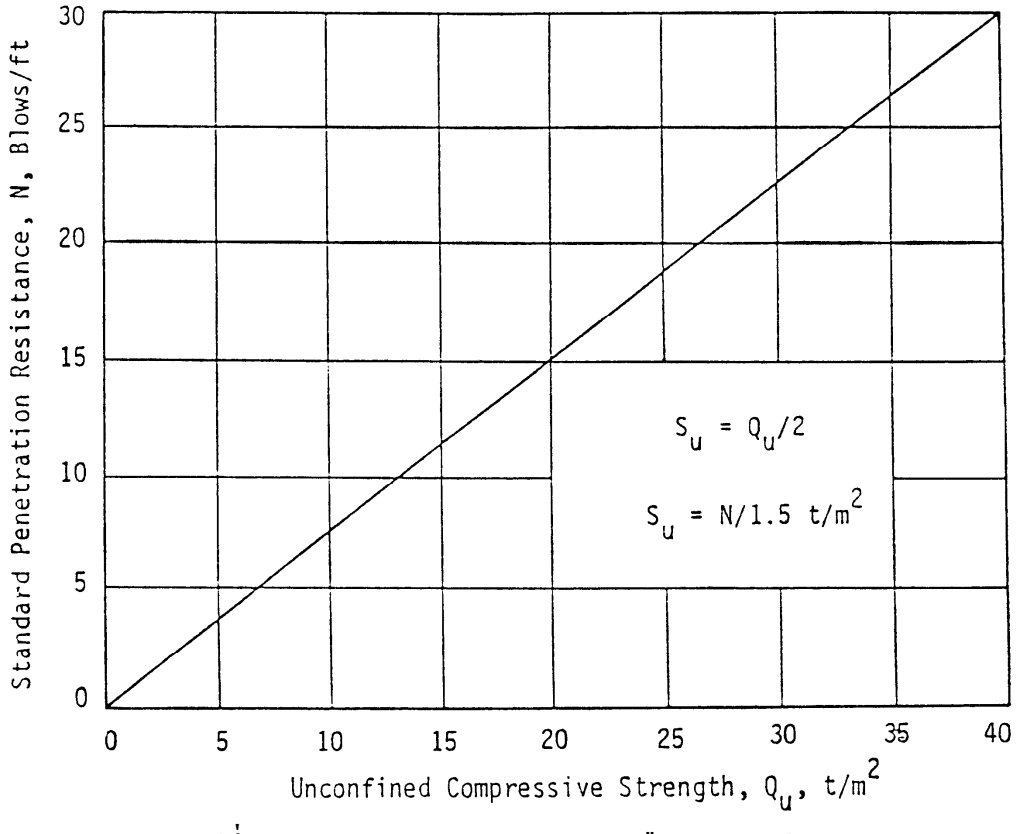
q_u = กำลังเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compressive strength), T/m^2

$A_{sh} = p\sum \Delta L$ = เนื้อที่รอบเสาเข็มรับแรงเสียดทาน, ตารางเมตร



รูปที่ 6.18 กราฟหาค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (adhesion factor), α ของดินเหนียว

(Tomlinson, 1957; Holmberg, 1970)



รูปที่ 6.19 กราฟสำหรับหากำลังรับแรงเฉือน S_u จากค่า N

(Terzaghi and Peck, 1967)

ทรายปนไม่เหนียว (non-plastic silt) ทราย (sand) และ กรวด (gravel) ใช้วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress analysis) โดยค่า $\phi = \phi', c = c' = 0$

$$q_s = \sum \left[p_o' K \tan \delta' (\Delta L) \right]$$

เมื่อ q_s = หน่วยแรงประสิทธิผล, T/m^2

K = สัมประสิทธิ์ความดันของดิน (coefficient earth pressure) โดยดูจากตาราง

δ' = มุมเสียดทานประสิทธิผลระหว่างเสาเข็มกับดิน (effective wall friction angle), องศา

p_o' = ความดันประสิทธิผลเหนือความลึกที่คำนวณ (effective overburden pressure), T/m^2

ΔL = ช่วงความลึกที่นำมาคำนวณ, m

ตารางค่า K สำหรับเสาเข็มตอก

N, ครั้ง/30 ซม	K
0-4	0.50
4-10	0.60
10-30	0.70
30-50	0.80
> 50	1.00

ในกรณีของเสาเข็มเจาะ ให้ใช้ค่าเพียง 0.5-0.75 ของค่า K ในตาราง เพื่อปรับค่าจากผลการเจาะ

สูตรเชิงประสบการณ์ (Empirical formula) จากผลการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) Thornburn and Mc Vicar (1971)

ทราย (sand)

ค่าน้ำหนักบรรทุกเสียดทาน

$$Q_s = 0.21 A_{sh} N$$

ทรายป่นไม่เหนียว (non-plastic silt)

ค่าน้ำหนักบรรทุกเสียดทาน

$$Q_s = 0.178 A_{sh} N$$

เมื่อ Q_s = ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยเสียดทาน, ตัน

$A_{sh} = p\sum \Delta L =$ เนื้อที่รอบเสาเข็มรับแรงเสียดทาน, m^2

N = ค่า SPT เฉลี่ย ช่วงที่คิดความยาว ΔL , ครั้ง/30 ซม

$\Delta L =$ ช่วงความยาวที่คำนวณ, m

น้ำหนักบรรทุกประลัยแบกทาน (End bearing)

ดินเหนียว (clay) ใช้วิธีวิเคราะห์หน่วยแรงทั้งหมด (total stress analysis) มี $\phi = 0, c = S_u$

ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยแบกทาน

$$Q_b = N_c S_c S_u A_p$$

$$Q_b = 9 S_u A_p$$

เมื่อ Q_b = ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยแบกทาน, ตัน

A_p = เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม, m^2

$S_u = \frac{1}{2}q_u$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength), T/m^2

q_u = หน่วยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compressive strength), T/m^2

S_c = ค่าคงที่สำหรับลักษณะฐานราก

เมื่อ $\phi = 0, \frac{B}{L} \approx 1.0, \frac{D}{B} > 5$

ค่า $N_c S_c = 9.0$ สำหรับฐานรากลึก (ฐานรากบนเสาเข็ม)

ทราย (Sand) ใช้วิธีวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress analysis) ค่ากำลังแบกทาน

$$q_b = p_e^{'}\left(N_q - 1\right)$$
$$Q_b = p_e^{'}\left(N_q - 1\right)A_p$$

เมื่อ q_b = หน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม, T/m2

Q_b = แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม, ตัน

N_q = ตัวประกอบกำลังแบกทาน (bearing capacity factor) จากรูปที่ 6.20

$p_e^{'}$ = ความดันประสิทธิผลเหนือปลายเสาเข็ม (effective overburden pressure), T/m^2

A_p = เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม, m^2

ทราย (Sand) ใช้สูตรเชิงประสบการณ์ (Empirical formula) Thornburn and Mc Vicar, 1971 ค่าแรงแบกทาน

$$Q_b = 42.8NA_p$$

และมาตรฐานญี่ปุ่น

$$Q_b = 30NA_p \le 1000A_p$$

ทรายป่นไม่เหนียว (non-plastic silt) ค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม

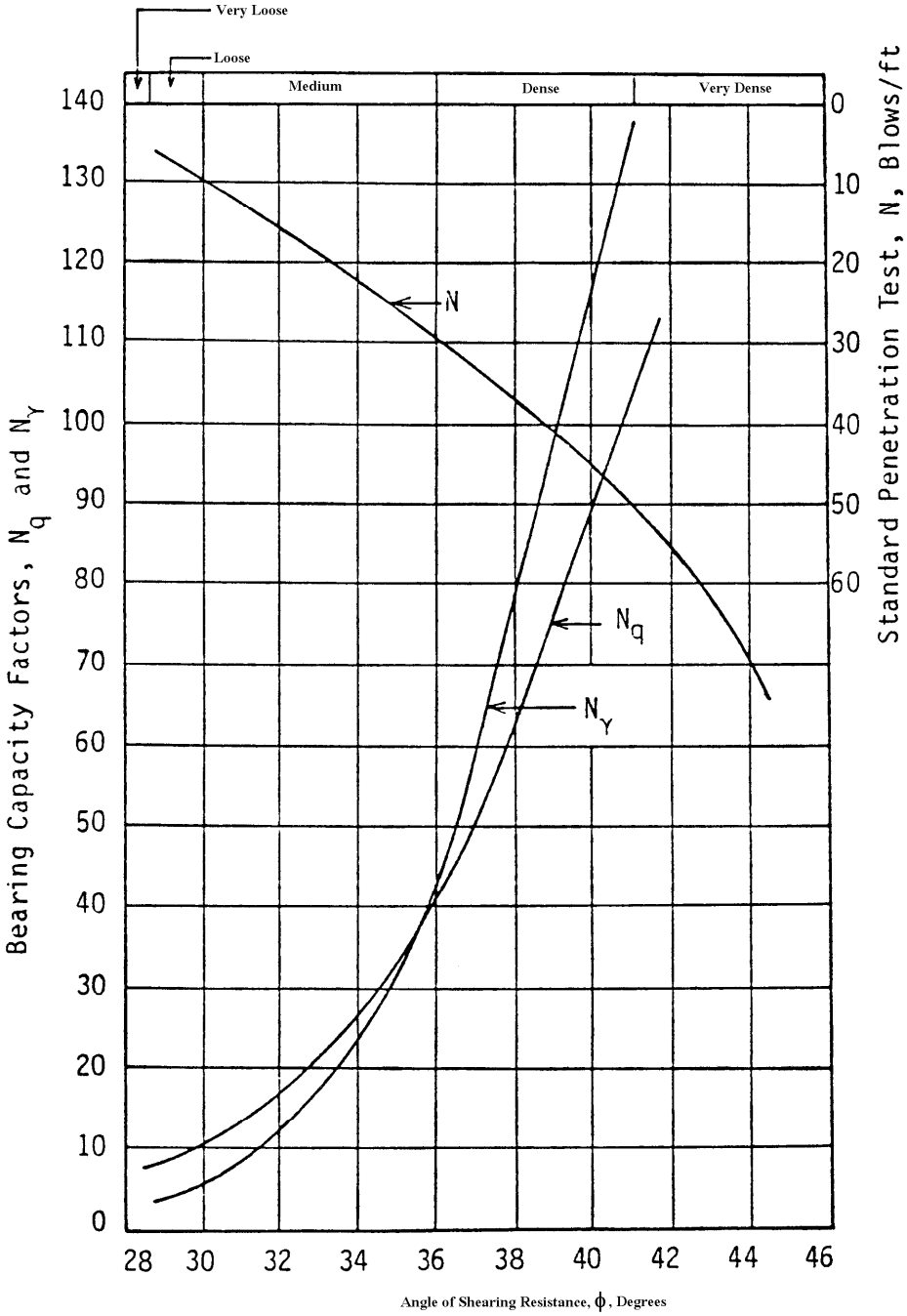
$$Q_b = 26.7NA_p$$

และแรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม

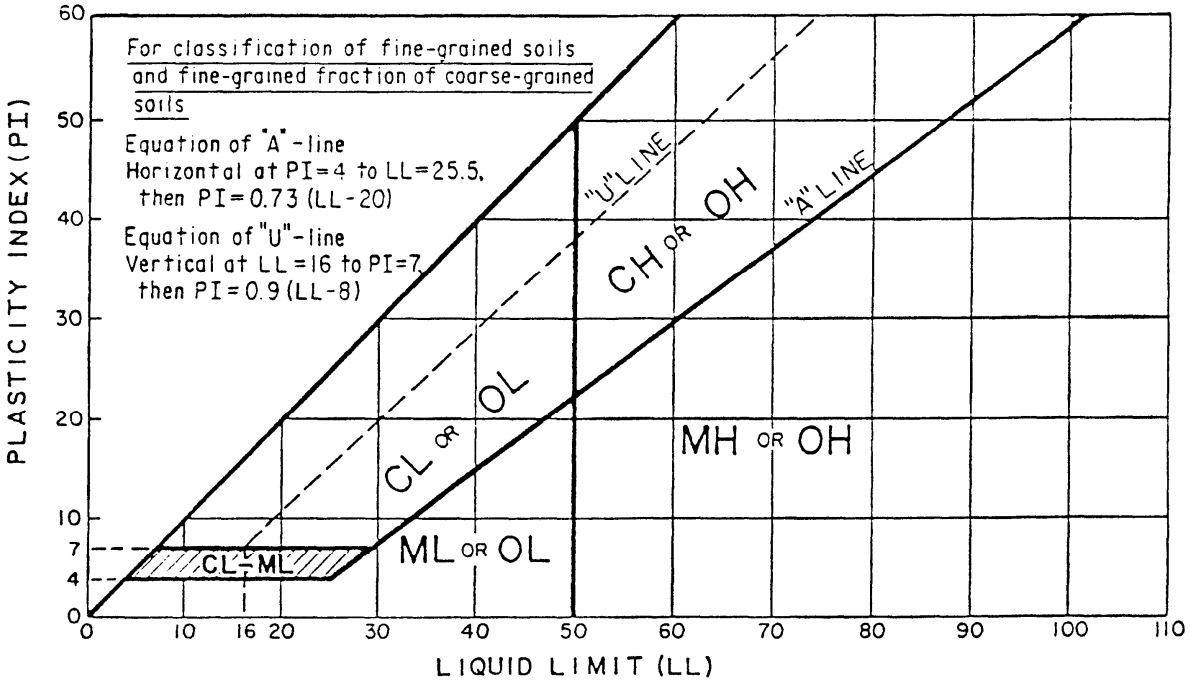
$$Q_s = 0.178A_{sh}N$$

ค่ากำลังแบกทานตามสูตรเชิงประสบการณ์

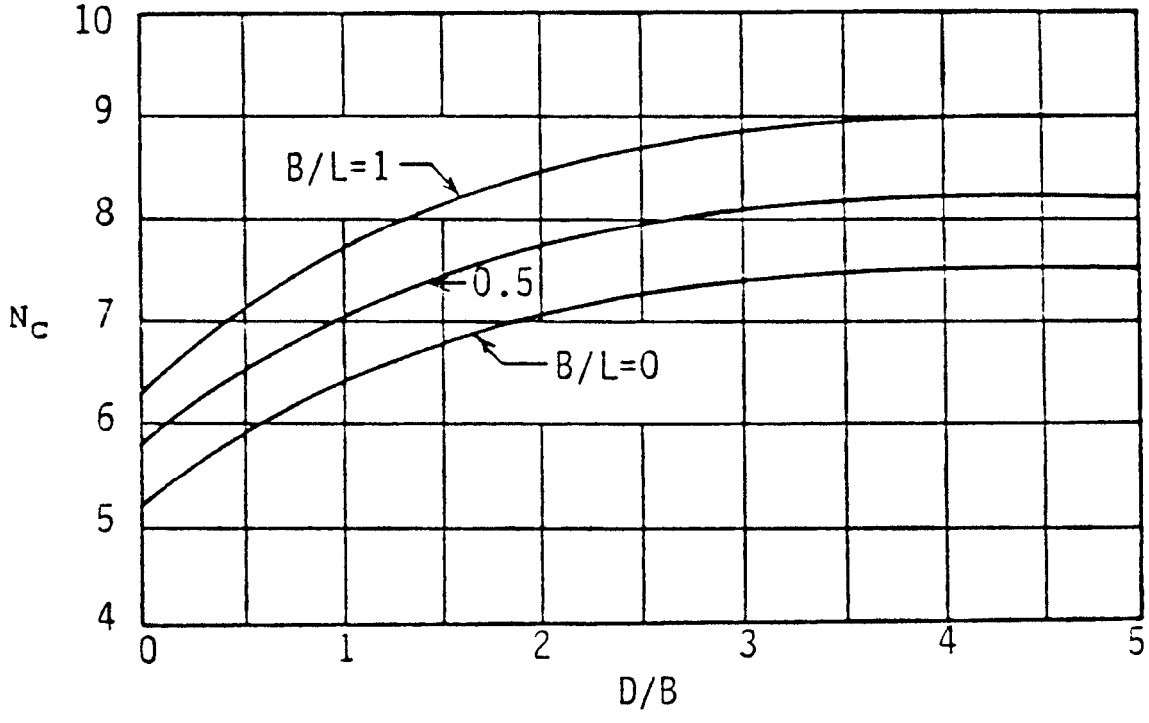
$$q_b = 30N \le 1000$$



รูปที่ 6.20 กราฟสำหรับหาค่าตัวประกอบน้ำหนักบรรทุก N_q และ N_γ จากค่า N สำหรับทรายและกรวด (Peck, Hanson and Thornbun, 1974)



รูปที่ 6.21 กราฟหาดัชนีพลาสติกสำหรับดินเม็ดละเอียดและฝุ่นที่แยกจากดินเม็ดหยาบ (ASTM D-2487)



รูปที่ 6.22 กราฟค่าตัวประกอบน้ำหนักบรรทุก N_c สำหรับวิเคราะห์แบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Skempton, 1951)

รายการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

วิศวกร.....

(นายXXXXX XXXXX)

สย. YYYY

1. ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

$$Q_u = Q_s + Q_b$$

$Q_s = p\sum \alpha S_u \Delta L$ (สำหรับดินเหนียว) + $p\sum (0.21N\Delta L)$ (สำหรับทราย)

Q_s = ค่าน้ำหนักบรรทุกแรงเสียดทาน, ตัน

$Q_b = 9S_u A_p \le 400A_p$ = ค่าแรงแบกทานปลายเสาเข็มกรณีดินเหนียว, ตัน

$Q_b = 30NA_p \le 1000A_p$ = ค่าแรงแบกทานปลายเสาเข็มกรณีทราย, ตัน

ค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS} = \frac{Q_u}{2.5}$$

เสาเข็มเจาะ คิดผลกระทบการเจาะ 50 % สำหรับ Q_b กรณีเป็นชั้นทราย

ค่าน้ำหนักเสาเข็มได้คิดไว้ในสูตรของการคำนวณ Q_b แล้ว

อาคารเรียนรวม 7 ชั้น 1 หลัง ข้อกำหนดตามแบบฐานรากระบุว่า ใช้เสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง (spun pile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ความยาว 23.00 เมตร ส่งหัวเสาเข็ม 2.0 เมตร จากผิวดิน รับค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยต้นละไม่น้อยกว่า 80 ตัน ใช้ส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5

ในการก่อสร้างจริงจะใช้เสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง (spun pile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ความยาว 23.00 เมตร ส่งหัวเสาเข็ม 2.0 เมตร จากผิวดินเดิม (ไม่มีดินถม) มีสมบัติดังนี้

เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม $A_p = \frac{\pi}{4} \times 0.60^2 = 0.282 \ m^2$

เส้นรอบรูป $p = \pi \times 0.60 = 1.88 \ m$

หลุมเจาะ BH-1

ระดับปากหลุมเจาะ ที่ผิวดินเดิม

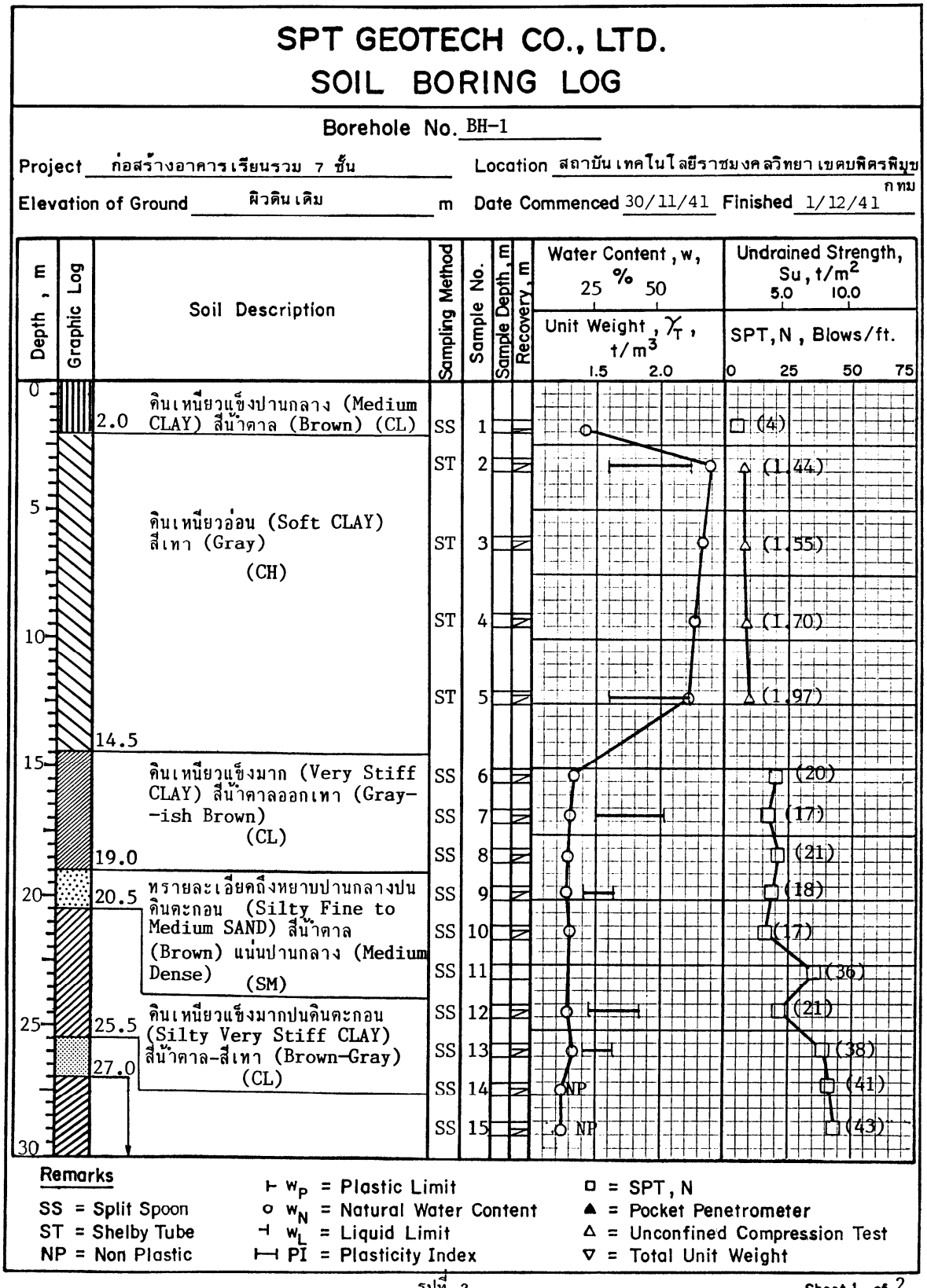
ความลึกปลายเสาเข็ม 25.00 เมตร จากผิวดินเดิม ส่งหัวเสาเข็มลึก 2.00 เมตร

$Q_s = \left[\sum \alpha S_u \Delta L + \sum 0.21N\Delta L\right]p = 85.82 \times 1.88 = 161.3416$ ตัน

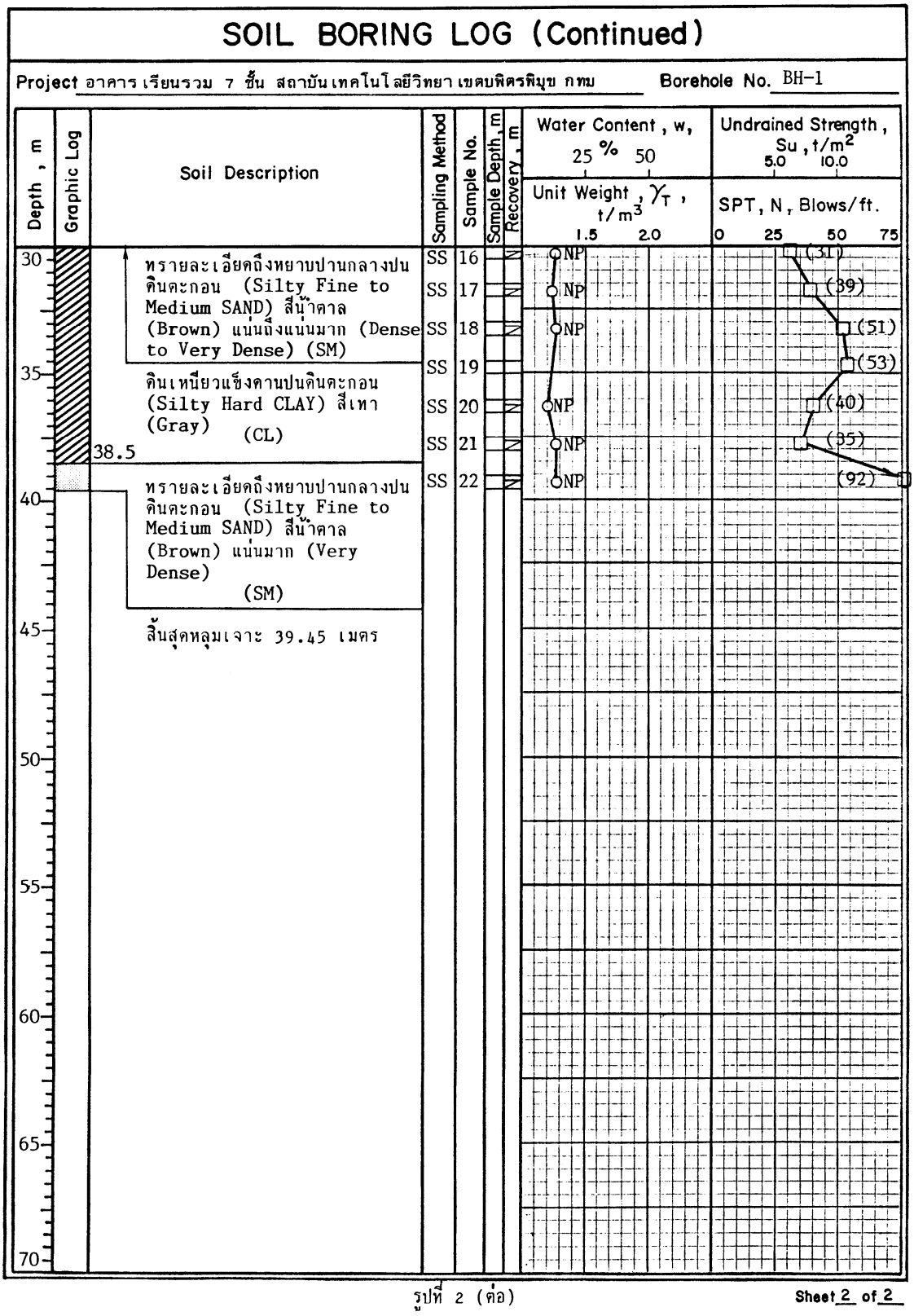
$Q_b = 9S_u A_p = 228 \times 0.282 = 64.296$ ตัน

$Q_u = Q_s + Q_b = 161.3416 + 64.296 = 225.6376$ ตัน

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS} = \frac{225.6376}{2.5} = 90.25 \text{ ตัน} > 80 \text{ ตัน ใช้ได้}$$



รูปที่ 6.23 ผลการเจาะสำรวจดินอาคารเรียนรวม ราชมงคลบพิตรพิมุข



รูปที่ 2 (ต่อ)

รูปที่ 6.24 ผลการเจาะสำรวจดินอาคารเรียนรวม ราชมงคลบพิตรพิมุข (ต่อ)

ตารางคำนวณกำลังของเสาเข็ม

หน่วยแรงเสียดทาน (shaft friction) หลุมเจาะ BH-1 (ดินเหนียว)

ชั้นดิน	ความลึก เมตร	$S_u = \frac{1}{2} q_u$ T/m^2	N ครั้ง/30 ซม	$S_u = \frac{N}{1.5}$ T/m^2	หน่วยแรงเสียดทาน (shaft friction) ดินเหนียว		
					α	$\alpha S_u \Delta L$ T/m	$\sum \alpha S_u \Delta L$ T/m
ดินเหนียว	1.50-1.95	-	-	-	-	-	-
	3.00-3.50	1.44	-	-	1.00	2.16	2.16
	6.00-6.50	1.55	-	-	1.00	4.65	6.81
	9.00-9.50	1.70	-	-	1.00	5.10	11.91
	12.00-12.50	1.97	-	-	1.00	5.91	17.82
	15.00-15.45	-	20	13.33	0.40	16.00	33.82
	16.50-16.95	-	17	11.33	0.40	6.80	40.62
	18.00-18.45	-	21	14.00	0.40	8.40	49.02
	19.50-19.95	-	18	12.00	0.40	7.20	56.22
	21.00-21.45	-	17	11.33	0.40	6.80	63.02
	22.50-22.95	-	36	24.00	0.40	14.40	77.42
	24.00-24.45	-	21	14.00	0.40	8.40	85.82
	25.50-25.95	-	38	25.33	0.40	15.20	101.02
ทราย	27.00-27.45	-	41	-	-	-	-
	28.50-28.95	-	43	-	-	-	-
	30.00-30.45	-	31	-	-	-	-
	31.50-31.95	-	39	-	-	-	-
	33.00-33.45	-	51	-	-	-	-
	34.50-34.95	-	53	-	-	-	-
	36.00-36.45	-	40	-	-	-	-
ดินเหนียว	37.50-37.95	-	35	23.33	0.40	14.00	115.02
ทราย	39.00-39.45	-	92	-	-	-	-

รูปที่ 6.25 ตารางคำนวณกำลังเสียดทานของเสาเข็ม สภาพดินเหนียว

ตารางคำนวณกำลังของเสาเข็ม

หน่วยแรงแบกทาน (end bearing) ดินเหนียว หลุมเจาะ BH-1

ชั้นดิน	ความลึก เมตร	N ครั้ง/30 ซม	หน่วยแรงแบกทาน (end bearing) ดินเหนียว $9S_u = 6N,\ T/m^2$
ดินเหนียว	1.50-1.95	-	-
	3.00-3.50	-	-
	6.00-6.50	-	-
	9.00-9.50	-	-
	12.00-12.50	-	-
	15.00-15.45	20	-
	16.50-16.95	17	-
	18.00-18.45	21	-
	19.50-19.95	18	-
	21.00-21.45	17	-
	22.50-22.95	36	-
	24.00-24.45	21	126
	25.50-25.95	38	228
ทราย	27.00-27.45	41	-
	28.50-28.95	43	-
	30.00-30.45	31	-
	31.50-31.95	39	-
	33.00-33.45	51	-
	34.50-34.95	53	-
	36.00-36.45	40	-
ดินเหนียว	37.50-37.95	35	-
ทราย	39.00-39.45	92	-

รูปที่ 6.26 ตารางคำนวณกำลังแบกทานของเสาเข็ม สภาพดินเหนียว

ตารางคำนวณกำลังของเสาเข็ม

หลุมเจาะ BH-1

ชั้นดิน	ความลึก เมตร	N ครั้ง/30 ซม	Shaft friction, sand		End bearing, sand 30N ตัน/ม^2
			0.21NΔL ตัน/เมตร	$\sum$0.21NΔL ตัน/เมตร	
ดินเหนียว	1.50-1.95	-	-	-	-
	3.00-3.50	-	-	-	-
	6.00-6.50	-	-	-	-
	9.00-9.50	-	-	-	-
	12.00-12.50	-	-	-	-
	15.00-15.45	20	-	-	-
	16.50-16.95	17	-	-	-
	18.00-18.45	21	-	-	-
	19.50-19.95	18	-	-	-
	21.00-21.45	17	-	-	-
	22.50-22.95	36	-	-	-
	24.00-24.45	21	-	-	-
	25.50-25.95	38	-	-	-
ทราย	27.00-27.45	41	12.30	12.30	1000
	28.50-28.95	43	12.90	25.20	1000
	30.00-30.45	31	9.30	34.50	930
	31.50-31.95	39	11.70	46.20	1000
	33.00-33.45	51	15.00	61.20	1000
	34.50-34.95	53	15.00	76.20	1000
	36.00-36.45	40	12.00	88.20	1000
ดินเหนียว	37.50-37.95	35	-	-	-
ทราย	39.00-39.45	92	15.00	103.20	1000

รูปที่ 6.27 ตารางคำนวณกำลังของเสาเข็ม

รายละเอียดการคำนวณ

ช่วงความลึก 1.50-1.95 ไม่มีผลอะไร เนื่องจากหัวเสาเข็มส่งลงไปที่ระดับความลึก 2.00 เมตร จากผิวดิน ในรูปที่ 6.25 ถึง 6.27 ช่วงนี้ไม่มีข้อมูล

ช่วง 2-3.50 เมตร มี $\Delta L = 3.50 - 2 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ความลึกประมาณ 3.5 เมตร มีค่า $S_u = \frac{1}{2} q_u = 1.44$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u < 2$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 1.00$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 1.00 \times 1.44 \times 1.50 = 2.16$ T/m เหนือขึ้นไปยังไม่มีค่า ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 0 + 2.16 = 2.16$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 3.50-6.50 เมตร มี $\Delta L = 6.50 - 3.50 = 3.00$ m จากรูปที่ 6.24 ความลึกประมาณ 6.50 เมตร มีค่า $S_u = \frac{1}{2} q_u = 1.55$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u < 2$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 1.00$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 1.00 \times 1.55 \times 3.00 = 4.65$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 2.16$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 2.16 + 4.65 = 6.81$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 6.50-9.50 เมตร มี $\Delta L = 9.50 - 6.50 = 3.00$ m จากรูปที่ 6.24 ความลึกประมาณ 9.50 เมตร มีค่า $S_u = \frac{1}{2} q_u = 1.70$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u < 2$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 1.00$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 1.00 \times 1.70 \times 3.00 = 5.10$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 6.81$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 6.81 + 5.10 = 11.91$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 9.50-12.50 เมตร มี $\Delta L = 12.50 - 9.50 = 3.00$ m จากรูปที่ 6.24 ความลึกประมาณ 12.50 เมตร มีค่า $S_u = \frac{1}{2} q_u = 1.97$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u < 2$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 1.00$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 1.00 \times 1.97 \times 3.00 = 5.91$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 11.91$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 11.91 + 5.91 = 17.82$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 12.50-15.50 เมตร มี $\Delta L = 15.50 - 12.50 = 3.00$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 15.45 เมตร มีค่า SPT N = 20 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{20}{1.5} = 13.33$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 13.33$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 13.33 \times 3.00 = 16.00$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 17.82$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 17.82 + 16.00 = 33.82$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 15.50-17.00 เมตร มี $\Delta L = 17.00 - 15.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 16.95 เมตร มีค่า SPT N = 17 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{17}{1.5} = 11.33$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 11.33$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 11.33 \times 1.50 = 6.798 \Rightarrow 6.80$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 33.82$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 33.82 + 6.80 = 40.62$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 17.00-18.50 เมตร มี $\Delta L = 18.50 - 17.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 18.45 เมตร มีค่า SPT N = 21 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{21}{1.5} = 14.00$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 14.00$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 14.00 \times 1.50 = 8.40$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 40.62$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 40.62 + 8.40 = 49.02$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 18.50-20.00 เมตร มี $\Delta L = 20.00 - 18.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 19.95 เมตร มีค่า SPT N = 18 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{18}{1.5} = 12.00$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 12.00$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 12.00 \times 1.50 = 7.20$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 49.02$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 49.02 + 7.20 = 56.22$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 18.50-20.00 เมตร มี $\Delta L = 20.00 - 18.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 24 ที่ความลึก 19.95 เมตร มีค่า SPT N = 18 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{18}{1.5} = 12.00$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 12.00$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 12.00 \times 1.50 = 7.20$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 49.02$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 49.02 + 7.20 = 56.22$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 20.00-21.50 เมตร มี $\Delta L = 21.50 - 20.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 21.45 เมตร มีค่า SPT N = 17 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{17}{1.5} = 11.33$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 11.33$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 11.33 \times 1.50 = 6.80$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 56.22$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 56.22 + 6.80 = 63.02$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 21.50-23.00 เมตร มี $\Delta L = 23.00 - 21.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 24 ที่ความลึก 22.95 เมตร มีค่า SPT N = 36 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{36}{1.5} = 24.00$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 24.00$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 24.00 \times 1.50 = 14.40$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 63.02$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 63.02 + 14.40 = 77.42$ T/m ดังรูปที่ 6.35

ช่วง 23.00-24.50 เมตร มี $\Delta L = 24.50 - 23.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 24.45 เมตร มีค่า SPT N = 21 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{21}{1.5} = 14.00$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 14.00$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 14.00 \times 1.50 = 8.40$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 77.42$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 77.42 + 8.40 = 85.82$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 24.50-26.00 เมตร มี $\Delta L = 26.00 - 24.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 25.95 เมตร มีค่า SPT N = 38 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{38}{1.5} = 25.33$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 25.33$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 25.33 \times 1.50 = 15.20$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 85.82$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 85.82 + 15.20 = 101.02$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 26.00-27.50 เมตร มี $\Delta L = 27.50 - 26.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 27.45 เมตร มีค่า SPT N = 41 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 41 = 1230 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ดังนั้น แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 41 \times 1.50 = 12.915$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{12.915}{1.05} = 12.30$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 0$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 0 + 12.30 = 12.30$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 27.50-29.00 เมตร มี $\Delta L = 29.00 - 27.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 28.95 เมตร มีค่า SPT N = 43 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 43 = 1290 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ดังนั้น แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 43 \times 1.50 = 13.545$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{13.545}{1.05} = 12.90$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 12.30$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 12.30 + 12.90 = 25.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 29.00-30.50 เมตร มี $\Delta L = 30.50 - 29.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 30.45 เมตร มีค่า SPT N = 31 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 31 = 930 < 1000$ ใช้ $30N = 930$ ดังนั้นแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 31 \times 1.50 = 9.765$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{9.765}{1.05} = 9.30$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 25.20$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 25.20 + 9.30 = 34.50$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 30.50-32.00 เมตร มี $\Delta L = 32.00 - 30.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 31.95 เมตร มีค่า SPT N = 39 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 39 = 1170 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ดังนั้น แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 39 \times 1.50 = 12.285$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{12.285}{1.05} = 11.70$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 34.50$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 34.50 + 11.70 = 46.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 32.00-33.50 เมตร มี $\Delta L = 33.50 - 32.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 33.45 เมตร มีค่า SPT N = 51 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 51 = 1530 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ต้องใช้ค่า N ไม่เกิน 50 ดังนั้นแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 50 \times 1.50 = 15.75$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{15.75}{1.05} = 15.00$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 46.20$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 46.20 + 15.00 = 61.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 33.50-35.00 เมตร มี $\Delta L = 35.00 - 33.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 34.95 เมตร มีค่า SPT N = 53 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 53 = 1590 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ต้องใช้ค่า N ไม่เกิน 50 ดังนั้นแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 50 \times 1.50 = 15.75$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{15.75}{1.05} = 15.00$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 61.20$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 61.20 + 15.00 = 76.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 35.00-36.50 เมตร มี $\Delta L = 36.50 - 35.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 36.45 เมตร มีค่า SPT N = 40 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 40 = 1200 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ดังนั้น แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 40 \times 1.50 = 12.6$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{12.6}{1.05} = 12.00$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 76.20$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 76.20 + 12.00 = 88.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

ช่วง 36.50-38.00 เมตร มี $\Delta L = 38.00 - 36.50 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 25.95 เมตร มีค่า SPT N = 35 ครั้ง/30 ซม ดังนั้น $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{35}{1.5} = 23.33$ T/m^2 จากรูปที่ 6.15 ขณะที่ $S_u = 23.33$ นั้นกราฟของ Holmberg ให้ค่า $\alpha \approx 0.40$ ดังนั้น $\alpha S_u \Delta L = 0.40 \times 23.33 \times 1.50 = 14.00$ T/m เหนือขึ้นไปมี $\sum \alpha S_u \Delta L = 101.02$ T/m อยู่แล้ว ดังนั้น $\sum \alpha S_u \Delta L = 101.02 + 14.00 = 115.02$ T/m ดังรูปที่ 6.25

ช่วง 38.00-39.50 เมตร มี $\Delta L = 36.50 - 35.00 = 1.50$ m จากรูปที่ 6.24 ที่ความลึก 39.45 เมตร มีค่า SPT N = 92 ครั้ง/30 ซม เป็นชั้นทราย ค่า $30N = 30 \times 92 = 2760 > 1000$ ใช้ $30N = 1000$ ต้องใช้ N ไม่เกิน 50 ดังนั้นแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม $0.21N\Delta L = 0.21 \times 50 \times 1.50 = 15.75$ ลดค่าลงโดยหารด้วย 1.05 ได้ $\frac{15.75}{1.05} = 15.00$ T/m และก่อนหน้ามีค่า $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 88.20$ ดังนั้น $\sum \frac{0.21N\Delta L}{1.05} = 88.20 + 15.00 = 103.20$ T/m ดังรูปที่ 6.27

แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มที่ระดับความลึก 25 เมตร พิจารณาช่วง 24.00-24.50 เมตร มี N = 21 ครั้ง/30 ซม ได้ $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{21}{1.5}$ T/m^2 แล้ว $q_b = 9S_u = 9 \times \frac{N}{1.5} = 6N = 6 \times 21 = 126$ T/m^2

พิจารณาช่วง 24.50-26.00 เมตร มี N = 38 ครั้ง/30 ซม ได้ $S_u = \frac{N}{1.5} = \frac{38}{1.5}$ T/m^2 แล้ว $q_b = 9S_u = 9 \times \frac{N}{1.5} = 6N = 6 \times 38 = 228$ T/m^2 ปลายเสาเข็มอยู่ในช่วงนี้

แรงแบกทานมีรายการคำนวณตามรูปที่ 6.27

6.7 การตอกเสาเข็ม

การตอกเสาเข็มลงไปในดิน หากเป็นเสาเข็มไม้หรือคอนกรีตที่ยาวไม่เกิน 4 เมตร อาจจะตอกด้วยสามเกลอโดยใช้เสียมขุดนำแล้วนำเสาเข็มเสียบ จากนั้นจึงขย่มแล้วส่งต่อด้วยสามเกลอ เสาเข็มที่ยาวมากกว่า 4 เมตร ขึ้นไป นิยมตอกด้วยปั้นจั่นซึ่งเป็นโครงเหล็กหอสูงมีตะเกียบเป็นเหล็กรางสำหรับนำแนวลูกตุ้มเหล็ก ด้านล่างมีเครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนเคเบิลสองสาย สายหนึ่งใช้หิ้วและตอกลูกตุ้ม อีกสายหนึ่งใช้หิ้วเสาเข็มและใช้เคลื่อนย้ายปั้นจั่น การตอกเสาเข็มอาจจะใช้ค้อนลม ไอน้ำ ไฮดรอลิกส์ โดยแบบหลังนี้นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาสูง ปั้นจั่นใช้เทคนิคต่ำ ผลิตในประเทศไทย ราคาถูก ปัจจุบันมีรถปั้นจั่นที่ใช้งานสะดวกไม่ต้องรื้อประกอบปั้นจั่นทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงไปได้

น้ำหนักของลูกตุ้ม ลูกตุ้มเหล็กที่ใช้ตอกเสาเข็มควรมีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 2.5 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม เช่นเลือกใช้เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตันความยาวด้านละ 0.30 เมตร ความยาวเสาเข็ม 21 เมตร จากรูปที่ 6.12 เสาเข็มหนัก 216 kg/m ดังนั้น

น้ำหนักเสาเข็ม $W_{pi} = 216 \times 21 = 4{,}536$ kg $= 4.536$ tonne

น้ำหนักลูกตุ้มไม่น้อยกว่า $0.7 \times 4.536 = 3.175$ tonne

น้ำหนักลูกตุ้มไม่ควรจะเกินกว่า $2.5 \times 4.536 = 11.34$ tonne

ในกรณีที่มีเสาเข็มหลายขนาด ควรจะเลือกลูกตุ้มที่ใช้งานได้กับทุกขนาด ลูกตุ้มที่เบาระยะยกตอกจะมาก ลูกตุ้มที่หนักระยะยกตอกจะน้อย ลูกตุ้มหนักแต่ยกสูงเกินไป หัวเสาเข็มแตกก่อนจะจมลงได้ระยะ

จำนวนครั้งในการตอก (blow-count) ในช่วง 3.00 เมตรสุดท้าย ให้ขีดแบ่งช่วงละ 0.30 เมตรหรือประมาณ 1 ฟุต กรณีที่เสาเข็มตอกลงยากให้แบ่งระยะด้วยชอล์คที่ตัวเสาเข็ม แต่ถ้าเสาเข็มตอกง่ายแล้วต้องส่งหัวเสาเข็มลงไปอีกให้แบ่งระยะที่เสาส่ง นับจำนวนครั้งในการตอกแต่ละช่วงแล้วจดบันทึกในระเบียนรายงาน ความสูงในการยกลูกตุ้มอยู่ระหว่าง 0.30 ถึง 1.20 เมตร แล้วแต่น้ำหนักของลูกตุ้ม ผู้ควบคุมการตอกเสาเข็มควรสังเกตการปล่อยลูกตุ้มว่าแต่ละครั้งสายเคเบิลหย่อนหรือไม่ หากหย่อนก็แสดงว่าช่างตอกเสาเข็มปล่อยลูกตุ้มให้ตกอย่างอิสระ แต่ถ้าสายเคเบิลตึงแสดงว่าช่างตอกเสาเข็มรั้งเพื่อให้ลูกตุ้มไม่มีแรงกระแทกส่งหัวเสาเข็ม จำนวนครั้งในการตอกจะมากกว่าจริง ใน 10 ช่วงนี้ช่างอาจจะยกลูกตุ้มสูงไม่สม่ำเสมอบ้างซึ่งไม่เป็นไร เนื่องจากค่าที่ใช้จะหาจาก last ten blow หรือระยะทรุดตัวจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย โดยให้หยุดการตอกแล้วขีดเส้นไว้ที่เสาเข็ม (หากเสาเข็มยังโผล่พ้นดิน) หรือขีดเส้นไว้ที่เสาส่ง (หากส่งหัวเสาเข็มลงดินไปแล้ว) จากนั้นให้ช่างตอกเสาเข็มอย่างประณีต กล่าวคือระยะยกต้องใกล้เคียงที่กำหนดที่สุด แล้วไม่ต้องเร่งเร็ว ตอกลงไป 10 ครั้งก็หยุดแล้วขีดเส้นใหม่ในมุมการขีดเดียวกัน วัดระยะห่างระหว่างขีดทั้งสอง เมื่อหารด้วยจำนวนครั้งในการตอก 10 จะได้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่อครั้งการตอกนำไปใช้คำนวณหากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม

สูตรในการตอกเสาเข็ม สูตรในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากจำนวนครั้งในการตอกมีหลายสูตรมากดังรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29

เมื่อ A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม, m^2

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม, T/m^2

$E = 152{,}000\sqrt{f'_{cp}}$ = โมดูลัสยืดหยุ่นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง, T/m^2

$f'_{cp} = 350$ ksc = กำลังประลัยของคอนกรีตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง, ksc = kg/cm^2

$E = 20{,}400{,}000\ T/m^2$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มเหล็ก

$E = 800{,}000 - 1{,}200{,}000\ T/m^2$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มไม้

h = ระยะยกของลูกตุ้ม, m

L = ความยาวของเสาเข็มที่ฝังในดิน, m

ℓ = ความหนาของที่รองหัวเสาเข็ม, m

n = สัมประสิทธิ์การคืนสภาพ

R = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม, T

s = ระยะทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย , m/blow

$s = \frac{0.30}{N}$ = ระยะทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มของฟุตสุดท้าย (กรณีไม่ได้ทำ last ten blow), m/blow

N = จำนวนการตอกในฟุตสุดท้าย , ครั้ง (blow)

W = น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม, ตัน

w = น้ำหนักของเสาเข็ม, ตัน

ลำดับ	ชื่อสูตร	น้ำหนักวิบัติ	หมายเหตุ
1	Engineering News	$R = \frac{Wh}{s + 0.0254C}$	$0.50 \leq C \leq 1.00$
2	Modified Eng. News	$R = \frac{Wh}{s + 0.0254C} \cdot \frac{W + n^2w}{W + w}$	$0.50 \leq C \leq 1.00$ $n = 0.25$
3	Hiley	$R = \frac{WhZ}{s + 0.01C/2} \cdot \frac{W + n^2w}{W + w}$	$Z = 0.80, n = 0.25$ $C = C_1 + C_2 + C_3$ $C_1 = \frac{1.80RL^2}{A}$ $C_2 = \frac{0.72RL}{A}$ $C_3 = \frac{3.60R}{A}$
4	Dutch	$R = \frac{10}{12} \cdot \frac{Wh}{s + 0.0254C} \cdot \frac{W}{W + w}$	$C = 1.0$
5	So	$R = \frac{a}{s + \sqrt{0.5ab}}$	$a = eWh$ $e = 0.80$ $b = \frac{L}{AE}$ $E =$ โมดูลัสยืดหยุ่น $= 2.0 \times 10^6$ Ton/m^2
6	Janbu	$R = \frac{Wh}{Ks}$	$K = C[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C}}]$ $C = 0.75 + 0.15\frac{w}{W}$ $\lambda = \frac{WhL}{AEs^2}$ $E = 1.8 \times 10^6$ Ton/m^2
7	Gate	$R_c = 40\sqrt{eWh}.\log(\frac{1}{4s})$	$e = 0.75$

รูปที่ 6.28 ตารางสูตรการตอกเสาเข็ม

ลำดับ	ชื่อสูตร	น้ำหนักวิบัติ	หมายเหตุ
8	Eytelwein	$R = \frac{Wh}{s + 0.0254(w/W)}$	
9	Navy Mckay	$R = \frac{Wh}{s[1 + 0.80\frac{w}{W}]}$	
10	Rankine	$R = \frac{2AEs}{L}\left[\sqrt{1 + \frac{WhL}{s^2EA}} - 1\right]$	
11	Redtenbacher	$R = \frac{AE}{L}\left[s + \sqrt{s^2 + \frac{wWhl}{AE(w + W)}}\right]$	
12	Pacific Coast Uniform Building Code	$R = \frac{\frac{Wh\,(W + n^2w)}{(W + w)}}{s + \frac{RL}{AE}}$	

รูปที่ 6.29 ตารางสูตรการตอกเสาเข็ม (ต่อ)

สูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหน้าตัด DH , I และสี่เหลี่ยมตัน ที่ปรับปรุงโดย รศ.วิเชียร เต็งอำนวย และสนิท พิพิธสมบัติ ตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร ปีที่ 33 เล่มที่ 4 ตุลาคม 2523 สรุปได้ดังนี้

ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียง เสาเข็มหน้าตัด DH และ I รับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้

$$R = \sqrt{Wh}\left[44.6\log\left(\frac{t}{s}\right) + 8.22\right]$$

เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้

$$R = \frac{2.14Wh}{Ks + \sqrt{0.5ab}}$$

เมื่อ R = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม, T

W = น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็ม, T

w = น้ำหนักของเสาเข็ม, ตัน

h = ระยะยกของลูกตุ้ม, m

t = ส่วนที่แคบที่สุดของหน้าตัด, m

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม, m^2

L = ความยาวของเสาเข็มที่ฝังในดิน, m

N = จำนวนการตอกในฟุตสุดท้าย , ครั้ง (blow)

s = ระยะทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย , m/blow

$s = \frac{0.30}{N}$ = ระยะทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มของฟุตสุดท้าย (กรณีไม่ได้ทำ last ten blow), m/blow

$K = C\left[1 + \frac{\lambda}{C}\right]$

$C = 0.75 + 0.15\frac{w}{W}$

$\lambda = \frac{WhL}{AEs^2}$ โดยใช้ $E = 1{,}800{,}000\ \ T/m^2$

$a = eWh$ โดยใช้ประสิทธิผล $e = 0.80$

$b = \frac{L}{AE}$ โดยใช้ $E = 2{,}000{,}000\ \ T/m^2$

สูตรคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ สูตร Danish โดย

$$Q_u = \frac{eWh}{s + C}$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS}$$

$$C = \sqrt{\frac{eWhL}{2AE}}$$

เมื่อ Q_a = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม, ตัน

Q_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม, ตัน

$FS = 2.5$ = ส่วนปลอดภัย ค่าปกติเท่ากับ 2.5

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม, ตัน

h = ระยะยกลูกตุ้ม, ซม

$e = 0.80$ = ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม ปกติ 0.80 หรือ 80 %

A = เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม, $ซม^2$

L = ความยาวของเสาเข็ม, ซม

$E = 15.2\sqrt{f'_{cp}}$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง, $ตัน/ซม^2$

$f'_{cp} = 350\ \ ksc$ = กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง, $กิโลกรัม/ซม^2$

s = ระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม

ตัวอย่างที่ 6.4 ลูกตุ้มเหล็กสำหรับตอกเสาเข็มมีปริมาตร 0.814 m^3 ความถ่วงจำเพาะของเหล็ก 7.85 เสาเข็มสี่เหลี่ยมตันหน้าตัด 0.40 เมตร ยาว L = 20.00 m = 2,000 cm เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม A = 1600 cm^2 ให้หากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มตั้งแต่ s = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, …., 1.00 cm โดยระยะยก h = 30, 40, 50, 60 cm ให้ส่วนปลอดภัย FS = 2.5 กำลังประลัยของคอนกรีตที่ผลิตเสาเข็ม $f'_{cp} = 350$ ksc

วิธีทำ หาข้อมูลพื้นฐาน

เหล็กมีความถ่วงจำเพาะ 7.85 หมายความว่า เมื่อปริมาตรของเหล็ก 1 m^3 จะมีน้ำหนัก

$$W_s = S_s\gamma_w = 7.85\times 1{,}000 = 7{,}850 \text{ kg} = 7.85 \text{ tonne}$$

$W = 7.85\times 0.814 = 6.39$ tonne = น้ำหนักของลูกตุ้ม

$e = 0.80$ = ประสิทธิภาพของปั้นจั่น

$A = 1{,}600$ cm^2 = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$L = 20$ m $= 2{,}000$ cm = ความยาวของเสาเข็ม

$f'_{cp} = 350$ ksc = กำลังประลัยของคอนกรีตที่ทำเสาเข็ม

$E = 15.2\sqrt{f'_{cp}} = 15.2\sqrt{350} = 284.37$ T/cm^2 = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทำเสาเข็ม

$FS = 2.5$ = ส่วนปลอดภัยสำหรับหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้

$h = 30,40,50,60$ cm = ระยะยกลูกตุ้ม

$s = 0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.40,0.45,0.50,0.55,0.60,0.65,0.70,0.75,0.80,$
$0.85,0.90,0.95,1.00$ cm

s = ระยะทรุดตัวต่อการตอกหนึ่งครั้ง

$$C = \sqrt{\frac{eWhL}{2AE}} = \sqrt{\frac{0.8\times 6.39h\times 2{,}000}{2\times 1600\times 284.37}} = \sqrt{0.011235362h}$$

$$Q_u = \frac{eWh}{s+C} = \frac{0.8\times 6.39h}{s+\sqrt{0.011235362h}} = \frac{5.112h}{s+\sqrt{0.011235362h}}$$

เมื่อ $h = 30$ cm, $s = 0.05$ cm

$$Q_u = \frac{5.112\times 30}{0.05+\sqrt{0.011235362\times 30}} = 243.2 \text{ tonne}$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS} = \frac{243.2}{2.5} = 97.3 \text{ tonne}$$

ตัวอย่างที่ 6.5 เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน $S-0.40\times0.40\times24.00$ m ลูกตุ้มหนัก 9 ตัน ระยะยกสูง 50 ซม ส่วนปลอดภัย 2.5 กำลังคอนกรีตเสาเข็ม 350 ksc ถ้ากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 80 ตัน จงหาค่า blow-count ที่จะสั่งให้ผู้ควบคุมตรวจสอบ

วิธีทำ เตรียมข้อมูล

$W = 9$ tonne = น้ำหนักลูกตุ้ม

$e = 0.80$ = ประสิทธิภาพของปั้นจั่น

$A = 40\times40 = 1600$ cm^2 = เนื้อที่หน้าตัดเสาเข็ม

$L = 24.00$ m $= 2400$ cm = ความยาวเสาเข็ม

$f'_{cp} = 350$ ksc = กำลังคอนกรีตเสาเข็ม

$E = 15.1\sqrt{f'_c} = 15.1\sqrt{350} = 282.5$ T/m^2 = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสาเข็ม

$FS = 2.5$ = ส่วนปลอดภัย

$h = 50$ cm = ระยะยกลูกตุ้ม

s = ระยะทรุดตัวของเสาเข็มในตอกแต่ละครั้ง, cm

$$C = \sqrt{\frac{eWhL}{2AE}} = \sqrt{\frac{0.8\times9\times50\times2400}{2\times1600\times282.5}} = 0.977625803$$

$Q_a = 80$ tonne = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

$Q_u = FS\cdot Q_a = 2.5\times80 = 200$ tonne = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

จาก $Q_u = \dfrac{eWh}{s+C}$ จะหาค่า s ได้ดังนี้

$$s = \frac{eWh}{Q_u} - C = \frac{0.8\times9\times50}{200} - 0.977625803 = 0.8224 \text{ cm/ครั้ง}$$

ดังนั้น Last ten blow $= 10s = 10\times0.8224 = 8.224$ cm

และ blow-count $= \dfrac{30.48}{0.8224} = 37.06 \Rightarrow 38$ ครั้ง

โปรแกรม Excel ชื่อ DANISH.XLS ที่แนบมานั้นเพียงป้อนข้อมูลในส่วนสีแดง ส่วนสีน้ำเงินเป็นผลการคำนวณ

DANISH FORMULA, known Qa find s & blow-count

กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ Qa =	**80**	ตัน
ส่วนปลอดภัย FS ปกติใช้ 2.5	**2.5**	
กำลังรับน้ำหนักประลัย Qu=FS.Qa=	**200**	ตัน
น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม W =	**9**	ตัน
ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม e = (0.8)	**0.8**	
เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม A =	**1600**	cm^2
ความยาวของเสาเข็ม L =	**2400**	cm
กำลังคอนกรีตเสาเข็ม f'cp =	**350**	ksc
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต E = 15.1sqrt(f'cp) =	**282.5**	T/cm^2
ระยะยกของลูกตุ้ม h =	**50**	cm
สัมประสิทธิ์ C=sqrt(eWhL/(2AE)) =	**0.978**	
ระยะทรุดตัวครั้งละ s=eWh/Qu-C =	**0.822**	cm
Last ten blow = ระยะทรุดตัวตอก 10 ครั้งสุดท้าย =	**8.224**	cm
blow-count = 30.48/s	**38**	ครั้ง

รูปที่ 6.30 โปรแกรม Excel คำนวณหา blow-count ในการตอกเสาเข็ม

6.8 ลักษณะการวิบัติของฐานราก

หากพิจารณาฐานรากเดียว จะต้องออกแบบให้ฐานรากมีคุณสมบัติ 3 ประการ โดยเน้นที่ความลึกประสิทธิผล d

1 ค่า d ของฐานรากต้องมากเพียงพอต้านทานไม่ให้เสาตอม่อดันทะลุลงไป เรียก ***แรงเฉือนเจาะทะลุ*** (punching shear) และในกรณีฐานรากบนเสาเข็มต้องออกแบบไม่ให้เสาเข็มดันทะลุฐานรากขึ้นมาด้วย

2 ค่า d ของฐานรากต้องมากเพียงพอไม่ให้ฐานรากแตกแบบคานกว้าง เรียก***แรงเฉือนแบบคาน*** (beam shear) หรือแรงเฉือนทางเดียว

3 ค่า d ต้องมากเพียงพอที่จะให้ปริมาณเหล็กเสริมไม่เกิน $\rho_{max} = 0.75\rho_b$ จึงต้องการเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง ทั้งนี้เพื่อให้การโก่งตัวของฐานรากน้อย เพราะหากฐานรากบางเกินไปหรือต้องเสริมเหล็กรับแรงอัดด้วยนั้นฐานรากจะโก่งมาก ทำให้ดินใต้ฐานรากบริเวณใต้ตอม่อเกิดแรงดันมากกว่าขอบของฐาน

รากจนดินอาจจะวิบัติ และหากเป็นฐานรากบนเสาเข็ม แล้วฐานรากบางเกินไปจะทำให้เสาเข็มใต้ตอม่อรับแรงมากกว่าเสาเข็มริมขอบตอม่อเนื่องจากการห่อตัวของฐานรากบาง

ค่า d ที่ต้องการด้วยผลของแรงเฉือนแบบเจาะทะลุจะมากกว่ากรณีแรงเฉือนแบบคาน และกรณีของโมเมนต์ จึงนิยมเรียกว่า ***แรงเฉือนเจาะทะลุเป็นตัวควบคุม*** (punching shear control)

รูปที่ 6.31 เป็นลักษณะแรงเฉือนและการกลายเป็นแรงดึงทแยง โดยมีขนาดเท่ากัน v = t

รูปที่ 6.32 ลักษณะแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ โดยแทนแรงเฉือนด้วยแรงดึงทแยง

เมื่อพิจารณาการแตกแบบเจาะทะลุ ให้แรงลัพธ์ที่กดตอม่อ P = V เป็นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ แนวเจาะทำมุม 45 องศาลงไป ถ้าตอม่อมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด $a \times b$ แนวแตกจะเป็นรูปปิรามิดปลายตัด $a \times b$ และฐานขนาด $(a + 2d) \times (b + 2d)$ ที่ผิวของปิรามิดจะมีแรงดึงทแยงทิศทางตั้งฉากกับผิว เมื่อมองตามแนว (1) กับแนว (2) จะได้ดังรูปที่ 6.56 ซึ่งผิวของปิรามิดทำมุม 45 องศากับแนวราบ แรง vA_1 และ vA_2 ทำมุม 45 องศากับแนวดิ่ง ความสูงเอียงของ A_1 กับ A_2 คือ $d\sqrt{2}$ ตามคุณสมบัติของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากฐาน 45 องศา พื้นที่ A_1 กับ A_2 เป็นสี่เหลี่ยมคางหมู จึงหาได้ดังรูปที่ 6.32 พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่ง

$\left[\sum F_y = 0\right]$

$$V = vA_1 \cos 45^o + vA_1 \cos 45^o + vA_2 \cos 45^o + vA_2 \cos 45^o$$

$$V = 2vA_1 \cos 45^o + 2vA_2 \cos 45^o$$

$$V = 2v(A_1 + A_2)\cos 45^o$$

$$V = 2v\left[d\sqrt{2}(a + d) + d\sqrt{2}(b + d)\right] \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

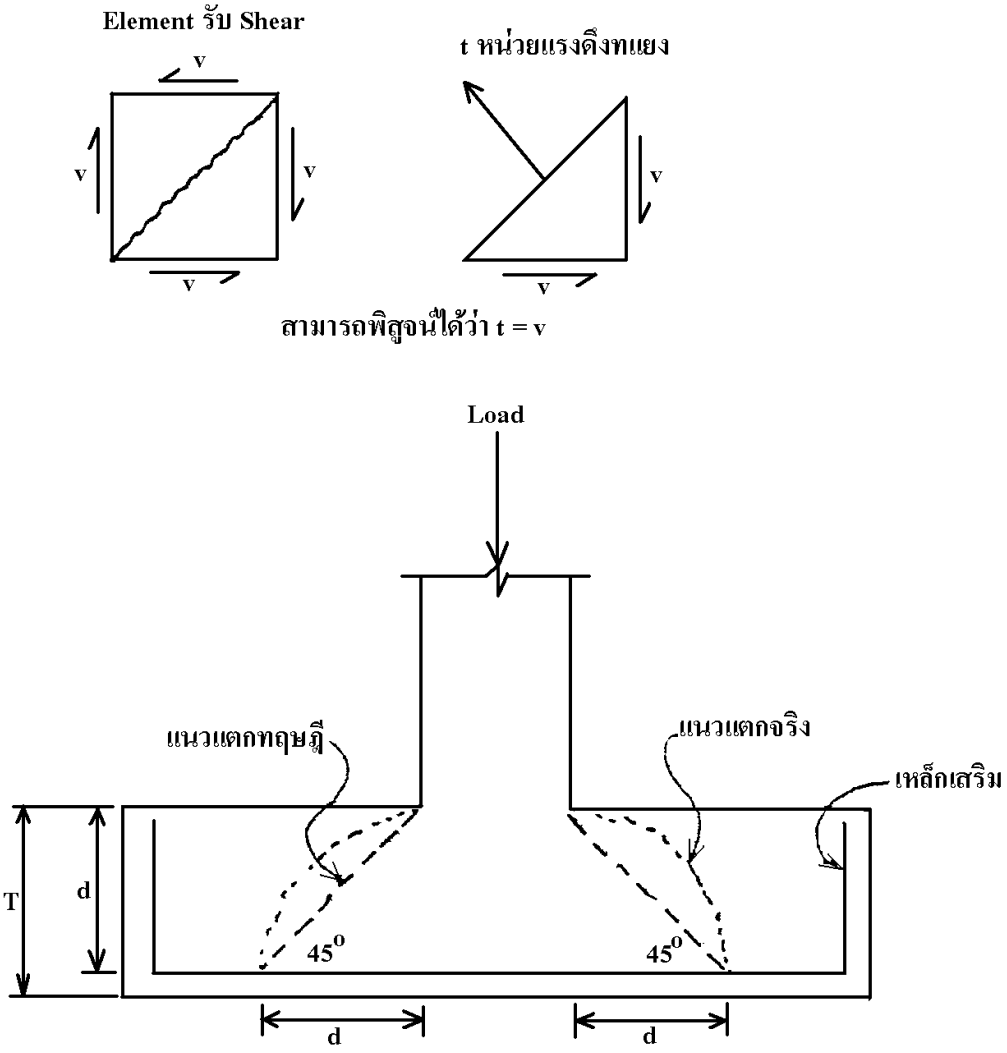
$$V = 2\sqrt{2}vd(a + b + 2d) \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$V = 2vd(a + b + 2d)$$

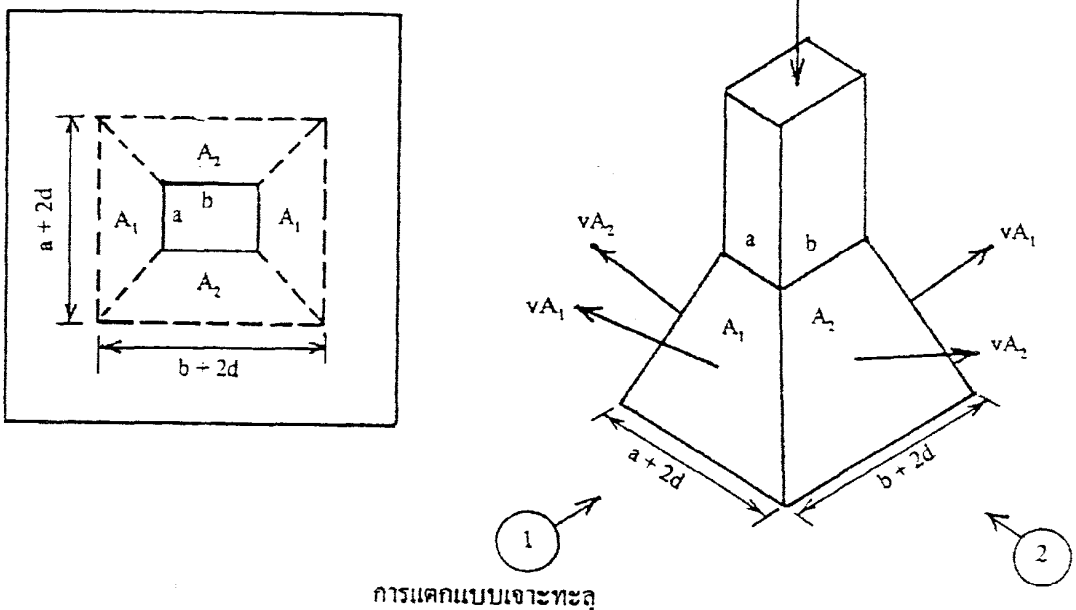
แทน v ด้วย v_p ซึ่งหมายถึงหน่วยแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$v_p = \frac{V}{[2(a + b + 2d)]d} = \frac{V}{b_o d} = \frac{V}{A_{vp}}$$

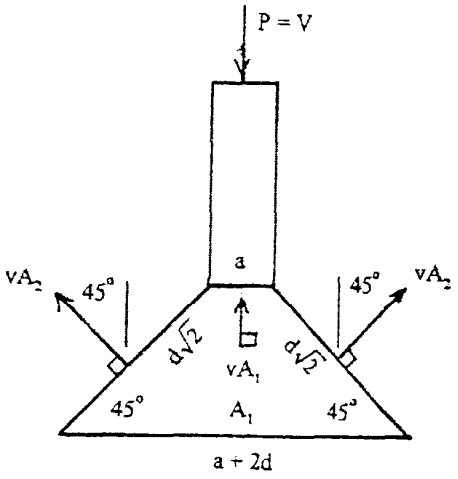
เป็นสูตรหาหน่วยแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ (punching shear stress, v_p)



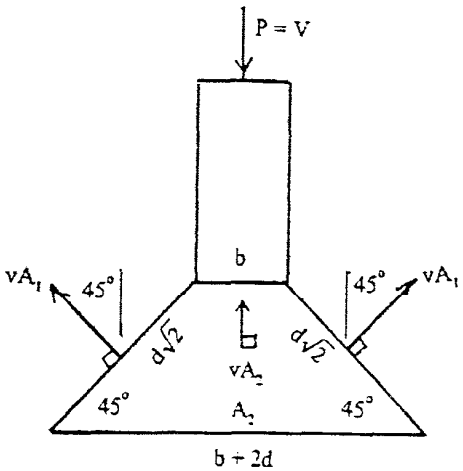
รูปที่ 6.31 ลักษณะแรงเฉือนและแรงดึงทแยงในฐานราก



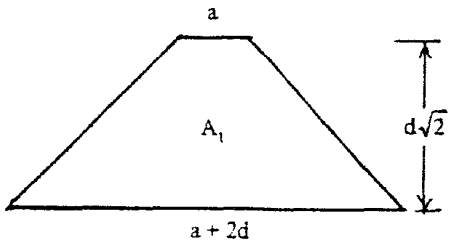
การแตกแบบเจาะทะลุ



มองแนว (1)

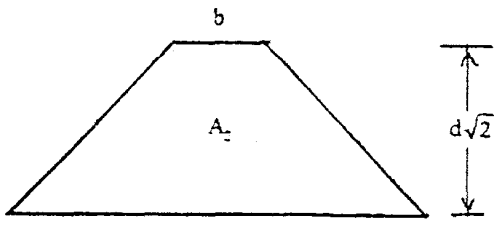


มองแนว (2)



$$A_1 = \frac{1}{2} d\sqrt{2}\,(a + a + 2d)$$

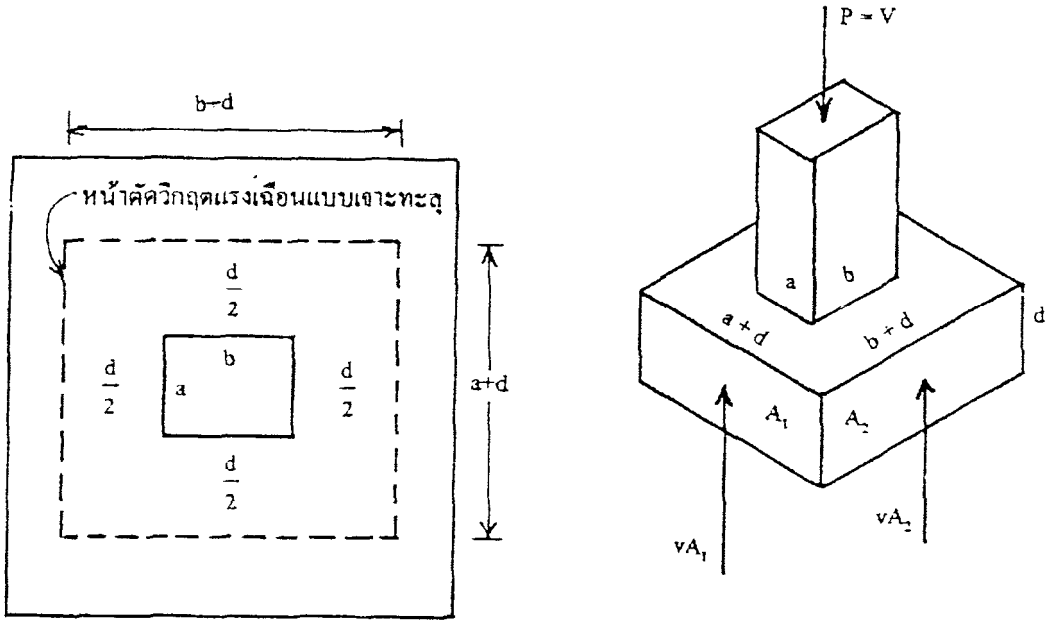
$$A_1 = d\sqrt{2}\,(a+d)$$



$$A_2 = \frac{1}{2} d\sqrt{2}\,(b + b + 2d)$$

$$A_2 = d\sqrt{2}\,(b+d)$$

รูปที่ 6.32 การพิจารณาการวิบัติของฐานรากจากแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ



รูปที่ 6.33 แบบจำลองหน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุ

หากพิจารณารูปที่ 6.33 ถ้าตัดฐานรากรอบตอม่อโดยให้ห่างจากขอบตอม่อระยะ $\frac{d}{2}$ เมื่อเจาะมาดูจะเห็นเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่ง

$$\left[\sum F_y = 0\right] \qquad V = vA_1 + vA_1 + vA_2 + vA_2 = 2v(A_1 + A_2)$$

แต่ $A_1 = d(a+d)$ และ $A_2 = d(b+d)$ แทนค่าในสมการสมดุล

$$V = 2v[d(a+d) + d(b+d)]$$

$$V = 2vd(a+b+2d)$$

แทน v ด้วย v_p และจัดรูปสมการ

$$v_p = \frac{V}{[2(a+b+2d)]d} = \frac{V}{b_o d} = \frac{V}{A_{vp}}$$

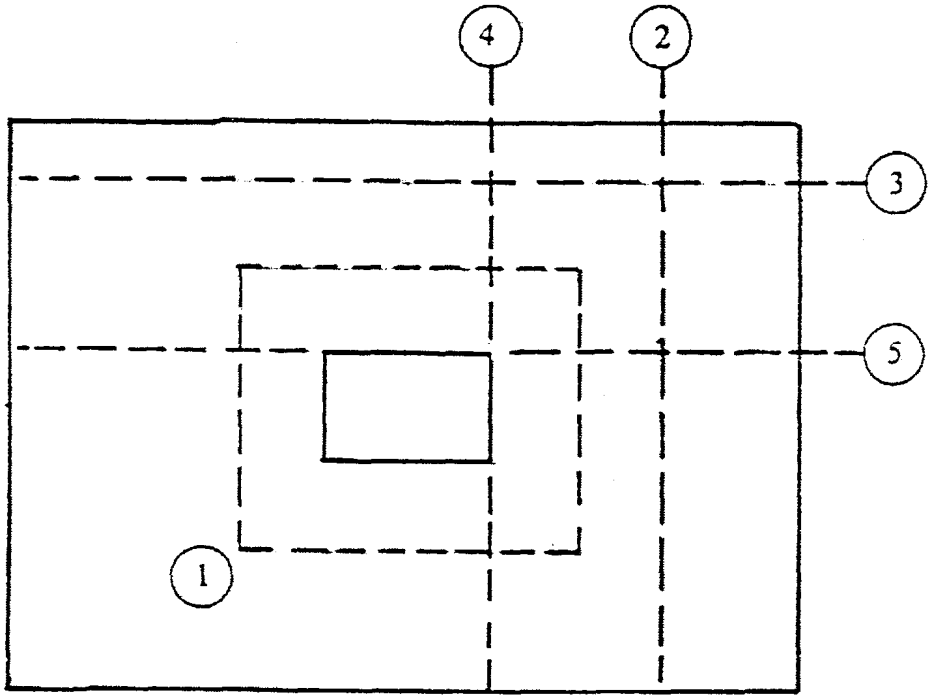
จะเห็นว่าเหมือนที่พิสูจน์ตอนแรก ดังนั้น ***หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบเจาะทะลุจะอยู่ห่างจากขอบตอม่อเป็นระยะ $\frac{d}{2}$ โดยรอบ และแรงเฉือน V จะหาจากแรงต้านของดินหรือเสาเข็มนอกหน้าตัดวิกฤต***

รูปที่ 6.34 แสดงหน้าตัดวิกฤตแบบต่างๆ ประกอบไปด้วย

(1) = หน้าตัดวิกฤตแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ ห่างขอบตอม่อ $\frac{d}{2}$

(2),(3) = หน้าตัดวิกฤตแรงเฉือนแบบคาน ห่างขอบตอม่อระยะ d

(4),(5) = หน้าตัดวิกฤตแรงดัดและระยะฝังยึด อยู่ตรงขอบตอม่อ



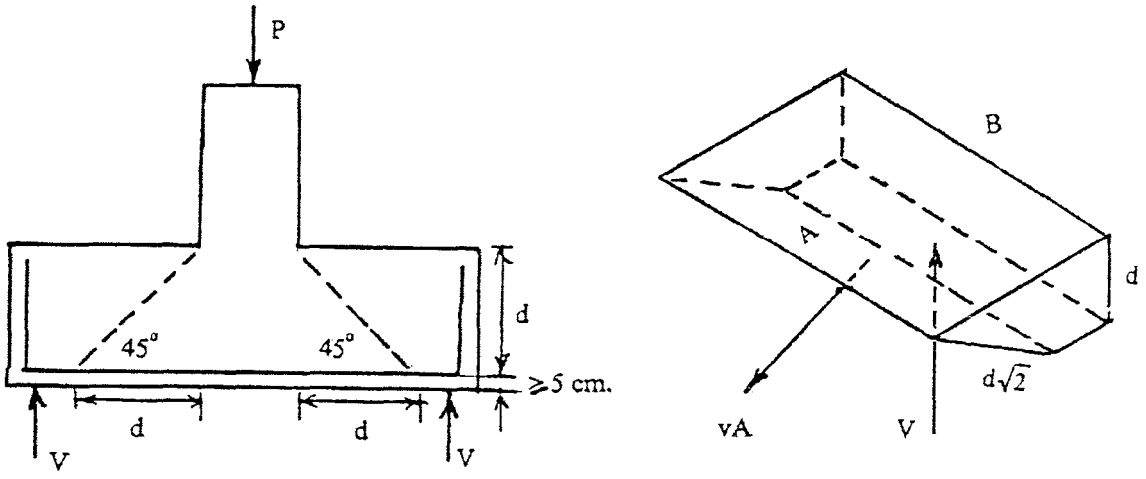
รูปที่ 6.34 แบบจำลองหน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุ

เมื่อพิจารณาจากการแตกแบบแรงเฉือนแบบคาน สมดุลของแรงในแนวดิ่ง

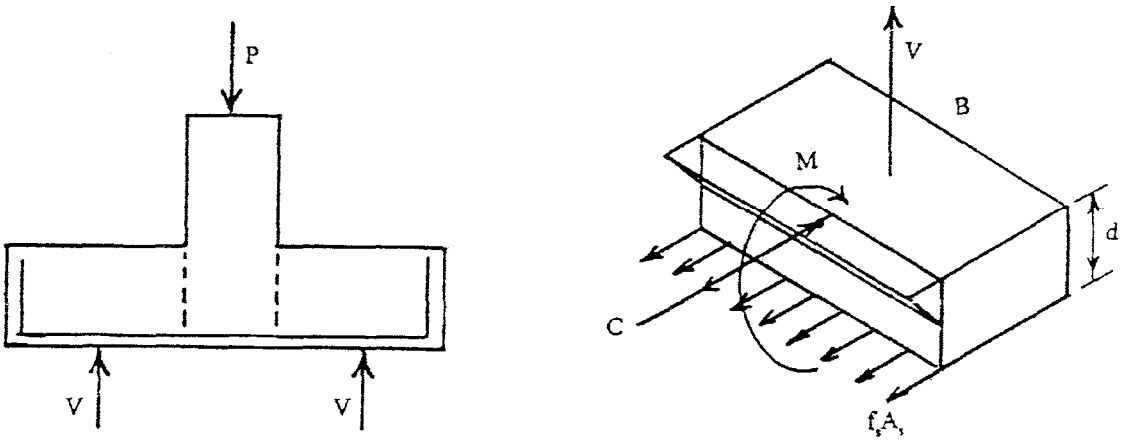
$$\left[\sum F_y = 0\right] \qquad V = vA\cos 45^\circ = vBd\sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = vBd$$

เมื่อแทน v ด้วย v_b จะได้

$$v_b = \frac{V}{Bd}$$



รูปที่ 6.35 ลักษณะการแตกเนื่องจากแรงเฉือนแบบคาน



รูปที่ 6.36 ลักษณะการหักเนื่องจากแรงดัดที่ขอบตอม่อ

รูปที่ 6.36 เป็นหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงดัดและฝังยึดเหล็กเสริม

ในการออกแบบฐานราก ในขั้นแรกจะต้องประมาณขนาดฐานรากแผ่บนดินแน่น หรือจำนวนเสาเข็ม และจัดวางเสาเข็มและขนาดรูปร่างแปลนฐานราก จากนั้นจะต้องหาแรงดัดแรงเฉือน ตรวจสอบค่าไม่ให้เกินกว่าค่าที่ยอมให้ หาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง (ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงอัดในฐานราก) หาระยะฝังยึด การหาค่าข้างต้นต้องพิจารณาที่ตำแหน่งวิกฤตของแรงนั้นๆ ดังนี้

หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงดัดและระยะฝังยึดเหล็กเสริม

1. หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ขอบของเสา ตอม่อ หรือกำแพง สำหรับฐานรากที่รองรับเสาตอม่อ หรือกำแพงคอนกรีต

2. หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขอบและศูนย์กลางของกำแพง สำหรับฐานรากที่รองรับกำแพงอิฐ

3. หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขอบของเสา หรือตอม่อ กับขอบของแผ่นเหล็กรองใต้เสา สำหรับฐานรากที่รองรับเสาโดยใช้แผ่นเหล็ก

หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือน

แรงเฉือนแบบคาน (beam shear) หน้าตัดวิกฤตห่างขอบของตอม่อ หรือกำแพง ออกไปเท่ากับความลึกประสิทธิผล d แต่ถ้ามีแผ่นเหล็กรองใต้เสาให้วัดระยะจากกึ่งกลางระหว่างขอบเสากับขอบแผ่นเหล็กออกไประยะ d หากความกว้างของหน้าตัดวิกฤตเป็น B เนื้อที่รับแรงเฉือนแบบคานคือ

$$A_v = Bd$$

แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ (punching shear) หน้าตัดวิกฤตห่างจากขอบตอม่อเท่ากับ $\frac{d}{2}$ โดยรอบ ถ้าตอม่อขนาด a กับ b เนื้อที่หน้าตัดรับแรงเฉือนคือ

$$A_v = 2d(a+d)+2d(b+d)$$
$$A_v = 2d(a+b+2d)$$

ถ้าตอม่อเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง a เนื้อที่หน้าตัดรับแรงเฉือนคือ

$$A_v = \pi(a+d)d$$

แรงเฉือนจากเสาเข็ม ขึ้นกับระยะห่างจากหน้าตัดวิกฤต ดังนี้

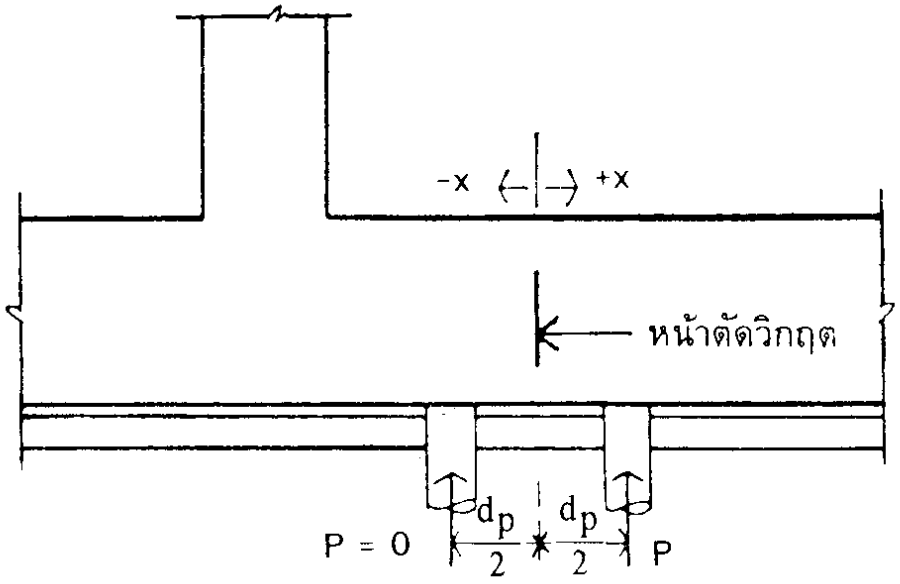
ให้ P = แรงต้านเฉลี่ยของเสาเข็ม, kg

P' = แรงเฉือนจากเสาเข็ม, kg

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มหรือด้านแคบของเสาเข็ม, cm

x = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงหน้าตัดวิกฤต, cm

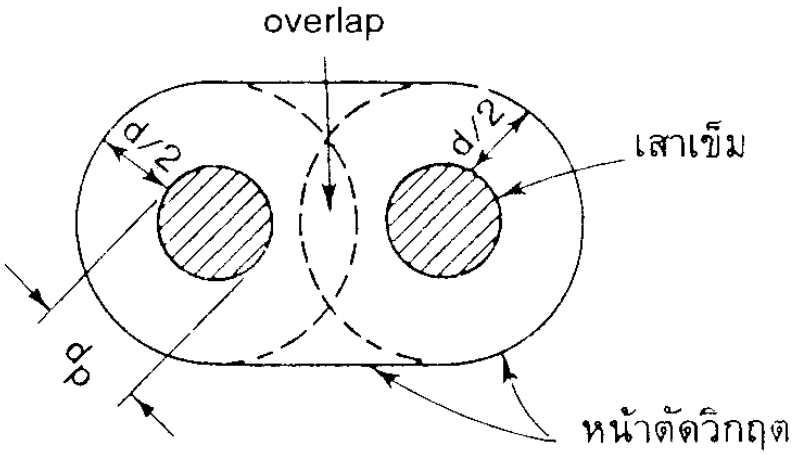
ถ้าเสาเข็มอยู่ระหว่างตอม่อกับหน้าตัดวิกฤต x เป็น – ถ้าเสาเข็มเลยหน้าตัดวิกฤตออกไปทางขอบฐานราก x เป็น + ดังรูปที่ 6.37



รูปที่ 6.37 แรงจากเสาเข็มกับแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤต

$$P' = P\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{d_p}\right) \le P$$

ในบางกรณีที่อาจจะเกิดการเฉือนเจาะทะลุรอบหัวเสาเข็มได้ และหากเสาเข็มใกล้กันมาก หน้าตัดวิกฤตการเจาะทะลุอาจจะเกยกันดังรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 หน้าตัดวิกฤตรอบเสาเข็มที่ชิดกัน

6.9 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตในฐานราก

การออกแบบฐานรากวิธีหน่วยแรงใช้งานนั้น ต้องให้คอนกรีตรับแรงเฉือนทั้งหมดไว้

$$V \le V_c$$

เมื่อ V เป็นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง, kg

V_c เป็นกำลังรับแรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ ,kg

การออกแบบฐานรากนิยมให้คอนกรีตเป็นผู้รับแรงเฉือนทั้งหมด เพื่อให้ความหนาของฐานรากมีมากพอจนไม่แอ่นโค้งมากเกินไป ที่จะทำให้การกระจายแรงลงดินหรือเสาเข็มไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าฐานรากหนาเกิน 0.25 เมตรขึ้นไปจะออกแบบให้มีเหล็กรับแรงเฉือนด้วยได้ ลักษณะเหล็กรับแรงเฉือนในฐานรากมักจะเป็นเหล็กคอม้า หรือปีกนกที่กำลังยกขึ้นบิน ในที่นี้แนะนำให้คอนกรีตเป็นผู้รับแรงเฉือนทั้งหมดไป ดังนั้น

แรงเฉือนแบบคาน (beam shear) หรือ***แรงเฉือนทางเดียว (one-way action)***

แรงเฉือนแบบคานที่รับได้ $V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, b_w d$

แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ (punching shear) หรือ***แรงเฉือนสองทาง (two-way action)***

หน่วยแรงเฉือนแบบเจาะทะลุที่รับได้ $V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d$

f_c' = กำลังคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก, cm

b_w = ความกว้างฐานรากด้านรับแรงเฉือนแบบคาน, cm

b_o = เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุ, cm

$b_o = 2(a+d)+2(b+d) = 2(a+b+2d)$ สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$b_o = \pi(a+d)$ สำหรับเสาหน้าตัดกลม

a = ด้านสั้นของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสากลม, cm

b = ด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

6.10 การเสริมเหล็กรับแรงดัดในฐานราก

การเสริมเหล็กรับแรงดัดในฐานราก ให้ดำเนินการดังนี้

1. *ฐานรากรับแรงทางเดียว* เช่นฐานรากบนเสาเข็มสองต้น ต้องเสริมเหล็กให้มีปริมาณเพียงพอในการรับแรงดัดและมีระยะฝังยึดเพียงพอ กระจายเหล็กสม่ำเสมอตลอดความกว้างของฐานราก ทั้งนี้ต้องให้ระยะหุ้มเพียงพอด้วย ส่วนเหล็กด้านที่ไม่รับแรงดัดให้ใช้เหล็กกันร้าว คือ

เหล็ก SR-24 $A_{s,temp} = 0.0025bh$

เหล็ก SD-30 $A_{s,temp} = 0.0020bh$

เหล็ก SD-40 $A_{s,temp} = 0.0018bh$

โดยที่ b เป็นความกว้างของฐานรากในทิศทางที่จะหาเหล็กกันร้าว (มักเป็นด้านยาวของฐานราก) และ h เป็นความหนาฐานราก (ไม่ใช่ความลึกประสิทธิผล d)

2. *ฐานรากรับแรงสองทาง* เช่นฐานแผ่บนดินแน่น ฐานรากบนเสาเข็มตั้งแต่ 3 ต้นขึ้นไป ต้องเสริมเหล็กในแต่ละทิศทางให้สามารถต้านทานแรงดัดและระยะฝังยึดเพียงพอ กระจายเหล็กสม่ำเสมอตลอดความกว้างโดยคำนึงถึงระยะหุ้มด้วย

3. *ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสรับแรงสองทาง* ต้องเสริมเหล็กทั้งสองทางในปริมาณที่เท่ากัน แม้ว่าตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้ปริมาณเหล็กต่างกัน ให้เลือกค่ามากเป็นเกณฑ์ในการเสริมทั้งสองทาง เหล็กต้องต้านแรงดัดและมีระยะฝังยึดพอเพียง

4. ฐานรากแปลนสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงกระทำสองทาง เหล็กเสริมขนานขอบยาวให้จัดเรียงสม่ำเสมอเต็มความกว้างโดยระยะหุ้มพอเพียง ส่วนเหล็กเสริมขนานขอบสั้นให้กระจายเรียงถี่ในบริเวณแถบกลาง ที่เหลือเรียงห่างในบริเวณแถบริม

จากรูปที่ 6.39 แสดงการกระจายของเหล็กเสริมในฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งต้องดำเนินการดังนี้

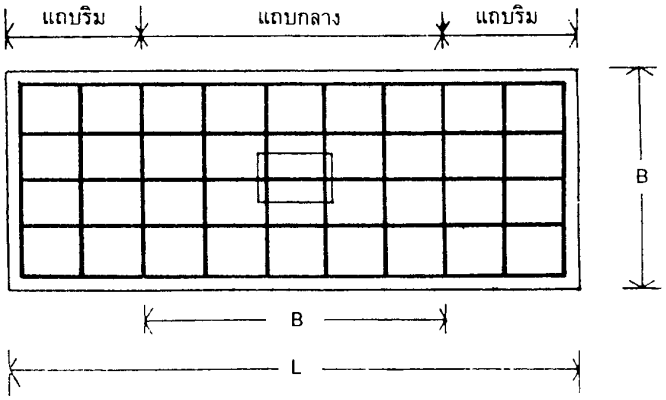
ให้ A_{SB} เป็นเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมขนานขอบสั้นที่คำนวณได้ ,cm^2

B เป็นความกว้างของฐานราก และเป็นความยาวของแถบกลาง, m

L เป็นความยาวของฐานราก, m

$\beta = \frac{L}{B}$ อัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของฐานราก

$A_{SB,Mid} = \frac{2}{\beta+1}A_{SB} = \frac{2B}{L+B}A_{SB}$ ปริมาณเหล็กเสริมในแถบกลาง, cm^2



รูปที่ 6.39 การกระจายเหล็กเสริมในฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า

` แต่เพื่อความสะดวกทั้งในการเขียนแบบ การก่อสร้างที่นิยมเรียงเหล็กให้ห่างสม่ำเสมอ หากเพิ่มเหล็กเสริมแถบริมให้เรียงเท่ากันกับแถบกลาง จะต้องเพิ่มเหล็กเสริมขนานขอบสั้นให้มากขึ้นเป็น

$$A_{SB,New} = \frac{L}{B}A_{SB,Mid} = \frac{2\beta}{\beta+1}A_{SB} = \frac{2L}{L+B}A_{SB}$$

นำ $A_{SB,New}$ มาจัดเรียงระยะห่างเท่าๆ กันบนด้านยาวของฐานราก

6.11 การถ่ายแรงจากเสาตอม่อ หรือผนังกำแพง สู่ฐานราก

การถ่ายแรงอัดและแรงดัดจากเสาตอม่อ หรือผนังกำแพงลงสู่ฐานรากจะอาศัยแรงแบกทาน (bearing) ของคอนกรีตทั้งส่วนที่ถ่ายแรงลง และส่วนที่รองรับคือคอนกรีตฐานราก รวมทั้งเหล็กยืนในเสา หรือเหล็กเดือย (dowel bars) การคำนวณออกแบบจะต้องใช้วิธีกำลัง ซึ่งอาจจะประมาณแรงกดอัดเพิ่มค่าอยู่ที่ 1.6 เท่าของแรงกดอัดใช้งาน

