การวิเคราะห์ และออกแบบอาคาร

เอกสารคำสอน
วิชาวิศวกรรมเกษตร 442 อาคารกสิกรรม

โดย
ผศ.บุญสม สุวชิรัตน์

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

คำนำ

อาคารกสิกรรมนั้นมีมากมายหลายชนิด ตามลักษณะที่ใช้งานเท่าที่พบเห็นอยู่เสมอได้แก่ โรงเรือนที่อยู่อาศัยในไร่นา รั้ว โรงเลี้ยงปศุสัตว์ได้แก่ วัว ควาย หมู แกะ เป็ด ไก่ เป็นต้น โรงเพาะชำ เรือนกระจก โรงเก็บปุ๋ย โรงผสมดิน โรงเก็บเครื่องมือทางเกษตร เช่น แทรกเตอร์ รถไถ รถเก็บเกี่ยวเป็นต้น โรงแยกขนาดผลไม้ โรงซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลเกษตร ยุ้งฉางเก็บข้าว เก็บข้าวโพด ไซโล โรงเก็บหญ้า โรงเก็บอาหารสัตว์ โรงเก็บผลิตผลเกษตร โรงสูบน้ำ เป็นต้น

อาคารต่าง ๆ เหล่านี้ถ้าจะแบ่งเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะการใช้ได้ 4 ชนิดคืออาคารเกี่ยวกับสัตว์และพืช อาคารเก็บผลิตผลและเครื่องมือทางเกษตร แต่ถ้ามองในแง่ของรูปร่างและการวิเคราะห์แรงในอาคารสามารถแยกออกได้เป็น 4 ชนิด คือ กาน โครงข้อแข็ง โครงข้อหมุน และโครงสร้างเชิงประกอบ ส่วนในแง่ของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างหรือการออกแบบอาคารนั้น โดยทั่วไปมีอาคารอยู่ 3 ประเภท คือ อาคารไม้ เหล็ก และคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

เนื่องจากอาคารกสิกรรมมีขอบเขตกว้างขวางเช่นนี้ เพื่อให้การศึกษาเกิดความเข้าใจทั้งในแง่ของการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง จึงได้แยกแนวการวิเคราะห์โครงสร้างตั้งแต่โครงสร้างอย่างง่ายจนถึงโครงสร้างอย่างยาก ซึ่งสามารถจะนำไปประยุกต์กับโครงสร้างอื่นได้ ส่วนการออกแบบไม้ เหล็ก และคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ซึ่งมีวิธีการแต่ละชนิดมากมาย ดังนั้นจึงได้นำเฉพาะสิ่งที่สำคัญซึ่งผู้เขียนได้เคยประสพมา เป็นการย่อการออกแบบในทางปฏิบัติไปในตัว หนังสือเล่มนี้ใช้ประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมเกษตร 442 อาคารกสิกรรม ซึ่งผู้ศึกษาสามารถใช้เป็นคู่มือสำหรับการปฏิบัติงานในโอกาสต่อไป

ผศ.บุญสม สุวชิรัตน์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง	1
	1.2 คำจำกัดความทั่วไป	2
	1.3 ชนิดของฐานรองรับ	4
	1.4 สมการของการสมดุลย์	4
	1.5 รูปร่างและชนิดของโครงสร้าง	5
	1.6 โครงสร้างดิเทอมิเนทและอินดิเทอมิเนท	5
	1.7 น้ำหนักบรรทุก	7
	1.8 โครงสร้างจริงและโครงสร้างวิเคราะห์	9
บทที่ 2	โครงสร้างดิเทอมิเนท	11
	2.1 แรงปฏิกิริยาและรูปอิสระ	11
	2.2 คาน	16
	2.3 โครงข้อแข็ง	25
	2.4 โครงสร้างข้อหมุน	31
	2.5 โครงสร้างเชิงประกอบ	34
บทที่ 3	การโก่งของโครงสร้าง	41
	3.1 Unit load method	41
	3.2 การหาระยะโก่งของคานโดย Unit load method	43
	3.3 การหามุมของคานโดย Unit load method	44
	3.4 ขั้นตอนการใช้ Unit load method	45
	3.5 ตัวอย่างหาระยะโก่งและมุมของคานต่าง ๆ	45
	3.6 การหาระยะโก่งและมุมของโครงข้อแข็งโดย Unit load method	52
	3.7 ระยะโก่งและมุมของโครงข้อแข็ง เนื่องจากฐานรับเคลื่อนที่	56
	3.8 ระยะโก่งของโครงข้อหมุน	57

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

		หน้า
บทที่ 4	โครงสร้างอินดิเทอมิเนท	63
	4.1 Method of Consistent Deformation	63
	4.2 The Slope - deflection Method	67
	4.3 The moment distribution Method	80
	4.4 Statically Indeterminate Trusses	114
	4.5 Composite Structures	119
บทที่ 5	การออกแบบโครงสร้างไม้	125
	5.1 ความทั่วไป	125
	5.2 สูตรการคำนวณองค์อาคารและข้อกำหนด	125
	5.3 ตัวอย่างการออกแบบอาคารไม้	136
	5.4 การออกแบบโครงหลังคา	143
บทที่ 6	การออกแบบโครงสร้างเหล็ก	
	6.1 ทั่วไป	144
	6.2 สูตรและคำนวณและข้อกำหนดที่สำคัญ	145
	6.3 การออกแบบเหล็กรับแรงดึง	150
	6.4 การออกแบบเหล็กรับแรงอัดตามแกน	152
	6.5 การออกแนนคานเหล็ก	153
	6.6 การออกแบบโครงหลังคา	155
	6.7 โครงสร้างรับแรงแนวแกนและแรงดัดพร้อมกัน	159
บทที่ 7	การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	
	7.1 ทั่วไป	160
	7.2 ปูนซีเมนต์	160
	7.3 วัสดุผสมละเอียด-หยาบและน้ำ	161
	7.4 สิ่งที่มีผลต่อกำลังคอนกรีต	162
	7.5 การควบคุมคุณภาพของคอนกรีต	163
	7.6 กำลังและส่วนผสมของคอนกรีต	164

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

หน้า

7.7 สูตรการคำนวณองค์อาคารและข้อกำหนดต่างๆ 165

7.8 ตัวอย่างการคำนวณและออกแบบ 173

ภาคผนวก ก ตารางหน่วยแรงที่ยอมให้ 185

ภาคผนวก ข การคำนวณคานและแผ่นพื้นทางเดียว 188

การออกแบบแผ่นพื้นสองทาง วิธีที่ 2 189

ภาคผนวก ค ตารางที่เกี่ยวกับการออกแบบ 191

บรรณานุกรม 215

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

บทที่ 1
บทนำ

โครงสร้างหรืออาคาร เป็นสิ่งที่มนุษย์สร้างและมีไว้ใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ซึ่งพบเห็นอยู่ทั่วไป เช่น อาคารที่พักอาศัย สำนักงาน โรงพยาบาล โรงเรียน คลังสินค้า โรงงานอุตสาหกรรม สะพาน เขื่อน ฝาย ประตูน้ำ ถนน สนามบิน กำแพงกันดิน ท่อ อุโมงค์ หอสูง ถังประปา โครงหลังคา เป็นต้น อาคารเหล่านี้ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ รวมกัน บางชิ้นส่วนเป็นรูปแท่งตันหรือกลวง แผ่นพื้นบาง แท่งหรือแผ่นโค้ง เป็นต้น

การประกอบหรือต่อชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าด้วยกัน อาจทำได้โดยทำปลายยึดแน่น ปลายต่ออย่างหมุนได้ หรือปลายต่อที่หมุนได้เล็กน้อย เป็นต้น

1.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้าง

การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง มีความสัมพันธ์และต่อเนื่องกันในกรณีที่มีอาคารอยู่แล้วต้องการทราบว่าโครงสร้างนั้น ๆ รับแรงได้เท่าใด หรือสามารถรับน้ำหนักที่เราต้องการได้หรือไม่ เช่นต้องการนำรถชุดผ่านสะพานที่มีอยู่ เป็นต้น แต่ถ้าต้องการให้มีอาคารก็จำเป็นจะต้องมีการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง เพื่อการก่อสร้างในที่สุด ขั้นตอนการดำเนินงานพอสรุปได้ดังนี้

(1) วัตถุประสงค์ให้มีอาคาร เป็นความต้องการของเจ้าของ เช่น บ้านพัก สะพาน โรงเรียน ถนน เป็นต้น

(2) งบประมาณหรือค่าก่อสร้าง เป็นเงินหรือรูปสัญญาอื่น

(3) รูปร่างและชนิดของอาคาร ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องเขียนรูปร่างของโครงสร้างนั้นๆ ในรูปโครงร่างเสร็จ ๆ หรือถูกต้อง เช่น โครงหลังคารูปต่าง ๆ ท่อเป็นชนิดกลมหรือเหลี่ยม เป็นเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานไม้หรือคอนกรีตหรือเหล็ก เป็นต้น นอกจากชนิดของวัสดุแล้วยังต้องพิจารณาแบบของโครง เช่น เป็นคาน โครงข้อแข็งหรือข้อหมุน และโครงสร้างเชิงประกอบ เป็นต้น

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(4) น้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำ โดยทั่วไปอาคารจะรับน้ำหนัก 2 ชนิดคือ น้ำหนักอาคาร (Dead load) และน้ำหนักจร (Live load) น้ำหนักต่าง ๆ เหล่านี้คิดตามธรรมชาติของวัสดุและกฎหรือข้อบัญญัติเกี่ยวกับอาคารของแต่ละแห่งกำหนดให้ บางอาคารอาจต้องคิดแรงกระแทก (Impact) ด้วย

(5) การวิเคราะห์โครงสร้าง เมื่อมีรูปโครงสร้างและน้ำหนักกระทำต่ออาคารเรียบร้อย อยากทราบว่าเกิดแรงภายในโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนอย่างไร เท่าใด การวิเคราะห์แรงอาจจะทำได้โดยวิธีแม่นยำ ประมาณหรือข้อกำหนด (Code) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบจะพิจารณาว่าต้องการให้ถูกต้องกับความเป็นจริงตามธรรมชาติแค่ไหน

(6) การออกแบบโครงสร้าง ต้องเป็นไปตามทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น การออกแบบโครงสร้างไม้ เหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรงและวัสดุอื่น ๆ การใช้ส่วนปลอดภัยสำหรับพื้น คาน เสา และฐานรากต่าง ๆ เป็นต้น การเลือกขนาด ชนิดและรูปร่างของโครงสร้าง เพื่อให้เกิดความสะดวก ประหยัดและปลอดภัย อยู่ในขั้นตอนนี้

(7) การเขียนแบบก่อสร้าง จะต้องเขียนแบบตามสากลนิยม ชัดเจน อ่านง่ายและไม่ซับซ้อน

(8) การออกรายการรายละเอียด (Specification) หรือที่เรียกว่าออกสเปค เขียนตามหลักเกณฑ์ ชัดเจน ใช้ภาษาง่าย ๆ ไม่ต้องตีความ ไม่เขียนให้ตีความได้หลายอย่าง

(9) การประมาณราคากลาง (Cost estimate) ซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายที่จะทราบว่าเมื่อออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถสร้างได้ในงบประมาณตามข้อ 2 หรือไม่

ขั้นตอนเหล่านี้ ผู้ออกแบบที่ยังขาดประสพการณ์อาจจะต้องดำเนินการจากข้อ 3 ถึงข้อ 9 แล้วย้อนกลับไปใหม่ตามความจำเป็นเพื่อให้ได้ผลงานที่ดีที่สุด คือ สะดวก ประหยัดและปลอดภัย

1.2 คำจำกัดความทั่วไป

น้ำหนักโครงสร้างหรืออาคาร (Dead load) คือน้ำหนักคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างทิศทางลงดิ่งในแนวศูนย์ถ่วงของพื้นที่

น้ำหนักจร (Live load) คือน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการให้โครงสร้างรับได้

น้ำหนักกระแทก (Impact load) คือน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักจร เมื่อวัตถุเคลื่อนที่กระทบกับโครงสร้าง

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แรง (Forces) คือพลังที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ หยุดนิ่งหรือเปลี่ยนรูป แรงต้องแสดงด้วยตำแหน่ง ขนาดและทิศทาง ดังนั้นแรงจึงสามารถเขียนเส้นมีหัวลูกศรแทนได้ โดยใช้มาตราส่วนของแรง หรือเรียกเวคเตอร์ (Vector) แทนแรง โครงสร้างที่ถูกแรงกายนอกกระทำจะเกิดแรงต้านทานภายในของวัสดุ