ในการก่อสร้างจริงนั้น จะเทคอนกรีตฐานรากก่อนโดยโผล่เหล็กยืนในเสาหรือโผล่เหล็กเดือยไว้ จากนั้นจึงจะประกอบแบบเสาและเทคอนกรีต ดังนั้นกำลังคอนกรีตในฐานรากกับในเสาอาจจะไม่เท่ากัน

ให้ P = แรงกดอัดจากตอม่อลงบนฐานราก, kg (ประมาณ 1.6 เท่าของแรงกดอัดใช้งาน)

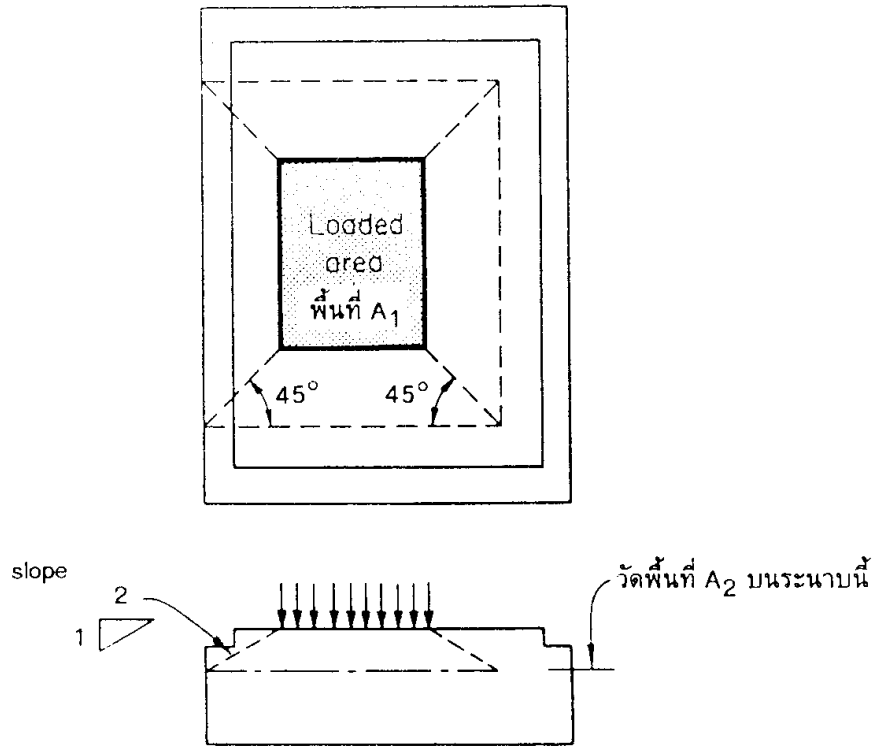
f'_{cc} = กำลังประลัยของคอนกรีตในเสาตอม่อ, ksc

f'_{cf} = กำลังประลัยของคอนกรีตในฐานราก, ksc

A_1 = เนื้อที่หน้าตัดเสาตอม่อที่ทำหน้าที่รับแรงแบกทาน, cm^2

A_2 = เนื้อที่บนระนาบที่ขยายจาก A_1 อัตรา 2 : 1 จนชนขอบที่ใกล้สุด ดูรูปที่ 6.10

$\phi = 0.70$ = ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงแบกทาน



รูปที่ 6.40 แสดงการคำนวณแรงกดอัดบนฐานราก

ดังนั้นหน่วยแรงแบกทานในเสาตอม่อ

$$\frac{P}{A_1} \le 0.85\phi f'_{cc}$$

หน่วยแรงแบกทานในฐานราก

$$\frac{P}{A_1} \le 0.85\phi f'_{cf}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 1.70\phi f'_{cf}$$

ในกรณีที่ฐานรากกว้างมากจนแนวเอียง 2 : 1 ไม่ตัดขอบดิ่งของฐานรากเลย ให้หาค่า A_2 ที่ระดับความลึกประสิทธิผล d ซึ่งเป็นบริเวณเหล็กเสริมรับแรงดัดอยู่นั่นเอง

หากพบว่าหน่วยแรงแบกทานเกินกว่าที่คอนกรีตจะรับได้ หรือมีแรงดึงจากแรงดัดเกิดขึ้น ให้คิดผลของเหล็กยืนหรือเหล็กเดือย ระยะฝังที่เหล็กยืนหรือเหล็กเดือยวัดจากขอบบนฐานรากลงไปต้องไม่น้อยกว่าระยะฝังยึดของเหล็กเสริมนั้น กล่าวคือ ให้เลือกค่ามากจากสามค่าต่อไปนี้

$$\ell_d = 0.075 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}}$$

$$\ell_d \geq 0.0043 f_y d_b$$

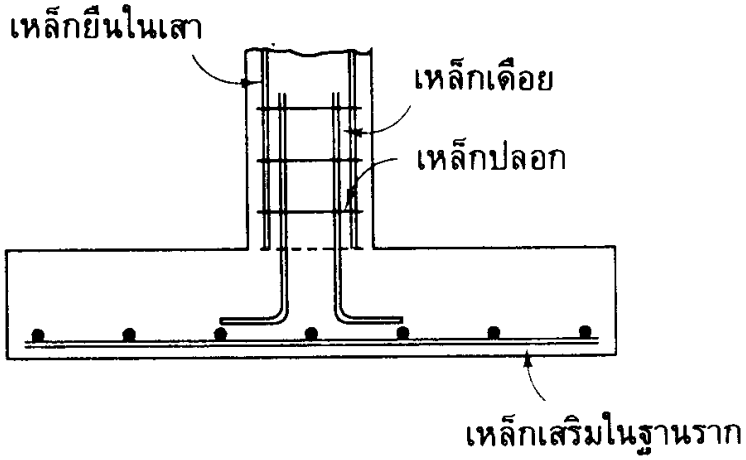
$$\ell_d \geq 20 \text{ cm}$$

เมื่อ ℓ_d = ระยะฝังยึดเหล็กเสริม, cm

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืนหรือเหล็กเดือย, cm

f_y = กำลังครากของเหล็กยืนหรือเหล็กเดือย, ksc

f_c' = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานของฐานรากหรือเสา โดยเลือกค่าที่น้อยกว่า



รูปที่ 6.41 เหล็กเดือยในฐานราก

เหล็กยืนในเสาตอม่อหรือเหล็กเดือยในฐานรากที่ยื่นเข้าไปในเสาตอม่อ ต้องมีค่าดังนี้

1. จำนวนไม่น้อยกว่า 4 เส้น ขนาดไม่เล็กกว่า 12 mm
2. เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเดือยไม่น้อยกว่า 0.005 เท่าของหน้าตัดเสา
3. ขนาดของเหล็กเดือยโตกว่าเหล็กยืนในเสาตอม่อไม่เกิน 3 mm
4. ระยะทาบระหว่างเหล็กยืนในเสาตอม่อกับเหล็กเดือยไม่น้อยกว่าระยะฝังยึดที่คิดจากเหล็กที่โตกว่า กล่าวคือ

$$\ell_d = 0.007 f_y d_b$$

$$\ell_d \geq 30 \text{ cm}$$

$$f_y \leq 4000 \text{ ksc}$$

$$f_c' \geq 210 \text{ ksc}$$

ในทางปฏิบัตินั้นนิยมฝังเหล็กยืนหรือเหล็กเดือยจนถึงเหล็กเสริมรับแรงดัดด้านล่างฐานราก แล้วแผ่ออกไม่น้อยกว่า 12 เท่าของขนาดเหล็ก ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เหล็กยืนหรือเหล็กเดือยถอนหลุดจากคอนกรีตฐานรากหากมีแรงดึงเกิดขึ้น

6.12 คอนกรีตหยาบก้นหลุมฐานราก

เมื่อขุดดินจนถึงระดับที่ต้องการแล้ว ถ้าเป็นฐานรากบนดินแน่น การเตรียมดินใต้ฐานรากให้แน่นเป็นเรื่องสำคัญมาก ใส่ลูกรังหรืออิฐหักหรือหินย่อย หนา 10-15 cm กระทุ้งให้แน่น ทับด้วยทรายหยาบประมาณ 10 cm กระทุ้งให้แน่น แล้วจึงทับด้วยคอนกรีตหยาบหนาประมาณ 5-10 cm สำหรับฐานรากบนเสาเข็ม ไม่จำเป็นต้องลงลูกรังหรืออิฐหักหรือหินย่อย ให้ลงทรายหยาบกระทุ้งให้แน่น เททับด้วยคอนกรีตหยาบหนาประมาณ 5-10 cm

คอนกรีตหยาบ (Lean concrete) มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หิน ประมาณ 1:3:5 หน้าที่ของคอนกรีตหยาบคือป้องกันความสกปรกจากก้นหลุมไม่ให้โดนเหล็กเสริม และมีความแข็งพอที่จะหนุนเหล็กเสริมเอาไว้โดยใช้ลูกปูนทำจากปูนทรายหนา 7.5-10 cm ตามระยะหุ้มว่าบริเวณกัดกร่อนน้อยให้ใช้ 7.5 cm ถ้ากัดกร่อนมาก เช่นริมทะเล ใช้ 10 cm วางเหล็กเสริมฐานราก เหล็กเดือยหรือเหล็กตอม่อและค้ำยึดให้อยู่ในตำแหน่ง ทำแบบข้างฐานราก อุดรอยรั่วระหว่างแบบข้างกับคอนกรีตหยาบแล้วจึงเทคอนกรีตฐานรากต่อไป สังเกตว่าการวางเหล็กยืนหรือเหล็กเดือยติดเหล็กฐานรากจะทำงานง่าย

6.13 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากบนดินแน่น

การออกแบบฐานรากรองรับกำแพงหรือเสาตอม่อโดยวางฐานรากบนดินแน่นตามวิธีหน่วยแรงใช้งาน มีลำดับขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

f_c' = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานที่อายุ 28 วัน , ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

q_a = กำลังต้านทานปลอดภัยของดิน, kg/m^2

DL = น้ำหนักบรรทุกคงที่ลงตอม่อ, kg

LL = น้ำหนักบรรทุกจรลงตอม่อ, kg

P = DL + LL = น้ำหนักบรรทุกรวมลงตอม่อ, kg

a = ความยาวขอบสั้นของเสาตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

b = ความยาวขอบยาวของเสาตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

$f_c = 0.45f_c'$ ตาม วสท. หรือ $f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc ตามกฎกระทรวงฯ = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y \le 1{,}700$ ksc = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \text{อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นเหล็กต่อคอนกรีต}$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \text{พารามิเตอร์แกนสะเทิน}$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = \text{พารามิเตอร์แขนโมเมนต์}$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \text{พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล, ksc}$$

$$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'} = \text{หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ , ksc}$$

$$v_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'} = \text{หน่วยแรงเฉือนเจาะทะลุที่ยอมให้ , ksc}$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานรากและดินถม 0.15-0.30 เท่าของน้ำหนักที่ลงตอม่อ คือคูณน้ำหนักลงตอม่อด้วย 1.15 ถึง 1.30 จากนั้นหาเนื้อที่ฐานรากที่ต้องการ เช่น

$$A_{req} = \frac{1.3P}{q_a}$$

ค่า A_{req} เป็นตารางเมตร ประมาณขนาดแปลนฐานรากให้มีเนื้อที่ A มากกว่า A_{req} จากนั้นหาหน่วยแรงดันขึ้นสุทธิของดิน

$$q = \frac{P}{A}$$

เมื่อ $q =$ หน่วยแรงดันขึ้นสุทธิของดิน, kg/m^2

B = ความยาวขอบสั้นของฐานราก, m

L = ความยาวขอบยาวของฐานราก, m

$A = BL =$ เนื้อที่ฐานราก, m^2

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณแรงเฉือน V_4, V_5 และแรงดัด M_4, M_5 เนื่องจากแรงดันสุทธิตรงหน้าตัดวิกฤตแรงดัดและระยะยึดฝังซึ่งอยู่ตรงขอบตอม่อทั้งสองทิศทาง เช่น

$$V_4 = qB\left(\frac{L-a}{2}\right)$$

$$M_4 = qB\left(\frac{L-a}{2}\right)\left(\frac{L-a}{4}\right) = qB\frac{(L-a)^2}{8}$$

$$V_5 = qL\left(\frac{B-b}{2}\right)$$

$$M_5 = qL\left(\frac{B-b}{2}\right)\left(\frac{B-b}{4}\right) = qL\frac{(B-b)^2}{8}$$

หาความลึกประสิทธิผลจากผลของโมเมนต์

$$d_4 = \sqrt{\frac{M_4}{RB}}$$
$$d_5 = \sqrt{\frac{M_5}{RL}}$$

เลือกค่ามากและเพิ่มค่าขึ้นอีกให้สามารถรับแรงเฉือนได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_p = V_1 = q[BL - (a+d)(b+d)]$$
$$b_o = 2(a+d) + 2(b+d) = 2(a+b+2d)$$
$$v_p = \frac{V_p}{b_o d}$$

ตรวจสอบถ้าพบว่า $v_p > v_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}$ แสดงว่าค่า d น้อยเกินไปให้เพิ่มค่า d จนกว่า $v_p \le 0.53\sqrt{f_c'}$ ค่า d เป็นค่าที่จะใช้คำนวณต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

$$V_{b2} = qB\left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2} - d\right)$$
$$v_{b2} = \frac{V_{b2}}{Bd} = \frac{q}{d}\left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2} - d\right) \le 0.29\sqrt{f_c'}$$
$$V_{b3} = qL\left(\frac{B}{2} - \frac{b}{2} - d\right)$$
$$v_{b3} = \frac{V_{b3}}{Ld} = \frac{q}{d}\left(\frac{B}{2} - \frac{b}{2} - d\right) \le 0.29\sqrt{f_c'}$$

ถ้าพบ $v_{b2} > 0.29\sqrt{f_c'}$ หรือ $v_{b3} > 0.29\sqrt{f_c'}$ ให้เพิ่มค่า d และคำนวณจนกว่า $v_{b2} < 0.29\sqrt{f_c'}$ และต้องให้ $v_{b3} < 0.29\sqrt{f_c'}$ โดยปกติถ้าทดสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุผ่านแล้ว แรงเฉือนแบบคานผ่านเสมอ ยกเว้นกรณีที่ฐานรากเรียวยาวมากจะวิบัติแบบคานมากกว่าแบบเจาะทะลุ

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบแรงต้านเฉลี่ยของดินว่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้

หาน้ำหนักจริงของตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมกับน้ำหนักลงตอม่อ หารด้วยเนื้อที่ฐานรากต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้

$$q = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{BL} \le q_a$$

เมื่อ $q =$ หน่วยแรงดันขึ้นของดินที่เกิดขึ้นจริง, kg/m^2

$q_a =$ หน่วยแรงต้านทานของดินที่ยอมให้, kg/m^2

B = ความกว้างของฐานราก, m

L = ความยาวของฐานราก, m

a = ความกว้างของตอม่อขนานขอบยาวของฐานราก, m

b = ความยาวของตอม่อขนานขอบสั้นของฐานราก, m

d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก, m

H = ความลึกของท้องฐานรากวัดจากระดับดิน, m

H_F = ความหนาของฐานราก (ไม่รวมคอนกรีตหยาบ), m

$H_P = H\text{-}H_F$ = ความยาวของตอม่อและความหนาของดินถม, m

P = น้ำหนักจากโครงสร้างด้านบนถ่ายลงตอม่อ, kg

$W_F = 2400BLH_F =$ น้ำหนักของฐานราก, kg

$W_p = 2400abH_p =$ น้ำหนักของตอม่อ, kg

$W_{BF} = 1690H_p(BL - ab) =$ น้ำหนักดินถม, kg

ถ้าตรวจสอบพบว่า $q > q_a$ ให้ปรับค่าของ B และ L เช่นอาจจะเพิ่มค่าขึ้นอีกอย่างละ 10 cm ย้อนไปตรวจสอบค่า q จากขั้นตอนที่ 2 มาใหม่

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณเหล็กเสริม จากขั้นตอนที่ 3 ทราบค่าของ V_4, M_4, V_5, M_5 ให้ประมาณขนาดเหล็กเสริมที่ต้องใช้ d_b คำนวณหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยว u

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 35 \text{ ksc}$$

เหล็กเสริมขนานขอบยาวของฐานราก

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} \quad cm^4$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} \quad cm$$

เหล็กเสริมขนานขอบสั้นของฐานราก

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} \quad cm^2$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} \quad cm$$

เหล็กแต่ละเส้นมีเนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$ และเส้นรอบรูป $\sum O_1 = \pi d_b$ หาจำนวนเส้นที่ต้องใช้ในแต่ละทิศทางโดยการคำนวณและปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มแล้วเลือกค่ามาก

เหล็กขนาดขอบยาว เลือกจากค่ามากของผลการคำนวณที่ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม

$$N_{41} = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} \text{ กับ } N_{42} = \frac{\sum O_4}{\sum O_1}$$

เหล็กขนานขอบสั้น เลือกจากค่ามากของผลการคำนวณที่ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม

$$N_{51} = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} \text{ กับ } N_{52} = \frac{\sum O_5}{\sum O_1}$$

สำหรับเหล็กขนานขอบสั้นให้ปรับจำนวนเส้นมากขึ้นโดยคูณด้วย $\frac{2L}{L+B}$

ขั้นตอนที่ 8 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 6.6 จงออกแบบฐานรากตื้นวางบนดินแข็งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับน้ำหนักบรรทุกใช้งานจากตอม่อ โดยเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ 120 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจร 80 ตัน ขนาดของเสาตอม่อ $0.40 \times 0.60 \text{ m}^2$ ท้องฐานรากวางอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 2.00 เมตร จากผิวดินเดิม กำลังต้านทานที่ยอมให้ 10 ตัน/ตารางเมตร $f_c' = 210 \text{ ksc}, f_y = 3000 \text{ ksc}$

วิธีทำ

การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c' = 210 \text{ ksc} =$ กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานที่อายุ 28 วัน

$f_y = 3{,}000 \text{ ksc} =$ กำลังครากของเหล็กเสริม

$q_a = 10{,}000 \text{ kg/m}^2 =$ กำลังต้านทานปลอดภัยของดิน

$DL = 120{,}000 \text{ kg}$ น้ำหนักบรรทุกคงที่ลงตอม่อ

$LL = 80{,}000 \text{ kg}$ น้ำหนักบรรทุกจรลงตอม่อ

$P = DL + LL = 120{,}000 + 80{,}000 = 200{,}000 \text{ kg}$ น้ำหนักบรรทุกรวมลงตอม่อ

$a = 40 \text{ cm}$ ความยาวขอบสั้นของเสาตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$b = 60$ cm ความยาวขอบยาวของเสาตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$f_c = 0.45f_c' = 0.45 \times 210 = 94.5$ ksc ตาม วสท. หรือ $f_c = 0.375f_c' \le 65$ ksc ตามกฎกระทรวงฯ = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{210}} = 9.32$$ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นเหล็กต่อคอนกรีต

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{9.32 \times 94.5}} = 0.37$$ พารามิเตอร์แกนสะเทิน

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.37}{3} = 0.877$$ พารามิเตอร์แขนโมเมนต์

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2} \times 94.5 \times 0.37 \times 0.877 = 15.332$$ ksc พารามิเตอร์โมเมนต์สมดุล

$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{210} = 4.202$ ksc หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้

$v_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{210} = 7.68$ ksc หน่วยแรงเฉือนเจาะทะลุที่ยอมให้

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานรากและดินถม 0.15-0.30 เท่าของน้ำหนักที่ลงตอม่อ คือคูณน้ำหนักลงตอม่อด้วย 1.15 ถึง 1.30 จากนั้นหาเนื้อที่ฐานรากที่ต้องการ เช่น

$$A_{req} = \frac{1.3P}{q_a} = \frac{1.3 \times 200{,}000}{10{,}000} = 26 \text{ m}^2$$

ค่า A_{req} เป็นตารางเมตร ประมาณขนาดแปลนฐานรากให้มีเนื้อที่ A มากกว่า A_{req} จากนั้นหาหน่วยแรงดันขึ้นสุทธิของดิน

สมมติให้ฐานรากกว้าง 5.75 เมตร ยาว 6.00 เมตร เนื้อที่ฐานราก

$$A = BL = 5.75 \times 6.00 = 34.5 \text{ m}^2 > 26 \text{ m}^2$$

$$q = \frac{P}{A} = \frac{200{,}000}{34.5} = 5{,}797.1 \text{ kg/m}^2$$

เมื่อ q = หน่วยแรงดันขึ้นสุทธิของดิน, kg/m^2

B = ความยาวขอบสั้นของฐานราก, m

L = ความยาวขอบยาวของฐานราก, m

$A = BL$ = เนื้อที่ฐานราก, m^2

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณแรงเฉือน V_4, V_5 และแรงดัด M_4, M_5 เนื่องจากแรงดันสุทธิตรงหน้าตัดวิกฤตแรงดัดและระยะยึดฝังซึ่งอยู่ตรงขอบตอม่อทั้งสองทิศทาง เช่น

$$V_4 = qB\left(\frac{L-a}{2}\right) = 5,797.1\times 5.75\left(\frac{6.00-0.40}{2}\right) = 93,333.33 \text{ kg}$$
$$M_4 = qB\frac{(L-a)^2}{8} = 5,797.1\times 5.75\times\frac{(6.00-0.40)^2}{8} = 130,666.634 \text{ kg}\cdot\text{m}$$
$$V_5 = qL\left(\frac{B-b}{2}\right) = 5,797.1\times 6.00\times\left(\frac{5.75-0.60}{2}\right) = 89,565.195 \text{ kg}$$
$$M_5 = qL\frac{(B-b)^2}{8} = 5,797.1\times 6.00\times\frac{(5.75-0.60)^2}{8} = 115,315.1886 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

หาความลึกประสิทธิผลจากผลของโมเมนต์

$$d_4 = \sqrt{\frac{M_4}{RB}} = \sqrt{\frac{130,666.634\times 100}{15.332\times 575}} = 38.5 \text{ cm}$$
$$d_5 = \sqrt{\frac{M_5}{RL}} = \sqrt{\frac{115,315.1886\times 100}{15.332\times 600}} = 35.4 \text{ cm}$$

เลือกค่ามากคือ 38.5 cm ให้ความหนาฐานราก $H_F = 1.00$ m ระยะหุ้มของคอนกรีต 10 cm ขนาดเหล็ก DB 25 mm หรือ $d_b = 2.5$ cm ดังนั้นความลึกประสิทธิผล

$$d = 100 - 10 - 2.5 - \frac{2.5}{2} = 86.25 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_p = V_1 = q[BL - (a+d)(b+d)]$$
$$V_p = 5,797.1\times[5.75\times 6.00 - (0.40+0.8625)(0.60+0.8625)]$$
$$V_p = 189,296.1483 \text{ kg}$$
$$b_o = 2(a+d)+2(b+d) = 2(a+b+2d)$$
$$b_o = 2\times(40+60+2\times 89.25)$$
$$b_o = 557 \text{ m}$$
$$v_p = \frac{V_p}{b_o d} = \frac{189,296.1483}{557\times 86.25} = 3.94 \text{ ksc} < v_{cp} = 7.68 \text{ ksc}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

$$V_{b2} = qB\left(\frac{L}{2}-\frac{a}{2}-d\right) = 5,797.1\times 5.75\times\left(\frac{6.00}{2}-\frac{0.40}{2}-0.8625\right)$$
$$V_{b2} = 64,583.31719 \text{ kg}$$
$$v_{b2} = \frac{V_{b2}}{Bd} = \frac{64,583.31719}{575\times 86.25} = 1.302 \text{ ksc} < v_{cb} = 4.202 \text{ ksc}$$

$$V_{b3} = qL\left(\frac{B}{2} - \frac{b}{2} - d\right) = 5{,}797.1 \times 6.00 \times \left(\frac{5.75}{2} - \frac{0.60}{2} - 0.8625\right)$$

$$V_{b3} = 59{,}565.2025 \text{ kg}$$

$$v_{b3} = \frac{V_{b3}}{Ld} = \frac{59{,}565.2025}{600 \times 86.25} = 1.151 \text{ ksc} < v_{cb} = 4.202 \text{ ksc}$$

ฐานรากหนาเพียงพอที่จะรับแรงเฉือนทั้งแบบเจาะทะลุและแบบคาน

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบแรงต้านเฉลี่ยของดินว่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้

หาน้ำหนักจริงของตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมกับน้ำหนักลงตอม่อ หารด้วยเนื้อที่ฐานรากต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้

$$q = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{BL} \le q_a$$

เมื่อ $q =$ หน่วยแรงดันขึ้นของดินที่เกิดขึ้นจริง, kg/m^2

$q_a = 10{,}000 \text{ kg/m}^2$ หน่วยแรงต้านทานของดินที่ยอมให้

$B = 5.75 \text{ m}$ = ความกว้างของฐานราก

$L = 6.00 \text{ m}$ = ความยาวของฐานราก

$a = 0.40 \text{ m}$ = ความกว้างของตอม่อขนานขอบยาวของฐานราก

$b = 0.60 \text{ m}$ = ความยาวของตอม่อขนานขอบสั้นของฐานราก

$d = 0.8625 \text{ m}$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

$H = 2.00 \text{ m}$ = ความลึกของท้องฐานรากวัดจากระดับดิน

$H_F = 1.00 \text{ m}$ = ความหนาของฐานราก (ไม่รวมคอนกรีตหยาบ)

$H_p = 2.00 - 1.00 = 1.00 \text{ m}$ = ความยาวของตอม่อและความหนาของดินถม

$P = 200{,}000 \text{ kg}$ = น้ำหนักจากโครงสร้างด้านบนถ่ายลงตอม่อ

$W_F = 2400BLH_F = 2400 \times 5.75 \times 6.00 \times 1.00 = 82{,}800 \text{ kg}$ น้ำหนักฐานราก

$W_p = 2400abH_p = 2{,}400 \times 0.40 \times 0.60 \times 1.00 = 576 \text{ kg}$ น้ำหนักของตอม่อ

$W_{BF} = 1690H_p(BL - ab) = 1{,}690 \times 1.00 \times (5.75 \times 6.00 - 0.40 \times 0.60) = 57{,}899.4 \text{ kg}$ น้ำหนักดินถม

$$q = \frac{200{,}000 + 82{,}800 + 576 + 57{,}899.4}{5.75 \times 6.00} = 9{,}892.04 \text{ kg/m}^2 < q_a$$

แรงต้านของดินไม่เกิน $10{,}000 \text{ kg/m}^2$ ปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 7 หาปริมาณเหล็กเสริม จากขั้นตอนที่ 3 ทราบค่าของ V_4, M_4, V_5, M_5 ให้ประมาณขนาดเหล็กเสริมที่ต้องใช้ d_b คำนวณหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยว u

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 35 \text{ ksc}$$

$V_4 = 93{,}333.33 \text{ kg}$
$M_4 = 13{,}066{,}663.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$
$V_5 = 89{,}565.195 \text{ kg}$
$M_5 = 11{,}531{,}518.86 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

เลือกใช้เหล็ก DB 25 mm มี

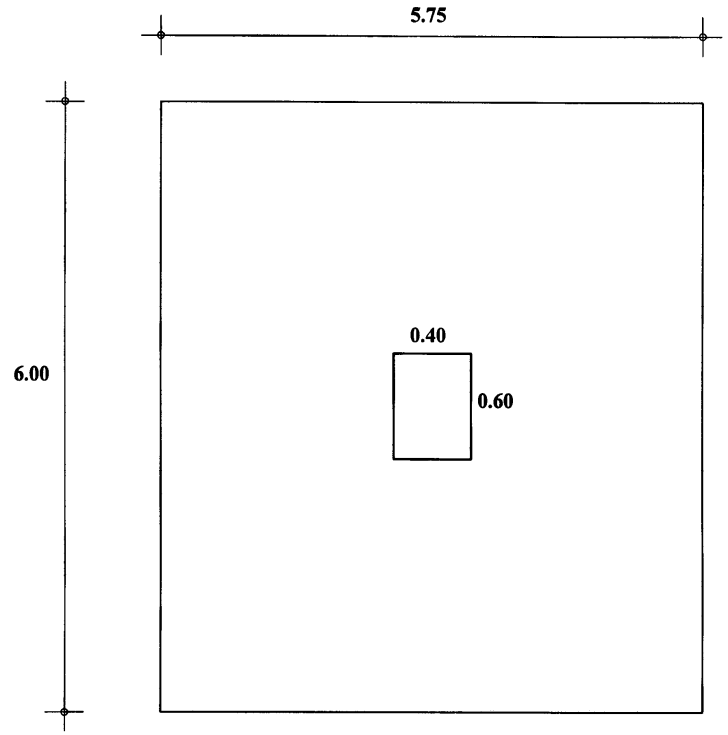
$$u = 3.23\times\frac{\sqrt{210}}{2.5} = 18.723 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$
$$A_{s1} = \frac{\pi}{4}\times 2.5^2 = 4.909 \text{ cm}^2$$
$$\sum O_1 = \pi\times 2.5 = 7.854 \text{ cm}$$
$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{13{,}066{,}663.4}{1{,}500\times 0.877\times 86.25} = 115.163 \text{ cm}^2$$
$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{93{,}333.33}{18.723\times 0.877\times 86.25} = 65.903 \text{ cm}$$
$$N_{41} = \frac{115.163}{4.909} = 23.46 \Rightarrow 24 \text{ bars}$$
$$N_{42} = \frac{65.903}{7.854} = 8.39 \Rightarrow 9 \text{ bars}$$
$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{11{,}531{,}518.86}{1{,}500\times 0.877\times 86.25} = 101.633 \text{ cm}^2$$
$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{89{,}565.195}{18.723\times 0.877\times 86.25} = 63.242 \text{ cm}$$
$$N_{51} = \frac{101.633}{4.909} = 20.7 \Rightarrow 21 \text{ bars}$$
$$N_{52} = \frac{63.242}{7.854} = 8.05 \Rightarrow 9 \text{ bars}$$

เหล็กขนานขอบสั้น ต้องปรับจำนวนเส้น

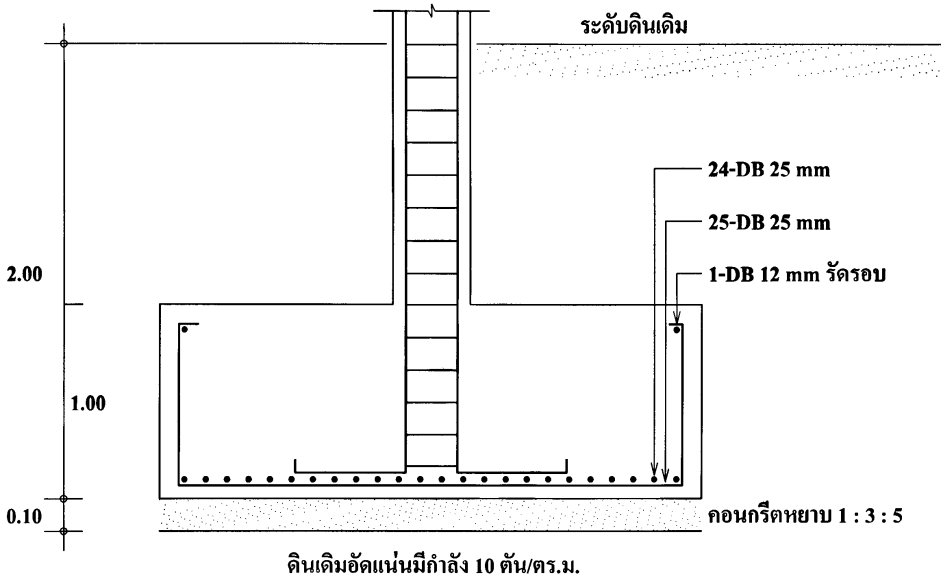
$$N_5 = \frac{2L}{L+B}N_{51} = \frac{2\times 6.00}{6.00+5.75}\times 21 = 21.45 \Rightarrow 22 \text{ เส้น ใช้จริง 25-DB 25 mm}$$

เหล็กขนานขอบยาว ใช้ตามที่คำนวณได้คือ 24-DB 25 mm

ขั้นตอนที่ 8 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กในหน้าถัดไป



F-10 PLAN



F-10 SECTION

FOOTING F-10

รูปที่ 6.42 รายละเอียดฐานรากบนดินแน่นตามตัวอย่างที่ 6.10

ตัวอย่างที่ 6.7 ให้ตรวจสอบการถ่ายแรงระหว่างเสากับฐานรากในตัวอย่างที่ 6.6 จากนั้นพิจารณาการใช้เหล็กเดือย เสาตอม่อขนาด $0.40\times0.60\ m^2$ รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 120 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 80 ตัน ฐานรากขนาด $5.75\times6.00\times1.00\ m^3$ ความลึกประสิทธิผล d = 0.90 m กำลังคอนกรีตทั้งเสาและฐานรากที่ใช้จริง $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ตรวจสอบแรงแบกทานที่เสา

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า

$$P_u = 1.4DL + 1.7LL$$
$$P_u = 1.4\times120{,}000 + 1.7\times80{,}000$$
$$P_u = 304{,}000\ kg$$

เนื้อที่หน้าตัดเสารับแรงกด

$$A_1 = ab = 40\times60 = 2400\ cm^2$$

กำลังรับน้ำหนักของเสา

$$\phi P_{nb} = 0.85\phi f_c^{'} A_1$$
$$\phi P_{nb} = 0.85\times0.70\times240\times2400$$
$$\phi P_{nb} = 342{,}720\ kg > P_u = 304{,}000\ kg$$

แสดงว่าคอนกรีตเสารับแรงแบกทานได้

ตรวจสอบแรงแบกทานที่ฐานราก

จากขอบของตอม่อลากลงไป 1 ส่วนถึงเหล็กเสริม ลึก d = 0.90 m แล้วลากออกไปทางขอบฐานรากยาว 2 ส่วน คือ $2\times0.90 = 1.80$ m ทางด้านขอบสั้น ระยะจากขอบตอม่อถึงขอบฐานรากยาว

$$= \frac{A-a}{2} = \frac{5.75-0.40}{2} = 2.675\ m > 1.80\ m$$

แสดงว่าพื้นที่ A_2 อยู่ตรงเหล็กเสริมฐานราก เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง $a + 2d = 0.40 + 2\times0.9 = 2.20$ m ยาว $b + 2d = 0.60 + 2\times0.90 = 2.40$ m ดังนั้น

$$A_1 = 40\times60 = 2400\ cm^2$$
$$A_2 = 220\times240 = 52{,}800\ cm^2$$

หน่วยแรงแบกทานในฐานรากคือ

$$f_{bF} = 0.85f_c'\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 1.70f_c'$$

$$f_{bF} = 0.85f_c'\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = 0.85\times 240\sqrt{\frac{52{,}800}{2400}} = 956.84 \text{ ksc}$$

$$f_{bF} = 1.70f_c' = 1.70\times 240 = 408 \text{ ksc} < 956.84 \text{ ksc}$$

ดังนั้นใช้ $f_{bF} = 408$ ksc

กำลังรับแรงแบกทานของฐานราก

$$\phi P_{nb} = \phi f_{bF} A_1$$
$$\phi P_{nb} = 0.70\times 408\times 2400$$
$$\phi P_{nb} = 685{,}440 \text{ kg} > P_u = 304{,}000 \text{ kg}$$

แสดงว่าการถ่ายแรงระหว่างเสาตอม่อกับฐานรากผ่านคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย

ในกรณีที่ต้องฝังเหล็กเดือยในฐานรากแล้วฝังเข้าไปในเสาตอม่อ จะต้องหาระยะฝังในฐานราก และระยะที่ต้องทาบกับเหล็กในเสา

ปริมาณเหล็กเดือยไม่น้อยกว่า 0.005 ของหน้าตัดเสา ขนาดไม่เล็กกว่า 12 mm และไม่น้อยกว่า 4 เส้น

$$A_{s,min} = 0.005A_1 = 0.005\times 2400 = 12 \text{ cm}^2$$

ปริมาณเหล็กเสริมในเสารับน้ำหนักตามแนวแกน

$$P_u = 0.56\left[0.85f_c'A_g + f_yA_{st}\right]$$
$$304{,}000 = 0.56\left[0.85\times 240\times 2400 + 3000A_{st}\right]$$
$$A_{st} = \frac{1}{3000}\left[\frac{304{,}000}{0.56} - 0.85\times 240\times 2400\right] = 17.75 \text{ cm}^2$$
$$\min A_{st} = 0.01A_g = 0.01\times 2400 = 24 \text{ cm}^2$$

วิศวกรผู้ออกแบบใช้ 14-DB 25 mm เพื่อให้ระยะห่างระหว่างเส้นเหล็กยืนไม่เกิน 15 cm และให้ถือว่าเหล็กยืนเป็นเหล็กเดือย

$$A_{st} = 14\times 4.909 = 68.726 \text{ cm}^2 > 12 \text{ cm}^2$$

หาระยะฝังในฐานราก

$$\ell_d = 0.075d_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.075\times 2.5\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 36.3 \text{ cm} < d = 86.25 \text{ cm}$$

หาระยะทาบระหว่างเหล็กเดือยกับเหล็กเสา เป็นกรณีที่โผล่เหล็กเดือยเหนือผิวบนฐานรากแล้วจึงเสริมเหล็กเสาโดยการทาบ

$$\ell_d = 0.075 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.075 \times 2.5 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 36.3 \text{ cm}$$
$$\ell_d = 0.007 f_y d_b = 0.007 \times 3000 \times 2.5 = 52.5 \text{ cm}$$

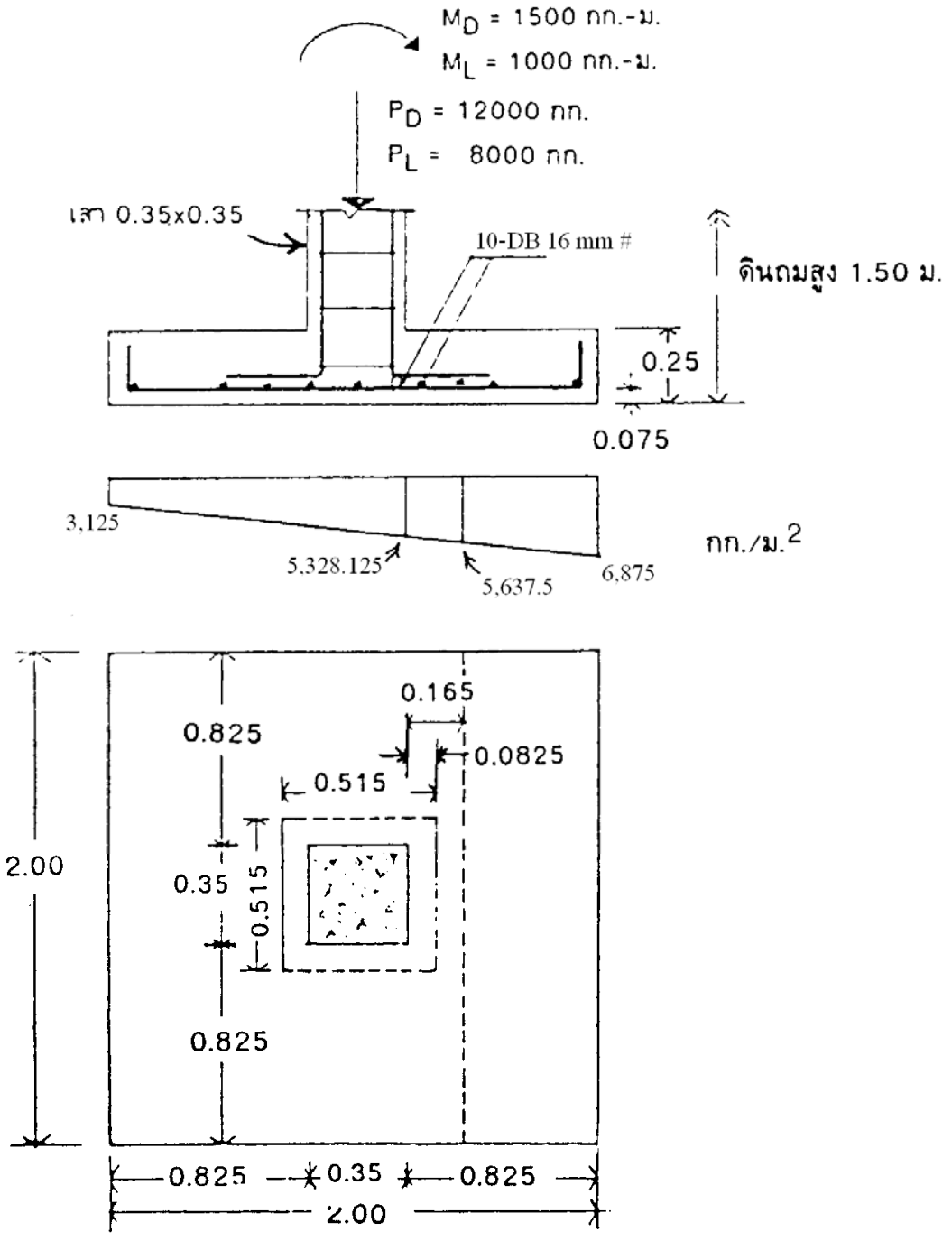
ค่ามากคือ 52.5 cm และ $f_c' = 240 \text{ ksc} > 210 \text{ ksc}$ จึงไม่ต้องเพิ่มค่ามากขึ้นอีก 1 ในสาม ใช้ระยะทาบในเสา $\ell_d = 55 \text{ cm}$

ตัวอย่างที่ 6.8 จงออกแบบฐานรากแผ่รับน้ำหนักใช้งานตามแนวแกน DL = 12,000 kg และ LL = 8,000 kg และแรงดัดใช้งาน M_D = 1,500 kg.m และ M_L = 1,000 kg.m หน่วยแรงแบกทานของดินที่ยอมให้ 10,000 kg/m^2 ให้ $f_c' = 200$ ksc, และ $f_y = 3000$ ksc ท้องฐานรากลึก 1.50 m เสาขนาด $0.35 \times 0.35 \text{ m}^2$

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c' = 200 \text{ ksc}$
$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 200 = 75 \Rightarrow 65 \text{ ksc}$
$f_y = 3000 \text{ ksc}$
$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3000 = 1500 \text{ ksc}$
$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{200}} = 9.55$$
$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n f_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1500}{9.55 \times 65}} = 0.293$$
$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.293}{3} = 0.902$$
$$R = \frac{1}{2} f_c k j = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.293 \times 0.902 = 8.59 \text{ ksc}$$
$DL = 12{,}000 \text{ kg}$
$LL = 8{,}000 \text{ kg}$
$P = DL + LL = 12{,}000 + 8{,}000 = 20{,}000 \text{ kg}$
$M_D = 1{,}500 \text{ kg.m}$
$M_L = 1{,}000 \text{ kg.m}$
$M = M_D + M_L = 1{,}500 + 1{,}000 = 2{,}500 \text{ kg.m}$
$a = b = 0.35 \text{ m} = 35 \text{ cm}$
$q_a = 10{,}000 \text{ kg/m}^2$



ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักของตอม่อ ฐานราก ดินถม ประมาณ 20% ของน้ำหนักตามแกน

$$A_{req} = \frac{1.20P}{q_a} = \frac{1.20 \times 20{,}000}{10{,}000} = 2.4 \text{ m}^2$$

แต่เนื่องจากฐานรากต้องรับแรงดัดด้วยจึงต้องเผื่อให้มากขึ้นไปอีก

ใช้ฐานรากขนาด 2.00×2.00 m^2

$B = L = 2.00$ m $= 200$ cm

ตรวจสอบแรงดันดินโดยใช้แรงตามแนวแกนที่เผื่อ 20% แล้ว

หน่วยแรงดันดินด้านมาก

$$q_{max} = \frac{1.20P}{BL} + \frac{6M}{BL^2}$$

$$q_{max} = \frac{1.20 \times 20{,}000}{2.00 \times 2.00} + \frac{6 \times 2{,}500}{2.00 \times 2.00^2}$$

$$q_{max} = 7{,}875 \text{ kg/m}^2 < 10{,}000 \text{ kg/m}^2$$

ขั้นตอนที่ 3 หาหน่วยแรงดันขึ้นสุทธิจากน้ำหนักบรรทุก

$$P = DL + LL = 12{,}000 + 8{,}000 = 20{,}000 \text{ kg}$$

$$M = M_D + M_L = 1{,}500 + 1{,}000 = 2{,}500 \text{ kg.m}$$

หน่วยแรงดันสุทธิข้างมาก

$$q_{max} = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{BL^2}$$

$$q_{max} = \frac{20{,}000}{2.00 \times 2.00} + \frac{6 \times 2{,}500}{2.00 \times 2.00^2}$$

$$q_{max} = 6{,}875 \text{ kg/m}^2$$

หน่วยแรงดันสุทธิข้างน้อย

$$q_{min} = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{BL^2}$$

$$q_{min} = \frac{20{,}000}{2.00 \times 2.00} - \frac{6 \times 2{,}500}{2.00 \times 2.00^2}$$

$$q_{min} = 3{,}125 \text{ kg/m}^2$$

ระยะจากขอบตอม่อถึงขอบฐานราก $= \frac{2.00 - 0.35}{2} = 0.825$ m และห่างอีกขอบ เป็นระยะ $= 2.00 - 0.825 = 1.175$ m หาหน่วยแรงดันดินที่ขอบตอม่อข้างมากโดยใช้สามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{q_4 - 3{,}125}{1.175} = \frac{6{,}875 - 3{,}125}{2.00}$$

$$q_4 = 3{,}125 + \frac{1.175}{2.00}(6{,}875 - 3{,}125)$$

$$q_4 = 5{,}328.125 \text{ kg/m}^2$$

ขั้นตอนที่ 4 ประมาณความหนาฐานรากจากแรงดัดที่ขอบเสา

$$V_4 = \bar{q}B\left(\frac{L-a}{2}\right) = q_4 B\left(\frac{L-a}{2}\right) + \frac{q_{max} - q_4}{2} B\left(\frac{L-a}{2}\right)$$

$$V_4 = 5{,}328.125 \times 2.00 \times \frac{2.00 - 0.35}{2} + \frac{6{,}875 - 5{,}328.125}{2} \times 2.00 \times \frac{2.00 - 0.35}{2}$$

$$V_4 = 8{,}791.40625 + 1{,}276.171875$$

$$V_4 = 10{,}067.57813 \text{ kg}$$

$$M_4 = q_4 B\left(\frac{L-a}{2}\right)\left(\frac{L-a}{4}\right) + \frac{q_{max}-q_4}{2} B\left(\frac{L-a}{2}\right)\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{L-a}{2}\right)$$

$$M_4 = 8{,}791.40625 \times \left(\frac{2.00-0.35}{4}\right) + 1{,}276.171875 \times \frac{2}{3} \times \left(\frac{2.00-0.35}{2}\right)$$

$$M_4 = 3{,}626.455078 + 701.8945313$$

$$M_4 = 4{,}328.349609 \ \text{kg.m}$$

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{4{,}328.349609 \times 100}{8.59 \times 200}} = 15.87 \ \text{cm}$$

เลือกฐานรากหนา 0.25 เมตร ใช้เหล็ก DB 20 mm. ระยะหุ้ม 7.5 cm ได้ความลึกประสิทธิผลดังนี้

$$d = 25 - 7.5 - \frac{2.0}{2} = 16.5 \ \text{cm} = 0.165 \ \text{m}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

หน่วยแรงดันขึ้นเฉลี่ยที่ศูนย์กลางตอม่อ หาได้จากสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{q-3{,}125}{1.00} = \frac{6{,}875-3{,}125}{2.00}$$

$$q = 3{,}125 + \frac{1.00}{2.00}(6{,}875-3{,}125)$$

$$q = 5{,}000 \ \text{kg/m}^2$$

หน้าตัดวิกฤตห่างจากขอบตอม่อ $= \frac{d}{2} = \frac{0.165}{2} = 0.0825$ m เมื่อดูที่แปลนฐานราก จะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 0.35 + 0.0825 = 0.4325 m.

แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = q(BL - 0.4325 \times 0.4325)$$

$$V_p = 5{,}000 \times (2.00 \times 2.00 - 0.4325 \times 0.4325)$$

$$V_p = 19{,}064.71875 \ \text{kg}$$

เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 4 \times 43.25 = 173 \ \text{cm}$$

หากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f'_c}\, b_o d = 0.53\sqrt{200} \times 173 \times 16.5 = 21{,}395.42485 \ \text{kg} > V_p = 19{,}064.71875 \ \text{kg}$$

แสดงว่ารับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤตห่างจากขอบตอม่อเท่ากับความลึกประสิทธิผล d = 0.165 m ห่างจากด้านที่มีหน่วยแรงอัดน้อยกว่าเป็นระยะ 0.825 + 0.35 + 0.165 = 1.34 cm หาหน่วยแรงดันดินด้วยสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{q-3{,}125}{1.34} = \frac{6{,}875-3{,}125}{2.00}$$

$$q = 3{,}125 + \frac{1.34}{2.00}(6{,}875-3{,}125)$$

$$q = 5{,}637.5 \ \text{kg/m}^2$$

พื้นที่รับแรงดันดินกว้าง 0.825 – 0.165 = 0.66 m ยาว 2.00 m ดังนั้นแรงเฉือนแบบคาน

$$V_{b2} = \frac{5,637.5 + 6,875}{2} \times 0.66 \times 2.00 = 8,258.25 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{c2} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd$$
$$V_{c2} = 0.29\sqrt{200} \times 200 \times 16.5$$
$$V_{c2} = 13,534.02379 \text{ kg} > V_{b2} = 8,258.25 \text{ kg OK}$$

แสดงว่ารับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบแรงต้านเฉลี่ยของดิน

ฐานรากหนา 0.25 เมตร เสาตอม่อยาว 1.50 – 0.25 = 1.25 m. = ความหนาดินถม

$$W_F = 2400BLH_F = 2400 \times 2.00 \times 2.00 \times 0.25 = 2,400 \text{ kg}$$
$$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.35 \times 0.35 \times 1.25 = 367.5 \text{ kg}$$
$$W_{BF} = 1690(BL - ab) = 1690 \times (2.00 \times 2.00 - 0.35 \times 0.35)$$
$$W_{BF} = 6,552.975 \text{ kg}$$
$$q = \frac{P + W_F + W_p + W_{BF}}{BL} + \frac{6M}{BL^2}$$
$$q = \frac{20,000 + 2,400 + 367.5 + 6,552.975}{2.00 \times 2.00} + \frac{6 \times 2,500}{2.00 \times 2.00^2}$$
$$q = 9,205.12 \text{ kg/m} < 10,000 \text{ kg/m}^2$$

ขั้นตอนที่ 8 หาปริมาณเหล็กเสริม

$$V_4 = 10,067.578135 \text{ kg}$$
$$M_4 = 4,328.349609 \text{ kg.m}$$
$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{432,834.9609}{1,500 \times 0.902 \times 16.5} = 19.39 \text{ cm}^2$$

เลือกใช้เหล็ก DB 16 mm. มี $A_b = 2.01 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 5.03 \text{ cm}$ จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{19.39}{2.01} = 9.6 \Rightarrow 10 \text{ เส้น}$$
$$u = 2.29\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 2.29\frac{\sqrt{200}}{1.6} = 20.24 \text{ ksc} < 25 \text{ ksc}$$
$$\sum O = \frac{V}{ujd} = \frac{10,067.578135}{20.24 \times 0.902 \times 16.5} = 33.421 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

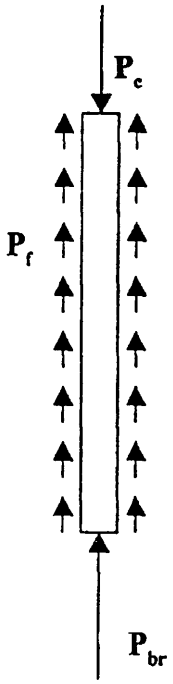
$$N_2 = \frac{33.421}{5.03} = 6.64 \Rightarrow 7 \text{ เส้น}$$

ใช้ #10 DB 16 mm

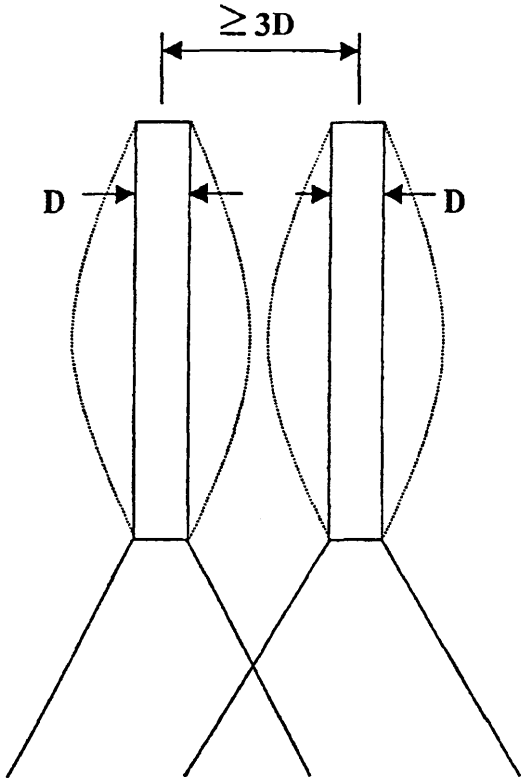
ขั้นตอนที่ 9 เขียนรายละเอียดฐานรากดังแสดงในตอนแรก

6.14 ลักษณะการรับแรงของเสาเข็ม

เสาเข็ม รับน้ำหนักจากฐานรากแล้วถ่ายลงดินในรูปของแรงเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม และแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มซึ่งจิกลงในชั้นดินแข็งหรือชั้นหิน ดังรูปที่ 70



รูปที่ 6.43 การรับน้ำหนักของเสาเข็ม



รูปที่ 6.44 การจัดระยะห่างระหว่างเสาเข็มกลุ่ม

พิจารณารูปที่ 6.43

$$P_c = P_f + P_{br}$$

เมื่อ P_c = กำลังของเสาเข็ม, ตัน

P_f = กำลังจากความเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม, ตัน

P_{br} = กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม, ตัน

ถ้า $P_f > P_{br}$ เรียกว่า เสาเข็มแรงเสียดทาน (friction pile)

ถ้า $P_{br} > P_f$ เรียกว่า เสาเข็มแรงแบกทาน (bearing pile)

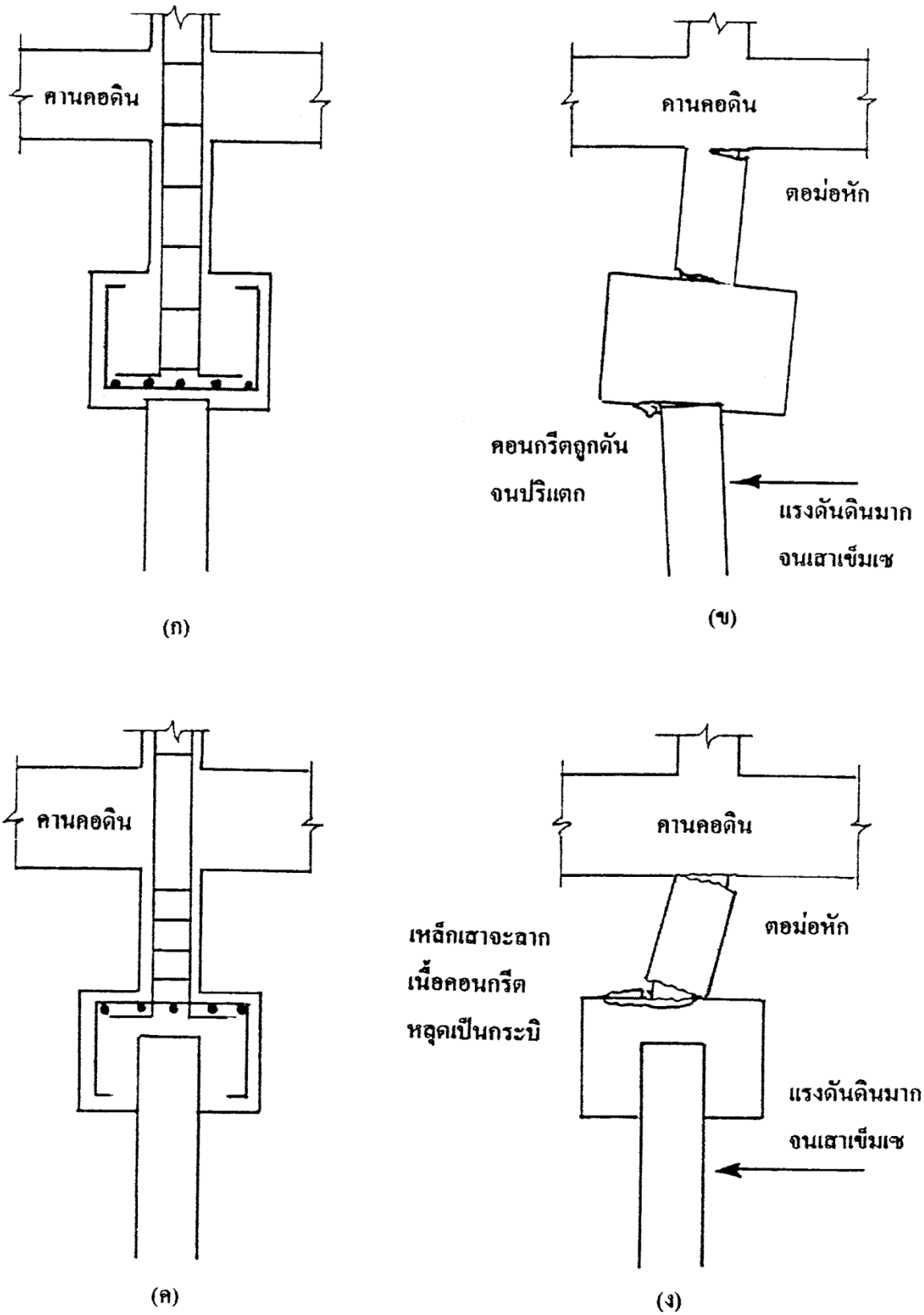
จากรูปที่ 6.44 แสดงการวางตำแหน่งเสาเข็มกลุ่มโดยจัดให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็มที่ใกล้กันนั้นไม่น้อยกว่า 1.5-3 เท่าของขนาดเสาเข็ม แนะนำว่าให้ใช้ระยะห่าง 3 เท่าของขนาดเสาเข็ม ระยะห่างน้อยกว่า 3 เท่าก็ควรใช้ในกรณีจำเป็นจริงๆ เท่านั้น การที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มมากพอจะมีผลให้กำลังของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มรับน้ำหนักได้เต็มที่ กล่าวคือในส่วนของความเสียดทาน รอบๆ ผิวของเสาเข็มจะมีกระเปาะความเสียดทานรอบๆ ผิวเสมือนมีดินเกาะอยู่รอบๆ เสาเข็ม ถ้าระยะห่างระหว่างเสาเข็มมากพอ กระเปาะความเสียดทานจะไม่เกยกัน แต่ถ้าห่างกันน้อยเกินไป กระเปาะความเสียดทานจะเกยเข้าหากันทำให้ดินบริเวณนั้นรับแรงเสียดทานเป็นสองเท่าของส่วนที่ไม่เกยและอาจจะวิบัติได้

ส่วนที่สองของรูปที่ 6.44 ที่ควรพิจารณาคือแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มแต่ละต้น เป็นแรงที่เหลือจากแรงเสียดทานรอบเสาเข็มแล้ว เนื้อที่ดินบริเวณปลายเสาเข็มจะเท่ากับเนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็มแล้วบานออก มุมการบานจะประมาณค่า ϕ ของดินใต้ปลายเสาเข็ม ยิ่งลึกลงไปเนื้อที่จะยิ่งมาก เอาไปหารแรงแบกทานก็จะเหลือน้อยลง แนวการบานนี้เมื่อถึงความลึกที่สามารถคำนวณได้จากระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับมุม ϕ ก็จะเกิดการเกยกัน หน่วยแรงแบกทานก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของส่วนที่ไม่เกยกันทันที แต่หากระยะห่างมากพอ หน่วยแรงแบกทานส่วนที่เกยกันซึ่งลดน้อยลงแล้วแม้ว่าจะเพิ่มเป็นสองเท่าก็ยังไม่เกินกว่าหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม การวิบัติจากแรงเสียดทานก็จะไม่เกิดขึ้น

6.15. การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น (Pile cap)

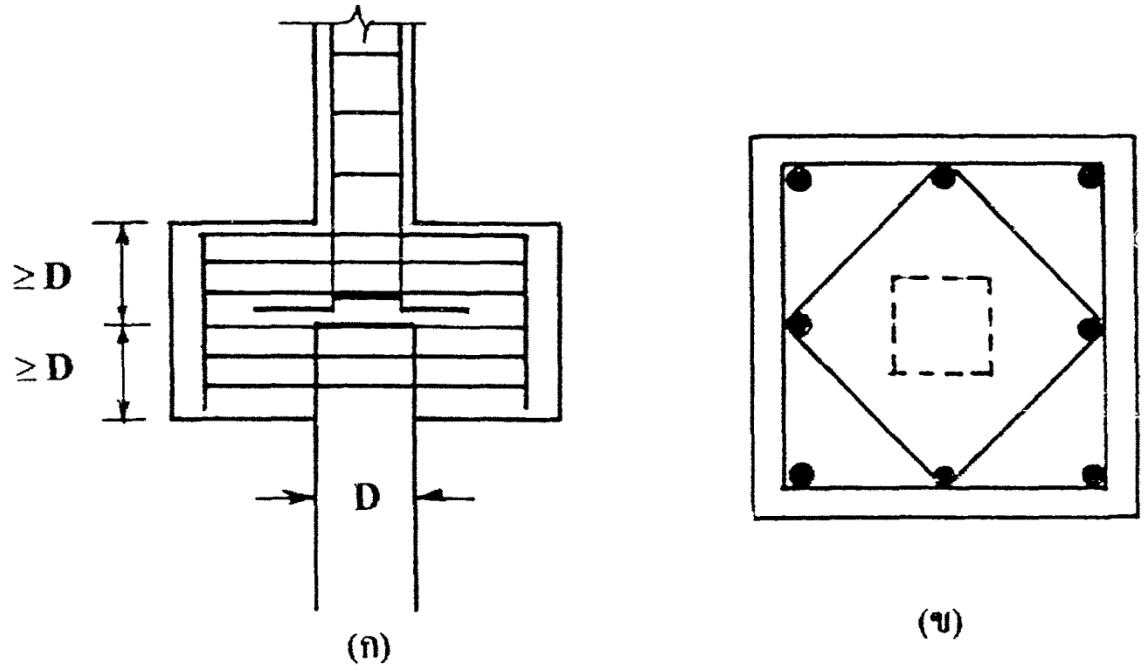
ลักษณะการวิบัติของฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้นที่เสริมเหล็กไม่เหมาะสม พิจารณาจากรูปที่ 6.45 เมื่อน้ำหนักที่ลงตอม่อน้อยกว่ากำลังของเสาเข็ม ฐานรากนั้นจึงต้องการเสาเข็มเพียงต้นเดียว รูปที่ 6.45(ก) เป็นการเสริมเหล็กในฐานรากเหมือนกับฐานรากที่มีเสาเข็ม 2 ต้นขึ้นไป คือ บนหัวเสาเข็มมีตะแกรงเหล็กแล้วให้เหล็กของตอม่อยื่นลงไปถึงเหล็กตะแกรง ฐานรากจึงตั้งบนหัวเสาเข็มแบบหมิ่นเหม่ หากตอกเสาเข็มในบริเวณดินอ่อนมากเช่นบริเวณบางนา ส่วนบนเสาเข็มจะอ่อนไหวต่อแรงทางข้างเสมอ เมื่อรถบรรทุกวิ่งบนถนนใกล้ๆ จะกดลงบนถนนให้จมลงและเกิดแรงทางข้างไปในแนวนอน ดันเสาเข็มจนเซพาเอาฐานรากโย้ตาม ปลายเสาเข็มที่จมเข้าไปในฐานรากน้อยก็งัดเนื้อคอนกรีตปริแตก ตอม่อซึ่งมีขนาดเล็กรับได้เฉพาะแรงตามแนวแกนแต่รับโมเมนต์ไม่ไหวก็จะหัก สภาพเยื้องศูนย์จากการเซของเสาเข็มยิ่งทำให้เกิดแรงดัดขั้นที่สอง (secondary moment) หรือ $P-\Delta$ effect ทำให้ตอม่อหักมากยิ่งขึ้น สุดท้ายอาคารส่วนนี้จะล้มลงดังรูปที่ 6.45 (ข) อาคารตึกแถวที่บางนาเกิดอาการล้มด้านหน้าที่ใกล้ถนน เสาเข็มแถวหน้าหลุดแนวจากแรงทางข้างทั้งหมดแต่เสาเข็มแถวในเข้าไปไม่หลุดตอม่อไม่หัก จึงมีอาการล้มหน้า

รูปที่ 6.45(ค) เสริมเหล็กกลับหัวกับรูปที่ 6.45(ก) ทำให้เหล็กเสริมในตอม่อไปชิดกับผิวบนฐานรากเกินไป เมื่อรับแรงทางข้างดังรูปที่ 6.45(ง) หัวเสาเข็มกับฐานรากยึดกันได้แน่นจึงเคลื่อนไปพร้อมๆ กัน การที่เหล็กชิดผิวบนมากเกินไป ระยะฝังยึดไม่เพียงพอ เสาตอม่อหักพร้อมกันนั้นเหล็กเสริมในตอม่อจะลากเอาเหล็กเสริมฐานรากโก่งและปริแตกได้ จากนั้นการวิบัติเกิดขึ้นเช่นเดียวกับรูปที่ 6.45(ข)



รูปที่ 6.45 ลักษณะการวิบัติจากแรงทางข้างของฐานรากเสาเข็ม 1 ต้น เนื่องจากเสริมเหล็กไม่เหมาะสม

ในรูปที่ 6.45 แสดงการวิบัติจากการออกแบบและเสริมเหล็กไม่เหมาะสม ดังนั้นหากเสริมคล้ายๆ รูปที่ 6.45(ค) แต่ให้เหล็กจากตอม่ออยู่ลึกลงมามากพอ ดังรูปที่ 6.46(ก) เป็นรูปตัดตามยาวของฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้นที่มีประสิทธิภาพสูง รูปที่ 6.46(ข) เป็นรูปตัดตามขวางของฐานราก ให้ D เป็นขนาดของเสาเข็ม ระยะที่หัวเสาเข็มฝังเข้าไปในฐานรากต้องไม่น้อยกว่าระยะ D เพื่อป้องหันไม่ให้หัวเสาเข็มงัดเนื้อฐานรากปริแตก ขณะเดียวกันตอม่อต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะไม่หักโดยง่าย อย่างน้อยตอม่อต้องรับแรงดัดที่เกิดการเยื้องศูนย์เท่าระยะ kern ของตอม่อ ถ้า P เป็นแรงลงตอม่อตามแนวแกน และ C แทนขนาดแคบสุดของตอม่อหรือเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ แรงดัดที่ตอม่อต้องรับได้ไม่น้อยกว่า $M_c = \frac{PC}{6}$ เหล็กเสริมในตอม่อต้องหยั่งลึกลงมาไม่น้อยกว่าระยะ D เพื่อป้องกันการฉีกของฐานรากแบบรูปที่ 6.45(ง)



รูปที่ 6.46 การเสริมเหล็กในฐานรากเสาเข็ม 1 ต้นที่ถูกต้อง

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะรับแรงดึงได้น้อย หากตอม่อมีความแข็งแรงมากพอและยึดฐานรากเอาไว้ได้แน่นหนา การวิบัติของฐานรากจะเกิดจากการงัดของหัวเสาเข็มที่จมในเนื้อฐานราก ทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีต และอาจจะฉีกออก การป้องกันการฉีกคือหาอะไรกอดรัดเอาไว้ ในที่นี้ใช้เหล็กปลอกวางถี่ๆ เหล็กปลอกจะทำงานนี้ไม่ได้หากไม่มีหลักยึดที่แข็งแรง รูปที่ 6.46(ข) จะเห็นเหล็กยืนที่นิยมใช้คือเหล็ก 8-DB 25 mm ส่วนเหล็กปลอกจะเป็น 2-ป RB 9 mm @ 0.10 m เหล็กปลอกหากวางถี่กว่านี้อาจจะทำให้เกิดโพรงและการจับยึดระหว่างเหล็กกับคอนกรีตไม่ดีกำลังก็จะน้อยลง ระยะห่างระหว่างเหล็กยืนไม่เกิน 45 cm ตามลักษณะการรับแรงเฉือนในคานลึก

ลักษณะการเสริมเหล็กในฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น จะเหมือนกับการเสริมเหล็กในเสาที่ใช้เหล็กปลอกสองวงในหนึ่งชุดไม่ทำเป็นตะแกรงเหมือนฐานรากทั่วไป การก่อสร้างจริง ช่างเหล็กจะผูกเหล็กฐานรากกับเหล็กตอม่อให้ติดกันแล้วยกลงสวมครอบหัวเสาเข็ม หนุนด้วยลูกปูนให้เหล็กตอม่อห่างจากหัวเสาเข็มไม่น้อยกว่า 2.5 cm

ประเด็นปัญหาในการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น มิใช่ความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนหรือแรงดัดแรงเฉือน แต่กลายเป็น***การป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมี*** ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ผลิตเสาเข็ม โดยเฉพาะเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง จะใช้ $f_c' = 350$ ksc จากตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน (ผู้ผลิตหลายรายมักจะส่งผลการทดสอบตัวอย่างลูกบาศก์มาตรฐานซึ่ง f_c' จะมากกว่าตัวอย่างทรงกระบอก หากได้ผล f_c' ของตัวอย่างลูกบาศก์มาให้คูณด้วย $\frac{5}{6}$ จะใกล้เคียงกับ f_c' ของตัวอย่างทรงกระบอก กฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 และที่แก้ไขเพิ่มเติม (ฉบับที่ 3 พ.ศ.2543) กำหนดไว้ว่า กำลังของคอนกรีตหมายถึงกำลังของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม สูง 30 ซม) อายุ 28 วัน ปัจจุบันนี้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงนิยมใช้ $f_c' = 350$ ksc กำลังของคอนกรีตฐานรากอาจจะเพียง $f_c' = 250$ ksc ซึ่งแตกต่างกับของเสาเข็ม แล้วก่อนเทคอนกรีตฐานรากก็ไม่ได้ทำให้ผิวของเสาเข็มขรุขระเพื่อให้คอนกรีตฐานรากจับเสาเข็มได้แน่น ดังนั้นรอยสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับคอนกรีตฐานรากจึงจับกันไม่สนิทมีช่องว่างเป็นฟิล์มบางๆ ทำให้เกิดผลคาปิลลารีที่จะดึงดูดเอาน้ำสกปรกหรือมีสารเคมีละลายอยู่ซึมขึ้นไปตามช่องว่างนี้ได้ ถ้าเหล็กปลอกวงในอยู่ชิดมุมของเสาเข็มน้อยกว่าระยะหุ้ม (covering) น้ำสารเคมีซึมเข้าถึงเหล็กปลอกวงในจนเป็นสนิม (การ oxidation จนเป็นสนิมของเหล็กไม่จำเป็นต้องมีอากาศสัมผัส ขอเพียงแต่มีตัวให้ออกซิเจนหรือ oxidizer ก็เป็นสนิมได้แล้ว) เหล็กที่เป็นสนิมจะพองตัวขึ้น แรงดันจากการพองตัวจะเบ่งจนคอนกรีตแตก น้ำสารเคมีก็จะยิ่งเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากและเร็วขึ้น ทำนองเดียวกัน ระยะหุ้มด้านผิวนอกของฐานรากก็ต้องเพียงพอด้วย

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ของ วสท. กำหนดเรื่องระยะหุ้มเอาไว้ว่า

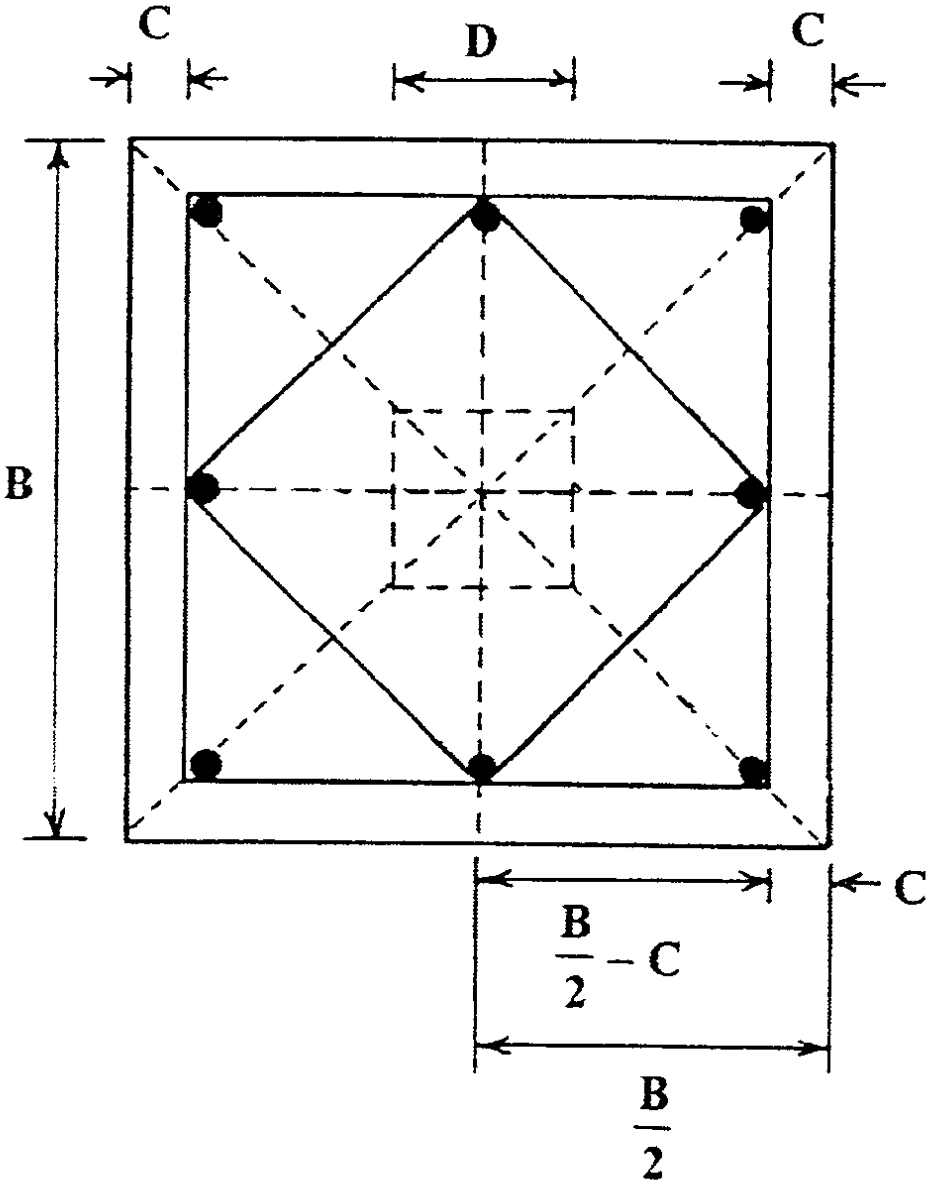
ระยะหุ้มขององค์อาคารที่สัมผัสหรือจมในดิน บริเวณที่ไม่มีการกัดกร่อนหรือมีแต่ไม่รุนแรง ให้ใช้ระยะหุ้มของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 7.5 ซม

ระยะหุ้มขององค์อาคารที่สัมผัสหรือจมในดิน บริเวณที่มีการกัดกร่อนรุนแรง (ชายทะเล นิคมอุตสาหกรรม บริเวณดินเค็มเช่น อ.พิมาย มีหินเกลือ) ให้ใช้ระยะหุ้มของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 10 ซม

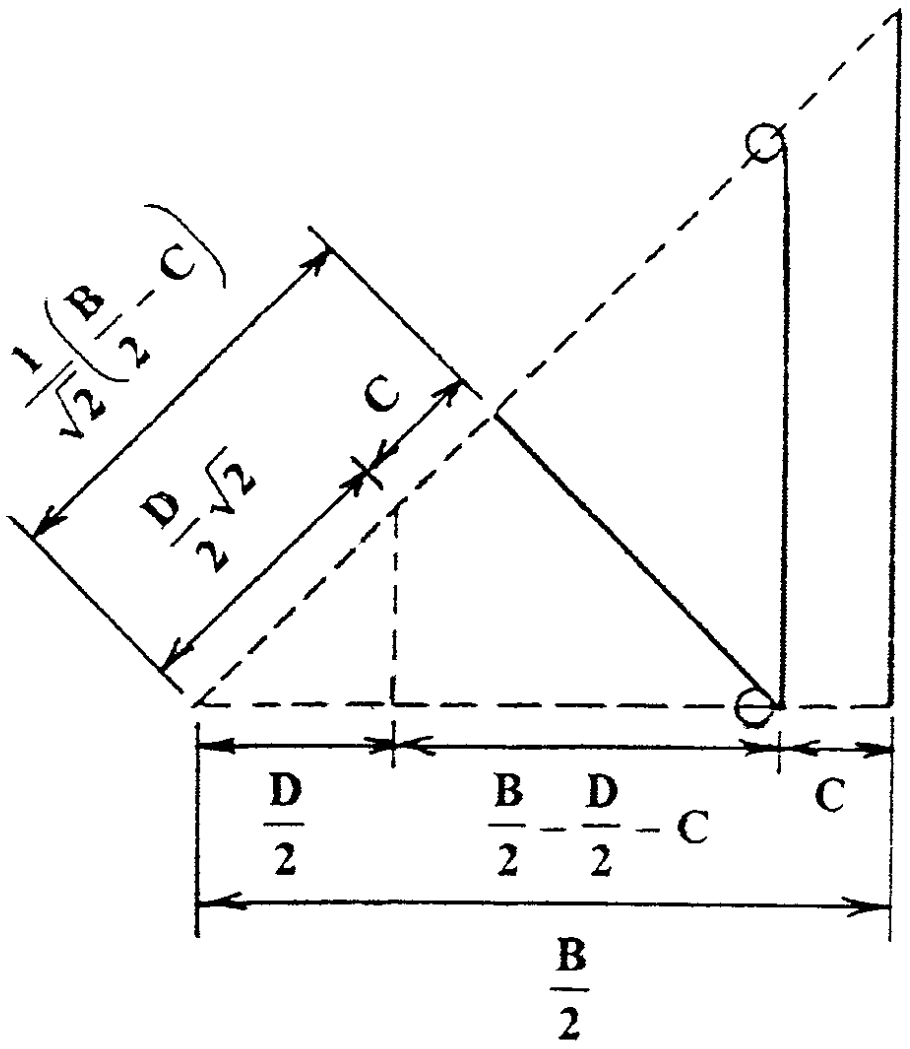
จากรูปที่ 6.47 เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (แม้จะระบุเป็นหน้าตัด I แต่ส่วนหัวเสาเข็มที่ติดกับฐานรากจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส) เมื่อพยายามหมุนให้มุมของเสาเข็มอยู่ใกล้เหล็กปลอกวงในมากที่สุดได้ดังรูป ให้ระยะห่างจากผิวนอกของฐานรากถึงผิวนอกของเหล็กยืน (ที่จริงต้องเหล็กปลอก แต่ประมาณที่ผิวนอกเหล็กยืน โดยจะมีการชดเชยต่อไป) เท่ากับระยะหุ้ม C ตามมาตรฐาน และจากมุมเสาเข็มถึงเหล็กปลอกวงในเท่ากับ C ด้วย ระยะ C = 7.5 cm หรือ 10 cm ตามมาตรฐานของ วสท. ที่กล่าวแล้ว

ในโครงสร้างส่วนอื่นๆ ที่อาจจะสัมผัสดินบ้าง ถูกแดดถูกฝนบ้าง ระยะหุ้มไม่น้อยกว่า 4 cm ในเหล็กที่โตกว่า 16 mm ขึ้นไป และระยะหุ้มไม่น้อยกว่า 3 cm ในเหล็กขนาด 16 mm ลงมา

รูปที่ 6.47 หน้าตัดขวางของฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น กว้างด้านละ B ขนาดของเสาเข็ม D อยู่กึ่งกลางพอดี แบ่งหน้าตัดนี้ออกเป็น 8 ส่วนเท่าๆ กันโดยใช้เส้นทแยงมุมกับเส้นแบ่งครึ่งด้าน ขอบของเสาเข็มให้ขนานกับขอบของฐานรากเพื่อให้มุมของเสาเข็มอยู่ใกล้กับเหล็กปลอกวงในที่สุด ระยะห่างจากมุมเสาเข็มถึงเหล็กปลอกวงในเท่ากับระยะหุ้ม C ส่วนด้านนอกระยะหุ้มก็เท่ากับ C ซึ่งตามมาตรฐานค่า C = 0.075 m ในสภาพดินทั่วไปไม่กัดกร่อนหรือถึงมีก็น้อย และ C = 0.10 m เมื่อดินมีการกัดกร่อนรุนแรงเช่นชายทะเล



รูปที่ 6.47 แสดงการจัดวางตำแหน่งให้ระยะหุ้ม C น้อยที่สุด



รูปที่ 6.48 แสดงซีกล่างของมุมบนขวา

นำซีกล่างของมุมบนขวามาขยายดังรูปที่ 6.48 ระยะขอบล่างและขอบขวายาว $\frac{B}{2}$ ระยะจากเหล็กเสริมถึงขอบนอกทางขวาคือระยะหุ้ม C รูปตัดนี้จะเห็นเสาเข็มเป็นหนึ่งเสี้ยวรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก ด้านยาว $\frac{D}{2}$ สองด้านจึงมีมุมที่ฐาน 45 องศา ความยาวส่วนที่เหลือเมื่อหักเสาเข็มกับระยะหุ้มนอกออกไปแล้วเท่ากับ $\frac{B}{2}-\frac{D}{2}-C$ แต่ความยาวจากมุมซ้ายสุดไปหาเหล็กเสริมจะเป็น $\frac{B}{2}-C$ เหล็กปลอกวงในลากตั้งฉากกับเส้นทแยงมุมที่เป็นด้านตรงกันข้ามมุมฉากของสามเหลี่ยมใหญ่ จากสามเหลี่ยมมุมฉากที่มุมอีกสองมุม 45 องศา ด้านตรงกันข้ามมุมฉากยาว $\frac{B}{2}-C$ ด้านประกอบมุมฉากจะยาว $\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{2}-C\right)$ ย้อนไปดูสามเหลี่ยม

มุมฉากของเสาเข็ม ด้านประกอบมุมฉากยาว $\frac{D}{2}$ ด้านตรงกันข้ามมุมฉากยาว $\frac{D}{2}\sqrt{2}$ รวมกับ C เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{2}-C\right)$ เนื่องจากเป็นความยาวเดียวกัน เพียงคิดจากสองทางแตกต่างกัน ดังนั้น

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{2}-C\right)=\frac{D}{2}\sqrt{2}+C$$

คูณตลอดด้วย $\sqrt{2}$

$$\frac{B}{2}-C=\frac{D}{2}\times 2+\sqrt{2}C$$

$$\frac{B}{2}=D+C+\sqrt{2}C$$

ได้สมการทั่วไปในการหาขนาดหน้าตัดของฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้นดังนี้

$$B=2D+2\left(1+\sqrt{2}\right)C$$

กระจายค่าให้ง่ายต่อการใช้งาน

$$B=2D+2(1+1.414)C$$

$$B=2D+4.828C$$

ประมาณค่าให้ง่ายขึ้น

$$B=2D+5C$$

ในกรณีทั่วไป ฐานรากห่างทะเลมาก การกัดกร่อนน้อย ค่า C = 0.075 m แทนค่าได้

$$B=2D+0.375\ \ m$$

ในกรณีการกัดกร่อนมาก เช่นใกล้ทะเล มีหินเกลือ ค่า C = 0.10 m แทนค่าได้

$$B=2D+0.50\ \ m$$

ฐานรากในกรณีไม่กัดกร่อนให้ใช้อย่างน้อย 2 เท่าของขนาดเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสบวกอีก 0.375 เมตร และในกรณีที่อยู่ในพื้นที่กัดกร่อนสูง ให้ใช้ขนาด 2 เท่าของขนาดเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสบวกอีก 0.50 เมตร

ในกรณีของเสาเข็มกลมเช่น เสาเข็มแรงเหวี่ยง (spun pile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ดังรูปที่ 76 เป็นหน้าตัดของฐานราก แบ่งเป็น 8 ส่วน แล้วนำซีกล่างของมุมบนขวามาพิจารณาโดยขยายออกดังรูปที่ 77 ลักษณะการพิจารณาระยะเดียวกันจากสองวิธีจะได้ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{2}-C\right)=\frac{D}{2}+C$$

คูณตลอดด้วย $\sqrt{2}$

$$\frac{B}{2}-C=\frac{D\sqrt{2}}{2}+C\sqrt{2}$$

คูณตลอดด้วย 2

$$B-2C=D\sqrt{2}+2\sqrt{2}C$$

สมการทั่วไปในการหาขนาดฐานรากเสาเข็มกลมเดี่ยว

$$B = D\sqrt{2} + 2\left(1 + \sqrt{2}\right)C$$

หาค่าประมาณดังนี้

$$B = 1.414D + 2(1 + 1.414)C$$

$$B = 1.414D + 4.828C$$

จัดค่าใหม่ให้เหมาะสม

$$B \approx 1.5D + 5C$$

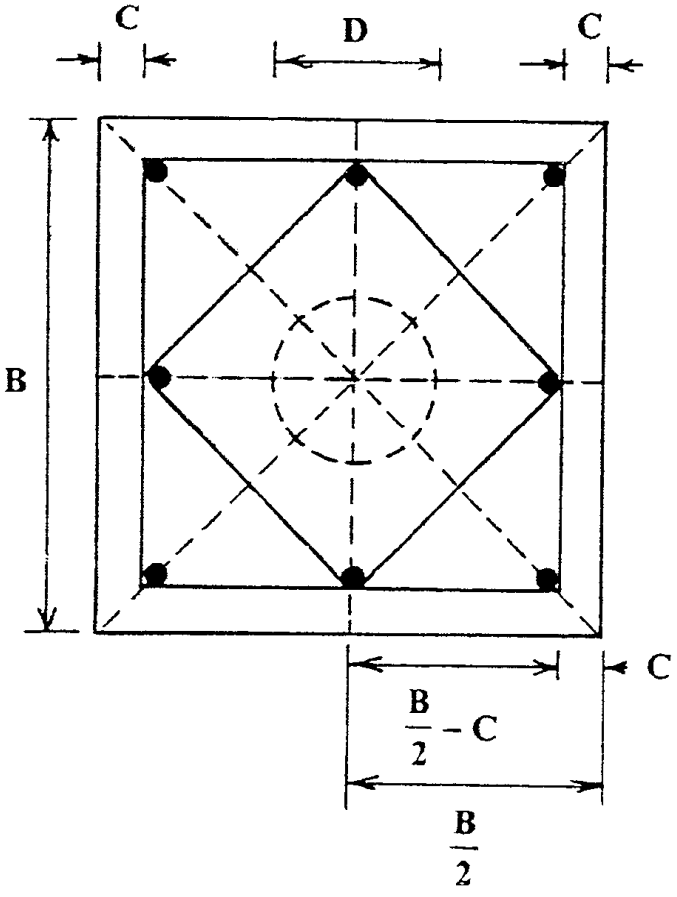
ในกรณีทั่วไป การกัดกร่อนน้อย (ไกลทะเล นิคมอุสาหกรรม หินเกลือ) ค่า C = 0.075 m แทนค่าได้

$$B = 1.5D + 0.375 \quad m$$

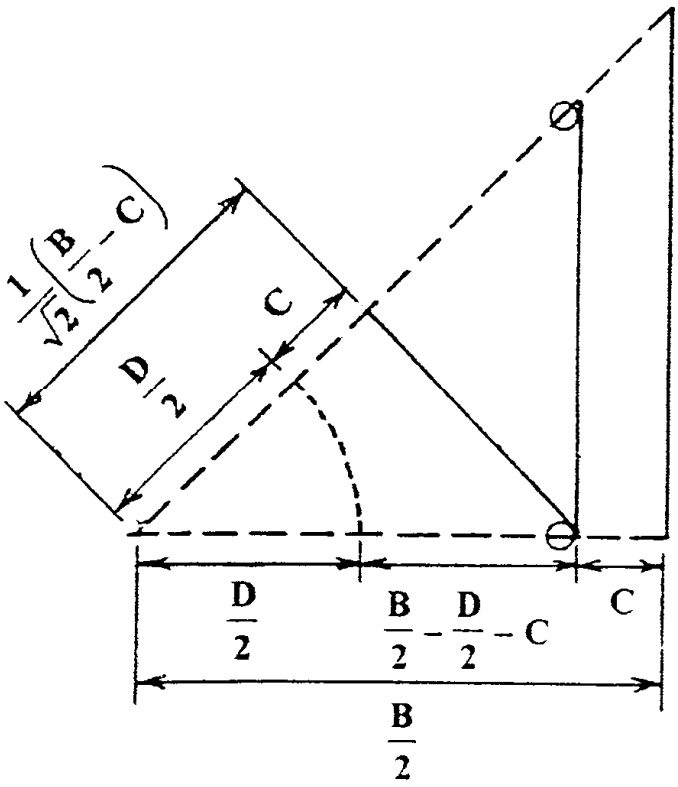
ในกรณีที่การกัดกร่อนมาก ค่า C = 0.10 m แทนค่าได้

$$B = 1.5D + 0.50 \quad m$$

สรุปได้ว่า เมื่อเสาเข็มมีหน้าตัดกลมสำเร็จรูปเส้นผ่านศูนย์กลาง D ในบริเวณที่ไม่กัดกร่อน ขนาดฐานรากเป็น 1.5 เท่าของขนาดเสาเข็มบวกอีก 0.375 เมตร แต่ถ้าอยู่ในบริเวณกัดกร่อนสูง ขนาดฐานรากเป็น 1.5 เท่าของขนาดเสาเข็มบวกอีก 0.50 เมตร

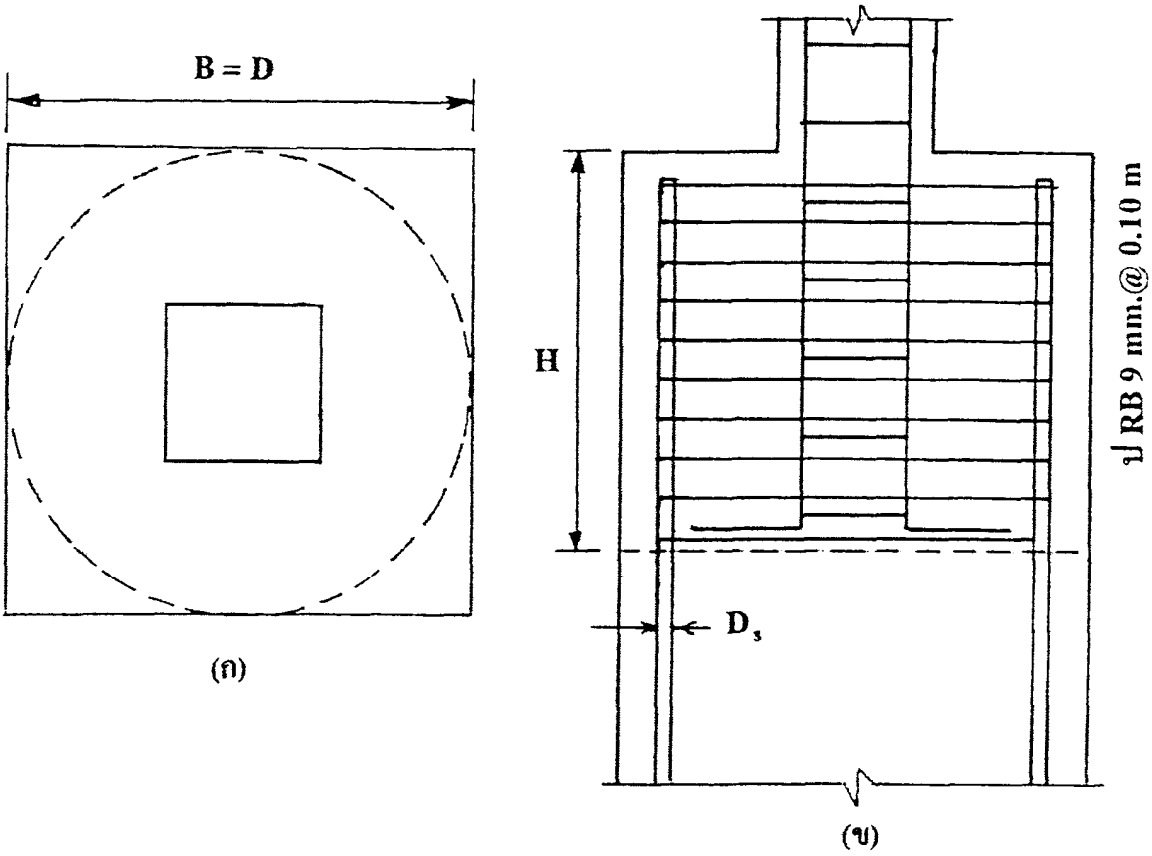


รูปที่ 6.49 ฐานรากบนเสาเข็มกลมเดี่ยว หาขนาดฐานราก B



รูปที่ 6.50 นำชีกล่างของมุมบนขวามาพิจารณา

ในกรณีของเสาเข็มเจาะ ต้องมีการสกัดหัวเสาเข็มส่วนบนที่คอนกรีตมีคุณภาพต่ำออกทิ้งไปจนเหล็กเสริมโผล่แล้วหล่อคอนกรีตใหม่ต่อขึ้นมาเป็นตอม่อ ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้หลักการเดียวกับเสาเข็มสำเร็จรูป ดูรูปที่ 6.51 ให้ D_s เป็นขนาดเหล็กเสริมในเสาเข็มเจาะที่จะให้ล้วงเข้าไปในฐานราก ขณะเดียวกันเหล็กในเสาตอม่อก็ต้องล้วงเข้าไปในเสาเข็มส่วนที่สกัดทิ้งไป ลักษณะการผูกเหล็กเสาตอม่อมีลักษณะที่ทำให้การยึดเกาะกับคอนกรีตดีกว่าเหล็กในเสาเข็ม หากจะวิบัติจากแรงยึดเหนี่ยวก็จะเกิดที่เหล็กเสาเข็มคือรูดจากคอนกรีต (กรณีรับแรงดึง) ดังนั้นควรให้ระยะที่เหล็กเสาเข็มโผล่ขึ้นในส่วนที่สกัดอย่างน้อย $H > 40D_s$ ตอนสกัดให้เอาเหล็กปลอกเสาเข็มทิ้งไปก่อน เหล็กปลอกใหม่ควรมีขนาดที่โตและเรียงถี่เช่น RB 9 mm @ 0.10 m การก่อสร้าง เอาเหล็กปลอกเสาเข็มที่จะใช้ทุกวงสวมลงไปไว้ก่อน สอดเหล็กตอม่อลงไปจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและถูกต้องแล้วเลื่อนเหล็กปลอกเสาเข็มขึ้นผูกจากบนลงล่างให้ระยะเรียง 0.10 เมตร รอยต่อจะทำแบบหล่อเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพราะทำง่ายและราคาถูก ทั้งยังเป็นที่หมายว่าเป็นจุดต่อระหว่างเสาเข็มกับตอม่อ เทคอนกรีตให้ประสานรอยต่อจนเต็ม