แรงที่มีแนวหรือทิศทางพบกัน (รวมกัน) ที่จุดเดียว เรียกว่า concurrent forces

แรงที่ไม่มีแนวแรงพบกันที่จุดเดียว เรียกว่า Non concurrent forces

แรงที่กระทำในระนาบเดียวกัน เรียกว่า Co-planar forces

โมเมนต์ คือผลคูณของขนาดแรงกับระยะตั้งฉากกับแนวแรง

แรงคู่ควบ (Couple) คือผลคูณของแรงใดแรงหนึ่งกับระยะห่างตั้งฉากระหว่างแรงทั้งสองนั้น เป็นค่าโมเมนต์

แรงลัพธ์ (Resultant force) คือผลรวมของแรงย่อยทั้งหมดอยู่ในตำแหน่งที่เกิดสมดุลย์ได้ เมื่อวัตถุสมดุลย์แรงลัพธ์เท่ากับแรงต้านกลับในทิศทางสวนกันและแนวตรงกัน

ส่วนประกอบของแรง (Components of forces) คือแรงตั้งแต่ 2 แรงขึ้นไป เขียนแทนแรงกระทำ เช่น เขียนแรงแนวราบและแนวดิ่ง แทนแรงกระทำ เป็นต้น

แรงตามแกน (Axial force) คือแรงที่กระทำในแนวแกนของส่วนโครงสร้าง ทำให้วัสดุเกิดการยืดหรือหดตามแกน ได้แก่ แรงดึงหรือแรงอัด

แรงเฉือน (Shear) คือแรงที่เกิดในทิศทางขนานกับพื้นที่รับแรง พยายามเฉือนส่วนของโครงสร้างให้ขาดจากกัน

โมเมนต์ดัด (Bending moment) คือโมเมนต์ที่ทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างโก่งงอ เกิดการอัดและดึงในผิวของโครงสร้าง

แรงบิด (Twisting moment or Torsion) คือโมเมนต์ที่ทำให้เกิดแรงเฉือนในแนวขวางรอบแกน หรือเกิดการบิดในวัสดุ

หน่วยแรง (Unit stress or stress) คือแรงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดรับแรง

แรงปฏิกิริยา (Reaction) คือแรงต้านเกิดที่ฐานรองรับ

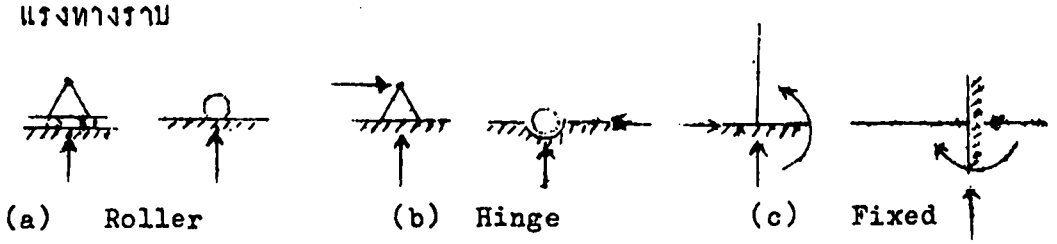
1.3 ชนิดของฐานรองรับ

การวางโครงสร้างบนพื้นที่รองรับทำได้ 3 แบบคือ

(1) แบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller support) เกิดแรงปฏิกิริยา 1 ตัว ตั้งฉากกับพื้นรองรับ

(2) แบบยึดหมุนได้ (Hinge support) เกิดแรงปฏิกิริยาส่วนประกอบของแรง 2 ตัว คือ แรงทางดิ่ง และแรงทางราบ

(3) แบบยึดแน่น (Fixed support) มีแรงปฏิกิริยา 3 ตัว คือ โมเมนต์ แรงทางดิ่งและแรงทางราบ



รูปที่ 1.1 ชนิดของฐานรองรับ

1.4 สมการของการสมดุลย์

เมื่อวัตถุหยุดนิ่ง หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เรียกว่า วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลย์ ตามกฎของสแตติคส์กำหนดไว้ว่า ผลรวมทางพีชคณิตของแรงต่าง ๆ ในทุกทิศทางเท่ากับศูญ ในที่นี้โครงสร้างในระนาบเดียวกัน จึงมี 3 สมการสมดุลย์ (Equations of Equilibrium) ดังนี้คือ

(1) $\Sigma F_x = 0$ คือผลรวมทางพีชคณิตของแรงในแนวนอนเท่ากับศูญ

(2) $\Sigma F_y = 0$ คือผลรวมทางพีชคณิตของแรงในแนวตั้งเท่ากับศูญ

(3) $\Sigma M = 0$ คือผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์ดัดรอบจุดใด ๆ เท่ากับศูญ

สมการสมดุลย์ทั้งสามนี้มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์โครงสร้าง เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดของการวิเคราะห์แรง

เมื่อโครงสร้างหรืออาคารรวมอยู่ในสภาพสมดุลย์ ถ้าจะตัดหรือแยกออกมาส่วนหนึ่งเป็นรูปอิสระ (Free body) จะอยู่ในสภาพสมดุลย์ทุกประการ คือแรงภายนอกถูกต้านด้วยแรงภายในที่มีขนาดเท่ากันและทิศทางตรงกันข้าม ถ้ากำลังของวัสดุไม่สามารถต้านแรงภายในได้แล้ว โครงสร้างจะพังในที่สุด

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

1.5 รูปร่างและชนิดของโครงสร้าง

รูปร่างของโครงสร้างใด ๆ โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุก และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างนั้น ๆ โครงสร้างเกือบทั้งหมดจำแนกเป็น 4 ชนิดคือ

(1) คาน (Beam) คือส่วนโครงสร้างที่มีความกว้างและลึกน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงรับน้ำหนัก (span) โดยทั่วไปน้ำหนักกระทำตั้งฉากกับแกน การวิเคราะห์เพื่อรู้ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

(2) โครงข้อแข็ง (Rigid frame) คือโครงสร้างที่มีข้อต่อยึดแน่น เช่นโดยการเชื่อม หรือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อต่อเนื่องกัน ชิ้นส่วนอาจเกิดแรง 3 ชนิดคือ แรงตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