รูปที่ 6.51 การต่อตอม่อกับเสาเข็มเจาะโดยตรงเมื่อใช้เสาเข็ม 1 ต้น

เนื่องจากเหล็กยืนไม่ใช่เหล็กรับน้ำหนักอย่างเสา เพียงทำหน้าที่เป็นหลักให้เหล็กปลอกยึดเกาะได้อย่างมั่นคงเท่านั้น ดังนั้นจึงมีเพียง 8 เส้นก็เพียงพอ แต่ระยะห่างระหว่างเส้นอย่าให้เกิน 45 ซม ขนาดเหล็กห้ามเล็กกว่า 12 มม แนะนำว่าเหล็กยืนทั้ง 8 เส้นควรจะเป็น DB 25 mm

ลำดับขั้นตอนการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น

ขั้นตอนที่ 1 ทราบข้อมูลดังนี้

D = ขนาดเสาเข็ม อาจจะเป็นความกว้างของหน้าตัดสี่เหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มกลม, m

P_c = กำลังของเสาเข็ม, ตัน/ต้น

a = ขนาดหน้าตัดตอม่อหรือเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ, m

b = ขนาดหน้าตัดตอม่อ, m

P = DL + LL =น้ำหนักลงตอม่อ, ตัน

DL = น้ำหนักบรรทุกคงที่, ตัน

LL = น้ำหนักบรรทุกจร, ตัน

ทราบชนิดของเสาเข็ม

1. เสาเข็มเจาะ
2. เสาเข็มสำเร็จรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, I
3. เสาเข็มสำเร็จรูปชนิดหน้าตัดกลม เช่นเสาเข็มแรงเหวี่ยง (spun pile)

กรณีเสาเข็มเจาะ

ขั้นตอนที่ 2 ทราบขนาดเหล็กยืนในเสาเข็ม , D_s

ขั้นตอนที่ 3 หาความสูงช่วงรอยต่อที่ต้องสกัดหัวเสาเข็มให้เหล็กโผล่ $H \geq 40D_s$

ขั้นตอนที่ 4 เลือกเหล็กปลอก อาจจะใช้ ป-RB 6 mm @ 0.10 m หรือ ป-RB 9 mm @ 0.10 m หรือ ป-DB 12 mm @ 0.10 m แล้วแต่ขนาดเสาเข็มเจาะนั้น หากขนาดเสาเข็มเล็กเช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร ถึง 0.50 เมตร ก็ใช้เหล็กปลอกขนาดเล็ก คือ ป-RB 6 mm @ 0.10 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ถึง 0.80 เมตร ใช้เหล็กปลอก ป-RB 9 mm @ 0.10 m โตกว่านั้นใช้เหล็กปลอก ป-DB 12 mm @ 0.10 m

ตรวจสอบน้ำหนักลงเสาเข็มต้องไม่เกินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม หากเกินก็จะเป็นการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้นขึ้นไป

ขั้นตอนที่ 5 แสดงผลลัพธ์ในการออกแบบ คือขนาดของฐานรากหรือจุดต่อ B=D, ความสูงของรอยต่อ $H \geq 40D_s$ และเหล็กปลอกที่ใช้

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดแบบฐานราก

กรณีเสาเข็มสำเร็จรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดกลม

ขั้นตอนที่ 2 หาระยะที่หัวเสาเข็มฝังในฐานราก $\geq D$

หาระยะจากหัวเสาเข็มถึงโคนตอม่อ $\geq D$

หาความสูงของฐานราก = ผลบวกของระยะที่หัวเสาเข็มฝังกับระยะจากหัวเสาเข็มถึงโคนตอม่อ

$$H \geq 2D$$

ขั้นตอนที่ 3 ทราบสถานะของพื้นที่นั้นเป็นประเภทไม่กัดกร่อนหรือกัดกร่อนรุนแรงเช่นริมทะเล มีหินเกลือจากการสังเกตว่ามีการผลิตเกลือสินเธาว์ หรืออาจจะกัดกร่อนรุนแรงได้ในอนาคต เช่นเขตนิคมอุตสาหกรรมหรือใกล้เคียง หรือเป็นบริเวณที่มีประกาศให้เป็นอีสเทอร์นซีบอร์ด ทำนองนี้

ขั้นตอนที่ 4 หาขนาดฐานราก B ตามเงื่อนไขดังนี้

หน้าตัดเสาเข็มเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่ไม่มีการกัดกร่อน

$$B = 2D + 0.375 \quad m$$

หน้าตัดเสาเข็มเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่มีการกัดกร่อนรุนแรง

$$B = 2D + 0.50 \quad m$$

หน้าตัดเสาเข็มวงกลม พื้นที่ไม่มีการกัดกร่อน

$$B = 1.5D + 0.375 \quad m$$

หน้าตัดเสาเข็มวงกลม พื้นที่มีการกัดกร่อน

$$B = 1.5D + 0.50 \quad m$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดปริมาณเหล็กยืน ในขั้นต้นให้เลือก 8-DB 25 mm แล้วตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นตามขอบฐานรากว่าห่างกันเกิน 45 cm หรือไม่ หากเกินให้ปรับใหม่เป็น 16-DB 20 mm

เหล็กปลอกให้ใช้ 2-ป-RB 9 mm @ 0.10 m ทุกกรณี

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียด แบบฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.9 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $I - 0.30 \times 0.30 \times 21$ m กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ยอมให้ 40 ตัน/ต้น ตอม่อขนาด 0.30×0.30 m^2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 18 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 14 ตัน กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc และกำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4000$ ksc หัวเสาเข็มลึกจากผิวดิน 2.00 เมตร

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$D = 0.30$ m = ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม กรณีนี้คือความกว้างของจัตุรัสหน้าตัดเสาเข็ม

$P_c = 40$ T / pile = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

$a = b = 0.30$ m = ขนาดหน้าตัดตอม่อ

$DL = 18$ tonne = น้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน (serviced dead load)

$LL = 14$ tonne = น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน (serviced live load)

$P = DL + LL = 32$ tonne = น้ำหนักบรรทุกใช้งานรวมลงตอม่อ

$f_c^{'} = 240$ ksc = กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วัน

$f_y = 4000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม

ชนิดของเสาเข็มเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน

จำนวนเสาเข็มโดยประมาณ

$$N = \frac{1.1P}{P_c} = \frac{1.1 \times 32}{40} = 0.88 \Rightarrow 1 \text{ ต้น}$$

เป็นฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น

ขั้นตอนที่ 2 ระยะที่หัวเสาเข็มฝังในฐานราก $\geq D = 0.30$ m ใช้ 0.30 เมตร

ระยะจากหัวเสาเข็มถึงโคนตอม่อ $\geq D = 0.30$ m ใช้ 0.30 เมตร

ความสูงหรือความหนาของฐานราก $H_F = 0.30 + 0.30 = 0.60$ m

ขั้นตอนที่ 3 ทราบสถานะของพื้นที่ก่อสร้าง โจทย์ไม่ระบุว่าเป็นพื้นที่กัดกร่อนสูง และได้ไปตรวจพื้นที่จริงแล้ว แน่ใจว่าไม่มีการกัดกร่อนสูงแน่นอน ดังนั้นระยะหุ้มคอนกรีต C = 7.5 cm = 0.075 m

ขั้นตอนที่ 4 ขนาดของฐานราก

$$B = 2D + 0.375 = 2 \times 0.30 + 0.375 = 0.975 \Rightarrow 1.00 \text{ m}$$

ระยะครึ่งหนึ่งของขนาดฐานราก

$$\frac{B}{2} = \frac{1.00}{2} = 0.50 \text{ m}$$

ความยาวของเสาตอม่อ

$$H_p = 2.00 - 0.30 = 1.70 \text{ m}$$

น้ำหนักตอม่อ

$$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.30 \times 0.30 \times 1.70 = 367.2 \text{ kg}$$

น้ำหนักฐานราก

$$W_F = 2400B^2H_F = 2400 \times 1.00^2 \times 0.60 = 1440 \text{ kg}$$

น้ำหนักดินถม

$$W_{BF} = 1690\left(B^2 - ab\right)H_p = 1690 \times \left(1.00^2 - 0.30 \times 0.30\right) \times 1.70$$

$$W_{BF} = 2614.43 \text{ kg}$$

น้ำหนักบรรทุกรวมจริงถ่ายลงเสาเข็ม

$$P = 32{,}000 + 367.2 + 1440 + 2614.43 = 36{,}421.63 \text{ kg} < P_c = 40{,}000 \text{ kg}$$

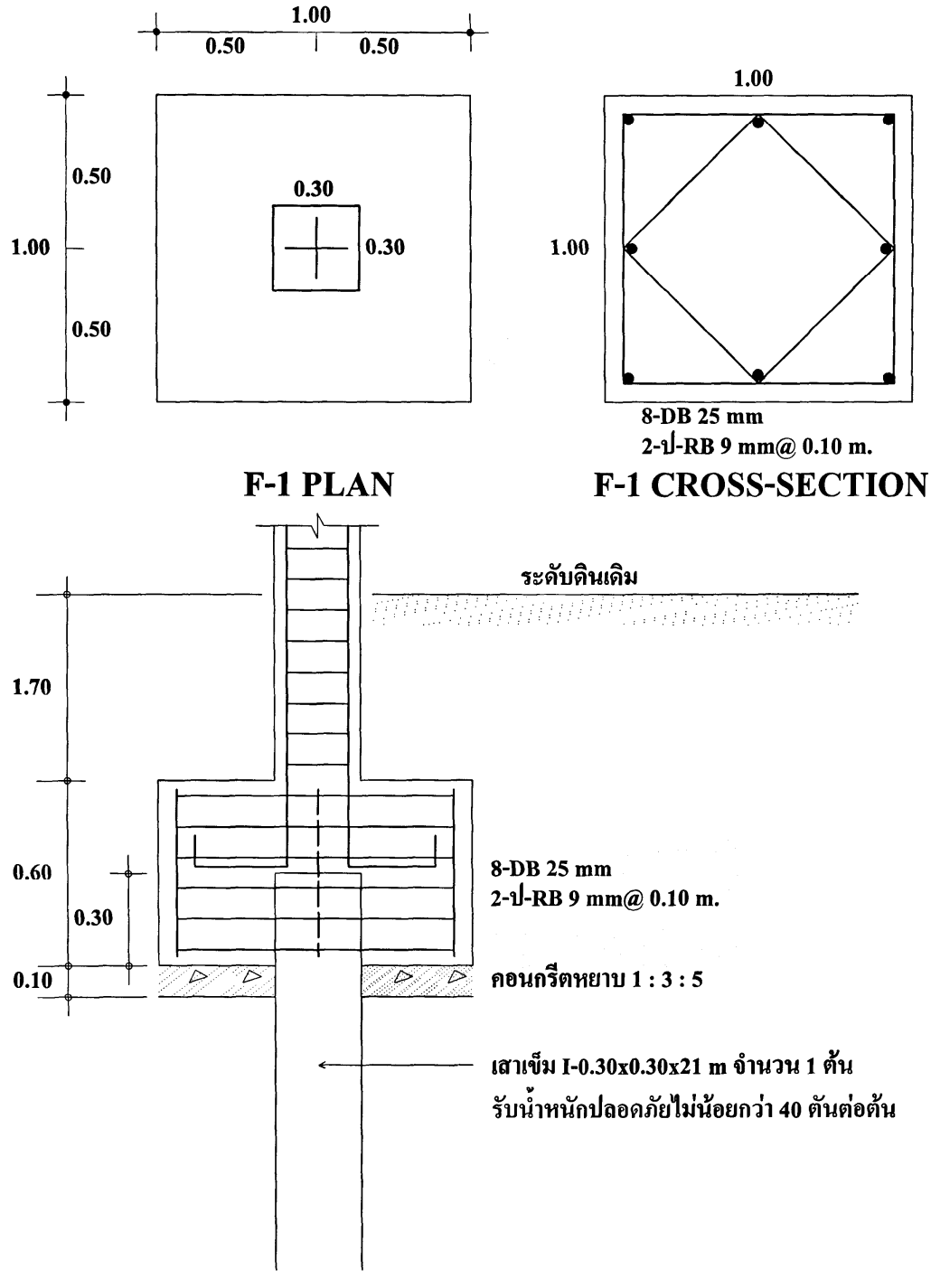
น้ำหนักที่กดลงไม่เกินกำลังของเสาเข็ม ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดปริมาณเหล็กยืนและเหล็กปลอก สำหรับเหล็กยืนใช้ 8-DB 25 mm ตรวจสอบระยะห่าง ระยะหุ้มสองข้างๆ ละ 7.5 cm ขนาดเหล็ก 2.5 cm ระยะห่างของศูนย์กลางเหล็กยืนท่อนริมเท่ากับ 100 – 7.5 – 7.5 – 2.5 = 82.5 cm ช่วงห่างระหว่างเส้น 2 ช่วง ดังนั้นเหล็กยืนห่างกัน

$$= \frac{82.5}{2} = 41.25 \text{ cm} < 45 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

ดังนั้นใช้เหล็กยืน 8-DB 25 mm และเหล็กปลอก 2-ปRB 9 mm @ 0.10 m

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดของฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น



FOOTING F-1

รูปที่ 6.52 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น ตัวอย่างที่ 6.9

ตัวอย่างที่ 6.10 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็มแรงเหวี่ยง Spun 0.60×26.00 m กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ยอมให้ 80 ตัน/ต้น ตอม่อขนาด 0.50×0.50 m^2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 38 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 30 ตัน กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc และกำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4000$ ksc หัวเสาเข็มลึกจากผิวดิน 2.00 เมตร เป็นพื้นที่ใกล้ทะเล

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูล

$D = 0.60$ m = ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม กรณีนี้คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มแรงเหวี่ยง

$P_c = 80$ T / pile = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

$a = b = 0.50$ m = ขนาดหน้าตัดตอม่อ

$DL = 38$ tonne = น้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน (serviced dead load)

$LL = 30$ tonne = น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน (serviced live load)

$P = DL + LL = 68$ tonne = น้ำหนักบรรทุกใช้งานรวมลงตอม่อ

$f_c^{'} = 240$ ksc = กำลังประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วัน

$f_y = 4000$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม

ชนิดของเสาเข็มเป็นเสาเข็มแรงเหวี่ยงคอนกรีตอัดแรง

จำนวนเสาเข็มโดยประมาณ

$$N = \frac{1.1P}{P_c} = \frac{1.1\times 68}{80} = 0.935 \Rightarrow 1 \text{ ต้น}$$

เป็นฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น

ขั้นตอนที่ 2 ระยะที่หัวเสาเข็มฝังในฐานราก $\geq D = 0.60$ m ใช้ 0.60 เมตร

ระยะจากหัวเสาเข็มถึงโคนตอม่อ $\geq D = 0.60$ m ใช้ 0.60 เมตร

ความสูงหรือความหนาของฐานราก $H_F = 0.60 + 0.60 = 1.20$ m

ขั้นตอนที่ 3 ทราบสถานะของพื้นที่ก่อสร้าง โจทย์ระบุว่าเป็นพื้นที่ใกล้ทะเลจึงมีการกัดกร่อนสูง ดังนั้น ระยะหุ้มคอนกรีต C = 10 cm = 0.10 m

ขั้นตอนที่ 4 ขนาดของฐานราก

$$B = 1.5D + 0.50 = 1.5\times 0.60 + 0.50 = 1.40 \text{ m}$$

ระยะครึ่งหนึ่งของขนาดฐานราก

$$\frac{B}{2} = \frac{1.40}{2} = 0.70 \text{ m}$$

ความยาวของเสาตอม่อ

$$H_p = 2.00 - 0.60 = 1.40 \text{ m}$$

น้ำหนักตอม่อ

$$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.50 \times 0.50 \times 1.40 = 840 \text{ kg}$$

น้ำหนักฐานราก

$$W_F = 2400B^2H_F = 2400 \times 1.40^2 \times 1.20 = 5644.8 \text{ kg}$$

น้ำหนักดินถม

$$W_{BF} = 1690\left(B^2 - ab\right)H_p = 1690 \times \left(1.40^2 - 0.50 \times 0.50\right) \times 1.40$$

$$W_{BF} = 4045.86 \text{ kg}$$

น้ำหนักบรรทุกรวมจริงถ่ายลงเสาเข็ม

$$P = 68{,}000 + 840 + 5644.8 + 4045.86 = 78{,}530.66 \text{ kg} < P_c = 80{,}000 \text{ kg}$$

น้ำหนักที่กดลงไม่เกินกำลังของเสาเข็ม ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดปริมาณเหล็กยืนและเหล็กปลอก สำหรับเหล็กยืนใช้ 8-DB 25 mm ตรวจสอบระยะห่าง ระยะหุ้มสองข้างๆ ละ 10 cm ขนาดเหล็ก 2.5 cm ระยะห่างของศูนย์กลางเหล็กยืนท่อนริมเท่ากับ 140 – 10 – 10 – 2.5 = 117.5 cm ช่วงห่างระหว่างเส้น 2 ช่วง ดังนั้นเหล็กยืนห่างกัน

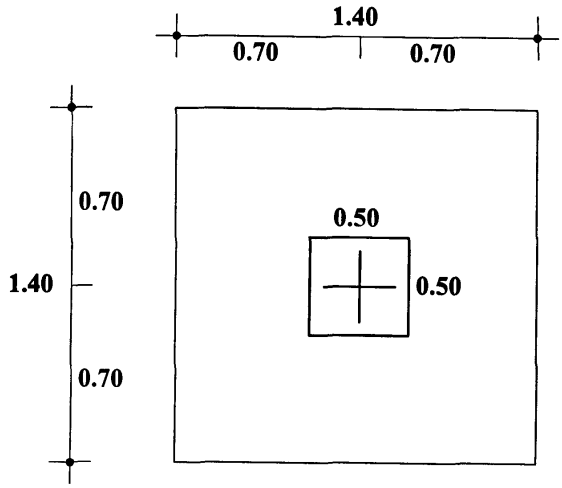
$$= \frac{117.5}{2} = 58.75 \text{ cm} > 45 \text{ cm} \quad \text{ใช้ไม่ได้}$$

เพิ่มเหล็กยืนเป็น 16-DB 25 mm ช่วงห่างระหว่างเส้น 4 ช่วง ดังนั้นเหล็กยืห่างกัน

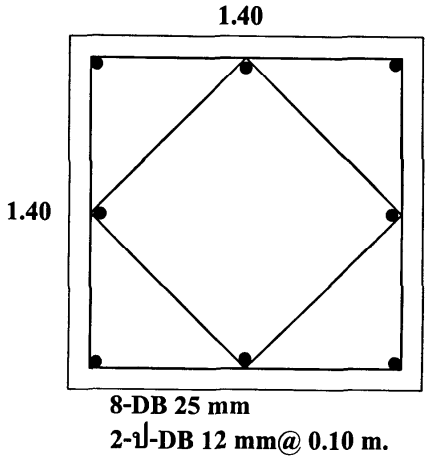
$$= \frac{117.5}{4} = 29.375 \text{ cm} < 45 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

ดังนั้นใช้เหล็กยืน 16-DB 25 mm และเหล็กปลอก 2-ปRB 9 mm @ 0.10 m

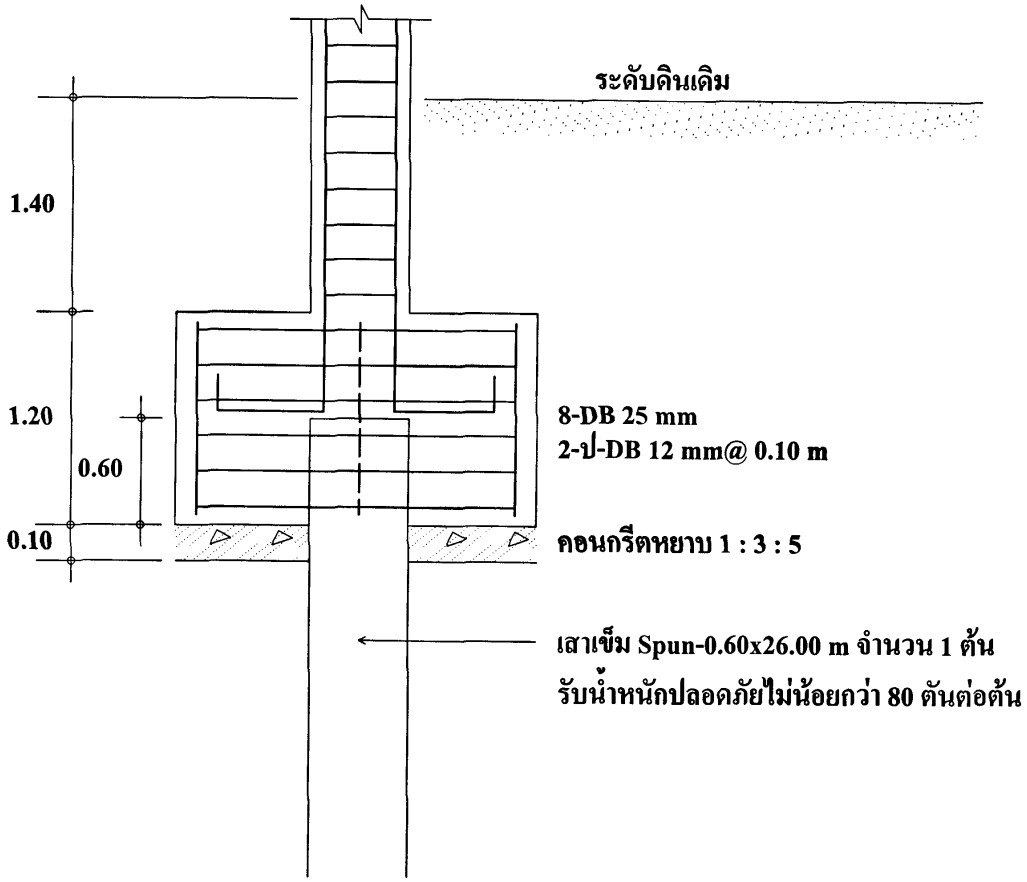
ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กฐานราก



F-1 PLAN



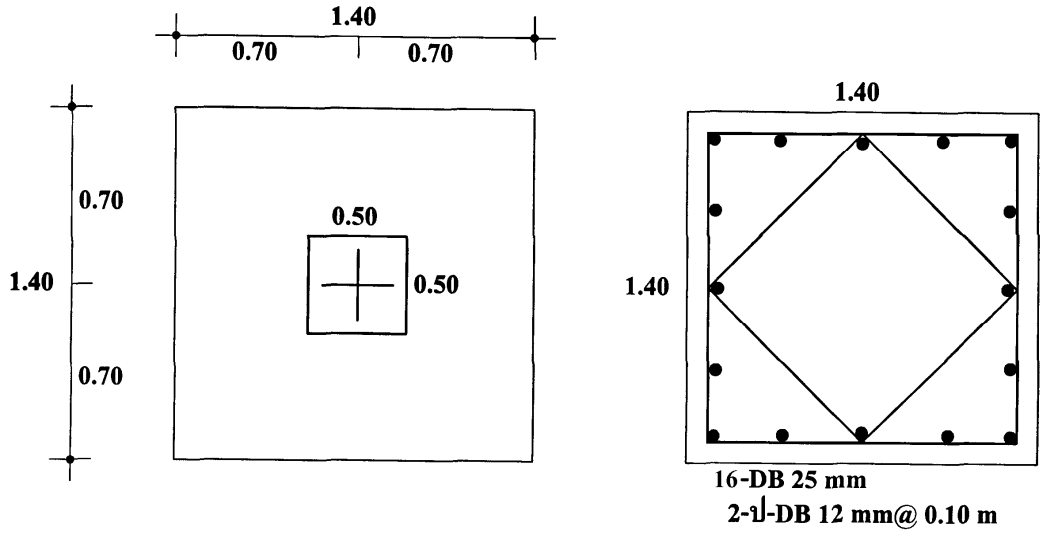
F-1 CROSS-SECTION



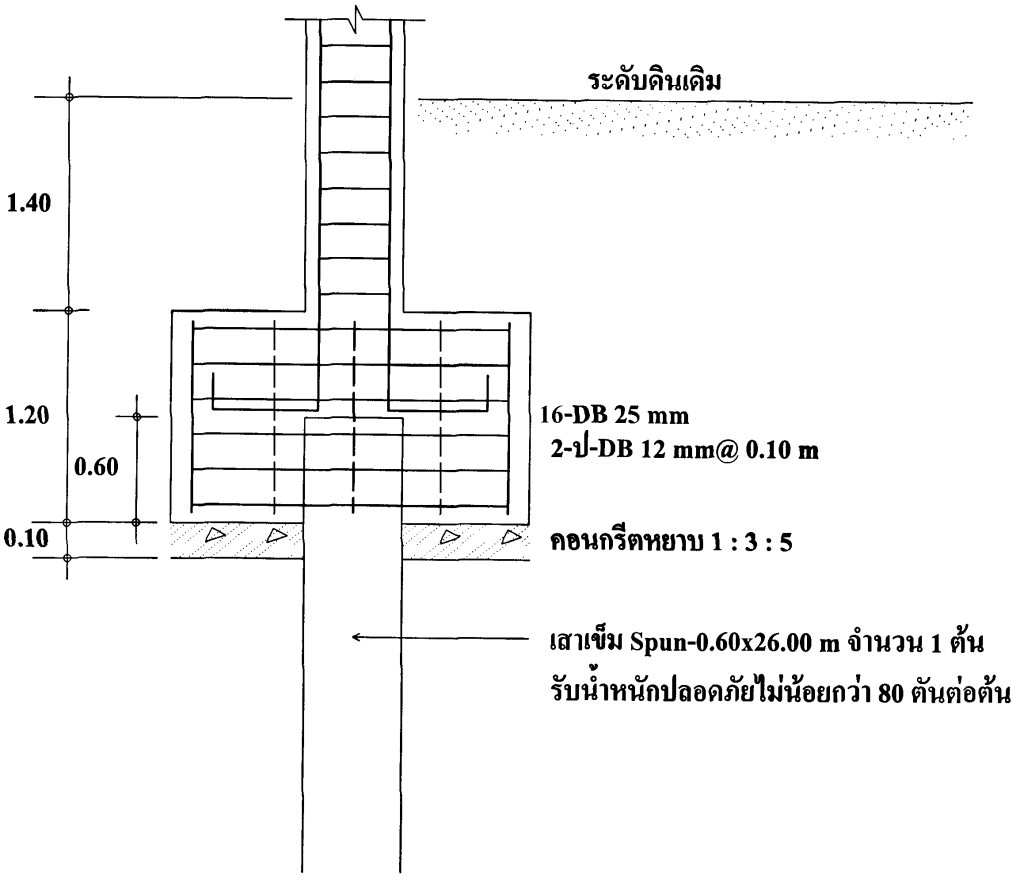
F-1 SECTION

FOOTING F-1

รูปที่ 6.53 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็มแรงเหวี่ยง



F-1 PLAN **F-1 CROSS-SECTION**



F-1 SECTION

FOOTING F-1

รูปที่ 6.54 เขียนเพิ่มเหล็กเสริมยืนให้เป็น 16 เส้น

ตัวอย่างที่ 6.11 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร ยาว 21 เมตร กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม 35 ตัน/ต้น เสาตอม่อเป็นเสากลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร รับน้ำหนัก 27 ตัน เหล็กเสริมในเสาเข็มสั่งพิเศษ 12-DB 12 mm (ปกติใช้เพียง 6-DB 12 mm) กำลังคอนกรีตเสาเข็ม $f_c' = 210$ ksc กำลังคอนกรีตในฐานรากและเสาตอม่อ $f_c' = 240$ ksc และกำลังครากของเหล็กเสริมทั้งในเสาเข็มเจาะ ฐานราก และเสาตอม่อ $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

$D = 0.35$ m = เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

$P_c = 35$ T/pile = กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม

$a = b = 0.30$ m = เสาตอม่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร

$P = 27$ tonne = น้ำหนักบรรทุกใช้งานลงตอม่อ

ประมาณจำนวนเสาเข็ม

$$N = \frac{1.1P}{P_c} = \frac{1.1\times 27}{35} = 0.85 \Rightarrow 1 \text{ ต้น}$$

ขั้นตอนที่ 2 ขนาดเหล็กยืนในเสาเข็ม $D_s = 12$ mm

ขั้นตอนที่ 3 ระยะที่ต้องสกัดหัวเสาเข็ม $H \geq 40D_s = 40\times\frac{12}{1000} = 0.45$ m ใช้ 0.60 เมตร

ขั้นตอนที่ 4 แม้ว่าเสาเข็มจะขนาดเล็กและเหล็กยืนก็มีขนาดเล็ก แต่ก็เสนอแนะให้ใช้เหล็กปลอกขนาดใหญ่และวางถี่ โดย ป-RB 9 mm @ 0.10 m ทำฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $0.35\times 0.35\times 0.60$ คือสูง 0.60 เมตร ความยาวของตอม่อประมาณ 1.50 เมตร

น้ำหนักของตอม่อ $W_p = 2400\times\frac{\pi}{4}\times 0.30^2\times 1.50 = 254.5$ kg

น้ำหนักฐานราก $W_F = 2400\times 0.35\times 0.35\times 0.60 = 176.4$ kg

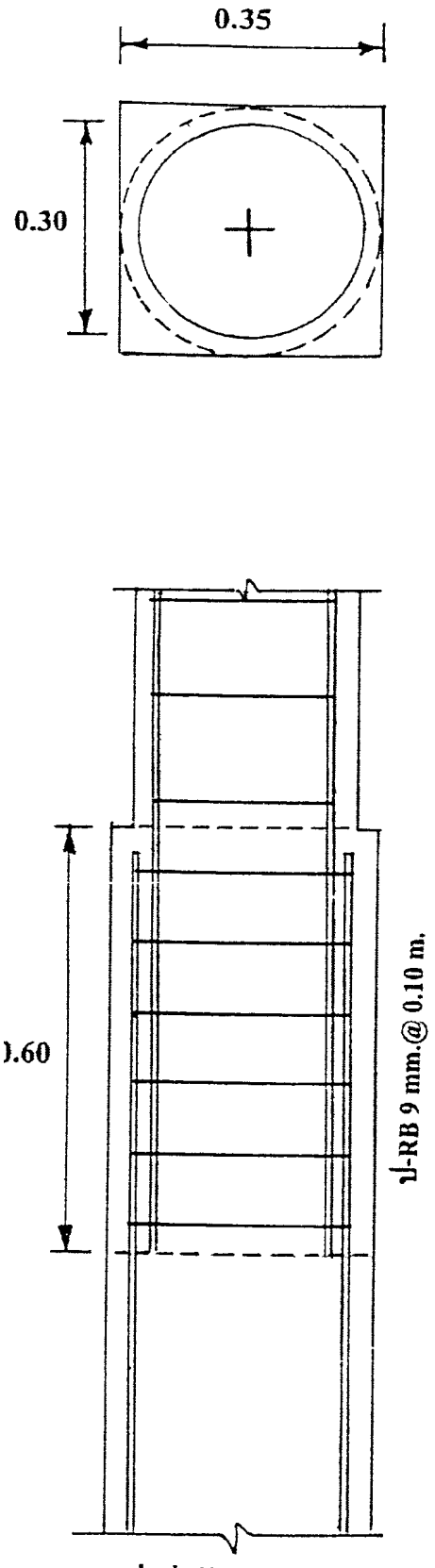
น้ำหนักดินถม $W_{BF} = 1690\times\left(0.35\times 0.35 - \frac{\pi}{4}\times 0.30^2\right)\times 1.50 = 131.3$ kg

น้ำหนักรวมลงเสาเข็ม $= 27{,}000 + 254.5 + 176.4 + 131.3 = 27{,}562.2$ kg $< 35{,}000$ kg

แสดงว่าฐานรากและเสาเข็มรับน้ำหนักได้

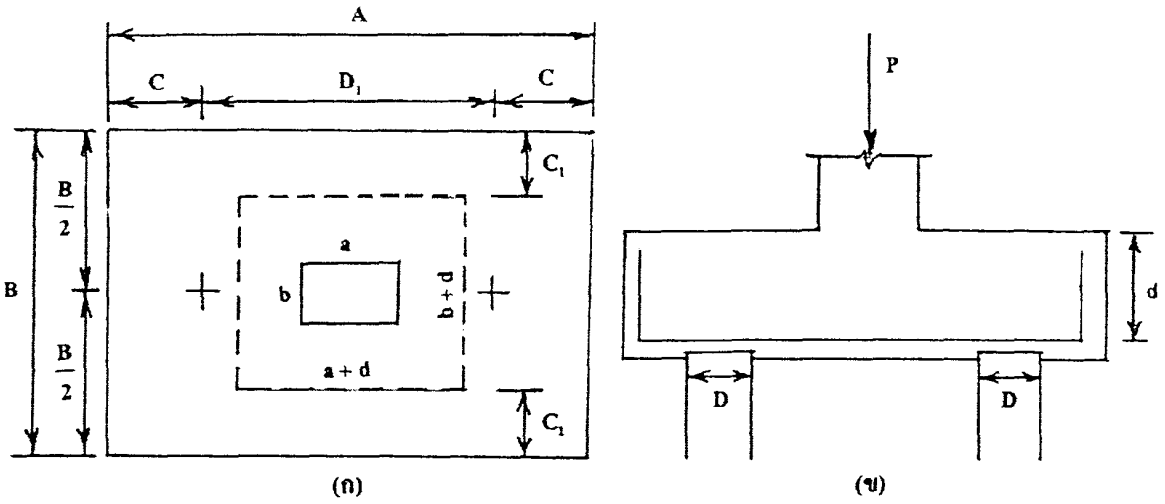
ขั้นตอนที่ 5 ได้ผลลัพธ์ฐานรากขนาด $0.35\times 0.35\times 0.60$

ขั้นตอนที่ 6 เขียนรายละเอียดฐานรากได้ดังรูปที่ 6.55 ซึ่งต้องเขียนเอง โปรแกรมไม่ได้เตรียมกรณีนี้เอาไว้



รูปที่ 6.55 ฐานรากบนเสาเข็มเจาะต้นเดียว

6.16. การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น



รูปที่ 6.56 ฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

พิจารณารูปที่ 6.56 เป็นฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น ขนาดหน้าตัดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม D ความลึกประสิทธิผล d ดังรูปที่ 6.56(ข)

การทำงานของโครงสร้างประเภทฐานรากนั้นจะต้องต้านทานแรงอยู่สามอย่างคือ แรงเฉือนแบบคาน (beam shear) ที่หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบนี้จะห่างจากขอบตอม่อออกไปเท่ากับระยะความลึกประสิทธิผล d แรงอย่างที่สองคือคือแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ (punching shear) ที่หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบนี้อยู่รอบๆ ตอม่อ ห่างจากขอบของตอม่อเป็นระยะ $\frac{d}{2}$ ดังแสดงในรูปที่ 6.56(ก) และสุดท้ายคือแรงดัดที่ขอบตอม่อ M ค่าความลึกประสิทธิผล d ต้องมากพอที่จะทำให้อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อคอนกรีตไม่เกินค่าสูงสุดหรือ $\rho \le 0.75\rho_b$ จึงต้องการเฉพาะเหล็กรับแรงดึง การโก่งตัวจึงน้อย หากฐานรากบางเกินไปจนต้องอาศัยเหล็กรับแรงอัดมาช่วย แม้จะไม่หักจากแรงดัดแต่การโก่งตัวมาก เสาเข็มด้านขอบฐานรากรับแรงน้อยกว่าเสาเข็มใกล้ตอม่อ การรับแรงโดยรวมของเสาเข็มจะน้อยลง

ระยะ C_1 ในรูปที่ 6.56 (ก) คือระยะห่างจากหน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุถึงขอบฐานราก ซึ่งต้องอยู่ในบริเวณที่มีเหล็กเสริมอยู่ นั่นคือ C_1 ต้องไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม ในบริเวณที่ไม่กัดกร่อน $C_1 \ge 0.075$ m แต่ถ้ามีการกัดกร่อนเช่นริมทะเล ใช้ $C_1 \ge 0.10$ m ดังนั้นเพื่อความสะดวกกับการใช้งานได้ทั้งสองกรณีจึงใช้ $C_1 = 0.10$ m

ความกว้างฐานราก B จึงต้องพิจารณาจากเหตุผลสองประการคือ ระยะ $\frac{B}{2}$ ต้องไม่น้อยกว่าขนาดของเสาเข็ม D และ B ต้องเท่ากับหรือมากกว่า $b + d + 2C_1$ ดังนั้น

$$\frac{B}{2} \geq D \quad \text{หรือ} \quad B \geq 2D$$

และ

$$B \geq b + d + 2C_1$$

ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม D_1 ควรจะอยู่ระหว่าง 1.5D ถึง 3D ระยะ 3D ได้ผลดีที่สุดซึ่งจะควบคุมด้วยระยะ 3D นี้

$$D_1 \geq 3D$$

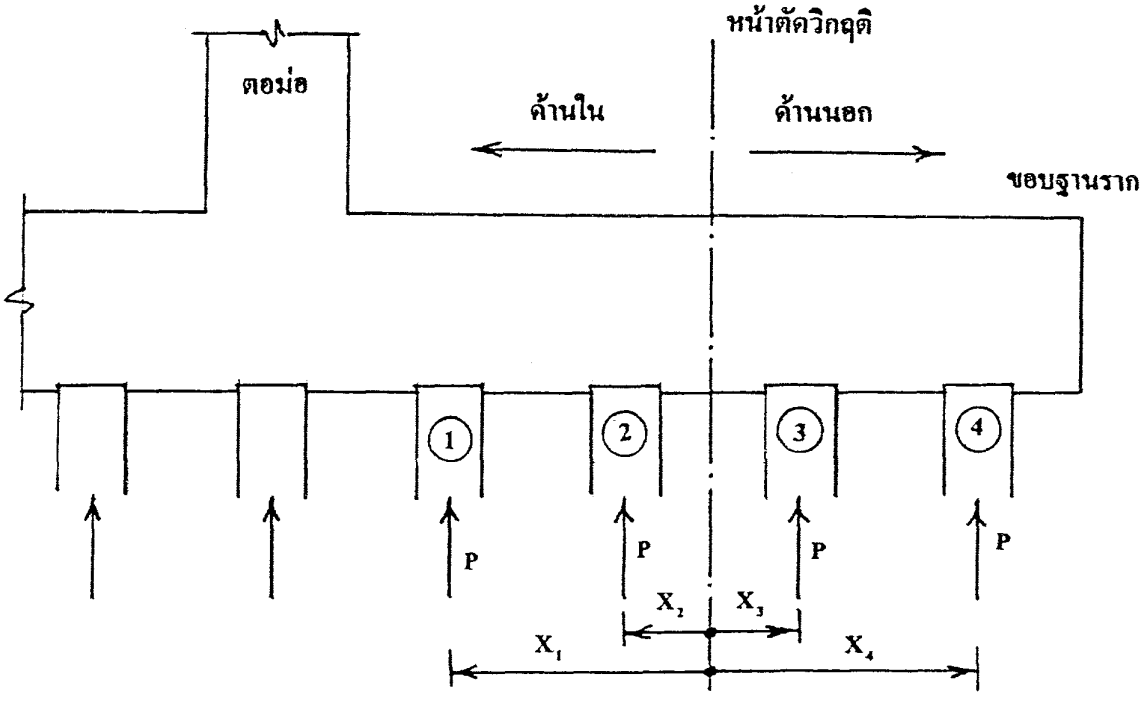
เมื่อ C เป็นระยะห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มต้นริมถึงขอบฐานราก ต้องไม่น้อยกว่าขนาดเสาเข็ม D

$$C \geq D$$

ความยาวขอบยาวของฐานราก A จะเกิดจากผลรวมของ D_1 กับ C สองข้าง ดังนั้น

$$A = D_1 + 2C$$

การพิจารณาแรงเฉือนจากเสาเข็ม



รูปที่ 6.57 การพิจารณาแรงเฉือนจากเสาเข็มที่ห่างจากหน้าตัดวิกฤตต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.57 แรงต้านเฉลี่ยของเสาเข็ม P ถือว่าเท่ากันทุกต้น ซึ่งเกิดจากการที่ฐานรากมีความหนามากเพียงพอให้การทรุดตัวของเสาเข็มลงพร้อมๆ เท่าๆ กัน หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนไม่ว่าจะเป็นแบบเจาะทะลุหรือแบบคานจะแบ่งเสาเข็มว่าเป็นด้านนอกกับด้านใน วิธีพิจารณาให้เสมือนไปยืนตรงหน้าตัดวิกฤต หากหันไปมองที่เสาตอม่อ เสาเข็มที่อยู่จากหน้าตัดวิกฤตไปหาเสาตอม่อ เรียกว่า ***เสาเข็มด้านใน*** เช่นเสาเข็มหมายเลข (1) และ (2) แล้วหากมองออกไปที่ขอบฐานราก เสาเข็มจากหน้าตัดวิกฤตไปยังขอบฐานรากเรียกว่า ***เสาเข็มด้านนอก*** เช่นเสาเข็มหมายเลข (3) และหมายเลข (4)

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มไปยังหน้าตัดวิกฤต หากเป็นเสาเข็มด้านนอกจะเป็นบวก เช่น x_3 และ x_4 หากเป็นเสาเข็มด้านในจะเป็นลบ เช่น x_1 และ x_2

กำหนดให้ V = แรงเฉือนจากเสาเข็ม, kg

P = แรงต้านทานเฉลี่ยของเสาเข็มที่ยอมให้ , kg/ต้น

D = ขนาดหน้าตัดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม, m

x = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงหน้าตัดวิกฤต, m เสาเข็มด้านนอกเป็นบวก ด้านในเป็นลบ

เมื่อ $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนจากเสาเข็มไม่มี $V = 0$

เมื่อ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนจากเสาเข็ม $V = P\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

เมื่อ $x \ge \frac{D}{2}$ แรงเฉือนจากเสาเข็ม $V = P$

หากพิจารณาจากรูปที่ 6.57 แรงจากเสาเข็มหมายเลข (1) อาจจะไม่มีผลเป็นแรงเฉือน V เพราะอาจจะมีค่า $x_1 \le \frac{D}{2}$ แรงจากเสาเข็มหมายเลข (2) อาจจะมีผลบ้าง อยู่ระหว่าง 0 กับ $\frac{P}{2}$ เมื่อ $-\frac{D}{2} \le x_2 \le 0$ แรงจากเสาเข็มหมายเลข (3) อาจจะมีผลบ้างอยู่ระหว่าง $\frac{P}{2}$ กับ P เมื่อ $0 \le x_3 \le \frac{D}{2}$ แรงจากเสาเข็มหมายเลข (4) อาจจะมีผลเต็มที่หาก $x_4 \ge \frac{D}{2}$ สังเกตว่าเมื่อศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ตรงหน้าตัดวิกฤตนั้นแรงเฉือน $V = \frac{P}{2}$

ย้อนกลับไปดูรูปที่ 6.56 ศูนย์กลางเสาเข็มห่างจากหน้าตัดวิกฤต x เท่ากันทั้งสองต้น ตามรูปนั้นเสาเข็มทั้งสองต้นเป็นเสาเข็มภายนอก ระยะ x หาได้ดังนี้

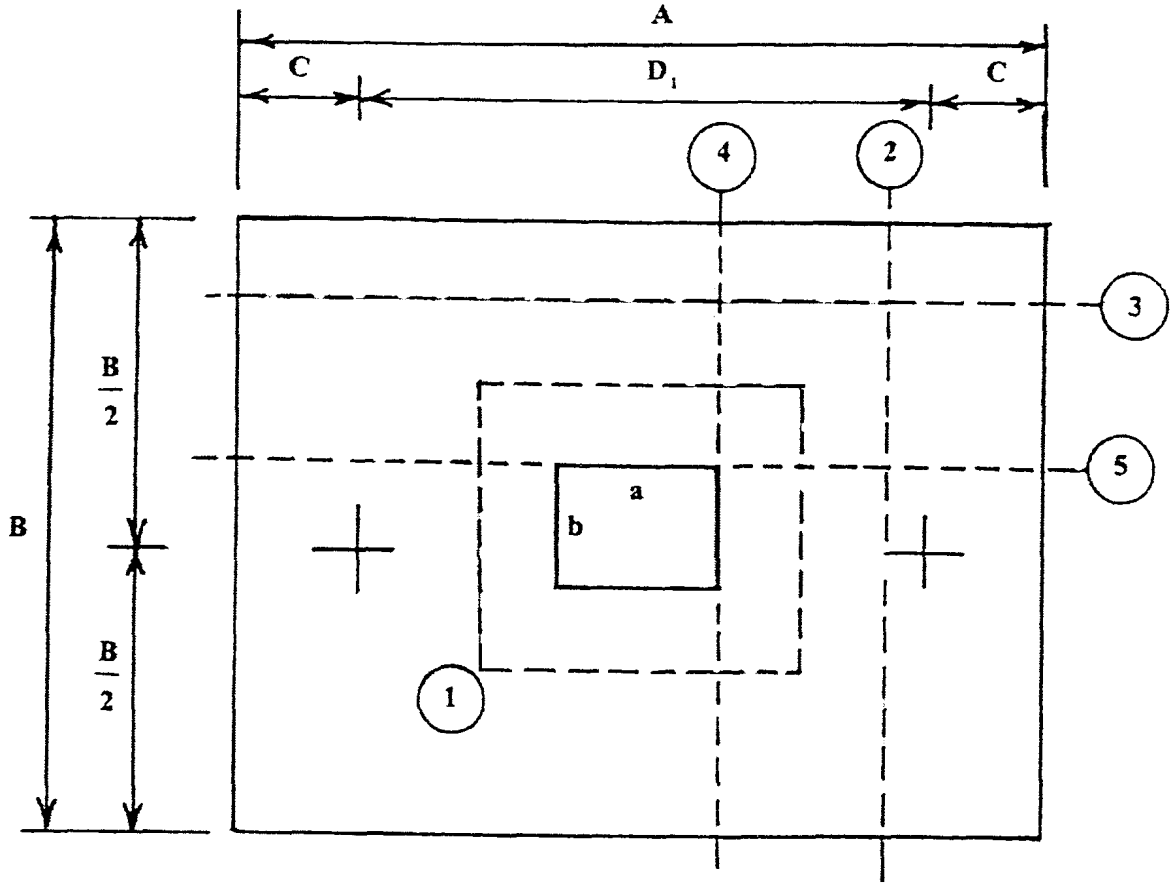
$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - \frac{d}{2} = \frac{D_1 - a - d}{2}$$

ค่า x ที่คำนวณได้อาจจะเป็นลบก็ได้ เมื่อทราบค่า x แล้วนำไปคำนวณหาแรงเฉือนต่อไป และเนื่องจากมีเสาเข็มสองต้น

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุคือ $V = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุคือ $V = 2P\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \geq \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุคือ $V = 2P$



รูปที่ 6.58 หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนและแรงดัด

จากรูปที่ 6.58 หน้าตัดวิกฤต (1) สำหรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุห่างจากขอบตอม่อระยะ $\frac{d}{2}$ ใช้ในการคำนวณหาค่าความลึกประสิทธิผล d

หน้าตัดวิกฤต (2) สำหรับแรงเฉือนแบบคานเนื่องจากเสาเข็ม 1 ต้นทางขวา หน้าตัดวิกฤตห่างขอบตอม่อระยะทาง d ใช้ในการคำนวณหาค่าความลึกประสิทธิผล d

หน้าตัดวิกฤต (3) สำหรับแรงเฉือนแบบคาน แต่ไม่มีแรงจากเสาเข็มเลย จึงไม่ต้องพิจารณา

หน้าตัดวิกฤต (4) ตรงขอบของตอม่อ ใช้ในการหาแรงดัด M_4 จากแรงต้านของเสาเข็ม

$$M_4 = P\frac{D_1 - a}{2} \leq RBd^2$$

ความลึกประสิทธิผลที่ต้องการ

$$d = \sqrt{\frac{M_4}{RB}} \geq 30 \text{ cm}$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องใช้

$$A_{s1} \geq \frac{M_4}{f_s jd}$$

เหล็กเสริม SR-24 มี $\rho_{temp} = 0.0025$
เหล็กเสริม SD-30 มี $\rho_{temp} = 0.0020$
เหล็กเสริม SD-40 มี $\rho_{temp} = 0.0018$
ให้ความหนาฐานรากเป็น T
ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

$$A_{s1} = \rho_{temp} Bt$$

สำหรับเหล็กทางขวางขนานขอบ B นั้นให้ใช้เหล็กเสริมขั้นต่ำ กล่าวคือ

$$A_{s2} = \rho_{temp} At$$

จัดเหล็กเสริมลงฐานราก ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมไม่เกิน 45 cm

ต้องตรวจสอบระยะฝังของเหล็กเสริม A_{s1} ที่วางตัวขนานขอบยาว A โดยวัดจากหน้าตัดวิกฤต (4) ถึงห่างจากขอบขวาของฐานรากระยะ 0.10 เมตร ที่เป็นระยะหุ้ม นั่นคือระยะฝังจริงคือ

$$L_d = \frac{A - a}{2} - 0.10 \text{ m}$$

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}}$$

ตรวจสอบให้ $L_d \geq \ell_{db}$ หากพบว่า $L_d < \ell_{db}$ ให้เพิ่มระยะ D_1 มากขึ้น หรือปรับลดขนาดเหล็กให้เล็กลง

เหล็กเสริม A_{s1} เป็นเหล็กเสริมเอกจึงต้องพยายามจัดให้อยู่ล่างสุดเพื่อให้ระยะความลึกประสิทธิผล d มากที่สุด ส่วนเหล็ก A_{s2} เป็นเหล็กกันร้าววางซ้อนถัดขึ้นมา ควรเลือกใช้เหล็กเล็กๆ แต่ถ้าถี่เกินไปให้เลือกเหล็กที่โตขึ้น

หากการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น ใช้ความกว้างของฐานราก B = 2D หรือสองเท่าของขนาดเสาเข็มแล้ว ฐานรากอาจจะมีสภาพเป็นคานลึก โดยเหล็กขนานขอบยาว A เป็นเหล็กรับแรงดัด เหล็กรับแรงเฉือนจะมีทั้งเหล็กทางตั้งที่งอเหล็กขนานขอบกว้าง B ขึ้นมา และเหล็กทางนอนซึ่งต้องการมากกว่าเหล็กทางตั้งเสียอีก

ถ้ากำหนดความกว้าง $B \geq 2D$ และ $B \geq b + d + 2C_1$ ให้หน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุครอบอยู่ในเหล็กเสริมของฐานราก ก็จะไม่มีสภาพของคานลึกอีก สามารถออกแบบได้ดังอธิบายมาแล้ว

ฐานรากวางบนเสาเข็ม 2 ต้น จะมีแนวโน้มในการพลิกทางด้านข้าง หากมีเหล็กสมอ (dowel) ที่เป็นเหล็กเสริมธรรมดาก็ให้ล้วงฝังเข้าในเนื้อฐานรากโดยทำให้บานออกจะรูดได้ยากขึ้น แต่ถ้าไม่มีเหล็กสมอมีแต่ลวดอัดแรง ให้สะกัดหัวเสาเข็มแล้วเชื่อมเหล็กสมอเข้ากับลวดอัดแรงแทน

ลำดับขั้นตอนการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น

ขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบข้อมูลที่ทราบก่อนแล้ว

$f_c^{'}$ = กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน, ksc

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

P_c = กำลังต้านทานที่ยอมให้ของเสาเข็ม, kg/ต้น

DL = น้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน, kg

LL = น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน, kg

P = DL + LL = น้ำหนักบรรทุกใช้งานบนตอม่อ, kg

a = ขนาดหน้าตัดตอม่อสี่เหลี่ยม แนวนอนตามรูปที่ 82, m

b = ขนาดหน้าตัดตอม่อสี่เหลี่ยม แนวตั้งตามรูปที่ 82, m

กรณีที่ตอม่อเป็นเสากลม a = b = เส้นผ่านศูนย์กลางเสาตอม่อ, m

L = ความลึกของท้องฐานรากที่สมมติที่ระดับหัวเสาเข็ม, m

D = ขนาดของเสาเข็มสี่เหลี่ยมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มกลม

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

$C \geq D$ = ระยะห่างจากเสาเข็มต้นริมถึงขอบฐานราก

คำนวณค่าเบื้องต้นต่อไปนี้

$$f_c = 0.375 f_c^{'} \leq 65 \text{ ksc}$$

$$f_s = 0.5 f_y \leq 1700 \text{ ksc}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}}$$

$$j = 1 - \frac{k}{3}$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj$$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมกันแล้ว 1.10 ถึง 1.20 ของน้ำหนักที่ลงตอม่อ จากนั้นหาจำนวนเสาเข็มที่ต้องการโดยประมาณดังนี้

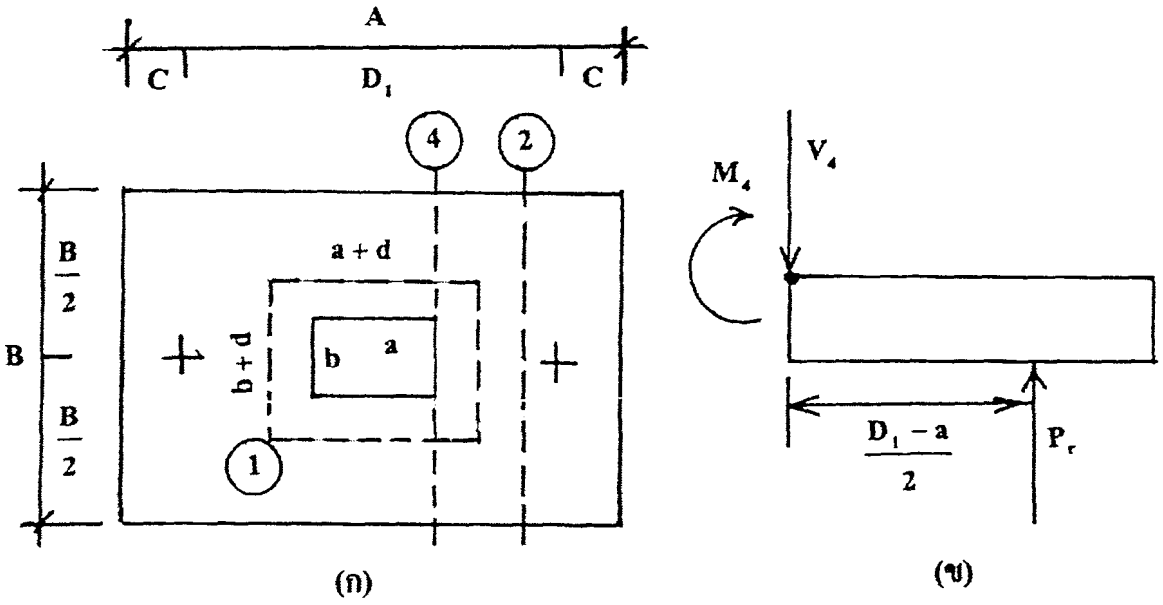
$$N_p = \frac{1.1P}{P_c} \text{ ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มเสมอ}$$

ถ้า $N_p = 1$ ให้ไปออกแบบเป็นฐานรากบนเสาเข็ม 1 ต้น

ถ้า $N_p = 2$ ให้ดำเนินการต่อไป

ถ้า $N_p > 2$ ให้ไปออกแบบตามกรณีนั้นๆ

เขียนแปลนฐานรากตามรูปที่ 6.59



รูปที่ 6.59 ฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น

ระยะ $C \geq D$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานรากไม่น้อยกว่าขนาดเสาเข็ม

ระยะ $D_1 \geq 3D$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็มไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดเสาเข็ม (อาจจะน้อยกว่าได้)

ดังนั้นระยะ $A = D_1 + 2C$ ซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นบ้างให้เป็นตัวเลขลงตัว

ความหนาของฐานรากบนเสาเข็มอย่างน้อย 0.40 เมตร โดยระยะหุ้ม $C_1 = 0.10$ เมตร ดังนั้นความลึกประสิทธิผลขั้นต่ำคือ $0.40 - 0.10 = 0.30$ m $= 30$ cm

ความกว้างขั้นต่ำ B หาจากค่ามากของ

$$B \geq 2D$$

$$B \geq b + d + 2C_1$$

$$B \geq b + 0.30 + 2 \times 0.10 = b + 0.50$$

หาน้ำหนักสุทธิ

$$P = DL + LL$$

แรงต้านเฉลี่ยสุทธิของเสาเข็ม

$$P_r = \frac{P}{N_p} = \frac{P}{2}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณแรงเฉือน $V_4 = P_r$ และแรงดัด $M_4 = V_4 \frac{D_1 - a}{2}$

หาความลึกประสิทธิผลจากการดัด

$$d = \sqrt{\frac{M_4}{RB}} \geq 30 \text{ cm}$$

ค่า d ที่ได้หากน้อยกว่า 30 cm ให้ใช้ d = 30 cm ถ้ามากกว่าให้เลือกค่ามากนั้น อย่าลืมปรับความกว้างฐานรากใหม่ตาม $B \geq b + d + 2C_1$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบเจาะทะลุนั้นจะห่างจากขอบตอม่อเป็นระยะ $\frac{d}{2}$ โดยรอบ ดังนั้นหาระยะห่าง x จากศูนย์กลางเสาเข็มแต่ละต้นไปยังหน้าตัดวิกฤต ถ้าเสาเข็มค่อนไปด้านในเลยหน้าตัดวิกฤตไปทางตอม่อ ค่า x จะเป็น ลบ แต่ถ้าเลยหน้าตัดวิกฤตออกไปด้านขอบฐานราก ค่า x จะเป็นบวก หาแรงเฉือนแบบเจาะทะลุจากเสาเข็มแต่ละต้นดังนี้

ถ้า $x < -\frac{D}{2}$ $\quad q_1 = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2}$ $q_1 = P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ $\quad q_1 = P_r$

โดยที่ P_r = แรงต้านของเสาเข็มแต่ละต้น , kg/ต้น

q_1 = แรงต้านของเสาเข็มตามระยะห่างจากหน้าตัดวิกฤต, kg/ต้น

D = ขนาดเสาเข็ม, cm

$V_p = \sum q_1 = 2q_1$ = แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ, kg

เมื่อได้แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มทุกต้น V_p แล้ว หากำลังที่คอนกรีตรับได้

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d$$

เมื่อ V_{cp} = แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้, kg

f_c' = กำลังคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานอายุ 28 วัน, ksc

d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก, cm

$b_w = B$ = ความกว้างฐานรากด้านรับแรงเฉือนแบบคาน, cm

b_o = เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตแบบเจาะทะลุ, cm

$b_o = 2(a + d) + 2(b + d) = 2(a + b + 2d)$ สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$b_o = \pi(a + d)$ สำหรับเสาหน้าตัดกลม

a = ด้านสั้นของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสากลม, cm

b = ด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, cm

ถ้าตรวจสอบพบว่า $V_{cp} > V_p$ แสดงว่าความหนาของฐานรากเพียงพอที่จะรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ถ้าตรวจสอบพบว่า $V_{cp} < V_p$ แสดงว่าความหนาของฐานรากไม่เพียงพอ ให้เพิ่มค่า d ขึ้นอีกเช่นคราวละ 5 cm แล้วตรวจสอบใหม่จนกว่าจะพบ $V_{cp} > V_p$ จึงจะไปขั้นตอนถัดไปได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤตจะห่างจากขอบตอม่อเป็นระยะ d

หน้าตัดวิกฤตขนานขอบกว้างของฐานราก

หน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบคานนั้นจะห่างจากขอบตอม่อเป็นระยะ d ดังนั้นหาระยะห่าง x จากศูนย์กลางเสาเข็มแต่ละต้นไปยังหน้าตัดวิกฤต ถ้าเสาเข็มค่อนไปด้านในเลยหน้าตัดวิกฤตไปทางตอม่อ ค่า x จะเป็น ลบ แต่ถ้าเลยหน้าตัดวิกฤตออกไปด้านขอบฐานราก ค่า x จะเป็นบวก หาแรงเฉือนแบบคานจากเสาเข็มแต่ละต้นดังนี้

ถ้า $x < -\frac{D}{2}$ $\quad q_1 = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} \le x \le \frac{D}{2}$ $\quad q_1 = P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D_p}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ $\quad q_1 = P_r$

โดยที่ P_r = แรงต้านของเสาเข็มแต่ละต้น , kg/ต้น

q_1 = แรงต้านของเสาเข็มตามระยะห่างจากหน้าตัดวิกฤต, kg/ต้น

D = ขนาดเสาเข็ม, cm

$V_{b2} = \sum q_1 = q_1 =$ แรงเฉือนแบบคาน, kg

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ $V_{c2} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd$ ระยะต่างๆ หน่วยเซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบแรงต้านเฉลี่ยของเสาเข็มว่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้

หาน้ำหนักจริงของตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมกับน้ำหนักลงตอม่อ หารด้วยจำนวนเสาเข็มต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้

$$q = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{N_p} \le P_c$$

เมื่อ q = แรงต้านของเสาเข็มที่เกิดขึ้นจริง, kg/ต้น

P_c = แรงต้านทานของเสาเข็มที่ยอมให้, kg/ต้น

$N_p = 2$ = จำนวนเสาเข็ม, ต้น

a = ความกว้างของตอม่อขนานขอบยาวของฐานราก, m

b = ความยาวของตอม่อขนานขอบสั้นของฐานราก, m

d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก, m

H = ความลึกของท้องฐานรากวัดจากระดับดิน, m

H_F = ความหนาของฐานราก (ไม่รวมคอนกรีตหยาบ), m

$H_P = H\text{-}H_F$ = ความยาวของตอม่อและความหนาของดินถม, m

P = น้ำหนักจากโครงสร้างด้านบนถ่ายลงตอม่อ, kg

$W_F = 2400BLH_F =$ น้ำหนักของฐานราก, kg

$W_p = 2400abH_p =$ น้ำหนักของตอม่อ, kg

$W_{BF} = 1690H_p(BL - ab) =$ น้ำหนักดินถม, kg

ถ้าตรวจสอบพบว่า $q > q_a$ ให้เพิ่มจำนวนเสาเข็มแล้วไปออกแบบฐานรากบนเสาเข็มมากกว่า 2 ต้น

ขั้นตอนที่ 7 หาเหล็กเสริม

เมื่อ $p_r =$ แรงต้านเฉลี่ยสุทธิของเสาเข็ม, kg

$D_1 =$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม, cm

a = ขนาดหน้าตัดตอม่อขนานขอบยาว, cm

$H_F =$ ความหนาของฐานราก, cm

d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก , cm (ประมาณ $H_F - 10$

$V_4 = p_r =$ แรงเฉือนที่ขอบตอม่อ, kg

$M_4 = p_r\left(\frac{D_1 - a}{2}\right) =$ โมเมนต์ดัดที่ขอบตอม่อ, $kg \cdot cm$

หาเหล็กขนานขอบยาวของฐานราก

$$A_s = \frac{M_4}{f_s jd} \ cm^2$$

เลือกขนาดเหล็ก ทราบ $A_{s1}, \sum O_1$ ซึ่งเป็นเนื้อที่หน้าตัดเหล็กหนึ่งเส้น และเส้นรอบรูปเหล็กหนึ่งเส้น ตามลำดับ หาหน่วยแรงยึดเหนี่ยว

กรณีเหล็กข้ออ้อย $u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 35 \ ksc$

กรณีเหล็กผิวเรียบ $u = \frac{3.23}{2}\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \succ 11 \ ksc$

หาเส้นรอบรูปรวมที่ต้องการ

$$\sum O = \frac{V_4}{ujd}$$

หาจำนวนเส้นขนานขอบยาว

$N_1 = \frac{A_s}{A_{s1}}$ ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มเสมอ

$N_2 = \frac{\sum O}{\sum O_1}$ ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มเสมอ

เลือกค่ามากระหว่าง N_1 กับ N_2 ตรวจสอบระยะเรียงอย่าให้เกิน 45 ซม โดยเส้นริมห่างขอบฐานราก 10 ซม โดยปกติค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะเรียงคือ 15 ซม

$$s = \frac{A_b(B - 2\times 0.10)}{A_{s4}} \text{ หน่วย m}$$

หาระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c^{'}}} \geq 30 \text{ cm}$$

ระยะฝังพื้นฐานจริง

$$L_{db} = \frac{A}{2} - \frac{a}{2} - 0.10 \text{ หน่วย m}$$

ถ้า $L_{db} < \ell_{db}$ แสดงว่าเลือกเหล็กโตเกินไปให้ลดขนาดเหล็กลงจนกว่า $L_{db} \geq \ell_{db}$ หรือเพิ่มระยะ $D_1 > 3D$ แล้วตรวจสอบใหม่

หาเหล็กขนานขอบสั้นของฐานราก

เหล็กเสริม SR-24 มี $\rho_{temp} = 0.0025$

เหล็กเสริม SD-30 มี $\rho_{temp} = 0.0020$

เหล็กเสริม SD-40 มี $\rho_{temp} = 0.0018$

ให้ความหนาฐานรากเป็น t

ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

$$A_{s1} = \rho_{temp}Bt$$

สำหรับเหล็กทางขวางขนานขอบ B นั้นให้ใช้เหล็กเสริมขั้นต่ำ กล่าวคือ

$$A_{s2} = \rho_{temp}At$$

ปรับเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมใหม่

$$A_{sB} = \frac{2A}{A+B}A_{s2}$$

จัดเหล็กเสริมลงฐานราก ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมไม่เกิน 45 cm

ตัวอย่างที่ 16 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $I - 0.26\times 0.26\times 21$ m รับน้ำหนักที่ยอมให้ 25 ตัน/ต้น ตอม่อขนาด 0.25×0.25 m^2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 25 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 15 ตัน หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมประมาณ 1.50 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 210$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 4000$ ksc

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 210$ ksc

$f_c = 0.375f_c^{'} = 0.375\times 210 = 78.75 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 4000$ ksc

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 4000 = 2000 \Rightarrow 1700$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{210}} = 9.32$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1700}{9.32 \times 65}} = 0.263$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.263}{3} = 0.912$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.263 \times 0.912 = 9.372 \text{ ksc}$$

$P_c = 25{,}000$ kg / pile

DL = 25,000 kg

LL = 15,000 kg

P = DL + LL = 25,000 + 15,000 = 40,000 kg

a = b = 0.25 m = 25 cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนัก น้ำหนักตอม่อ น้ำหนักดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2P}{P_c} = \frac{1.2 \times 40{,}000}{25{,}000} = 1.92 \Rightarrow 2 \text{ ต้น}$$

จัดแปลนฐานรากโดยให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$$D_1 \geq 3D = 3 \times 0.26 = 0.78 \Rightarrow 0.80 \text{ m}$$

ระยะห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$$C \geq D = 0.26 \Rightarrow 0.30 \text{ m}$$

ขอบยาวของฐานราก

$$A = D_1 + 2C = 0.80 + 2 \times 0.30 = 1.40 \text{ m}$$

ให้ฐานรากหนา t = 0.40 m ความลึกประสิทธิผล d = 0.40 – 0.10 = 0.30 m = 30 cm

พิจารณารูปที่ 6.60 ขนาดหน้าตัดตอม่อ a = b = 0.25 m = 25 cm ความกว้างของฐานรากพิจารณาจากค่ามากในสองค่าต่อไปนี้

$$B \geq 2D = 2 \times 0.26 = 0.52 \text{ m}$$

$$B \leq a + d + 2C_1 = 0.25 + 0.30 + 2 \times 0.10 = 0.75 \text{ m}$$

ให้ความกว้างเริ่มต้นของฐานรากอยู่ที่ B = 0.75 m และแบ่งครึ่งที่ระยะ $\frac{B}{2} = 0.375$ m

น้ำหนักสุทธิ

$$P = DL + LL = 25,000 + 15,000 = 40,000 \ \ kg$$

แรงต้านเฉลี่ยสุทธิของเสาเข็ม

$$P_r = \frac{P}{N_p} = \frac{40,000}{2} = 20,000 \ \ kg/pile$$

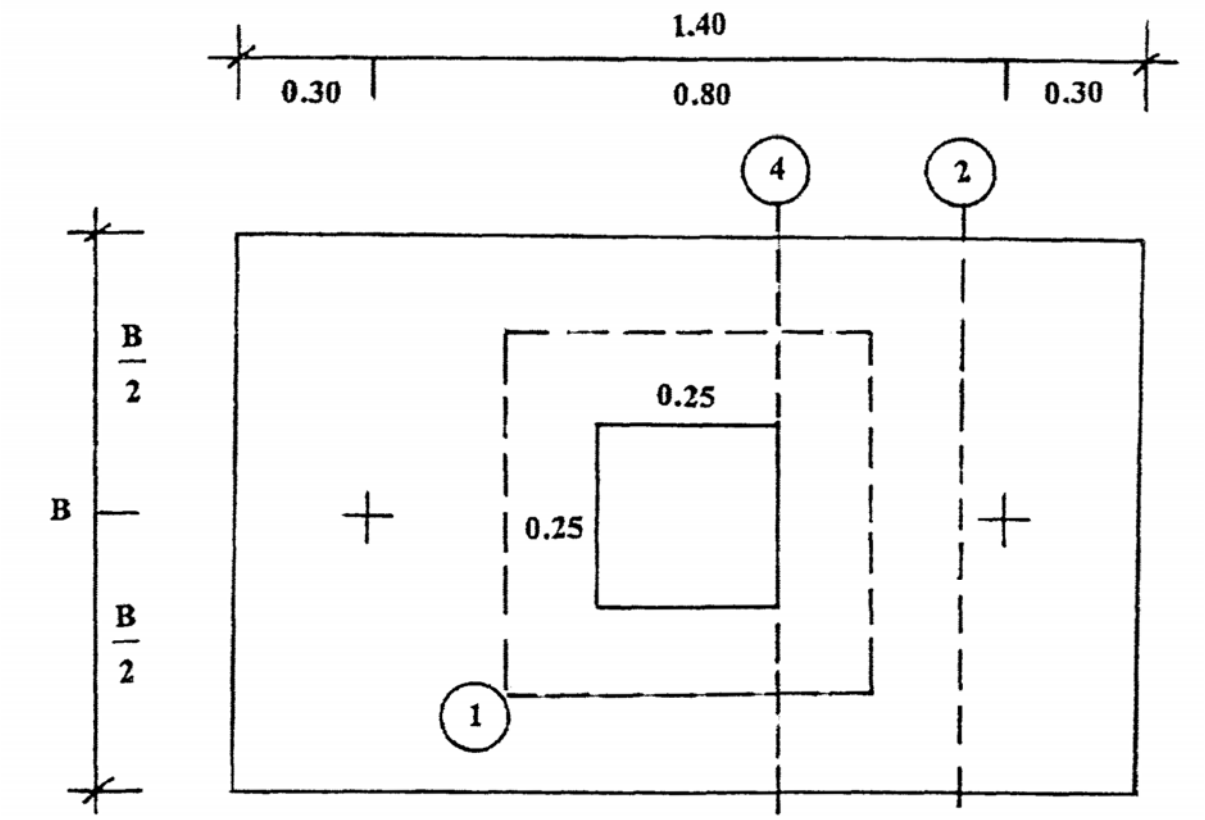
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณแรงเฉือน

$$V_4 = P_r = 20,000 \ \ kg$$

แรงดัดที่ขอบตอม่อ

$$M_4 = V_4 \frac{D_1 - a}{2}$$

$$M_4 = 20,000 \times \frac{0.80 - 0.25}{2} = 5,500 \ \ kg.m$$



รูปที่ 6.60 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น ตัวอย่างที่ 6.12

หาความลึกประสิทธิผลจากการดัด

$$d = \sqrt{\frac{M_4}{Rb}} = \sqrt{\frac{5,500 \times 100}{9.372 \times 75}} = 27.97 \ \ cm \Rightarrow 35 \ \ cm$$

ความหนาฐานรากรวมระยะหุ้มแล้ว $H_F = d + 10 = 35 + 10 = 45 \ \ cm$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะจากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - \frac{d}{2} = \frac{0.80}{2} - \frac{0.25}{2} - \frac{0.35}{2} = 0.10 \text{ m}$$

ครึ่งหนึ่งของขนาดเสาเข็ม

$$\frac{D}{2} = \frac{0.26}{2} = 0.13$$

พบว่า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 20{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.26}\right) = 35{,}384.61538 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (25 + 25 + 2 \times 35) = 240 \text{ cm}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุที่คอนกรีตรับได้

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{210} \times 240 \times 35 = 64{,}515.60927 \text{ kg} > V_p = 35{,}384.61538 \text{ kg}$$ ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน หน้าตัดวิกฤตห่างจากขอบตอม่อระยะ d

ระยะจากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{0.80}{2} - \frac{0.25}{2} - 0.35 = -0.075 \text{ m}$$

ครึ่งหนึ่งของขนาดเสาเข็ม

$$\frac{D}{2} = \frac{0.26}{2} = 0.13$$

พบว่า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 20{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.075}{0.26}\right) = 4{,}230.769231 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Bd = 0.29\sqrt{210} \times 75 \times 35 = 11{,}031.56055 \text{ kg} > V_b = 4{,}230.769231 \text{ kg}$$ ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบแรงต้านเฉลี่ยของเสาเข็มว่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้

ตอม่อยาว $H_p = 1.50 - 0.45 = 1.05$ m

น้ำหนักตอม่อ $W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.25 \times 0.25 \times 1.05 = 158$ kg

น้ำหนักฐานราก $W_F = 2400ABt = 2400\times1.40\times0.75\times0.45 = 1593$ kg

น้ำหนักดินถม $W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(1.40\times0.75-0.25\times0.25)\times1.05 = 1752$ kg

น้ำหนักบรรทุกรวม $P + W_p + W_F + W_{BF} = 40{,}000+158+1593+1752 = 43{,}503$ kg

แรงต้านเฉลี่ยของเสาเข็ม

$$q = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{N_p} = \frac{43{,}503}{2} = 21{,}751.5 \text{ kg} < P_c = 25{,}000 \text{ kg}$$ ใช้ได้

ขั้นตอนที่ 7 หาเหล็กเสริม

หาเหล็กขนานขอบยาว

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{5{,}500\times100}{1{,}700\times0.912\times35} = 10.136 \text{ cm}$$

$$\min A_{s4} = 0.0018BH_F = 0.0018\times75\times45 = 6.075 \text{ cm}$$

เลือก DB 16 mm มี $A_{s1} = 2.01$ cm^2, $\sum O_1 = 1.6\times\pi = 5.026$ cm มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยว

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\frac{\sqrt{210}}{1.6} = 29.25 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$\sum O = \frac{V_4}{ujd} = \frac{20{,}000}{29.25\times0.912\times35} = 21.421 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์ $N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{10.136}{2.01} = 5.04 \Rightarrow 6$ เส้น DB 16 mm

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน $N_2 = \frac{\sum O}{\sum O_1} = \frac{21.421}{5.026} = 4.26 \Rightarrow 5$ เส้น DB 16 mm

เหล็กเสริมขนานขอบยาวคือ $6-$ DB 16 mm ระยะห่างระหว่างเส้น

$$s = \frac{B-2\times0.10}{N-1} = \frac{75-0.20}{6-1} = 11 \text{ cm} < 45 \text{ cm}$$

หาเหล็กขนานขอบสั้น

$$A_{s,temp} = \rho_{temp}At = 0.0018\times140\times45 = 11.34 \text{ cm}^2$$

สมมติใช้เหล็กเสริม DB 16 mm แต่ละเส้นมี $A_b = 2.01$ cm^2 หาระยะเรียงของเหล็ก

$$s = \frac{A_b(A-2\times0.10)}{A_{s,temp}} = \frac{2.01\times(1.40-2\times0.10)}{11.34} = 0.212 \text{ m}$$

หรือใช้เหล็ก DB 16 mm จำนวน $\frac{11.34}{2.01} = 5.64 \Rightarrow 6$ เส้น

ตรวจสอบระยะฝังของเหล็กเสริมขนานขอบยาว

ระยะฝังพื้นฐาน

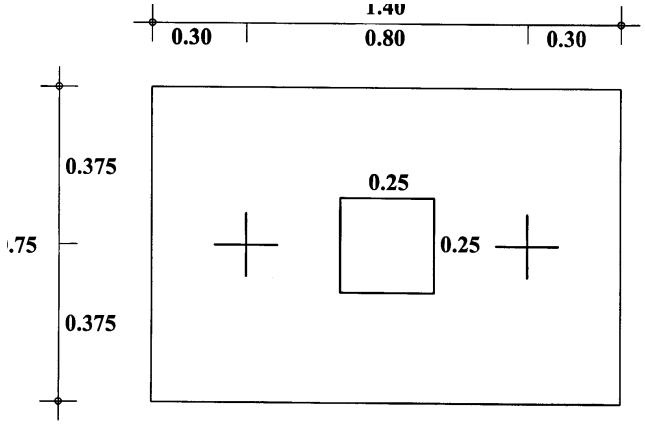
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times2.01\times\frac{4000}{\sqrt{210}} = 33.3 \text{ cm}$$

ระยะฝังพื้นฐานจริง

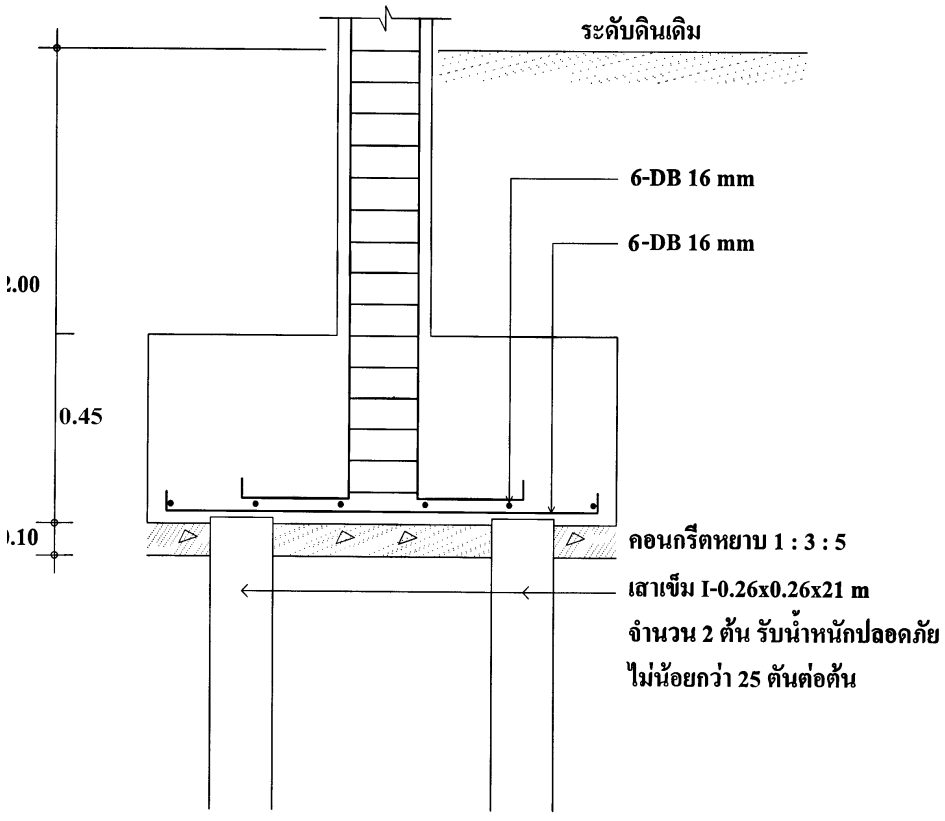
$$L_{db} = \frac{A}{2} - \frac{a}{2} - 0.10 = \frac{1.40}{2} - \frac{0.25}{2} - 0.10 = 0.625 \text{ m} = 62.5 \text{ cm} > \ell_{db} = 33.3 \text{ cm}$$

แสดงว่าระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 8 เขียนรายละเอียดฐานราก



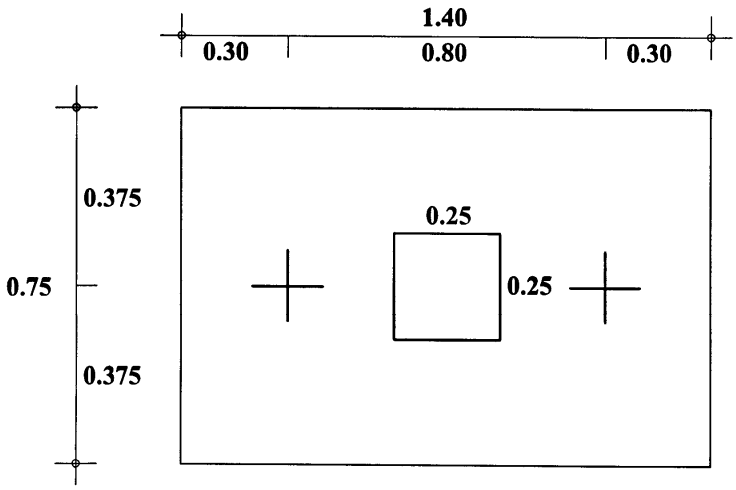
F-2 PLAN



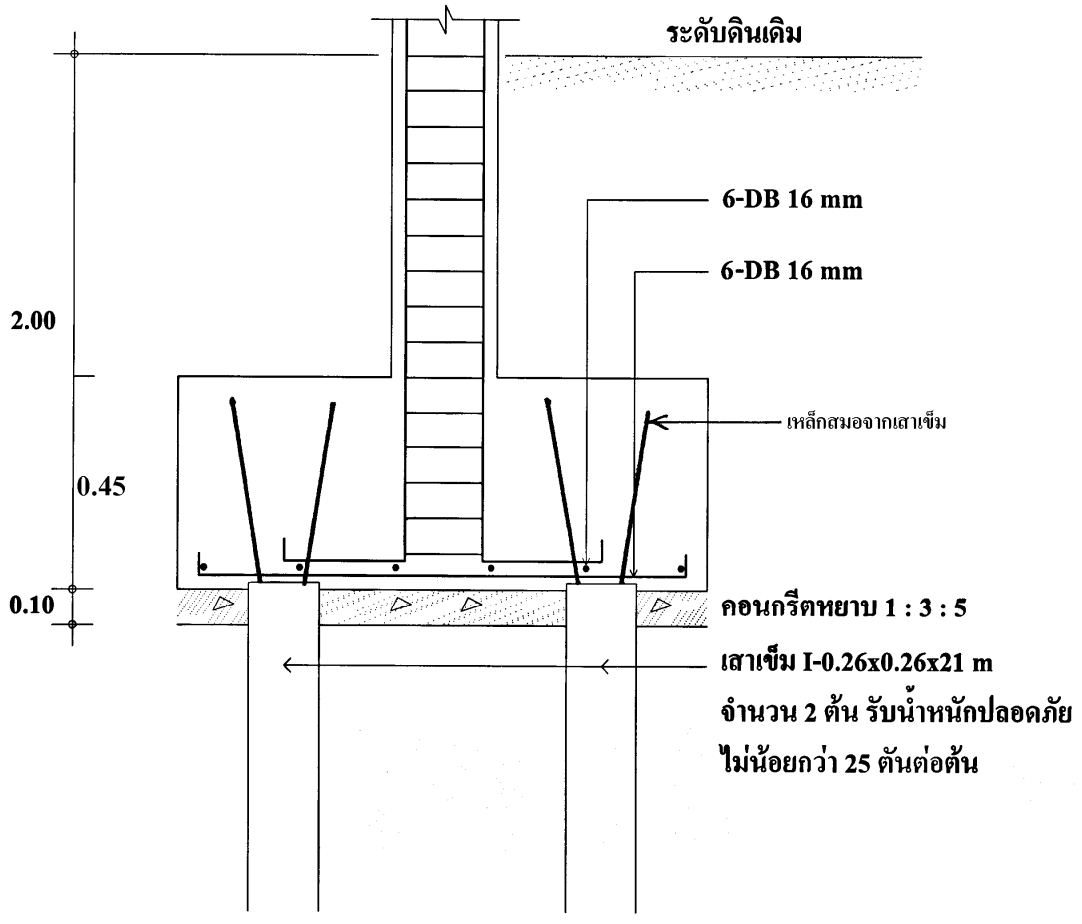
F-2 SECTION

FOOTING F-2

รูปที่ 6.61 ฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้น



F-2 PLAN



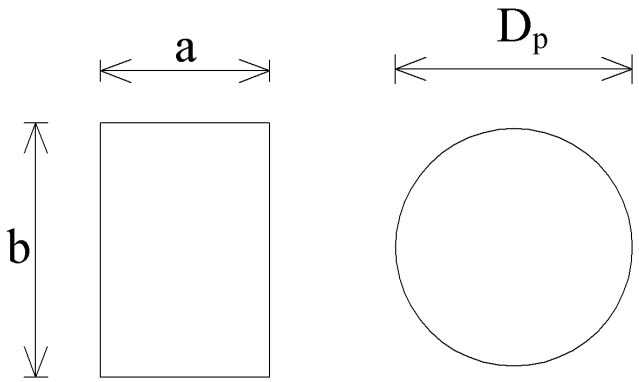
F-2 SECTION

FOOTING F-2

รูปที่ 6.62 ฐานรากบนเสาเข็ม 2 ต้นที่เติมเหล็กสมอจากเสาเข็ม

6.17 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้น

การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้น ยุ่งยากในการหาแรงเฉือน ความกว้างของหน้าตัดวิกฤต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตอม่อเป็นสี่เหลี่ยม ดังนั้นในขั้นแรกต้องแปลงหน้าตัดจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าไปเป็นวงกลมโดยให้เนื้อที่เท่ากัน



รูปที่ 6.62 การแปลงเสาตอม่อสี่เหลี่ยมไปเป็นวงกลมโดยให้เนื้อที่เท่ากัน

$$\frac{\pi}{4}D_p^2 = ab$$

$$D_p = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}}$$

เมื่อ $D =$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

$C \geq D :-$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มต้นริมถึงขอบฐานราก ไม่น้อยกว่าขนาดเสาเข็ม

$D_1 \geq 3D :-$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม ไม่น้อยกว่า 3 เท่าขนาดเสาเข็ม

$C_1 \geq 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} :-$ ระยะหุ้มของคอนกรีตจากผิวนอกถึงเหล็กเสริม

$d \geq 0.30\ \text{m} :-$ ความลึกประสิทธิผล ฐานรากบนเสาเข็มไม่น้อยกว่า 30 cm

$t = d + C_1 :-$ ความหนาของฐานราก ฐานรากบนเสาเข็มไม่น้อยกว่า 40 cm

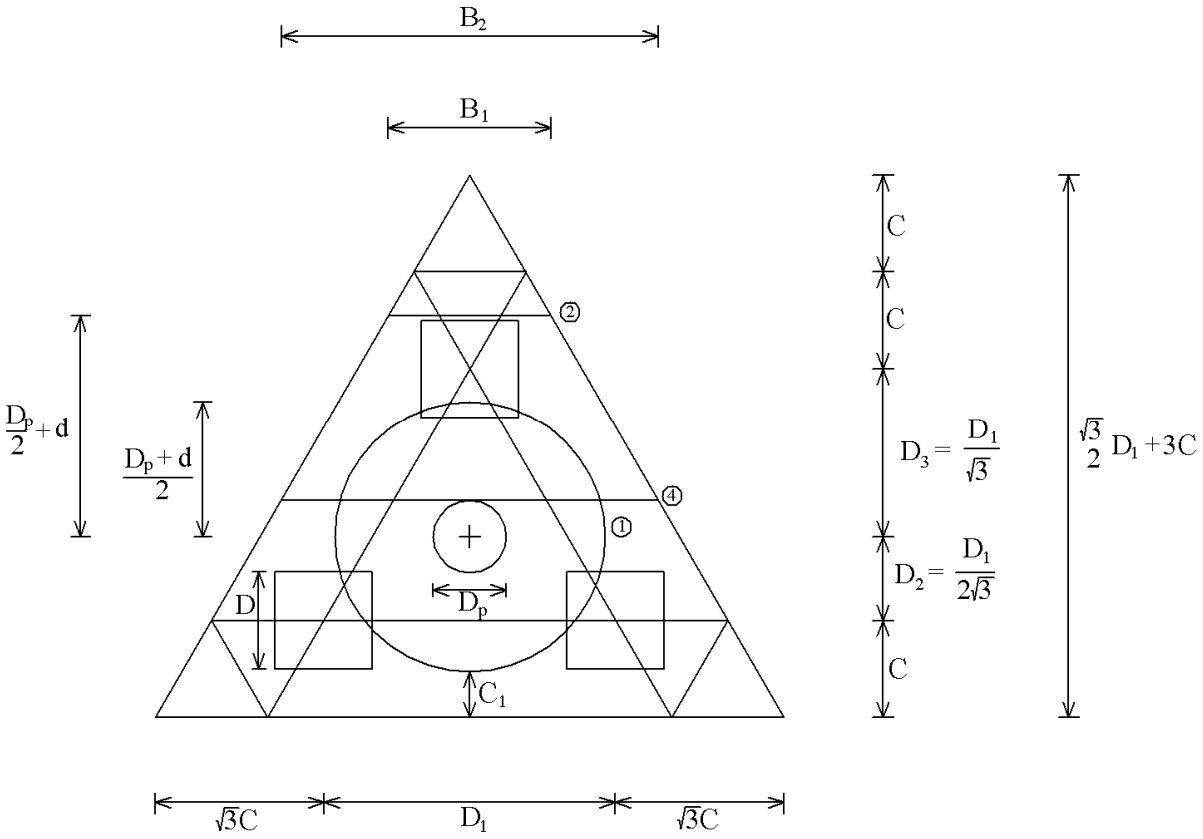
การเขียนแปลนฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้น

เขียนสามเหลี่ยมด้านเท่าความยาวแต่ละด้านเท่ากับ $D_1 = 3D$

ลากเส้นขนานด้านทั้งสามห่างออกไป C และจากมุมก็ลากขนานด้านห่างออกไป C เป็นรูป 6 เหลี่ยม

จากแต่ละมุมต่อด้านออกไปเป็นสามเหลี่ยมเล็กๆ 3 รูป เพื่อช่วยการคำนวณ

ผลการเขียนแปลงได้ดังรูปที่ 6.64



รูปที่ 6.64 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้นเพื่อการพิสูจน์สูตร

หน้าตัดวิกฤต (1) สำหรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ จะห่างจากขอบตอม่อไประยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผล d ดังนั้นรัศมีของวงกลม (1) จึงเป็น

$$= \frac{D_p}{2} + \frac{d}{2} = \frac{D_p + d}{2}$$

แนวของหน้าตัดวิกฤต (1) ต้องวางบนเหล็กเสริม นั่นคือระยะห่างขอบฐานรากต้องไม่เกินค่าระยะหุ้ม C_1 ระยะจากศูนย์กลางตอม่อถึงขอบล่างฐานรากคิดได้จากสองทางซึ่งต้องเท่ากันเพราะเป็นระยะเดียวกัน

$$\frac{D_p + d}{2} + C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C$$

ดังนั้น

$$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C - \frac{D_p + d}{2}$$

หากผลการคำนวณพบว่า $C_1 < 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm}$ ต้องเพิ่มระยะ D_1 โดยให้ค่า $C_1 = 0.10\ \text{m}$ แล้วหาค่า D_1 ดังนี้

$$D_1 = 2\sqrt{3}\left(\frac{D_p + d}{2} + C_1 - C\right)$$

ผลการคำนวณจะได้ค่าของ D_1 เป็นทศนิยมที่ไม่เหมาะสมในการก่อสร้างจริงให้ปรับขึ้นเหมาะกับการทำงานจริง

น้ำหนักบรรทุกลงบนตอม่อ

$$P = DL + LL$$

เมื่อ $P =$ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่าบนเสาตอม่อ, kg

$DL =$ น้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน, kg

$LL =$ น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน, kg

แรงต้านเฉลี่ยสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{3}$$

หาแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตไปยังศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p + d}{2}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 3P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 3P_r$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2\pi\left(\frac{D_p + d}{2}\right) = \pi\left(D_p + d\right)$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุของฐานรากคือ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d$$

ถ้าพบว่า $V_{cp} \ge V_p$ แสดงว่าขนาดและความหนาของฐานรากเพียงพอที่จะรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้อย่างปลอดภัย ข้ามไปตรวจสอบแรงเฉือนแบบคานและแรงดัด ระยะฝัง

ถ้าพบว่า $V_{cp} < V_p$ แสดงว่าขนาดและความหนาของฐานรากไม่เพียงพอที่จะรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ ต้องเพิ่มความลึกประสิทธิผล d แล้วย้อนไปตรวจสอบมาใหม่ การหาค่า d โดยประมาณทำดังนี้

ให้แรงเฉือนเจาะทะลุสูงสุดเท่ากับแรงลงตอม่อ $V_p = 3P_r$

ให้เท่ากับแรงเฉือนที่รับได้ $V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d$

ดังนั้น

$$0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 3P_r$$

แต่ $b_o = \pi(D_p + d)$ แทนค่า

$$0.53\sqrt{f_c'}\,\pi(D_p + d)d = 3P_r$$

$$d^2 + D_p d - \frac{3P_r}{0.53\pi\sqrt{f_c'}} = 0$$

$$d = \frac{-D_p + \sqrt{D_p^2 + \dfrac{12P_r}{0.53\pi\sqrt{f_c'}}}}{2}$$

$$d = -\frac{D_p}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{D_p^2 + \frac{12P_r}{0.53\pi\sqrt{f_c'}}}$$

สมการนี้ใช้ประมาณค่าสูงสุดของความลึกประสิทธิผลจากแรงเฉือนแบบเจาะทะลุเมื่อไม่คิดลดผลของระยะห่างของเสาเข็มจากหน้าตัดวิกฤต

ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤตแรงเฉือนแบบคานห่างจากขอบของตอม่อระยะ d หรือห่างจากศูนย์กลางตอม่อ $\frac{D_p}{2} + d$ แล้วห่างจากมุมยอดด้านบนของสามเหลี่ยมใหญ่

$$= \frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \left(\frac{D_p}{2} + d\right) = \frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2} - d$$

ใช้สมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายหาความยาวของหน้าตัดวิกฤต B_1

สามเหลี่ยมสองรูปคล้ายกันอัตราส่วนของด้านสมนัยย่อมเท่ากัน

$$\frac{B_1}{D_1 + 2\sqrt{3}C} = \frac{\dfrac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \dfrac{D_p}{2} - d}{\dfrac{3D_1}{2\sqrt{3}} + 3C}$$

$$B_1 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\dfrac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \dfrac{D_p}{2} - d\right)}{\left(\dfrac{3D_1}{2\sqrt{3}} + 3C\right)}$$

ระยะหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม x

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2} - d$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = P_r$

คำนวณหากำลังรับแรงเฉือนแบบคาน

กำลังรับแรงเฉือนแบบคาน

$$\phi V_c = 0.29\phi\sqrt{f_c'}B_1 d$$

ค่าของ B_1 และ d ต้องมีหน่วยเป็น cm

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบคานที่รับได้จริง V_{cb} กับแรงเฉือนแบบคาน V_p

ถ้า $V_{cb} \ge V_b$ แสดงว่าขนาดและความหนาของฐานรากสามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้อย่างปลอดภัย

ถ้า $V_{cb} < V_b$ แสดงว่าความหนาของฐานรากรับแรงเฉือนแบบคานไม่ได้ ต้องหาความลึกประสิทธิผลใหม่ โดยที่

$$d \ge \frac{V_b}{0.29\phi\sqrt{f_c'}B_1}$$

จัดค่า d ที่เหมาะสมกับการก่อสร้าง แล้วย้อนไปทำตั้งแต่ตรวจสอบระยะฝัง $C_1 \ge 0.10$ m มาใหม่

ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

เนื้อที่เสาตอม่อ

$$A_p = \frac{\pi}{4}D_p^2$$

เนื้อที่ฐานรากประกอบจากสามเหลี่ยมใหญ่ฐานยาว $D_1 + 2\sqrt{3}C$ สูง $\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C$ ลบด้วยสามเหลี่ยมเล็ก 3 รูป ฐานยาว $\frac{2C}{\sqrt{3}}$ สูง C ดังนั้น

$$A_F = \frac{1}{2}\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right) - 3\times\frac{1}{2}\times\frac{2C}{\sqrt{3}}\times C$$

$$A_F = \frac{1}{2}\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right) - \sqrt{3}C^2$$

เมื่อ $H =$ ความลึกของหัวเสาเข็มและท้องฐานราก, m

$H_F = t = d + 0.10 =$ ความหนาของฐานราก, m

$H_p = H - H_F =$ ความยาวของตอม่อและความหนาของดินถม, m

$P = DL + LL =$ น้ำหนักบรรทุกรวมลงตอม่อ

$W_p = 2400 A_p H_p =$ น้ำหนักของเสาตอม่อ, kg

$W_F = 2400 A_F H_F =$ น้ำหนักของฐานราก, kg

$W_{BF} = 1690(A_F - A_p)H_p =$ น้ำหนักของดินถม, kg

$P_a =$ กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม, kg/ต้น

แรงต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น P_{act}

$$P_{act} = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{3}$$

ถ้า $P_{act} > P_a$ แสดงว่าฐานรากต้องใช้เสาเข็ม 4 ต้นขึ้นไป ไปออกแบบตามฐานรากนั้นๆ

ถ้า $P_{act} \le P_a$ แสดงว่าฐานรากยังคงต้องการเสาเข็ม 3 ต้นเช่นเดิม ไปหาปริมาณเหล็กเสริมและตรวจสอบระยะฝังต่อไป

หาปริมาณเหล็กเสริม

หน้าตัดวิกฤต (4) สำหรับแรงดัด ห่างจากมุมยอดสามเหลี่ยมใหญ่

$$= \frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2}$$

ใช้สามเหลี่ยมคล้ายหาระยะ B_2

$$\frac{B_2}{D_1 + 2\sqrt{3}C} = \frac{\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C}$$

$$B_2 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right)}$$

แรงดัดที่ขอบตอม่อ

$$M_4 = P_r\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2}\right)$$

$$A_s = \frac{M_4}{f_s jd}$$

$$\min A_s = \rho_{temp} B_2 H_F$$

จัดเหล็กแต่ละชั้นเท่ากับค่าที่คำนวณได้ โดยจัดเป็น 3 ชั้น เหล็กแผ่คล้ายพัดทั้ง 3 ชั้น

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = \frac{D_1}{\sqrt{3}} + C - C_1 = \frac{D_1}{\sqrt{3}} + C - 0.10 \text{ m}$$

ถ้า $L_{db} < \ell_{db}$ แสดงว่าเลือกเหล็กขนาดโตเกินไปให้ลดขนาดเหล็กลง หรืออาจจะเพิ่มค่า C มากขึ้น แต่ต้องระวังว่าอาจจะทำให้น้ำหนักฐานรากและดินถมมากขึ้นจนเสาเข็มรับน้ำหนักไม่ได้

ขั้นตอนสุดท้าย เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.13 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 100 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 80 ตัน ตอม่อขนาด 0.40×0.60 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c' = 240$ ksc

$f_c = 0.375f_c' = 0.375 \times 240 = 90 \text{ ksc} \Rightarrow 65 \text{ ksc}$

$f_y = 3000$ ksc

$f_s = 0.5f_y = 0.5 \times 3000 = 1500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

$DL = 100{,}000$ kg

$LL = 80{,}000$ kg

$P = DL + LL = 180{,}000$ kg

$a = 40$ cm

$b = 60$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2\times 180{,}000}{75{,}000} = 2.88 \Rightarrow 3 \text{ ต้น}$$

เมื่อจำนวนเสาเข็ม 3 ต้น ต้องแปลงเสาตอม่อเป็นเสากลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D_p

$$\frac{\pi}{4}D_p^2 = ab$$

$$D_p = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{40\times 60}{\pi}} = 55.279 \text{ cm} = 0.55279 \text{ m}$$

เมื่อ $D = 0.40 \text{ m} = 40 \text{ cm} =$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40 \text{ m} = 40 \text{ cm} =$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3\times 0.40 = 1.20 \text{ m} = 120 \text{ cm} =$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 0.30 \text{ m} = 30 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

$t = d + C_1 = 0.30 + 0.10 = 0.40 \text{ m} = 40 \text{ cm} =$ ความหนาฐานราก

ตรวจสอบระยะหุ้มว่าไม่น้อยกว่า 0.10 เมตร

$$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.20}{2\sqrt{3}} + 0.40 - \frac{0.55279 + 0.30}{2} = 0.32 \text{ m} > 0.10 \text{ m}$$

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 100{,}000 + 80{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

$$P_r = \frac{P}{3} = \frac{180{,}000}{3} = 60{,}000 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตไปยังศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.20}{\sqrt{3}} - \frac{0.55279 + 0.30}{2} = 0.2664 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

$$x > \frac{D}{2}$$

ดังนั้น

$$V_p = 3P_r = 3\times 60{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = \pi(D_p + d) = \pi(55.279 + 30) = 267.91 \text{ cm}$$

ข้อมูลอื่น

หากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 267.91 \times 30 = 65{,}992 \text{ kg} < V_p$$

ต้องเพิ่มความหนาให้มากขึ้น โดยพิจารณาจากค่า

$$d = -\frac{D_p}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{D_p^2 + \frac{12P_r}{0.53\pi\sqrt{f_c'}}}$$

$$d = -\frac{55.279}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{55.279^2 + \frac{12 \times 60{,}000}{0.53\pi\sqrt{240}}} = 156.8 \text{ cm}$$

ประมาณค่า $d = \frac{156.8}{2} = 78.4 \Rightarrow 80$ cm

ย้อนกลับไปตรวจสอบระยะหุ้ม

$$t = d + C_1 = 0.80 + 0.10 = 0.90 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.20}{2\sqrt{3}} + 0.40 - \frac{0.55279 + 0.80}{2} = 0.07 \text{ m} < 0.10 \text{ m}$$

ปรับเปลี่ยน D_1

$$D_1 = 2\sqrt{3}\left(\frac{D_p + d}{2} + C_1 - C\right) = 2\sqrt{3}\left(\frac{0.55279 + 0.80}{2} + 0.10 - 0.40\right)$$

$$D_1 = 1.304 \text{ m} \Rightarrow 1.35 \text{ m}$$

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 100{,}000 + 80{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

$$P_r = \frac{P}{3} = \frac{180{,}000}{3} = 60{,}000 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตไปยังศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.35}{\sqrt{3}} - \frac{0.55279 + 0.80}{2} = 0.103 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

$$-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$$

ดังนั้น

$$V_p = 3P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 3 \times 60{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.103}{0.40}\right) = 136{,}350 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = \pi(D_p + d) = \pi(55.279 + 80) = 424.99 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 424.99 \times 80 = 279{,}158.071 \text{ kg} > V_p = 136{,}350 \text{ kg}$$ ใช้ได้

ความหนาประสิทธิผลที่เหมาะสมคือ 0.80 เมตร ความหนาฐานรากคือ 0.90 เมตร แสดงว่าฐานรากรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

ความยาวของหน้าตัดวิกฤต

$$B_1 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2} - d\right)}{\left(\frac{3D_1}{2\sqrt{3}} + 3C\right)}$$

$$B_1 = \frac{\left(1.35 + 2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{1.35}{\sqrt{3}} + 2\times 0.40 - \frac{0.55279}{2} - 0.80\right)}{\left(\frac{3\times 1.35}{2\sqrt{3}} + 3\times 0.40\right)}$$

$$B_1 = 0.580846544 \text{ m} = 58.08 \text{ cm}$$

ระยะหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม x

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2} - d = \frac{1.35}{\sqrt{3}} - \frac{0.55279}{2} - 0.80 = -0.29 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

พบว่า $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบคานคือ

$$V_b = 0$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบคาน

$$V_{cb} = 0.29\phi\sqrt{f_c'}B_1 d = 0.29\times\sqrt{240}\times 58.08\times 80 = 20{,}874.7 \text{ kg} > V_b$$

รับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

เนื้อที่เสาตอม่อ

$$A_p = \frac{\pi}{4}D_p^2 = \frac{\pi}{4}\times 0.55279^2 = 0.24 \text{ m}^2$$

เนื้อที่ฐานราก

$$A_F = \frac{1}{2}\times\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right) - \sqrt{3}C^2$$

$$A_F = \frac{1}{2}\times\left(1.35 + 2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\times 1.35 + 3\times 0.40\right) - \sqrt{3}\times 0.40^2$$

$$A_F = 2.9634 \text{ m}^2$$

$$H = 2.00 \text{ m} = \text{ ความลึกท้องฐานราก}$$

$H_F = t = d + 0.10 = 0.80 + 0.10 = 0.90$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 0.90 = 1.10$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 100{,}000 + 80{,}000 = 180{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400 A_p H_p = 2400 \times 0.24 \times 1.10 = 633.6$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400 A_F H_F = 2400 \times 2.9634 \times 0.90 = 6400.9$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(A_F - A_p)H_p = 1690 \times (2.9634 - 0.24) \times 1.10 = 5062.8$ kg = น้ำหนักดินถม

$P_a = 75{,}000$ kg/pile = กำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม

แรงต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{3}$$

$$P_a = \frac{180{,}000 + 633.6 + 6400.9 + 5062.8}{3}$$

$P_a = 64{,}032.4$ kg/pile $< 75{,}000$ kg/pile

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

ความยาวของหน้าตัดวิกฤต (4) ที่ขอบตอม่อ

$$B_2 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right)}$$

$$B_2 = \frac{\left(1.35 + 2\sqrt{3} \times 0.40\right) \times \left(\frac{1.35}{\sqrt{3}} + 2 \times 0.40 - \frac{0.55279}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times 1.35 + 3 \times 0.40\right)}$$

$B_2 = 1.504606795$ m $= 150.46$ cm

แรงดัดที่ขอบตอม่อ

$$M_4 = P_r\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2}\right) = 60{,}000 \times \left(\frac{1.35}{\sqrt{3}} - \frac{0.55279}{2}\right) = 30{,}181.6718 \text{ kg.m}$$

$M_4 = 30{,}181{,}67.18$ kg.cm

$$A_s = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{3{,}018{,}167.18}{1{,}500 \times 0.909 \times 80} = 27.67 \text{ cm}^2$$

$\min A_s = \rho_{temp} B_2 t = 0.0020 \times 150.46 \times 90 = 27.08 \text{ cm}^2$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2$ ต้องจำนวนเส้น

$$= \frac{27.67}{4.909} = 5.64 \Rightarrow 6 \text{ เส้น}$$

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

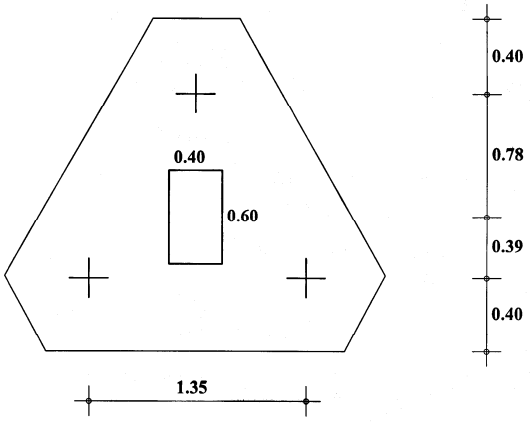
$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

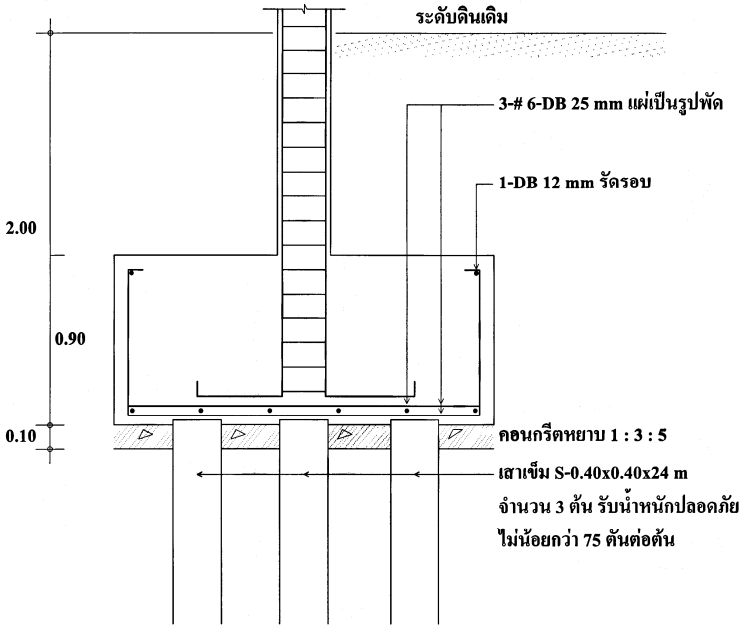
$$L_{db} = \frac{D_1}{\sqrt{3}} + C - C_1 = \frac{135}{\sqrt{3}} + 40 - 10 = 107.94 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-3 PLAN

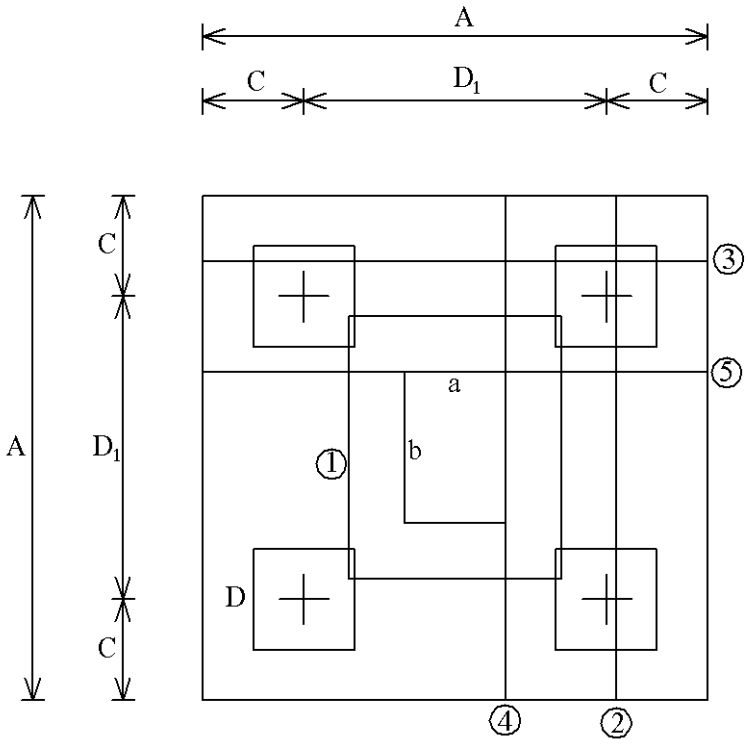


F-3 SECTION

FOOTING F-3

รูปที่ 6.65 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 3 ต้น

6.18 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 4 ต้น



รูปที่ 6.66 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 4 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = D_1 + 2C$ = ความกว้างยาวของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

t = ความหนาของฐานราก

$d = t - C_1 = t - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.14 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 120 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 80 ตัน ตอม่อขนาด 0.40×0.60 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90$ ksc $\Rightarrow 65$ ksc

$f_y=3000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3000=1500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095 \text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

DL $=120{,}000$ kg

LL $=80{,}000$ kg

P $=$ DL $+$ LL $=200{,}000$ kg

a $=40$ cm

b $=60$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times200{,}000}{75{,}000}=3.2\Rightarrow 4 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=0.30$ m $=30$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

$$A=D_1+2C=1.20+2\times0.40=2.00 \text{ m}$$

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P=DL+LL=120{,}000+80{,}000=200{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{N_p} = \frac{200,000}{4} = 50,000 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1 - a - d}{2} = \frac{1.20 - 0.40 - 0.30}{2} = 0.25 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r = 4 \times 50,000 = 200,000 \ \text{kg}$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (40 + 60 + 2 \times 30) = 320 \ \text{cm}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุที่รับได้

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f'_c}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 320 \times 30 = 78,823 \ \text{kg} << V_p$$

ให้ $V_p = V_{cp}$ แล้วหาความลึกประสิทธิผล

$$200,000 = 0.53\sqrt{240} \times 2 \times (40 + 60 + 2d)d$$

$$200,000 = 4 \times 0.53\sqrt{240}\left(50d + d^2\right)$$

$$d^2 + 50d = \frac{200,000}{4 \times 0.53\sqrt{240}} = 6,089.596456$$

$$d^2 + 50d - 6,089.596456 = 0$$

$$d = \frac{-50 + \sqrt{50^2 + 4 \times 6,089.596456}}{2}$$

$$d = \frac{-50 + 163.8852825}{2} = \frac{113.8852825}{2} = 56.94 \ \text{cm}$$

เลือกใช้ความลึกประสิทธิผล $d = 60 \ \text{cm} = 0.60 \ \text{m}$

ความหนาฐานราก $t = d + 0.10 = 0.60 + 0.10 = 0.70 \ \text{m}$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (40 + 60 + 2 \times 60) = 440 \ \text{cm}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1 - a - d}{2} = \frac{1.20 - 0.40 - 0.60}{2} = 0.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 4 \times 50{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 150{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุที่รับได้

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 440 \times 60 = 78{,}823216{,}763.1319 \text{ kg} > V_p$$

ฐานรากรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.40}{2} - 0.60 = -0.20 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 200 \times 60 = 53{,}911.92818 \text{ kg} > V_b = 0$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.60}{2} - 0.60 = -0.30 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 200 \times 60 = 53{,}911.92818 \text{ kg} > V_b = 0$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00\ \text{m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 0.60 + 0.10 = 0.70\ \text{m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 0.70 = 1.30\ \text{m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 120{,}000 + 80{,}000 = 200{,}000\ \text{kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.40 \times 0.60 \times 1.30 = 748.8\ \text{kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400\left(A^2 - ab\right)H_F = 2400 \times \left(2.00^2 - 0.40 \times 0.60\right) \times 0.70 = 6316.8\ \text{kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690\left(A^2 - ab\right)H_p = 1690 \times \left(2.00^2 - 0.40 \times 0.60\right) \times 1.30 = 8260.7\ \text{kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{4}$$

$$P_a = \frac{200{,}000 + 748.8 + 6316.8 + 8260.7}{4}$$

$$P_a = 53{,}832\ \text{kg/pile} < 75{,}000\ \text{kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 2P_r \frac{D_1 - a}{2} = 2 \times 50{,}000 \times \frac{1.20 - 0.40}{2} = 40{,}000\ \text{kg.m} = 4{,}000{,}000\ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{4{,}000{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 60} = 48.89\ \text{cm}$$

$$\min A_{s4} = 0.0020 \times 200 \times 70 = 28\ \text{cm}^2$$

ใช้ DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909\ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854\ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.02\ \text{ksc} < 35\ \text{ksc}$$

$$V_4 = 2P_r = 2 \times 50{,}000 = 100{,}000\ \text{kg}$$

$$\sum O = \frac{V_4}{ujd} = \frac{100{,}000}{20.02 \times 0.909 \times 60} = 91.58\ \text{cm}$$

จำนวน DB 25 mm จากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{48.89}{4.909} = 9.96 \Rightarrow 10\ \text{เส้น}$$

จำนวน DB 25 mm จากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{91.58}{7.854} = 11.66 \Rightarrow 12\ \text{เส้น}$$

$$M_5 = 2P_r \frac{D_1 - b}{2} = 2 \times 50{,}000 \times \frac{1.20 - 0.60}{2} = 30{,}000 \text{ kg.m} = 3{,}000{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{3{,}000{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 60} = 36.67 \text{ cm}^2$$

$$\min A_s = \rho_{temp} A H_F = 0.0020 \times 200 \times 70 = 28 \text{ cm}^2 < 36.67 \text{ cm}^2$$

ใช้ DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23 \frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.02 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$V_5 = 2P_r = 2 \times 50{,}000 = 100{,}000 \text{ kg}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{100{,}000}{20.02 \times 0.909 \times 60} = 91.58 \text{ cm}$$

จำนวน DB 25 mm จากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{36.67}{4.909} = 7.47 \Rightarrow 8 \text{ เส้น}$$

จำนวน DB 25 mm จากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{91.58}{7.854} = 11.66 \Rightarrow 12 \text{ เส้น}$$

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

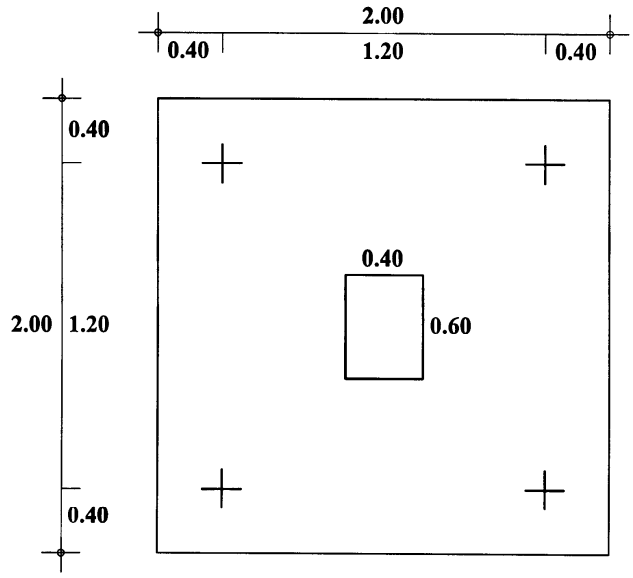
$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

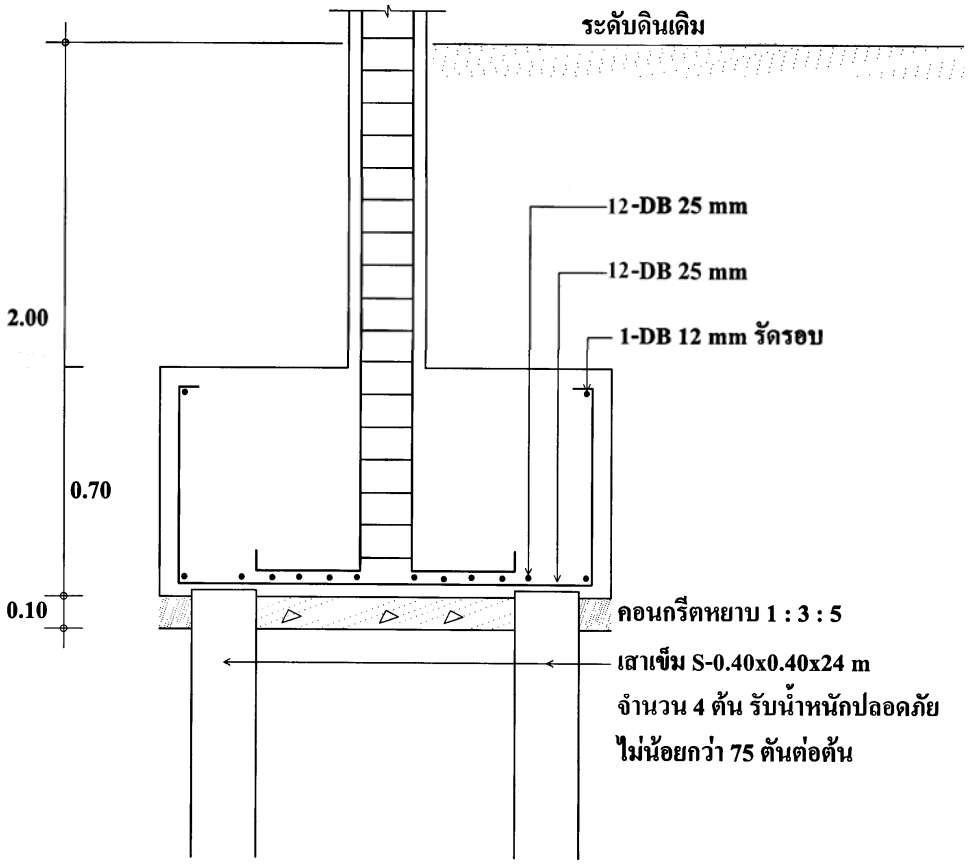
$$L_{db} = \frac{D_1}{2} + C - \frac{b}{2} - C_1 = \frac{120}{2} + 40 - \frac{60}{2} - 10 = 60 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-4 PLAN

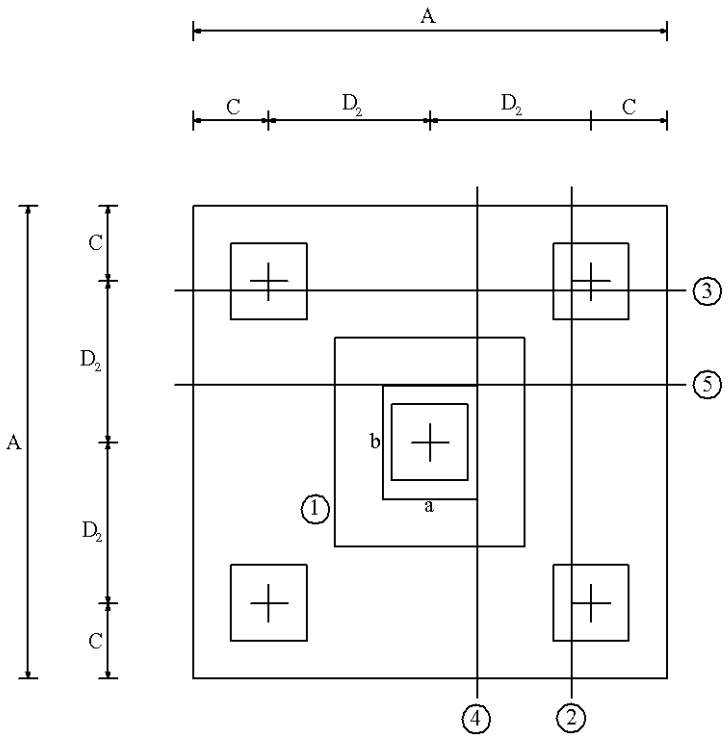


F-4 SECTION

FOOTING F-4

รูปที่ 6.67 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 4 ต้น

6.19 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 5 ต้น



รูปที่ 6.68 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 5 ต้น

กำหนด

$D =$ ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D =$ ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D =$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

เนื่องจาก $2D_2 = \sqrt{2}D_1$ ให้คำนวณค่า D_2 แล้วปรับค่าให้มากขึ้นและเหมาะต่อการก่อสร้าง

$A = 2D_2 + 2C =$ ความกว้างยาวของฐานราก

$a =$ ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10 \text{ m} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.15 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 190 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 100 ตัน ตอม่อขนาด 0.50×0.75 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90$ ksc $\Rightarrow 65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72 \text{ ksc}$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095 \text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020 \Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=190{,}000$ kg

$LL=100{,}000$ kg

$P=DL+LL=290{,}000$ kg

$a=50$ cm

$b=75$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times290{,}000}{75{,}000}=4.64\Rightarrow 5 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$2D_2=\sqrt{2}D_1$

$$D_2=\frac{\sqrt{2}}{2}D_1=\frac{\sqrt{2}}{2}\times1.20=0.8485 \text{ m}\Rightarrow 0.85 \text{ m}$$

$A=2D_2+2C=2\times0.85+2\times0.40=2.50$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 0.30\ m = 30\ cm$ = ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 190{,}000 + 100{,}000 = 290{,}000\ kg$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{5} = \frac{290{,}000}{5} = 58{,}000\ kg/pile$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตรงกับตอม่อไม่มีผลเกี่ยวกับแรงเฉือนในฐานราก

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มต้นริมถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}\left(D_2 - \frac{a+d}{2}\right) = \sqrt{2}\left(0.85 - \frac{0.50+0.30}{2}\right) = 0.636\ m$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ m$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r = 4 \times 58{,}000 = 232{,}000\ kg$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (50 + 75 + 2 \times 30) = 370\ cm$$

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 370 \times 30 = 91{,}139.0441\ ksc << 232{,}000\ ksc$$

ประมาณความหนาฐานราก $h_F = 0.70\ m$ ระยะหุ้ม 10 ซม ดังนั้นความลึกประสิทธิผล

$$d = 70 - 10 = 60\ cm$$

$$x = \sqrt{2}\left(D_2 - \frac{a+d}{2}\right) = \sqrt{2}\left(0.85 - \frac{0.50+0.60}{2}\right) = 0.424\ m$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ m$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_u = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r = 4 \times 58{,}000 = 232{,}000\ kg$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (50 + 75 + 2 \times 60) = 490 \text{ cm}$$

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 490 \times 60 = 241{,}395.306 \text{ ksc} > 232{,}000 \text{ ksc}$$

ฐานรากรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = D_2 - \frac{a}{2} - d = 0.85 - \frac{0.50}{2} - 0.60 = 0 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 58{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0}{0.40}\right) = 58{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29\sqrt{240} \times 250 \times 60 = 67{,}389.91022 \text{ kg} > V_b = 58{,}000 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = D_2 - \frac{b}{2} - d = 0.85 - \frac{0.75}{2} - 0.60 = -0.125 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 58{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.125}{0.40}\right) = 21{,}750 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29\sqrt{240} \times 250 \times 60 = 67{,}389.91022 \text{ kg} > V_b = 21{,}750 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 0.60 + 0.10 = 0.70 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 0.70 = 1.30 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 190{,}000 + 100{,}000 = 290{,}000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.50 \times 0.75 \times 1.30 = 1170 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$$W_F = 2400A^2H_F = 2400\times 2.50^2\times 0.70 = 10{,}500 \text{ kg} = \text{น้ำหนักฐานราก}$$

$$W_{BF} = 1690\left(A^2 - ab\right)H_p = 1690\times\left(2.50^2 - 0.50\times 0.75\right)\times 1.30 = 12{,}907 \text{ kg} = \text{น้ำหนักดินถม}$$

แรงต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{5}$$

$$P_a = \frac{290{,}000 + 1{,}170 + 10{,}500 + 12{,}907}{5}$$

$$P_a = 62{,}915 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 2P_r\left(D_2 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = 2\times 58{,}000\times\left(0.85 - \frac{0.50}{2}\right)$$

$$M_4 = 69{,}600 \text{ kg.m} = 6{,}960{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{6{,}960{,}000}{1{,}500\times 0.909\times 60} = 85.075 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$V_4 = 2P_r = 2\times 58{,}000 = 116{,}000 \text{ kg}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{116{,}000}{20.01\times 0.909\times 60} = 106.29 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{85.075}{4.909} = 17.33 \Rightarrow 18 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{106.29}{7.854} = 13.53 \Rightarrow 14 \text{ เส้น}$$

ใช้ 18 DB 25 mm

$$M_5 = 2P_r\left(D_2 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 2\times 58{,}000\times\left(0.85 - \frac{0.75}{2}\right)$$

$$M_5 = 43{,}500 \text{ kg.m} = 4{,}350{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{4{,}350{,}000}{1{,}500\times 0.909\times 60} = 53.172 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$V_5 = 2P_r = 2 \times 58{,}000 = 116{,}000 \text{ kg}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{116{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 60} = 106.29 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{53.172}{4.909} = 10.83 \Rightarrow 11 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{106.29}{7.854} = 13.53 \Rightarrow 14 \text{ เส้น}$$

ใช้ 14 DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

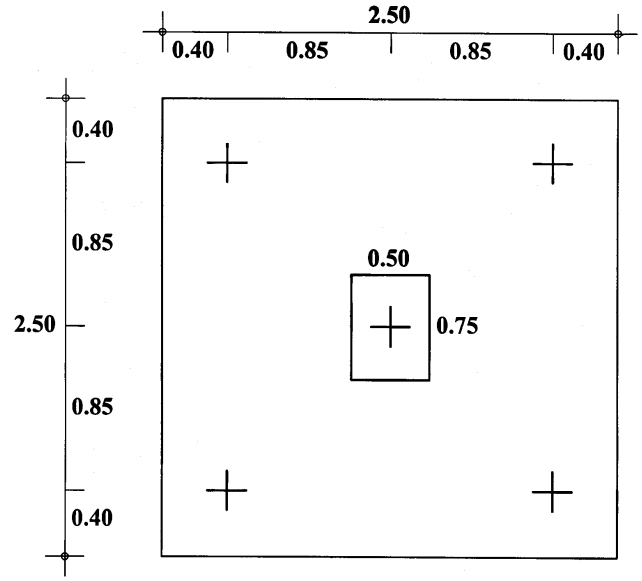
$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

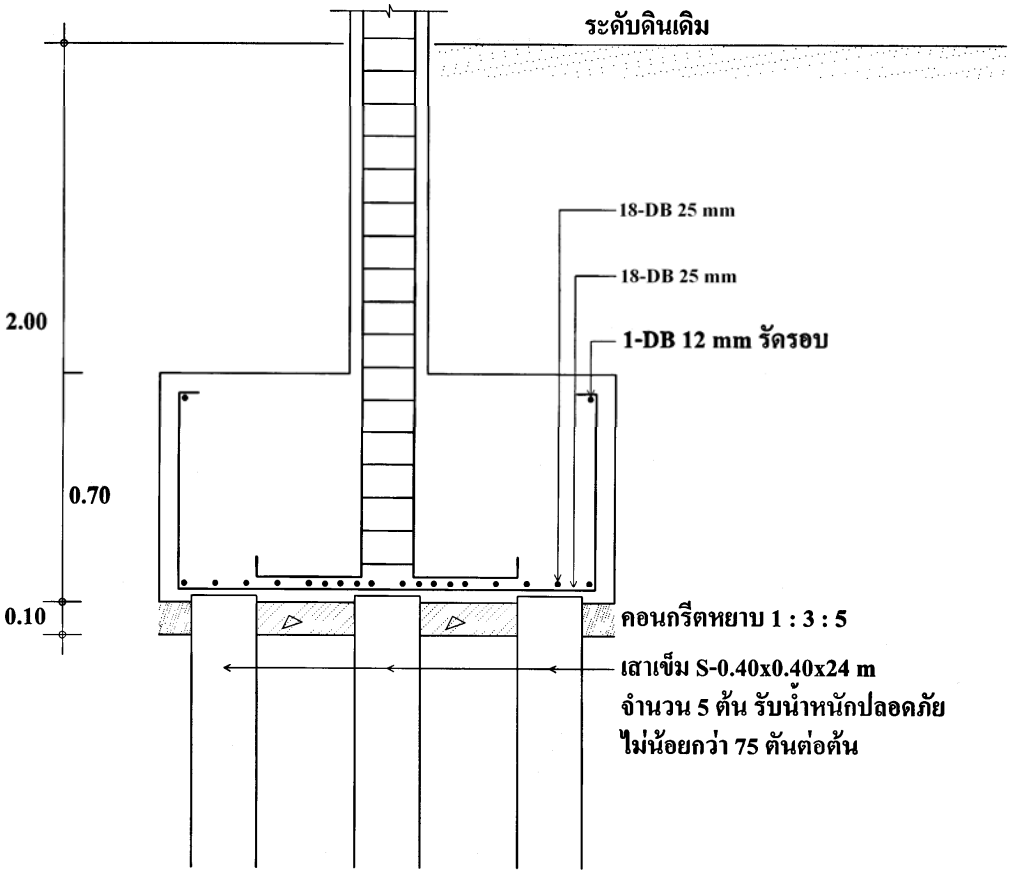
$$L_{db} = D_2 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 85 + 40 - \frac{75}{2} - 10 = 77.5 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-5 PLAN

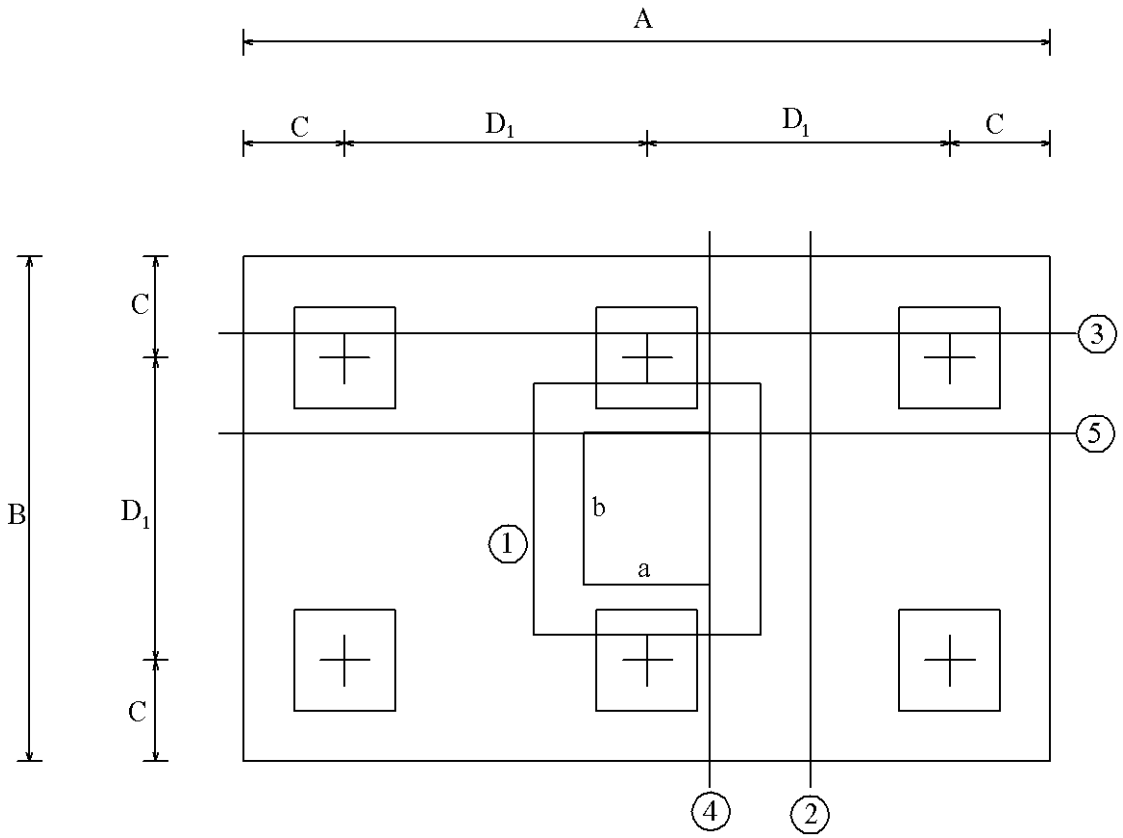


F-5 SECTION

FOOTING F-5

รูปที่ 6.69 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 5 ต้น

6.20 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 6 ต้น



รูปที่ 6.70 ฐานรากบนเสาเข็ม 6 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 2D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

t = ความหนาของฐานราก

$d = t - C_1 = t - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.16 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 200 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 160 ตัน ตอม่อขนาด 0.60×0.80 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90$ ksc $\Rightarrow 65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095 \text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020 \Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=200{,}000$ kg

$LL=160{,}000$ kg

$P=DL+LL=360{,}000$ kg

$a=60$ cm

$b=80$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times360{,}000}{75{,}000}=5.76\Rightarrow 6 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$B=D_1+2C=1.20+2\times0.40=2.00$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=0.30$ m $=30$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 200{,}000 + 160{,}000 = 360{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{6} = \frac{360{,}000}{6} = 60{,}000 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1 - b - d}{2} = \frac{1.20 - 0.80 - 0.30}{2} = 0.05$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 2 \times 36{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.05}{0.40}\right) = 45{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ต้นมุมถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.60 + 0.30}{2} = 0.75 > \frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ และเสาเข็มมี 4 ต้น แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r = 4 \times 36{,}000 = 144{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_u = 45{,}000 + 144{,}000 = 189{,}000 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (60 + 80 + 2 \times 30) = 400 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 400 \times 30 = 98{,}528.69633 \text{ kg} < V_p = 189{,}000 \text{ kg}$$

รับแรงเฉือนไม่ได้ หาความหนาประสิทธิผลโดยประมาณจากการให้แรงเฉือนที่เกิดเท่ากับที่รับได้

$$0.53\sqrt{240} \times 2(60 + 80 + 2d)d = 189{,}000$$

$$2d^2 + 140d - 11{,}509.3373 = 0$$

$$d^2 + 70d - 5{,}754.668651 = 0$$

$$d = \frac{-70 + \sqrt{70^2 + 4 \times 5{,}754.668651}}{2} = 48.54 \text{ cm}$$

เลือกใช้ความลึกประสิทธิผล $d = 80 \text{ cm} = 0.80 \text{ m}$

ความหนาฐานราก $H_F = d + 0.10 = 0.80 + 0.10 = 0.90 \text{ m}$

ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุใหม่

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1 - b - d}{2} = \frac{1.20 - 0.80 - 0.80}{2} = -0.20$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 0$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ต้นมุมถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.60 + 0.80}{2} = 0.50 > \frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ และเสาเข็มมี 4 ต้น แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_u = 0 + 240{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (60 + 80 + 2 \times 80) = 600 \text{ cm}$$

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f'_c}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 600 \times 80 = 394{,}114.7853 \text{ kg} > V_p = 240{,}000 \text{ kg}$$

ฐานรากรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มคู่ขวา

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.60}{2} - 0.80 = 0.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 60{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 90{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29 \times \sqrt{240} \times 200 \times 80 = 71{,}882.57091 \text{ kg} < V_b = 90{,}000 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานไม่ได้ เพิ่มความลึกประสิทธิผล d โดยไม่ต้องตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุซ้ำ

$$0.29\sqrt{f_c'}Bd = V_b$$

$$d \geq \frac{V_b}{0.29\sqrt{f_c'}B} = \frac{90{,}000}{0.29 \times \sqrt{240} \times 200} = 100.16 \text{ cm} \Rightarrow 100 \text{ cm} = 1.00 \text{ m}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80}{2} - 1.00 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_u = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.10 = 0.90 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 200{,}000 + 160{,}000 = 360{,}000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.60 \times 0.80 \times 0.90 = 1036.8 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 3.20 \times 2.00 \times 1.10 = 16{,}896 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (3.20 \times 2.00 - 0.60 \times 0.80) \times 0.90 = 9{,}004.32 \text{ kg}$ = น้ำหนักดินถมต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{6}$$

$$P_a = \frac{360{,}000 + 1036.8 + 16{,}896 + 9004.32}{6}$$

$$P_a = 64{,}490 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 2P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = 2 \times 60{,}000 \times \left(1.20 - \frac{0.60}{2}\right)$$

$$M_4 = 108{,}000 \text{ kg.m} = 10{,}800{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{10{,}800{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 79.208 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$ และ

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$V_4 = 2P_r = 2 \times 60{,}000 = 120{,}000 \text{ kg}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{120{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 100} = 65.974 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{79.208}{4.909} = 16.14 \Rightarrow 17 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{65.974}{7.854} = 8.4 \Rightarrow 9 \text{ เส้น}$$

เลือกค่ามาก ดังนั้นเหล็กขนานขอบยาวของฐานรากคือ 17-DB 25 mm

$$M_5 = 3P_r\left(\frac{D_1 - b}{2}\right)$$

$$M_5 = 3 \times 60{,}000 \times \left(\frac{1.20 - 0.80}{2}\right)$$

$$M_5 = 36{,}000 \text{ kg.m} = 3{,}600{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{3{,}600{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 26.403 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$ และ

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$V_5 = 3P_r = 3\times 60{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{180{,}000}{20.01\times 0.909\times 100} = 98.96 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{26.403}{4.909} = 5.4 \Rightarrow 6 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{98.96}{7.854} = 12.6 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

เลือกค่ามาก ดังนั้นเหล็กขนานขอบสั้นของฐานรากคือ 13-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

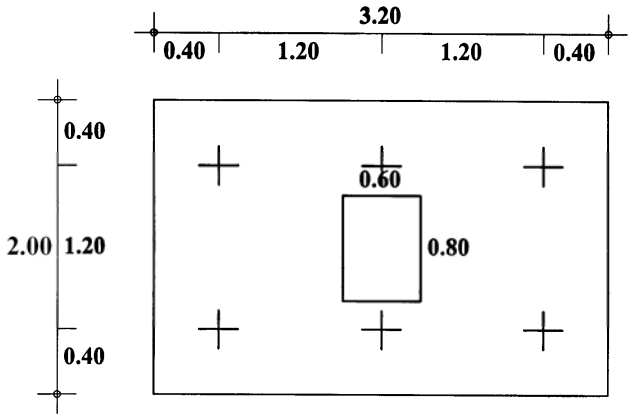
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

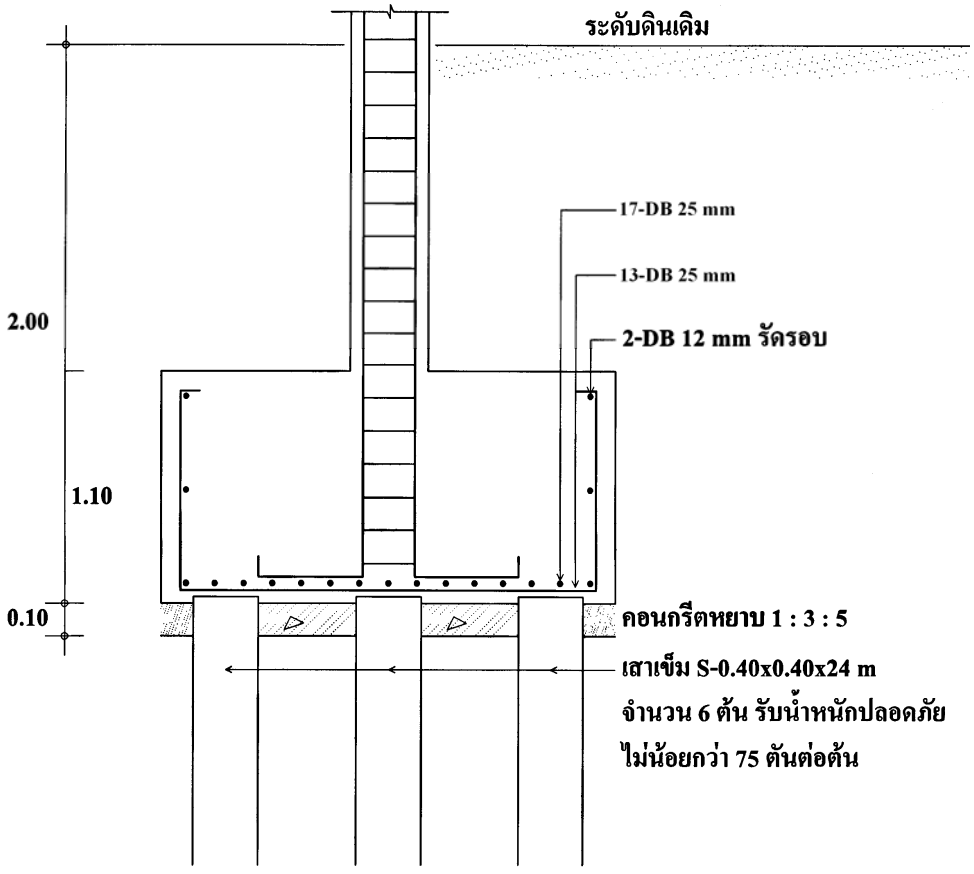
$$L_{db} = \frac{D_1}{2} + C - \frac{b}{2} - C_1 = \frac{120}{2} + 40 - \frac{80}{2} - 10 = 50 \text{ cm} < \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังไม่เพียงพอ เพิ่มความกว้างฐานรากอีกข้างละ 10 cm เป็นความกว้าง 2.20 เมตร

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



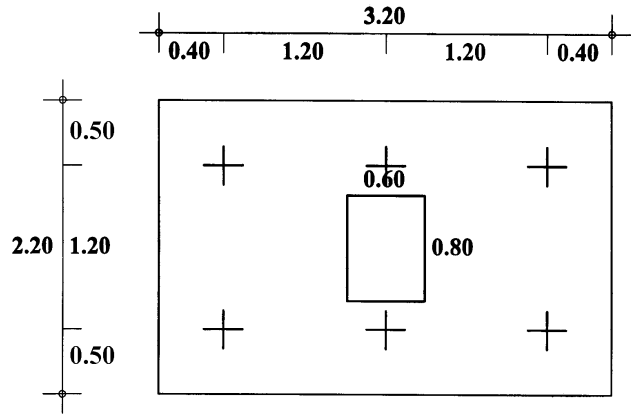
F-6 PLAN



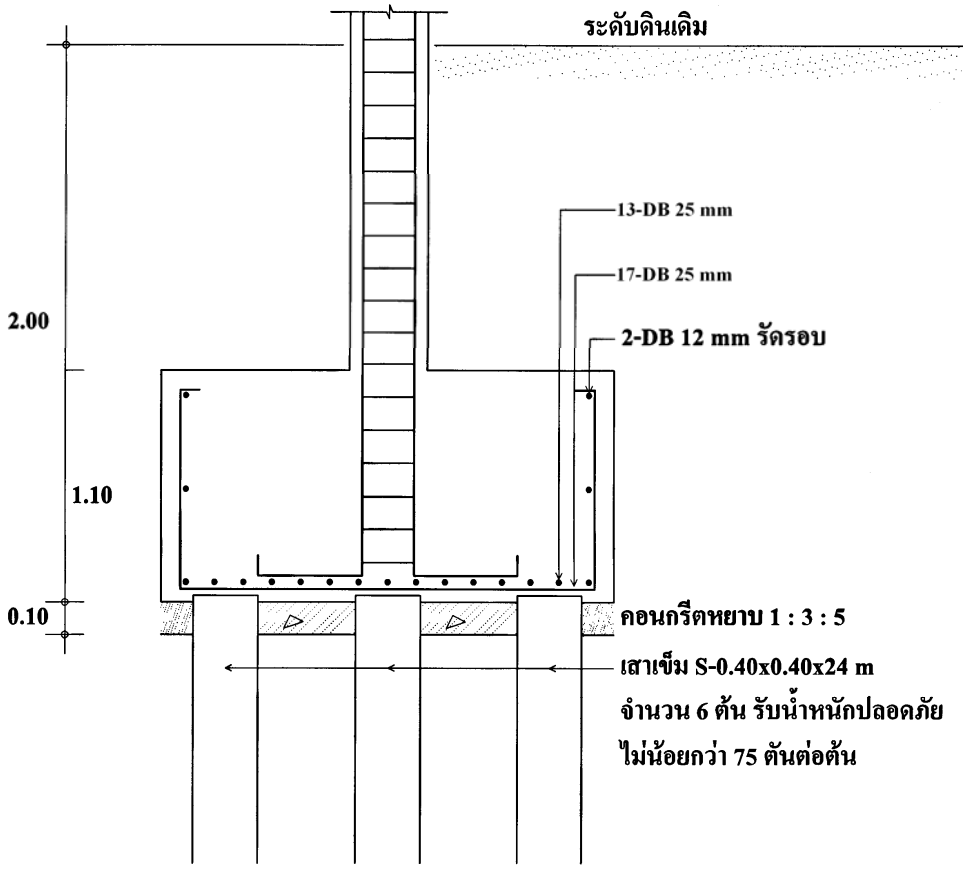
F-6 SECTION

FOOTING F-6

รูปที่ 6.71 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 6 ต้น ยังไม่ปรับแก้ความกว้าง



F-6 PLAN

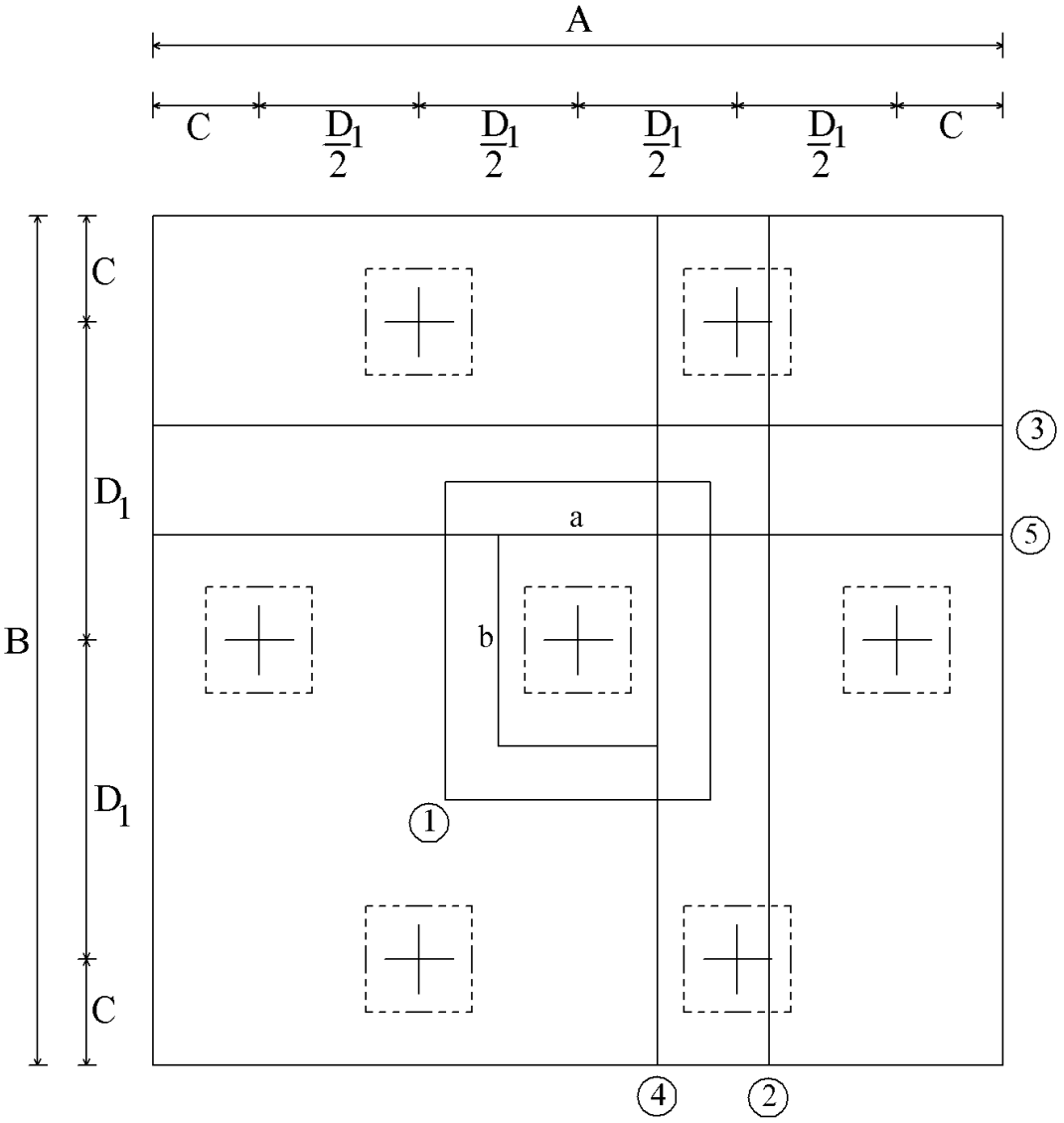


F-6 SECTION

FOOTING F-6

รูปที่ 6.72 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 6 ต้น ปรับแก้ความกว้างแล้ว

6.21 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 7 ต้น



รูปที่ 6.73 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 7 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 2D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.17 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 240 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 160 ตัน ตอม่อขนาด 0.70×1.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375f_c^{'} = 0.375\times240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5f_y = 0.5\times3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}} = 0.274$$

$$j = 1-\frac{k}{3} = 1-\frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2}f_c kj = \frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

$DL = 240{,}000$ kg

$LL = 160{,}000$ kg

$P = DL + LL = 400{,}000$ kg

$a = 70$ cm

$b = 100$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2\times400{,}000}{75{,}000} = 6.4 \Rightarrow 7 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3\times0.40 = 1.20$ m $= 120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 2D_1 + 2C = 2\times1.20 + 2\times0.40 = 3.20$ m

$B = 2D_1 + 2C = 2\times1.20 + 2\times0.40 = 3.20$ m

$C_1 = 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 0.30\ \text{m} = 30\ \text{cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 240{,}000 + 160{,}000 = 400{,}000\ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{7} = \frac{400{,}000}{7} = 57{,}142.85714\ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตรงตอม่อไม่ผลต่อแรงเฉือนและแรงดัด

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+0.30}{2} = 0.55$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 2 \times 57{,}142.85714 = 114{,}285.7143\ \text{kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ต้นบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.70+0.30}{2} = 0.70 > \frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ และเสาเข็มมี 4 ต้น แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r = 4 \times 57{,}142.85714 = 228{,}571.4286\ \text{kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_p = 0 + 114{,}285.7143 + 228{,}571.4286 = 342{,}857.1429\ \text{kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (70 + 100 + 2 \times 30) = 460\ \text{cm}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุที่รับได้

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f'_c}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 460 \times 30 = 113{,}308.0008\ \text{kg} << V_p = 342{,}857.1429\ \text{kg}$$

ประมาณความหนาฐานรากใหม่โดยให้กำลังรับแรงเฉือนเท่ากับค่าที่เกิดขึ้นเดิม

$$0.53\sqrt{f_c'} \times 2(a+b+2d)d = V_p$$

$$0.53\sqrt{240} \times 2 \times (70+100+2d)d = 342,857.1429$$

$$d(d+85) = \frac{342,857.1429}{4 \times 0.53\sqrt{240}}$$

$$d^2 + 85d - 10,439.30821 = 0$$

$$d = \frac{-85 + \sqrt{85^2 + 4 \times 10,439.30821}}{2} = 68.16 \text{ cm}$$

เลือกใช้ความลึกประสิทธิผล $d = 100 \text{ cm} = 1.00 \text{ m}$

ความหนาฐานราก $H_F = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10 \text{ m}$

ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุใหม่

เสาเข็มต้นกลางตรงตอม่อไม่ผลต่อแรงเฉือนและแรงดัด

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+1.00}{2} = 0.20$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x \ge \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 2 \times 57,142.85714 = 114,285.7143 \text{ kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ต้นบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.70+1.00}{2} = 0.35 > \frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x \ge \frac{D}{2}$ และเสาเข็มมี 4 ต้น แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r = 4 \times 57,142.85714 = 228,571.4286 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_u = 114,285.7143 + 228,571.4286 = 342,857.1429 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2 \times (70+100+2 \times 100) = 740 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 740 \times 100 = 607,593.6274 \text{ kg} > V_p = 342,857.1429 \text{ kg}$$

ฐานรากรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มริมขวาสุด

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.70}{2} - 1.00 = -0.15 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 57{,}142.85714 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.15}{0.40}\right) = 7{,}142.857145 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มคู่ขวาใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.70}{2} - 1.00 = -0.75 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 7{,}142.857145 + 0 = 7{,}142.857145 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_p = 7{,}142.857145 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มคู่บน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.00 = -0.30 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.10 = 0.90$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 240{,}000 + 160{,}000 = 400{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.70 \times 1.00 \times 0.90 = 1{,}512$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 3.20 \times 3.20 \times 1.10 = 27{,}033.6$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (3.20 \times 3.20 - 0.70 \times 1.00) \times 0.90 = 14{,}510.34$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{7}$$

$$P_a = \frac{400{,}000 + 1{,}512 + 27{,}033.6 + 14{,}510.34}{7}$$

$P_a = 63{,}294$ kg/pile $< 75{,}000$ kg/pile

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 2P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{a}{2}\right) + P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) = P_r(2D_1 - 1.5a)$$

$M_4 = 57{,}142.85714 \times (2 \times 1.20 - 1.5 \times 0.70)$

$M_4 = 77{,}142.85714$ kg.m $= 7{,}714{,}285.714$ kg.cm

$V_4 = 3P_r = 3 \times 57{,}142.85714 = 171{,}428.5714$ kg

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{7{,}714{,}285.714}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 56.577 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็กขนาด DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909$ cm^2, $\sum O_1 = 7.854$ cm และหน่วยแรงยึดเหนี่ยว

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{171{,}428.5714}{20.01 \times 0.909 \times 100} = 94.248 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{56.577}{4.909} = 11.5 \Rightarrow 12 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{94.248}{7.854} = 12 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

ใช้ 15-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

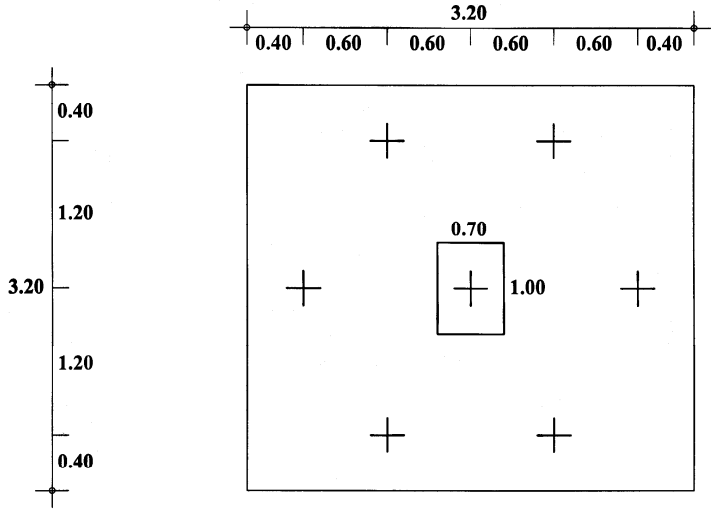
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

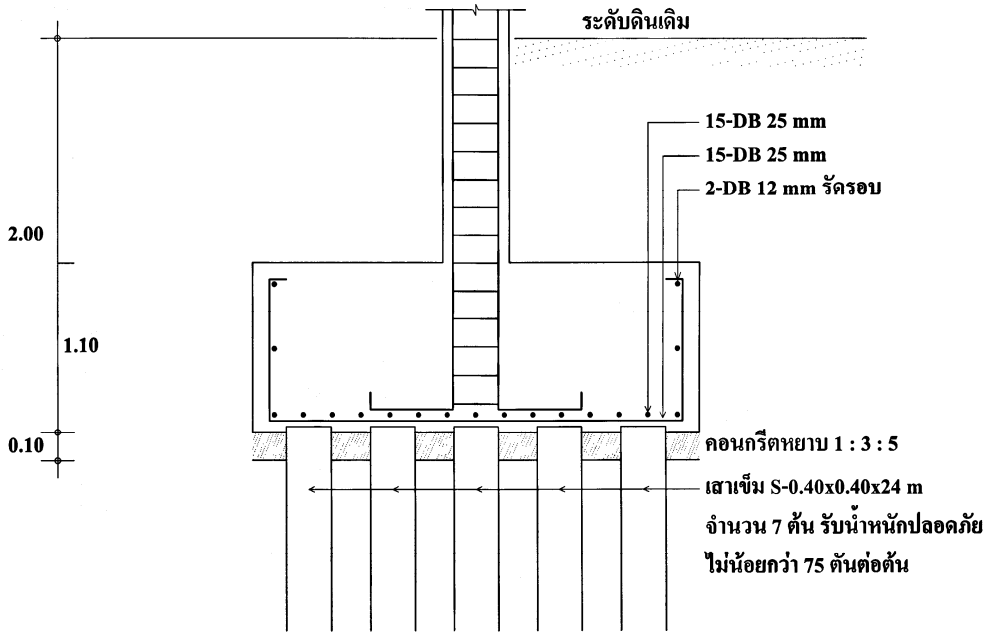
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 100 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-7 PLAN

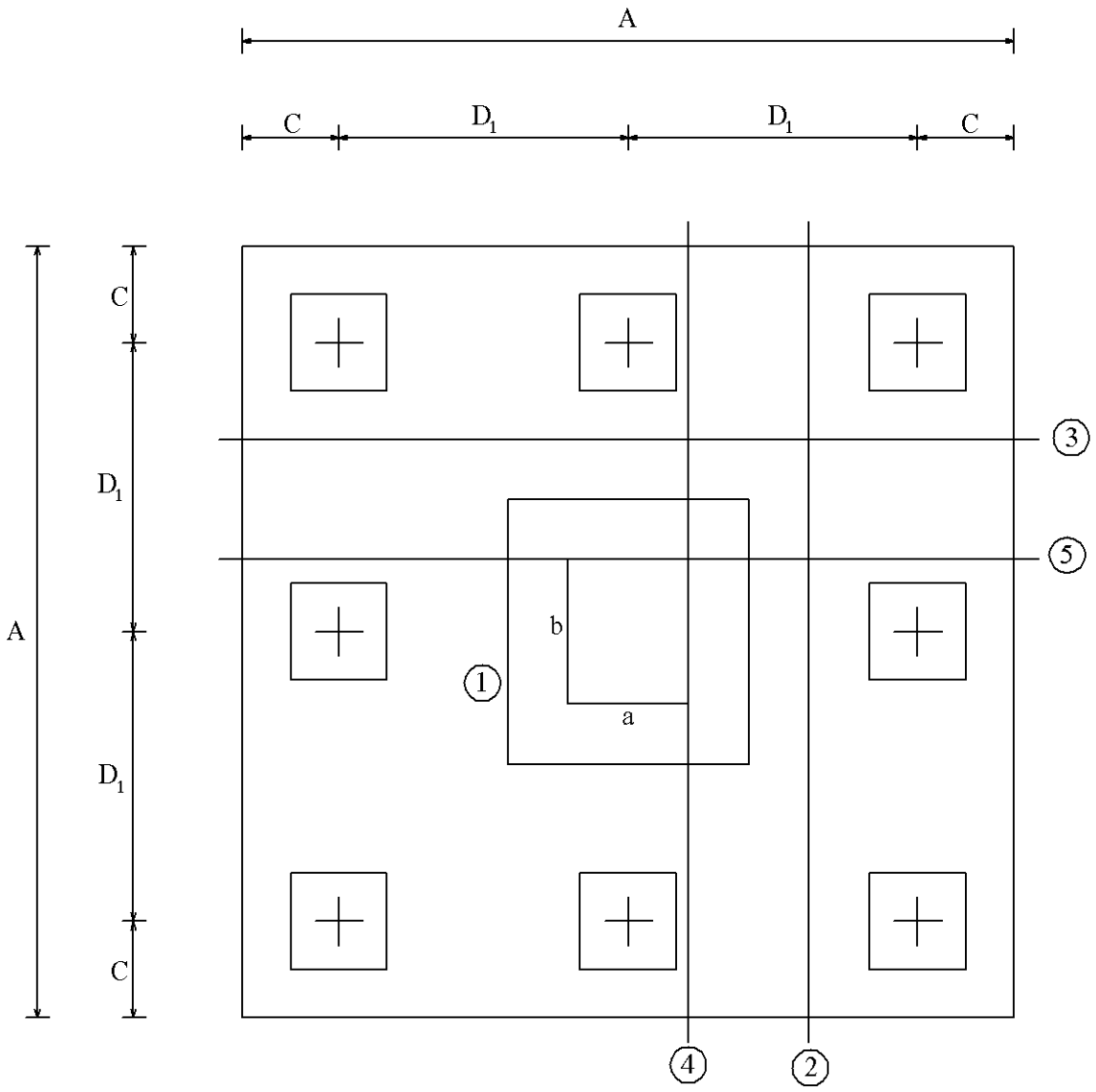


F-7 SECTION

FOOTING F-7

รูปที่ 6.74 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 7 ต้น

6.20 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 8 ต้น



รูปที่ 6.75 ฐานรากบนเสาเข็ม 8 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 2D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.18 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 280 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 195 ตัน ตอม่อขนาด 0.80×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

DL = 280,000 kg

LL = 195,000 kg

P = DL + LL = 475,000 kg

a = 80 cm

b = 120 cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 475{,}000}{75{,}000} = 7.6 \Rightarrow 8 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m $= 40$ cm = ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m $= 40$ cm = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20$ m $= 120$ cm = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$$A = 2D_1 + 2C = 2\times1.20 + 2\times0.40 = 3.20 \text{ m}$$
$$B = 2D_1 + 2C = 2\times1.20 + 2\times0.40 = 3.20 \text{ m}$$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.00 \text{ m} = 100 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 280{,}000 + 195{,}000 = 475{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{8} = \frac{475{,}000}{8} = 59{,}375 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.80+1.00}{2} = 0.30$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 2\times59{,}375 = 118{,}750 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.00}{2} = 0.10$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_u = 2\times59{,}375\times\left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 89{,}062.5 \text{ kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ที่มุมถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{0.10^2 + 0.30^2} = 0.316 \text{ m}$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นที่มุม

$$V_p = 4P_r = 4\times59{,}375 = 237{,}500 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_p = 118{,}750 + 89{,}062.5 + 237{,}500 = 445{,}312.5 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (80 + 120 + 2 \times 100) = 800 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 800 \times 100 = 656{,}857.9755 \text{ kg} > V_p = 445{,}312.5 \text{ kg}$$

รับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.80}{2} - 1.00 = -0.20 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_u = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_u = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มบน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.00 = -0.40 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_u = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_u = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.10 = 0.90$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 280{,}000 + 195{,}000 = 475{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times0.80\times1.20\times0.90 = 2{,}073.6$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times3.20\times3.20\times1.10 = 27{,}033.6$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(3.20\times3.20-0.80\times1.20)\times0.90 = 14{,}114.88$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P+W_p+W_F+W_{BF}}{8}$$

$$P_a = \frac{475{,}000+2{,}073.6+27{,}033.6+14{,}114.88}{8}$$

$$P_a = 64{,}777.76 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1-\frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = 3\times59{,}375\times\left(1.20-\frac{0.80}{2}\right)$$

$$M_4 = 142{,}500 \text{ kg.m} = 14{,}250{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 3P_r = 3\times59{,}375 = 178{,}125 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{14{,}250{,}000}{1{,}500\times0.909\times100} = 104.51 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm ซึ่งมี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{178{,}125}{20.01\times0.909\times100} = 96.28 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{104.51}{4.909} = 21.3 \Rightarrow 22 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{96.28}{7.854} = 12.3 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

ใช้ 22-DB 25 mm

$$M_5 = 3P_r\left(D_1-\frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 3\times59{,}375\times\left(1.20-\frac{1.20}{2}\right)$$

$$M_5 = 106{,}875 \text{ kg.m} = 10{,}687{,}500 \text{ kg.cm}$$

$$V_5 = 3P_r = 3\times59{,}375 = 178{,}125 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{10{,}687{,}500}{1{,}500\times0.909\times100} = 78.383 \text{ cm}^2$$

เลือก DB 25 mm ซึ่งมี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{178{,}125}{20.01\times 0.909\times 100} = 96.28 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{78.383}{4.909} = 15.97 \Rightarrow 16 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือน

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{96.28}{7.854} = 12.3 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

อาจจะใช้ 16-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

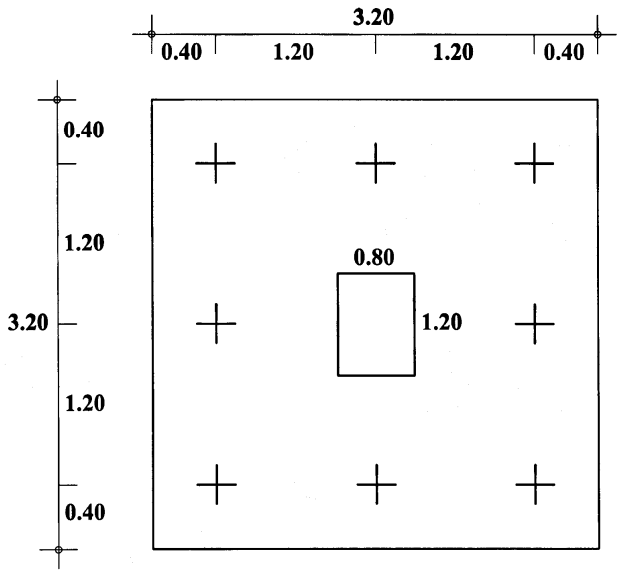
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

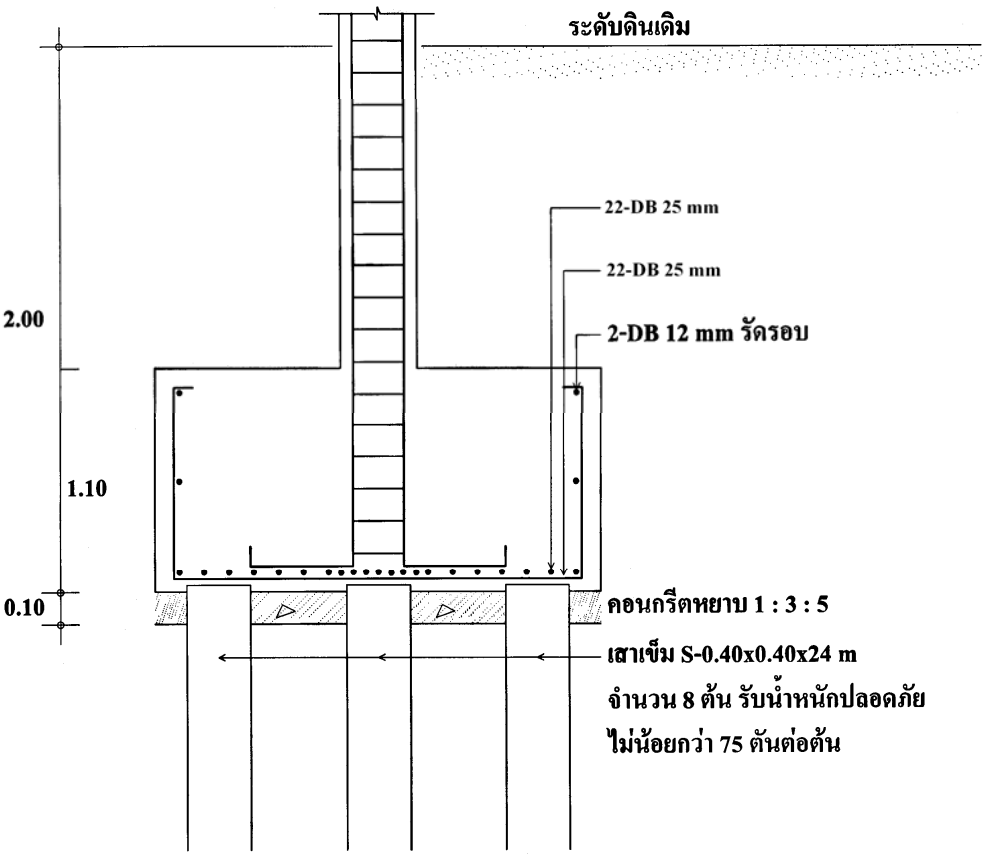
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-8 PLAN

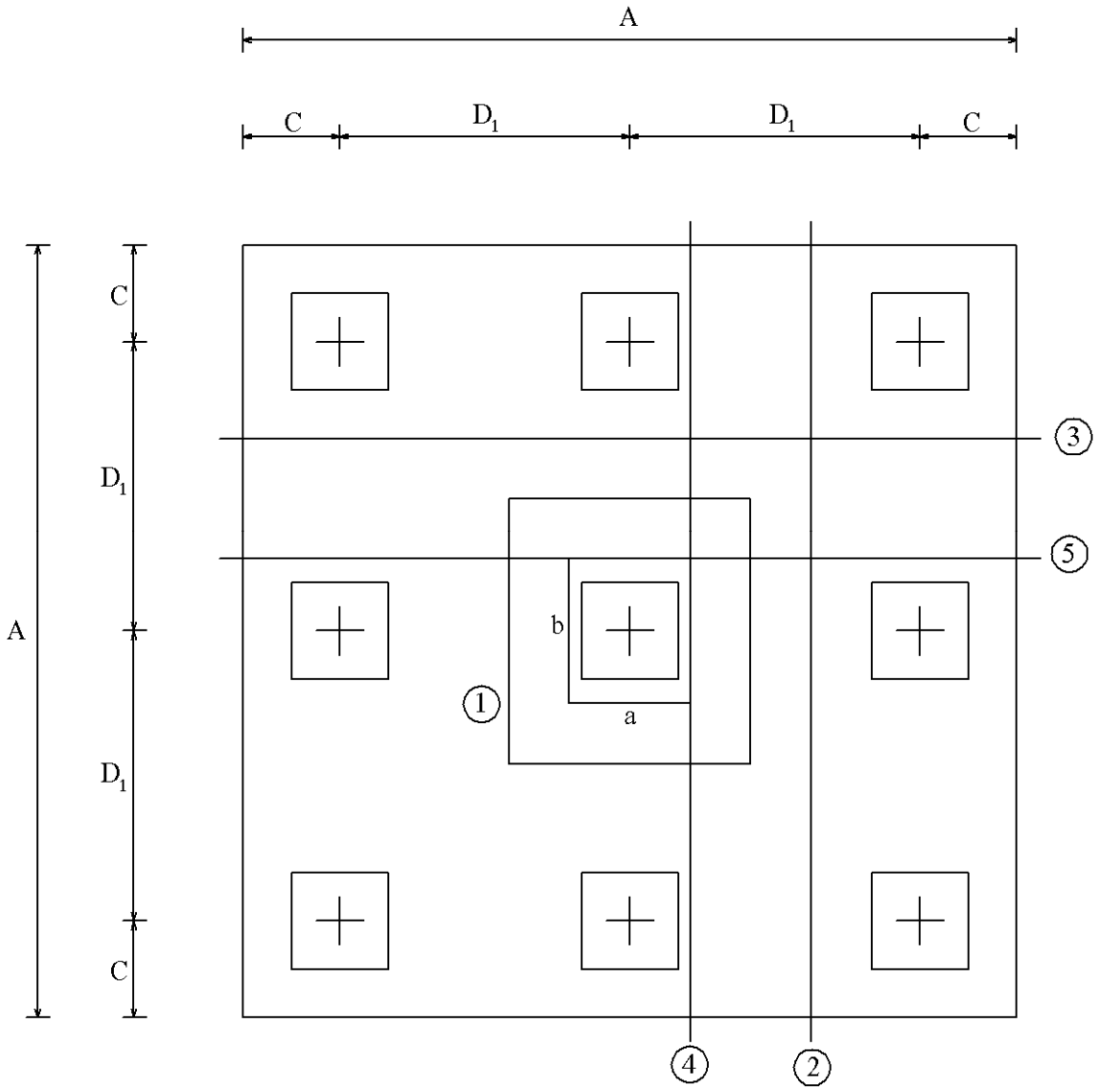


F-8 SECTION

FOOTING F-8

รูปที่ 6.76 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 8 ต้น

6.19 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 9 ต้น



รูปที่ 6.77 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 9 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 2D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.19 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 320 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 220 ตัน ตอม่อขนาด 0.80×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

DL = 320,000 kg

LL = 220,000 kg

P = DL + LL = 540,000 kg

a = 80 cm

b = 120 cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 540{,}000}{75{,}000} = 8.64 \Rightarrow 9 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m = 40 cm = ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m = 40 cm = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20$ m = 120 cm = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$$A = 2D_1 + 2C = 2\times 1.20 + 2\times 0.40 = 3.20 \text{ m}$$
$$B = 2D_1 + 2C = 2\times 1.20 + 2\times 0.40 = 3.20 \text{ m}$$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.00 \text{ m} = 100 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 320{,}000 + 220{,}000 = 540{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{9} = \frac{540{,}000}{9} = 60{,}000 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.80+1.00}{2} = 0.30$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 2\times 60{,}000 = 120{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.00}{2} = 0.10$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2\times 60{,}000 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 90{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ที่มุมถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{0.10^2 + 0.30^2} = 0.316 \text{ m}$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นที่มุม

$$V_p = 4P_r = 4\times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนเจาะทะลุรวม

$$V_u = 120{,}000 + 90{,}000 + 240{,}000 = 450{,}000 \text{ kg}$$

หากำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2 \times (80 + 120 + 2 \times 100) = 800 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 800 \times 100 = 656{,}857.9755 \text{ kg} > V_p = 450{,}000 \text{ kg}$$

รับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.80}{2} - 1.00 = -0.20 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_u = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มบน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.00 = -0.40 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_u = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_u = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.10 = 0.90$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 320{,}000 + 220{,}000 = 540{,}000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.80 \times 1.20 \times 0.90 = 2{,}073.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 3.20 \times 3.20 \times 1.10 = 27{,}033.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (3.20 \times 3.20 - 0.80 \times 1.20) \times 0.90 = 14{,}114.88 \text{ kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{9}$$

$$P_a = \frac{540{,}000 + 2{,}073.6 + 27{,}033.6 + 14{,}114.88}{9}$$

$$P_a = 64{,}802 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = 3 \times 60{,}000 \times \left(1.20 - \frac{0.80}{2}\right)$$

$$M_4 = 144{,}000 \text{ kg.m} = 14{,}400{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 3P_r = 3 \times 60{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{14{,}400{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 105.61 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{180{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 100} = 98.96 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{105.61}{4.909} = 21.5 \Rightarrow 22 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{98.96}{7.854} = 12.6 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 22-DB 25 mm

$$M_5 = 3P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 3 \times 60{,}000 \times \left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$

$$M_5 = 108{,}000 \text{ kg.m} = 10{,}800{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_5 = 3P_r = 3 \times 60{,}000 = 180{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{10{,}800{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 79.21 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{180{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 100} = 98.96 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{79.21}{4.909} = 16.1 \Rightarrow 17 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{98.96}{7.854} = 12.6 \Rightarrow 13 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 17-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

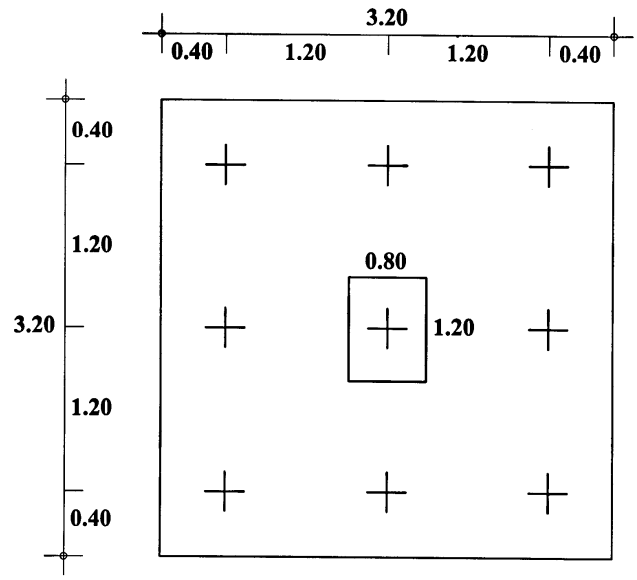
$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

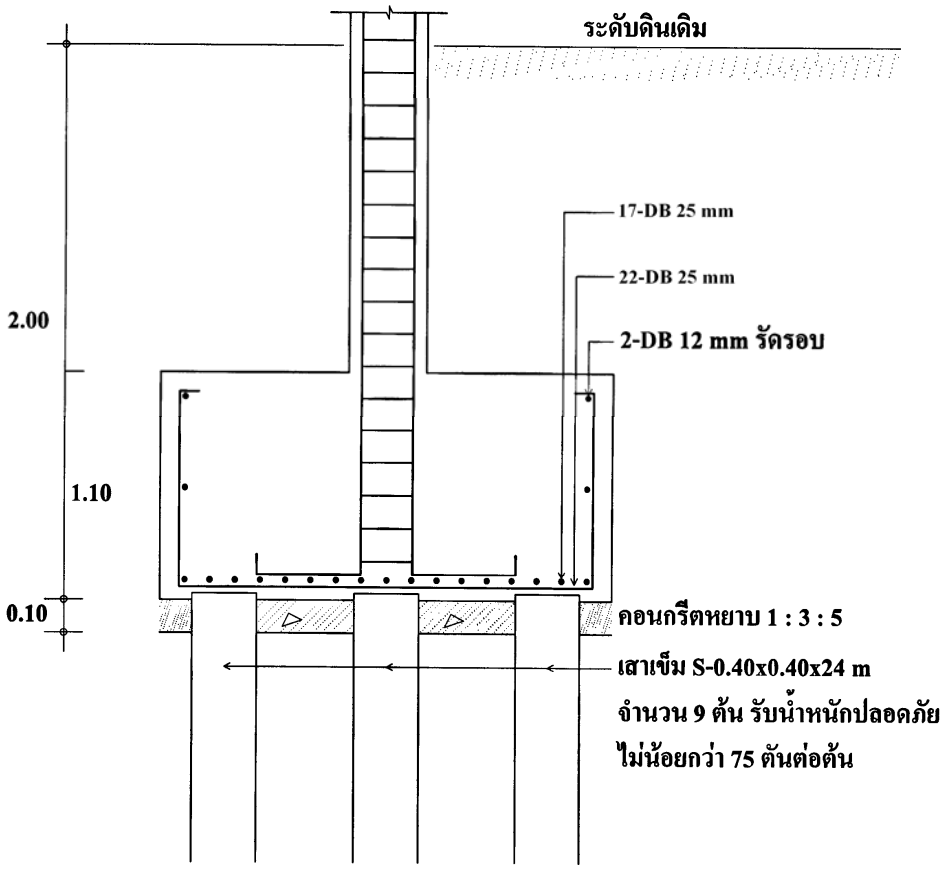
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-9 PLAN

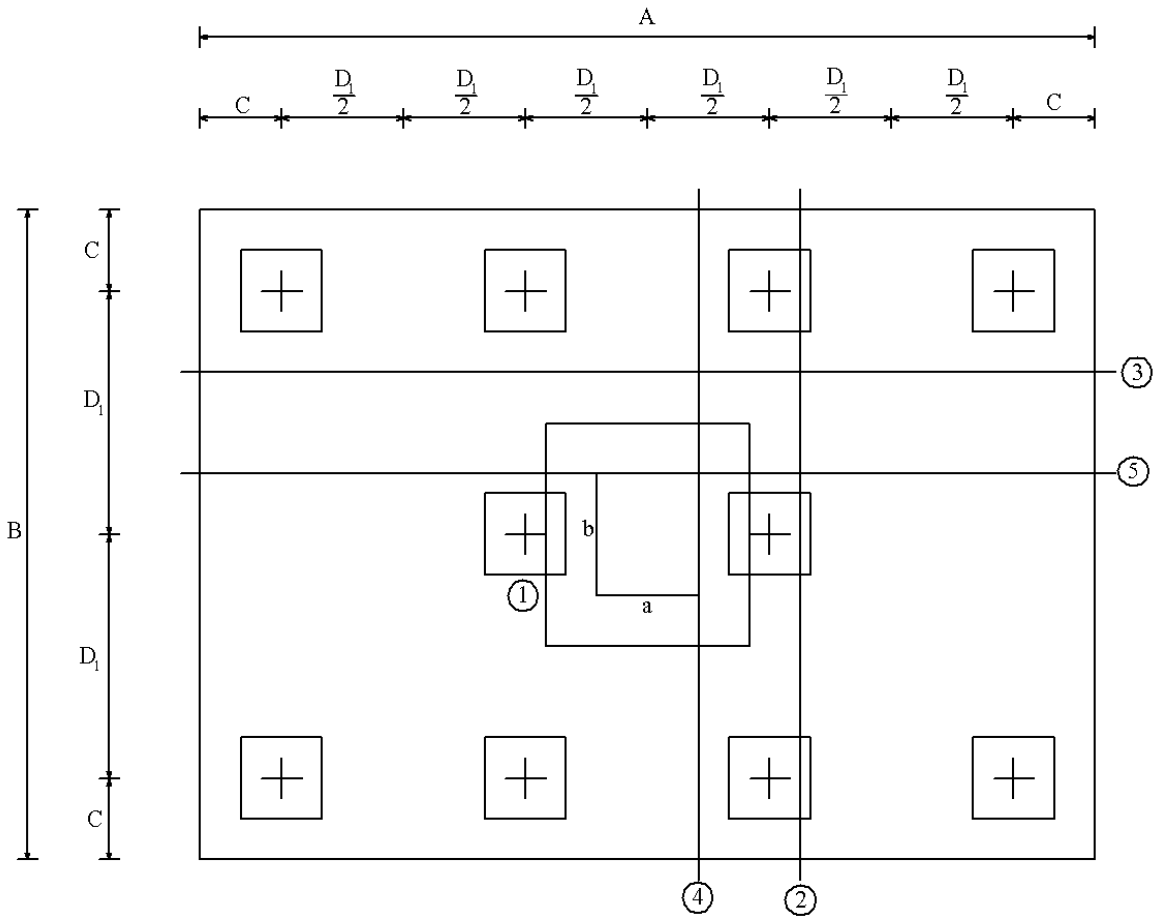


F-9 SECTION

FOOTING F-9

รูปที่ 6.78 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 9 ต้น

6.20 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 10 ต้น



รูปที่ 6.79 ฐานรากบนเสาเข็ม 10 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 3D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.20 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 360 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 255 ตัน ตอม่อขนาด 0.80×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=360{,}000$ kg

$LL=255{,}000$ kg

$P=DL+LL=615{,}000$ kg

$a=80$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times615{,}000}{75{,}000}=9.84\Rightarrow10\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.00$ m $=100$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 360{,}000 + 255{,}000 = 615{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{10} = \frac{615{,}000}{10} = 61{,}500 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็มคู่กลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a+d}{2} = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80+1.00}{2} = -0.30$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 0 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ต้นที่มุมในถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{1.20^2 + 1.20^2} - \sqrt{0.90^2 + 1.10^2} = 0.276 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นที่มุม

$$V_p = 4P_r = 4 \times 61{,}500 = 246{,}000 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20+1.00}{2} = 0.70$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 2 ต้นริมซ้ายขวา

$$V_p = 4P_r = 4 \times 61{,}500 = 246{,}000 \ \text{kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 246{,}000 + 246{,}000 = 492{,}000 \ \text{kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(80 + 120 + 2 \times 100) = 800 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 800 \times 100 = 656{,}857.9755 \text{ kg} > V_p = 492{,}000 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80}{2} - 1.00 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 2 ต้นริมขวาสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.80}{2} - 1.00 = 0.40 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 2P_r = 2 \times 61{,}500 = 123{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 100 = 143{,}765.1418 \text{ kg} > V_b = 123{,}000 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.00 = -0.40 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 440 \times 100 = 197{,}677.07 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.00 + 0.10 = 1.10$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.10 = 0.90$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 360{,}000 + 255{,}000 = 615{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.80 \times 1.20 \times 0.90 = 2{,}073.6$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 4.40 \times 3.20 \times 1.10 = 37{,}171.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (4.40 \times 3.20 - 0.80 \times 1.20) \times 0.90 = 19{,}955.52$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{10}$$

$$P_a = \frac{615{,}000 + 2{,}073.6 + 37{,}171.2 + 19{,}955.52}{10}$$

$$P_a = 67{,}420 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{a}{2}\right) + 2P_r\left(1.5D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r\left(\frac{3D_1}{2} - \frac{3a}{2} + 3D_1 - a\right) = P_r(4.5D_1 - 2.5a)$$

$$M_4 = 61{,}500 \times (4.5 \times 1.20 - 2.5 \times 0.80)$$

$$M_4 = 209{,}100 \text{ kg.m} = 20{,}910{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 5P_r = 5 \times 61{,}500 = 307{,}500 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{16{,}605{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 100} = 121.782 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909$ cm^2, $\sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{307{,}500}{20.01 \times 0.909 \times 100} = 169.057 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{121.782}{4.909} = 24.8 \Rightarrow 25 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{169.057}{7.854} = 21.5 \Rightarrow 22 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 25-DB 25 mm

$$M_5 = 4P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 4\times 61{,}500\times\left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$

$$M_5 = 147{,}600 \text{ kg.m} = 14{,}760{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_5 = 4P_r = 4\times 61{,}500 = 246{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{14{,}760{,}000}{1{,}500\times 0.909\times 100} = 108.25 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = \frac{2L}{B+L}A_{s5} = \frac{2\times 4.40}{3.20+4.40}\times 108.25 = 125.343 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{246{,}000}{20.01\times 0.909\times 100} = 135.246 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{125.343}{4.909} = 25.5 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{135.246}{7.854} = 17.22 \Rightarrow 18 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 26-DB 25 mm ใช้เหมือนกันทั้งสองทิศทาง