(3) โครงข้อหมุน (Truss) คือโครงสร้างที่มีข้อต่อยึดชนิดหมุนได้และไม่มีความฝืด ประกอบด้วยโครงสามเหลี่ยมแทนแรงต่อเนื่องกัน เกิดแรงตามแกนชนิดแรงดึงหรือแรงอัดในโครงสร้าง

(4) โครงสร้างเชิงประกอบ (Composite structure) คือโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิด ซึ่งเหมาะสมกับแรงที่เกิดขึ้น เช่น ส่วนใดรับแรงดึงใช้สลิงหรือลวด ส่วนที่รับโมเมนต์ดัดใช้ชิ้นส่วนในรูปคาน เป็นต้น

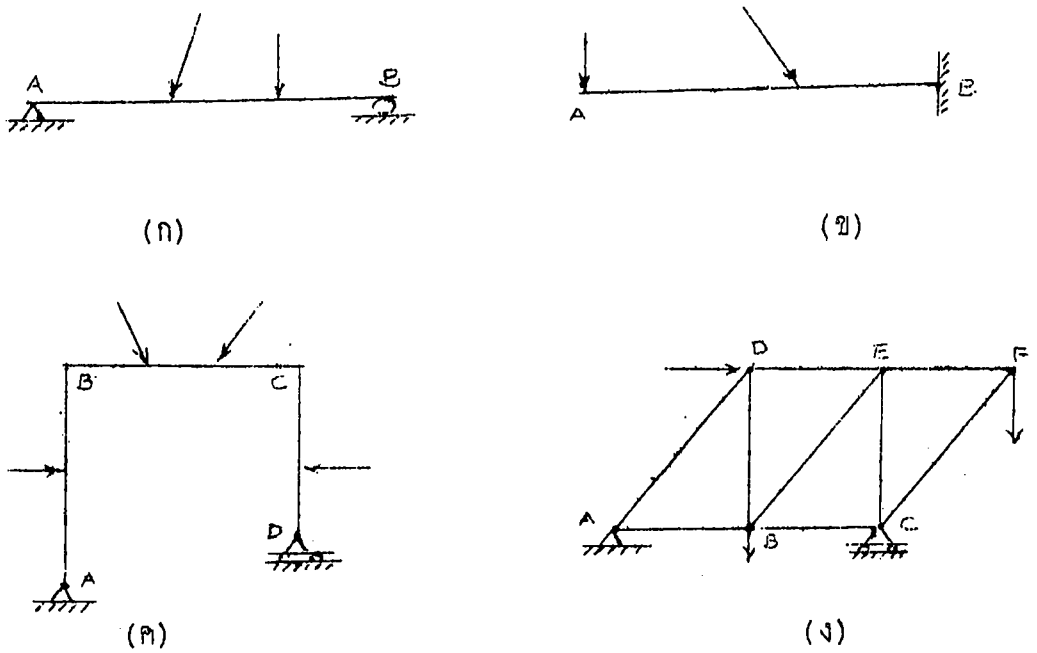
โครงสร้างต่าง ๆ หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล อาจจะรับแรงตามแกน แรงเฉือน โมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด อย่างใดอย่างหนึ่งหรือพร้อม ๆ กันหลายอย่างก็ได้

1.6 โครงสร้างดิเทอมิเนทและอินดิเทอมิเนท

โครงสร้างชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวในข้อ 1.5 นั้น เมื่อแยกออกตามแบบของวิธีวิเคราะห์โครงสร้างแล้ว แยกออกเป็น 2 แบบคือ

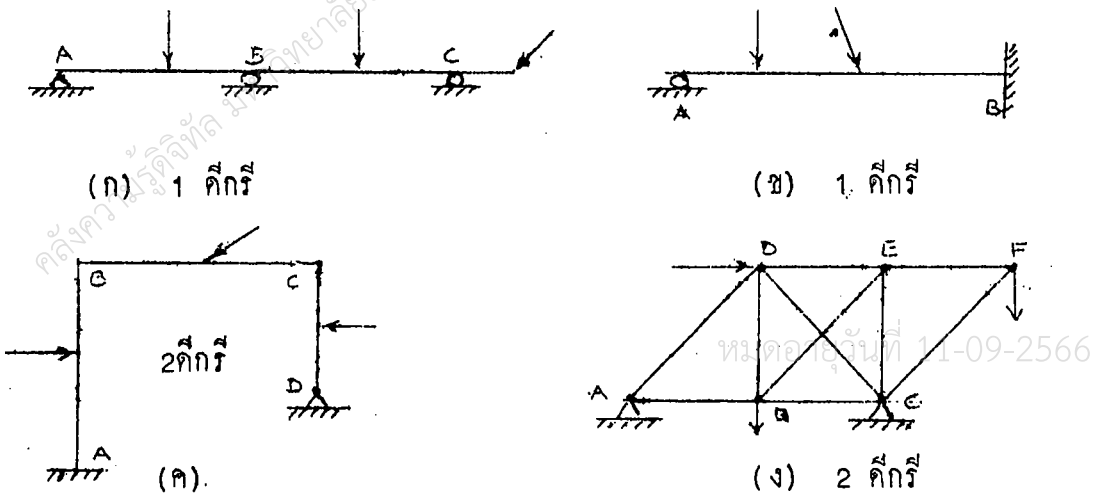
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(1) โครงสร้างดิเทอมิเนท (Statically Determinate Structures) หมายถึงโครงสร้างที่สามารถวิเคราะห์เพื่อหาแรงปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งภายนอกและภายใน โดยใช้การสมดุลย์ 3 สมการในข้อ 1.4 เท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าโครงสร้างที่มีตัวไม่รู้ค่า (Unknown) ไม่เกิน 3 ตัว ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างดิเทอมิเนท

2. โครงสร้างอินดิเทอมิเนท (Statically indeterminate structures) ได้แก่โครงสร้างที่ไม่สามารถวิเคราะห์แรงได้ด้วยความสมดุลย์ 3 สมการที่กล่าวมาแล้ว เพราะเป็นโครงสร้างที่มีตัวไม่รู้ค่ามากกว่า 3 ตัว ต้องใช้วิธีการอื่นช่วยในการวิเคราะห์แรงก่อนใช้ 3 สมการ ตัวไม่รู้ค่าที่เกิน (Redundents) มาจากโครงสร้างดิเทอมิเนทเรียกว่า ดีกรีของอินดิเทอมิเนท ซึ่งอาจจะเป็นตัวไม่รู้ค่าภายในหรือภายนอกก็ได้ ดังรูปที่ 1.3



คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

รูปที่ 1.3 โครงสร้างอินดิเทอมิเนท

1.7 น้ำหนักบรรทุก

โครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการนั้น อย่างน้อยที่สุดจะต้องรับน้ำหนักของตัวเองก่อน จึงทำให้มีน้ำหนัก 2 ประเภทคือ

1. น้ำหนักโครงสร้างหรือน้ำหนักตายตัว (Dead Loads)
2. น้ำหนักจร (Live loads)

<u>น้ำหนักบรรทุกตายตัว</u> หมายถึงน้ำหนักของอาคารที่มีตำแหน่งกระทำตายตัวหรือถาวรตลอดเวลา และไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก ได้แก่น้ำหนักของส่วนโครงสร้าง และอุปกรณ์ที่ติดตั้งตายตัว เป็นน้ำหนักที่กระทำในแนวดิ่งเสมอ เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ค่าประมาณของน้ำหนักบรรทุกตายตัวซึ่งใช้ในการคำนวณวิเคราะห์โครงสร้างดังนี้

คอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กก/ม.^{3}
เหล็กกล้า	7850	"
เหล็กเหนียว	7770	"
ไม้เนื้อแข็ง	1000	"
อิฐ	1900	"
ทรายแห้ง	1500	"
ทรายเปียกเฉลี่ย	1750	"
วัสดุมุงกระเบื้องลอนคู่	12.5	กก/ม.^{2}
แป้ไม้	5	"
โครงหลังคาไม้	10—20	"
ฝ้าเพดาน	14—25	"
พื้นไม้ รวมตง	30	"
กำแพงอิฐมอญ	180—360	" (ครึ่ง-เต็มแผ่น)
กำแพงอิฐบล็อก	100—200	"
คอนกรีตบล็อก	100—240	" (7-20 ซม)

กระเบื้องแผ่นเรียบ 120×240 ซม.หนา4-6-8มม. หนัก 20.3-30.5-40.7ก.ก.
กระเบื้องหลังคาซีแพคโมเนีย ขนาด33x42 ซ.ม. หนัก 4.5ก.ก. ใช้10แผ่น /ตร.ม.

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2564

น้ำหนักบรรทุกจร หมายถึงน้ำหนักบรรทุกที่ทำต่ออาคารเป็นครั้งคราว อาจจะเปลี่ยนขนาดและตำแหน่งได้ ซึ่งแยกออกเป็น 2 ชนิดคือ

(1) น้ำหนักจรชนิดไม่เคลื่อนที่ ตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522 ข้อ 62 หน่วยน้ำหนักบรรทุกของอาคารประเภทต่าง ๆ นอกเหนือจากน้ำหนักของตัวอาคารหรือส่วนของเครื่องจักร หรืออุปกรณ์อย่างอื่นที่แน่ชัดให้คำนวณเป็นประมาณเฉลี่ยไม่ต่ำกว่าอัตราดังต่อไปนี้

1.	หลังคา	50	กก/ม.^{2}
2.	กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100	"
3.	ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ	150	"
4.	ห้องแถว อาคารชุด หอพัก โรงแรม	200	"
5.	สำนักงาน ธนาคาร	250	"
6.	อาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย โรงเรียน ฯลฯ	300	"
7.	ตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ กัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในหอสมุด ที่จอดหรือเก็บรถยนต์นั่ง ฯลฯ	400	"
8.	คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิทธภัณฑ์ อัฒจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสาร และพัสดุ ฯลฯ	500	"
9.	ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด	600	"
10.	ที่จอดหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่น ๆ	800	"

ข้อ 63 ในการคำนวณออกแบบพื้นอาคาร หากปรากฏว่าพื้นที่ส่วนใดต้องรับน้ำหนักเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ หรือน้ำหนักบรรทุกอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ระบุไว้ในข้อ 62 ให้ใช้น้ำหนักจำนวนที่มากกว่าเฉพาะส่วนที่ต้องรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(2) น้ำหนักจรชนิดเคลื่อนที่ได้

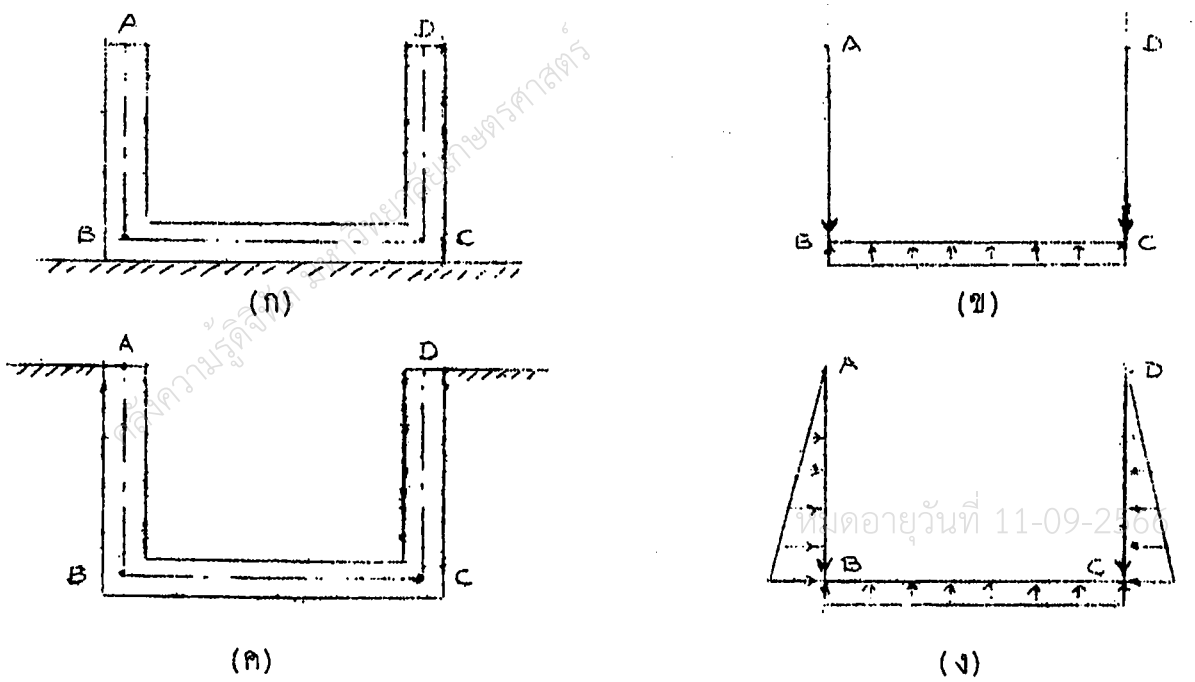
ข้อ 64. ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคารให้คำนึงถึงแรงลมด้วย หากจำเป็นต้องคำนวณและไม่มีเอกสารใดอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ให้ใช้หน่วยแรงลมดังต่อไปนี้

ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน	10	เมตร							50	กก/ม.^{2}
"	"	"	กว่า	10	เมตร	แต่ไม่เกิน	20	เมตร	80	"
"	"	"	"	20	"	"	40	"	120	"
"	"	"	"	40	"	ขึ้นไป			160	"

1.8 โครงสร้างจริงและโครงสร้างวิเคราะห์

ในข้อ 1.1 จะเห็นว่าขอบเขตของการวิเคราะห์โครงสร้างอยู่ระหว่างข้อ (3) ถึงข้อ (5) แต่เพื่อให้สะดวกและประหยัดวิธีการจึงมักจะกำหนดรูปร่างของโครงสร้างพร้อมกับน้ำหนักกระทำ เพื่อให้วิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของโครงสร้างนั้น ๆ

โครงสร้างที่ปรากฏในแบบก่อสร้างข้อ 1.1 (7) นั้น แสดงรูปร่างความกว้าง ความยาวและความหนา ตัวอย่างรูปที่ 1.4 เป็นทางน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้า แรกเริ่มเมื่อหล่อพื้น ค.ส.ล. บนดินน้ำหนักของพื้นจะแผ่อย่างสม่ำเสมอบนดินและมีแรงปฏิกิริยาตอบเท่ากัน ต่อมาเมื่อมีการสร้างกำแพงสองข้าง น้ำหนักกำแพงจะถ่ายลงดินทางพื้น ค.ส.ล. ทางน้ำนี้อาจจะวางลอยอยู่บนพื้นดินหรือฝังอยู่ในดินก็ตาม แรงที่กระทำย่อมต่างกัน และผลที่เกิดคือแรงภายในจะแตกต่างกันไปด้วย ในกรณีที่น้ำเต็มและน้ำไม่มียอมมีผลต่อโครงสร้างต่างกัน



รูปที่ 1.4 ทางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 1.4 (ก) และ (ค) เป็นรูปในแบบก่อสร้าง รูปที่ 1.4 (ข) และ (ง) เป็นรูปโครงสร้างเพื่อการวิเคราะห์ โดยทั่วไปเขียนเส้นแทนรูปโครงสร้างจริงและเส้นแทนแรงกระทำ เส้นนี้เป็นเส้นกึ่งกลางหรือแนวศูนย์ถ่วงของส่วนโครงสร้าง น้ำหนักของกำแพง AB และ DC จะลงเป็นจุดตามแนว AB และ DC น้ำหนักนี้จะแผ่บนดินโดยพื้น ก.ส.ล. ในรูปที่ 1.4(ข)

ลูกศรแสดงทิศทางของแรง ส่วนในรูป 1.4 (ง) นั้น มีแรงดันดินข้าง ๆ เมื่อน้ำไม่มีในกาชนะ ใช้เป็นโครงสร้างสำหรับวิเคราะห์อีกกรณีหนึ่ง

โครงสร้างจริงอาจจะทำได้ไม่เหมือนโครงสร้างวิเคราะห์ เช่น ข้อต่อของโครงสร้างข้อหมุน โดยทั่วไปทำในรูปเชื่อมหรือหมุดย้ำหมู่ ทำให้ข้อต่อไม่สามารถหมุนได้เต็มที่ บางครั้งอาจจะกลายเป็นโครงข้อแข็งไปเลย ซึ่งยากแก่การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้น อีกกรณีหนึ่งที่พบเสมอคือฐานรองรับ โดยแท้จริงแล้วเราไม่สามารถทำให้ฐานเลื่อนได้โดยปราศจากความฝืดหรือทำให้ฐานยึดแน่นจนไม่สามารถหมุนได้ ดังนั้นบางครั้งอาจจะทำได้เพียงค่าระหว่างสภาพทั้งสองนี้ ซึ่งอาจจะเรียกว่าฐานรองรับกึ่งยึดแน่น สิ่งที่น่าระวังอีกอย่างหนึ่งก็คือการก่อสร้างอาคารให้เป็นไปตามแบบ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โครงสร้าง อาจจะทำได้ยาก ดังนั้นผู้คำนวณออกแบบจึงต้องนึงถึงสภาพในสนามให้มาก เพื่อที่จะได้กำหนดค่าได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงก่อนการคำนวณรายละเอียด แม้แต่กำลังของวัสดุ เช่น คอนกรีตที่มีการก่อสร้างในถิ่นชุรกันดารอาจจะกำหนดกำลังในการออกแบบต่ำกว่าในที่ ๆ มีวิทยาการสูง เป็นต้น

สรุปจากโครงสร้างวิเคราะห์ไปสู่โครงสร้างจริง จะต้องผ่านการออกแบบ ดังนั้นการออกแบบที่ดีจะต้องทำให้โครงสร้างทั้งสองนี้ถูกต้องใกล้เคียงกันและตามธรรมชาติมากที่สุด