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

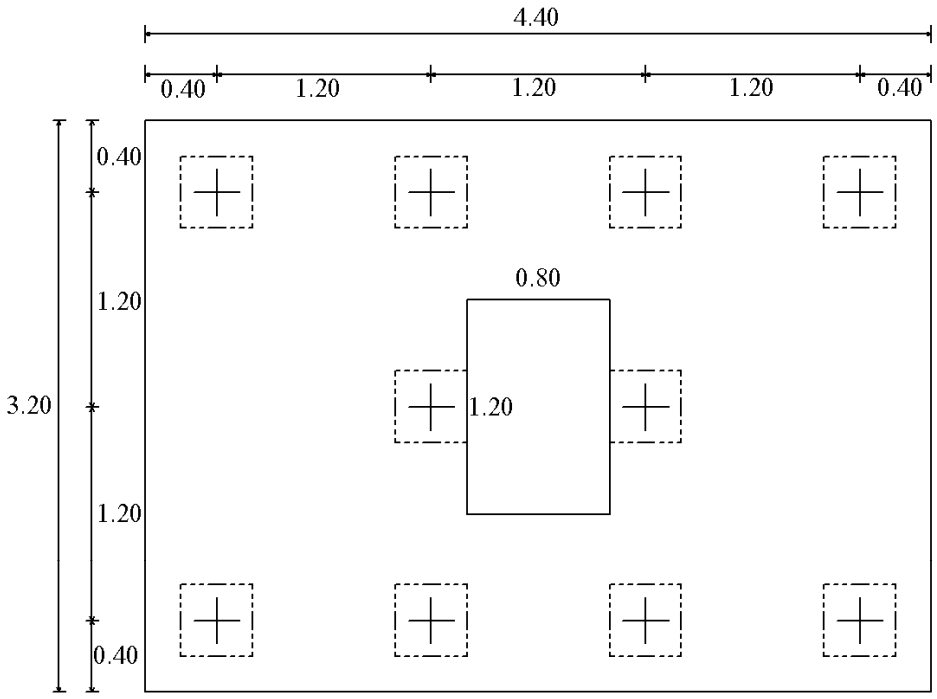
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

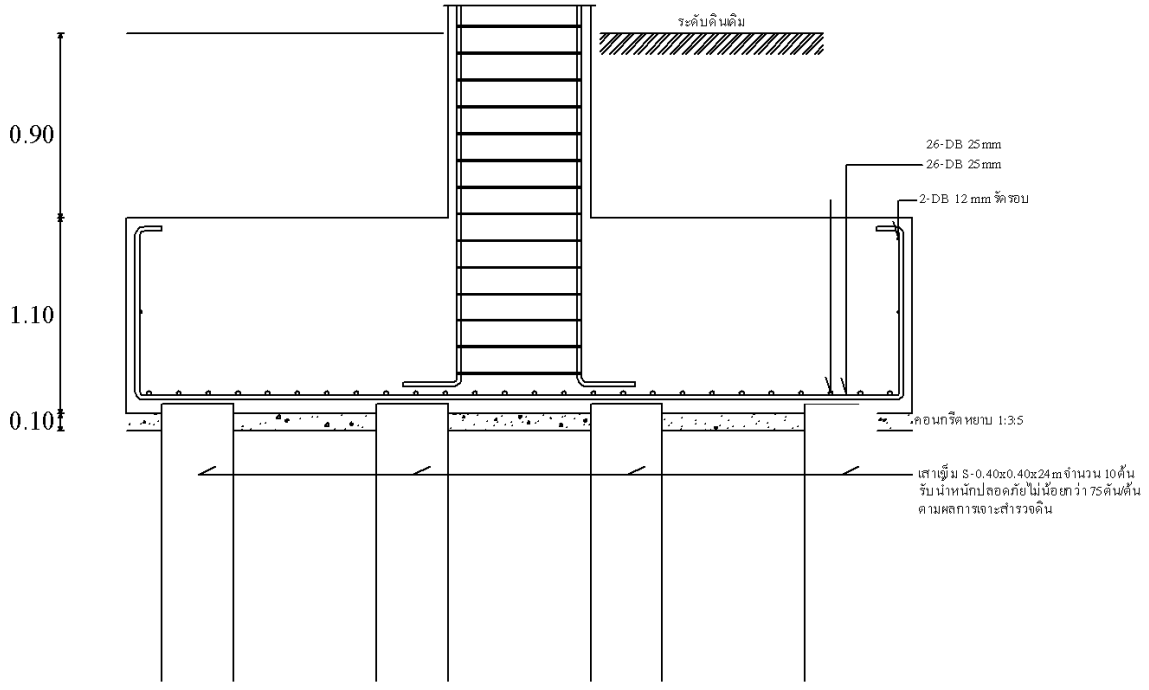
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-10 PLAN



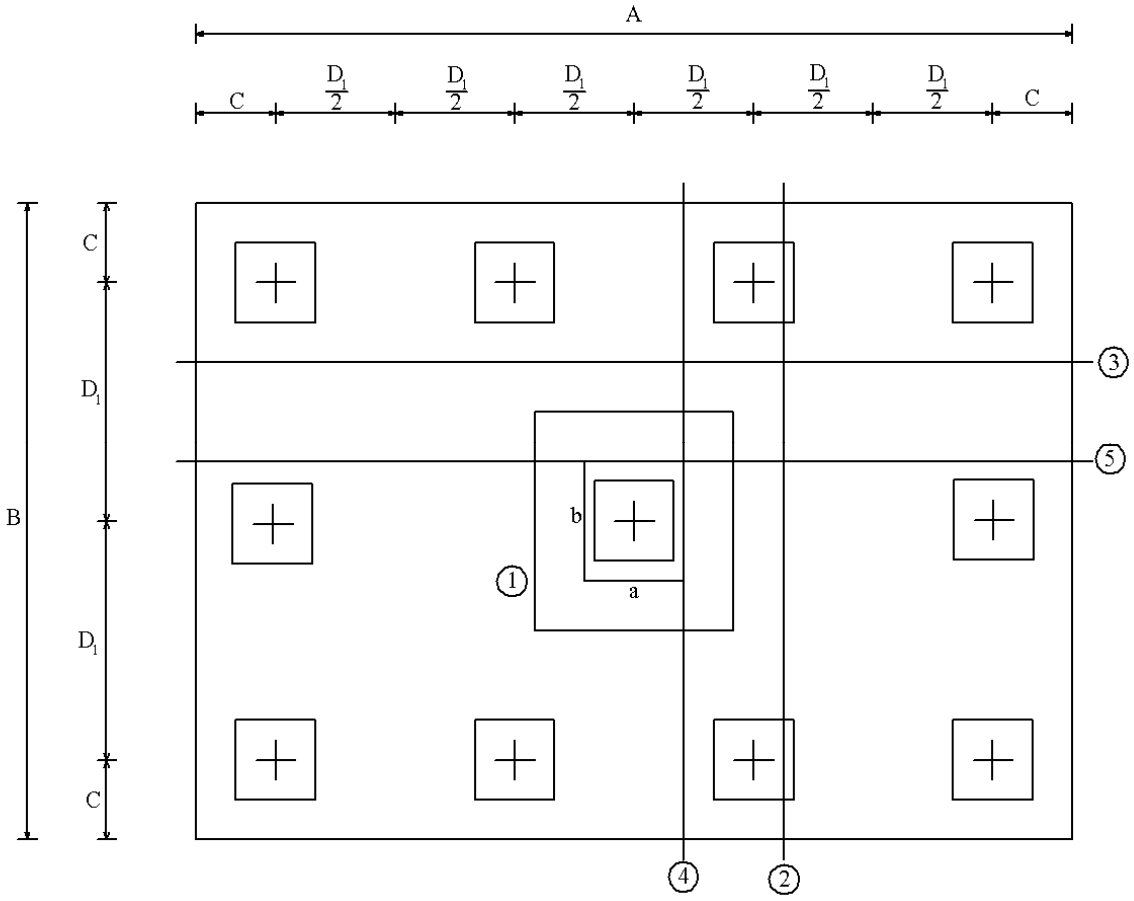
F-10 SECTION

FOOTING F-10

SCALE 1:20

รูปที่ 6.80 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 10 ต้น

6.21 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 11 ต้น



รูปที่ 6.81 ฐานรากบนเสาเข็ม 11 ต้น

กำหนด

$D =$ ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D =$ ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D =$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 3D_1 + 2C =$ ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C =$ ความกว้างของฐานราก

$a =$ ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10 \text{ m} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.21 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 390 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 290 ตัน ตอม่อขนาด 0.80×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=390{,}000$ kg

$LL=290{,}000$ kg

$P=DL+LL=680{,}000$ kg

$a=80$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times680{,}000}{75{,}000}=10.88\Rightarrow11\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.30$ m $=130$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 390{,}000 + 290{,}000 = 680{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{11} = \frac{680{,}000}{11} = 61{,}818.18182 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตรงกับศูนย์กลางตอม่อ ไม่มีผลต่อแรงเฉือนเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นใน ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.30}{2} = -0.05$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 61{,}818.18182 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 92{,}727.27273 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.80+1.30}{2} = 0.75$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 61{,}818.18182 = 247{,}272.7273 \ \text{kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 92{,}727.27273 + 247{,}272.7273 = 340{,}000 \ \text{kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(80 + 120 + 2 \times 130) = 920 \ \text{cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 920 \times 130 = 982{,}002.6734 \ \text{kg} > V_p = 340{,}000 \ \text{kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 2 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80}{2} - 1.30 = -1.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 3 ต้นริมขวาสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.80}{2} - 1.30 = 0.10 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 3P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 3 \times 61{,}818.18182 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 139{,}090.9091 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 130 = 186{,}894.6844 \text{ kg} > V_b = 139{,}090.9091 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.30 = -0.70 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 440 \times 130 = 256{,}980.191 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.30 + 0.10 = 1.40 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.40 = 0.60 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 390{,}000 + 290{,}000 = 680{,}000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.80 \times 1.20 \times 0.60 = 1{,}382.4 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 4.40 \times 3.20 \times 1.40 = 47{,}308.8 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (4.40 \times 3.20 - 0.80 \times 1.20) \times 0.60 = 13{,}303.68$ kg = น้ำหนักดินถมต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{11}$$

$$P_a = \frac{680{,}000 + 1{,}382.4 + 47{,}308.8 + 13{,}303.68}{11}$$

$$P_a = 67{,}454.08 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 2P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{a}{2}\right) + 3P_r\left(1.5D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(D_1 - a + 4.5D_1 - 1.5a) = P_r(5.5D_1 - 2.5a)$$

$$M_4 = 61{,}818.18182 \times (5.5 \times 1.20 - 2.5 \times 0.80)$$

$$M_4 = 284{,}363.6364 \text{ kg.m} = 28{,}436{,}363.64 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 5P_r = 5 \times 61{,}818.18182 = 309{,}090.9091 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{28{,}436{,}363.64}{1{,}500 \times 0.909 \times 130} = 160.426 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{307{,}500}{20.01 \times 0.909 \times 130} = 130.717 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{160.426}{4.909} = 32.7 \Rightarrow 33 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{130.717}{7.854} = 16.6 \Rightarrow 17 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 33-DB 25 mm

$$M_5 = 4P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 4 \times 61{,}818.18182 \times \left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$

$$M_5 = 148{,}363.6364 \text{ kg.m} = 14{,}836{,}363.64 \text{ kg.cm}$$

$$V_5 = 4P_r = 4 \times 61{,}818.18182 = 247{,}272.7273 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{14{,}836{,}363.64}{1{,}500 \times 0.909 \times 130} = 83.7 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = \frac{2L}{B + L} A_{s5} = \frac{2 \times 4.40}{3.20 + 4.40} \times 83.7 = 96.92 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{247{,}272.7273}{20.01\times 0.909\times 130} = 104.574 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{96.92}{4.909} = 19.7 \Rightarrow 20 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{104.574}{7.854} = 13.3 \Rightarrow 14 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 20-DB 25 mm ใช้เหมือนกันทั้งสองทิศทาง

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

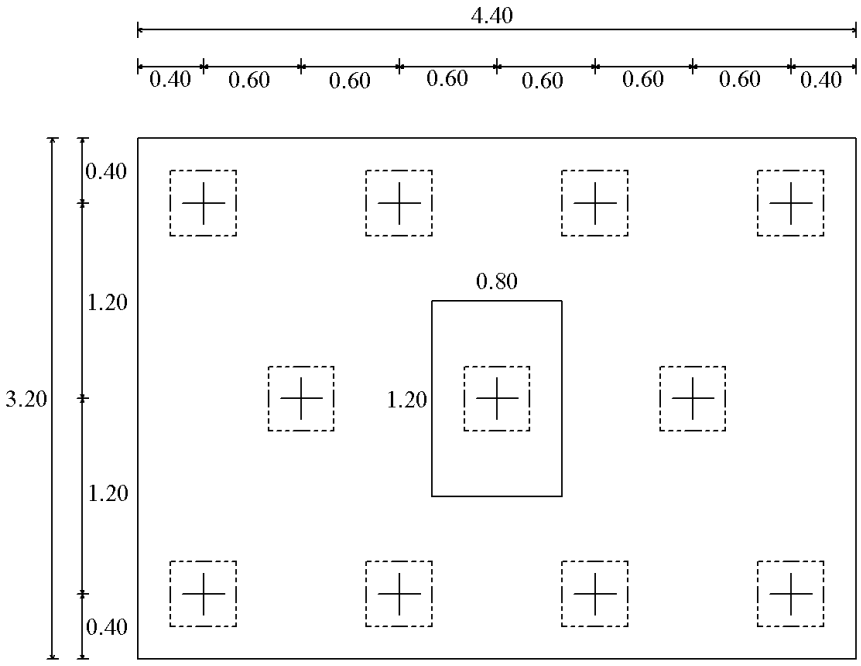
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

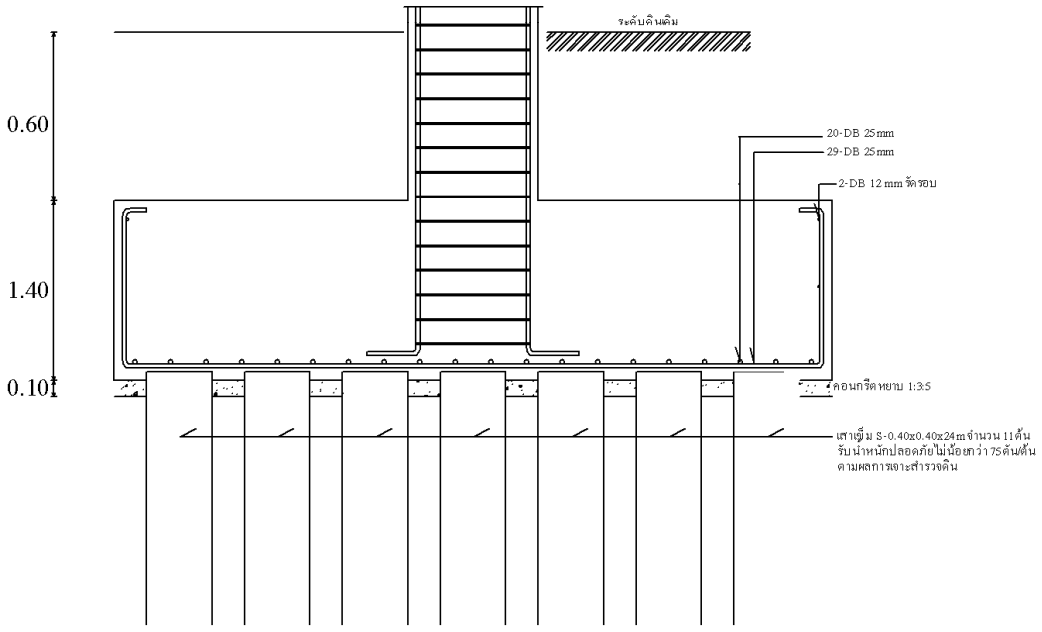
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-11 PLAN



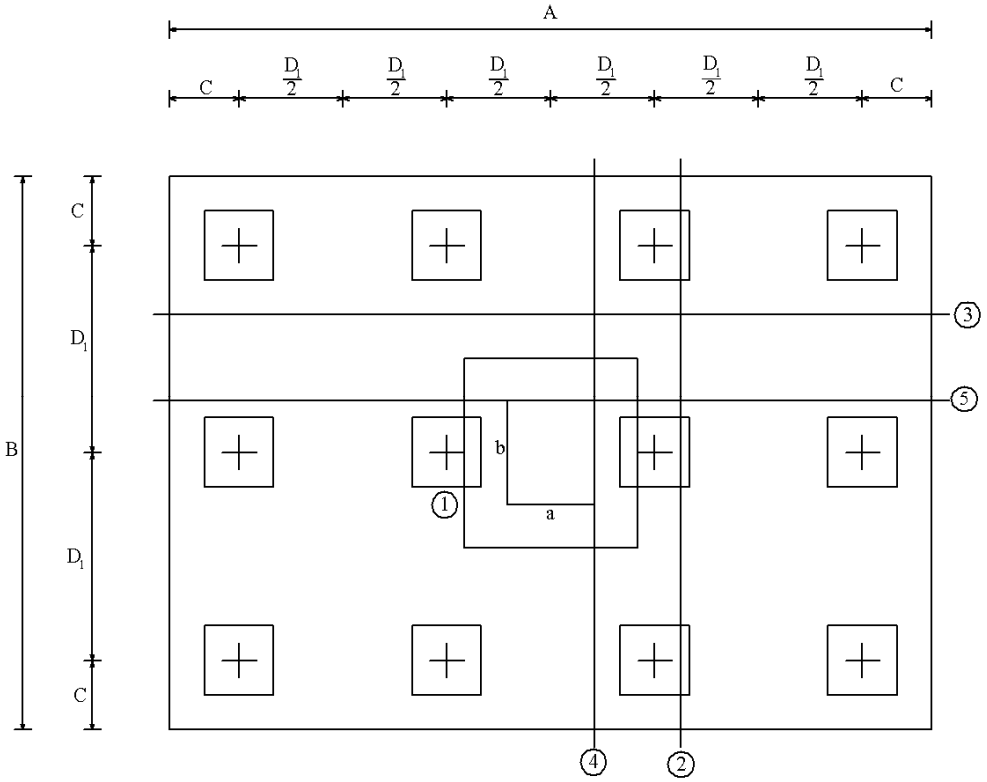
F-11 SECTION

FOOTING F-11

SCALE 1:20

รูปที่ 6.82 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 11 ต้น

6.22 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 12 ต้น



รูปที่ 6.83 ฐานรากบนเสาเข็ม 12 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 3D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.22 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 430 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 320 ตัน ตอม่อขนาด 0.80×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\ \text{ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=430{,}000$ kg

$LL=320{,}000$ kg

$P=DL+LL=750{,}000$ kg

$a=80$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times750{,}000}{75{,}000}=12\Rightarrow12\ \text{ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.30$ m $=130$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 430{,}000 + 320{,}000 = 750{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{12} = \frac{750{,}000}{12} = 62{,}500 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a+d}{2} = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80+1.30}{2} = -0.45 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นใน ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.30}{2} = -0.05$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 62{,}500 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 187{,}500 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 6 ต้นนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.80+1.30}{2} = 0.75$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 6P_r = 6 \times 62{,}500 = 375{,}000 \ \text{kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 187{,}500 + 375{,}000 = 562{,}500 \ \text{kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(80 + 120 + 2 \times 130) = 920 \ \text{cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 920 \times 130 = 982{,}002.6734 \ \text{kg} > V_p = 562{,}000 \ \text{kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.80}{2} - 1.30 = -1.10 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 3 ต้นริมขวาสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.80}{2} - 1.30 = 0.10 \ \text{m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 3P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 3 \times 62{,}500 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 140{,}625 \ \text{kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 130 = 186{,}894.6844 \ \text{kg} > V_b = 140{,}625 \ \text{kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบน

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.30 = -0.70 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เมื่อ $x < -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}\, Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 440 \times 130 = 256{,}980.191 \ \text{kg} > V_b = 0 \ \text{kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.30 + 0.10 = 1.40$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.40 = 0.60$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 430,000 + 320,000 = 750,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.80 \times 1.20 \times 0.60 = 1,382.4$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 4.40 \times 3.20 \times 1.40 = 47,308.8$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (4.40 \times 3.20 - 0.80 \times 1.20) \times 0.60 = 13,303.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{12}$$

$$P_a = \frac{750,000 + 1,382.4 + 47,308.8 + 13,303.68}{12}$$

$$P_a = 67,666.24 \text{ kg/pile} < 75,000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{a}{2}\right) + 3P_r\left(1.5D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(1.5D_1 - 1.5a + 4.5D_1 - 1.5a) = P_r(6D_1 - 3a)$$

$$M_4 = 62,500 \times (6 \times 1.20 - 3 \times 0.80)$$

$$M_4 = 300,000 \text{ kg.m} = 30,000,000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 6P_r = 6 \times 62,500 = 375,000 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{30,000,000}{1,500 \times 0.909 \times 130} = 169.248 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{375,000}{20.01 \times 0.909 \times 130} = 158.59 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{169.248}{4.909} = 34.5 \Rightarrow 35 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{158.59}{7.854} = 20.2 \Rightarrow 21 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 35-DB 25 mm

$$M_5 = 4P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 4\times 62{,}500\times\left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$

$$M_5 = 150{,}000 \text{ kg.m} = 15{,}000{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_5 = 4P_r = 4\times 62{,}500 = 250{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{15{,}000{,}000}{1{,}500\times 0.909\times 130} = 84.624 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = \frac{2L}{B+L}A_{s5} = \frac{2\times 4.40}{3.20+4.40}\times 84.624 = 97.986 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{250{,}000}{20.01\times 0.909\times 130} = 105.727 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{97.986}{4.909} = 19.96 \Rightarrow 20 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{105.727}{7.854} = 13.46 \Rightarrow 14 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 20-DB 25 mm ใช้เหมือนกันทั้งสองทิศทาง

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

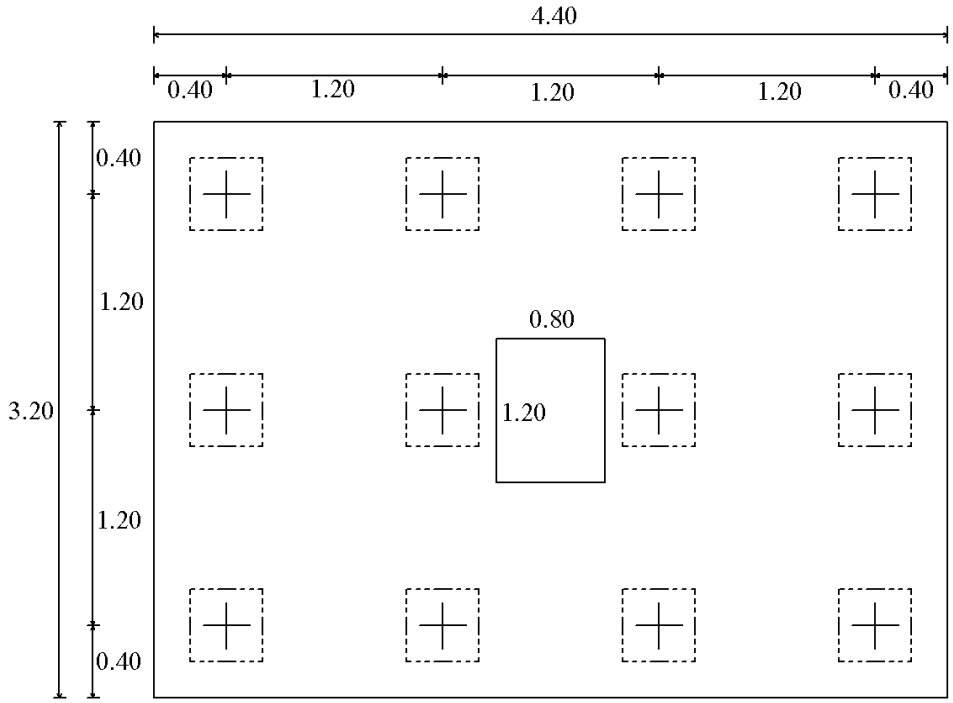
$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

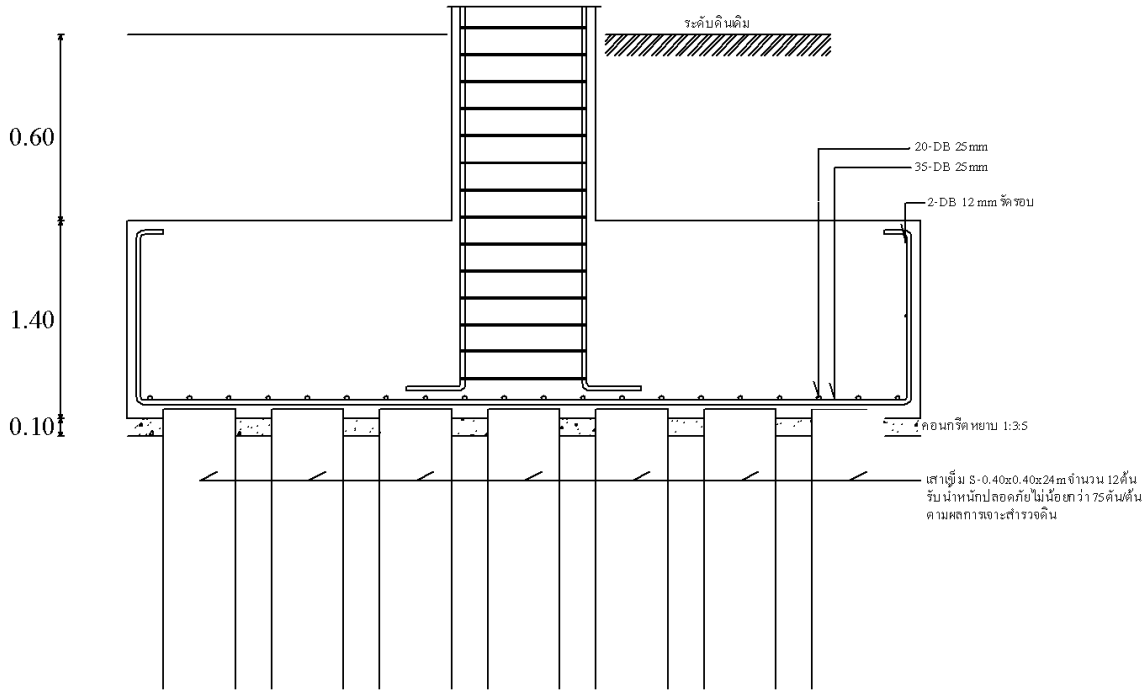
$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F-12 PLAN



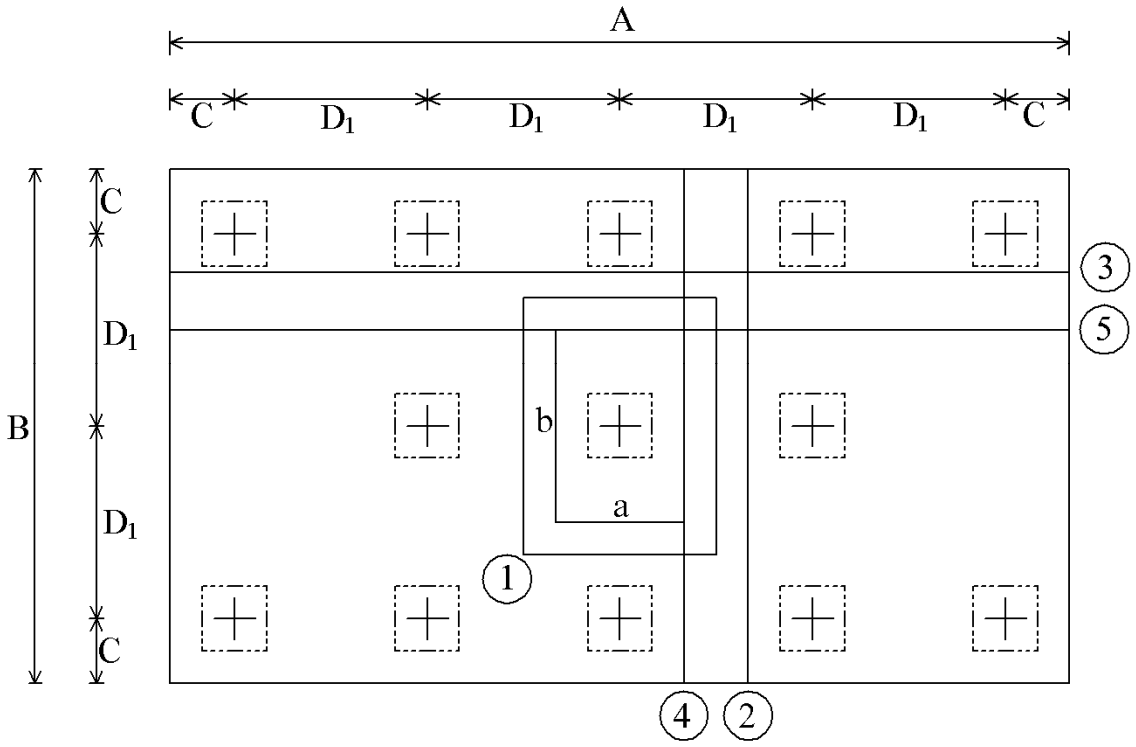
F-12 SECTION

FOOTING F-12

SCALE 1:20

รูปที่ 6.84 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 12 ต้น

6.23 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 13 ต้น



รูปที่ 6.85 ฐานรากบนเสาเข็ม 13 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.23 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 460 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 350 ตัน ตอม่อขนาด 0.90×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=460{,}000$ kg

$LL=350{,}000$ kg

$P=DL+LL=810{,}000$ kg

$a=90$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times810{,}000}{75{,}000}=12.96\Rightarrow13\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.40$ m $=140$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 460{,}000 + 350{,}000 = 810{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{13} = \frac{810{,}000}{13} = 62{,}307.69231 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ต้นกลางตรงตอม่อไม่มีผลต่อแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.90+1.40}{2} = 0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 62{,}307.69231 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.05}{0.40}\right) = 77{,}884.61538 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.40}{2} = -0.10 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 62{,}307.69231 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.10}{0.40}\right) = 31{,}153.84615 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบนล่างซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \sqrt{\left(\frac{0.90+1.40}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.20+1.40}{2}\right)^2} = -0.03859922 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 62,307.69231 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.03859922}{0.40}\right) = 100,565.1008 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(0.90+1.40)^2 + (1.20+1.40)^2} = 0.9476 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 62,307.69231 = 249,230.7692 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 77,884.61538 + 31,153.84615 + 100,565.1008 + 249,230.7692 = 458,834.3316 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(90 + 120 + 2 \times 140) = 980 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 980 \times 140 = 1,126,511.428 \text{ kg} > V_p = 458,834.3316 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = -0.65 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 2 ต้นริมขวาสุด

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = 0.55 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 2P_r = 2 \times 62,307.69231 = 124,615.3846 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 140 = 201,271.1985 \text{ kg} > V_b = 124,615.3846 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มบน 5 ต้น

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 560 \times 140 = 352,224.5974 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.40 + 0.10 = 1.50$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.50 = 0.50$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 460,000 + 350,000 = 810,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.90 \times 1.20 \times 0.50 = 1,296$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 5.60 \times 3.20 \times 1.50 = 64,512$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (5.60 \times 3.20 - 0.90 \times 1.20) \times 0.50 = 14,229.8$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{13}$$

$$P_a = \frac{810,000 + 1,296 + 64,512 + 14,229.8}{13}$$

$$P_a = 68,464.44615 \text{ kg/pile} < 75,000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 2P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$
$$M_4 = P_r\left(3D_1 - 1.5a + 4D_1 - a\right) = P_r\left(7D_1 - 2.5a\right)$$
$$M_4 = 62{,}307.69231 \times \left(7 \times 1.20 - 2.5 \times 0.90\right)$$
$$M_4 = 383{,}192.3077 \text{ kg.m} = 38{,}319{,}230.77 \text{ kg.cm}$$
$$V_4 = 5P_r = 5 \times 62{,}307.69231 = 311{,}538.4615 \text{ kg}$$
$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{38{,}319{,}230.77}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 200.74 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{311{,}538.4615}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 122.341 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{200.74}{4.909} = 40.9 \Rightarrow 41 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{122.341}{7.854} = 15.6 \Rightarrow 16 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 41-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5 \times 62{,}307.69231 \times \left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$
$$M_5 = 186{,}923.0769 \text{ kg} \cdot \text{m} = 18{,}692{,}307.69 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$
$$V_5 = 5P_r = 5 \times 62{,}307.69231 = 311{,}538.4615 \text{ kg}$$
$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{18{,}692{,}307.69}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 97.922 \text{ cm}^2$$

ปรับปริมาณตามมาตรฐานกำหนด

$$A_{s5} = \frac{2L}{B+L}A_{s5} = \frac{2 \times 5.60}{3.20 + 5.60} \times 97.922 = 124.628 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{311{,}538.4615}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 122.341 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{124.628}{4.909} = 25.4 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{122.341}{7.854} = 15.6 \Rightarrow 16 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 26-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริงทางขนานขอบสั้น

$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

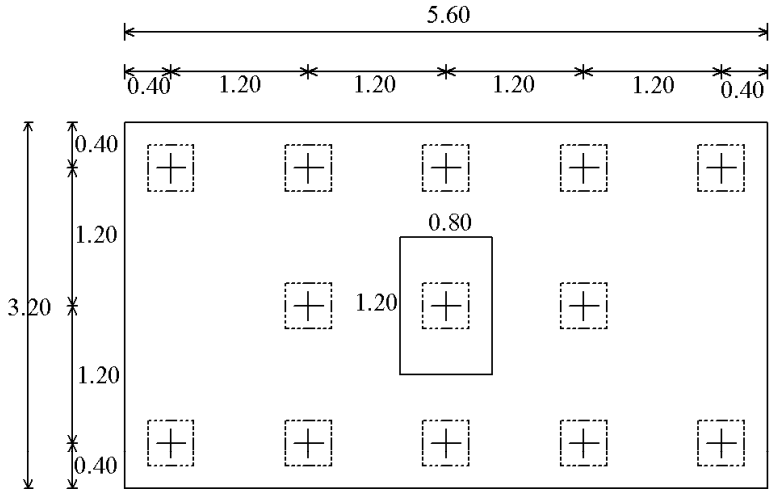
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

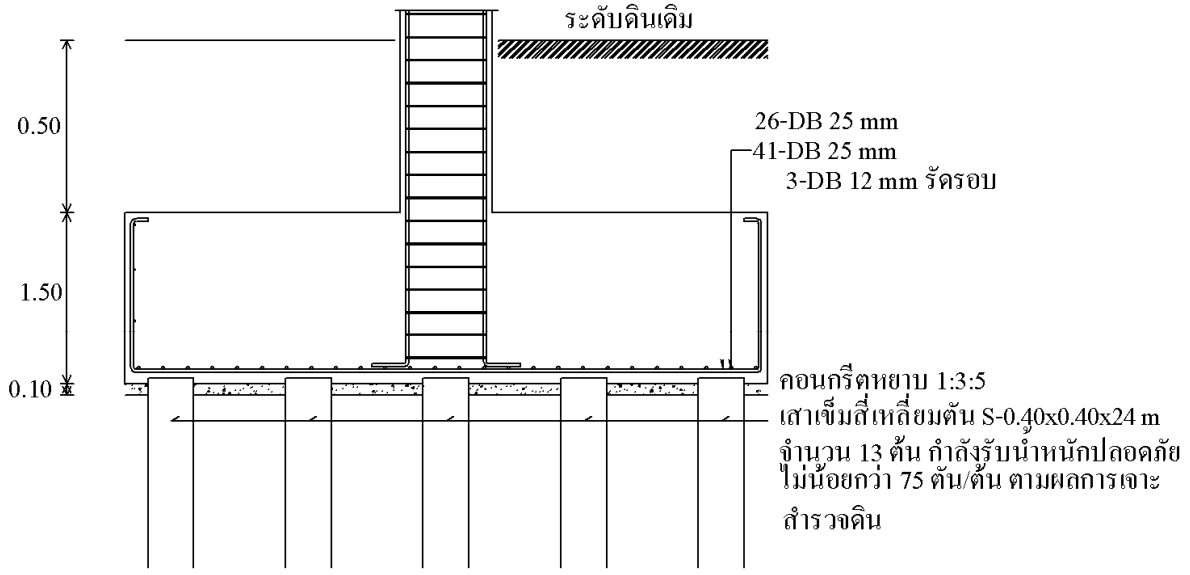
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{90}{2} - 10 = 225 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F13 PLAN



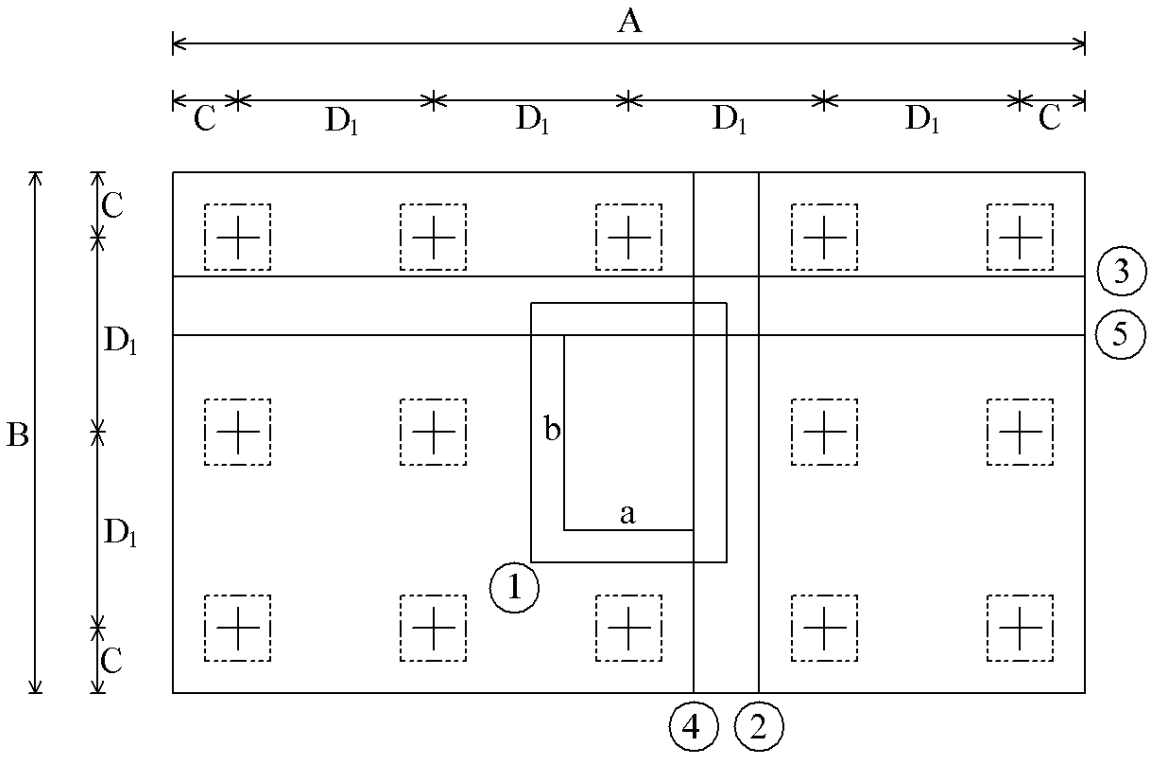
F13 SECTION

FOOTING F-13

SCALE 1:20

รูปที่ 6.86 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 13 ต้น

6.24 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 14 ต้น



รูปที่ 6.87 ฐานรากบนเสาเข็ม 14 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.24 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 480 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 380 ตัน ตอม่อขนาด 0.90×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\ \text{ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=480{,}000$ kg

$LL=380{,}000$ kg

$P=DL+LL=860{,}000$ kg

$a=90$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times860{,}000}{75{,}000}=13.76\Rightarrow14\ \text{ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.40$ m $=140$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 480{,}000 + 380{,}000 = 860{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{14} = \frac{860{,}000}{14} = 61{,}428.57143 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.90+1.40}{2} = 0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 61{,}428.57143 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.05}{0.40}\right) = 76{,}785.71429 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.40}{2} = -0.10 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 61{,}428.57143 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.10}{0.40}\right) = 30{,}714.28571 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบนล่างซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \sqrt{\left(\frac{0.90+1.40}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.20+1.40}{2}\right)^2} = -0.03859922 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 61{,}428.57143 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.03859922}{0.40}\right) = 99{,}146.19343 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(0.90+1.40)^2 + (1.20+1.40)^2} = 0.9476 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.2 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = 0.55$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด และ 2 ต้นกลางสุดซ้ายขวา

$$V_p = 6P_r = 6 \times 61{,}428.57143 = 368{,}571.4286 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 76{,}785.71429 + 30{,}714.28571 + 99{,}146.19343 + 368{,}571.4286 = 575{,}217.622 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(90 + 120 + 2 \times 140) = 980 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 980 \times 140 = 1{,}126{,}511.428 \text{ kg} > V_p = 575{,}217.622 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = -0.65 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 3 ต้นริมขวาสุด

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2\times 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = 0.55 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 3P_r = 3\times 61{,}428.57143 = 184{,}285.7143 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\times\sqrt{240}\times 320\times 140 = 201{,}271.1985 \text{ kg} > V_b = 184{,}285.7143 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มบน 5 ต้น

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\times\sqrt{240}\times 560\times 140 = 352{,}224.5974 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.40 + 0.10 = 1.50$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.50 = 0.50$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 480{,}000 + 380{,}000 = 860{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times 0.90\times 1.20\times 0.50 = 1{,}296$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times 5.60\times 3.20\times 1.50 = 64{,}512$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690\times(5.60\times 3.20 - 0.90\times 1.20)\times 0.50 = 14{,}229.8$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{14}$$

$$P_a = \frac{860{,}000 + 1{,}296 + 64{,}512 + 14{,}229.8}{14}$$

$$P_a = 67{,}145.55714 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 3P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$
$$M_4 = P_r(3D_1 - 1.5a + 6D_1 - 1.5a) = P_r(9D_1 - 3a) = 3P_r(3D_1 - a)$$
$$M_4 = 3 \times 61{,}428.57143 \times (3 \times 1.20 - 0.90)$$
$$M_4 = 497{,}571.4286 \text{ kg.m} = 49{,}757{,}142.86 \text{ kg.cm}$$
$$V_4 = 6P_r = 6 \times 61{,}428.57143 = 368{,}571.4286 \text{ kg}$$
$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{49{,}757{,}142.86}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 260.6587189 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{368{,}571.4286}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 144.738 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{260.659}{4.909} = 53.1 \Rightarrow 54 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{144.738}{7.854} = 18.4 \Rightarrow 19 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 54-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5 \times 61{,}428.57143 \times \left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$
$$M_5 = 184{,}285.7143 \text{ kg} \cdot \text{m} = 18{,}428{,}571.43 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$
$$V_5 = 5P_r = 5 \times 61{,}428.57143 = 307{,}142.8571 \text{ kg}$$
$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{18{,}428{,}571.43}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 96.54 \text{ cm}^2$$

ปรับปริมาณตามมาตรฐานกำหนด

$$A_{s5} = \frac{2L}{B+L} A_{s5} = \frac{2 \times 5.60}{3.20 + 5.60} \times 96.54 = 122.869 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{307{,}142.8571}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 120.615 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{122.869}{4.909} = 25.02 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{122.869}{7.854} = 15.6 \Rightarrow 16 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 26-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริงทางขนานขอบสั้น

$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

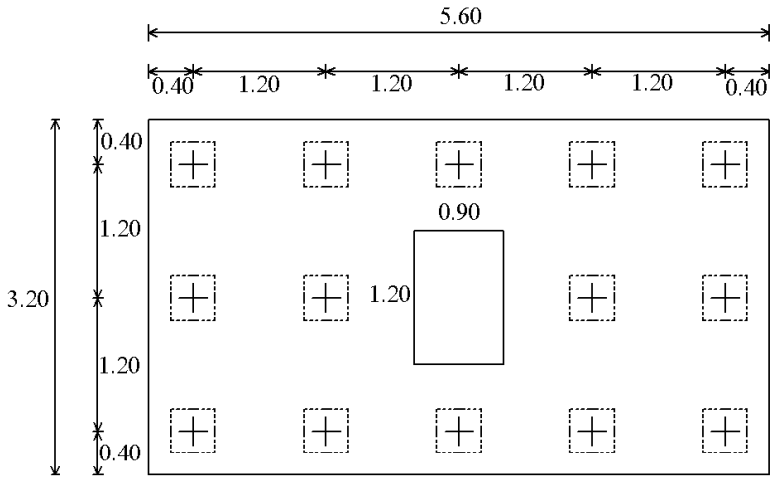
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

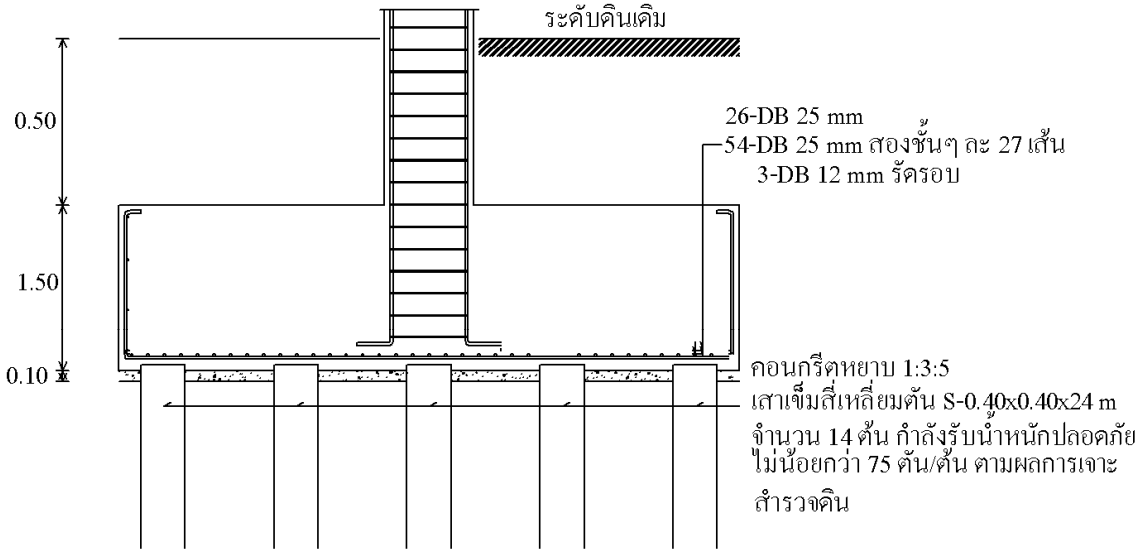
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{90}{2} - 10 = 225 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F14 PLAN



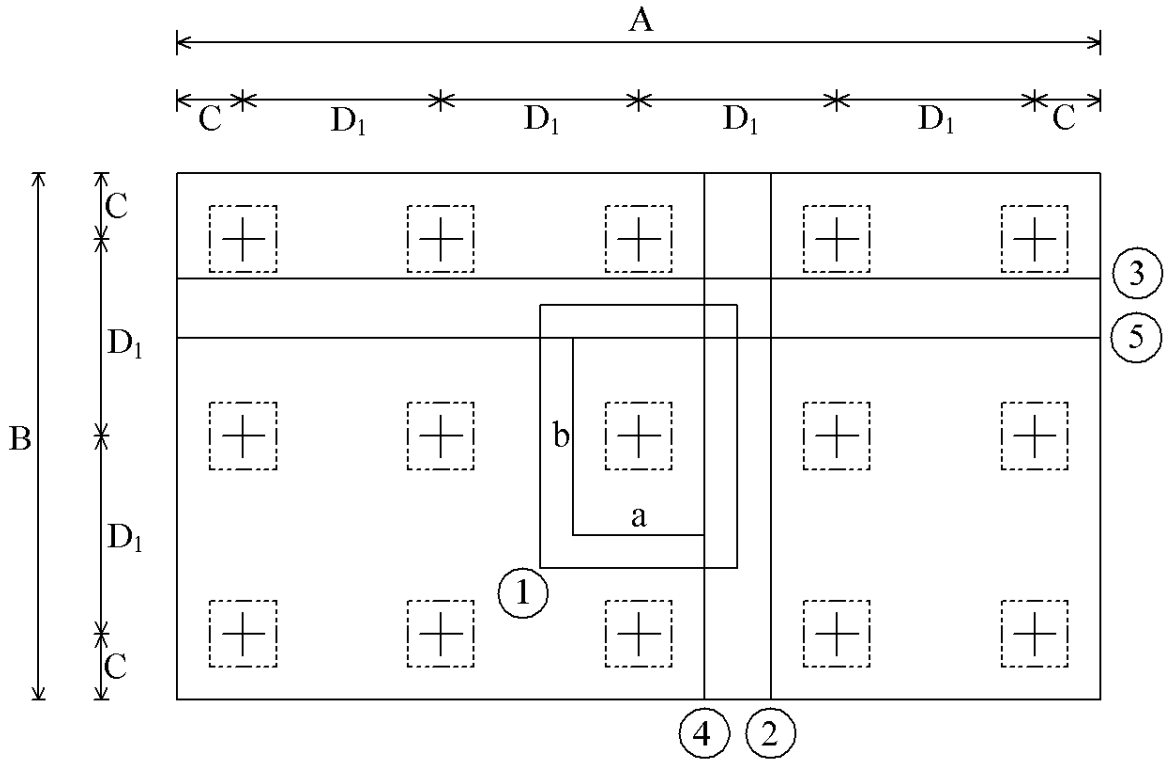
F14 SECTION

FOOTING F-14

SCALE 1:20

รูปที่ 6.88 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 14 ต้น

6.25 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 15 ต้น



รูปที่ 6.89 ฐานรากบนเสาเข็ม 15 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 2D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.25 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 500 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 410 ตัน ตอม่อขนาด 0.90×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=500{,}000$ kg

$LL=410{,}000$ kg

$P=DL+LL=910{,}000$ kg

$a=90$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times910{,}000}{75{,}000}=14.56\Rightarrow15\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=2D_1+2C=2\times1.20+2\times0.40=3.20$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.40$ m $=140$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 500{,}000 + 410{,}000 = 914{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{15} = \frac{910{,}000}{15} = 60{,}666.66667 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางไม่มีแรงเฉือนแบบเจาะทะลุรอบตอม่อ $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{0.90+1.40}{2} = 0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 60{,}666.66667 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{0.05}{0.40}\right) = 75{,}833.33333 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.40}{2} = -0.10 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 2 \times 60{,}666.66667 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{-0.10}{0.40}\right) = 30{,}333.333333 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นบนล่างซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \sqrt{\left(\frac{0.90+1.40}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.20+1.40}{2}\right)^2} = -0.03859922 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 60{,}666.66667 \times \left(\frac{1}{2}+\frac{-0.03859922}{0.40}\right) = 97{,}916.4732 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(0.90+1.40)^2 + (1.20+1.40)^2} = 0.9476 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.2 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = 0.55$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด และ 2 ต้นกลางสุดซ้ายขวา

$$V_p = 6P_r = 6 \times 60{,}666.66667 = 364{,}000 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 75{,}833.33333 + 30{,}333.33333 + 97{,}916.4732 + 364{,}000 = 568{,}083.1399 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(90+120+2\times140) = 980 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 980 \times 140 = 1{,}126{,}511.428 \text{ kg} > V_p = 568{,}083.1399 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = -0.65 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากเสาเข็ม 3 ต้นริมขวาสุด

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = 0.55 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน

$$V_b = 3P_r = 3 \times 60,666.66667 = 182,000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 320 \times 140 = 201,271.1985 \text{ kg} > V_b = 182,000 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มบน 5 ต้น

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานที่ฐานรากรับได้

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29 \times \sqrt{240} \times 560 \times 140 = 352,224.5974 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

สามารถรับแรงเฉือนแบบคานได้

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.40 + 0.10 = 1.50$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.50 = 0.50$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 500,000 + 410,000 = 910,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.90 \times 1.20 \times 0.50 = 1,296$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 5.60 \times 3.20 \times 1.50 = 64,512$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (5.60 \times 3.20 - 0.90 \times 1.20) \times 0.50 = 14,229.8$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{15}$$

$$P_a = \frac{910,000 + 1,296 + 64,512 + 14,229.8}{15}$$

$$P_a = 66,002.52 \text{ kg/pile} < 75,000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 3P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$
$$M_4 = P_r(3D_1 - 1.5a + 6D_1 - 1.5a) = P_r(9D_1 - 3a) = 3P_r(3D_1 - a)$$
$$M_4 = 3 \times 60,666.66667 \times (3 \times 1.20 - 0.90)$$
$$M_4 = 491,400 \text{ kg.m} = 49,140,000 \text{ kg.cm}$$
$$V_4 = 6P_r = 6 \times 60,666.66667 = 364,000 \text{ kg}$$
$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{49,140,000}{1,500 \times 0.909 \times 140} = 257.426 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{364,000}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 142.943 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{257.426}{4.909} = 52.4 \Rightarrow 53 \Rightarrow 54 \text{ เส้นจัด 2 ชั้นๆ ละ 27 เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{142.943}{7.854} = 18.2 \Rightarrow 19 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 54-DB 25 mm จัดเป็น 2 ชั้นๆ ละ 27 เส้น

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5 \times 60,666.66667 \times \left(1.20 - \frac{1.20}{2}\right)$$
$$M_5 = 182,000 \text{ kg} \cdot \text{m} = 18,200,000 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$
$$V_5 = 5P_r = 5 \times 60,666.66667 = 303,333.3333 \text{ kg}$$
$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{18,200,000}{1,500 \times 0.909 \times 140} = 95.343 \text{ cm}^2$$

ปรับปริมาณตามมาตรฐานกำหนด

$$A_{s5} = \frac{2L}{B+L}A_{s5} = \frac{2 \times 5.60}{3.20 + 5.60} \times 95.343 = 121.345 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$
$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{303,333.3333}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 119.119 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{121.345}{4.909} = 24.7 \Rightarrow 25 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{119.119}{7.854} = 15.2 \Rightarrow 16 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 26-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริงทางขนานขอบสั้น

$$L_{db} = D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 90 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

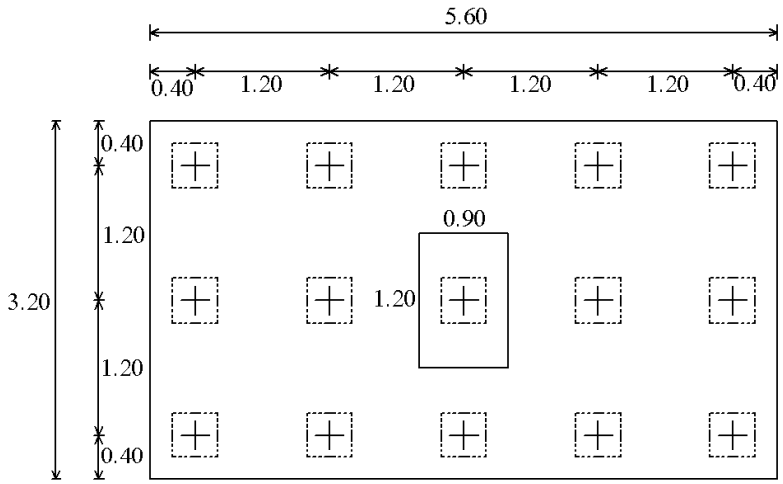
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

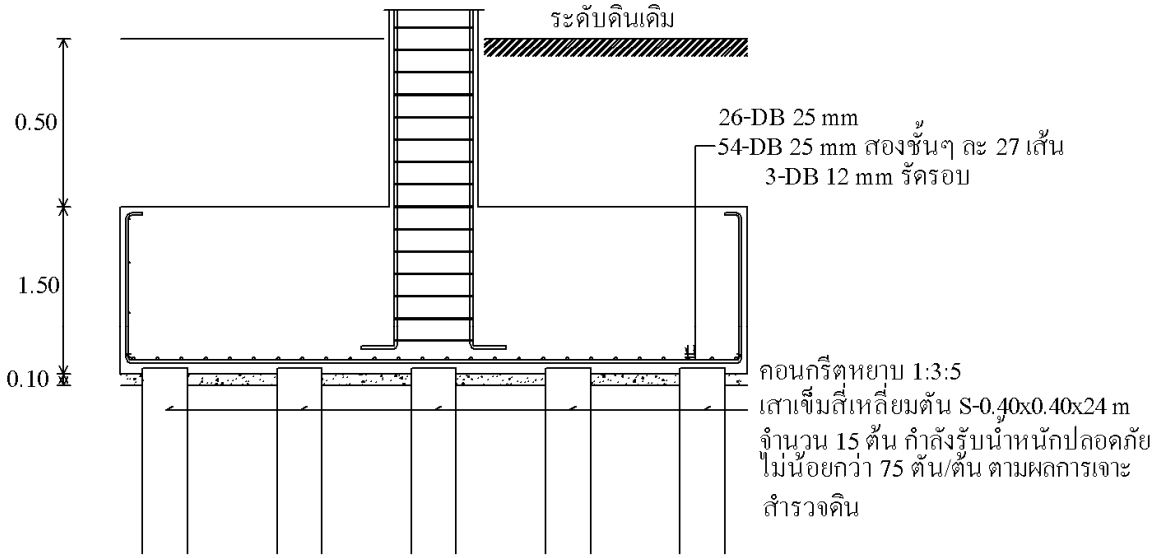
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{90}{2} - 10 = 225 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F15 PLAN



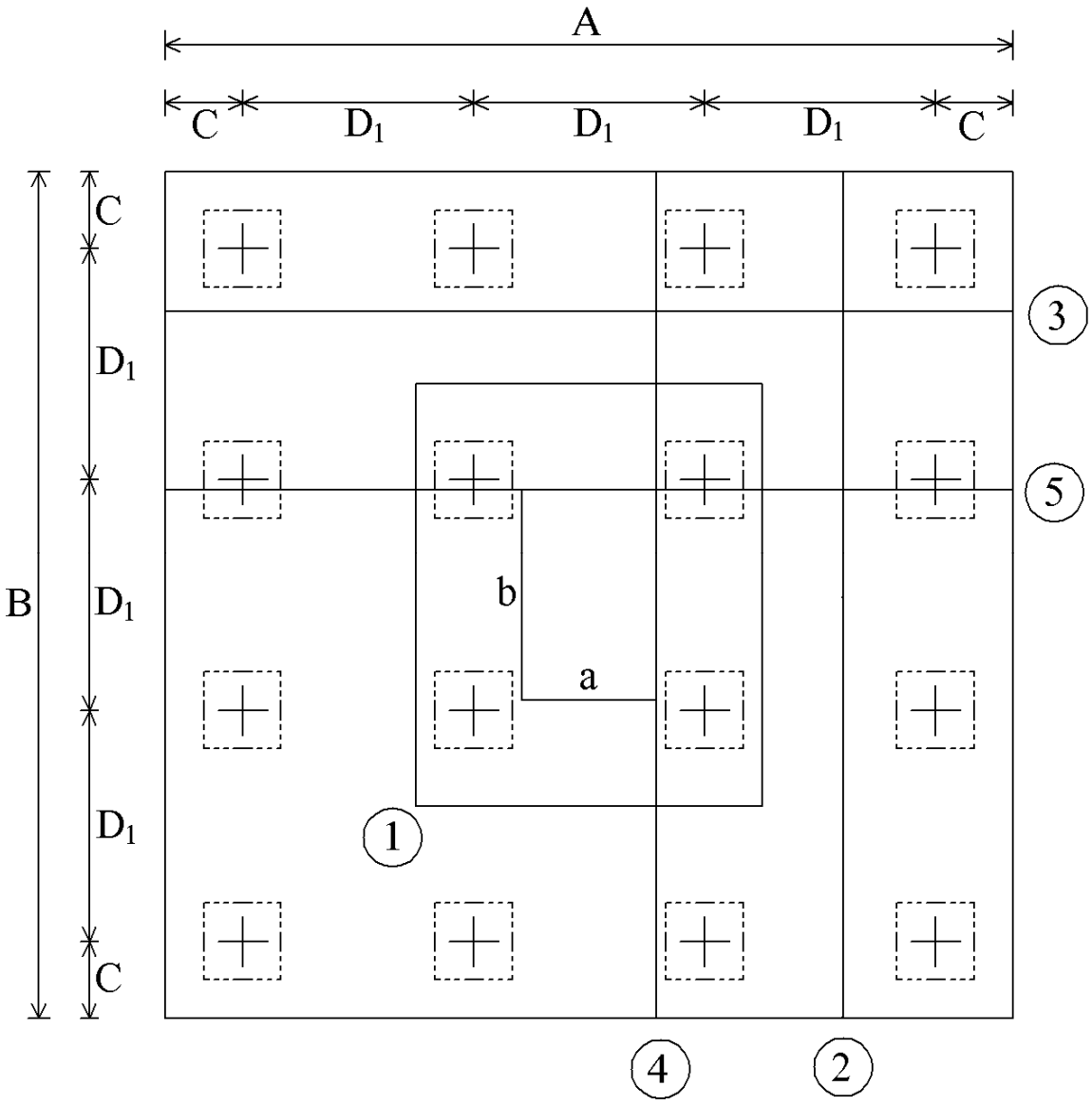
F15 SECTION

FOOTING F-15

SCALE 1:20

รูปที่ 6.90 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 15 ต้น

6.26 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 16 ต้น



รูปที่ 6.91 ฐานรากบนเสาเข็ม 16 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 3D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 3D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.26 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 520 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 440 ตัน ตอม่อขนาด 0.90×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

DL = 520,000 kg

LL = 440,000 kg

P = DL + LL = 960,000 kg

a = 90 cm

b = 120 cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 960{,}000}{75{,}000} = 15.36 \Rightarrow 16 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m $= 40$ cm = ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m $= 40$ cm = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20$ m $= 120$ cm = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10$ m $= 10$ cm = ระยะหุ้มของคอนกรีต

$$A = 3D_1 + 2C = 3 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 4.40 \text{ m}$$
$$B = 3D_1 + 2C = 3 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 4.40 \text{ m}$$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.40 \text{ m} = 140 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 520{,}000 + 440{,}000 = 960{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{16} = \frac{960{,}000}{16} = 60{,}000 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a+d}{2} = \frac{1.20}{2} - \frac{0.90+1.40}{2} = -0.55 \text{ m}$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20+1.40}{2} = 0.50 \text{ m}$$
$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4P_r = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.5\times 1.20 - \frac{0.90+1.40}{2} = 0.65 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4\times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2+(1.5D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2+\left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = 1.5\sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2+(b+d)^2}$$

$$x = 1.5\sqrt{2}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(0.90+1.40)^2+(1.20+1.40)^2} = 0.809928916 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4\times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 240{,}000 + 240{,}000 + 240{,}000 = 720{,}000 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(90+120+2\times 140) = 980 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}b_o d = 0.53\sqrt{240}\times 980\times 140 = 1{,}126{,}511.428 \text{ kg} > V_p = 720{,}000 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.90}{2} - 1.40 = -1.25 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 4 ต้น

$$x = 1.5D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{0.90}{2} - 1.40 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 4 \times 60{,}000 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40} \right) = 90{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 90{,}000 = 90{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 140 = 276{,}747.898 \text{ kg} > V_b = 90{,}000 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -1.40 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นริมบนสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 0 = 0 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 140 = 276{,}747.898 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.40 + 0.10 = 1.50$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.50 = 0.50$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 500{,}000 + 410{,}000 = 910{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 0.90 \times 1.20 \times 0.50 = 1{,}296$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 4.40 \times 4.40 \times 1.50 = 69{,}696$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (4.40 \times 4.40 - 0.90 \times 1.20) \times 0.50 = 15{,}446.6$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{16}$$

$$P_a = \frac{960{,}000 + 1{,}296 + 69{,}696 + 15{,}446.6}{16}$$

$$P_a = 65{,}402.4125 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{a}{2}\right) + 4P_r\left(1.5D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(2D_1 - 2a + 6D_1 - 2a) = P_r(8D_1 - 4a) = 4P_r(2D_1 - a)$$

$$M_4 = 4 \times 60{,}000 \times (2 \times 1.20 - 0.90)$$

$$M_4 = 360{,}000 \text{ kg.m} = 36{,}000{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 8P_r = 8 \times 60{,}000 = 480{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{36{,}000{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 188.59 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{480{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 140} = 188.496 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{188.59}{4.909} = 38.4 \Rightarrow 39 \Rightarrow 40 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{188.496}{7.854} = 24 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 40-DB 25 mm

$$M_5 = 4P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{b}{2}\right) + 4P_r\left(1.5D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = P_r(2D_1 - 2b + 6D_1 - 2b) = P_r(8D_1 - 4b) = 4P_r(2D_1 - b)$$

$$M_5 = 4 \times 60{,}000 \times (2 \times 1.20 - 1.20)$$

$$M_5 = 288{,}000 \text{ kg} \cdot \text{m} = 28{,}800{,}000 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$V_5 = 8P_r = 8 \times 60{,}000 = 480{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{28{,}800{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 140} = 150.872 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{480{,}000}{20.01\times 0.909\times 140} = 188.496 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{150.872}{4.909} = 30.7 \Rightarrow 31 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{188.496}{7.854} = 24 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 31-DB 25 mm เสริมจริง 40-DB 25 mm ทั้งสองทิศทาง

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 1.5\times 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 150 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

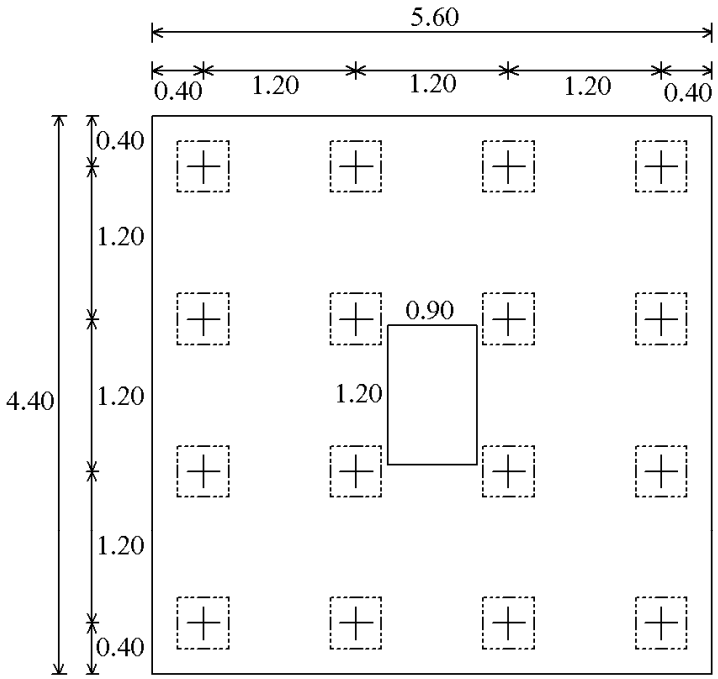
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 1.5\times 120 + 40 - \frac{90}{2} - 10 = 165 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



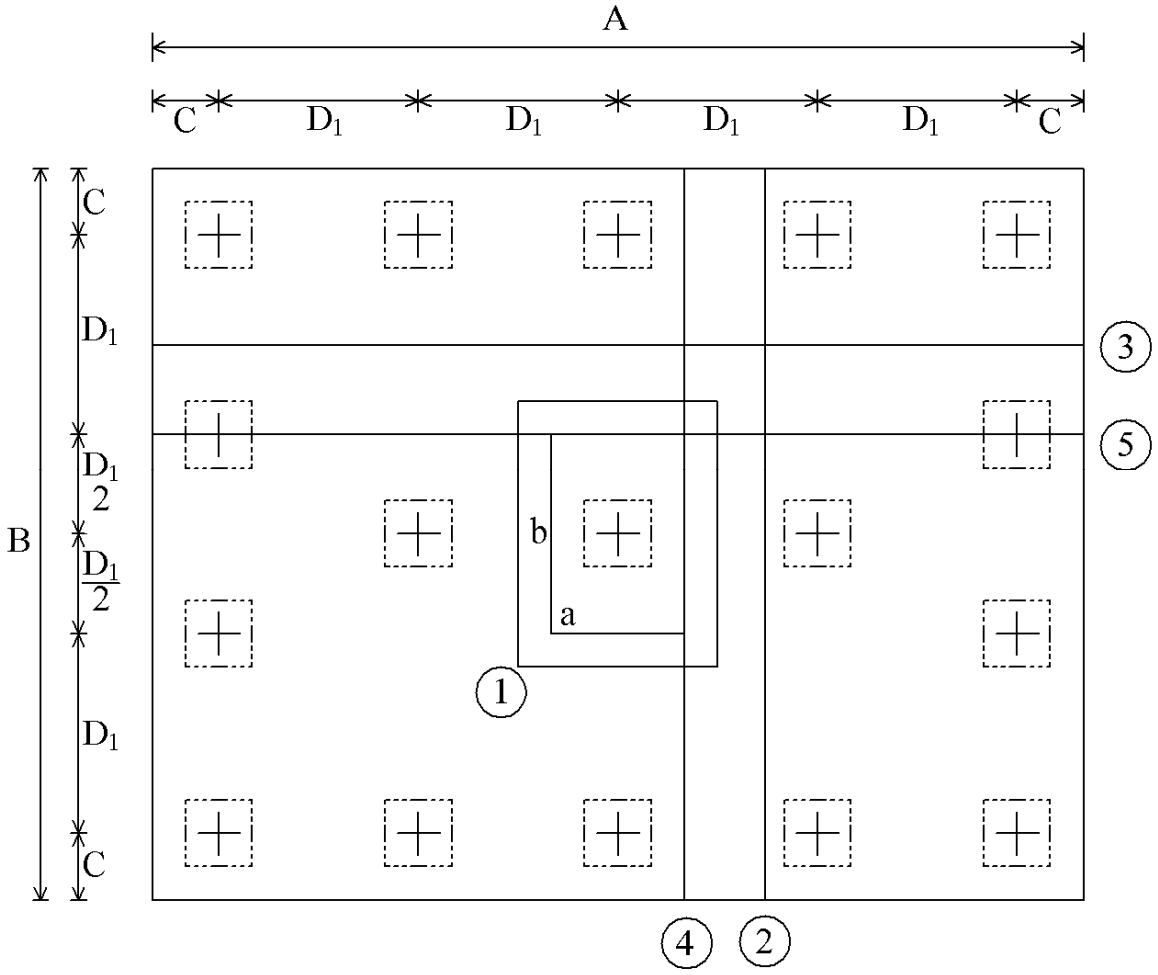
F16 SECTION

FOOTING F-16

SCALE 1:20

รูปที่ 6.92 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 16 ต้น

6.27 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 17 ต้น



รูปที่ 6.93 ฐานรากบนเสาเข็ม 17 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 3D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.27 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 540 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 470 ตัน ตอม่อขนาด 1.00×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=540{,}000$ kg

$LL=470{,}000$ kg

$P=DL+LL=1{,}010{,}000$ kg

$a=100$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times1{,}010{,}000}{75{,}000}=16.16\Rightarrow17\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.50$ m $=150$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 540{,}000 + 470{,}000 = 1{,}010{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{17} = \frac{1{,}010{,}000}{17} = 59{,}411.76471 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตอม่อไม่มีผลกับแรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = -0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 59{,}411.76471 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 44{,}558.82353 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20+1.50}{2} = 0.45 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 59{,}411.76471 = 118{,}823.5294 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่าง ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.20+1.50)^2} = 0.323493816 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 59,411.76471 = 237,647.0588 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นริมนอกสุดซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = 1.15 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59,411.76471 = 237,647.0588 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{6.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{6.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.20+1.50)^2} = 1.160163051 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59,411.76471 = 237,647.0588 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 44,558.82353 + 118,523.5294 + 237,647.0588 + 237,647.0588 + 237,647.0588$$

$$V_p = 876,323.5294 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(100+120+2 \times 150) = 1,040 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1,040 \times 150 = 1,280,873.052 \text{ kg} > V_p = 876,323.5294 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 3 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 4 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = 0.40 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 4 \times 59,411.76471 = 237,647.0588 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 237,647.0588 = 237,647.0588 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 150 = 296,515.605 \text{ kg} > V_b = 237,647.0588 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 2 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -1.40 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.40 = -0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 0 = 0 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 150 = 377,383.4973 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.50 + 0.10 = 1.60 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.60 = 0.40 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 500,000 + 410,000 = 910,000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times1.00\times1.20\times0.40 = 1{,}152 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times5.60\times4.40\times1.60 = 94{,}617.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(5.60\times4.40-1.00\times1.20)\times0.40 = 15{,}845.44 \text{ kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{17}$$

$$P_a = \frac{1{,}010{,}000 + 1{,}152 + 94{,}617.6 + 15{,}845.44}{17}$$

$$P_a = 65{,}977.35529 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 3P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 4P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(3D_1 - 1.5a + 8D_1 - 2a) = P_r(11D_1 - 3.5a)$$

$$M_4 = 59{,}411.76471\times(11\times1.20 - 3.5\times1.00)$$

$$M_4 = 576{,}294.1176 \text{ kg.m} = 57{,}629{,}411.76 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 7P_r = 7\times59{,}411.76471 = 415{,}882.3529 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{57{,}629{,}411.76}{1{,}500\times0.909\times150} = 281.772 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{415{,}882.3529}{20.01\times0.909\times150} = 152.429 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{281.772}{4.909} = 57.4 \Rightarrow 58 \text{ เส้น จัด 2 ชั้นๆ ละ 29 เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{152.429}{7.854} = 19.4 \Rightarrow 20 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 58-DB 25 mm จัด 2 ชั้นๆ ละ 29 เส้น

$$M_5 = 2P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(1.5D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = P_r(D_1 - b + 7.5D_1 - 2.5b) = P_r(8.5D_1 - 3.5b)$$

$$M_5 = 59{,}411.76471\times(8.5\times1.20 - 3.5\times1.20)$$

$$M_5 = 356{,}470.5882 \text{ kg}\cdot\text{m} = 35{,}647{,}058.82 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$V_5 = 7P_r = 7\times59{,}411.76471 = 415{,}882.3529 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{35{,}647{,}058.82}{1{,}500\times0.909\times150} = 174.292 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{415{,}882.3529}{20.01\times 0.909\times 150} = 152.429 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{174.292}{4.909} = 35.5 \Rightarrow 36 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{152.429}{7.854} = 19.4 \Rightarrow 20 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 36-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 1.5\times 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 150 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

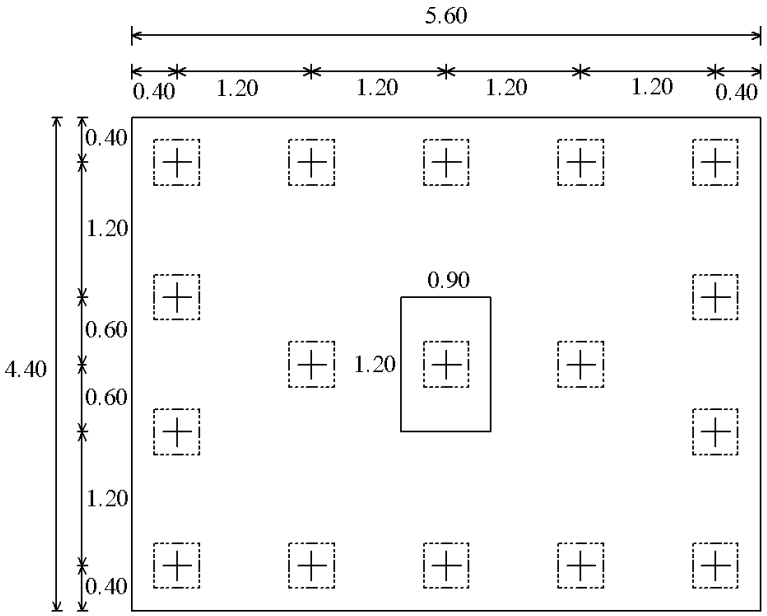
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

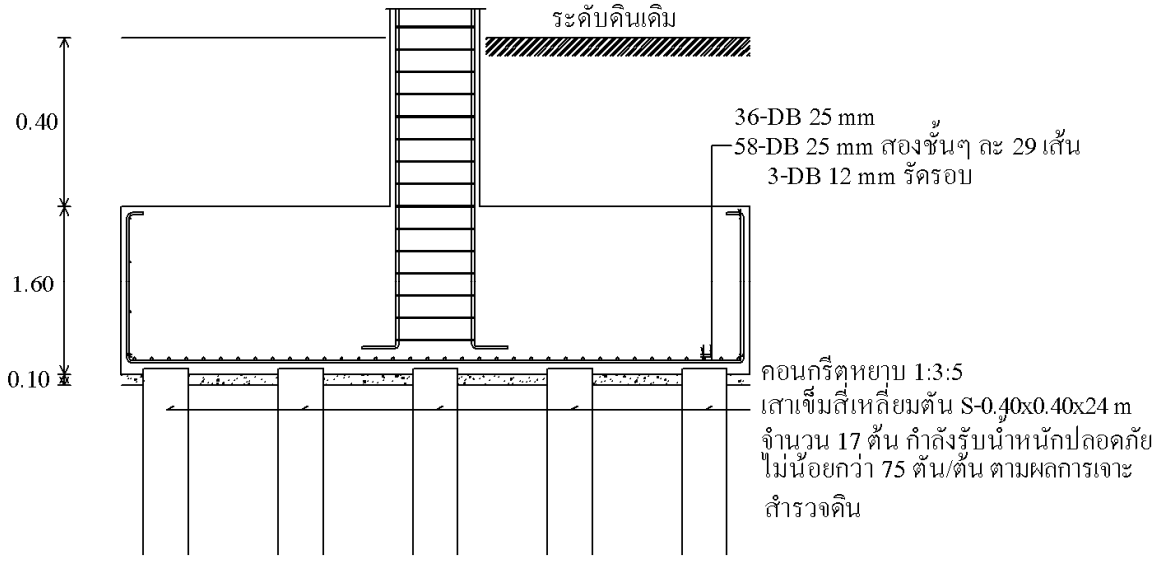
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F17 PLAN



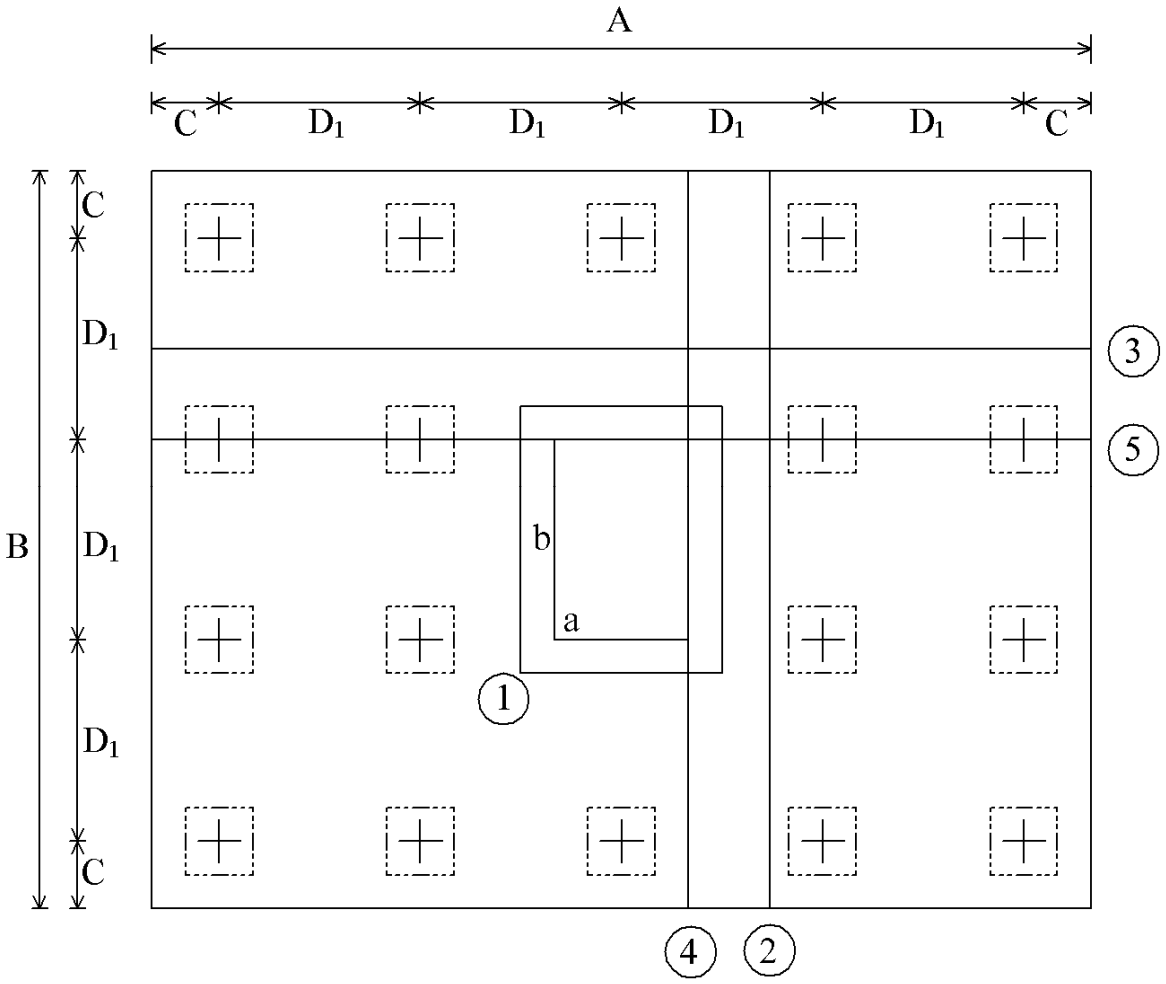
F17 SECTION

FOOTING F-17

SCALE 1:20

รูปที่ 6.94 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 17 ต้น

6.28 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 18 ต้น



รูปที่ 6.95 ฐานรากบนเสาเข็ม 18 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 3D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.28 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 570 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 500 ตัน ตอม่อขนาด 1.00×1.20 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\ \text{ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=570{,}000$ kg

$LL=500{,}000$ kg

$P=DL+LL=1{,}070{,}000$ kg

$a=100$ cm

$b=120$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times1{,}070{,}000}{75{,}000}=17.12\Rightarrow18\ \text{ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.50$ m $=150$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 570{,}000 + 500{,}000 = 1{,}070{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{18} = \frac{1{,}070{,}000}{18} = 59{,}444.44444 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = -0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4 \times 59{,}444.44444 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 89{,}166.66667 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20+1.50}{2} = 0.45 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 59{,}444.44444 = 118{,}888.8889 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่าง ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.20+1.50)^2} = 0.323493816 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 59,444.44444 = 237,777.7778 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นริมนอกสุดซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = 1.15 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59,444.44444 = 237,777.7778 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2+(2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2+\left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{6.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2+(b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{6.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2+(1.20+1.50)^2} = 1.160163051 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59,444.44444 = 237,777.7778 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 89,166.66667 + 118,888.8889 + 237,777.7778 + 237,777.7778 + 237,777.7778$$

$$V_p = 921,388.8889 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(100+120+2 \times 150) = 1,040 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1,040 \times 150 = 1,280,873.052 \text{ kg} > V_p = 921,388.8889 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 4 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = 0.40 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 4 \times 59,444.44444 = 237,777.7778 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 237,777.7778 = 237,777.7778 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 150 = 296,515.605 \text{ kg} > V_b = 237,777.7778 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{1.20}{2} - 1.50 = -1.50 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.50 = -0.30 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 0 = 0 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 150 = 377,383.4973 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.50 + 0.10 = 1.60 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.60 = 0.40 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 570,000 + 500,000 = 1,070,000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times1.00\times1.20\times0.40 = 1{,}152 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times5.60\times4.40\times1.60 = 94{,}617.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(5.60\times4.40-1.00\times1.20)\times0.40 = 15{,}845.44 \text{ kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{18}$$

$$P_a = \frac{1{,}070{,}000 + 1{,}152 + 94{,}617.6 + 15{,}845.44}{18}$$

$$P_a = 65{,}645.28 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 4P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 8D_1 - 2a) = P_r(12D_1 - 4a)$$

$$M_4 = 59{,}444.44444\times(12\times1.20 - 4\times1.00)$$

$$M_4 = 618{,}222.2222 \text{ kg.m} = 61{,}822{,}222.22 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 8P_r = 8\times59{,}444.44444 = 475{,}555.5556 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{61{,}822{,}222.22}{1{,}500\times0.909\times150} = 302.272 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{475{,}555.5556}{20.01\times0.909\times150} = 174.3 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{302.272}{4.909} = 61.6 \Rightarrow 62 \text{ เส้น จัด 2 ชั้นๆ ละ 31 เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{174.3}{7.854} = 22.2 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 62-DB 25 mm จัด 2 ชั้นๆ ละ 31 เส้น

$$M_5 = 4P_r\left(\frac{D_1}{2} - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(1.5D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = P_r(2D_1 - 2b + 7.5D_1 - 2.5b) = P_r(9.5D_1 - 4.5b)$$

$$M_5 = 59{,}444.44444\times(9.5\times1.20 - 4.5\times1.20)$$

$$M_5 = 356{,}666.6667 \text{ kg}\cdot\text{m} = 35{,}647{,}058.82 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$V_5 = 9P_r = 9\times59{,}444.44444 = 535{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{35{,}647{,}058.82}{1{,}500\times0.909\times150} = 174.388 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{535{,}000}{20.01\times 0.909\times 150} = 196.088 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{174.388}{4.909} = 35.5 \Rightarrow 36 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{196.088}{7.854} = 24.97 \Rightarrow 25 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 36-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 1.5\times 120 + 40 - \frac{120}{2} - 10 = 150 \ \text{cm} > \ell_{db} = 57.04 \ \text{cm}$$

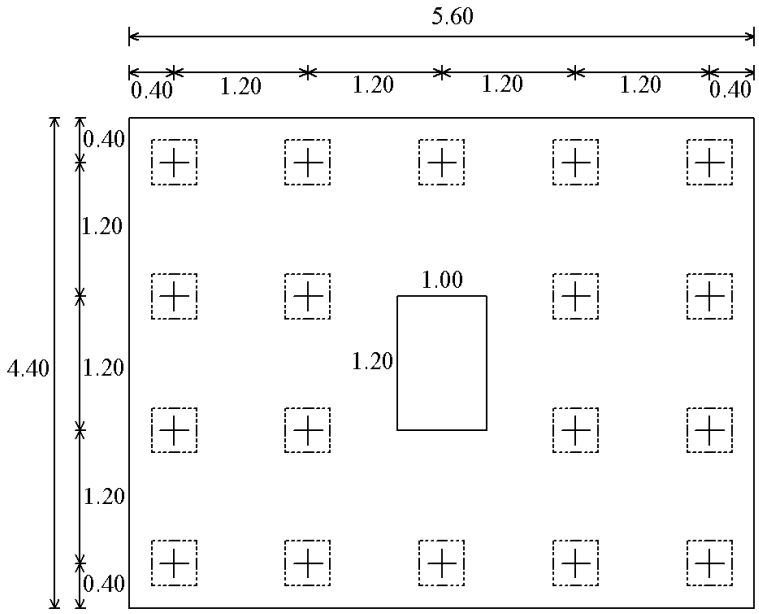
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

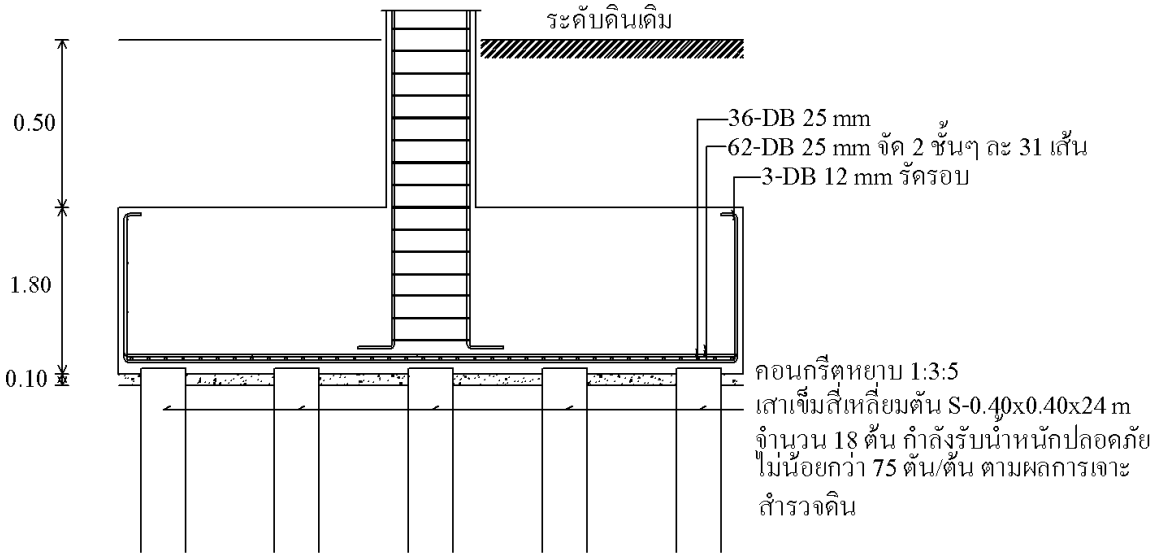
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \ \text{cm} > \ell_{db} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F18 PLAN



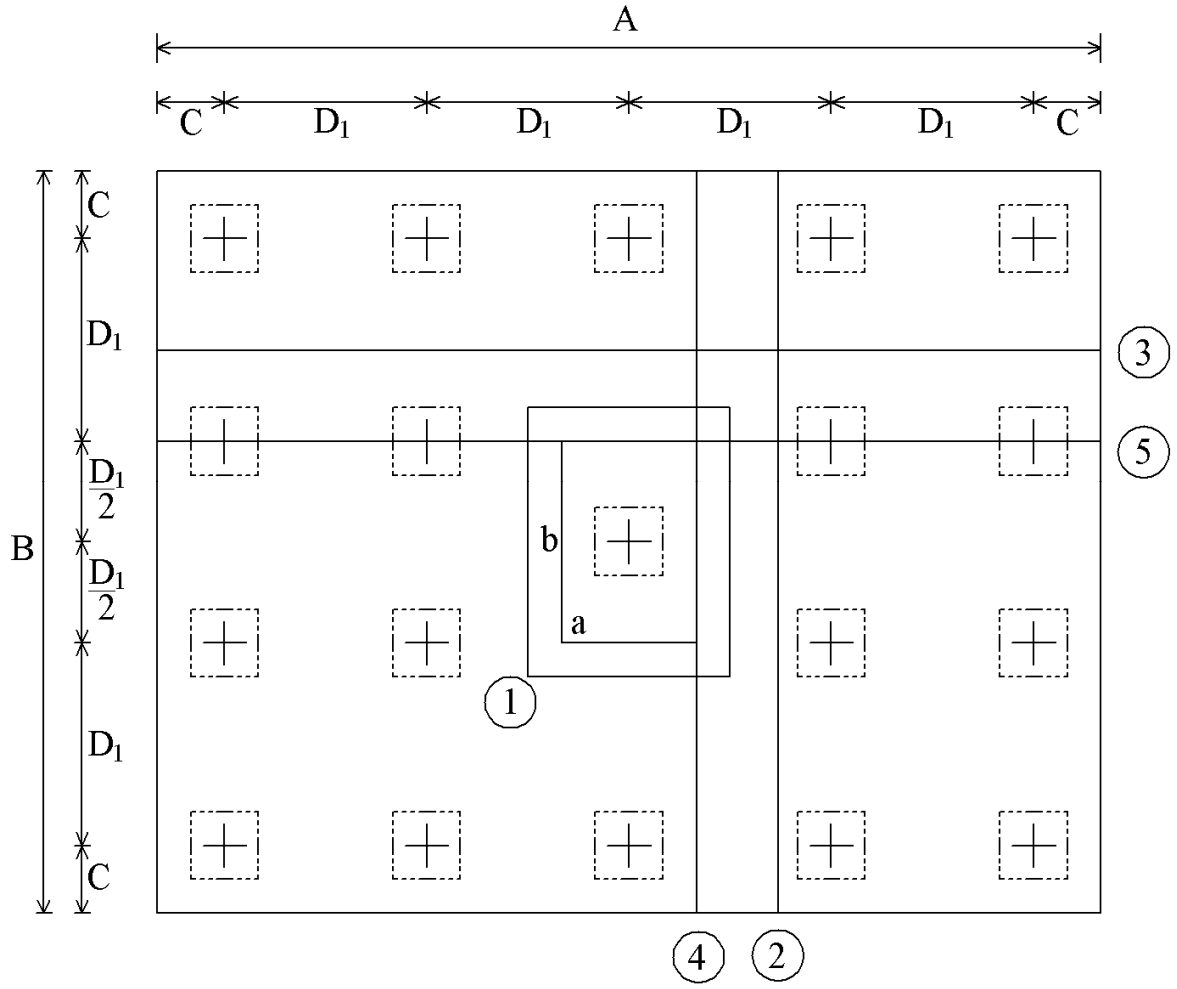
F18 SECTION

FOOTING F-18

SCALE 1:20

รูปที่ 6.96 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 18 ต้น

6.29 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 19 ต้น



รูปที่ 6.97 ฐานรากบนเสาเข็ม 19 ต้น

กำหนด

$D =$ ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D =$ ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D =$ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C =$ ความยาวของฐานราก

$B = 3D_1 + 2C =$ ความกว้างของฐานราก

$a =$ ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10 \text{ m} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.29 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 600 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 530 ตัน ตอม่อขนาด 1.00×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\ \text{ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=600{,}000$ kg

$LL=530{,}000$ kg

$P=DL+LL=1{,}130{,}000$ kg

$a=100$ cm

$b=150$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times1{,}130{,}000}{75{,}000}=18.08\Rightarrow19\ \text{ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.50$ m $=150$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 600{,}000 + 530{,}000 = 1{,}130{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{19} = \frac{1{,}130{,}000}{19} = 59{,}473.68421 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตอม่อไม่มีผลกับแรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = -0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4 \times 59{,}473.68421 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 89{,}210.52632 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.50+1.50}{2} = 0.30 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 59{,}473.68421 = 118{,}947.3684 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่าง ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.50+1.50)^2} = 0.210768346 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 59{,}473.68421 = 237{,}894.7368 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นริมนอกสุดซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = 1.15 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59{,}473.68421 = 237{,}894.7368 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2+(2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2+\left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{6.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2+(b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{6.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2+(1.50+1.50)^2} = 1.047437581 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2}=\frac{0.40}{2}=0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 59{,}473.68421 = 237{,}894.7368 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 89{,}210.52632 + 118{,}947.3684 + 237{,}894.7368 + 237{,}894.7368 + 237{,}894.7368$$

$$V_p = 921{,}842.1053 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(100+150+2 \times 150) = 1{,}100 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1{,}100 \times 150 = 1{,}354{,}769.575 \text{ kg} > V_p = 921{,}842.1053 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 4 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = 0.40 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 4 \times 59,473.68421 = 237,894.7368 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 237,894.7368 = 237,894.7368 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 150 = 296,515.605 \text{ kg} > V_b = 237,894.7368 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{1.20}{2} - 1.50 = -1.50 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.50 = -0.45 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 0 = 0 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 150 = 377,383.4973 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.50 + 0.10 = 1.60$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.60 = 0.40$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 600,000 + 530,000 = 1,130,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times1.00\times1.50\times0.40 = 1{,}440 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times5.60\times4.40\times1.60 = 94{,}617.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(5.60\times4.40-1.00\times1.50)\times0.40 = 15{,}642.64 \text{ kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{19}$$

$$P_a = \frac{1{,}130{,}000 + 1{,}440 + 94{,}617.6 + 15{,}642.64}{19}$$

$$P_a = 65{,}352.64421 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 4P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 8D_1 - 2a) = P_r(12D_1 - 4a)$$

$$M_4 = 59{,}473.68421\times(12\times1.20 - 4\times1.00)$$

$$M_4 = 618{,}526.3158 \text{ kg.m} = 61{,}852{,}631.58 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 8P_r = 8\times59{,}473.68421 = 475{,}789.4737 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{61{,}852{,}631.58}{1{,}500\times0.909\times150} = 302.421 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{475{,}789.4737}{20.01\times0.909\times150} = 174.386 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{302.421}{4.909} = 61.6 \Rightarrow 62 \text{ เส้น จัด 2 ชั้นๆ ละ 31 เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{174.386}{7.854} = 22.2 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 62-DB 25 mm จัด 2 ชั้นๆ ละ 31 เส้น

เนื่องจาก $(b = 1.50 \text{ m}) > (D_1 = 1.20 \text{ m})$ ดังนั้น

$$M_5 = 5P_r\left(1.5D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 5\times59{,}473.68421\times\left(1.5\times1.20 - \frac{1.50}{2}\right)$$

$$M_5 = 312{,}236.8421 \text{ kg}\cdot\text{m} = 31{,}223{,}684.21 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$V_5 = 5P_r = 5\times59{,}473.68421 = 297{,}368.4211 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{31{,}223{,}684.21}{1{,}500 \times 0.909 \times 150} = 152.664 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{297{,}368.4211}{20.01 \times 0.909 \times 150} = 108.991 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{152.664}{4.909} = 31.1 \Rightarrow 32 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{108.991}{7.854} = 13.9 \Rightarrow 14 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 32-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 1.5 \times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 135 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

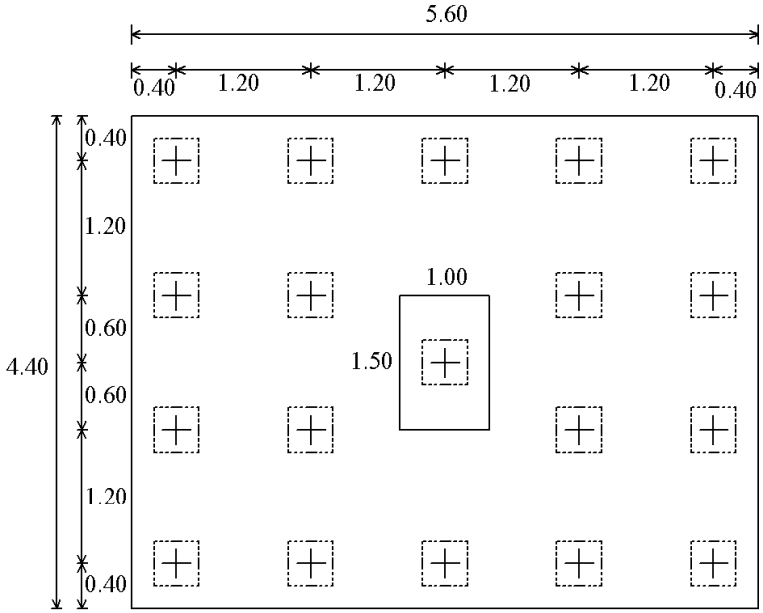
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

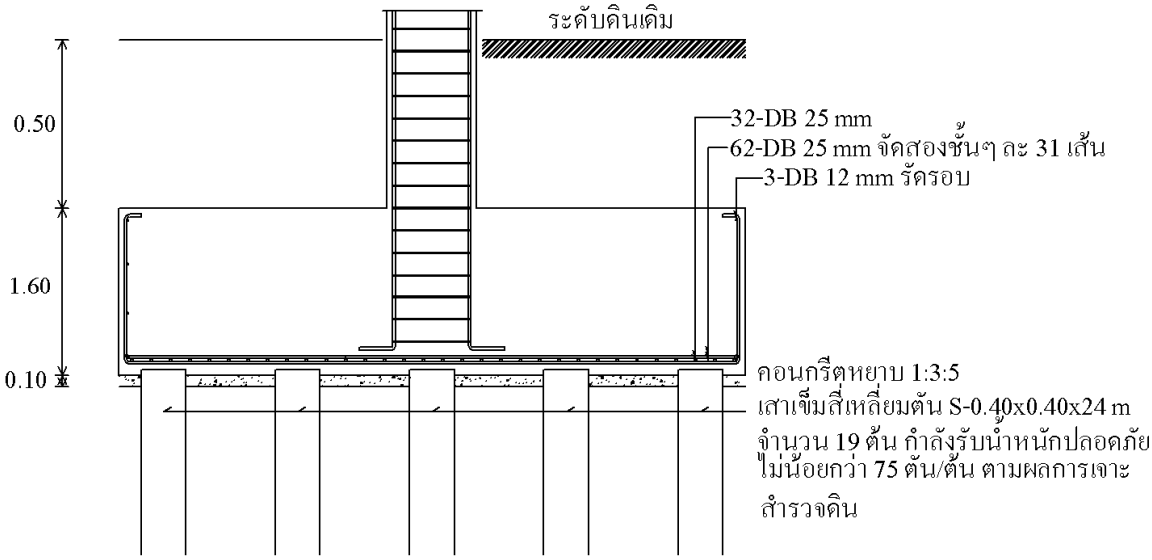
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F19 PLAN



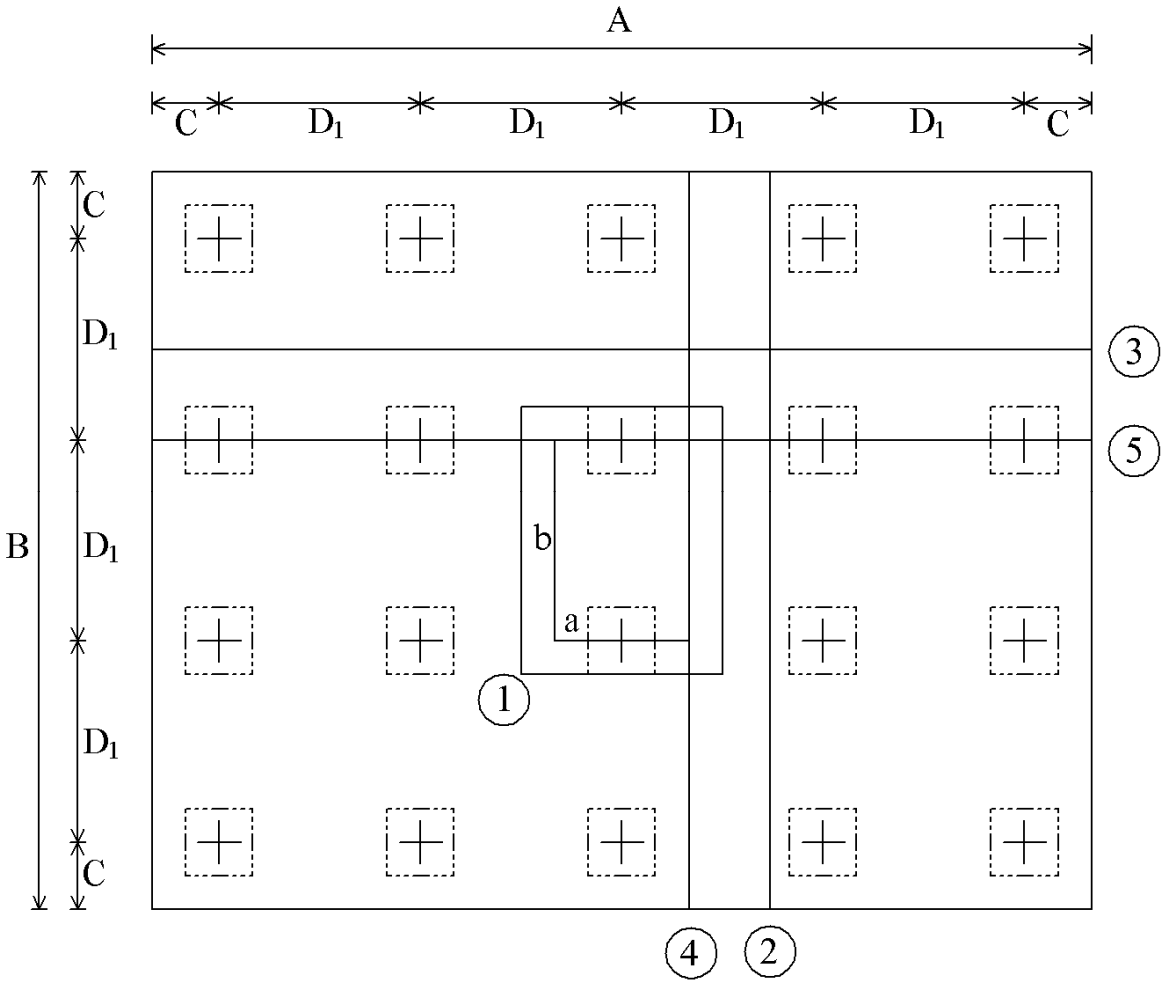
F19 SECTION

FOOTING F-19

SCALE 1:20

รูปที่ 6.98 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 19 ต้น

6.30 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 20 ต้น



รูปที่ 6.99 ฐานรากบนเสาเข็ม 20 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 3D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

b = ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m = ระยะหุ้มของคอนกรีต

H_F = ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10$ = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.30 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 640 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 560 ตัน ตอม่อขนาด 1.00×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'}=240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y=3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'}=240$ ksc

$f_c=0.375f_c^{'}=0.375\times240=90\Rightarrow65$ ksc

$f_y=3{,}000$ ksc

$f_s=0.5f_y=0.5\times3{,}000=1{,}500$ ksc

$$n=\frac{E_s}{E_c}=\frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}}=\frac{135.099}{\sqrt{240}}=8.72$$

$$k=\frac{1}{1+\frac{f_s}{nf_c}}=\frac{1}{1+\frac{1{,}500}{8.72\times65}}=0.274$$

$$j=1-\frac{k}{3}=1-\frac{0.274}{3}=0.909$$

$$R=\frac{1}{2}f_ckj=\frac{1}{2}\times65\times0.274\times0.909=8.095\text{ ksc}$$

$P_c=75{,}000$ kg

$\rho_{temp}=0.0020\Rightarrow f_y=3000$ ksc

$DL=640{,}000$ kg

$LL=560{,}000$ kg

$P=DL+LL=1{,}200{,}000$ kg

$a=100$ cm

$b=150$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p=\frac{1.2\times1{,}200{,}000}{75{,}000}=19.2\Rightarrow20\text{ ต้น}$$

เมื่อ $D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C=D=0.40$ m $=40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1=3D=3\times0.40=1.20$ m $=120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A=4D_1+2C=4\times1.20+2\times0.40=5.60$ m

$B=3D_1+2C=3\times1.20+2\times0.40=4.40$ m

$C_1=0.10$ m $=10$ cm $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d=1.50$ m $=150$ cm $=$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 640{,}000 + 560{,}000 = 1{,}200{,}000 \ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{20} = \frac{1{,}200{,}000}{20} = 60{,}000 \ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

ระยะ x จากเสาเข็มคู่กลางอทในตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b+d}{2} = \frac{1.20}{2} - \frac{1.50+1.50}{2} = -0.90 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นกลางซ้ายขวาใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = -0.05 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 4 \times 60{,}000 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 90{,}000 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 1.5D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.50+1.50}{2} = 0.30 \ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 60{,}000 = 120{,}000 \ \text{kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่าง ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.50+1.50)^2} = 0.210768346 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 4P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นริมนอกสุดซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.50}{2} = 1.15 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{6.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{6.25} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.50)^2 + (1.50+1.50)^2} = 1.047437581 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 90{,}000 + 120{,}000 + 240{,}000 + 240{,}000 + 240{,}000$$

$$V_p = 930{,}000 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(100 + 150 + 2 \times 150) = 1{,}100 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1{,}100 \times 150 = 1{,}354{,}769.575 \text{ kg} > V_p = 930{,}000 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = -0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 4 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.50 = 0.40 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 4 \times 60{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 240{,}000 = 240{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 440 \times 150 = 296{,}515.605 \text{ kg} > V_b = 240{,}000 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{b}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{1.20}{2} - 1.50 = -1.50 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 1.5D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.5 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.50 = -0.45 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x \le -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 0 = 0 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 150 = 377{,}383.4973 \text{ kg} > V_b = 0 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00 \text{ m} =$ ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.50 + 0.10 = 1.60 \text{ m} =$ ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.60 = 0.40 \text{ m} =$ ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 640{,}000 + 560{,}000 = 1{,}200{,}000 \text{ kg} =$ น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times1.00\times1.50\times0.40 = 1{,}440 \text{ kg} =$ น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times5.60\times4.40\times1.60 = 94{,}617.6 \text{ kg} =$ น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB-ab)H_p = 1690\times(5.60\times4.40-1.00\times1.50)\times0.40 = 15{,}642.64 \text{ kg} =$ น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{20}$$

$$P_a = \frac{1{,}200{,}000 + 1{,}440 + 94{,}617.6 + 15{,}642.64}{20}$$

$$P_a = 65{,}585.012 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 4P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 8D_1 - 2a) = P_r(12D_1 - 4a)$$

$$M_4 = 60{,}000\times(12\times1.20 - 4\times1.00)$$

$$M_4 = 624{,}000 \text{ kg.m} = 62{,}400{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 8P_r = 8\times60{,}000 = 480{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{62{,}400{,}000}{1{,}500\times0.909\times150} = 305.097 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{480{,}000}{20.01\times0.909\times150} = 175{,}93 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{305.097}{4.909} = 62.15 \Rightarrow 63 \Rightarrow 64 \text{ เส้น จัด 2 ชั้นๆ ละ 32 เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{175.93}{7.854} = 22.4 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 64-DB 25 mm จัด 2 ชั้นๆ ละ 32 เส้น

เนื่องจาก $(b = 1.50 \text{ m}) > (D_1 = 1.20 \text{ m})$ ดังนั้น

$$M_5 = 5P_r\left(1.5D_1 - \frac{b}{2}\right)$$

$$M_5 = 5\times60{,}000\times\left(1.5\times1.20 - \frac{1.50}{2}\right)$$

$$M_5 = 315{,}000 \text{ kg}\cdot\text{m} = 31{,}500{,}000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$V_5 = 5P_r = 5\times60{,}000 = 300{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{31{,}500{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 150} = 154.015 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{300{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 150} = 109.956 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{154.015}{4.909} = 31.4 \Rightarrow 32 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{109.956}{7.854} = 14 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 32-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 1.5D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 1.5 \times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 135 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

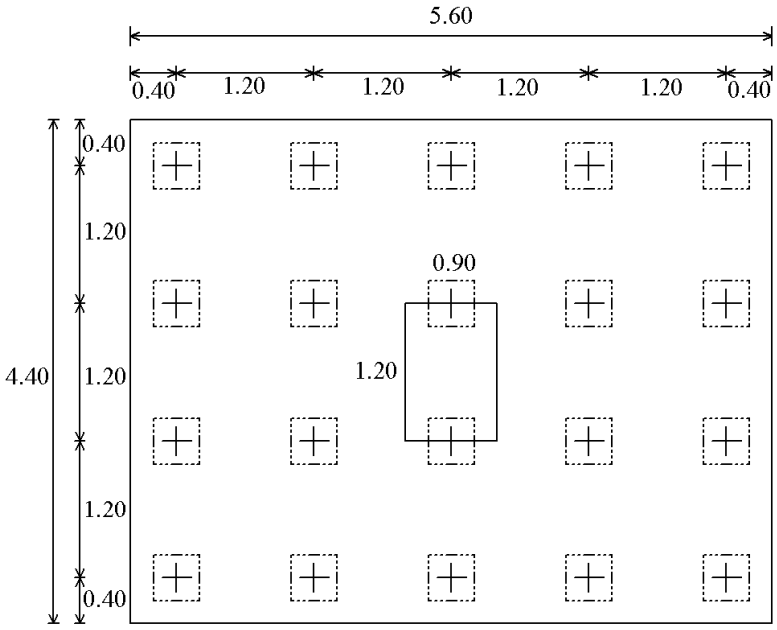
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

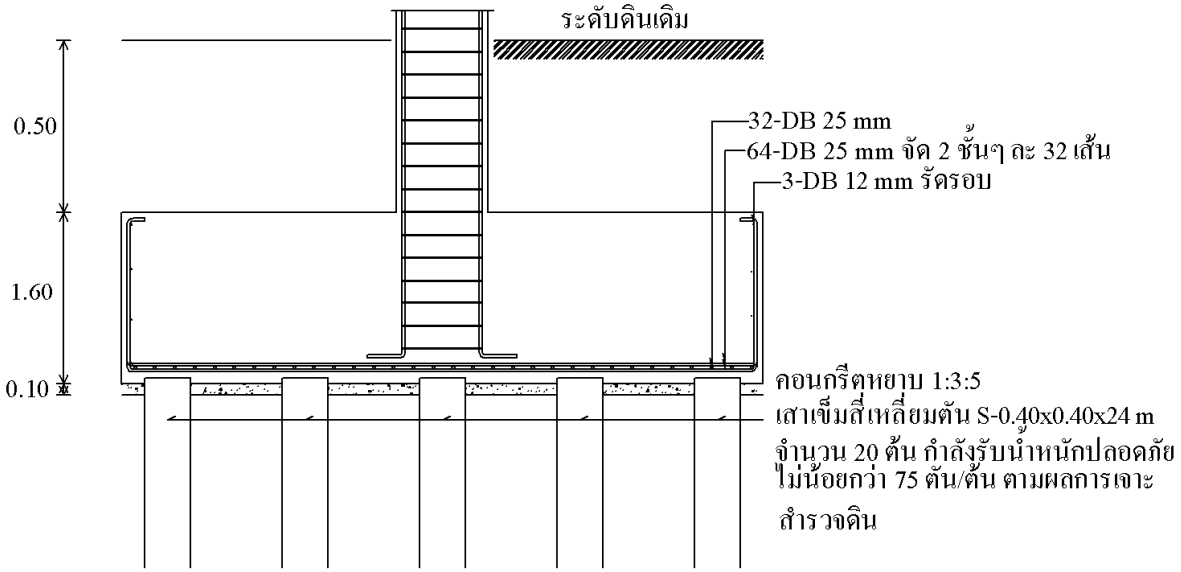
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F20 PLAN



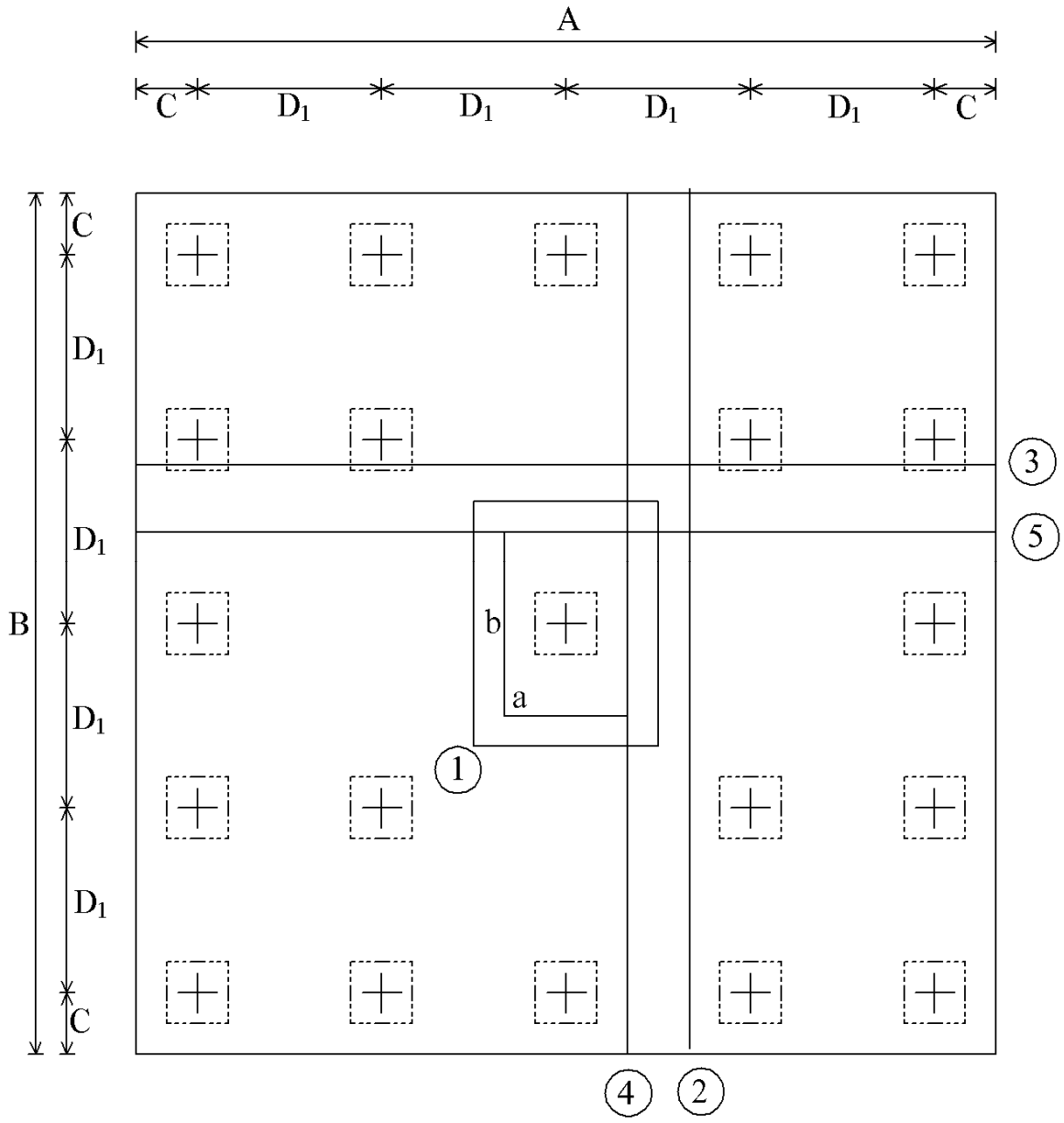
F20 SECTION

FOOTING F-20

SCALE 1:20

รูปที่ 6.100 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 20 ต้น

6.31 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น



รูปที่ 6.101 ฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 4D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.31 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 680 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 600 ตัน ตอม่อขนาด 1.00×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

$DL = 680{,}000$ kg

$LL = 600{,}000$ kg

$P = DL + LL = 1{,}280{,}000$ kg

$a = 100$ cm

$b = 150$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 1{,}280{,}000}{75{,}000} = 20.48 \Rightarrow 21 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20$ m $= 120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$B = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.70 \text{ m} = 170 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 680{,}000 + 600{,}000 = 1{,}280{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{21} = \frac{1{,}280{,}000}{21} = 60{,}952.38095 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตอม่อไม่มีผลต่อแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2}$$

$$x = -0.396385866$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.70}{2} = 1.05 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 60{,}652.38095 = 121{,}904.7619 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{b+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = 0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2\times 60,952.38095 = 121,904.7619 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่างรวม 8 ต้น แนวกลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 0.0698886923 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 8\times 60,952.38095\left(\frac{1}{2}+\frac{0.069888623}{0.40}\right) = 329,007.0842 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{8}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{8}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 1.300670408 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4\times 60,952.38095 = 243,809.5238 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 0 + 121,904.7619 + 121,904.7619 + 329,007.0842 + 243,809.5238$$

$$V_p = 816,626.1318 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a+b+2d) = 2(100+150+2\times 150) = 1,100 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_o d = 0.53\sqrt{240}\times 1,100\times 150 = 1,354,769.575 \text{ kg} > V_p = 816,626.1318 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.70 = -1.00 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 5 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.70 = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x \ge \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5 \times 60{,}952.38095 = 304{,}761.9048 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 304{,}761.9048 = 304{,}761.9048 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Bd = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427{,}701.2968 \text{ kg} > V_b = 304{,}761.9048 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 2D_1 - \frac{b}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 5 \times 60{,}952.38095 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 114{,}285.7143 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 114{,}285.7143 = 114{,}285.7143 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427{,}701.2969 \text{ kg} > V_b = 114{,}285.7143 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.70 + 0.10 = 1.80$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.80 = 0.20$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 680{,}000 + 600{,}000 = 1{,}280{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 1.00 \times 1.50 \times 0.20 = 720$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 5.60 \times 5.60 \times 1.80 = 135{,}475.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (5.60 \times 5.60 - 1.00 \times 1.50) \times 0.20 = 10{,}092.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{21}$$

$$P_a = \frac{1{,}280{,}000 + 720 + 135{,}475.2 + 10{,}092.68}{21}$$

$P_a = 67{,}918.47048$ kg / pile $< 75{,}000$ kg / pile

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 10D_1 - 2.5a) = P_r(14D_1 - 4.5a)$$

$$M_4 = 60{,}952.38095 \times (14 \times 1.20 - 4.5 \times 1.00)$$

$M_4 = 749{,}714.2857$ kg.m $= 74{,}971{,}428.57$ kg.cm

$V_4 = 9P_r = 9 \times 60{,}952.38095 = 548{,}571.4286$ kg

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{74{,}971{,}428.57}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 323.438 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909$ cm^2, $\sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{548{,}571.4286}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 177.408 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{323.438}{4.909} = 65.9 = 66 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{177.408}{7.854} = 22.6 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 66-DB 25 mm

$$M_5 = 4P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{b}{2}\right) = P_r\left(4D_1 - 2b + 10D_1 - 2.5b\right) = P_r\left(14D_1 - 4.5b\right)$$

$$M_5 = 60{,}952.38095 \times \left(14 \times 1.20 - 4.5 \times 1.50\right)$$

$$M_5 = 612{,}571.4285 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 61{,}257{,}142.85 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$V_5 = 9P_r = 9 \times 60{,}952.38095 = 548{,}571.4286 \ \text{kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{61{,}257{,}142.85}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 264.273 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{548{,}571.4286}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 177.408 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{264.273}{4.909} = 53.8 \Rightarrow 54 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{177.408}{7.854} = 22.6 \Rightarrow 23 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 54-DB 25 mm ใช้จริง 66-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 195 \ \text{cm} > \ell_{db} = 57.04 \ \text{cm}$$

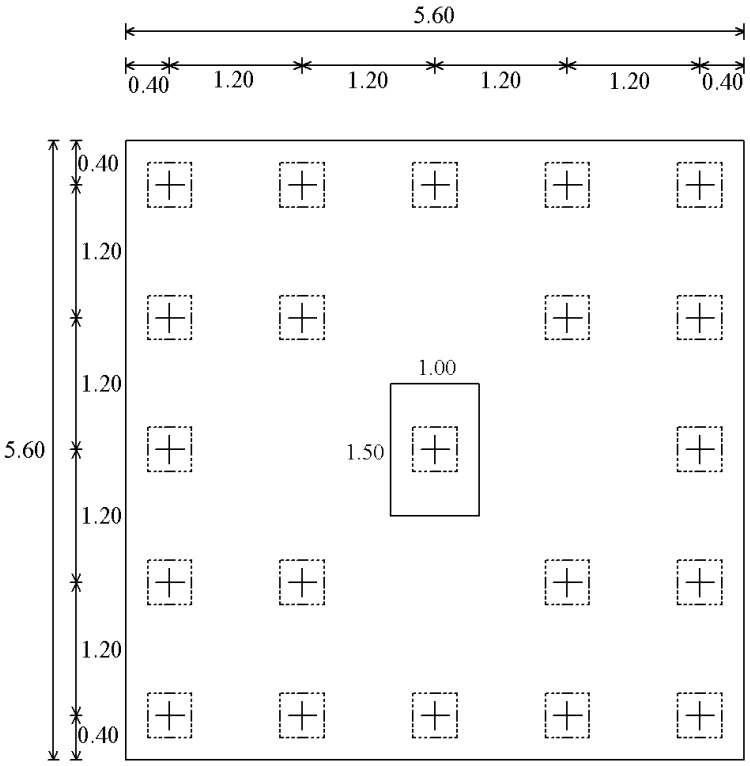
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

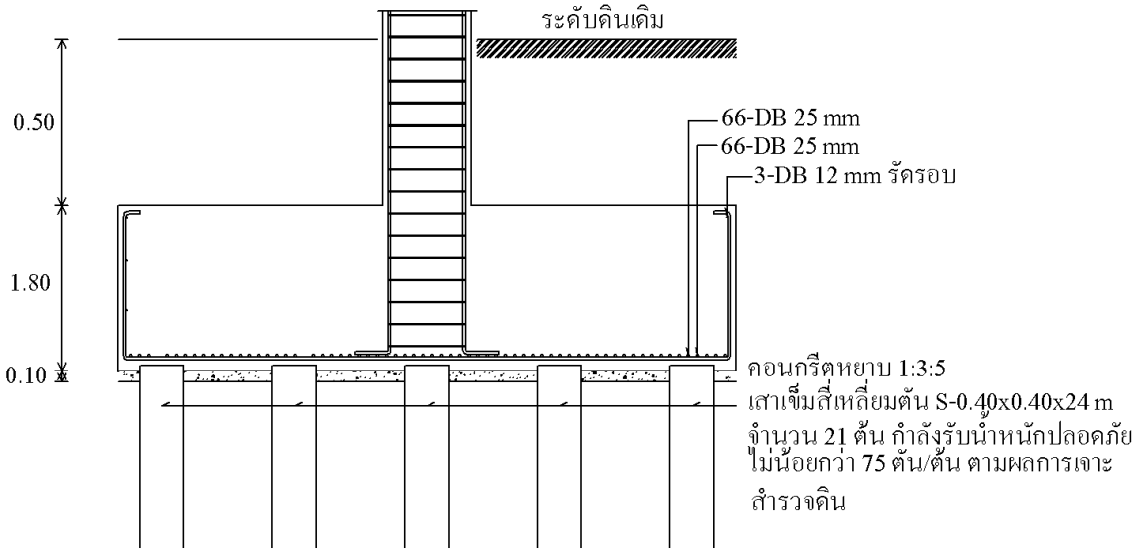
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \ \text{cm} > \ell_{db} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F21 PLAN



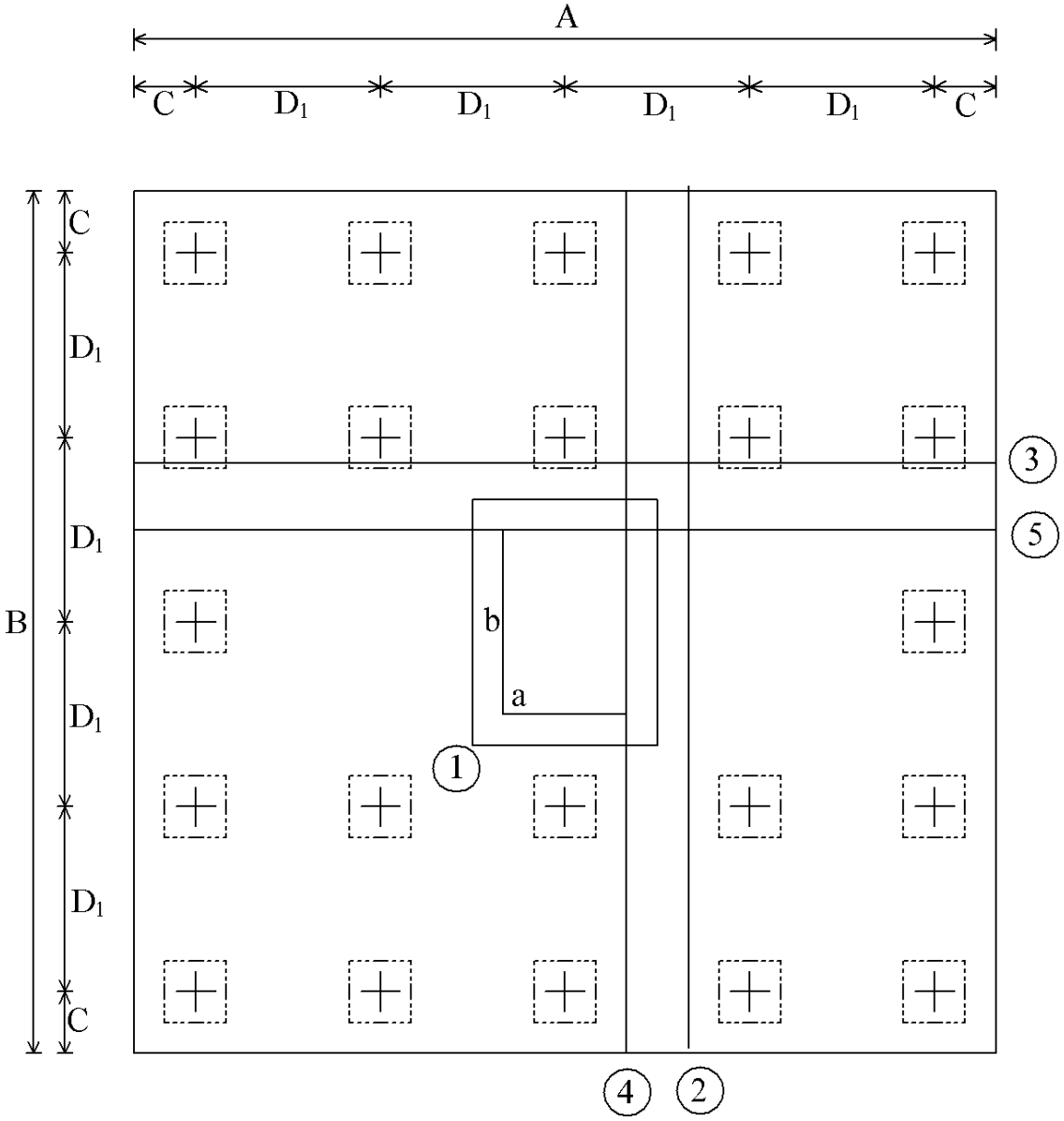
F21 SECTION

FOOTING F-21

SCALE 1:20

รูปที่ 6.102 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น

6.32 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 22 ต้น



รูปที่ 6.103 ฐานรากบนเสาเข็ม 22 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 4D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10\ m =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.32 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24\ m$ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 720 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 620 ตัน ตอม่อขนาด $1.00 \times 1.50\ m^2$ หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240\ ksc$ กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000\ ksc$

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240\ ksc$

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65\ ksc$

$f_y = 3{,}000\ ksc$

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500\ ksc$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n f_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c k j = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095\ ksc$$

$P_c = 75{,}000\ kg$

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000\ ksc$

$DL = 720{,}000\ kg$

$LL = 620{,}000\ kg$

$P = DL + LL = 1{,}340{,}000\ kg$

$a = 100\ cm$

$b = 150\ cm$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 1{,}340{,}000}{75{,}000} = 21.44 \Rightarrow 22 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20\ m = 120\ cm =$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$B = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.70 \text{ m} = 170 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 720{,}000 + 620{,}000 = 1{,}340{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{22} = \frac{1{,}340{,}000}{22} = 60{,}909.09091 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่าง ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = -0.40 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2}$$

$$x = -0.396385866$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.00+1.70}{2} = 1.05 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 60{,}909.09091 = 121{,}818.1818 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{b+d}{2} = 2\times 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = 0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2\times 60{,}909.09091 = 121{,}818.1818 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่างรวม 8 ต้น แนวกลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(1.5D_1)^2 + D_1^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{3.25}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{3.25}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 0.0698886923 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 8\times 60{,}909.09091\left(\frac{1}{2}+\frac{0.069888623}{0.40}\right) = 328{,}773.4135 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{8}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{8}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.00+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 1.300670408 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4\times 60{,}909.09091 = 243{,}636.3636 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 0 + 121{,}818.1818 + 121{,}818.1818 + 328{,}773.4135 + 243{,}636.3636$$

$$V_p = 816{,}046.1408 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(100 + 150 + 2 \times 170) = 1{,}180 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1{,}180 \times 170 = 1{,}647{,}071.374 \text{ kg} > V_p = 816{,}046.1408 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.70 = -1.00 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 5 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.00}{2} - 1.70 = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณี $x \ge \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5 \times 60{,}909.09091 = 304{,}545.4545 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 304{,}545.4545 = 304{,}545.4545 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Bd = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427{,}701.2968 \text{ kg} > V_b = 304{,}545.4545 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 2D_1 - \frac{b}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 5 \times 60{,}909.09091 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 114{,}204.5455 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 114{,}204.5455 = 114{,}204.5455 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240}\times 560\times 170 = 427,701.2969 \text{ kg} > V_b = 114,204.5455 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.70 + 0.10 = 1.80$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.80 = 0.20$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 720,000 + 620,000 = 1,340,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times 1.00\times 1.50\times 0.20 = 720$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times 5.60\times 5.60\times 1.80 = 135,475.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690\times(5.60\times 5.60 - 1.00\times 1.50)\times 0.20 = 10,092.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{22}$$

$$P_a = \frac{1,340,000 + 720 + 135,475.2 + 10,092.68}{22}$$

$$P_a = 67,558.54 \text{ kg/pile} < 75,000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 10D_1 - 2.5a) = P_r(14D_1 - 4.5a)$$

$$M_4 = 60,909.09091\times(14\times 1.20 - 4.5\times 1.00)$$

$$M_4 = 749,181.8182 \text{ kg.m} = 74,918,181.82 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 9P_r = 9\times 60,909.09091 = 548,181.8182 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{74,918,181.82}{1,500\times 0.909\times 170} = 323.209 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854$ cm

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{548,181.8182}{20.01\times 0.909\times 170} = 177.282 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{323.209}{4.909} = 65.84 = 66 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{177.282}{7.854} = 22.6 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 66-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5P_r(3D_1 - b)$$

$$M_5 = 5 \times 60,909.09091 \times (3 \times 1.20 - 1.50)$$

$$M_5 = 639,545.4545 \text{ kg} \cdot \text{m} = 63,954,545.45 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$V_5 = 10P_r = 10 \times 60,909.09091 = 609,090.9091 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{63,954,545.45}{1,500 \times 0.909 \times 170} = 275.91 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{609,090.9091}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 196.98 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{275.91}{4.909} = 56.2 \Rightarrow 57 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{196.98}{7.854} = 25.08 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 57-DB 25 mm ใช้จริง 66-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 195 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

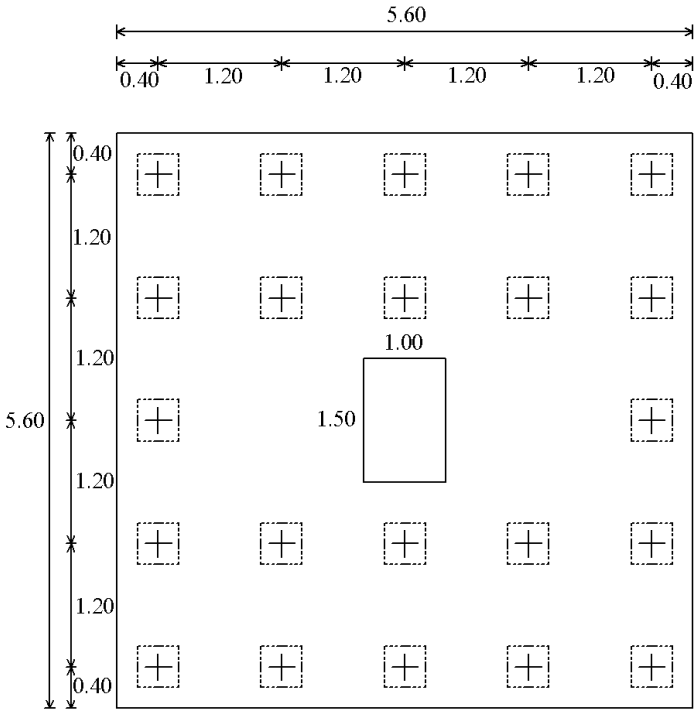
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

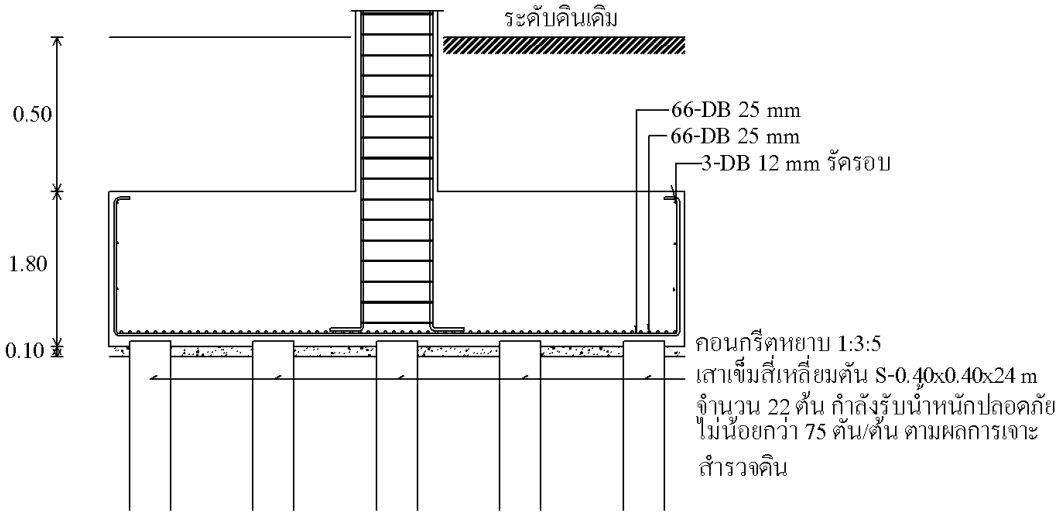
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2 \times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F22 PLAN



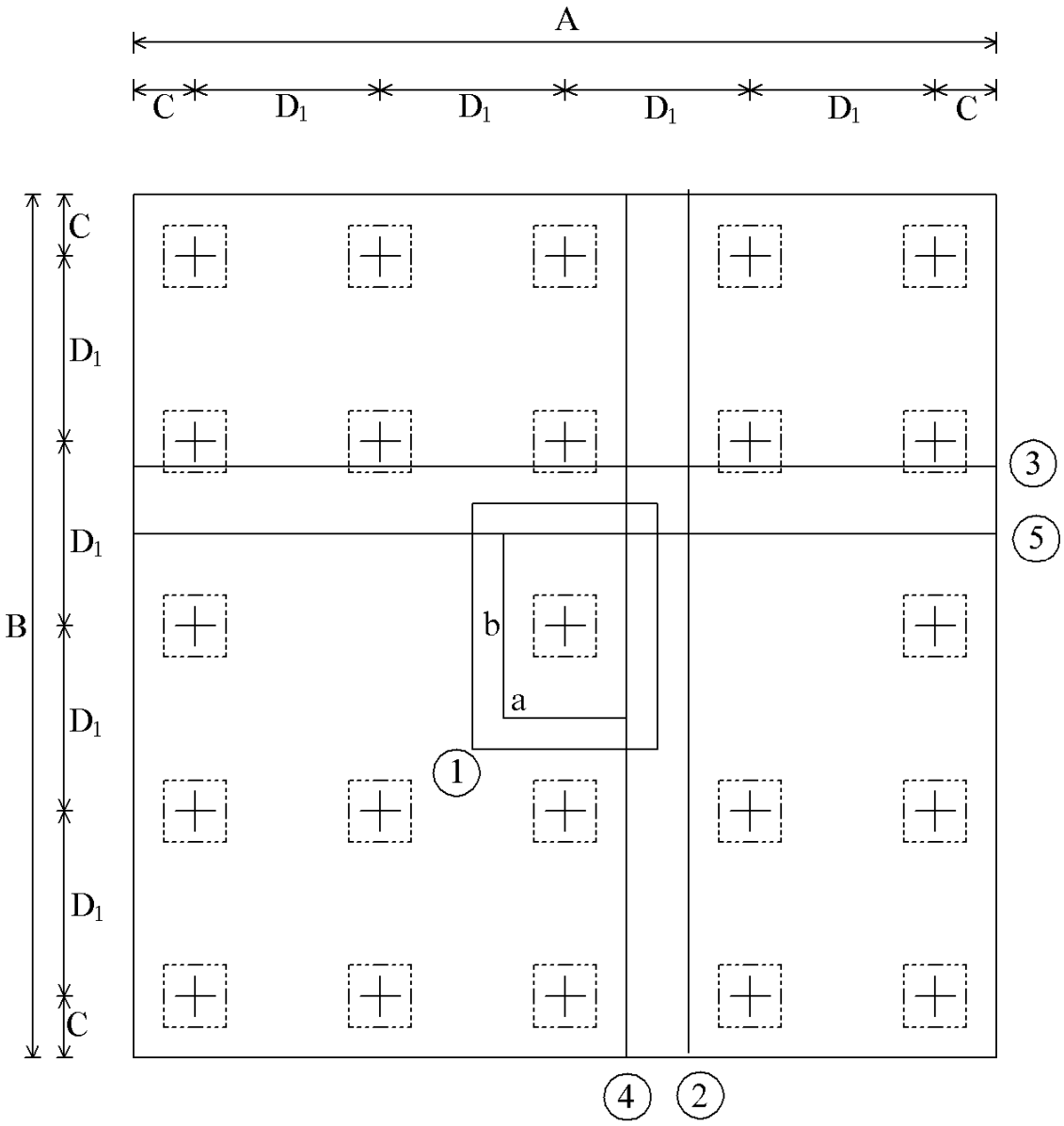
F22 SECTION

FOOTING F-22

SCALE 1:20

รูปที่ 6.104 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 22 ต้น

6.33 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 23 ต้น



รูปที่ 6.105 ฐานรากบนเสาเข็ม 23 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 4D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10$ m $=$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.33 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 760 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 650 ตัน ตอม่อขนาด 1.20×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240$ ksc

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65$ ksc

$f_y = 3{,}000$ ksc

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095 \text{ ksc}$$

$P_c = 75{,}000$ kg

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000$ ksc

$DL = 760{,}000$ kg

$LL = 650{,}000$ kg

$P = DL + LL = 1{,}410{,}000$ kg

$a = 120$ cm

$b = 150$ cm

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 1{,}410{,}000}{75{,}000} = 22.56 \Rightarrow 23 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ m $= 40$ cm $=$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20$ m $= 120$ cm $=$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$B = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60 \text{ m}$

$C_1 = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.70 \text{ m} = 170 \text{ cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 760{,}000 + 650{,}000 = 1{,}410{,}000 \text{ kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{23} = \frac{1{,}410{,}000}{23} = 61{,}304.34783 \text{ kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มกลางตอม่อไม่มีผลต่อแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

เสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่าง ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = -0.40 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2}$$

$$x = -0.462226013$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.20+1.70}{2} = 0.95 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 61{,}304.34783 = 122{,}608.6957 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{b+d}{2} = 2\times 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = 0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2\times 61{,}304.34783 = 122{,}608.6957 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่างรวม 8 ต้น แนวกลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2+(D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2+\left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2+(b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2+(1.50+1.70)^2} = 0.523999284 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 8\times 61{,}304.34783 = 490{,}434.7826 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2+(2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2+\left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{8}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2+(b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{8}\times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2+(1.50+1.70)^2} = 1.234830262 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4\times 61{,}304.34783 = 245{,}217.3913 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 0 + 122{,}608.6957 + 122{,}608.6957 + 490{,}434.7826 + 245{,}217.3913$$

$$V_p = 980{,}869.5652 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(120 + 150 + 2 \times 170) = 1{,}220 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1{,}220 \times 170 = 1{,}702{,}904.302 \text{ kg} > V_p = 980{,}869.5652 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 5 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = 0.10 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5 \times 61{,}304.34783 = 306{,}521.7391 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 306{,}521.7391 = 306{,}521.7391 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Bd = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427{,}701.2968 \text{ kg} > V_b = 306{,}521.7391 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 2D_1 - \frac{b}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 5 \times 61{,}304.34783 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{0.05}{0.40}\right) = 114{,}945.6522 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -1.25 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 114,945.6522 = 114,945.6522 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427,701.2969 \text{ kg} > V_b = 114,945.6522 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.70 + 0.10 = 1.80$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.80 = 0.20$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 760,000 + 650,000 = 1,410,000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400 \times 1.00 \times 1.50 \times 0.20 = 720$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400 \times 5.60 \times 5.60 \times 1.80 = 135,475.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690 \times (5.60 \times 5.60 - 1.00 \times 1.50) \times 0.20 = 10,092.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{23}$$

$$P_a = \frac{1,410,000 + 720 + 135,475.2 + 10,092.68}{23}$$

$$P_a = 67,664.69043 \text{ kg/pile} < 75,000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 4P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(4D_1 - 2a + 10D_1 - 2.5a) = P_r(14D_1 - 4.5a)$$

$$M_4 = 61,304.34783 \times (14 \times 1.20 - 4.5 \times 1.20)$$

$$M_4 = 698,869.5652 \text{ kg.m} = 69,886,956.52 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 9P_r = 9 \times 61,304.34783 = 551,739.1304 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{69,886,956.52}{1,500 \times 0.909 \times 170} = 301.503 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{551{,}739.1304}{20.01\times 0.909\times 170} = 178.432 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{301.503}{4.909} = 61.4 \Rightarrow 62 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{178.432}{7.854} = 22.7 \Rightarrow 23 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 62-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5P_r(3D_1 - b)$$

$$M_5 = 5\times 61{,}304.34783\times(3\times 1.20 - 1.50)$$

$$M_5 = 643{,}695.6522 \text{ kg}\cdot\text{m} = 64{,}369{,}565.22 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$V_5 = 10P_r = 10\times 61{,}304.34783 = 613{,}043.4783 \text{ kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{64{,}369{,}565.22}{1{,}500\times 0.909\times 170} = 277.7 \text{ cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \text{ cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \text{ cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23\times\frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \text{ ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{613{,}043.4783}{20.01\times 0.909\times 170} = 198.258 \text{ cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{277.7}{4.909} = 56.6 \Rightarrow 57 \text{ เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{198.258}{7.854} = 25.24 \Rightarrow 26 \text{ เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 57-DB 25 mm ใช้จริง 62-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06\times 4.909\times\frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 195 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

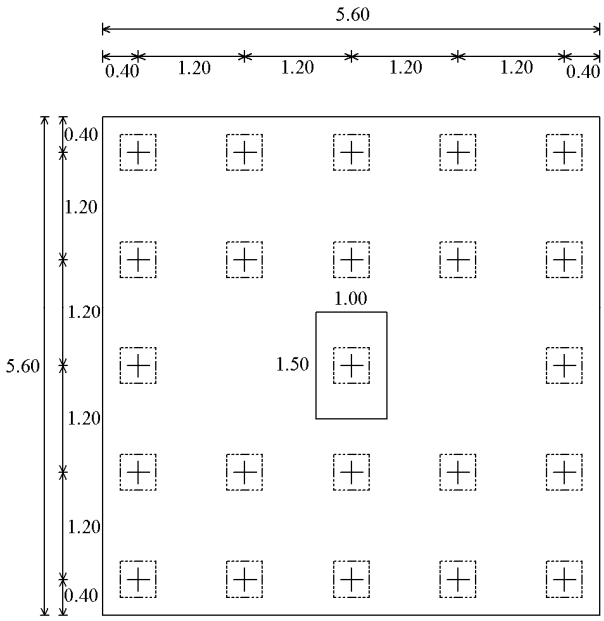
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

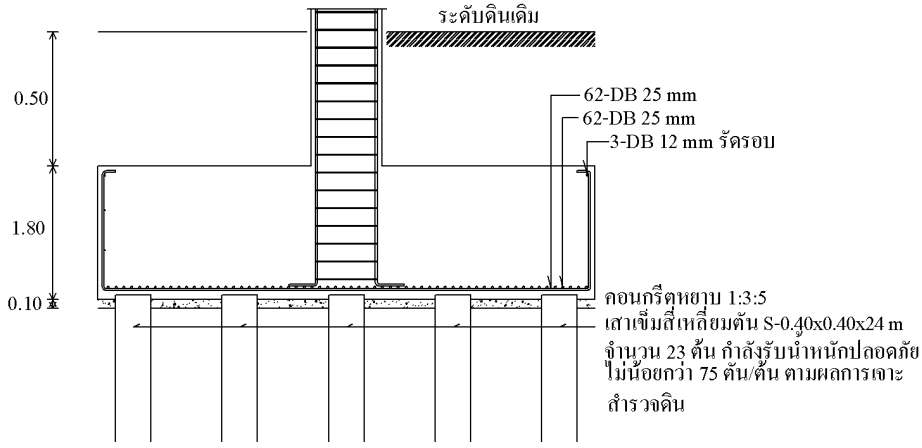
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2\times120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F23 PLAN



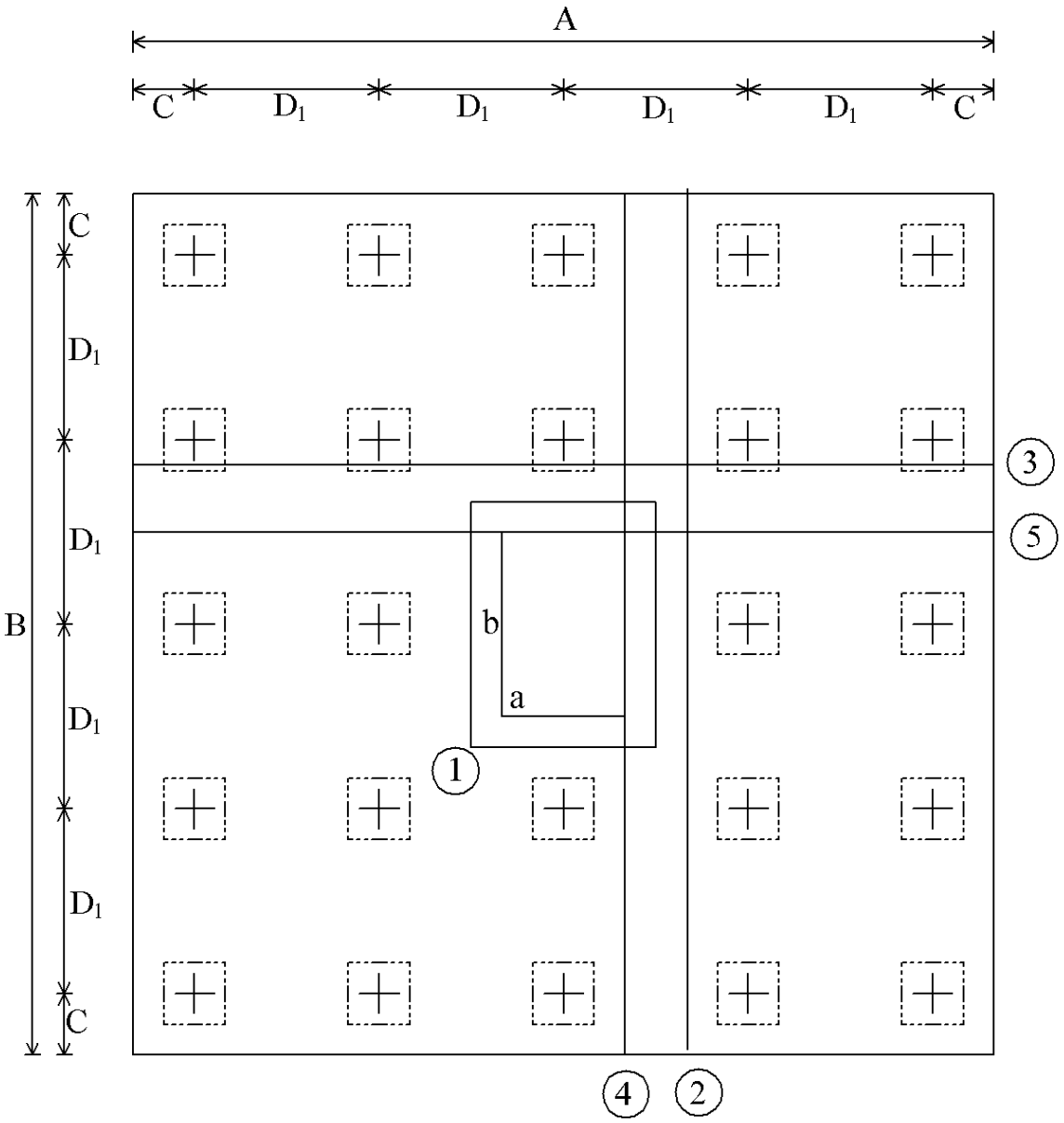
F23 SECTION

FOOTING F-23

SCALE 1:20

รูปที่ 6.106 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 23 ต้น

6.34 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 24 ต้น



รูปที่ 6.107 ฐานรากบนเสาเข็ม 24 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 4D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10\ m =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.34 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24\ m$ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 800 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 680 ตัน ตอม่อขนาด $1.20 \times 1.50\ m^2$ หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240\ ksc$ กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000\ ksc$

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240\ ksc$

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65\ ksc$

$f_y = 3{,}000\ ksc$

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500\ ksc$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n f_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c k j = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095\ ksc$$

$P_c = 75{,}000\ kg$

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000\ ksc$

$DL = 800{,}000\ kg$

$LL = 680{,}000\ kg$

$P = DL + LL = 1{,}480{,}000\ kg$

$a = 120\ cm$

$b = 150\ cm$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 1{,}480{,}000}{75{,}000} = 23.68 \Rightarrow 24 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20\ m = 120\ cm =$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60\ \text{m}$

$B = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60\ \text{m}$

$C_1 = 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.70\ \text{m} = 170\ \text{cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 800{,}000 + 680{,}000 = 1{,}480{,}000\ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{24} = \frac{1{,}480{,}000}{24} = 61{,}666.66667\ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวา ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.70}{2} = -0.25\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

เสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่าง ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = -0.40\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2}$$

$$x = -0.462226013$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.20+1.70}{2} = 0.95\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 61{,}666.66667 = 123{,}333.3333 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{b+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = 0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 61{,}666.66667 = 123{,}333.3333 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่างรวม 8 ต้น แนวกลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 0.523999284 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 8 \times 61{,}666.66667 = 493{,}333.3333 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{8}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{8} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 1.234830262 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 61,666.66667 = 246,666.6667 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 0 + 123,333.3333 + 123,333.3333 + 493,333.3333 + 246,666.6667$$

$$V_p = 986,666.6667 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(120 + 150 + 2 \times 170) = 1,220 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1,220 \times 170 = 1,702,904.302 \text{ kg} > V_p = 986,666.6667 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 5 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 5 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = 0.10 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5 \times 61,666.66667\left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 231,250 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 231,250 = 231,250 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Bd = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427,701.2968 \text{ kg} > V_b = 231,250 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 2D_1 - \frac{b}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right) = 5\times 61{,}666.66667\times\left(\frac{1}{2}-\frac{0.05}{0.40}\right) = 115{,}625 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -1.25 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 115{,}625 = 115{,}625 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240}\times 560\times 170 = 427{,}701.2969 \text{ kg} > V_b = 115{,}625 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.70 + 0.10 = 1.80$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.80 = 0.20$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 800{,}000 + 680{,}000 = 1{,}480{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times 1.00\times 1.50\times 0.20 = 720$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times 5.60\times 5.60\times 1.80 = 135{,}475.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690\times(5.60\times 5.60 - 1.00\times 1.50)\times 0.20 = 10{,}092.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{24}$$

$$P_a = \frac{1{,}480{,}000 + 720 + 135{,}475.2 + 10{,}092.68}{24}$$

$$P_a = 67{,}791.995 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 5P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(5D_1 - 2.5a + 10D_1 - 2.5a) = P_r(15D_1 - 5a)$$

$$M_4 = 61{,}666.66667\times(15\times 1.20 - 5\times 1.20)$$

$$M_4 = 740{,}000 \text{ kg.m} = 74{,}000{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 10P_r = 10\times 61{,}666.66667 = 616{,}666.6667 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{74{,}000{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 319.247611 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{616{,}666.6667}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 199.43 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{319.248}{4.909} = 65.03 \Rightarrow 66 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{199.43}{7.854} = 25.4 \Rightarrow 26 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 66-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5P_r(3D_1 - b)$$

$$M_5 = 5 \times 61{,}666.66667 \times (3 \times 1.20 - 1.50)$$

$$M_5 = 647{,}500 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 64{,}750{,}000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$V_5 = 10P_r = 10 \times 61{,}666.66667 = 616{,}666.6667 \ \text{kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{64{,}750{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 279.342 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{616{,}666.66667}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 199.43 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{279.342}{4.909} = 56.9 \Rightarrow 57 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{199.43}{7.854} = 25.4 \Rightarrow 26 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 57-DB 25 mm ใช้จริง 66-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 195 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

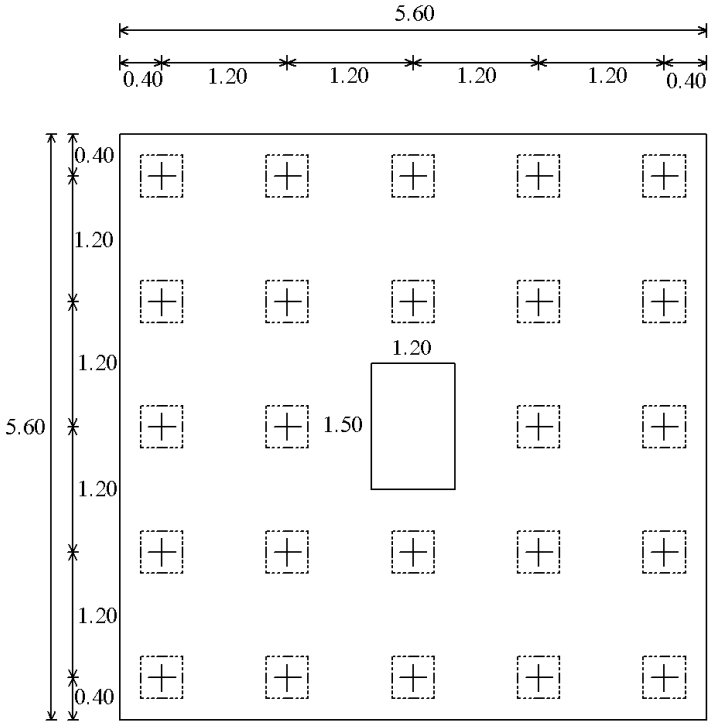
ระยะฝังเพียงพอ

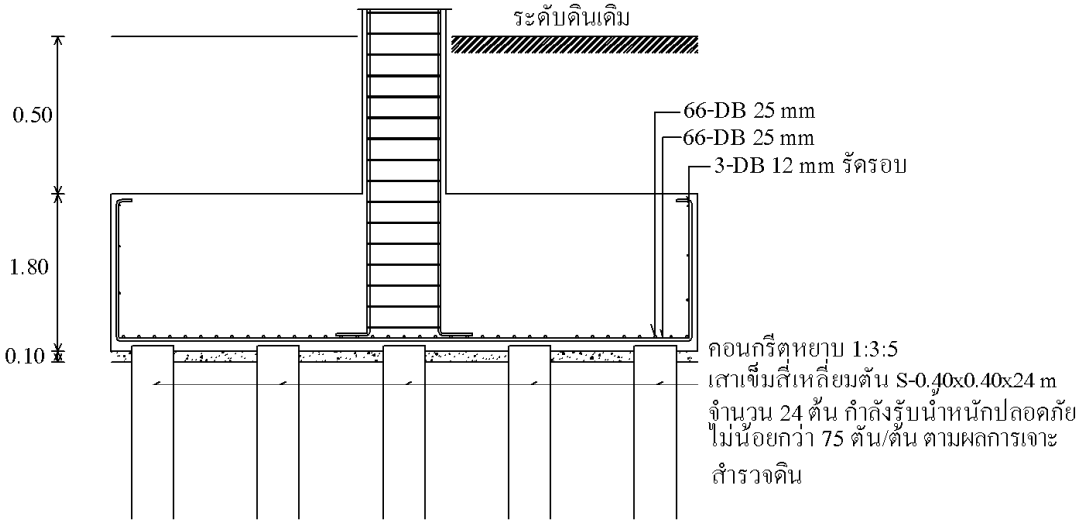
ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



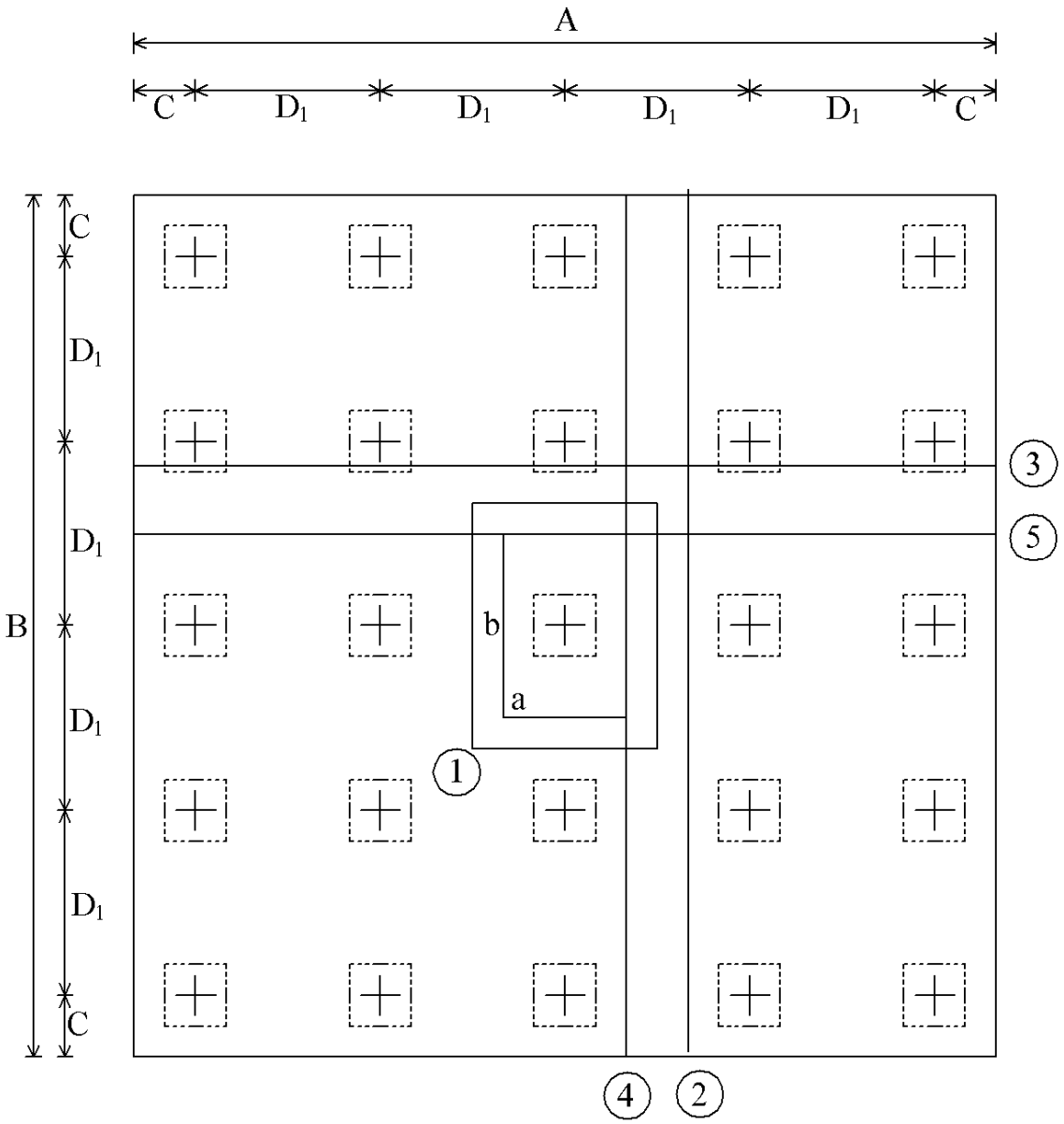


FOOTING F-24

SCALE 1:20

รูปที่ 6.108 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 24 ต้น

6.35 การออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม 25 ต้น



รูปที่ 6.109 ฐานรากบนเสาเข็ม 25 ต้น

กำหนด

D = ขนาดเสาเข็ม

$C \geq D$ = ระยะศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 \geq 3D$ = ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$A = 4D_1 + 2C$ = ความยาวของฐานราก

$B = 4D_1 + 2C$ = ความกว้างของฐานราก

a = ขนาดทางราบของตอม่อ ปกติจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ b

$b =$ ขนาดทางตั้งของตอม่อ

$C_1 = 0.10\ m =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$H_F =$ ความหนาของฐานราก

$d = H_F - C_1 = H_F - 0.10 =$ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก

ตัวอย่างที่ 6.35 จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S - 0.40 \times 0.40 \times 24\ m$ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 840 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 720 ตัน ตอม่อขนาด $1.20 \times 1.50\ m^2$ หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c^{'} = 240\ ksc$ กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000\ ksc$

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูล

$f_c^{'} = 240\ ksc$

$f_c = 0.375 f_c^{'} = 0.375 \times 240 = 90 \Rightarrow 65\ ksc$

$f_y = 3{,}000\ ksc$

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500\ ksc$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c^{'}}} = \frac{135.099}{\sqrt{240}} = 8.72$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{8.72 \times 65}} = 0.274$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.274}{3} = 0.909$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 65 \times 0.274 \times 0.909 = 8.095\ ksc$$

$P_c = 75{,}000\ kg$

$\rho_{temp} = 0.0020 \Rightarrow f_y = 3000\ ksc$

$DL = 840{,}000\ kg$

$LL = 720{,}000\ kg$

$P = DL + LL = 1{,}560{,}000\ kg$

$a = 120\ cm$

$b = 150\ cm$

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณน้ำหนักตอม่อ ฐานราก ดินถม รวมแล้ว 20 % ของน้ำหนักลงตอม่อ หาจำนวนเสาเข็ม

$$N_p = \frac{1.2 \times 1{,}560{,}000}{75{,}000} = 24.96 \Rightarrow 25 \text{ ต้น}$$

เมื่อ $D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม

$C = D = 0.40\ m = 40\ cm =$ ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3 \times 0.40 = 1.20\ m = 120\ cm =$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

$A = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60\ \text{m}$

$B = 4D_1 + 2C = 4 \times 1.20 + 2 \times 0.40 = 5.60\ \text{m}$

$C_1 = 0.10\ \text{m} = 10\ \text{cm} =$ ระยะหุ้มของคอนกรีต

สมมติให้ $d = 1.70\ \text{m} = 170\ \text{cm} =$ ความลึกประสิทธิผล

น้ำหนักบรรทุกบนตอม่อ

$$P = DL + LL = 840{,}000 + 720{,}000 = 1{,}560{,}000\ \text{kg}$$

เฉลี่ยแรงต้านทานสุทธิของเสาเข็มแต่ละต้น

$$P_r = \frac{P}{25} = \frac{1{,}560{,}000}{25} = 62{,}400\ \text{kg/pile}$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบเฉือนเจาะทะลุ

เสาเข็มต้นกลางตรงตอม่อไม่มีผลต่อแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

เสาเข็ม 2 ต้นกลางซ้ายขวา ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{a+d}{2} = 1.20 - \frac{1.20+1.70}{2} = -0.25\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

เสาเข็ม 2 ต้นกลางบนล่าง ห่างจากหน้าตัดวิกฤต

$$x = D_1 - \frac{b+d}{2} = 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = -0.40\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้นแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ $V_p = 0$

ระยะ x จากเสาเข็ม 4 ใกล้ตอม่อ ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{2}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2} = \sqrt{2} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2}$$

$$x = -0.462226013$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_p = 0$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางซ้ายขวา ถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{a+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.20+1.70}{2} = 0.95\ \text{m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20\ \text{m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2 \times 62,400 = 124,800 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 2 ต้นริมกลางบนล่างถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = 2D_1 - \frac{b+d}{2} = 2 \times 1.20 - \frac{1.50+1.70}{2} = 0.80 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 2P_r$

เป็นกรณี $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 2P_r = 2 \times 62,400 = 124,800 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นซ้ายขวาและบนล่างรวม 8 ต้น แนวกลางถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{5}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{5} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 0.523999284 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

ถ้า $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 0$

ถ้า $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุ $V_p = 8P_r$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็มคู่กลาง

$$V_p = 8 \times 62,400 = 499,200 \text{ kg}$$

ระยะ x จากศูนย์กลางเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุดถึงหน้าตัดวิกฤต

$$x = \sqrt{(2D_1)^2 + (2D_1)^2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2} = \sqrt{8}D_1 - \frac{1}{2}\sqrt{(a+d)^2 + (b+d)^2}$$

$$x = \sqrt{8} \times 1.20 - \frac{1}{2}\sqrt{(1.20+1.70)^2 + (1.50+1.70)^2} = 1.234830262 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x > \frac{D}{2}$ แรงเฉือนเจาะทะลุจากเสาเข็ม 4 ต้นมุมนอกสุด

$$V_p = 4P_r = 4 \times 62,400 = 249,600 \text{ kg}$$

รวมแรงเฉือนเจาะทะลุ

$$V_p = 0 + 0 + 124,800 + 124,800 + 499,200 + 249,600$$

$$V_p = 998,400 \text{ kg}$$

เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2(a + b + 2d) = 2(120 + 150 + 2 \times 170) = 1,220 \text{ cm}$$

กำลังรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ

$$V_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}\, b_o d = 0.53\sqrt{240} \times 1,220 \times 170 = 1,702,904.302 \text{ kg} > V_p = 998,400 \text{ kg}$$

ความหนาฐานรากเพียงพอในการรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุได้

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคาน

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวา 5 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{a}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.40}{2} = 0.20$$

เป็นกรณี $x \le -\frac{D}{2}$ แรงเฉือนแบบคาน $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (2) ห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มขวาสุด 5 ต้น

$$x = 2D_1 - \frac{a}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = 0.10 \text{ m}$$

เป็นกรณี $-\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5 \times 62,400\left(\frac{1}{2} + \frac{0.10}{0.40}\right) = 234,000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 234,000 = 234,000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}\, Bd = 0.29\sqrt{240} \times 560 \times 170 = 427,701.2968 \text{ kg} > V_b = 234,000 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 4 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.20}{2} - 1.70 = -1.10 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D}{2}$ ดังนั้น $V_b = 0$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นริมบนสุด

$$x = 2D_1 - \frac{b}{2} - d = 2 \times 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -0.05 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $-\frac{D}{2} < x < \frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 5P_r\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right) = 5\times 62{,}400\times\left(\frac{1}{2}-\frac{0.05}{0.40}\right) = 117{,}000 \text{ kg}$$

หน้าตัดวิกฤต (3) ห่างจากเสาเข็ม 5 ต้นใกล้ตอม่อ

$$x = D_1 - \frac{b}{2} - d = 1.20 - \frac{1.50}{2} - 1.70 = -1.25 \text{ m}$$

เป็นกรณีที่ $x < -\frac{D_1}{2}$ ดังนั้น

$$V_b = 0$$

แรงเฉือนแบบคานรวม

$$V_b = 0 + 117{,}000 = 117{,}000 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่รับได้

$$V_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}Ad = 0.29\sqrt{240}\times 560\times 170 = 427{,}701.2969 \text{ kg} > V_b = 117{,}000 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$H = 2.00$ m = ความลึกท้องฐานราก

$H_F = t = d + 0.10 = 1.70 + 0.10 = 1.80$ m = ความหนาฐานราก

$H_p = H - H_F = 2.00 - 1.80 = 0.20$ m = ความยาวตอม่อและความหนาดินถม

$P = DL + LL = 840{,}000 + 720{,}000 = 1{,}560{,}000$ kg = น้ำหนักลงตอม่อ

$W_p = 2400abH_p = 2400\times 1.00\times 1.50\times 0.20 = 720$ kg = น้ำหนักตอม่อ

$W_F = 2400ABH_F = 2400\times 5.60\times 5.60\times 1.80 = 135{,}475.2$ kg = น้ำหนักฐานราก

$W_{BF} = 1690(AB - ab)H_p = 1690\times(5.60\times 5.60 - 1.00\times 1.50)\times 0.20 = 10{,}092.68$ kg = น้ำหนักดินถม

ต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้น

$$P_a = \frac{P + W_p + W_F + W_{BF}}{25}$$

$$P_a = \frac{1{,}560{,}000 + 720 + 135{,}475.2 + 10{,}092.68}{25}$$

$$P_a = 68{,}251.5152 \text{ kg/pile} < 75{,}000 \text{ kg/pile}$$

เสาเข็มยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาณเหล็กเสริมและระยะฝังยึด

$$M_4 = 5P_r\left(D_1 - \frac{a}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_4 = P_r(5D_1 - 2.5a + 10D_1 - 2.5a) = P_r(15D_1 - 5a)$$

$$M_4 = 62{,}400\times(15\times 1.20 - 5\times 1.20)$$

$$M_4 = 748{,}800 \text{ kg.m} = 74{,}880{,}000 \text{ kg.cm}$$

$$V_4 = 10P_r = 10\times 62{,}400 = 624{,}000 \text{ kg}$$

$$A_{s4} = \frac{M_4}{f_s jd} = \frac{74{,}880{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 323.044 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_4 = \frac{V_4}{ujd} = \frac{624{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 201.802 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s4}}{A_{s1}} = \frac{323.044}{4.909} = 65.8 \Rightarrow 66 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_4}{\sum O_1} = \frac{201.802}{7.854} = 25.7 \Rightarrow 26 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 66-DB 25 mm

$$M_5 = 5P_r\left(D_1 - \frac{b}{2}\right) + 5P_r\left(2D_1 - \frac{b}{2}\right) = 5P_r(3D_1 - b)$$

$$M_5 = 5 \times 62{,}400 \times (3 \times 1.20 - 1.50)$$

$$M_5 = 655{,}200 \ \text{kg} \cdot \text{m} = 65{,}520{,}000 \ \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$V_5 = 10P_r = 10 \times 62{,}400 = 624{,}000 \ \text{kg}$$

$$A_{s5} = \frac{M_5}{f_s jd} = \frac{65{,}520{,}000}{1{,}500 \times 0.909 \times 170} = 282.664 \ \text{cm}^2$$

เลือกเหล็ก DB 25 mm มี $A_{s1} = 4.909 \ \text{cm}^2, \sum O_1 = 7.854 \ \text{cm}$

$$u = 3.23\frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 3.23 \times \frac{\sqrt{240}}{2.5} = 20.01 \ \text{ksc}$$

$$\sum O_5 = \frac{V_5}{ujd} = \frac{624{,}000}{20.01 \times 0.909 \times 170} = 201.802 \ \text{cm}$$

จำนวนเส้นจากผลของโมเมนต์

$$N_1 = \frac{A_{s5}}{A_{s1}} = \frac{282.664}{4.909} = 57.6 \Rightarrow 58 \ \text{เส้น}$$

จำนวนเส้นจากผลของแรงเฉือนที่แปลงเป็นแรงยึดเหนี่ยว

$$N_2 = \frac{\sum O_5}{\sum O_1} = \frac{201.802}{7.854} = 25.7 \Rightarrow 26 \ \text{เส้น}$$

ดังนั้นทิศทางนี้ต้องเสริมเหล็ก 58-DB 25 mm ใช้จริง 66-DB 25 mm

ตรวจสอบระยะฝัง

ระยะฝังพื้นฐาน

$$\ell_{db} = 0.06A_b\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} = 0.06 \times 4.909 \times \frac{3000}{\sqrt{240}} = 57.04 \ \text{cm}$$

ระยะฝังจริง

$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{b}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{150}{2} - 10 = 195 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

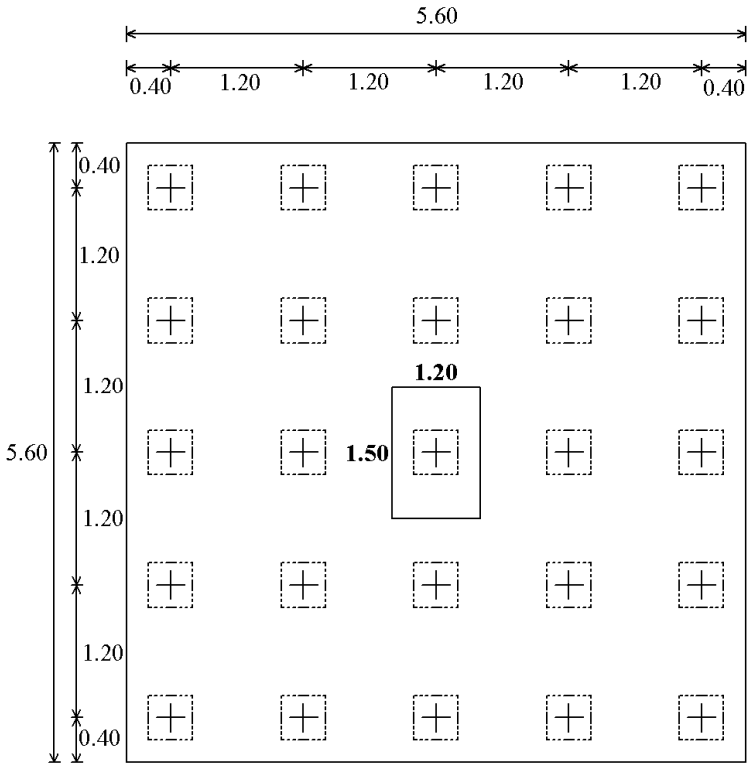
ระยะฝังเพียงพอ

ระยะฝังจริงทางขนานขอบยาว

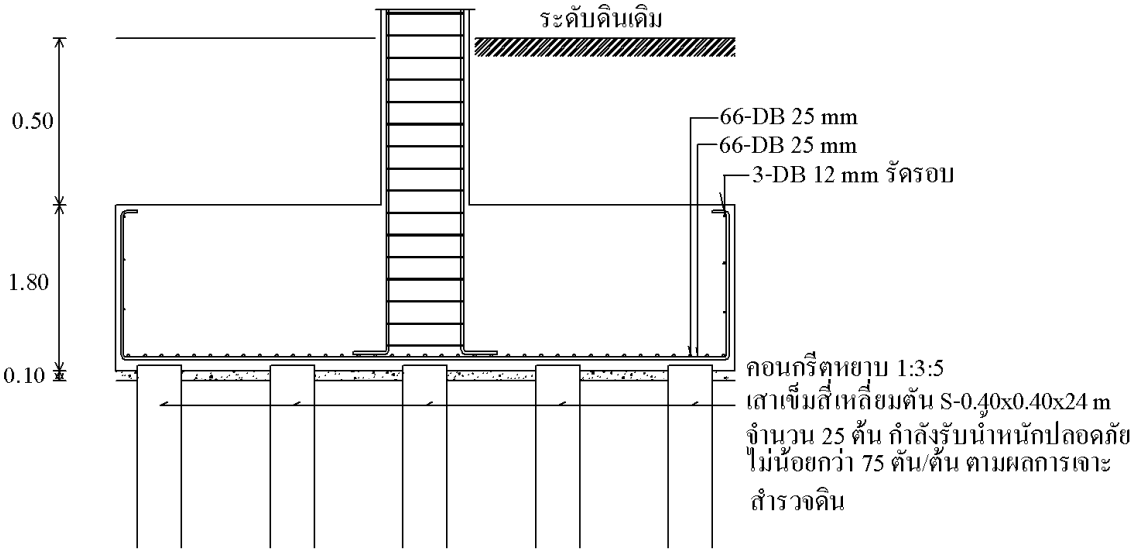
$$L_{db} = 2D_1 + C - \frac{a}{2} - C_1 = 2\times 120 + 40 - \frac{100}{2} - 10 = 220 \text{ cm} > \ell_{db} = 57.04 \text{ cm}$$

ระยะฝังเพียงพอ

ขั้นตอนที่ 7 เขียนรายละเอียดฐานราก



F25 PLAN



F25 SECTION

FOOTING F-25

SCALE 1:20

รูปที่ 6.110 รายละเอียดฐานรากบนเสาเข็ม 25 ต้น

แบบฝึกหัด

[1] ให้ออกแบบฐานรากบนดินแน่น กำหนดน้ำหนักบรรทุก กำลังของวัสดุ ส่วนแรงแบกทานที่ยอมให้ของดินให้ใช้ 6 หรือ 8 หรือ 10 หรือ 12 หรือ 15 ตันต่อตารางเมตร

[2] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 870 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 750 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 26 ต้น)

[3] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 900 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 780 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 27 ต้น)

[4] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 940 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 810 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 28 ต้น)

[5] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 970 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 840 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 29 ต้น)

[6] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,000 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 870 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×1.50 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 30 ต้น)

[7] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,030 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 900 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 31 ต้น)

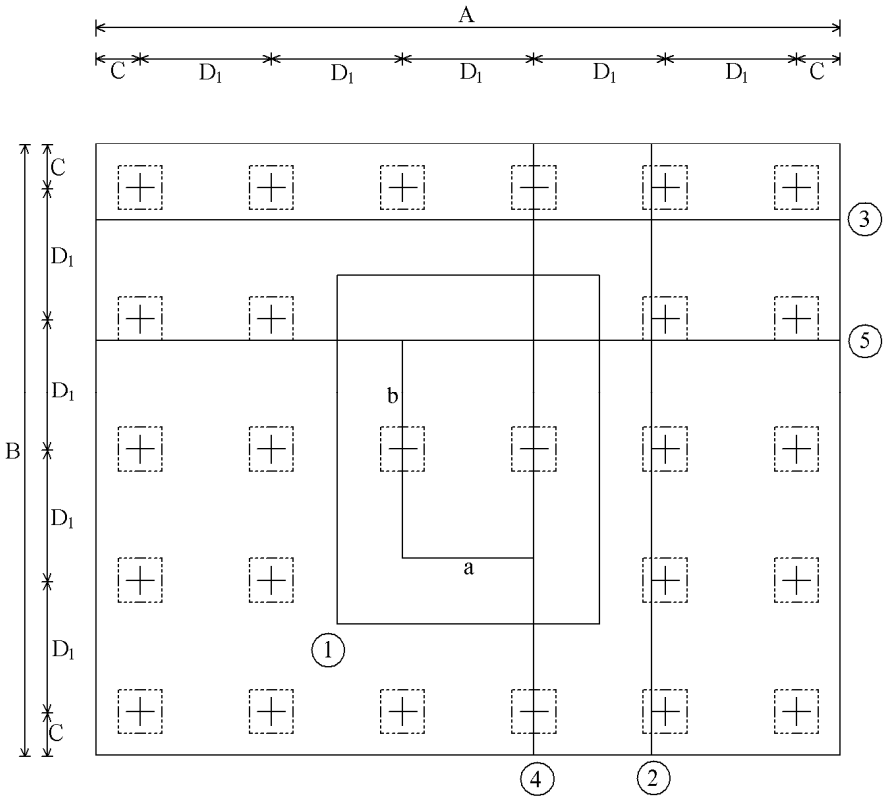
[8] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,070 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 930 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 32 ต้น)

[9] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,100 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 960 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 33 ต้น)

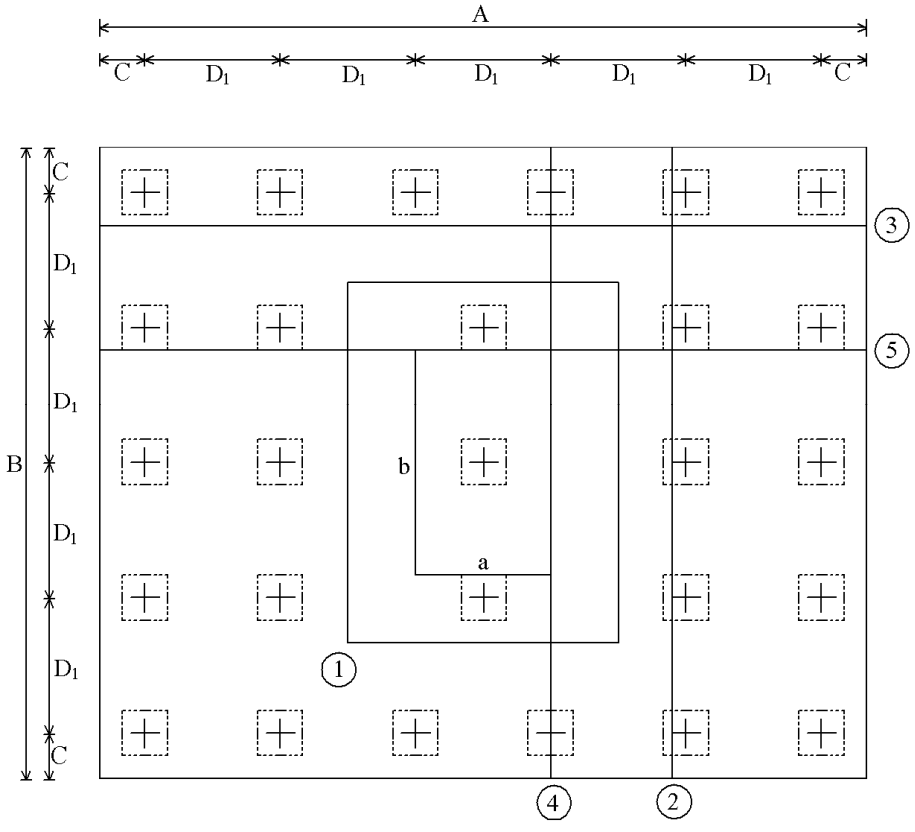
[10] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,130 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 990 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 34 ต้น)

[11] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,160 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 1,020 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 35 ต้น)

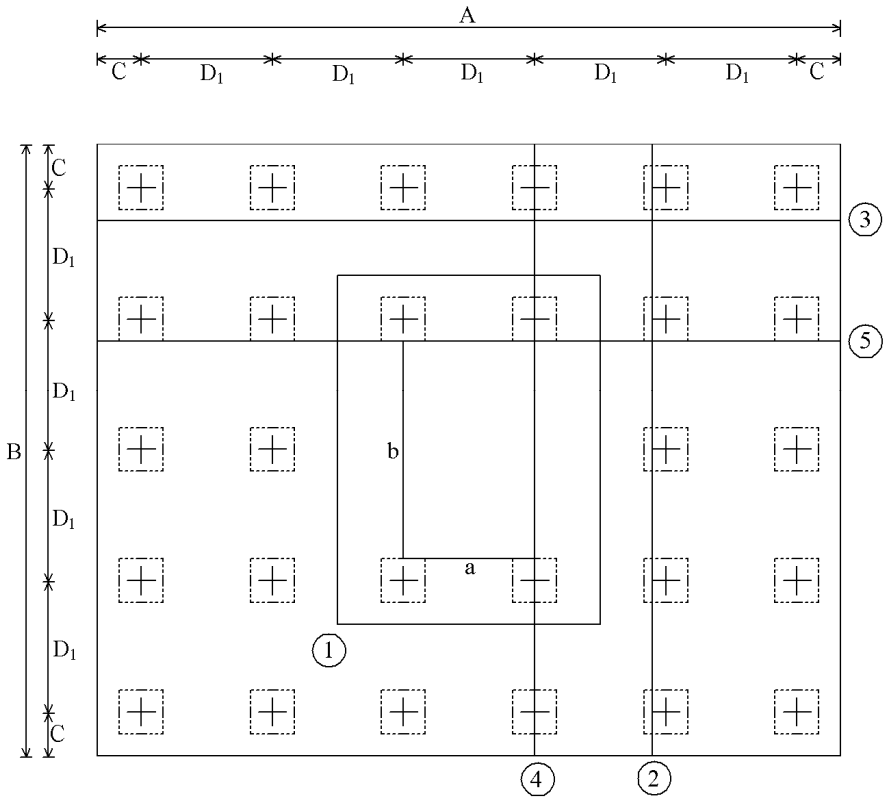
[12] จงออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม $S-0.40\times0.40\times24$ m กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน 1,190 ตัน น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 1,050 ตัน ตอม่อขนาด 1.50×2.00 m^2 หัวเสาเข็มลึกจากระดับดินเดิมที่เป็นระดับอ้างอิงด้วยประมาณ 2.00 เมตร กำลังคอนกรีต $f_c' = 240$ ksc กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc (จำนวนเสาเข็ม 36 ต้น)



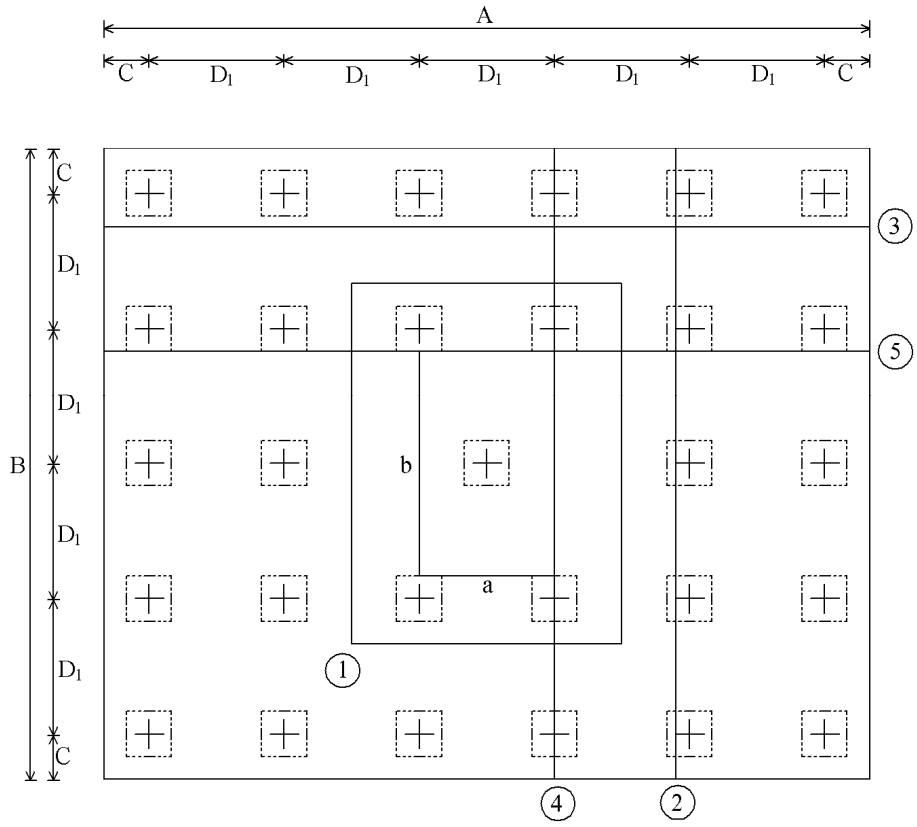
รูปที่ 6.111 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 26 ต้น