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

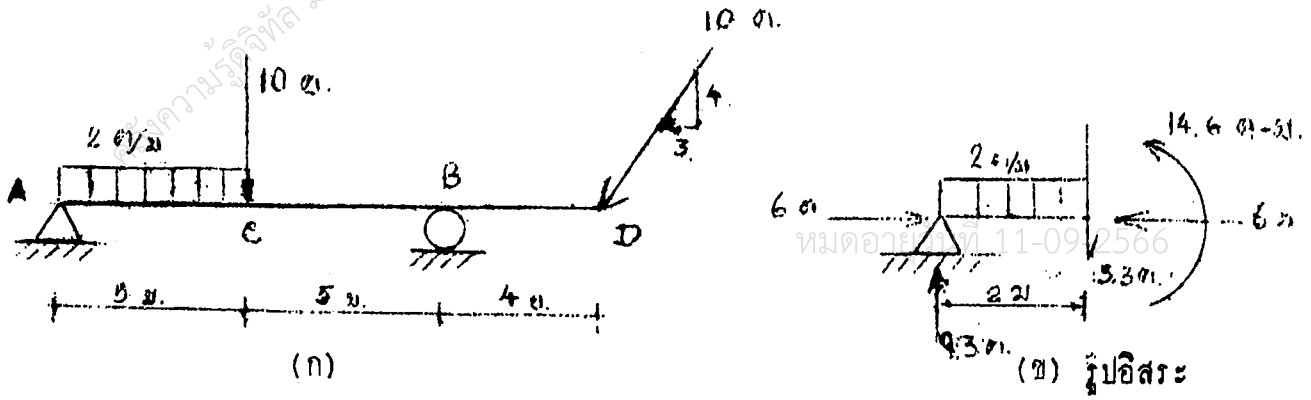
บทที่ 2
โครงสร้างดิเทอมิเนท
(Statically Determinate Structures)

โครงสร้างแบบนี้มีความสมดุลย์โดยหลักธรรมดา ดังนั้นการวิเคราะห์แรงจึงใช้เพียงสมดุลย์ 3 สมการคือ $\Sigma M = 0$, $\Sigma F_x = 0$ และ $\Sigma F_y = 0$ ในโครงสร้างจะมีตัวไม่รู้ค่าไม่เกิน 3 ตัว การวิเคราะห์ทำได้ทั้งวิธีคำนวณและวิธีกราฟ ในที่นี้จะแสดงเฉพาะวิธีคำนวณเท่านั้น เพราะทำได้ง่าย สะดวกและแม่นยำ ใช้ความรู้พื้นฐานและคณิตศาสตร์เบื้องต้นเท่านั้น

2.1 แรงปฏิกิริยาและรูปอิสระ

เมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักทั้งตัวเองและน้ำหนักจร น้ำหนักต่าง ๆ เหล่านี้จะถ่ายลงสู่ฐานรองรับรูปต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว การที่จะคำนวณหาขนาดและทิศทางของแรงปฏิกิริยา เพียงใช้สมการทั้ง 3 ข้างต้นเท่านั้น ส่วนรูปอิสระ (Free body diagram) จะแสดงการสมดุลย์ของทั้งแรงภายนอกและแรงภายใน สำหรับโมเมนต์ดัดภายในเมื่อลากหัวลูกศรหมุนไปจะพบผิวของโครงสร้างทางด้านอัด (Compression side) ซึ่งเป็นข้อสังเกตในการเขียนภาพโมเมนต์ดัดหรือการเสริมเหล็กสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย สำหรับแรงตามแกนนั้นถ้าหัวลูกศรเข้าหาโครงสร้างจะแสดงว่าโครงสร้างนั้นรับแรงอัด

<u>ตัวอย่าง</u> (1) ให้วิเคราะห์คานซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนรูปอิสระที่หน้าตัด 2 เมตร ห่างจากฐานรับ



รูปที่ 2.1

<u>วิธีทำ</u>

แรง 10 ตัน แตกในแนวดิ่งได้ 8 ตัน และแนวราบ 6 ตัน

$\Sigma M_A = 0$

$10 V_B = 2 \times 5 \times 2.5 + 10 \times 5 + 8 \times 14$

$V_B = 2.5 + 5 + 11.2 = 18.7$ ตัน ↑

หาแรงรับทางดิ่งที่ A โดย $\Sigma F_y = 0$

ได้ $V_A = 10 + 10 + 8 - 18.7 = 9.3$ ตัน

หาแรงรับทางราบที่ A โดย $\Sigma F_x = 0$

ได้ $H_A = 6$ ตัน →

ที่ระยะ 2 ม. จาก A

แรงตามแกน $= H_A = 6$ ตัน (อัด)

แรงเฉือน $= 9.3 - 2 \times 2 = 5.3$ ตัน

โมเมนต์ $= 9.3 \times 2 - 2 \times \frac{2 \times 2}{2} = 14.6$ ต – ม.

<u>ตัวอย่าง</u> (2) ให้วิเคราะห์แรงในโครงข้อแข็งซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนรูปอิสระที่หน้าตัดกึ่งกลางของ BC