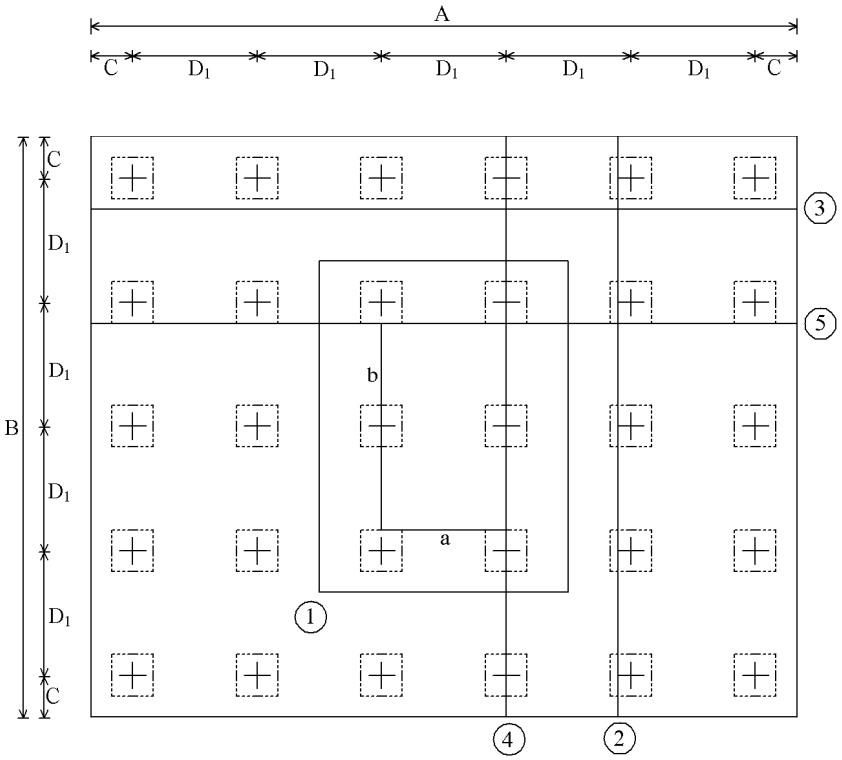
รูปที่ 6.112 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 27 ต้น



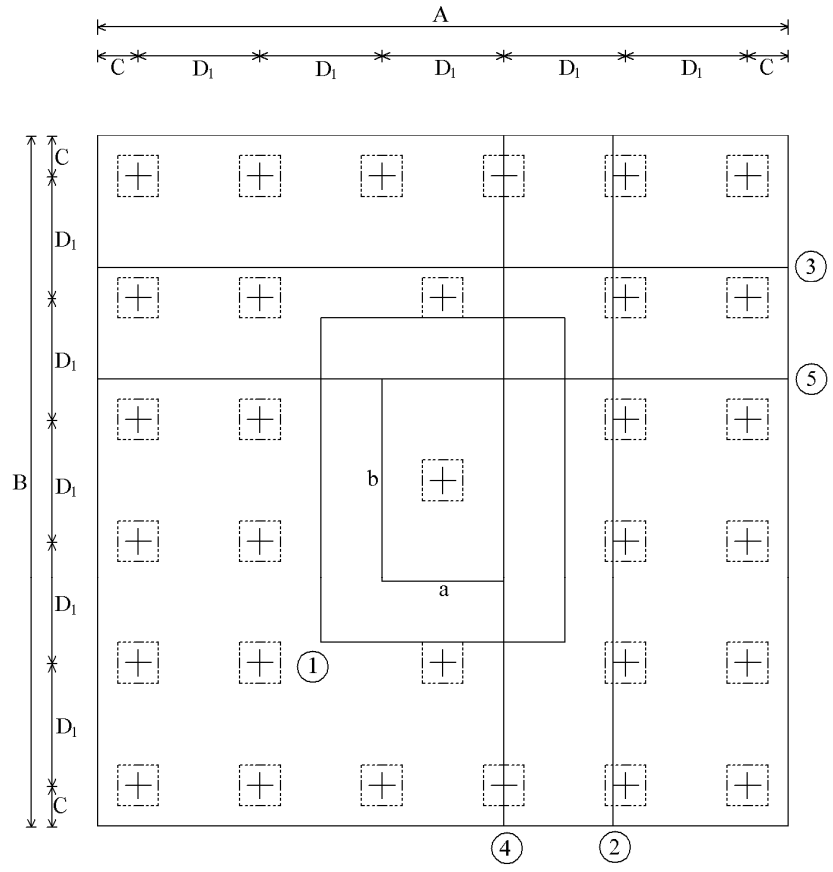
รูปที่ 6.113 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 28 ต้น



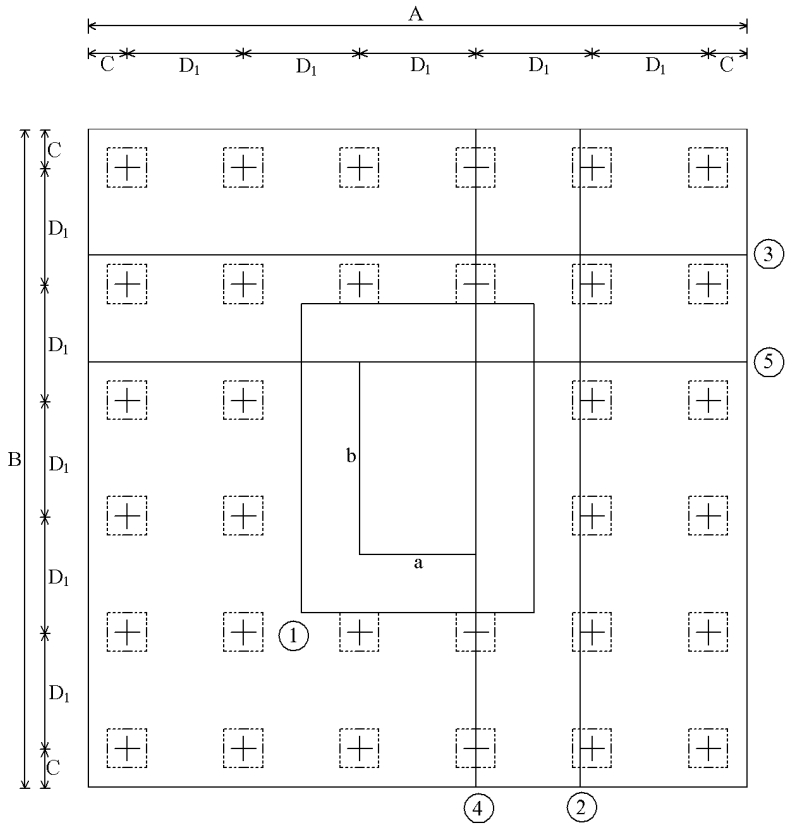
รูปที่ 6.114 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 29 ต้น



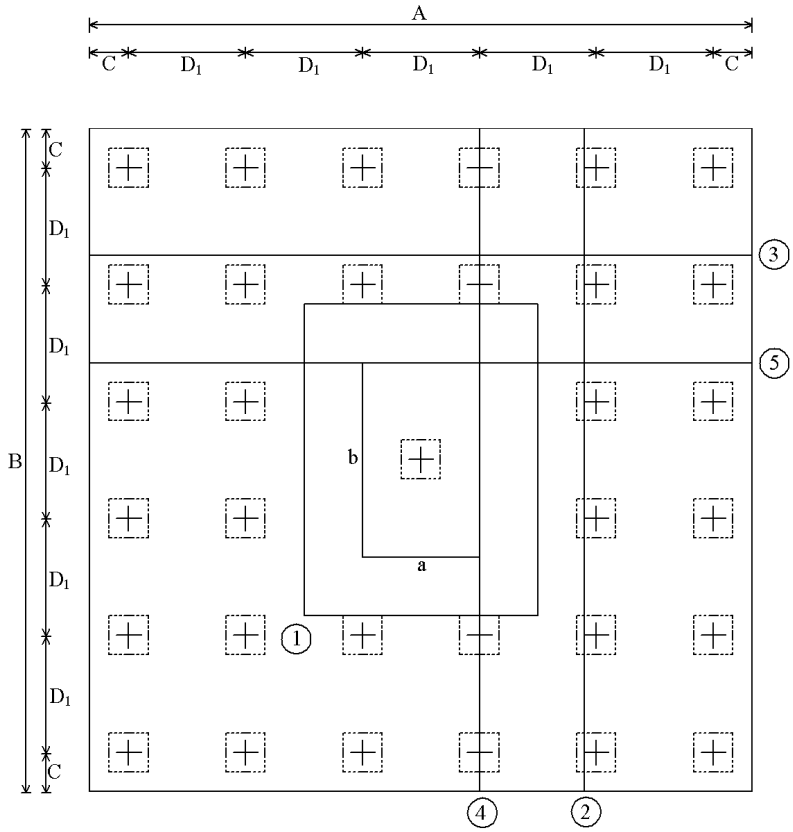
รูปที่ 6.115 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 30 ต้น



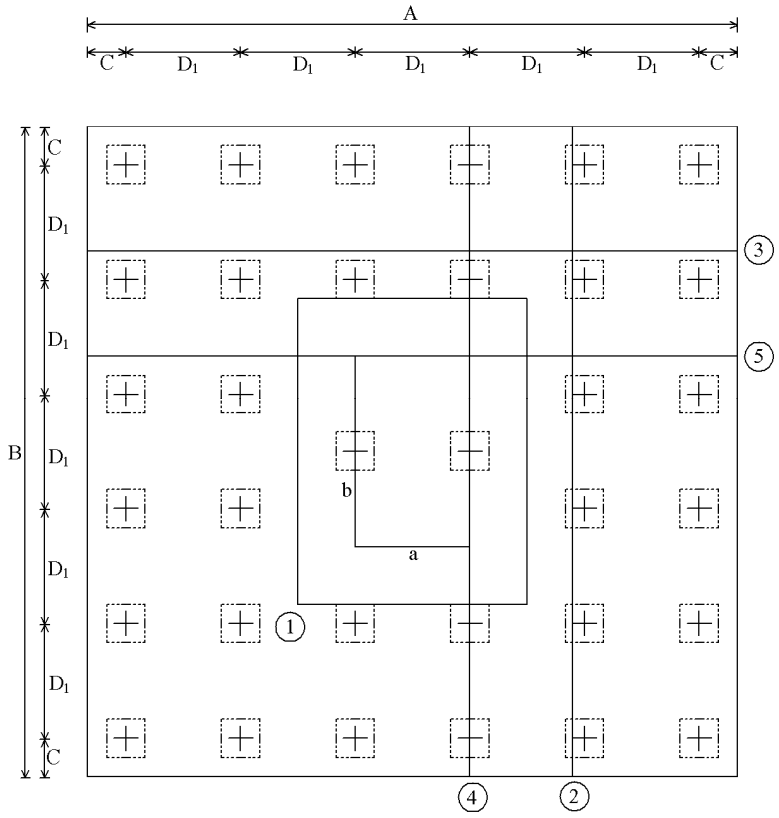
รูปที่ 6.116 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 31 ต้น



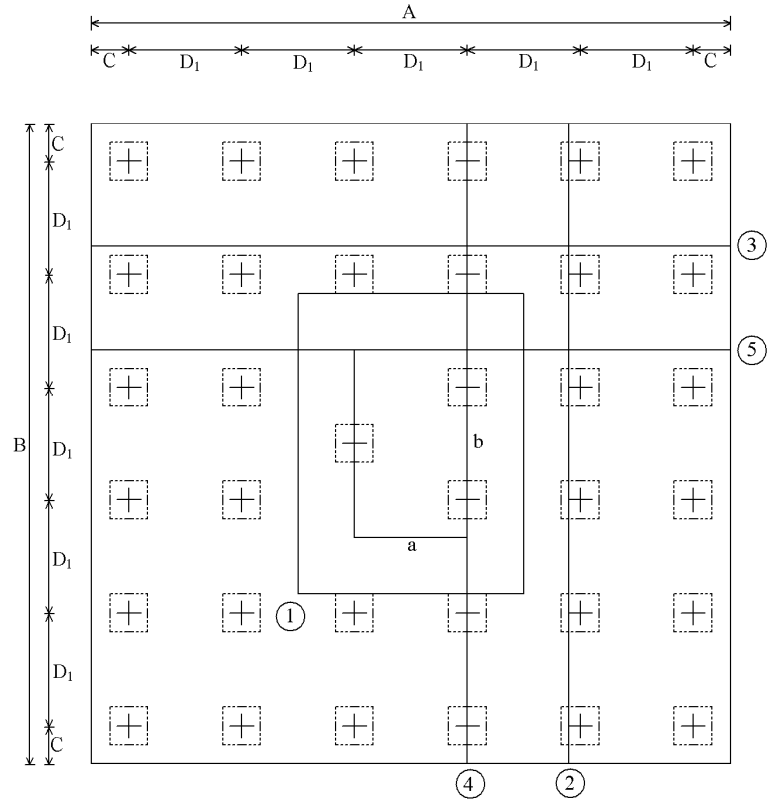
รูปที่ 6.117 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 32 ต้น



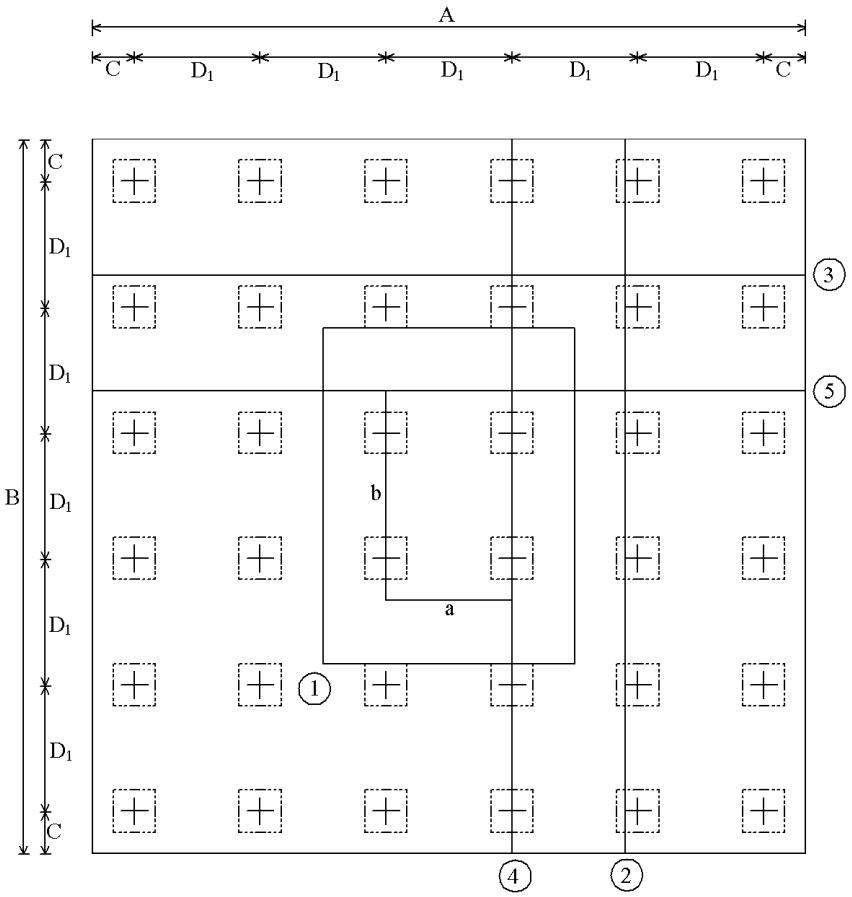
รูปที่ 6.118 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 33 ต้น



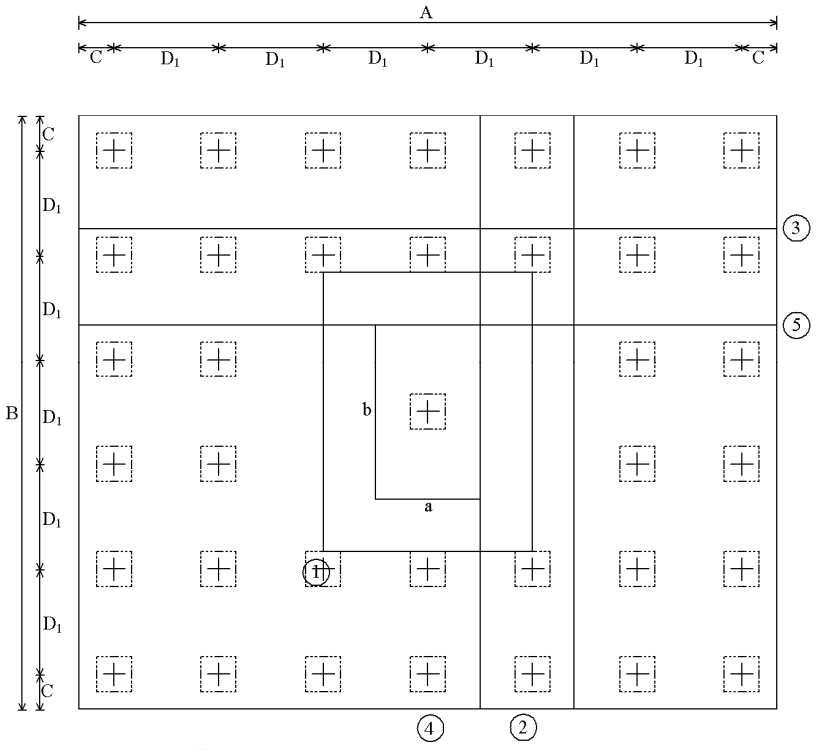
รูปที่ 6.119 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 34 ต้น



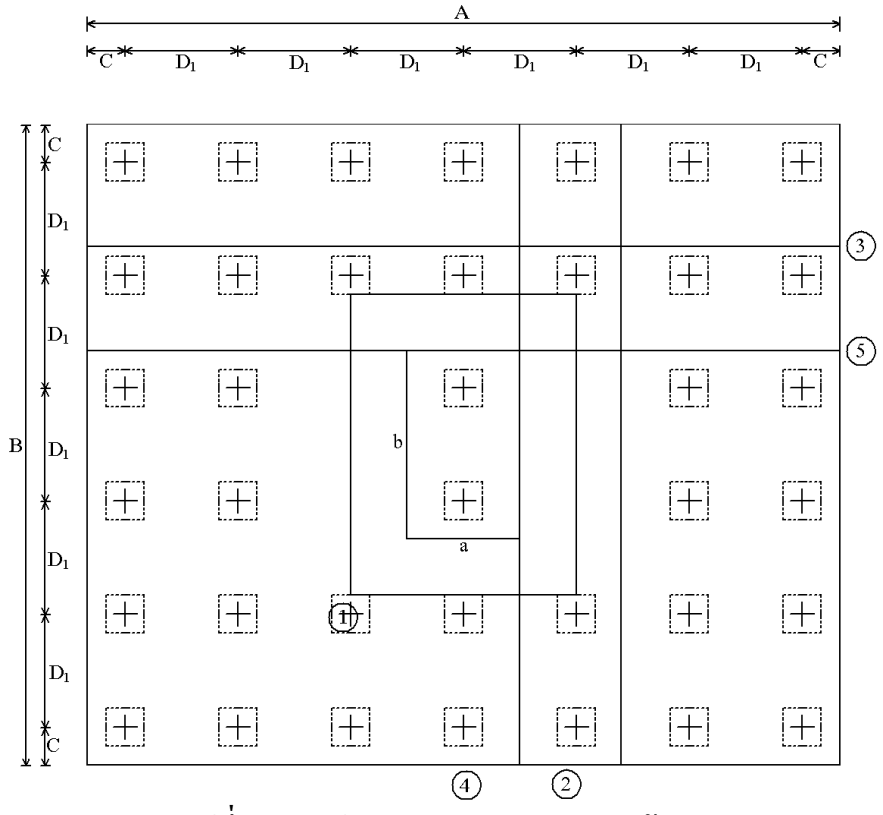
รูปที่ 6.120 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 35 ต้น



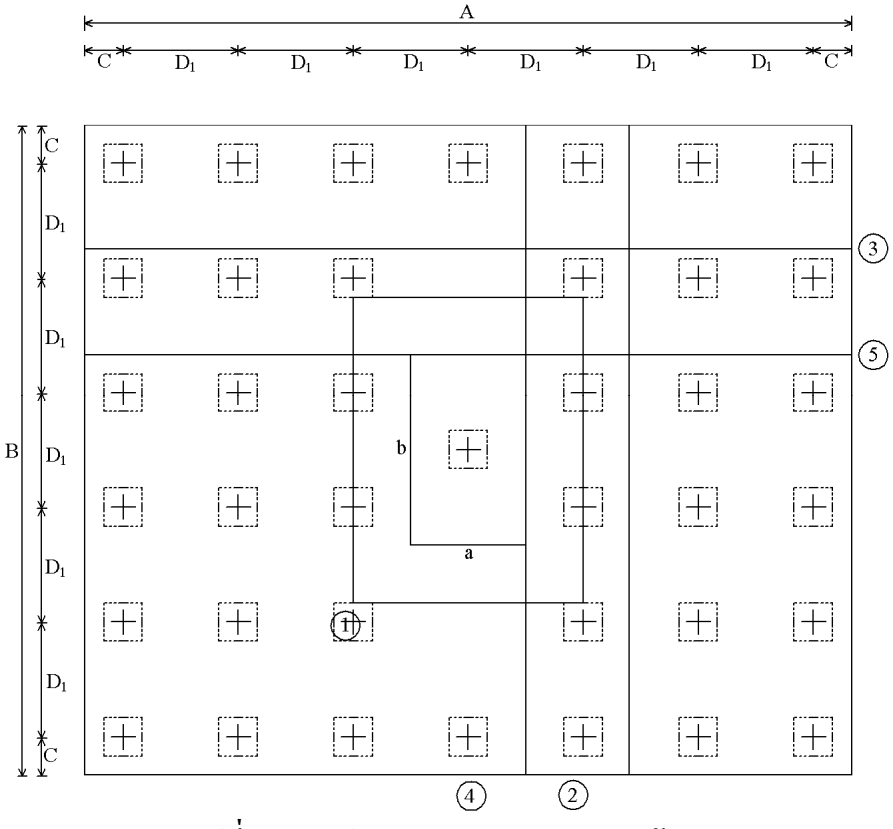
รูปที่ 6.121 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 36 ต้น



รูปที่ 6.122 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 37 ต้น



รูปที่ 6.123 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 38 ต้น



รูปที่ 6.124 แปลนฐานรากบนเสาเข็ม 39 ต้น

ภาคผนวก

คำอธิบายตาราง ผ-1

A = ผลรวมของเนื้อที่หน้าตัด , cm^2

$\sum O$ = ผลรวมของเส้นรอบรูป , cm

ขนาด = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม , mm

น้ำหนัก วัดต่อความยาว 1 เมตร , kg/m

RB = Round bar = เส้นกลมผิวเรียบ

DB = Deformed bar = เส้นข้ออ้อย

ขนาดของเหล็กในตาราง ผ-1 แสดงที่นิยมใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป และมีอยู่ในตลาดแล้ว ความยาวปกติ 10 เมตร และ 12 เมตร หากเป็นความยาวอื่นต้องสั่งจากโรงงาน หากออกแบบใน สปป.ลาว ขนาดโตสุดคือ 20 mm หากโตกว่านั้นต้องสั่งจากไทยหรือเวียดนาม จะทำให้ราคาสูงขึ้น

ปัจจุบันที่เครื่องคำนวณวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาถูกลง ดังนั้นการหาเนื้อที่หน้าตัด และผลรวมเส้นรอบวงของเหล็กอาจจะใช้วิธีคำนวณหาได้โดยตรงดังนี้

เนื้อที่หน้าตัด $A_{s1} = \frac{\pi}{4} d_b^2$

ความยาวเส้นรอบวง $\sum O_1 = \pi d_b$

เมื่อ A_{s1} = เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก 1 เส้น, cm^2

$\sum O_1$ = เส้นรอบวงของเหล็ก 1 เส้น, cm

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก, cm

$\pi = 3.141592654$ = ค่าคงที่พาย

ข้อควรระวังคือเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กระบุเป็น mm แต่ต้องหารด้วย 10 ให้เป็น cm ก่อนนำไปแทนค่าในสูตรข้างต้น เมื่อชำนาญแล้วก็ไม่จำเป็นต้องพกพาตารางเหล็กอีก

ในกรณีที่ใช้ Tablet หรือ IPad แล้วใช้ Application DRMK ของ ดร.มงคล มทส. ก็อาจจะบันทึกสำหรับ pdf-notes เอาไว้ประกอบการใช้ก็ได้

ตาราง ผ-1 เนื้อที่หน้าตัด น้ำหนัก และเส้นรอบวงของเหล็กเสริมคอนกรีต

ขนาด	น้ำหนัก		จำนวนเหล็กเสริม									
ϕ mm	kg/m		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RB 6	0.222	A	0.283	0.566	0.849	1.132	1.415	1.698	1.981	2.264	2.547	2.83
-		∑O	1.884	3.768	5.652	7.536	9.42	11.304	13.188	15.072	16.956	18.84
RB 9	0.499	A	0.636	1.272	1.908	2.544	3.18	3.816	4.452	5.088	5.724	6.36
-		∑O	2.827	5.654	8.481	11.308	14.135	16.962	19.789	22.616	25.443	28.27
-	0.617	A	0.785	1.57	2.355	3.14	3.925	4.71	5.495	6.28	7.065	7.85
DB 10		∑O	3.141	6.282	9.423	12.564	15.705	18.846	21.987	25.128	28.269	31.41
RB 12	0.888	A	1.131	2.262	3.393	4.524	5.655	6.786	7.917	9.048	10.179	11.31
DB 12		∑O	3.77	7.54	11.31	15.08	18.85	22.62	26.39	30.16	33.93	37.7
RB 15	1.387	A	1.767	3.534	5.301	7.068	8.835	10.602	12.369	14.136	15.903	17.67
-		∑O	4.712	9.424	14.136	18.848	23.56	28.272	32.984	37.696	42.408	47.12
-	1.578	A	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.09	20.1
DB 16		∑O	5.026	10.052	15.078	20.104	25.13	30.156	35.182	40.208	45.234	50.26
RB 19	2.226	A	2.835	5.67	8.505	11.34	14.175	17.01	19.845	22.68	25.515	28.35
-		∑O	5.969	11.938	17.907	23.876	29.845	35.814	41.783	47.752	53.721	59.69
-	2.466	A	3.141	6.282	9.423	12.564	15.705	18.846	21.987	25.128	28.269	31.41
DB 20		∑O	6.283	12.566	18.849	25.132	31.415	37.698	43.981	50.264	56.547	62.83
RB 25	3.854	A	4.909	9.818	14.727	19.636	24.545	29.454	34.363	39.272	44.181	49.09
DB 25		∑O	7.854	15.708	23.562	31.416	39.27	47.124	54.978	62.832	70.686	78.54
RB 28	4.835	A	6.157	12.314	18.471	24.628	30.785	36.942	43.099	49.256	55.413	61.57
DB 28		∑O	8.796	17.592	26.388	35.184	43.98	52.776	61.572	70.368	79.164	87.96
-	6.314	A	8.042	16.084	24.126	32.168	40.21	48.252	56.294	64.336	72.378	80.42
DB 32		∑O	10.053	20.106	30.159	40.212	50.265	60.318	70.371	80.424	90.477	100.53
-	7.992	A	10.178	20.356	30.534	40.712	50.89	61.068	71.246	81.424	91.602	101.78
DB 36		∑O	11.309	22.618	33.927	45.236	56.545	67.854	79.163	90.472	101.781	113.09

คำอธิบายตาราง ผ-2 ระยะเรียงเหล็กในแผ่นพื้นและโครงสร้างอื่นๆ

การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมในแผ่นพื้นจะได้ปริมาณเหล็กเสริมเป็น cm^2/m เนื่องจากในการวิเคราะห์จะตัดพื้นกว้าง 1 เมตรเสมือนเป็นคานแบน

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} \quad \frac{cm^2}{m}$$

โดยโมเมนต์ดัด M มีหน่วยเป็น $kg \cdot cm/m$

การแสดงปริมาณเหล็กเสริมในพื้นจะแสดงเป็นระยะเรียงเหล็กเสริมเป็นเมตรหรือมิลลิเมตร วิธีหาระยะเรียงจะหาได้โดยใช้เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก 1 เส้น หารด้วย เนื้อที่หน้าตัดที่ต้องการในหน่วย cm^2/m ระยะเรียงที่ได้จะเป็นหน่วย m

$$s = \frac{A_{s1}}{A_s}$$

สำหรับตาราง ผ-2 เป็นการระบุระยะเรียงเป็นเมตร และแสดงเนื้อที่หน้าตัดในแถวบน และเส้นรอบรูปในแถวล่าง ทั้งนี้ระยะเรียงจะต้องไม่เกิน 3 เท่าของความหนาพื้น และไม่เกิน 45 cm ระยะห่างระหว่างผิวเหล็ก $s - d_b$ ต้องไม่น้อยกว่า 3 cm เพื่อให้หินแทรกลงได้

ตาราง ผ-2 เนื้อที่หน้าตัด A_s และผลรวมของเส้นรอบวง $\sum O$ ของเหล็กในแผ่นพื้น

S m	A_s cm^2/m $\sum O$ cm/m สำหรับเหล็กขนาดต่างๆ								
	RB 6 mm	RB 9 mm -	- DB 10 mm	RB 12 mm DB 12 mm	RB 15 mm -	- DB 16 mm	RB 19 mm -	- DB 20 mm	RB 25 mm DB 25 mm
0.05	5.66 37.68	12.72 56.54	15.7 62.82	22.62 75.4	35.34 94.26	40.22 100.52	56.7 119.38	62.84 125.66	98.175 157.08
0.06	4.717 31.4	10.6 47.117	13.083 52.35	18.85 62.833	29.45 78.55	33.517 83.767	47.25 99.483	52.367 104.717	81.812 130.9
0.07	4.043 26.914	9.086 40.386	11.214 44.871	16.157 53.857	25.243 67.329	28.729 71.8	40.5 85.271	44.886 89.757	70.125 112.2
0.075	3.773 25.12	8.48 37.693	10.467 41.88	15.08 50.267	23.56 62.84	26.813 67.013	37.8 79.587	41.893 83.773	65.45 104.72
0.08	3.538 23.55	7.95 35.338	9.813 39.263	14.138 47.125	22.088 58.913	25.138 62.825	35.438 74.613	39.275 78.538	61.359 98.175
0.09	3.144 20.933	7.067 31.411	8.722 34.9	12.567 41.889	19.633 52.367	22.344 55.844	31.5 66.322	34.911 69.811	54.542 87.266
0.10	2.83 18.84	6.36 28.27	7.85 31.41	11.31 37.7	17.67 47.13	20.11 50.26	28.35 59.69	31.42 62.83	49.087 78.54

ตาราง ผ-2 (ต่อ)

S m	A_s cm²/m $\sum O$ cm/m สำหรับเหล็กขนาดต่างๆ								
	RB 6 mm	RB 9 mm -	- DB 10 mm	RB 12 mm DB 12 mm	RB 15 mm -	- DB 16 mm	RB 19 mm -	- DB 20 mm	RB 25 mm DB 25 mm
0.11	2.573 17.127	5.782 25.7	7.136 28.555	10.282 34.273	16.064 42.845	18.282 45.691	25.773 54.264	28.564 57.118	44.625 71.4
0.12	2.358 15.7	5.3 23.558	6.542 26.175	9.425 31.417	14.725 39.275	16.758 41.883	23.625 49.742	26.183 52.358	40.906 65.45
0.125	2.264 15.072	5.088 22.616	6.28 25.128	9.048 30.16	14.136 37.704	16.088 40.208	22.68 47.752	25.136 50.264	39.27 62.832
0.13	2.177 14.492	4.892 21.746	6.038 24.162	8.7 29	13.592 36.254	15.469 38.662	21.808 45.915	24.169 48.331	37.76 60.415
0.14	2.021 13.457	4.543 20.193	5.607 22.436	8.079 26.929	12.621 33.664	14.364 35.9	20.25 42.636	22.443 44.879	35.062 56.1
0.15	1.887 12.56	4.24 18.847	5.233 20.94	7.54 25.133	11.78 31.42	13.407 33.507	18.9 39.793	20.947 41.887	32.725 52.36
0.16	1.769 11.775	3.975 17.669	4.906 19.631	7.069 23.563	11.044 29.456	12.569 31.413	17.719 37.306	19.638 39.269	30.68 49.087
0.17	1.665 11.082	3.741 16.629	4.618 18.476	6.653 22.176	10.394 27.724	11.829 29.565	16.676 35.112	18.482 36.959	28.875 46.2
0.175	1.617 10.766	3.634 16.154	4.486 17.948	6.463 21.543	10.097 26.931	11.491 28.72	16.2 34.109	17.954 35.903	28.05 44.88
0.18	1.572 10.467	3.533 15.706	4.361 17.45	6.283 20.944	9.817 26.183	11.172 27.922	15.75 33.161	17.456 34.906	27.271 43.633
0.19	1.489 9.916	3.347 14.879	4.132 16.532	5.953 19.842	9.3 24.805	10.584 26.453	14.921 31.416	16.537 33.068	25.835 41.337
0.20	1.415 9.42	3.18 14.135	3.925 15.705	5.655 18.85	8.835 23.565	10.055 25.13	14.175 29.845	15.71 31.415	24.544 39.27
0.21	1.348 8.971	3.029 13.462	3.738 14.957	5.386 17.9521	8.414 22.443	9.576 23.933	13.5 28.424	14.962 29.919	23.375 37.4
0.22	1.286 8.564	2.891 12.85	3.568 14.277	5.141 17.136	8.032 21.423	9.141 22.845	12.886 27.132	14.282 28.559	22.312 35.7
0.225	1.258 8.373	2.827 12.564	3.489 13.96	5.027 16.756	7.853 20.947	8.938 22.338	12.6 26.529	13.964 27.924	21.817 34.907
0.23	1.23 8.191	2.765 12.291	3.413 13.656	4.917 16.391	7.683 20.491	8.743 21.852	12.326 25.952	13.661 27.317	21.342 34.148
0.24	1.179 7.85	2.65 11.779	3.271 13.088	4.713 15.708	7.363 19.638	8.379 20.942	11.813 24.871	13.092 26.179	20.453 32.725
0.25	1.132 7.536	2.544 11.308	3.14 12.564	4.524 15.08	7.068 18.852	8.044 20.104	11.34 23.876	12.568 25.132	19.635 31.416

ตาราง ผ-2 (ต่อ)

S m	A_s cm^2/m $\sum O$ cm/m สำหรับเหล็กขนาดต่างๆ								
	RB 6 mm	RB 9 mm -	- DB 10 mm	RB 12 mm DB 12 mm	RB 15 mm -	- DB 16 mm	RB 19 mm -	- DB 20 mm	RB 25 mm DB 25 mm
0.26	1.088 7.246	2.446 10.873	3.019 12.081	4.35 14.5	6.796 18.127	7.735 19.331	10.904 22.958	12.085 24.165	18.88 30.208
0.27	1.048 6.978	2.356 10.47	2.907 11.633	4.189 13.963	6.544 17.456	7.448 18.615	10.5 22.107	11.637 23.27	18.181 29.089
0.275	1.029 6.851	2.313 10.28	2.855 11.422	4.113 13.709	6.425 17.138	7.313 18.276	10.309 21.705	11.425 22.847	17.85 28.56
0.28	1.011 6.728	2.271 10.096	2.804 11.218	4.039 13.464	6.311 16.832	7.182 17.95	10.125 21.318	11.221 22.439	17.531 28.05
0.29	0.976 6.497	2.193 9.748	2.707 10.831	3.9 13	6.093 16.252	6.934 17.331	9.776 20.583	10.834 21.666	16.927 27.083
0.30	0.943 6.28	2.12 9.423	2.617 10.47	3.77 12.567	5.89 15.71	6.703 16.753	9.45 19.897	10.473 20.943	16.362 26.18
0.31	0.913 6.077	2.052 9.119	2.532 10.132	3.648 12.161	5.7 15.203	6.487 16.213	9.145 19.255	10.135 20.268	15.835 25.335
0.32	0.884 5.888	1.988 8.834	2.453 9.816	3.534 11.781	5.522 14.728	6.284 15.706	8.859 18.653	9.819 19.634	15.34 24.544
0.325	0.871 5.797	1.957 8.698	2.415 9.665	3.48 11.6	5.437 14.502	6.188 15.465	8.723 18.366	9.668 19.332	15.104 24.166
0.33	0.858 5.709	1.927 8.567	2.379 9.518	3.427 11.424	5.355 14.282	6.094 15.23	8.591 18.088	9.521 19.039	14.875 23.8
0.34	0.832 5.541	1.871 8.315	2.309 9.238	3.326 11.088	5.197 13.862	5.915 14.782	8.338 17.556	9.241 18.479	14.437 23.1
0.35	0.809 5.383	1.817 8.077	2.243 8.974	3.231 10.771	5.049 13.266	5.746 14.36	8.1 17.054	8.977 17.951	14.025 22.44
0.36	0.786 5.233	1.767 7.853	2.181 8.725	3.142 10.472	4.908 13.092	5.586 13.961	7.875 16.581	8.728 17.453	13.635 21.817
0.37	0.765 5.092	1.719 7.641	2.122 8.489	3.057 10.189	4.776 12.738	5.435 13.584	7.662 16.132	8.492 16.981	13.267 21.227
0.38	0.745 4.958	1.674 7.439	2.066 8.266	2.976 9.921	4.65 12.403	5.292 13.226	7.461 15.708	8.268 16.534	12.918 20.668
0.39	0.726 4.831	1.631 7.249	2.013 8.054	2.9 9.667	4.531 12.085	5.156 12.887	7.269 15.305	8.056 16.11	12.587 20.138
0.40	0.708 4.71	1.59 7.068	1.963 7.853	2.828 9.425	4.418 11.783	5.028 12.565	7.088 14.923	7.855 15.708	12.272 19.635
0.41	0.69 4.595	1.551 6.895	1.915 7.661	2.759 9.195	4.31 11.495	4.905 12.259	6.915 14.559	7.663 15.324	11.973 19.156

ตาราง ผ-2 (ต่อ)

S m	A_s cm^2/m $\sum O$ cm/m สำหรับเหล็กขนาดต่างๆ								
	RB 6 mm	RB 9 mm -	- DB 10 mm	RB 12 mm DB 12 mm	RB 15 mm -	- DB 16 mm	RB 19 mm -	- DB 20 mm	RB 25 mm DB 25 mm
0.42	0.694 4.486	1.514 6.731	1.869 7.479	2.693 8.976	4.207 11.221	4.788 11.967	6.75 14.212	7.481 14.96	11.687 18.7
0.425	0.666 4.433	1.496 6.652	1.847 7.391	2.661 8.871	4.158 11.089	4.732 11.826	6.671 14.212	7.393 14.784	11.55 18.48
0.43	0.658 4.381	1.479 6.574	1.826 7.305	2.63 8.767	4.109 10.96	4.677 11.688	6.593 13.881	7.307 14.612	11.416 18.265
0.44	0.643 4.282	1.445 6.425	1.784 7.139	2.57 8.568	4.016 10.711	4.57 11.423	6.443 13.566	7.141 14.28	11.156 17.85
0.45	0.629 4.187	1.413 6.282	1.744 6.98	2.513 8.378	3.927 10.473	4.469 11.169	6.3 13.264	6.982 13.962	10.908 17.453

คำอธิบายตาราง ผ-3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้

กำหนดให้ $u =$ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้, $kg/cm^2 = ksc$

$f_c' =$ กำลังอัดประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานอายุ 28 วัน , $kg/cm^2 = ksc$

$d_b =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม, cm

เหล็กบนรับแรงดึง (เหล็กบน = เหล็กที่มีคอนกรีตอยู่ใต้ผิวเหล็กอย่างน้อย 30 cm)

เส้นกลมผิวเรียบ $u = 1.145\dfrac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 11.0$ ksc

ข้ออ้อย $u = 2.29\dfrac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 25.0$ ksc

เหล็กอื่นที่ไม่ใช่เหล็กบน เช่นเหล็กฐานราก

เส้นกลมผิวเรียบ $u = 1.615\dfrac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 11.0$ ksc

ข้ออ้อย $u = 3.23\dfrac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \le 35.0$ ksc

ตาราง ผ-3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ของคอนกรีต (เหล็กบนรับแรงดึง)

f_c'	ขนาดเหล็ก, mm											
ksc	RB 6 -	RB 9 -	- DB 10	RB 12 DB 12	RB 15 -	- DB 16	RB 19 -	- DB 20	RB 25 DB 25	- DB 28	- DB 32	- DB 36
100	11.0 -	11.0 -	- 22.9	9.542 19.083	7.633 -	- 14.313	6.026 -	- 11.45	4.58 9.16	- 8.179	- 7.156	- 6.361
120	11.0 -	11.0 -	- 25.0	10.452 20.905	8.362 -	- 15.679	6.601 -	- 12.543	5.017 10.034	- 8.959	- 7.839	- 6.968
150	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 23.372	9.349 -	- 17.529	7.381 -	- 14.023	5.609 11.219	- 10.017	- 8.765	- 7.791
180	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	9.349 -	- 19.202	8.085 -	- 15.362	6.145 12.289	- 10.973	- 9.601	- 8.534
200	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	10.795 -	- 20.241	8.522 -	- 16.193	6.477 12.594	- 11.566	- 10.12	- 8.996
210	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 20.741	8.733 -	- 16.593	6.637 13.274	- 11.852	- 10.37	- 9.218
240	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 22.173	9.336 -	- 17.738	7.095 14.191	- 12.67	- 11.086	- 9.855
250	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 22.63	9.528 -	- 18.104	7.242 14.483	- 12.931	- 11.315	- 10.058
280	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 23.949	10.084 -	- 19.16	7.664 15.328	- 13.685	- 16.733	- 10.644
320	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 25.0	10.78 -	- 20.482	8.193 16.386	- 14.63	- 12.801	- 11.379
350	11.0 -	11.0 -	- 25.0	11.0 25.0	11.0 -	- 25.0	11.0 -	- 21.421	8.568 17.137	- 15.301	- 13.388	- 11.901

ตาราง ผ-3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ของคอนกรีต (เหล็กอื่นรับแรงดึง)

f_c'	ขนาดเหล็ก, mm											
ksc	RB 6	RB 9	-	RB 12	RB 15	-	RB 19	-	RB 25	-	-	-
	-	-	DB 10	DB 12	-	DB 16	-	DB 20	DB 25	DB 28	DB 32	DB 36
100	11.0	11.0	-	11.0	10.767	-	8.5	-	6.46	-	-	-
	-	-	32.3	26.917	-	20.188	-	16.15	12.92	11.536	10.094	8.972
120	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	9.311	-	7.077	-	-	-
	-	-	35.0	29.486	-	22.114	-	17.691	14.153	12.637	11.057	9.829
150	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	10.41	-	7.912	-	-	-
	-	-	35.0	32.966	-	24.725	-	19.78	15.824	14.128	12.362	10.989
180	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	8.667	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	27.084	-	21.667	17.334	15.477	13.542	12.037
200	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	9.136	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	28.549	-	22.84	18.272	16.314	14.275	12.689
210	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	9.361	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	29.254	-	23.404	18.723	16.717	14.627	13.002
240	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	10.008	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	31.274	-	25.019	20.016	17.871	15.637	13.9
250	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	10.214	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	31.919	-	25.535	20.428	18.24	15.96	14.186
280	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	10.81	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	33.78	-	27.024	21.619	19.303	16.89	15.013
320	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	11.0	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	35.0	-	28.89	23.112	20.636	18.056	16.05
350	11.0	11.0	-	11.0	11.0	-	11.0	-	11.0	-	-	-
	-	-	35.0	35.0	-	35.0	-	30.214	24.171	21.581	18.884	16.785

คำอธิบายตาราง ผ-4 ระยะฝังและระยะทาบของเหล็กเสริม

วิธีหน่วยแรงใช้งาน

$$L_d = \frac{d_b f_s}{4u}$$

L_d = ระยะทาบและระยะฝังของเหล็กเสริม, cm

เส้นกลมเรียบ $L_d \geq 60$ cm

ข้ออ้อย $L_d \geq 30$ cm

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก, cm

$f_s = 0.5f_y$ = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม $\leq 1{,}200$ ksc เส้นกลมผิวเรียบ และ $\leq 1{,}700$ ksc ข้ออ้อย ในตาราง ผ-3 ใช้ $f_s = 1200$ ksc สำหรับเหล็กผิวเรียบ และ $f_s = 1500$ ksc สำหรับเหล็กข้ออ้อย

u = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ (ตามตาราง ผ-3)

สำหรับเหล็กขนาด 25 mm ขึ้นไป ควรใช้ตัวต่อทางกล (coupler) ที่เป็นกระบอกเกลียวใน ส่วนเหล็กเสริมจะทำปลายให้อ้วนขึ้นและทำเกลียวนอกโดยร่องเกลียวโตกว่าข้ออ้อย ทำให้สามารถหมุนผ่านข้ออ้อยแล้วยึดได้อย่างแข็งแรง หากทดสอบดึงจะขาดจุดอื่นไม่ใช่ตรงจุดต่อ ปัจจุบันนิยมต่อด้วยตัวต่อทางกลตั้งแต่ขนาด 16 mm ขึ้นไป

วิธีกำลัง

เหล็กข้ออ้อยรับแรงดึง ใช้กับเหล็กขนาด $d_b \leq 36$ mm

$$\ell_{db} = 0.06A_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \geq 30 \text{ cm}$$

เหล็กข้ออ้อยรับแรงอัด

$$\ell_{db} = 0.075d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \geq 0.0043d_b f_y \leq 20 \text{ cm}$$

เมื่อ ℓ_{db} = ระยะฝังยึดพื้นฐาน, cm

$f_c' \leq 700$ ksc = กำลังทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน

$f_y \leq 5{,}600$ ksc = กำลังครากของเหล็กเสริม

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม, cm

$A_b = \frac{\pi}{4}d_b^2$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก 1 เส้น, cm^2

ตาราง ผ-4 ระยะฝังและระยะทาบของเหล็กเสริมวิธีหน่วยแรงใช้งาน

f_c'	ขนาดเหล็ก , mm								
ksc	RB 6 mm	RB 9 mm	-	RB 12 mm	RB 15 mm	-	RB 19 mm	-	RB 25 mm
	-	-	DB 10 mm	DB 12 mm	-	DB 16 mm	-	DB 20 mm	DB 25 mm
100	60	60	-	60	60	-	95	-	163.8
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(67)	-	(116.1)
	-	-	30	30	-	40	-	65.5	102.3
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(46.4)	(72.56)
120	60	60	-	60	60	-	86.35	-	149.5
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(61.22)	-	(105.98)
	-	-	30	30	-	38.3	-	65.5	93.43
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(46.44)	(66.24)
150	60	60	-	60	60	-	77.22	-	133.71
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(94.79)
	-	-	30	30	-	34.22	-	53.48	83.56
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(37.92)	(59.25)
180	60	60	-	60	60	-	70.5	-	122.05
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(86.54)
	-	-	30	30	-	31.25	-	48.82	76.29
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(34.61)	(54.08)
200	60	60	-	60	60	-	66.89	-	115.79
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(82.09)
	-	-	30	30	-	30	-	46.32	74.44
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(32.84)	(51.31)
210	60	60	-	60	60	-	65.27	-	113
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(80.12)
	-	-	30	30	-	30	-	45.2	70.63
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(32.05)	(50.07)
240	60	60	-	60	60	-	61.05	-	105.71
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(74.94)
	-	-	30	30	-	30	-	42.28	66.06
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(30)	(46.84)
250	60	60	-	60	60	-	60	-	103.56
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(73.43)
	-	-	30	30	-	30	-	41.43	64.73
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(30)	(45.89)
280	60	60	-	60	60	-	60	-	97.86
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(69.38)
	-	-	30	30	-	30	-	39.14	61.16
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(30)	(43.36)

หมายเหตุ ค่านอกวงเล็บสำหรับเหล็กบน และค่าในวงเล็บสำหรับเหล็กอื่น

ตาราง ผ-4 ระยะฝังและระยะทาบของเหล็กเสริมวิธีหน่วยแรงใช้งาน

f_c'	ขนาดเหล็ก , mm								
ksc	RB 6 mm	RB 9 mm	-	RB 12 mm	RB 15 mm	-	RB 19 mm	-	RB 25 mm
	-	-	DB 10 mm	DB 12 mm	-	DB 16 mm	-	DB 20 mm	DB 25 mm
320	60	60	-	60	60	-	60	-	91.54
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(68.18)
	-	-	30	30	-	30	-	36.62	57.21
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(30)	(40.56)
350	60	60	-	60	60	-	60	-	87.54
	(60)	(60)	-	(60)	(60)	-	(60)	-	(68.18)
	-	-	30	30	-	30	-	35.01	54.71
	-	-	(30)	(30)	-	(30)	-	(30)	(38.79)

หมายเหตุ ค่านอกวงเล็บสำหรับเหล็กบน และค่าในวงเล็บสำหรับเหล็กอื่น

คำอธิบายตารางที่ ผ-5 หน่วยแรงที่ยอมให้

อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c'}}$

โมเมนต์ดัด หน่วยแรงอัดที่ผิวตามมาตรฐาน ว.ส.ท. $f_{c1} = 0.45f_c'$

โมเมนต์ดัด หน่วยแรงอัดที่ผิวตามกฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 $f_{c2} = 0.375f_c' \le 65$ ksc

โมเมนต์ดัด หน่วยแรงดึงที่ผิวฐานรากและกำแพงคอนกรีตล้วน $f_{ct} = 0.42\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน คานคอนกรีตล้วน หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ที่คอนกรีตรับได้ $v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน ตงคอนกรีตล้วน หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ที่คอนกรีตรับได้ $v_{cj} = 0.32\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน หน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้เมื่อมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน $v_{cT} = 1.32\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้จากผลของแรงบิด $v_{ctor} = 1.32\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ทั้งหมดรวมผลของแรงบิด $v_{ctotal} = 1.65\sqrt{f_c'}$

แรงเฉือน หน่วยแรงเฉือนแบบเจาะทะลุสำหรับพื้นและฐานราก $v_{cp} = 0.53\sqrt{f_c'}$

แรงกด หน่วยแรงกดที่เกิดขึ้นเต็มพื้นที่ (เช่นหัวเสาเข็ม) $v_{cbar1} = 0.25f_c'$

แรงกด หน่วยแรงกดที่เกิดขึ้นหนึ่งในสามของเนื้อที่หรือน้อยกว่า (เช่นท้องฐานราก) $v_{cbar2} = 0.37f_c'$

ตารางที่ ผ-5 หน่วยแรงที่ยอมให้

รายการ	กำลังประลัยของคอนกรีต f_c', ksc										
	100	120	150	180	200	210	240	250	280	320	350
n	13.509	12.333	11.031	10.07	9.553	9.323	8.721	8.544	8.074	7.552	7.221
f_{c1}	45	54	67.5	81	90	94.5	108	112.5	126	144	157.5
f_{c2}	37.5	45	56.25	65	65	65	65	65	65	65	65
f_{ct}	4.2	4.6	5.144	5.635	5.94	6.086	6.507	6.641	7.028	7.513	7.857
v_{cb}	2.9	3.177	3.552	3.891	4.101	4.202	4.493	4.585	4.853	5.188	5.425
v_{cj}	3.2	3.505	3.919	4.293	4.525	4.637	4.957	5.06	5.355	5.724	5.987
v_{cT}	13.2	14.46	16.167	17.71	18.668	19.129	20.449	20.871	22.088	23.613	24.695
v_{ctor}	13.2	14.46	16.167	17.71	18.668	19.129	20.449	20.871	22.088	23.613	24.695
v_{ctotal}	16.5	18.075	20.208	22.137	23.335	23.911	25.562	26.089	27.61	29.516	30.869
v_{cp}	5.3	5.806	6.491	7.111	7.495	7.68	8.211	8.38	8.869	9.481	9.915
v_{cbar1}	25	30	37.5	45	50	52.5	60	62.5	70	80	87.5
v_{cbar2}	37	44.4	55.5	66.6	74	77.7	88.8	92.5	103.6	118.4	129.5

คำอธิบายตาราง ผ-6 กำลังของหน้าตัดคานขนาดต่างๆ

ในการออกแบบในประเทศไทยที่ยังคงใช้กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 ที่จำกัดเรื่องกำลังในคอนกรีต และร่วมกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ว.ส.ท. โดยเฉพาะอย่างยิ่งความกว้างคานไม่ควรน้อยกว่า 20 cm เพื่อที่จะให้คานที่มาฝากนั้นเหล็กรับแรงดึงในคานฝากสามารถฝังเข้าไปในคานรับฝากได้ไม่น้อยกว่า 15 cm รวมทั้งในมาตรฐาน UBC 1997 สำหรับคานหลักในโครงสร้างที่ต้องรับแผ่นดินไหวนั้นต้องมีความกว้างอย่างน้อย 30 cm พารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นมีดังนี้

$f_c' = 173$ ksc กำลังประลัยตัวอย่างมาตรฐานทรงกระบอกคอนกรีต

$f_c = 0.375 f_c' = 0.375 \times 173 = 64.875$ ksc < 65 ksc กำลังดัดที่ยอมให้

$f_y = 3{,}000$ ksc = กำลังครากของเหล็กข้ออ้อยที่มีการใช้งานมากที่สุด

$f_s = 0.5 f_y = 0.5 \times 3{,}000 = 1{,}500$ ksc = กำลังที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2{,}040{,}000}{15{,}100\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{f_c'}} = \frac{135.099}{\sqrt{173}} = 10.271$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}500}{10.271 \times 64.875}} = 0.308$$

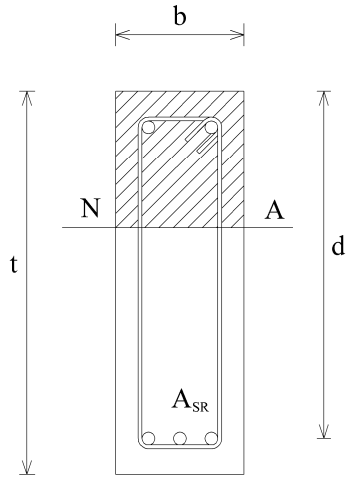
$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.308}{3} = 0.897$$

$$R = \frac{1}{2} f_c kj = \frac{1}{2} \times 64.875 \times 0.308 \times 0.897 = 8.962 \text{ ksc}$$

$$v_{cb} = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{173} = 3.814 \text{ ksc}$$

$$v_{ctor} = 1.32\sqrt{f_c'} = 1.32\sqrt{173} = 17.362 \text{ ksc}$$

$v_{ctotal} = 1.65\sqrt{f_c'} = 1.65\sqrt{173} = 21.702 \ \ ksc$



คานหน้าตัดกว้าง b cm ลึก t cm กำลังรับโมเมนต์ดัดบวก เหล็กรับแรงดึงอยู่ล่าง เหล็กรับแรงอัดอยู่บน แกนสะเทิน NA พื้นที่แรเงารับแรงอัด ระยะหุ้มของคอนกรีตทางซ้ายและขวา 3.5 cm บนและล่าง 4 cm ประมาณขนาดเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือน d_{bs} ขนาดเหล็กเสริม d_b จำนวนชั้นเหล็กเสริม โดยระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 cm

สมมติเหล็กรับแรงดึงมีหนึ่งชั้น ความลึกประสิทธิผลซึ่งคือระยะจากผิวรับแรงอัดถึงเซนทรอยด์ของเหล็กรับแรงดึงหาได้จาก

$$d = t - 4 - d_{bs} - \frac{d_b}{2}$$

ความลึกของเหล็กรับแรงอัดจากผิวรับแรงอัดหาได้จาก

$$d' = 4 + d_{bs} + \frac{d_b}{2}$$

ในตาราง ผ-6 จะใช้ $d_{bs} = 9 \ \ mm = 0.9 \ \ cm$ และ $d_b = 20 \ \ mm = 2 \ \ cm$ ดังนั้น

$$d = t - 4 - 0.9 - \frac{2.0}{2} = t - 5.9 \ \ cm$$

$$d' = 4 + 0.9 + \frac{2.0}{2} = 5.9 \ \ cm$$

น้ำหนักคาน $w = 2{,}400bt \ \ kg/m$

เมื่อ b และ t มีหน่วยเป็นเมตร

โมเมนต์ดัดสมดุล $M_R = M_c = Rbd^2 \ \ kg \cdot cm$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ $V_c = v_{cb}bd = 0.29\sqrt{f_c'}bd \ \ kg$

เหล็กเสริมที่หน้าตัดสมดุล $A_{SR} = \frac{M_R}{f_s jd} \ \ cm^2$

โมเมนต์บิดที่รับได้ $M_t = \frac{v_{ctor}b^2t}{3.5} = \frac{1.32\sqrt{f_c'}b^2t}{3.5} \ \ kg \cdot cm$

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 14.1 cm					
0.10 × 0.20	48	178.2	0.94	537.8	99.2
0.11 × 0.20	52.8	196	1.03	591.6	120
0.12 × 0.20	57.6	213.8	1.13	645.3	142.9
0.125 × 0.20	60	222.7	1.17	672.2	155
0.13 × 0.20	62.4	231.6	1.22	699.1	167.7
0.14 × 0.20	67.2	249.4	1.31	752.9	194.5
0.15 × 0.20	72	267.3	1.41	806.7	223.2
d = 19.1 cm					
0.10 × 0.25	60	326.9	1.27	728.5	124.0
0.11 × 0.25	66	359.6	1.40	801.3	150.1
0.12 × 0.25	72	392.3	1.53	874.2	178.6
0.125 × 0.25	75	408.7	1.59	910.6	193.8
0.13 × 0.25	78	425	1.65	947	209.6
0.14 × 0.25	84	457.7	1.78	1019.9	243.1
0.15 × 0.25	90	490.4	1.91	1092.7	279.0
0.20 × 0.25	120	653.9	2.54	1456.9	496.1
d = 24.1 cm					
0.10 × 0.30	72	520.5	1.61	919.2	148.8
0.11 × 0.30	79.2	572.6	1.77	1011.1	180.1
0.12 × 0.30	86.4	624.6	1.93	1103	214.3
0.125 × 0.30	90	650.7	2.01	1149	232.5
0.13 × 0.30	93.6	676.7	2.09	1194.9	251.5
0.14 × 0.30	100.8	728.7	2.25	1286.8	291.7
0.15 × 0.30	108	780.8	2.41	1378.8	334.8
0.20 × 0.30	144	1041	3.21	1838.3	595.3
d = 29.1 cm					
0.10 × 0.35	84	758.9	1.94	1109.9	173.6
0.11 × 0.35	92.4	834.8	2.13	1220.9	210.1
0.12 × 0.35	100.8	910.7	2.33	1331.8	250
0.125 × 0.35	105	948.6	2.42	1387.3	271.3
0.13 × 0.35	109.2	986.6	2.52	1442.8	293.4
0.14 × 0.35	117.6	1062.5	2.71	1553.8	340.3
0.15 × 0.35	126	1138.4	2.91	1664.8	390.6
0.20 × 0.35	168	1517.8	3.88	2219.7	694.5

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 34.1 cm					
0.10 × 0.40	96	1042.1	2.27	1300.6	198.4
0.11 × 0.40	105.6	1146.3	2.50	1430.6	240.1
0.12 × 0.40	115.2	1250.5	2.73	1560.7	285.7
0.125 × 0.40	120	1302.6	2.84	1625.7	310
0.13 × 0.40	124.8	1354.7	2.95	1690.7	335.3
0.14 × 0.40	134.4	1459	3.18	1820.8	388.9
0.15 × 0.40	144	1563.2	3.41	1950.9	446.5
0.20 × 0.40	192	2084.2	4.54	2601.1	793.7
0.25 × 0.40	240	2605.3	5.68	3251.4	1240.1
d = 39.1 cm					
0.10 × 0.45	108	1370.1	2.60	1491.3	223.2
0.11 × 0.45	118.8	1507.1	2.86	1640.4	270.1
0.12 × 0.45	129.6	1644.1	3.13	1789.5	321.4
0.125 × 0.45	135	1712.6	3.26	1864.1	348.8
0.13 × 0.45	140.4	1781.2	3.39	1938.7	377.3
0.14 × 0.45	151.2	1918.2	3.65	2087.8	437.5
0.15 × 0.45	162	2055.2	3.91	2236.9	502.3
0.20 × 0.45	216	2740.2	5.21	2982.5	892.9
0.25 × 0.45	270	3425.3	6.51	3728.2	1395.2
d = 44.1 cm					
0.10 × 0.50	120	1742.9	2.94	1682	248
0.11 × 0.50	132	1917.2	3.23	1850.2	300.1
0.12 × 0.50	144	2091.5	3.52	2018.4	357.2
0.125 × 0.50	150	2178.7	3.67	2102.5	387.5
0.13 × 0.50	156	2265.8	3.82	2186.6	419.2
0.14 × 0.50	168	2440.1	4.11	2354.8	486.1
0.15 × 0.50	180	2614.4	4.41	2523	558.1
0.20 × 0.50	240	3485.9	5.87	3363.9	992.1
0.25 × 0.50	300	4357.3	7.34	4204.9	1550.2
0.30 × 0.50	360	5228.8	8.81	5045.9	2232.3

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 49.1 cm					
0.10 × 0.55	132	2160.6	3.27	1872.7	272.8
0.11 × 0.55	145.2	2376.6	3.60	2059.9	330.1
0.12 × 0.55	158.4	2592.7	3.92	2247.2	392.9
0.125 × 0.55	165	2700.7	4.09	2340.8	426.3
0.13 × 0.55	171.6	2808.7	4.25	2434.5	461.1
0.14 × 0.55	184.8	3024.8	4.58	2621.7	534.7
0.15 × 0.55	198	3240.9	4.91	2809.0	613.9
0.20 × 0.55	264	4321.1	6.54	3745.3	1091.3
0.25 × 0.55	330	5401.4	8.18	4681.7	1705.2
0.30 × 0.55	396	6481.7	9.81	5618.0	2455.5
d = 54.1 cm					
0.10 × 0.60	144	2623.0	3.60	2063.4	297.6
0.11 × 0.60	158.4	2885.3	3.96	2269.7	360.1
0.12 × 0.60	172.8	3147.6	4.32	2476.0	428.6
0.125 × 0.60	180	3278.8	4.50	2579.2	465.1
0.13 × 0.60	187.2	3409.9	4.68	2682.4	503.0
0.14 × 0.60	201.6	3672.2	5.04	2888.7	583.4
0.15 × 0.60	216	3934.5	5.41	3095.1	669.7
0.20 × 0.60	288	5246.0	7.21	4126.7	1190.5
0.25 × 0.60	360	6557.5	9.01	5158.4	1860.2
0.30 × 0.60	432	7869.0	10.81	6190.1	2678.7
d = 59.1 cm					
0.10 × 0.65	156	3130.3	3.94	2254.1	322.4
0.11 × 0.65	171.6	3443.3	4.33	2479.5	390.1
0.12 × 0.65	187.2	3756.3	4.72	2704.9	464.3
0.125 × 0.65	195	3912.8	4.92	2817.6	503.8
0.13 × 0.65	202.8	4069.3	5.12	2930.3	544.9
0.14 × 0.65	218.4	4382.4	5.51	3155.7	632.0
0.15 × 0.65	234	4695.4	5.90	3381.1	725.5
0.20 × 0.65	312	6260.5	7.87	4508.1	1289.7
0.25 × 0.65	390	7825.6	9.84	5635.2	2015.2
0.30 × 0.65	468	9390.8	11.81	6762.2	2901.9

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 64.1 cm					
0.10 × 0.70	168	3682.3	4.27	2444.8	347.2
0.11 × 0.70	184.8	4050.5	4.70	2689.3	420.2
0.12 × 0.70	201.6	4418.8	5.12	2933.7	500.0
0.125 × 0.70	210	4602.9	5.34	3056.0	542.6
0.13 × 0.70	218.4	4787.0	5.55	3178.2	586.8
0.14 × 0.70	235.2	5155.2	5.98	3422.7	680.6
0.15 × 0.70	252	5523.5	6.40	3667.2	781.3
0.20 × 0.70	336	7364.6	8.54	4889.5	1389.0
0.25 × 0.70	420	9205.8	10.67	6111.9	2170.3
0.30 × 0.70	504	11046.9	12.81	7334.3	3125.2
0.35 × 0.70	588	12888.1	14.94	8556.7	4253.7
d = 69.1 cm					
0.10 × 0.75	180	4279.2	4.60	2635.5	372.0
0.11 × 0.75	198	4707.1	5.06	2899.0	450.2
0.12 × 0.75	216	5135.0	5.52	3162.6	535.7
0.125 × 0.75	225	5349.0	5.75	3294.3	581.3
0.13 × 0.75	234	5562.9	5.98	3426.1	628.8
0.14 × 0.75	252	5990.9	6.44	3689.7	729.2
0.15 × 0.75	270	6418.8	6.90	3953.2	837.1
0.20 × 0.75	360	8558.4	9.21	5270.9	1488.2
0.25 × 0.75	450	10698.0	11.51	6588.7	2325.3
0.30 × 0.75	540	12837.6	13.81	7906.4	3348.4
0.35 × 0.75	630	14977.1	16.11	9224.2	4557.5
0.40 × 0.75	720	17116.7	18.41	10541.9	5952.7
d = 74.1 cm					
0.10 × 0.80	192	4920.9	4.94	2826.2	396.8
0.11 × 0.80	211.2	5413.0	5.43	3108.8	480.2
0.12 × 0.80	230.4	5905.0	5.92	3391.4	571.5
0.125 × 0.80	240	6151.1	6.17	3532.7	620.1
0.13 × 0.80	249.6	6397.1	6.42	3674.0	670.7
0.14 × 0.80	268.8	6889.2	6.91	3956.6	777.8
0.15 × 0.80	288	7381.3	7.40	4239.3	892.9
0.20 × 0.80	384	9841.7	9.87	5652.3	1587.4
0.25 × 0.80	480	12302.2	12.34	7065.4	2480.3
0.30 × 0.80	576	14762.6	14.81	8478.5	3571.6
0.35 × 0.80	672	17223.0	17.27	9891.6	4861.4
0.40 × 0.80	768	19683.5	19.74	11304.7	6349.5

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 84.1 cm					
0.10 × 0.90	216	6338.7	5.60	3207.6	446.5
0.15 × 0.90	324	9508.0	8.40	4811.4	1004.5
0.20 × 0.90	432	12677.3	11.20	6415.1	1785.8
0.25 × 0.90	540	15846.6	14.00	8018.9	2790.3
0.30 × 0.90	648	19016.0	16.80	9622.7	4018.1
0.35 × 0.90	756	22185.3	19.61	11226.5	5469.0
0.40 × 0.90	864	25354.6	22.41	12830.3	7143.2
0.45 × 0.90	972	28523.9	25.21	14434.1	9040.6
0.50 × 0.90	1080	31693.3	28.01	16037.9	11161.3
0.55 × 0.90	1188	34862.6	30.81	17641.7	13505.2
0.60 × 0.90	1296	38031.9	33.61	19245.4	16072.3
d = 94.1 cm					
0.10 × 1.00	240	7935.7	6.27	3589.0	496.1
0.15 × 1.00	360	11903.5	9.40	5383.5	1116.1
0.20 × 1.00	480	15871.4	12.54	7177.9	1984.2
0.25 × 1.00	600	19839.2	15.67	8972.4	3100.4
0.30 × 1.00	720	23807.0	18.80	10766.9	4464.5
0.35 × 1.00	840	27774.9	21.94	12561.4	6076.7
0.40 × 1.00	960	31742.7	25.07	14355.9	7936.9
0.45 × 1.00	1080	35710.6	28.20	16150.4	10045.2
0.50 × 1.00	1200	39678.4	31.34	17944.9	12401.4
0.55 × 1.00	1320	43646.2	34.47	19739.4	15005.7
0.60 × 1.00	1440	47614.1	37.61	21533.8	17858.1
d = 104.1 cm					
0.10 × 1.10	264	9711.9	6.93	3970.4	545.7
0.15 × 1.10	396	14567.9	10.40	5955.6	1227.7
0.20 × 1.10	528	19423.9	13.87	7940.7	2182.7
0.25 × 1.10	660	24279.9	17.33	9925.9	3410.4
0.30 × 1.10	792	29135.8	20.80	11911.1	4911.0
0.35 × 1.10	924	33991.8	24.27	13896.3	6684.4
0.40 × 1.10	1056	38847.8	27.74	15881.5	8730.6
0.45 × 1.10	1188	43703.8	31.20	17866.7	11049.7
0.50 × 1.10	1320	48559.7	34.67	19851.9	13641.6
0.55 × 1.10	1452	53415.7	38.14	21837.1	16506.3
0.60 × 1.10	1584	58271.7	41.60	23822.2	19643.9

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 114.1 cm					
0.15 × 1.20	432	17501.2	11.40	6527.7	1339.4
0.20 × 1.20	576	23334.9	15.20	8703.5	2381.1
0.25 × 1.20	720	29168.6	19.00	10879.4	3720.4
0.30 × 1.20	864	35002.4	22.80	13055.3	5357.4
0.35 × 1.20	1008	40836.1	26.60	15231.2	7292.0
0.40 × 1.20	1152	46669.8	30.40	17407.1	9524.3
0.45 × 1.20	1296	52503.6	34.20	19583.0	12054.2
0.50 × 1.20	1440	58337.3	38.00	21758.9	14881.7
0.55 × 1.20	1584	64171.0	41.80	23934.8	18006.9
0.60 × 1.20	1728	70004.7	45.60	26110.6	21429.7
d = 124.1 cm					
0.15 × 1.30	468	20703.3	12.40	7099.8	1451.0
0.20 × 1.30	624	27604.4	16.53	9466.3	2579.5
0.25 × 1.30	780	34505.5	20.66	11832.9	4030.5
0.30 × 1.30	936	41406.6	24.80	14199.5	5803.9
0.35 × 1.30	1092	48307.7	28.93	16566.1	7899.7
0.40 × 1.30	1248	55208.8	33.06	18932.7	10318.0
0.45 × 1.30	1404	62109.9	37.20	21299.3	13058.7
0.50 × 1.30	1560	69011.0	41.33	23665.9	16121.9
0.55 × 1.30	1716	75912.1	45.46	26032.5	19507.4
0.60 × 1.30	1872	82813.2	49.60	28399.0	23215.5
0.65 × 1.30	2028	89714.3	53.73	30765.6	27245.9
0.70 × 1.30	2184	96615.4	57.86	33132.2	31598.8
d = 134.1 cm					
0.15 × 1.40	504	24174.3	13.40	7671.9	1562.6
0.20 × 1.40	672	32232.4	17.86	10229.1	2777.9
0.25 × 1.40	840	40290.5	22.33	12786.4	4340.5
0.30 × 1.40	1008	48348.6	26.80	15343.7	6250.3
0.35 × 1.40	1176	56406.7	31.26	17901.0	8507.4
0.40 × 1.40	1344	64464.8	35.73	20458.3	11111.7
0.45 × 1.40	1512	72522.9	40.19	23015.6	14063.2
0.50 × 1.40	1680	80581.0	44.66	25572.9	17362.0
0.55 × 1.40	1848	88639.1	49.13	28130.2	21008.0
0.60 × 1.40	2016	96697.2	53.59	30687.4	25001.3
0.65 × 1.40	2184	104755.3	58.06	33244.7	29341.8
0.70 × 1.40	2352	112813.4	62.52	35802.0	34029.5

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 144.1 cm					
0.15 × 1.50	540	27914.1	14.40	8244.0	1674.2
0.20 × 1.50	720	37218.8	19.20	10991.9	2976.3
0.25 × 1.50	900	46523.6	24.00	13739.9	4650.5
0.30 × 1.50	1080	55828.3	28.79	16487.9	6696.8
0.35 × 1.50	1260	65133.0	33.59	19235.9	9115.1
0.40 × 1.50	1440	74437.7	38.39	21983.9	11905.4
0.45 × 1.50	1620	83742.4	43.19	24731.9	15067.7
0.50 × 1.50	1800	93047.1	47.99	27479.9	18602.1
0.55 × 1.50	1980	102351.8	52.79	30227.9	22508.6
0.60 × 1.50	2160	111656.5	57.59	32975.8	26787.1
0.65 × 1.50	2340	120961.2	62.39	35723.8	31437.6
0.70 × 1.50	2520	130266.0	67.19	38471.8	36460.2
d = 154.1 cm					
0.15 × 1.60	576	31922.8	15.40	8816.1	1785.8
0.20 × 1.60	768	42563.8	20.53	11754.7	3174.8
0.25 × 1.60	960	53204.7	25.66	14693.4	4960.6
0.30 × 1.60	1152	63845.7	30.79	17632.1	7143.2
0.35 × 1.60	1344	74486.6	35.92	20570.8	9722.7
0.40 × 1.60	1536	85127.6	41.06	23509.5	12699.1
0.45 × 1.60	1728	95768.5	46.19	26448.2	16072.3
0.50 × 1.60	1920	106409.5	51.32	29386.9	19842.3
0.55 × 1.60	2112	117050.4	56.45	32325.6	24009.2
0.60 × 1.60	2304	127691.3	61.59	35264.2	28572.9
0.65 × 1.60	2496	138332.3	66.72	38202.9	33533.5
0.70 × 1.60	2688	148973.2	71.85	41141.6	38890.9

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 164.1 cm					
0.15 × 1.70	612	36200.4	16.40	9388.2	1897.4
0.20 × 1.70	816	48267.2	21.86	12517.5	3373.2
0.25 × 1.70	1020	60334.0	27.33	15646.9	5270.6
0.30 × 1.70	1224	72400.8	32.79	18776.3	7589.7
0.35 × 1.70	1428	84467.6	38.26	21905.7	10330.4
0.40 × 1.70	1632	96534.4	43.72	25035.1	13492.8
0.45 × 1.70	1836	108601.2	49.19	28164.5	17076.8
0.50 × 1.70	2040	120668.0	54.65	31293.9	21082.4
0.55 × 1.70	2244	132734.8	60.12	34423.3	25509.7
0.60 × 1.70	2448	144801.6	65.58	37552.6	30358.7
0.65 × 1.70	2652	156868.4	71.05	40682.0	35629.3
0.70 × 1.70	2856	168935.2	76.51	43811.4	41321.6
0.80 × 1.70	3264	193068.8	87.44	50070.2	53971.0
0.90 × 1.70	3672	217202.4	98.37	56329.0	68307.1
1.00 × 1.70	4080	241336.0	109.30	62587.7	84329.7
d = 174.1 cm					
0.15 × 1.80	648	40746.8	17.39	9960.3	2009.0
0.20 × 1.80	864	54329.1	23.19	13280.3	3571.6
0.25 × 1.80	1080	67911.4	28.99	16600.4	5580.6
0.30 × 1.80	1296	81493.6	34.79	19920.5	8036.1
0.35 × 1.80	1512	95075.9	40.59	23240.6	10938.1
0.40 × 1.80	1728	108658.2	46.39	26560.7	14286.4
0.45 × 1.80	1944	122240.5	52.18	29880.8	18081.3
0.50 × 1.80	2160	135822.7	57.98	33200.9	22322.6
0.55 × 1.80	2376	149405.0	63.78	36521.0	27010.3
0.60 × 1.80	2592	162987.3	69.58	39841.0	32144.5
0.65 × 1.80	2808	176569.6	75.38	43161.1	37725.1
0.70 × 1.80	3024	190151.8	81.17	46481.2	43752.2
0.80 × 1.80	3456	217316.4	92.77	53121.4	57145.8
0.90 × 1.80	3888	244480.9	104.37	59761.6	72325.1
1.00 × 1.80	4320	271645.5	115.96	66401.7	89290.3

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 184.1 cm					
0.20 × 1.90	912	60749.5	24.52	14043.1	3770.0
0.25 × 1.90	1140	75936.8	30.66	17553.9	5890.7
0.30 × 1.90	1368	91124.2	36.79	21064.7	8482.6
0.35 × 1.90	1596	106311.6	42.92	24575.5	11545.7
0.40 × 1.90	1824	121498.9	49.05	28086.3	15080.1
0.45 × 1.90	2052	136686.3	55.18	31597.1	19085.8
0.50 × 1.90	2280	151873.7	61.31	35107.9	23562.7
0.55 × 1.90	2508	167061.0	67.44	38618.7	28510.9
0.60 × 1.90	2736	182248.4	73.57	42129.4	33930.3
0.65 × 1.90	2964	197435.8	79.71	45640.2	39821.0
0.70 × 1.90	3192	212623.2	85.84	49151.0	46182.9
0.80 × 1.90	3648	242997.9	98.10	56172.6	60320.5
0.90 × 1.90	4104	273372.6	110.36	63194.2	76343.2
1.00 × 1.90	4560	303747.4	122.62	70215.7	94250.9
d = 194.1 cm					
0.20 × 2.00	960	67528.3	25.86	14805.9	3968.5
0.25 × 2.00	1200	84410.4	32.32	18507.4	6200.7
0.30 × 2.00	1440	101292.5	38.79	22208.9	8929.0
0.35 × 2.00	1680	118174.6	45.25	25910.4	12153.4
0.40 × 2.00	1920	135056.7	51.71	29611.9	15873.8
0.45 × 2.00	2160	151938.7	58.18	33313.4	20090.3
0.50 × 2.00	2400	168820.8	64.64	37014.9	24802.9
0.55 × 2.00	2640	185702.9	71.11	40716.4	30011.5
0.60 × 2.00	2880	202585.0	77.57	44417.8	35716.1
0.65 × 2.00	3120	219467.1	84.03	48119.3	41916.8
0.70 × 2.00	3360	236349.2	90.50	51820.8	48613.6
0.80 × 2.00	3840	270113.3	103.43	59223.8	63495.3
0.90 × 2.00	4320	303877.5	116.36	66626.8	80361.3
1.00 × 2.00	4800	337641.6	129.28	74029.7	99211.4

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 240 cm					
0.20 × 2.50	1200	103242.2	31.97	18307.2	4960.6
0.30 × 2.50	1800	154863.4	47.96	27460.8	11161.3
0.40 × 2.50	2400	206484.5	63.94	36614.4	19842.3
0.50 × 2.50	3000	258105.6	79.93	45768.0	31003.6
0.60 × 2.50	3600	309726.7	95.91	54921.6	44645.1
0.70 × 2.50	4200	361347.8	111.90	694075.2	60767.0
0.80 × 2.50	4800	412969.0	127.89	73228.8	79369.1
0.90 × 2.50	5400	464590.1	143.87	82382.4	100451.6
1.00 × 2.50	6000	516211.2	159.86	91536.0	124014.3
1.10 × 2.50	6600	567832.3	175.84	100689.6	150057.3
1.20 × 2.50	7200	619453.4	191.83	109843.2	178580.6
1.30 × 2.50	7800	671074.6	207.81	118996.8	209584.1
1.40 × 2.50	8400	722695.7	223.80	128150.4	243068.0
1.50 × 2.50	9000	774316.8	239.79	137304.0	279032.1
d = 285 cm					
0.20 × 3.00	1440	145587.7	37.97	21739.8	5952.7
0.30 × 3.00	2160	218381.5	56.95	32609.7	13393.5
0.40 × 3.00	2880	291175.4	75.93	43479.6	23810.7
0.50 × 3.00	3600	263969.2	94.92	54349.5	37204.3
0.60 × 3.00	4320	436763.1	113.90	65219.4	53574.2
0.70 × 3.00	5040	509556.9	132.88	76089.3	72920.4
0.80 × 3.00	5760	582350.8	151.86	86959.2	95243.0
0.90 × 3.00	6480	655144.6	170.85	97829.1	120541.9
1.00 × 3.00	7200	727938.5	189.83	108699.0	148817.1
1.10 × 3.00	7920	800732.3	208.81	119568.9	180068.7
1.20 × 3.00	8640	873526.1	227.80	130438.8	214296.7
1.30 × 3.00	9360	946320.0	246.78	141308.7	251501.0
1.40 × 3.00	10080	1019113.8	265.76	152178.6	291681.6
1.50 × 3.00	10800	1091907.7	284.75	163048.5	334838.6

ตาราง ผ-6 สมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$b \times t$ $m \times m$	w kg/m	M_R $kg \cdot m$	A_{SR} cm^2	V_c kg	M_t $kg \cdot m$
d = 335 cm					
0.20 × 3.50	1680	201152.1	44.63	25553.8	6944.8
0.30 × 3.50	2520	301728.1	66.94	38330.7	15625.8
0.40 × 3.50	3360	402304.2	89.25	51107.6	27779.2
0.50 × 3.50	4200	502880.2	111.57	63884.5	43405.0
0.60 × 3.50	5040	603456.3	133.88	76661.4	62503.2
0.70 × 3.50	5880	704032.3	156.19	89438.3	85073.8
0.80 × 3.50	6720	804608.4	178.51	102215.2	111116.8
0.90 × 3.50	7560	905184.4	200.82	114992.1	140632.2
1.00 × 3.50	8400	1005760.5	223.13	127769.0	173620.0
1.10 × 3.50	9240	1106336.5	245.45	140545.9	210080.2
1.20 × 3.50	10080	1206912.5	267.76	153322.8	250012.8
1.30 × 3.50	10920	1307488.6	290.07	166099.7	293417.8
1.40 × 3.50	11760	1408064.6	312.39	178876.6	340295.2
1.50 × 3.50	12600	1508640.7	334.70	191653.5	390645.0
d = 385 cm					
0.20 × 4.00	1920	265678.5	51.29	29,367.8	7,936.9
0.30 × 4.00	2880	398517.7	76.93	44,051.7	17,858.1
0.40 × 4.00	3840	531357.0	102.58	58,735.6	31,747.7
0.50 × 4.00	4800	664196.2	128.22	73,419.5	49,605.7
0.60 × 4.00	5760	797035.5	153.86	88,103.4	71,432.2
0.70 × 4.00	9720	929874.4	179.51	102,787.3	97,227.2
0.80 × 4.00	7680	1062714.0	205.15	117,471.2	126,990.6
0.90 × 4.00	8640	1195553.2	230.79	132,155.1	160,722.5
1.00 × 4.00	9600	1,328,392.5	256.44	146,839.0	198,422.9
1.10 × 4.00	10560	1,461,231.7	282.08	161,522.9	240,091.7
1.20 × 4.00	11520	1,594,070.9	307.73	176,206.8	285,728.9
1.30 × 4.00	12480	1,726,910.2	333.37	190,890.7	335,334.6
1.40 × 4.00	13440	1,859,749.4	359.01	205,574.6	388,908.8
1.50 × 4.00	14400	1,992,588.7	384.66	220,258.5	446,451.4

คำอธิบายตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง

$$V - V_c = \frac{A_v f_v d}{s}$$

เมื่อ $V \le 1.03\sqrt{f_c'}bd =$ แรงเฉือนทั้งหมดที่หน้าตัดวิกฤต (ระยะ d จากขอบที่รองรับ) , kg

$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd =$ แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้, kg

$A_v =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กลูกตั้งสองขา , cm^2

$f_v = 0.5f_y =$ กำลังรับแรงดึงเนื่องจากแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ksc

$f_y \le 4{,}200$ ksc = กำลังครากของเหล็กลูกตั้ง

d = ความลึกประสิทธิผลวัดจากผิวรับแรงอัดถึงเซนทรอยด์เหล็กรับแรงดึง, cm

s = ระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง, cm

ในกรณีที่ $V - V_c \le 0.795\sqrt{f_c'}bd$ ระยะเรียง s กำหนดดังนี้

$$s \le \frac{A_v f_v d}{V - V_c}$$

$$s \le \frac{d}{2}$$

$$s \le 60 \text{ cm}$$

ในกรณีที่ $0.795\sqrt{f_c'}bd < V - V_c \le 1.03\sqrt{f_c'}bd$ ระยะเรียง s กำหนดดังนี้

$$s \le \frac{A_v f_v d}{V - V_c}$$

$$s \le \frac{d}{4}$$

$$s \le 30 \text{ cm}$$

ตาราง ผ-7 จะกำหนดระยะเรียง s แล้วแสดงค่า $V - V_c$ ของเล็กลูกตั้งวงเดียว หากไม่พอให้เพิ่มจำนวนวง แล้วคูณแรงเฉือนด้วยจำนวนวงจะเป็นแรงเฉือนที่เหล็กลูกตั้งรับได้

ขนาดเหล็กลูกตั้งที่นิยมใช้คือ RB 6 mm สำหรับคานที่มีเหล็กตามยาวตั้งแต่ 12 mm ถึง 16 mm ขนาด RB 9 mm หรือ DB 10 mm สำหรับคานที่มีเหล็กตามยาวตั้งแต่ 20 mm ถึง 25 mm ขนาด DB 12 mm สำหรับคานที่มีเหล็กตามยาวขนาด 28 mm ขึ้นไป กรณีหลังสุดนี้ ACI กำหนดระยะเรียงเหล็กทางขวางทั้งคานและเสาเอาไว้ไม่เกิน 15 cm ทั้งนี้ไม่รวมผลแบบคานลึกที่สามารถคำนวณออกแบบตามหลักการวิธีกำลัง

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 6 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm									
m	cm	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	1.7281	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	2.1805	1.6354	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	2.6329	1.9747	1.5797	-	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	3.0853	2.3140	1.8512	1.5426	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	3.5377	2.6533	2.1226	1.7688	1.5162	-	-	-	-	-
0.50	44.1	3.9901	2.9926	2.3940	1.9950	1.7100	1.4963	-	-	-	-
0.55	49.1	4.4425	3.3318	2.6655	2.2212	1.9039	1.6659	1.4808	-	-	-
0.60	54.1	4.8948	3.6711	2.9369	2.4474	2.0978	1.8356	1.6316	1.4685	-	-
0.65	59.1	5.3472	4.0104	3.2083	2.6736	2.2917	2.0052	1.7824	1.6042	1.4583	-
0.70	64.1	5.7996	4.3498	3.4798	2.8998	2.4856	2.1749	1.9332	1.7399	1.5817	1.4499
0.75	69.1	6.2520	4.6890	3.7512	3.1260	2.6794	2.3445	2.0840	1.8756	1.7051	1.5630
0.80	74.1	6.7044	5.0283	4.0226	3.3522	2.8733	2.5142	2.2348	2.0113	1.8285	1.6761
0.90	84.1	7.6092	5.7069	4.5655	3.8046	3.2611	2.8534	2.5364	2.2828	2.0752	1.9023
1.00	94.1	8.5140	6.3855	5.1084	4.2570	3.6488	3.1927	2.8380	2.5542	2.3220	2.1285
1.10	104.1	9.4187	7.0641	5.6512	4.7094	4.0366	3.5320	3.1396	2.8256	2.5687	2.3547
1.20	114.1	10.3235	7.7426	6.1941	5.1618	4.4244	3.8713	3.4412	3.0971	2.8155	2.5809
1.30	124.1	11.2283	8.4212	6.7370	5.6142	4.8121	4.2106	3.7428	3.3685	3.0623	2.8071
1.40	134.1	12.1331	9.0998	7.2798	6.0665	5.1999	4.5499	4.0444	3.6399	3.3090	3.0333
1.50	144.1	13.0379	9.7784	7.8227	6.5189	5.5877	4.8892	4.3460	3.9114	3.5558	3.2595
1.60	154.1	13.9426	10.4570	8.3656	6.9713	5.9754	5.2285	4.6475	4.1828	3.8025	3.4857
1.70	164.1	14.8474	11.1356	8.9085	7.4237	6.3632	5.5678	4.9491	4.4542	4.0493	3.7119
1.80	174.1	15.7522	11.8141	9.4513	7.8761	6.7509	5.9071	5.2507	4.7257	4.2961	3.9380
1.90	184.1	16.6570	12.4927	9.9942	8.3285	7.1387	6.2464	5.5523	4.9971	4.5428	4.1642
2.00	194.1	17.5618	13.1713	10.5371	8.7809	7.5265	6.5857	5.8539	5.2685	4.7896	4.3904
2.50	240	21.7147	16.2860	13.0288	10.8573	9.3063	8.1430	7.2382	6.5144	5.9222	5.4287
3.00	285	25.7862	19.3396	15.4717	12.8931	11.0512	9.6698	8.5954	7.7359	7.0326	6.4465
3.50	335	30.3101	22.7326	18.1861	15.1550	12.9900	11.3663	10.1034	9.0930	8.2664	7.5775
4.00	385	34.8340	26.1255	20.9004	17.4170	14.9288	13.0627	11.6113	10.4502	9.5002	8.7085

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 6 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm					
m	cm	350	400	450	500	550	600
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	-	-	-	-	-	-
0.50	44.1	-	-	-	-	-	-
0.55	49.1	-	-	-	-	-	-
0.60	54.1	-	-	-	-	-	-
0.65	59.1	-	-	-	-	-	-
0.70	64.1	-	-	-	-	-	-
0.75	69.1	-	-	-	-	-	-
0.80	74.1	1.4367	-	-	-	-	-
0.90	84.1	1.6305	1.4267		-	-	-
1.00	94.1	1.8244	1.5964	1.4190	-	-	-
1.10	104.1	2.0183	1.7660	1.5698	1.4128	-	-
1.20	114.1	2.2122	1.9357	1.7206	1.5485	1.4078	-
1.30	124.1	2.4061	2.1053	1.8714	1.6842	1.5311	1.4035
1.40	134.1	2.5999	2.2750	2.0222	1.8200	1.6545	1.5166
1.50	144.1	2.7938	2.4446	2.1730	1.9557	1.7779	1.6297
1.60	154.1	2.9877	2.6142	2.3238	2.0914	1.9013	1.7428
1.70	164.1	3.1816	2.7839	2.4746	2.2271	2.0246	1.8559
1.80	174.1	3.3755	2.9535	2.6254	2.3628	2.1480	1.9690
1.90	184.1	3.5694	3.1232	2.7762	2.4985	2.2714	2.0821
2.00	194.1	3.7632	3.2928	2.9270	2.6343	2.3948	2.1952
2.50	240	4.6531	4.0715	3.6191	3.2572	2.9611	2.7143
3.00	285	5.5256	4.8349	4.2977	3.8679	3.5163	3.2233
3.50	335	6.4950	5.6831	5.0517	4.5465	4.1332	3.7888
4.00	385	7.4644	6.5314	5.8057	5.2251	4.7501	4.3542

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 9 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm									
m	cm	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	3.8883	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	4.9062	3.6796	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	5.9240	4.4430	3.5544	-	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	6.9419	5.2064	4.1651	3.4710	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	7.9598	5.9698	4.7759	3.9799	3.4113	-	-	-	-	-
0.50	44.1	8.9777	6.7332	5.3866	4.4888	3.8476	3.3666	-	-	-	-
0.55	49.1	9.9955	7.4967	5.9973	4.9978	4.2838	3.7483	3.3318	-	-	-
0.60	54.1	11.0134	8.2601	6.6081	5.5067	4.7200	4.1300	3.6711	3.3040	-	-
0.65	59.1	12.0313	9.0235	7.2188	6.0156	5.1563	4.5117	4.0104	3.6094	3.2813	-
0.70	64.1	13.0492	9.7869	7.8295	6.5246	5.5925	4.8934	4.3497	3.9148	3.5589	3.2623
0.75	69.1	14.0670	10.5503	8.4402	7.0335	6.0287	5.2751	4.6890	4.2201	3.8365	3.5168
0.80	74.1	15.0849	11.3137	9.0510	7.5425	6.4650	5.6568	5.0283	4.5255	4.1141	3.7712
0.90	84.1	17.1207	12.8405	10.2724	8.5603	7.3374	6.4203	5.7069	5.1362	4.6693	4.2802
1.00	94.1	19.1564	14.3673	11.4939	9.5782	8.2099	7.1837	6.3855	5.7469	5.2245	4.7891
1.10	104.1	21.1922	15.8941	12.7153	10.5961	9.0824	7.9471	7.0641	6.3577	5.7797	5.2980
1.20	114.1	23.2279	17.4209	13.9368	11.6140	9.9548	8.7105	7.7426	6.9684	6.3349	5.8070
1.30	124.1	25.2637	18.9478	15.1582	12.6318	10.8273	9.4739	8.4212	7.5791	6.8901	6.3159
1.40	134.1	27.2994	20.4746	16.3791	13.6497	11.6998	10.2373	9.0998	8.1898	7.4453	6.8249
1.50	144.1	29.3352	22.0014	17.6011	14.6676	12.5722	11.0007	9.7784	8.8006	8.0005	7.3338
1.60	154.1	31.3709	23.5282	18.8226	15.6855	13.4447	11.7641	10.4570	9.4113	8.5557	7.8427
1.70	164.1	33.4067	25.0550	20.0440	16.7033	14.3172	12.5275	11.1356	10.0220	9.1109	8.3517
1.80	174.1	35.4424	26.5818	21.2655	17.7212	15.1896	13.2909	11.8141	10.6327	9.6661	8.8606
1.90	184.1	37.4782	28.1086	22.4869	18.7391	16.0621	14.0543	12.4927	11.2435	10.2213	9.3695
2.00	194.1	39.5139	29.6355	23.7084	19.7570	16.9345	14.8177	13.1713	11.8542	10.7765	9.8785
2.50	240	48.8580	36.6435	29.3148	24.4290	20.9392	18.3218	16.2860	14.6574	13.3249	12.2145
3.00	285	58.0189	43.5142	34.8114	29.0095	24.8653	21.7571	19.3396	17.4057	15.8233	14.5047
3.50	335	68.1977	51.1483	40.9186	34.0988	29.2276	25.5741	22.7326	20.4593	18.5994	17.0494
4.00	385	78.3765	58.7823	47.0259	39.1882	33.5899	29.3912	26.1255	23.5129	21.3754	19.5941

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 9 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm					
m	cm	350	400	450	500	550	600
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	-	-	-	-	-	-
0.50	44.1	-	-	-	-	-	-
0.55	49.1	-	-	-	-	-	-
0.60	54.1	-	-	-	-	-	-
0.65	59.1	-	-	-	-	-	-
0.70	64.1	-	-	-	-	-	-
0.75	69.1	-	-	-	-	-	-
0.80	74.1	3.2325	-	-	-	-	-
0.90	84.1	3.6687	3.2101		-	-	-
1.00	94.1	4.1049	3.5918	3.1927	-	-	-
1.10	104.1	4.5412	3.9735	3.5320	3.1788	-	-
1.20	114.1	4.9774	4.3552	3.8713	3.4842	3.1674	-
1.30	124.1	5.4136	4.7369	4.2106	3.7896	3.4450	3.1580
1.40	134.1	5.8499	5.1186	4.5499	4.0949	3.7227	3.4124
1.50	144.1	6.2861	5.5003	4.8892	4.4003	4.0003	3.6669
1.60	154.1	6.7223	5.8821	5.2285	4.7056	4.2779	3.9214
1.70	164.1	7.1586	6.2638	5.5678	5.0110	4.5555	4.1758
1.80	174.1	7.5948	6.6455	5.9071	5.3164	4.8331	4.4303
1.90	184.1	8.0310	7.0272	6.2464	5.6217	5.1107	4.6848
2.00	194.1	8.4673	7.4089	6.5857	5.9271	5.3883	4.9392
2.50	240	10.4696	9.1609	8.1430	7.3287	6.6625	6.1073
3.00	285	12.4326	10.8785	9.6698	8.7028	7.9117	7.2524
3.50	335	14.6138	12.7871	11.3663	10.2297	9.2997	8.5247
4.00	385	16.7950	14.6956	13.0627	11.7565	10.6877	9.7971

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด DB 10 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm									
m	cm	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	6.0004	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	7.5712	5.6784	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	9.1420	6.8565	5.4852	-	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	10.7128	8.0346	6.4277	5.3564	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	12.2836	9.2127	7.3702	6.1418	5.2644	-	-	-	-	-
0.50	44.1	13.8544	10.3908	8.3127	6.9272	5.9376	5.1954	-	-	-	-
0.55	49.1	15.4252	11.5689	9.2551	7.7126	6.6108	8.7845	5.1417	-	-	-
0.60	54.1	16.9960	12.7470	10.1976	8.4980	7.2840	6.3735	5.6653	5.0988	-	-
0.65	59.1	18.5668	13.9251	11.1401	9.2834	7.9572	6.9626	6.1889	5.5700	5.0637	-
0.70	64.1	20.1376	15.1032	12.0826	10.0688	8.6304	7.5516	6.7125	6.0413	5.4921	5.0344
0.75	69.1	21.7084	16.2813	13.0250	10.8542	9.3036	8.1407	7.2361	6.5125	5.9205	5.4271
0.80	74.1	23.2792	17.4594	13.9675	11.6396	9.9768	8.7297	7.7597	6.9838	6.3489	5.8198
0.90	84.1	26.4208	19.8156	15.8525	13.2104	11.3232	9.9078	8.8069	7.9262	7.2057	6.6052
1.00	94.1	29.5624	22.1718	17.7374	14.7812	12.6696	11.0859	9.8541	8.8687	8.0625	7.3906
1.10	104.1	32.7040	24.5280	19.6224	16.3520	14.0160	12.2640	10.9013	9.8112	8.9193	8.1760
1.20	114.1	35.8456	26.8842	21.5073	17.9228	15.3624	13.4421	11.9485	10.7537	9.7761	8.9614
1.30	124.1	38.9872	29.2404	23.3923	19.4936	16.7088	14.6202	12.9957	11.6961	10.6329	9.7468
1.40	134.1	42.1288	31.5966	25.2773	21.0644	18.0552	15.7983	14.0429	12.6386	11.4897	10.5322
1.50	144.1	45.2704	33.9528	27.1622	22.6352	19.4016	16.9764	15.0901	13.5811	12.3465	11.3176
1.60	154.1	48.4119	36.3090	29.0472	24.2060	20.7480	18.1545	16.1373	14.5236	13.2033	12.1030
1.70	164.1	51.5535	38.6652	30.9321	25.7768	22.0944	19.3326	17.1845	15.4661	14.0601	12.8884
1.80	174.1	54.6951	41.0213	32.8171	27.3476	23.4408	20.5107	18.2317	16.4085	14.9169	13.6738
1.90	184.1	57.8367	43.3775	34.7020	28.9184	24.7872	21.6888	19.2789	17.3510	15.7737	14.4592
2.00	194.1	60.9783	45.7337	36.5870	30.4892	26.1336	22.8669	20.3261	18.2935	16.6304	15.2446
2.50	240	75.3982	56.5487	45.2389	37.6991	32.3135	28.2743	25.1327	22.6195	20.5632	18.8496
3.00	285	89.5354	67.1515	53.7212	44.7677	38.3723	33.5758	29.8451	26.8606	24.4187	22.3838
3.50	335	105.2434	78.9325	63.1460	52.6217	45.1043	39.4663	35.0811	31.5730	28.7027	26.3108
4.00	385	120.9513	90.7135	72.5708	60.4757	51.5363	45.3567	40.3171	36.2854	32.9867	30.2378

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด DB 10 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm					
m	cm	350	400	450	500	550	600
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	-	-	-	-	-	-
0.50	44.1	-	-	-	-	-	-
0.55	49.1	-	-	-	-	-	-
0.60	54.1	-	-	-	-	-	-
0.65	59.1	-	-	-	-	-	-
0.70	64.1	-	-	-	-	-	-
0.75	69.1	-	-	-	-	-	-
0.80	74.1	4.9884	-	-	-	-	-
0.90	84.1	5.6616	4.9539		-	-	-
1.00	94.1	6.3348	5.5429	4.9271	-	-	-
1.10	104.1	7.0080	6.1320	5.4507	4.9056	-	-
1.20	114.1	7.6812	6.7210	5.9743	5.3768	4.8880	-
1.30	124.1	8.3544	7.3101	6.4979	5.8481	5.3164	4.8734
1.40	134.1	9.0276	7.8991	7.0215	6.3193	5.7448	5.2661
1.50	144.1	9.7008	8.4882	7.5451	6.7906	6.1732	5.6588
1.60	154.1	10.3740	9.0772	8.0687	7.2618	6.6016	6.0515
1.70	164.1	11.0472	9.6663	8.5923	7.7330	7.0300	6.4442
1.80	174.1	11.7204	10.2553	9.1159	8.2043	7.4584	6.8369
1.90	184.1	12.3936	10.8444	9.6395	8.6755	7.8868	7.2296
2.00	194.1	13.0668	11.4334	10.1631	9.1467	8.3152	7.6223
2.50	240	16.1568	14.1372	12.5664	11.3097	10.2816	9.4248
3.00	285	19.1862	16.7879	14.9226	13.4303	12.2094	11.1919
3.50	335	22.5521	19.7331	17.5406	15.7865	14.3514	13.1554
4.00	385	25.9181	22.6784	20.1586	18.1427	16.4934	15.1189

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 12 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm									
m	cm	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	6.9125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	8.7221	6.5415	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	10.5316	7.8987	6.3190	-	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	12.3412	9.2559	7.4047	6.1706	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	14.1507	10.6131	8.4904	7.0754	6.0646	-	-	-	-	-
0.50	44.1	15.9603	11.9702	9.5762	7.9801	6.8401	5.9851	-	-	-	-
0.55	49.1	17.7699	13.3274	10.6619	8.8849	7.6157	6.6637	5.9233	-	-	-
0.60	54.1	19.5794	14.6846	11.7476	9.7897	8.3912	7.3423	6.5265	5.8738	-	-
0.65	59.1	21.3890	16.0417	12.8334	10.6945	9.1667	8.0209	7.1297	6.4167	5.8334	-
0.70	64.1	23.1985	17.3989	13.9191	11.5993	9.9422	8.6994	7.7328	6.9596	6.3269	5.7996
0.75	69.1	25.0081	18.7561	15.0048	12.5040	10.7177	9.3780	8.3360	7.5024	6.8204	6.2520
0.80	74.1	26.8176	20.1132	16.0906	13.4088	11.4933	10.0566	8.9392	8.0453	7.3139	6.7044
0.90	84.1	30.4368	22.8276	18.2621	15.2184	13.0443	11.4138	10.1456	9.1310	8.3009	7.6092
1.00	94.1	34.0559	25.5419	20.4335	17.0279	14.5954	12.7710	11.3520	10.2168	9.2880	8.5140
1.10	104.1	37.6750	28.2562	22.6050	18.8375	16.1464	14.1281	12.5583	11.3025	10.2750	9.4187
1.20	114.1	41.2941	30.9706	24.7765	20.6470	17.6975	15.4853	13.7647	12.3882	11.2620	10.3235
1.30	124.1	44.9132	33.6849	26.9479	22.4566	19.2485	16.8425	14.9711	13.4740	12.2491	11.2283
1.40	134.1	48.5323	36.3992	29.1194	24.2662	20.7996	18.1996	16.1774	14.5597	13.2361	12.1331
1.50	144.1	52.1514	39.1136	31.2909	26.0757	22.3506	19.5568	17.3838	15.6454	14.2231	13.0379
1.60	154.1	55.7706	41.8279	33.4623	27.8853	23.9017	20.9140	18.5902	16.7312	15.2102	13.9426
1.70	164.1	59.3897	44.5423	35.6338	29.6948	25.4527	22.2711	19.7966	17.8169	16.1972	14.8474
1.80	174.1	63.0088	47.2566	37.8053	31.5044	27.0038	23.6283	21.0029	18.9026	17.1842	15.7522
1.90	184.1	66.6279	49.9709	39.9767	33.3140	28.5548	24.9855	22.2093	19.9884	18.1712	16.6570
2.00	194.1	70.2470	52.6853	42.1482	35.1235	30.1059	26.3426	23.4157	21.0741	19.1583	17.5618
2.50	240	86.8588	65.1441	52.1153	43.4294	37.2252	32.5720	28.9529	26.0576	23.6888	21.7147
3.00	285	103.1448	77.3586	61.8869	51.5724	44.2049	38.6793	34.3816	30.9434	28.1304	25.7862
3.50	335	121.2403	90.9303	72.7442	60.6202	51.9601	45.4651	40.4134	36.3721	33.0655	30.3101
4.00	385	139.3359	104.5019	83.6016	69.6680	59.7154	52.2510	46.4453	41.8008	38.0007	34.8340

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด RB 12 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm					
m	cm	350	400	450	500	550	600
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	-	-	-	-	-	-
0.50	44.1	-	-	-	-	-	-
0.55	49.1	-	-	-	-	-	-
0.60	54.1	-	-	-	-	-	-
0.65	59.1	-	-	-	-	-	-
0.70	64.1	-	-	-	-	-	-
0.75	69.1	-	-	-	-	-	-
0.80	74.1	5.7466	-	-	-	-	-
0.90	84.1	6.5222	5.7069		-	-	-
1.00	94.1	7.2977	6.3855	5.6760	-	-	-
1.10	104.1	8.0732	7.0641	6.2792	5.6512	-	-
1.20	114.1	8.8487	7.7426	6.8823	6.1941	5.6310	-
1.30	124.1	9.6243	8.4212	7.4855	6.7370	6.1245	5.6142
1.40	134.1	10.3998	9.0998	8.0887	7.2798	6.6180	6.0665
1.50	144.1	11.1753	9.7784	8.6919	7.8227	7.1116	6.5189
1.60	154.1	11.9508	10.4570	9.2951	8.3656	7.6051	6.9713
1.70	164.1	12.7264	11.1356	9.8983	8.9085	8.0986	7.4237
1.80	174.1	13.5019	11.8141	10.5015	9.4513	8.5921	7.8761
1.90	184.1	14.2774	12.4927	11.1047	9.9942	9.0856	8.3285
2.00	194.1	15.0529	13.1713	11.7078	10.5371	9.5791	8.7809
2.50	240	18.6126	16.2860	14.4765	13.0288	11.8444	10.8573
3.00	285	22.1025	19.3396	17.1908	15.4717	14.0652	12.8931
3.50	335	25.9801	22.7326	20.2067	18.1861	16.5328	15.1550
4.00	385	29.8577	26.1255	23.2227	20.9004	19.0004	17.4170

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด DB 12 mm

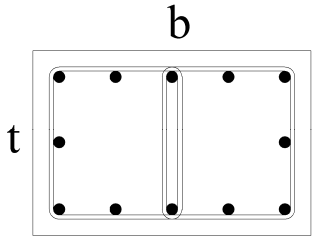
t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm									
m	cm	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	8.6406	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	10.9026	8.1769	-	-	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	13.1645	9.8734	7.8987	-	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	15.4265	11.5699	9.2559	7.7132	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	17.6884	13.2663	10.6131	8.8442	7.5808	-	-	-	-	-
0.50	44.1	19.9504	14.9628	11.9702	9.9752	8.5502	7.4814	-	-	-	-
0.55	49.1	22.2123	16.6592	13.3274	11.1062	9.5196	8.3296	7.4041	-	-	-
0.60	54.1	24.4743	18.3557	14.6846	12.2371	10.4890	9.1778	8.1581	7.3423	-	-
0.65	59.1	26.7362	20.0522	16.0417	13.3681	11.4584	10.0261	8.9121	8.0209	7.2917	-
0.70	64.1	28.9982	21.7486	17.3989	14.4991	12.4278	10.8743	9.6661	8.6994	7.9086	7.2495
0.75	69.1	31.2601	23.4451	18.7561	15.6301	13.3972	11.7225	10.4200	9.3780	8.5255	7.8150
0.80	74.1	33.5221	25.1415	20.1132	16.7610	14.3666	12.5708	11.1740	10.0566	9.1424	8.3805
0.90	84.1	38.0459	28.5345	22.8276	19.0230	16.3054	14.2672	12.6820	11.4138	10.3762	9.5115
1.00	94.1	42.5698	31.9274	25.5419	21.2849	18.2442	15.9637	14.1899	12.7710	11.6100	10.6425
1.10	104.1	47.0937	35.3203	28.2562	23.5469	20.1830	17.6601	15.6979	14.1281	12.8437	11.7734
1.20	114.1	51.6176	38.7132	30.9706	25.8088	22.1218	19.3566	17.2059	15.4853	14.0775	12.9044
1.30	124.1	56.1415	42.1061	33.6849	28.0708	24.0607	21.0531	18.7138	16.8425	15.3113	14.0354
1.40	134.1	60.6654	45.4991	36.3992	30.3327	25.9995	22.7496	20.2218	18.1996	16.5451	15.1664
1.50	144.1	65.1893	48.8920	39.1136	32.5947	27.9383	24.4460	21.7298	19.5568	17.7789	16.2973
1.60	154.1	69.7132	52.2849	41.8279	34.8566	29.8771	26.1424	23.2377	20.9140	19.0127	17.4283
1.70	164.1	74.2371	55.6778	44.5423	37.1185	31.8159	27.8389	24.7457	22.2711	20.2465	18.5593
1.80	174.1	78.7610	59.0707	47.2566	39.3805	33.7547	29.5354	26.2537	23.6283	21.4803	19.6902
1.90	184.1	83.2849	62.4637	49.9709	41.6424	35.6935	31.2318	27.7616	24.9855	22.7141	20.8212
2.00	194.1	87.8088	65.8566	52.6853	43.9044	37.6323	32.9283	29.2696	26.3426	23.9478	21.9522
2.50	240	108.5734	81.4301	65.1441	54.2867	46.5315	40.7150	36.1911	32.5720	29.6109	27.1434
3.00	285	128.9310	96.6982	77.3586	64.4655	55.2561	48.3491	42.9770	38.6793	35.1630	32.2327
3.50	335	151.5504	113.6628	90.9303	75.7752	64.9502	56.8314	50.5168	45.4651	41.3319	37.8876
4.00	385	174.1699	130.6274	104.5019	87.0849	74.6442	65.3137	58.0566	52.2510	47.5009	43.5425

ตาราง ผ-7 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง, ตัน

เหล็กลูกตั้งขนาด DB 12 mm

t	d	ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง, mm					
m	cm	350	400	450	500	550	600
0.20	14.1	-	-	-	-	-	-
0.25	19.1	-	-	-	-	-	-
0.30	24.1	-	-	-	-	-	-
0.35	29.1	-	-	-	-	-	-
0.40	34.1	-	-	-	-	-	-
0.45	39.1	-	-	-	-	-	-
0.50	44.1	-	-	-	-	-	-
0.55	49.1	-	-	-	-	-	-
0.60	54.1	-	-	-	-	-	-
0.65	59.1	-	-	-	-	-	-
0.70	64.1	-	-	-	-	-	-
0.75	69.1	-	-	-	-	-	-
0.80	74.1	7.1833	-	-	-	-	-
0.90	84.1	8.1527	7.1336		-	-	-
1.00	94.1	9.1221	7.9818	7.0950	-	-	-
1.10	104.1	10.0915	8.8301	7.8490	7.0641	-	-
1.20	114.1	11.0609	9.6783	8.6029	7.7426	7.0388	-
1.30	124.1	12.0303	10.5265	9.3569	8.4212	7.6557	7.0177
1.40	134.1	12.9997	11.3748	10.1109	9.0998	8.2726	7.5832
1.50	144.1	13.9691	12.2230	10.8649	9.7784	8.8895	8.1487
1.60	154.1	14.9385	13.0712	11.6189	10.4570	9.5063	8.7141
1.70	164.1	15.9079	13.9195	12.3728	11.1356	10.1232	9.2796
1.80	174.1	16.8774	14.7677	13.1268	11.8141	10.7401	9.8451
1.90	184.1	17.8468	15.6159	13.8808	12.4927	11.3570	10.4106
2.00	194.1	18.8162	16.4641	14.6348	13.1713	11.9739	10.9761
2.50	240	23.2657	20.3575	18.0956	16.2860	14.8055	13.5717
3.00	285	27.6281	24.1746	21.4885	19.3396	17.5815	16.1164
3.50	335	32.4751	28.4157	25.2584	22.7326	20.6660	18.9438
4.00	385	37.3221	32.6569	29.0283	26.1255	23.7504	21.7712

คำอธิบายตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น



น้ำหนักบรรทุกของเสาสั้นปลอกเดี่ยว

$$P = 0.85A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_g\right)$$
$$P = 0.85bt\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_g\right)$$
$$P = 0.85bt\left(0.25f_c^{'} + 0.4f_y\rho_g\right)$$

เมื่อ $P =$ น้ำหนักบรรทุกที่เสาปลอกเดี่ยวรับได้, kg

$A_g = bt =$ เนื้อที่หน้าตัดเสา, cm^2

$b =$ ด้านยาวของหน้าตัดเสา, cm

$t =$ ด้านแคบของหน้าตัด ต้องมีขนาดไม่เหล็กกว่า 20 cm

$f_c^{'} = 173$ ksc $=$ กำลังประลัยคอนกรีต

$f_s = 1{,}200$ ksc $=$ กำลังของเหล็กยืนในเสา เฉพาะเหล็กผิวเรียบ

$f_s = 0.4f_y = 0.4 \times 3{,}000 = 1{,}200$ ksc $=$ กำลังของเหล็กยืนในเสา เฉพาะเหล็ก SD-30

$f_s = 0.4f_y = 0.4 \times 4{,}000 = 1{,}600$ ksc $=$ กำลังของเหล็กยืนในเสา เฉพาะเหล็ก SD-40

$f_s = 0.4f_y = 0.4 \times 5{,}000 = 2{,}000$ ksc $=$ กำลังของเหล็กยืนในเสา เฉพาะเหล็ก SD-50

ตาราง ผ-8 ใช้ $f_s = 1{,}200$ ksc ซึ่งใช้ได้ทั้งกรณีเหล็กผิวเรียบ SR-24 และเหล็กข้ออ้อย SD-30

มาตรฐานกำหนด $f_s \le 2{,}100$ ksc

$f_y =$ กำลังครากของเหล็กเสริม, ksc

$0.01 \le \left(\rho_g = \dfrac{A_{st}}{A_g}\right) \le 0.08 =$ อัตราส่วนเนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืนต่อเนื้อที่หน้าตัดเสา

$w_D = 2{,}400\dfrac{A_g}{100} = 24A_g \ \dfrac{kg}{m} =$ น้ำหนักเสาต่อความยาว , kg/m

เหล็กยืนในเสาอย่างน้อย 4-DB 12 mm ในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ 6-DB 12 mm ในเสาหน้าตัดกลม เหล็กยืนในเสาต้องห่างกันไม่เกิน 15 cm โดยต้องมีเหล็กปลอกคล้องเป็นมุม 90 องศา เส้นเว้นเส้นดังตัวอย่างที่แสดง

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.20 × 0.20	400	96	16.745	18.785	22.865	28.710	31.025	35.105	39.185	43.265	47.345
0.20 × 0.25	500	120	20.931	23.481	28.581	35.887	38.781	43.881	48.981	54.081	59.181
0.20 × 0.30	600	144	25.118	28.178	34.298	43.064	46.538	52.658	58.778	64.898	71.018
0.20 × 0.35	700	168	29.304	32.874	40.014	50.242	54.294	61.434	68.574	75.714	82.854
0.20 × 0.40	800	192	33.490	37.570	45.730	57.419	62.050	70.210	78.370	86.530	94.690
0.20 × 0.45	900	216	37.676	42.266	51.446	64.597	69.806	78.986	88.166	97.346	106.526
0.20 × 0.50	1000	240	41.863	46.963	57.163	71.774	77.563	87.763	97.963	108.163	118.363
0.20 × 0.55	1100	264	46.049	51.659	62.879	78.951	85.319	96.539	107.759	118.979	130.199
0.20 × 0.60	1200	288	50.235	56.355	68.595	86.129	93.075	105.315	117.555	129.795	142.035
0.20 × 0.65	1300	312	54.421	61.051	74.311	93.306	100.831	114.091	127.351	140.611	153.871
0.20 × 0.70	1400	336	58.608	65.748	80.028	100.484	108.588	122.868	137.148	151.428	165.708
0.20 × 0.75	1500	360	62.794	70.444	85.744	107.661	116.344	131.644	146.944	162.244	177.544
0.20 × 0.80	1600	384	66.980	75.140	91.460	114.838	124.100	140.420	156.740	173.060	189.380
0.20 × 0.85	1700	408	71.166	79.836	97.176	122.016	131.856	149.196	166.536	183.876	201.216
0.20 × 0.90	1800	432	75.353	84.533	102.893	129.193	139.613	157.973	176.333	194.693	213.053
0.20 × 0.95	1900	456	79.539	89.229	108.609	136.371	147.369	166.749	186.129	205.509	224.889
0.20 × 1.00	2000	480	83.725	93.925	114.325	143.548	155.125	175.525	195.925	216.325	236.725
0.20 × 1.05	2100	504	87.911	98.621	120.041	150.725	162.881	184.301	205.721	227.141	248.561
0.20 × 1.10	2200	528	92.098	103.318	125.758	157.903	170.638	193.078	215.518	237.958	260.398
0.20 × 1.20	2400	576	100.470	112.710	137.190	172.258	186.150	210.630	235.110	259.590	284.070
0.20 × 1.30	2600	624	108.843	122.103	148.623	186.612	201.663	228.183	254.703	281.223	307.743
0.20 × 1.40	2800	672	117.215	131.495	160.055	200.967	217.175	245.735	274.295	302.855	331.415
0.20 × 1.50	3000	720	125.588	140.888	171.488	215.322	232.688	263.288	293.888	324.488	355.088
0.20 × 1.60	3200	768	133.960	150.280	182.920	229.677	248.200	280.840	313.480	346.120	378.760
0.20 × 1.70	3400	816	142.333	159.673	194.353	244.032	263.713	298.393	333.073	367.753	402.433
0.20 × 1.80	3600	864	150.705	169.065	205.785	258.386	279.225	315.945	352.665	389.385	426.105
0.20 × 1.90	3800	912	159.078	178.458	217.218	272.741	294.738	333.498	372.258	411.018	449.778
0.20 × 2.00	4000	960	167.450	187.850	228.650	287.096	310.250	351.050	391.850	432.650	473.450

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.25 × 0.25	625	150	26.164	29.352	35.727	44.859	48.477	54.852	61.227	67.602	73.977
0.25 × 0.30	750	180	31.397	35.222	42.872	53.831	58.172	65.822	73.472	81.122	88.772
0.25 × 0.35	875	210	36.630	41.092	50.017	62.802	67.867	76.792	85.717	94.642	103.567
0.25 × 0.40	1000	240	41.863	46.963	57.163	71.774	77.563	87.763	97.963	108.163	118.363
0.25 × 0.45	1125	270	47.095	52.833	64.308	80.746	87.258	98.733	110.208	121.683	133.158
0.25 × 0.50	1250	300	52.328	58.703	71.453	89.718	96.953	109.703	122.453	135.203	147.953
0.25 × 0.55	1375	330	57.561	64.573	78.598	98.689	106.648	120.673	134.698	148.723	162.748
0.25 × 0.60	1500	360	62.794	70.444	85.744	107.661	116.344	131.644	146.944	162.244	177.544
0.25 × 0.65	1625	390	68.027	76.314	92.889	116.633	126.039	142.614	159.189	175.764	192.339
0.25 × 0.70	1750	420	73.259	82.184	100.034	125.605	135.734	153.584	171.434	189.284	207.134
0.25 × 0.75	1875	450	78.492	88.055	107.180	134.576	145.430	164.555	183.680	202.805	221.930
0.25 × 0.80	2000	480	83.725	93.925	114.325	143.548	155.125	175.525	195.925	216.325	236.725
0.25 × 0.85	2125	510	88.958	99.795	121.470	152.520	164.820	186.495	208.170	229.845	251.520
0.25 × 0.90	2250	540	94.191	105.666	128.616	161.492	174.516	197.466	220.416	243.366	266.316
0.25 × 0.95	2375	570	99.423	111.536	135.761	170.463	184.211	208.436	232.661	256.886	281.111
0.25 × 1.00	2500	600	104.656	117.406	142.906	179.435	193.906	219.406	244.906	270.406	295.906
0.25 × 1.05	2625	630	109.889	123.277	150.052	188.407	203.602	230.377	257.152	283.927	310.702
0.25 × 1.10	2750	660	115.122	129.147	157.197	197.379	213.297	241.347	269.397	297.447	325.497
0.25 × 1.20	3000	720	125.588	140.888	171.488	215.322	232.688	263.288	293.888	324.488	355.088
0.25 × 1.30	3250	780	136.053	152.628	185.778	233.266	252.078	285.228	318.378	351.528	384.678
0.25 × 1.40	3500	840	146.519	164.369	200.069	251.209	271.469	307.169	342.869	378.569	414.269
0.25 × 1.50	3750	900	156.984	176.109	214.359	269.153	290.859	329.109	367.359	405.609	443.859
0.25 × 1.60	4000	960	167.450	187.850	228.650	287.096	310.250	351.050	391.850	432.650	473.450
0.25 × 1.70	4250	1020	177.916	199.591	242.941	305.040	329.641	372.991	416.341	459.691	503.041
0.25 × 1.80	4500	1080	188.381	211.331	257.231	322.983	349.031	394.931	440.831	486.731	532.631
0.25 × 1.90	4750	1140	198.847	223.072	271.522	340.927	368.422	416.872	465.322	513.772	562.222
0.25 × 2.00	5000	1200	209.313	234.813	285.813	358.870	387.813	438.813	489.813	540.813	591.813
0.25 × 2.10	5250	1260	219.778	246.553	300.103	376.814	407.203	460.753	514.303	567.853	621.403

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.30 × 0.30	900	216	37.676	42.266	51.446	64.597	69.806	78.986	88.166	97.346	106.526
0.30 × 0.35	1050	252	43.956	49.311	60.021	75.363	81.441	92.151	102.861	113.571	124.281
0.30 × 0.40	1200	288	50.235	56.355	68.595	86.129	93.075	105.315	117.555	129.795	142.035
0.30 × 0.45	1350	324	56.514	63.399	77.169	96.895	104.709	118.479	132.249	146.019	159.789
0.30 × 0.50	1500	360	62.794	70.444	85.744	107.661	116.344	131.644	146.944	162.244	177.544
0.30 × 0.55	1650	396	69.073	77.488	94.318	118.427	127.978	144.808	161.638	178.468	195.298
0.30 × 0.60	1800	432	75.353	84.533	102.893	129.193	139.613	157.973	176.333	194.693	213.053
0.30 × 0.65	1950	468	81.632	91.577	111.467	139.959	151.247	171.137	191.027	210.917	230.807
0.30 × 0.70	2100	504	87.911	98.621	120.041	150.725	162.881	184.301	205.721	227.141	248.561
0.30 × 0.75	2250	540	94.191	105.666	128.616	161.492	174.516	197.466	220.416	243.366	266.316
0.30 × 0.80	2400	576	100.470	112.710	137.190	172.258	186.150	210.630	235.110	259.590	284.070
0.30 × 0.85	2550	612	106.749	119.754	145.764	183.024	197.784	223.794	249.804	275.814	301.824
0.30 × 0.90	2700	648	113.029	126.799	154.339	193.790	209.419	236.959	264.499	292.039	319.579
0.30 × 0.95	2850	684	119.308	133.843	162.913	204.556	221.053	250.123	279.193	308.263	337.333
0.30 × 1.00	3000	720	125.588	140.888	171.488	215.322	232.688	263.288	293.888	324.488	355.088
0.30 × 1.05	3150	756	131.867	147.932	180.062	226.088	244.322	276.452	308.582	340.712	372.842
0.30 × 1.10	3300	792	138.146	154.976	188.636	236.854	255.956	289.616	323.276	356.936	390.596
0.30 × 1.20	3600	864	150.705	169.065	205.785	258.386	279.225	315.945	352.665	389.385	426.105
0.30 × 1.30	3900	936	163.264	183.154	222.934	279.919	302.494	342.274	382.054	421.834	461.614
0.30 × 1.40	4200	1008	175.823	197.243	240.083	301.451	325.763	368.603	411.443	454.283	497.123
0.30 × 1.50	4500	1080	188.381	211.331	257.231	322.983	349.031	394.931	440.831	486.731	532.631
0.30 × 1.60	4800	1152	200.940	225.420	274.380	344.515	372.300	421.260	470.220	519.180	568.140
0.30 × 1.70	5100	1224	213.499	239.509	291.529	366.047	395.569	447.589	499.609	551.629	603.649
0.30 × 1.80	5400	1296	226.058	253.598	308.678	387.580	418.838	473.918	528.998	584.078	639.158
0.30 × 1.90	5700	1368	238.616	267.686	325.826	409.112	442.106	500.246	558.386	616.526	674.666
0.30 × 2.00	6000	1440	251.175	281.775	342.975	430.644	465.375	526.575	587.775	648.975	710.175
0.30 × 2.10	6300	1512	263.734	295.864	360.124	452.176	488.644	552.904	617.164	681.424	745.684
0.30 × 2.20	6600	1584	276.293	309.953	377.273	473.708	511.913	579.233	646.553	713.873	781.193

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.35 × 0.35	1225	294	51.282	57.529	70.024	87.923	95.014	107.509	120.004	132.499	144.994
0.35 × 0.40	1400	336	58.608	65.748	80.028	100.484	108.588	122.868	137.148	151.428	165.708
0.35 × 0.45	1575	378	65.933	73.966	90.031	113.044	122.161	138.226	154.291	170.356	186.421
0.35 × 0.50	1750	420	73.259	82.184	100.034	125.605	135.734	153.584	171.434	189.284	207.134
0.35 × 0.55	1925	462	80.585	90.403	110.038	138.165	149.308	168.943	188.578	208.213	227.848
0.35 × 0.60	2100	504	87.911	98.621	120.041	150.725	162.881	184.301	205.721	227.141	248.561
0.35 × 0.65	2275	546	95.237	106.840	130.045	163.286	176.455	199.660	222.865	246.070	269.275
0.35 × 0.70	2450	588	102.563	115.058	140.048	175.846	190.028	215.018	240.008	264.998	289.988
0.35 × 0.75	2625	630	109.889	123.277	150.052	188.407	203.602	230.377	257.152	283.927	310.702
0.35 × 0.80	2800	672	117.215	131.495	160.055	200.967	217.175	245.735	274.295	302.855	331.415
0.35 × 0.85	2975	714	124.541	139.713	170.058	213.528	230.748	261.093	291.438	321.783	352.128
0.35 × 0.90	3150	756	131.857	147.932	180.062	226.088	244.322	276.452	308.582	340.712	372.842
0.35 × 0.95	3325	798	139.193	156.150	190.065	238.649	257.895	291.810	325.725	359.640	393.555
0.35 × 1.00	3500	840	146.519	164.369	200.069	251.209	271.469	307.169	342.869	378.569	414.269
0.35 × 1.05	3675	882	153.845	172.587	210.072	263.769	285.042	322.527	360.012	397.497	434.982
0.35 × 1.10	3850	924	161.171	180.806	220.076	276.330	298.616	337.886	377.156	416.426	455.696
0.35 × 1.20	4200	1008	175.823	197.243	240.083	301.451	325.763	368.603	411.443	454.283	497.123
0.35 × 1.30	4550	1092	190.474	213.679	260.089	326.572	352.909	399.319	445.729	492.139	538.549
0.35 × 1.40	4900	1176	205.126	230.116	280.096	351.693	380.056	430.036	480.016	529.996	579.976
0.35 × 1.50	5250	1260	219.778	246.553	300.103	376.814	407.203	460.753	514.303	567.853	621.403
0.35 × 1.60	5600	1344	234.430	262.990	320.110	401.934	434.350	491.470	548.590	605.710	662.830
0.35 × 1.70	5950	1428	249.082	279.427	340.117	427.055	461.497	522.187	582.877	643.567	704.257
0.35 × 1.80	6300	1512	263.734	295.864	360.124	452.176	488.644	552.904	617.164	681.424	745.684
0.35 × 1.90	6650	1596	278.386	312.301	380.131	477.297	515.791	583.621	651.451	719.281	787.111
0.35 × 2.00	7000	1680	293.038	328.738	400.138	502.418	542.938	614.338	685.738	757.138	828.538
0.35 × 2.10	7350	1764	307.689	345.174	420.144	527.539	570.084	645.054	720.024	794.994	869.964
0.35 × 2.20	7700	1848	322.341	361.611	440.151	552.660	597.231	675.771	754.311	832.851	911.391
0.35 × 2.30	8050	1932	336.993	378.048	460.158	577.781	624.378	706.488	788.598	870.708	952.818

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.40 × 0.40	1600	384	66.980	75.140	91.460	114.838	124.100	140.420	156.740	173.060	189.380
0.40 × 0.45	1800	432	75.353	84.533	102.893	129.193	139.613	157.973	176.333	194.693	213.053
0.40 × 0.50	2000	480	83.725	93.925	114.325	143.548	155.125	175.525	195.925	216.325	236.725
0.40 × 0.55	2200	528	92.098	103.318	128.758	157.903	170.638	193.078	215.518	237.958	260.398
0.40 × 0.60	2400	576	100.470	112.710	137.190	172.258	186.150	210.630	235.110	259.590	284.070
0.40 × 0.65	2600	624	108.843	122.103	148.623	186.612	201.663	228.183	254.703	281.223	307.743
0.40 × 0.70	2800	672	117.215	131.495	160.055	200.967	217.175	245.735	274.295	302.855	331.415
0.40 × 0.75	3000	720	125.588	140.888	171.488	215.322	232.688	263.288	293.888	324.488	355.088
0.40 × 0.80	3200	768	133.960	150.280	182.920	229.677	248.200	280.840	313.480	346.120	378.760
0.40 × 0.85	3400	816	142.333	159.673	194.353	244.032	263.713	298.393	333.073	367.753	402.433
0.40 × 0.90	3600	864	150.705	169.065	205.785	258.386	279.225	315.945	352.665	389.385	426.105
0.40 × 0.95	3800	912	159.078	178.458	217.218	272.741	294.738	333.498	372.258	411.018	449.778
0.40 × 1.00	4000	960	167.450	187.850	228.650	287.096	310.250	351.050	391.850	432.650	473.450
0.40 × 1.05	4200	1008	175.823	197.243	240.083	301.451	325.763	368.603	411.443	454.283	497.123
0.40 × 1.10	4400	1056	184.195	206.635	251.515	315.806	341.275	386.155	431.035	475.915	520.795
0.40 × 1.20	4800	1152	200.940	225.420	274.380	344.515	372.300	421.260	470.220	519.180	568.140
0.40 × 1.30	5200	1248	217.685	244.205	297.245	373.225	403.325	456.365	509.405	562.445	615.485
0.40 × 1.40	5600	1344	234.430	262.990	320.110	401.934	434.350	491.470	548.590	605.710	662.830
0.40 × 1.50	6000	1440	251.175	281.775	342.975	430.644	465.375	526.575	587.775	648.975	710.175
0.40 × 1.60	6400	1536	267.920	300.560	365.840	459.354	496.400	561.680	626.960	692.240	757.520
0.40 × 1.70	6800	1632	284.665	319.345	388.705	488.063	527.425	596.785	666.145	735.505	804.865
0.40 × 1.80	7200	1728	301.410	338.130	411.570	516.773	558.450	631.890	705.330	778.770	852.210
0.40 × 1.90	7600	1824	318.155	356.915	434.435	545.482	589.475	666.995	744.515	822.035	899.555
0.40 × 2.00	8000	1920	334.900	375.700	457.300	574.192	620.500	702.100	783.700	865.300	946.900
0.40 × 2.10	8400	2016	351.645	394.485	480.165	602.902	651.525	737.205	822.885	908.565	994.245
0.40 × 2.20	8800	2112	368.390	413.270	503.030	631.611	682.550	772.310	862.070	951.830	1041.59
0.40 × 2.30	9200	2208	385.135	432.055	525.895	660.321	713.575	807.415	901.255	995.095	1088.94
0.40 × 2.40	9600	2304	401.880	450.840	548.760	689.030	744.600	842.520	940.440	1038.36	1136.28

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.45 × 0.45	2025	486	84.772	95.099	115.754	145.342	157.064	177.719	198.374	219.029	239.684
0.45 × 0.50	2250	540	94.191	105.666	128.616	161.492	174.516	197.466	220.416	243.366	266.316
0.45 × 0.55	2475	594	103.610	116.232	141.477	177.641	191.967	217.212	242.457	267.702	292.947
0.45 × 0.60	2700	648	113.029	126.799	154.339	193.790	209.419	236.959	264.499	292.039	319.579
0.45 × 0.65	2925	702	122.448	137.365	167.200	209.939	226.870	256.705	286.540	316.375	346.210
0.45 × 0.70	3150	756	131.867	147.932	180.062	226.088	244.322	276.452	308.582	340.712	372.842
0.45 × 0.75	3375	810	141.286	158.498	192.923	242.237	261.773	296.198	330.623	365.048	399.473
0.45 × 0.80	3600	864	150.705	169.065	205.785	258.386	279.225	315.945	352.665	389.385	426.105
0.45 × 0.85	3825	918	160.124	179.632	218.647	274.536	296.677	335.692	374.707	413.722	452.737
0.45 × 0.90	4050	972	169.543	190.198	231.508	290.685	314.128	355.438	396.748	438.058	479.368
0.45 × 0.95	4275	1026	178.962	200.765	244.370	306.834	331.580	375.185	418.790	462.395	406.000
0.45 × 1.00	4500	1080	188.381	211.331	257.231	322.983	349.031	394.931	440.831	486.731	532.631
0.45 × 1.05	4725	1134	197.800	221.898	270.093	339.132	366.483	414.678	462.873	511.068	559.263
0.45 × 1.10	4950	1188	207.219	232.464	282.954	355.281	383.934	434.424	484.914	535.404	585.894
0.45 × 1.20	5400	1296	226.058	253.598	308.678	387.580	418.838	473.918	528.998	584.078	639.158
0.45 × 1.30	5850	1404	244.896	274.731	334.401	419.878	453.741	513.411	573.081	632.751	692.421
0.45 × 1.40	6300	1512	263.734	295.864	360.124	452.176	488.644	552.904	617.164	681.424	745.684
0.45 × 1.50	6750	1620	282.572	316.997	385.847	484.475	523.547	592.397	661.247	730.097	798.947
0.45 × 1.60	7200	1728	301.410	338.130	411.570	516.773	558.450	631.890	705.330	778.770	852.210
0.45 × 1.70	7650	1836	320.248	359.263	437.293.	549.071	593.353	671.383	749.413	827.443	905.473
0.45 × 1.80	8100	1944	339.086	380.396	463.016	581.369	628.256	710.876	793.496	876.116	958.736
0.45 × 1.90	8550	2052	357.924	401.529	488.739	613.668	663.159	750.369	837.579	924.789	1011.999
0.45 × 2.00	9000	2160	376.763	422.663	514.463	645.966	698.063	789.863	881.663	973.463	1065.263
0.45 × 2.10	9450	2268	395.601	443.796	540.186	678.264	732.966	829.356	925.746	1022.136	1118.526
0.45 × 2.20	9900	2376	414.439	464.929	565.909	710.563	767.869	868.849	969.829	1070.809	1171.789
0.45 × 2.30	10350	2484	433.277	486.062	591.632	742.861	802.772	908.342	1013.912	1119.482	1225.052
0.45 × 2.40	10800	2592	452.115	507.195	617.355	775.159	837.675	947.835	1057.995	1168.155	1278.315
0.45 × 2.50	11250	2700	470.953	528.328	643.078	807.458	872.578	987.328	1102.078	1216.828	1331.578

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.50 × 0.50	2500	600	104.656	117.406	142.906	179.435	193.906	219.406	244.906	270.406	295.906
0.50 × 0.55	2750	660	115.122	129.147	157.197	197.379	213.297	241.347	269.397	297.447	325.497
0.50 × 0.60	3000	720	125.588	140.888	171.488	215.322	232.688	263.288	293.888	324.488	355.088
0.50 × 0.65	3250	780	136.053	152.628	185.778	233.266	252.078	285.228	318.378	351.528	384.678
0.50 × 0.70	3500	840	146.519	164.369	200.069	251.209	271.469	307.169	342.869	378.569	414.269
0.50 × 0.75	3750	900	156.984	176.109	214.359	269.153	290.859	329.109	367.359	405.609	443.859
0.50 × 0.80	4000	960	167.450	187.850	228.650	287.096	310.250	351.050	391.850	432.650	473.450
0.50 × 0.85	4250	1020	177.916	199.591	242.941	305.040	329.641	372.991	416.341	459.691	503.041
0.50 × 0.90	4500	1080	188.381	211.331	257.231	322.983	349.031	394.931	440.831	486.731	532.631
0.50 × 0.95	4750	1140	198.847	223.072	271.522	340.927	368.422	416.872	465.322	513.772	562.222
0.50 × 1.00	5000	1200	209.313	234.813	285.813	358.870	387.813	438.813	489.813	540.813	591.813
0.50 × 1.05	5250	1260	219.778	246.553	300.103	376.814	407.203	460.753	514.303	567.853	621.403
0.50 × 1.10	5500	1320	230.244	258.294	314.394	394.757	426.594	482.694	538.794	594.894	650.994
0.50 × 1.20	6000	1440	251.175	281.775	342.975	430.644	465.375	526.575	587.775	648.975	710.175
0.50 × 1.30	6500	1560	272.106	305.256	371.556	466.531	504.156	570.456	636.756	703.056	769.356
0.50 × 1.40	7000	1680	293.038	328.738	400.138	502.418	542.938	614.338	685.738	757.138	828.538
0.50 × 1.50	7500	1800	313.969	352.219	428.719	538.305	581.719	658.219	734.719	811.219	887.719
0.50 × 1.60	8000	1920	334.900	375.700	457.300	574.192	620.500	702.100	783.700	865.300	946.900
0.50 × 1.70	8500	2040	355.831	399.181	485.881	610.079	659.281	745.981	832.681	919.381	1006.081
0.50 × 1.80	9000	2160	376.763	422.663	514.463	645.966	698.063	789.863	881.663	973.463	1065.263
0.50 × 1.90	9500	2280	397.694	446.144	543.044	681.853	736.844	833.744	930.644	1027.544	1124.444
0.50 × 2.00	10000	2400	418.625	469.625	571.625	717.740	775.625	877.625	979.625	1081.625	1183.625
0.50 × 2.10	10500	2520	439.556	493.106	600.206	753.627	814.406	921.506	1028.606	1135.706	1242.806
0.50 × 2.20	11000	2640	460.488	516.588	628.788	789.514	853.188	965.388	1077.588	1189.788	1301.988
0.50 × 2.30	11500	2760	481.419	540.069	657.369	825.401	891.969	1009.269	1126.569	1243.869	1361.169
0.50 × 2.40	12000	2880	502.350	563.550	685.950	861.288	930.750	1053.150	1175.550	1297.950	1420.350
0.50 × 2.50	12500	3000	523.281	587.031	714.531	897.175	969.531	1097.031	1224.531	1352.031	1479.531
0.50 × 2.60	13000	3120	544.213	610.513	743.113	933.062	1008.313	1140.913	1273.513	1406.113	1538.713

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.55 × 0.55	3300	792	138.146	154.976	188.636	236.854	255.956	289.616	323.276	256.936	390.596
0.55 × 0.60	3575	858	149.658	167.891	204.356	256.592	277.286	313.751	350.216	386.681	423.146
0.55 × 0.65	3850	924	161.171	180.806	220.076	276.330	298.616	337.886	377.156	416.426	455.696
0.55 × 0.70	4125	990	172.683	193.720	235.795	296.068	319.945	362.020	404.095	446.170	488.245
0.55 × 0.75	4400	1056	184.195	206.635	251.515	315.806	341.275	386.155	431.035	475.915	520.795
0.55 × 0.80	4675	1122	195.707	219.550	267.235	335.543	362.605	410.290	457.975	505.660	553.345
0.55 × 0.85	4950	1188	207.219	232.464	282.954	355.281	383.934	434.424	484.914	535.404	585.894
0.55 × 0.90	5225	1254	218.732	245.379	298.674	375.019	405.264	458.559	511.854	565.149	618.444
0.55 × 0.95	5500	1320	230.244	258.294	314.394	394.757	426.594	482.694	538.794	594.894	650.994
0.55 × 1.00	5775	1386	241.756	271.208	330.113	414.495	447.923	506.828	565.733	624.638	683.543
0.55 × 1.05	6050	1452	253.268	284.123	345.833	434.233	469.253	530.963	592.673	654.383	716.093
0.55 × 1.10	6600	1584	276.293	309.953	377.273	473.708	511.913	579.233	646.553	713.873	781.193
0.55 × 1.20	7150	1716	299.317	335.782	408.712	513.184	554.572	627.502	700.432	773.362	846.292
0.55 × 1.30	7700	1848	322.341	361.611	440.151	552.660	597.231	675.771	754.311	832.851	911.391
0.55 × 1.40	8250	1980	345.366	387.441	471.591	592.136	639.891	724.041	808.191	892.341	976.491
0.55 × 1.50	8800	2112	368.390	413.270	503.030	631.611	682.550	772.310	862.070	951.830	1041.590
0.55 × 1.60	9350	2244	391.414	439.099	534.469	671.087	725.209	820.579	915.949	1011.319	1106.689
0.55 × 1.70	9900	2376	414.439	464.929	565.909	710.563	767.869	868.849	969.829	1070.809	1171.789
0.55 × 1.80	10450	2508	437.463	490.758	597.348	750.038	810.528	917.118	1023.708	1130.298	1236.888
0.55 × 1.90	11000	2640	460.488	516.588	628.788	789.514	853.188	965.388	1077.588	1189.788	1301.988
0.55 × 2.00	11550	2772	483.512	542.417	660.227	828.990	895.847	1013.657	1131.467	1249.277	1367.087
0.55 × 2.10	12100	2904	506.536	568.246	691.666	868.465	938.506	1061.926	1185.346	1308.766	1432.186
0.55 × 2.20	12650	3036	529.561	594.076	723.106	907.941	981.166	1110.196	1239.226	1368.256	1497.286
0.55 × 2.30	13200	3168	552.585	619.905	754.545	947.417	1023.825	1158.465	1293.105	1427.745	1562.385
0.55 × 2.40	13750	3300	575.609	645.734	785.984	986.893	1066.484	1206.734	1346.984	1487.234	1627.484
0.55 × 2.50	14300	3432	598.634	671.564	817.424	1026.368	1109.144	1255.004	1400.864	1546.724	1692.584
0.55 × 2.60	14850	3564	621.658	697.393	848.863	1065.844	1151.803	1303.273	1454.743	1606.213	1757.683
0.55 × 2.70	15400	3696	644.683	723.223	880.303	1105.320	1194.463	1351.543	1508.623	1665.703	1822.783

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.60 × 0.60	3600	864	150.705	169.065	205.785	258.386	279.225	315.945	352.665	389.385	426.105
0.60 × 0.65	3900	936	163.264	183.154	222.934	279.919	302.494	342.274	382.054	421.834	461.614
0.60 × 0.70	4200	1008	175.823	197.243	240.083	301.451	325.763	368.603	411.443	454.283	497.123
0.60 × 0.75	4500	1080	188.381	211.331	257.231	322.983	349.031	394.931	440.831	486.731	532.631
0.60 × 0.80	4800	1152	200.940	225.420	274.380	344.515	372.300	421.260	470.220	519.180	568.140
0.60 × 0.85	5100	1224	213.499	239.509	291.529	366.047	395.569	447.589	499.609	551.629	603.649
0.60 × 0.90	5400	1296	226.058	253.598	308.678	387.580	418.838	473.918	528.998	584.078	639.158
0.60 × 0.95	5700	1368	238.616	267.686	325.826	409.112	442.106	500.246	558.386	616.526	674.666
0.60 × 1.00	6000	1440	251.175	281.775	342.975	430.644	465.375	526.575	587.775	648.975	710.175
0.60 × 1.05	6300	1512	263.7344	295.864	360.124	452.176	488.644	552.904	617.164	681.424	745.684
0.60 × 1.10	6600	1584	276.293	309.953	377.273	473.708	511.913	579.233	646.553	713.873	781.193
0.60 × 1.20	7200	1728	301.410	338.130	411.570	516.773	558.450	631.890	705.330	778.770	852.210
0.60 × 1.30	7800	1872	326.528	366.308	445.868	559.837	604.988	684.548	764.108	843.668	923.228
0.60 × 1.40	8400	2016	351.645	394.485	480.165	602.902	651.525	737.205	822.885	908.565	994.245
0.60 × 1.50	9000	2160	376.763	422.663	514.463	645.966	698.063	789.863	881.663	973.463	1065.263
0.60 × 1.60	9600	2304	401.880	450.840	548.760	689.030	744.600	842.520	940.440	1038.360	1136.280
0.60 × 1.70	10200	2448	426.998	479.018	583.058	732.095	791.138	895.178	999.218	1103.258	1207.298
0.60 × 1.80	10800	2592	452.115	507.195	617.355	775.159	837.675	947.835	1057.995	1168.155	1278.315
0.60 × 1.90	11400	2736	477.233	535.373	651.653	818.224	884.213	1000.493	1116.773	1233.053	1349.333
0.60 × 2.00	12000	2880	502.350	563.550	685.950	861.288	930.750	1053.150	1175.550	1297.950	1420.350
0.60 × 2.10	12600	3024	527.468	591.728	720.248	904.352	977.288	1105.808	1234.328	1362.848	1491.368
0.60 × 2.20	13200	3168	552.585	619.905	754.545	947.417	1023.825	1158.465	1293.105	1427.745	1562.385
0.60 × 2.30	13800	3312	577.703	648.083	788.843	990.481	1070.363	1211.123	1351.883	1492.643	1633.403
0.60 × 2.40	14400	3456	602.820	676.260	823.140	1033.546	1116.900	1263.780	1410.660	1557.540	1704.420
0.60 × 2.50	15000	3600	627.938	704.438	857.438	1076.610	1163.438	1316.438	1469.438	1622.438	1775.438
0.60 × 2.60	15600	3744	653.055	732.615	891.735	1119.674	1209.975	1369.095	1528.215	1687.335	1846.455
0.60 × 2.70	16200	3888	678.173	760.793	926.033	1162.739	1256.513	1421.753	1586.993	1752.233	1917.473
0.60 × 2.80	16800	4032	703.290	788.970	960.330	1205.803	1303.050	1474.410	1645.770	1817.130	1988.490

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.65 × 0.65	4225	1014	176.869	198.417	241.512	303.245	327.702	370.797	413.892	456.987	500.082
0.65 × 0.70	4550	1092	190.474	213.679	260.089	326.572	352.909	399.319	445.729	492.139	538.549
0.65 × 0.75	4875	1170	204.080	228.942	278.667	349.898	378.117	427.842	477.567	527.292	577.017
0.65 × 0.80	5200	1248	217.685	244.205	297.245	373.225	403.325	456.365	509.405	562.445	615.485
0.65 × 0.85	5525	1326	231.290	259.468	315.823	396.551	428.533	484.888	541.243	597.598	653.953
0.65 × 0.90	5850	1404	244.896	274.731	334.401	419.878	453.741	513.411	573.081	632.751	692.421
0.65 × 0.95	6175	1482	258.501	289.993	352.978	443.204	478.948	541.933	604.918	667.903	730.888
0.65 × 1.00	6500	1560	272.106	305.256	371.556	466.531	504.156	570.456	636.756	703.056	769.356
0.65 × 1.05	6825	1638	285.712	320.519	390.134	489.858	529.364	598.979	668.594	738.209	807.824
0.65 × 1.10	7150	1716	299.317	335.782	408.712	513.184	554.572	627.502	700.432	773.362	846.292
0.65 × 1.20	7800	1872	326.528	366.308	445.868	559.837	604.988	684.548	764.108	843.668	923.228
0.65 × 1.30	8450	2028	353.738	396.833	483.023	606.490	655.403	741.593	827.783	913.973	1000.163
0.65 × 1.40	9100	2184	380.949	427.359	520.179	653.143	705.819	798.639	891.459	984.279	1077.099
0.65 × 1.50	9750	2340	408.159	457.884	557.334	699.797	756.234	855.684	955.134	1054.584	1154.034
0.65 × 1.60	10400	2496	435.370	488.410	594.490	746.450	806.650	912.730	1018.810	1124.890	1230.970
0.65 × 1.70	11050	2652	462.581	518.936	631.646	793.103	857.066	969.776	1082.486	1195.196	1307.906
0.65 × 1.80	11700	2808	489.791	549.461	668.801	839.756	907.481	1026.821	1146.161	1265.501	1384.841
0.65 × 1.90	12350	2964	517.002	579.987	705.957	886.409	957.897	1083.867	1209.837	1335.807	1461.777
0.65 × 2.00	13000	3120	544.213	610.513	743.113	933.062	1008.313	1140.913	1273.513	1406.113	1538.713
0.65 × 2.10	13650	3276	571.423	641.038	780.268	979.715	1058.728	1197.958	1337.188	1476.418	1615.648
0.65 × 2.20	14300	3432	598.634	671.564	817.424	1026.368	1109.144	1255.004	1400.864	1546.724	.1692.584
0.65 × 2.30	14950	3588	625.844	702.089	854.579	1073.021	1159.559	1312.049	1464.539	1617.029	1769.519
0.65 × 2.40	15600	3744	653.055	732.615	891.735	1119.674	1209.975	1369.095	1528.215	1687.335	1846.455
0.65 × 2.50	16250	3900	680.266	763.141	928.891	1166.328	1260.391	1426.141	1591.891	1757.641	1923.391
0.65 × 2.60	16900	4056	707.476	793.666	966.046	1212.981	1310.806	1483.186	1655.566	1827.946	2000.326
0.65 × 2.70	17550	4212	734.687	824.192	1003.202	1259.634	1361.222	1540.232	1719.242	1898.252	2077.262
0.65 × 2.80	18200	4368	761.898	854.718	1040.358	1306.287	1411.638	1597.278	1782.918	1968.558	2154.198
0.65 × 2.90	18850	4524	789.108	885.243	1077.513	1352.940	1462.053	1654.323	1846.593	2038.863	2231.133

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.70 × 0.70	4900	1176	205.126	230.116	280.096	351.693	380.056	430.036	480.016	529.996	579.976
0.70 × 0.75	5250	1260	219.778	246.553	300.103	376.814	407.203	460.753	514.303	567.853	621.403
0.70 × 0.80	5600	1344	234.430	262.990	320.110	401.934	434.350	491.470	548.590	605.710	662.830
0.70 × 0.85	5950	1428	249.082	279.427	340.117	427.055	461.497	522.187	582.877	643.567	704.257
0.70 × 0.90	6300	1512	263.734	295.864	360.124	452.176	488.644	552.904	617.164	681.424	745.684
0.70 × 0.95	6650	1596	278.386	312.301	380.131	477.297	515.791	583.621	651.451	719.281	787.111
0.70 × 1.00	7000	1680	293.038	328.738	400.138	502.418	542.938	614.338	685.738	757.138	828.538
0.70 × 1.05	7350	1764	307.689	345.174	420.144	527.539	570.084	645.054	720.024	794.994	869.964
0.70 × 1.10	7700	1848	322.341	361.611	440.151	552.660	597.231	675.771	754.311	832.851	911.391
0.70 × 1.20	8400	2016	351.645	394.485	480.165	602.902	651.525	737.205	822.885	908.565	994.245
0.70 × 1.30	9100	2184	380.949	427.359	520.179	653.143	705.819	798.639	891.459	984.279	1077.099
0.70 × 1.40	9800	2352	410.253	460.233	560.193	703.385	760.113	860.073	960.033	1059.993	1159.953
0.70 × 1.50	10500	2520	439.556	493.106	600.206	753.627	814.406	921.506	1028.606	1135.706	1242.806
0.70 × 1.60	11200	2688	468.860	525.980	640.220	803.869	868.700	982.940	1097.180	1211.420	1325.660
0.70 × 1.70	11900	2856	498.164	558.854	680.234	854.111	922.994	1044.374	1165.754	1287.134	1408.514
0.70 × 1.80	12600	3024	527.468	591.728	720.248	904.352	977.288	1105.808	1234.328	1362.848	1491.368
0.70 × 1.90	13300	3192	556.771	624.601	760.261	954.594	1031.581	1167.241	1302.901	1438.561	1574.221
0.70 × 2.00	14000	3360	586.075	657.475	800.275	1004.836	1085.875	1228.675	1371.475	1514.275	1657.075
0.70 × 2.10	14700	3528	615.379	690.349	840.289	1055.078	1140.169	1290.109	1440.049	1589.989	1739.929
0.70 × 2.20	15400	3696	644.683	723.223	880.303	1105.320	1194.463	1351.543	1508.623	1665.703	1822.783
0.70 × 2.30	16100	3864	673.986	756.096	920.316	1155.561	1248.756	1412.976	1577.196	1741.416	1905.636
0.70 × 2.40	16800	4032	703.290	788.970	960.330	1205.803	1303.050	1474.410	1645.770	1817.130	1988.490
0.70 × 2.50	17500	4200	732.594	821.844	1000.344	1256.045	1357.344	1535.844	1714.344	1892.844	2071.344
0.70 × 2.60	18200	4368	761.898	854.718	1040.358	1306.287	1411.638	1597.278	1782.918	1968.558	2154.198
0.70 × 2.70	18900	4536	791.201	887.591	1080.371	1356.529	1465.931	1658.711	1851.491	2044.271	2237.051
0.70 × 2.80	19600	4704	820.505	920.465	1120.385	1406.770	1520.225	1720.145	1920.065	2119.985	2319.905
0.70 × 2.90	20300	4872	849.809	953.339	1160.399	1457.012	1574.519	1781.579	1988.639	2195.699	2402.759
0.70 × 3.00	21000	5040	879.113	986.213	1200.413	1507.254	1628.813	1843.013	2057.213	2271.413	2485.613

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.75 × 0.75	5625	1350	235.477	264.164	321.539	403.729	436.289	493.664	551.039	608.414	665.789
0.75 × 0.80	6000	1440	251.175	281.775	342.973	430.644	465.375	526.575	587.775	648.975	710.175
0.75 × 0.85	6375	1530	266.873	299.386	364.411	457.559	494.461	559.486	624.511	689.536	754.561
0.75 × 0.90	6750	1620	282.572	316.997	385.847	484.475	523.547	592.397	661.247	730.097	798.947
0.75 × 0.95	7125	1710	298.270	334.608	407.283	511.390	552.633	625.308	697.983	770.658	843.333
0.75 × 1.00	7500	1800	313.969	352.219	428.719	538.305	581.719	658.219	734.719	811.219	887.719
0.75 × 1.05	7875	1890	329.667	369.830	450.155	565.220	610.805	691.130	771.455	851.780	932.105
0.75 × 1.10	8250	1980	345.366	387.441	471.591	592.136	639.891	724.041	808.191	892.341	976.491
0.75 × 1.20	9000	2160	376.763	422.663	514.463	645.966	698.063	789.863	881.663	973.463	1065.263
0.75 × 1.30	9750	2340	408.159	457.884	557.334	699.797	756.234	855.684	955.134	1054.584	1154.034
0.75 × 1.40	10500	2520	439.556	493.106	600.206	753.627	814.406	921.506	1028.606	1135.706	1242.806
0.75 × 1.50	11250	2700	470.953	528.328	643.078	807.458	872.578	987.328	1102.078	1216.828	1331.578
0.75 × 1.60	12000	2880	502.350	563.550	685.950	861.288	930.750	1053.150	1175.550	1297.950	1420.350
0.75 × 1.70	12750	3060	533.747	598.772	728.822	915.119	988.922	1118.972	1249.022	1379.072	1509.122
0.75 × 1.80	13500	3240	565.144	633.994	771.694	968.949	1047.094	1184.794	1322.494	1460.194	1597.894
0.75 × 1.90	14250	3420	596.541	669.216	814.566	1022.780	1105.266	1250.616	1395.966	1541.316	1686.666
0.75 × 2.00	15000	3600	627.938	704.438	857.438	1076.610	1163.438	1316.438	1469.438	1622.438	1775.438
0.75 × 2.10	15750	3780	659.334	739.659	900.309	1130.441	1221.609	1382.259	1542.909	1703.559	1864.209
0.75 × 2.20	16500	3960	690.731	774.881	943.181	1184.271	1279.781	1448.081	1616.381	1784.681	1952.981
0.75 × 2.30	17250	4140	722.128	810.103	986.053	1238.102	1337.953	1513.903	1689.853	1865.803	2041.753
0.75 × 2.40	18000	4320	753.525	845.325	1028.925	1291.932	1396.125	1579.725	1763.325	1946.925	2130.525
0.75 × 2.50	18750	4500	784.922	880.547	1071.797	1345.763	1454.297	1645.547	1836.797	2028.047	2219.297
0.75 × 2.60	19500	4680	816.319	915.769	1114.669	1399.593	1512.469	1711.369	1910.269	2109.169	2308.069
0.75 × 2.70	20250	4860	847.716	950.991	1157.541	1453.424	1570.641	1777.191	1983.741	2190.291	2396.841
0.75 × 2.80	21000	5040	879.113	986.213	1200.413	1507.254	1628.813	1843.013	2057.213	2271.413	2485.613
0.75 × 2.90	21750	5220	910.509	1021.434	1243.284	1561.085	1686.984	1908.834	2130.684	2352.534	2574.384
0.75 × 3.00	22500	5400	941.906	1056.656	1286.156	1614.915	1745.156	1974.656	2204.156	2433.656	2663.156
0.75 × 3.10	23250	5580	973.303	1091.878	1329.028	1668.746	1803.328	2040.478	2277.628	2514.778	2751.928

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.80 × 0.80	6400	1536	367.920	300.560	365.840	459.354	496.400	561.680	626.960	692.240	757.520
0.80 × 0.85	6800	1632	284.665	319.345	388.705	488.063	527.425	596.785	666.145	735.505	804.865
0.80 × 0.90	7200	1728	301.410	338.130	411.570	516.773	558.450	631.890	705.330	778.770	852.210
0.80 × 0.95	7600	1824	318.155	356.915	434.435	545.482	589.475	666.995	744.515	822.035	899.555
0.80 × 1.00	8000	1920	334.900	375.700	457.300	574.192	620.500	702.100	783.700	865.300	946.900
0.80 × 1.05	8400	2016	351.645	394.485	480.165	602.902	651.525	737.205	822.885	908.565	994.245
0.80 × 1.10	8800	2112	368.390	413.270	503.030	631.611	682.550	772.310	862.070	951.830	1041.590
0.80 × 1.20	9600	2304	401.880	450.840	548.760	689.030	744.600	842.520	940.440	1038.360	1136.280
0.80 × 1.30	10400	2496	435.370	488.410	594.490	746.450	806.650	912.730	1018.810	1124.890	1230.970
0.80 × 1.40	11200	2688	468.860	525.980	640.220	803.869	868.700	982.940	1097.180	1211.420	1325.660
0.80 × 1.50	12000	2880	502.350	563.550	685.950	861.288	930.750	1053.150	1175.550	1297.950	1420.350
0.80 × 1.60	12800	3072	535.840	601.120	731.680	918.707	992.800	1123.360	1253.920	1384.480	1515.040
0.80 × 1.70	13600	3264	569.330	638.690	777.410	976.126	1054.850	1193.570	1332.290	1471.010	1609.730
0.80 × 1.80	14400	3456	602.820	676.260	823.140	1033.546	1116.900	1263.780	1410.660	1557.540	1704.420
0.80 × 1.90	15200	3648	636.310	713.830	868.870	1090.965	1178.950	1333.990	1489.030	1644.070	1799.110
0.80 × 2.00	16000	3840	669.800	751.400	914.600	1148.384	1241.000	1404.200	1567.400	1730.600	1893.800
0.80 × 2.10	16800	4032	703.290	788.970	960.330	1205.803	1303.050	1474.410	1645.770	1817.130	1988.490
0.80 × 2.20	17600	4224	736.780	826.540	1006.060	1263.222	1365.100	1544.620	1724.140	1903.660	2083.180
0.80 × 2.30	18400	4416	770.270	864.110	1051.790	1320.642	1427.150	1614.830	1802.510	1990.190	2177.870
0.80 × 2.40	19200	4608	803.760	901.680	1097.520	1378.061	1489.200	1685.040	1880.880	2076.720	2272.560
0.80 × 2.50	20000	4800	837.250	939.250	1143.250	1435.480	1551.250	1755.250	1959.250	2163.250	2367.250
0.80 × 2.60	20800	4992	870.740	976.820	1188.980	1492.899	1613.300	1825.460	2037.620	2249.780	2461.940
0.80 × 2.70	21600	5182	904.230	1014.390	1234.710	1550.318	1675.350	1895.670	2115.990	2336.310	2556.630
0.80 × 2.80	22400	5376	937.720	1051.960	1280.440	1607.738	1737.400	1965.880	2194.360	2422.840	2651.320
0.80 × 2.90	23200	5568	971.210	1089.530	1326.170	1665.157	1799.450	2036.090	2272.730	2509.370	2746.010
0.80 × 3.00	24000	5760	1004.700	1127.100	1371.900	1722.576	1861.500	2106.300	2351.100	2595.900	2840.700
0.80 × 3.10	24800	5952	1038.190	1164.670	1417.630	1779.995	1923.550	2176.510	2429.470	2682.430	2935.390
0.80 × 3.20	25600	6144	1071.680	1202.240	1463.360	1837.414	1985.600	2246.720	2507.840	2768.960	3030.080

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.85 × 0.85	7225	1734	302.457	339.304	412.999	518.567	560.389	634.084	707.779	781.474	855.169
0.85 × 0.90	7650	1836	320.248	359.263	437.293	549.071	593.353	671.383	749.413	827.443	905.473
0.85 × 0.95	8075	1938	338.040	379.222	461.587	579.575	626.317	708.682	791.047	873.412	955.777
0.85 × 1.00	8500	2040	355.831	399.181	485.881	610.079	659.281	745.981	832.681	919.381	1006.081
0.85 × 1.05	8925	2142	373.623	419.140	510.175	640.583	692.245	783.280	874.315	965.350	1056.385
0.85 × 1.10	9350	2244	391.414	439.099	534.469	671.087	725.209	820.579	915.949	1011.319	1106.689
0.85 × 1.20	10200	2448	426.998	479.018	583.058	732.095	791.138	895.178	999.218	1103.258	1207.298
0.85 × 1.30	11050	2652	462.581	518.936	631.646	793.103	857.066	969.776	1082.486	1195.196	1307.906
0.85 × 1.40	11900	2856	498.164	558.854	680.234	854.111	922.994	1044.374	1165.754	1287.134	1408.514
0.85 × 1.50	12750	3060	533.747	598.772	728.822	915.119	988.922	1118.972	1249.022	1379.072	1509.122
0.85 × 1.60	13600	3264	569.330	638.690	777.410	976.126	1054.850	1193.570	1332.290	1471.010	1609.730
0.85 × 1.70	14450	3468	604.913	678.608	825.998	1037.134	1120.778	1268.168	1415.558	1562.948	1710.338
0.85 × 1.80	15300	3672	640.496	718.526	874.586	1098.142	1186.706	1342.766	1498.826	1654.886	1810.946
0.85 × 1.90	16150	3876	676.079	758.444	923.174	1159.150	1252.634	1417.364	1582.094	1746.824	1911.554
0.85 × 2.00	17000	4080	711.663	798.363	971.763	1220.158	1318.563	1491.963	1665.363	1838.763	2012.163
0.85 × 2.10	17850	4284	747.246	838.281	1020.351	1281.166	1384.491	1566.561	1748.631	1930.701	2112.771
0.85 × 2.20	18700	4488	782.829	878.199	1068.939	1342.174	1450.419	1641.159	1831.899	2022.639	2213.379
0.85 × 2.30	19550	4692	818.412	918.117	1117.527	1403.182	1516.347	1715.757	1915.167	2114.577	2313.987
0.85 × 2.40	20400	4896	8536.995	958.035	1166.115	1464.190	1582.275	1790.355	1998.435	2206.515	2414.595
0.85 × 2.50	21250	5100	889.578	997.953	1214.703	1525.198	1648.203	1864.953	2081.703	2298.453	2515.203
0.85 × 2.60	22100	5304	925.161	1037.871	1263.291	1586.205	1714.131	1939.551	2164.971	2390.391	2615.811
0.85 × 2.70	22950	5508	960.744	1077.789	1311.879	1647.213	1780.059	2014.149	2248.239	2482.329	2716.419
0.85 × 2.80	23800	5712	996.328	1117.708	1360.468	1708.221	1845.988	2088.748	2331.508	2574.268	2817.028
0.85 × 2.90	24650	5916	1031.911	1157.626	1409.056	1769.229	1911.916	2163.346	2414.776	2666.206	2917.636
0.85 × 3.00	25500	6120	1067.494	1197.544	1457.644	1830.237	1977.844	2237.944	2498.044	2758.144	3018.244
0.85 × 3.10	26350	6324	1103.077	1237.462	1506.232	1891.245	2043.772	2312.542	2581.312	2850.082	3118.852
0.85 × 3.20	27200	6528	1138.660	1277.380	1554.820	1952.253	2109.700	2387.140	2664.580	2942.020	3219.460
0.85 × 3.30	28050	6732	1174.243	1317.298	1603.408	2013.261	2175.628	2461.738	2747.848	3033.958	3320.068

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.90 × 0.90	8100	1944	339.086	380.396	463.016	581.369	628.256	710.876	793.496	876.116	958.736
0.90 × 0.95	8550	2052	357.924	401.529	488.739	613.668	663.159	750.369	837.579	924.789	1011.999
0.90 × 1.00	9000	2160	376.763	422.663	514.463	645.966	698.063	789.863	881.663	973.463	1065.263
0.90 × 1.05	9450	2268	395.601	443.796	540.186	678.264	732.966	829.356	925.746	1022.136	1118.526
0.90 × 1.10	9900	2376	414.439	464.929	565.909	710.563	767.869	868.849	969.829	1070.809	1171.789
0.90 × 1.20	10800	2592	452.115	507.195	617.355	775.159	837.675	947.835	1057.995	1168.155	1278.315
0.90 × 1.30	11700	2808	489.791	549.461	668.801	839.756	907.481	1026.821	1146.161	1265.501	1384.841
0.90 × 1.40	12600	3024	527.468	591.728	720.248	904.352	977.288	1105.808	1234.328	1362.848	1491.368
0.90 × 1.50	13500	3240	565.144	633.994	771.694	968.949	1047.094	1184.794	1322.494	1460.194	1597.894
0.90 × 1.60	14400	3456	602.820	676.260	823.140	1033.546	1116.900	1263.780	1410.660	1557.540	1704.420
0.90 × 1.70	15300	3672	640.496	718.526	874.586	1098.142	1186.706	1342.766	1498.826	1654.886	1810.946
0.90 × 1.80	16200	3888	678.173	760.793	926.033	1162.739	1256.513	1421.753	1586.993	1752.233	1917.473
0.90 × 1.90	17100	4104	715.849	803.059	977.479	1227.335	1326.319	1500.739	1675.159	1849.579	2023.999
0.90 × 2.00	18000	4320	753.525	845.325	1028.925	1291.932	1396.125	1579.725	1763.325	1946.925	2130.525
0.90 × 2.10	18900	4536	791.201	887.591	1080.371	1356.529	1465.931	1658.711	1851.491	2044.271	2237.051
0.90 × 2.20	19800	4752	828.878	929.858	1131.818	1421.125	1535.738	1737.698	1939.658	2141.618	2343.578
0.90 × 2.30	20700	4968	866.554	972.124	1183.264	1485.722	1605.544	1816.684	2027.824	2238.964	2450.104
0.90 × 2.40	21600	5184	904.230	1014.390	1234.710	1550.318	1675.350	1695.670	2115.990	2336.310	2556.630
0.90 × 2.50	22500	5400	941.906	1056.656	1286.156	1614.915	17458.156	1974.656	2204.156	2433.656	2663.156
0.90 × 2.60	23400	5616	979.583	1098.923	1337.603	1679.512	1814.963	2053.643	2292.323	2531.003	2769.683
0.90 × 2.70	24300	5832	1017.259	1141.189	1389.049	1744.108	1884.769	2132.629	2380.489	2628.349	2876.209
0.90 × 2.80	25200	6048	1054.935	1183.455	1440.495	1808.705	1954.575	2211.615	2468.655	2725.695	2982.735
0.90 × 2.90	26100	6264	1092.611	1225.721	1491.941	1873.301	2024.381	2290.601	2556.821	2823.041	3089.261
0.90 × 3.00	27000	6480	1130.288	1267.988	1543.388	1937.898	2094.188	2369.588	2644.988	2920.388	3195.788
0.90 × 3.10	27900	6696	1167.964	1310.254	1594.834	2002.495	2163.994	2448.574	2733.154	3017.734	3302.314
0.90 × 3.20	28800	6912	1205.640	1352.520	1646.280	2067.091	2233.800	2527.560	2821.320	3115.080	3408.840
0.90 × 3.30	29700	7128	1243.316	1394.786	1697.726	2131.688	2303.606	2606.546	2909.486	3212.426	3515.366
0.90 × 3.40	30600	7344	1280.993	1437.053	1749.173	2196.284	2373.413	2685.533	2997.653	3309.773	3621.893

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.95 × 0.95	9025	2166	377.809	423.837	515.892	647.760	700.002	792.057	884.112	976.167	1068.222
0.95 × 1.00	9500	2280	397.694	446.144	543.044	681.853	736.844	833.744	930.644	1027.544	1124.444
0.95 × 1.05	9975	2394	417.578	468.451	570.196	715.946	773.686	875.431	977.176	1078.921	1180.666
0.95 × 1.10	10450	2508	437.463	490.758	597.348	750.038	810.528	917.118	1023.708	1130.298	1236.888
0.95 × 1.20	11400	2736	477.233	535.373	651.653	818.224	884.213	1000.493	1116.773	1233.053	1349.333
0.95 × 1.30	12350	2964	517.002	579.987	705.957	886.409	957.897	1083.867	1209.837	1335.807	1461.777
0.95 × 1.40	13300	3192	556.771	624.601	760.261	954.594	1031.581	1167.241	1302.901	1438.561	1574.221
0.95 × 1.50	14250	3420	596.541	669.216	814.566	1022.780	1105.266	1250.616	1395.966	1541.316	1686.666
0.95 × 1.60	15200	3648	636.310	713.830	868.870	1090.965	1178.950	1333.990	1489.030	1644.070	1799.110
0.95 × 1.70	16150	3876	676.079	758.444	923.174	1159.150	1252.634	1417.364	1582.094	1746.824	1911.554
0.95 × 1.80	17100	4104	715.849	803.059	977.479	1227.335	1326.319	1500.739	1975.159	1849.579	2023.999
0.95 × 1.90	18050	4332	755.618	847.673	1031.783	1295.521	1400.003	1584.113	1768.223	1952.333	2136.443
0.95 × 2.00	19000	4560	795.388	892.288	1086.088	1363.706	1473.688	1667.488	1861.288	2055.088	2248.888
0.95 × 2.10	19950	4788	835.157	936.902	1140.392	1431.891	1547.372	1750.862	1954.352	2157.842	2361.332
0.95 × 2.20	20900	5016	874.926	981.516	1194.696	1500.077	1621.056	1834.236	2047.416	2260.596	2473.776
0.95 × 2.30	21850	5244	914.696	1026.131	1249.001	1568.262	1694.741	1917.611	2140.481	2363.351	2586.221
0.95 × 2.40	22800	5472	954.465	1070.745	1303.305	1636.447	1768.425	2000.985	2233.545	2466.105	2698.665
0.95 × 2.50	23750	5700	994.234	1115.359	1357.609	1704.633	1842.109	2084.359	2326.609	2568.859	2811.109
0.95 × 2.60	24700	5928	1034.004	1159.974	1411.914	1772.818	1915.794	2167.734	2419.674	2671.614	2923.554
0.95 × 2.70	25650	6156	1073.773	1204.588	1466.218	1841.003	1989.478	2251.108	2512.738	2774.368	3035.998
0.95 × 2.80	26600	6384	1113.543	1249.203	1520.523	1909.188	2063.163	2334.483	2605.803	2877.123	3148.443
0.95 × 2.90	27550	6612	1153.312	1293.817	1574.827	1977.374	2136.847	2417.857	2698.867	2979.877	3260.887
0.95 × 3.00	28500	6840	1193.081	1338.431	1629.131	2045.559	2210.531	2501.231	2791.931	3082.631	3373.331
0.95 × 3.10	29450	7068	1232.851	1383.046	1683.436	2113.744	2284.216	2584.606	2884.996	3185.386	3485.776
0.95 × 3.20	30400	7296	1272.620	1427.660	1737.740	2181.930	2357.900	2667.980	2978.060	3288.140	3598.220
0.95 × 3.30	31350	7524	1312.389	1472.274	1792.044	2250.115	2431.584	2751.354	3071.124	3390.894	3710.664
0.95 × 3.40	32300	7752	1352.159	1516.889	1846.349	2318.300	2505.269	2834.729	3164.189	3493.649	3823.109
0.95 × 3.50	33250	7980	1391.928	1561.503	1900.653	2386.486	2578.953	2918.103	3257.253	3596.403	3935.553

ตาราง ผ-8 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเดี่ยวแบบสั้น

SECTION $t \times b$ $m \times m$	A cm^2	w_D kg / m	น้ำหนักบรรทุกเป็น ตัน เมื่ออัตราส่วน ρ ต่างๆ								
			0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
1.00 × 1.00	10000	2400	418.625	469.625	571.625	717.740	775.625	877.625	979.625	1081.625	1183.625
1.00 × 1.05	10500	2520	439.556	493.106	600.206	753.627	814.406	921.506	1028.606	1135.706	1242.806
1.00 × 1.10	11000	2640	460.488	516.588	628.788	789.514	863.188	965.388	1077.588	1189.788	1301.988
1.00 × 1.20	12000	2880	502.350	563.550	685.950	861.288	930.750	1053.150	1175.550	1297.950	1420.350
1.00 × 1.30	13000	3120	544.213	610.513	743.113	933.062	1008.313	1140.913	1273.513	1406.113	1538.713
1.00 × 1.40	14000	3360	586.075	657.475	800.275	1004.836	1085.875	1228.675	1371.475	1514.275	1657.075
1.00 × 1.50	15000	3600	627.938	704.438	857.438	1076.610	1163.438	1316.438	1469.438	1622.438	1775.438
1.00 × 1.60	16000	3840	669.800	751.400	914.600	1148.384	1241.000	1404.200	1567.400	1730.600	1893.800
1.00 × 1.70	17000	4080	711.663	798.363	971.763	1220.158	1318.563	1491.963	1665.363	1838.763	2012.163
1.00 × 1.80	18000	4320	753.525	845.325	1028.925	1291.932	1396.125	1579.725	1763.325	1946.925	2130.525
1.00 × 1.90	19000	4560	795.388	892.288	1086.088	1363.706	1473.688	1667.488	1861.288	2055.088	2248.888
1.00 × 2.00	20000	4800	837.250	939.250	1143.250	1435.480	1551.250	1755.250	1959.250	2163.250	2367.250
1.00 × 2.10	21000	5040	879.113	986.213	1200.413	1507.254	1628.813	1843.013	2057.213	2271.413	2485.613
1.00 × 2.20	22000	5280	920.975	1033.175	1257.575	1579.028	1706.375	1930.775	2155.175	2379.575	2603.975
1.00 × 2.30	23000	5520	962.838	1080.138	1314.738	1650.802	1783.938	2018.538	2253.138	2487.738	2722.338
1.00 × 2.40	24000	5760	1004.700	1127.100	1371.900	1722.576	1861.500	2106.300	2351.100	2595.900	2840.700
1.00 × 2.50	25000	6000	1046.563	1174.063	1429.063	1794.350	1939.063	2194.063	2449.063	2704.063	2959.063
1.00 × 2.60	26000	6240	1088.425	1221.025	1486.225	1866.124	2016.625	2281.825	2547.025	2812.225	3077.425
1.00 × 2.70	27000	6480	1130.288	1267.988	1543.388	1937.898	2094.188	2369.588	2644.988	2920.388	3195.788
1.00 × 2.80	28000	6720	1172.150	1314.950	1600.550	2009.672	2171.750	2457.350	2742.950	3028.550	3314.150
1.00 × 2.90	29000	6960	1214.013	1361.913	1657.713	2081.446	2249.313	2545.113	2840.913	3136.713	3432.513
1.00 × 3.00	30000	7200	1255.875	1408.875	1714.875	2153.220	2326.875	2632.875	2938.875	3244.875	3550.875
1.00 × 3.10	31000	7440	1297.738	1455.838	1772.038	2224.994	2404.438	2720.638	3036.838	3353.038	3669.238
1.00 × 3.20	32000	7680	1339.600	1502.800		2296.768	2482.000	2808.400	3134.800	3461.200	3787.600
1.00 × 3.30	33000	7920	1381.463	1549.763	1829.200	2368.542	2559.563	2896.163	3232.763	3569.363	3905.963
1.00 × 3.40	34000	8160	1423.325	1596.725	1886.363	2440.316	2637.125	2983.925	3330.725	3677.525	4024.325
1.00 × 3.50	35000	8400	1465.188	1643.688	1943.525	2512.090	2714.688	3071.688	3428.688	3785.688	4142.688
1.00 × 3.60	36000	8640	1507.050	1690.650	2000.688	2583.864	2792.250	3159.450	3526.650	3893.850	4261.050
					2057.850						

คำอธิบายตาราง ผ-9 เสาปลอกเกลียวแบบสั้น

กำหนดให้

$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลาง, cm

$f_c^{'} = 173$ ksc $=$ กำลังประลัยของทรงกระบอกคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

$f_s = 1200$ ksc $=$ กำลังที่ยอมให้ของเหล็กยืนกรณี SR-24

$f_s = 0.4f_y = 1200$ ksc $=$ กำลังที่ยอมให้ของเหล็กข้ออ้อย SD-30

$A_g = \frac{\pi D^2}{4} =$ เนื้อที่หน้าตัดของเสา, cm^2

$w = 2400\frac{A_g}{10000} = 0.24A_g =$ น้ำหนักของเสา, kg/m

$h = 15D =$ ความสูงสูงสุดของเสาสั้น, cm

$0.01 \le \left(\rho_g = \frac{A_{st}}{A_g} \right) \le 0.08$ อัตราส่วนเหล็กยืนต่อเนื้อที่หน้าตัดเสา

$A_{st} =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืน อย่างน้อย 6-DB 12 mm หรือ $6 \times 1.131 = 6.786$ cm^2

กำลังรับน้ำหนักของเสาสั้นปลอกเกลียว

$$P = A_g\left(0.25f_c^{'} + f_s\rho_g\right)$$

เหล็กปลอกเกลียวนั้น มาตรฐาน วสท.ปัจจุบันกำหนดให้ใช้ RB 9 mm เป็นขั้นต่ำ

กำหนดให้

$D_c = D - 7 =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงเหล็กปลอกเกลียววัดผิวนอกของเหล็กปลอก, cm

$d =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเกลียว, cm

$A_{sp} = \frac{\pi}{4}d^2 =$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กปลอกเกลียวหนึ่งเส้น , cm^2

$A_c = \frac{\pi}{4}D_c^2 =$ เนื้อที่หน้าตัดแกนคอนกรีต, cm^2

$f_{sy} = 2400$ ksc $=$ กำลังครากของเหล็กปลอกเกลียวขนาด RB 9 mm และ RB 12 mm

$f_{sy} = 3000$ ksc $=$ กำลังครากของเหล็กปลอกเกลียวขนาด DB 10 mm และ DB 12 mm

$\rho_s = \frac{V_{sp}}{V_{cc}} = \frac{\pi(D-d)A_{sp}}{\frac{\pi}{4}D_c^2 s} \approx \frac{4A_{sp}}{sD_c} =$ อัตราส่วนปริมตรเหล็กปลอกเกลียวต่อปริมาตรแกนคอนกรีต

มาตรฐาน วสท. กำหนดว่า

$$\rho_s = 0.45\frac{f_c^{'}}{f_{sy}}\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)$$

ดังนั้น

$$\frac{4A_{sp}}{sD_c} = 0.45\frac{f_c^{'}}{f_{sy}}\left(\frac{\frac{\pi}{4}D^2}{\frac{\pi}{4}D_c^2} - 1\right) = 0.45\frac{f_c^{'}}{f_{sy}}\left(\frac{D^2}{D_c^2} - 1\right)$$

$$\frac{4A_{sp}}{sD_c} = 0.45\frac{f_c^{'}}{f_{sy}}\left(\frac{D^2 - D_c^2}{D_c^2}\right)$$

$$\frac{4A_{sp}}{s} = 0.45\frac{f_c^{'}}{f_{sy}}\frac{D^2 - D_c^2}{D_c}$$

$$s = \frac{4A_{sp}f_{sy}D_c}{0.45f_c^{'}\left(D^2 - D_c^2\right)}$$

$$s = \frac{4A_{sp}f_{sy}(D-7)}{0.45f_c^{'}(D+D_c)(D-D_c)} = \frac{4A_{sp}f_{sy}(D-7)}{0.45f_c^{'}(D+D-7)(D-D+7)} = \frac{4A_{sp}f_{sy}(D-7)}{0.45f_c^{'}(7)(2D-7)}$$

ระยะ s ไม่เกิน 7.5 cm และไม่น้อยกว่า 2.5 cm

ค่าในตาราง ผ-9 จะเป็นการใช้เหล็กปลอก RB 9 mm ดังนั้น

$$s = \frac{4\times 0.636\times 2400(D-7)}{0.45\times 173\times 7(2D-7)} = 11.20396367\frac{D-7}{2D-7}$$

ช่องตาราง s หมายถึงเหล็กปลอก RB 9 mm เท่านั้น

ตาราง ผ-9 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเกลียวแบบสั้น

D	A_g	w	h	s	P ตัน, Ag cm2 , ที่ ρ_g %							
m	cm^2	kg/m	m	mm	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.15	176.7	42.4	2.25	3.90	9.75	11.88	14.00	16.13	18.25	20.37	22.49	24.61
0.16	201.1	48.3	2.40	4.03	11.11	13.52	15.93	18.35	20.76	23.17	25.59	28.00
0.17	227.0	54.5	2.55	4.15	12.54	15.26	17.99	20.71	23.44	26.16	28.88	31.61
0.18	254.5	61.1	2.70	4.25	14.06	17.11	20.17	23.22	26.27	29.33	32.38	35.43
0.19	283.5	68.0	2.85	4.34	15.66	19.07	22.47	25.87	29.27	32.68	36.08	39.48
0.20	314.2	75.4	3.00	4.41	17.36	21.13	24.90	28.67	32.44	36.21	39.98	43.75
0.21	346.4	83.1	3.15	4.48	19.14	23.29	27.45	31.61	35.76	39.92	44.07	48.23
0.22	380.1	91.2	3.30	4.54	21.00	25.56	30.13	34.69	39.25	43.81	48.37	52.93
0.23	415.5	99.7	3.45	4.60	22.96	27.94	32.93	37.91	42.90	47.88	52.87	57.85
0.24	452.4	108.6	3.60	4.65	24.99	30.42	35.85	41.28	46.71	52.14	57.57	63.00
0.25	490.9	117.8	3.75	4.69	27.12	33.01	38.90	44.79	50.68	56.57	62.46	68.35
0.26	530.9	127.4	3.90	4.73	29.33	35.70	42.08	48.45	54.82	61.19	67.56	73.93
0.27	572.6	137.4	4.05	4.77	31.63	38.50	45.38	52.25	59.12	65.99	72.86	79.73
0.28	615.8	147.8	4.20	4.80	34.02	41.41	48.80	56.19	63.58	70.97	78.35	85.74
0.29	660.5	158.5	4.35	4.83	36.49	44.42	52.35	60.27	68.20	76.12	84.05	91.98
0.30	706.9	169.6	4.50	4.86	39.05	47.54	56.02	64.50	72.98	81.47	89.95	98.43
0.31	754.8	181.1	4.65	4.89	41.70	50.76	59.82	68.87	77.93	86.99	96.04	105.10
0.32	804.2	193.0	4.80	4.91	44.43	54.09	63.74	73.39	83.04	92.69	102.34	111.99
0.33	855.3	205.3	4.95	4.94	47.26	57.52	67.78	78.05	88.31	98.57	108.84	119.10
0.34	907.9	217.9	5.10	4.96	50.16	61.06	71.95	82.85	93.74	104.64	115.53	126.43
0.35	962.1	230.9	5.25	4.98	53.16	64.70	76.25	87.79	99.34	110.88	122.43	133.97
0.36	1017.9	244.3	5.40	5.00	56.24	68.45	80.67	92.88	105.10	117.31	129.52	141.74
0.37	1075.2	258.1	5.55	5.02	59.41	72.31	85.21	98.11	111.02	123.92	136.82	149.72
0.38	1134.1	272.2	5.70	5.03	62.66	76.27	89.88	103.49	117.10	130.71	144.32	157.93

ตาราง ผ-9 น้ำหนักบรรทุกของเสาปลอกเกลียวแบบสั้น

D	A_g	w	h	s	P ตัน, Ag cm2 , ที่ ρ_g %							
m	cm^2	kg/m	m	mm	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.39	1194.6	286.7	5.85	5.05	66.00	80.34	94.67	109.01	123.34	137.68	152.01	166.35
0.40	1256.6	301.6	6.00	5.06	69.43	84.51	99.59	114.67	129.75	144.83	159.91	174.99
0.41	1320.3	316.9	6.15	5.08	72.94	88.79	104.63	120.47	136.32	152.16	168.00	183.85
0.42	1385.4	332.5	6.30	5.09	76.55	93.17	109.80	126.42	143.05	159.67	176.30	192.92
0.43	1452.2	348.5	6.45	5.11	80.23	97.66	115.09	132.51	149.94	167.37	184.79	202.22
0.44	1520.5	364.9	6.60	5.12	84.01	102.26	120.50	138.75	156.99	175.24	193.49	211.73
0.45	1590.4	381.7	6.75	5.13	87.87	106.96	126.04	145.13	164.21	183.30	202.38	221.47
0.50	1963.5	471.2	7.50	5.18	108.48	132.05	155.61	179.17	202.73	226.29	249.85	273.42
0.55	2375.8	570.2	8.25	5.22	131.26	159.77	188.28	216.79	245.30	273.81	302.32	330.83
0.60	2827.4	678.6	9.00	5.25								
0.65	3318.3	796.4	9.75	5.28								
0.70	3848.5	923.6	10.50	5.31								
0.75	4417.9	1060.3	11.25	5.33								
0.80	5026.5	1206.4	12.00	5.35								
0.85	5674.5	1361.9	12.75	5.36								
0.90	6361.7	1526.8	13.50	5.38								
0.95	7088.2	1701.2	14.25	5.39								
1.00	7854.0	1885.0	15.00	5.40								
1.10	9503.3	2280.8	16.50	5.42								
1.20	11309.7	2714.3	18.00	5.43								
1.30	13273.2	3185.6	19.50	5.45								
1.40	15393.8	3694.5	21.0	5.46								
1.50	17671.5	4241.2	22.50	5.47								
1.60	20106.2	4825.5	24.00	5.48								
1.70	22698.0	5447.5	25.50	5.48								
1.80	25446.9	6107.3	27.00	5.49								
1.90	28352.9	6804.7	28.50	5.50								
2.00	31415.9	7539.8	30.00	5.50								

บรรณานุกรม

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ : มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พ.ศ.2517

2. ศ.สนั่น เจริญเผ่า, ศ.ดร.วินิต ช่อวิเชียร : คอนกรีตเสริมเหล็ก พ.ศ.2518

3. Dunham, C.W. : The Theory and Practice of Reinforced Concrete fourth Ed. International Student Edition, 1966

4. Ferguson, P.M. : Reinforced Concrete Fundamentals, 3rd Ed., John Wiley & Sons., Inc., New York, 1973

This Textbook is used for	
☑ Basic	☑ Advanced
☑ Workshop	☑ Reference
☑ IBM Computer	☐ Macintost
Civil Engineering Book	

ประวัติโดยย่อของ ผศ.สมศักดิ์ คำปลิว (อ.ป๋า)

1. วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต วิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่น 53 พ.ศ.2512
2. อาจารย์ประจำ มทร.ตะวันออก อุเทนถวาย 20 ปี
3. ผอ.กองพัสดุและออกแบบ มทร.เทเวศน์ 3 ปี
4. อาจารย์ประจำ มทร.ธัญบุรี 7 ปี
5. อาจารย์พิเศษและวิทยากรที่ TumCivil.com
6. วิศวกรที่ปรึกษา กรมการท่องเที่ยว กระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬา
7. Facebook : somsak.kampliew

TUMCIVIL.COM
engfanatic CLUB