<u>วิธีทำ</u> ต้องการหาแรงรับที่ D

$\Sigma M_A = 0$

$4V_D = 10 \times 2 + 2 \times \frac{4^2}{2} + 10 \times 6$

$V_D = 5 + 4 + 15$

$= 24$ ต. ↑

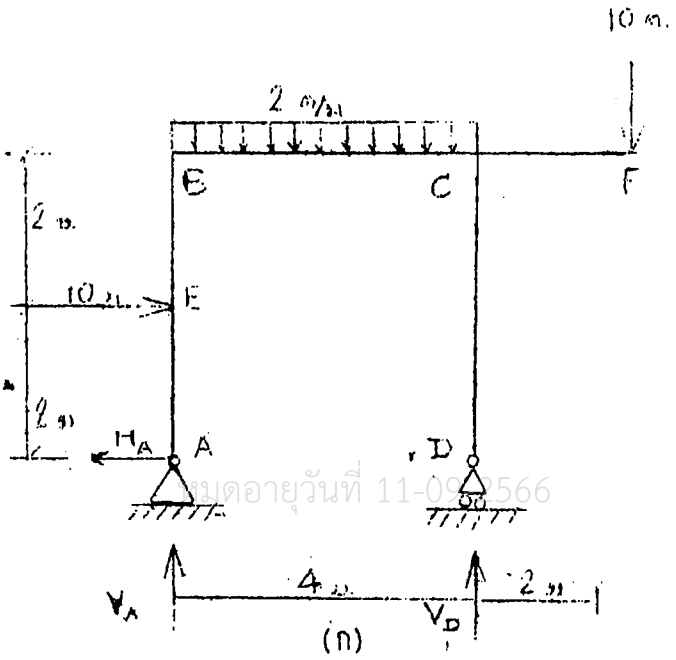
$\Sigma F_y = 0$

ได้ $V_A = 2.4 + 10 - 24$

$= -6$ ต. ↓ จริง

$\Sigma F_x = 0$

ได้ $HA = 10$ ต. ←



รูปที่ 2.2

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

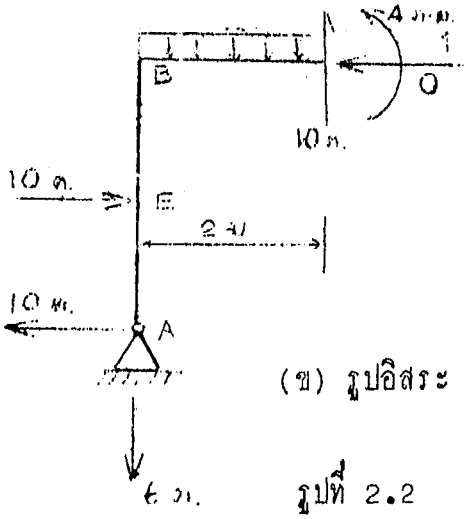
เขียนรูปอิสระที่ระยะ 2 ม. จาก B

แรงเฉือน = 6+4 = 10 ต. ↑

แรงตามแกน = 10 − 10 = 0

โมเมนต์ = $10 \times 2 - 6 \times 2 - 4 \times 2 \times \frac{2}{2}$

= 20 − 12 − 4 = 4 ต − ม. ↻



(ข) รูปอิสระ

รูปที่ 2.2

สรุป แรงที่เกิดในชิ้นส่วน คือ

ชิ้นส่วน	แรงเฉือน	แรงตามแกน	โมเมนต์
AE	10	+ 6	มี
EB	—	+ 6	20
BC	มี	—	มี
CD	—	— 24	—
CF	10	—	มี

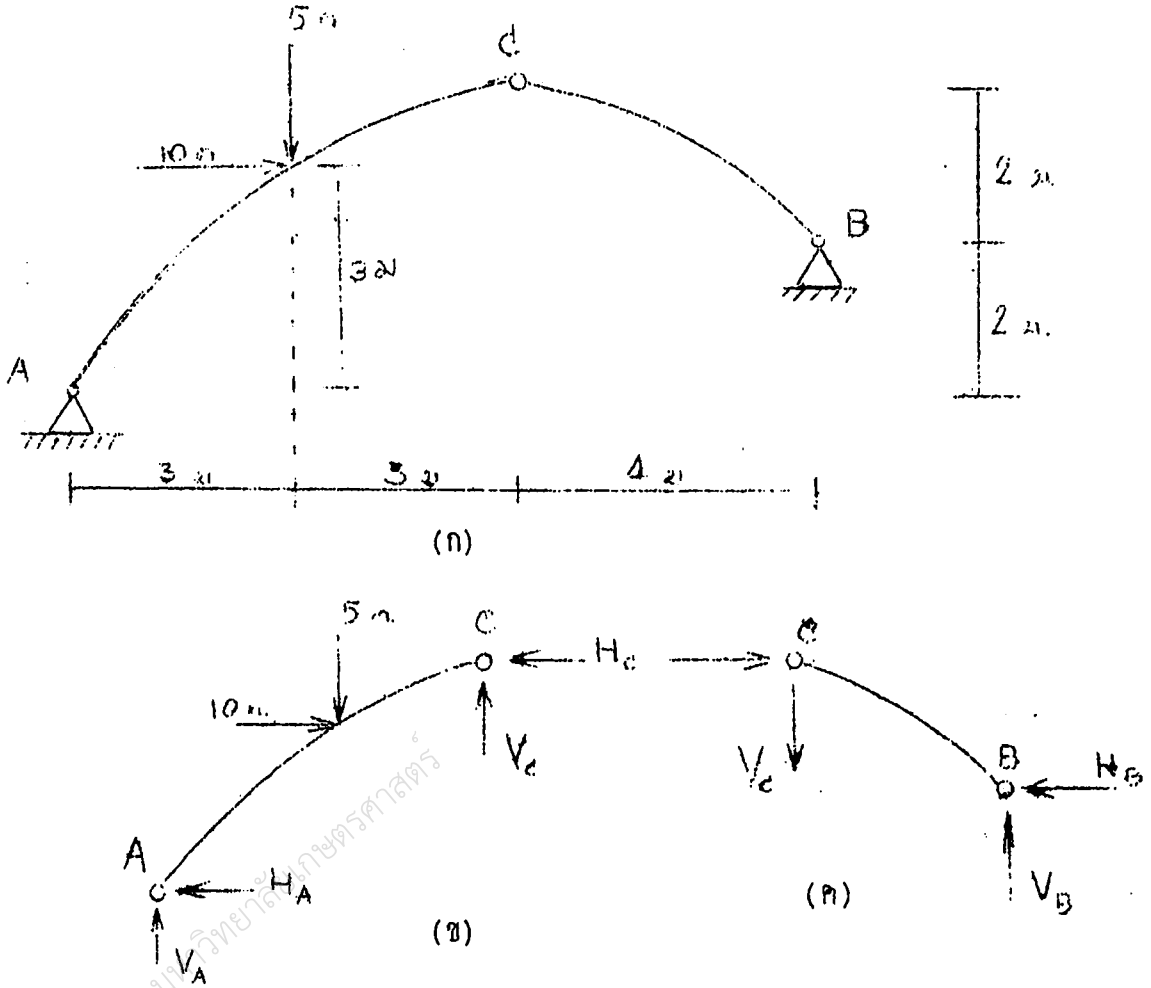
เมื่อ แรงอัด = —

แรงดึง = +

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง (3) ให้วิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นในฐานรับ A และ B ของ Three hinge arch ซึ่งมีแรงกระทำดังรูป



รูปที่ 2.3.

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

<u>วิธีทำ</u> รูป (ข) $\Sigma M_C = 0$

$$6V_A + 4H_A = 10 \times 1 + 5 \times 3 = 25 \quad \text{---------- (1)}$$

รูป (ค) $\Sigma M_C = 0$

$$4V_B - 2H_B = 0 \quad \text{---------- (2)}$$

$\Sigma V = 0$: $V_A + V_B = 5$ หรือ $V_A = 5 - V_B$

$\Sigma H = 0$: $H_A + H_B = 10$ หรือ $H_A = 10 - H_B$

แทนค่า V_B และ H_A ใน (1) ได้

$$6(5 - V_B) + 4(10 - H_B) = 25$$

$$30 - 6V_B + 40 - 4H_B = 25$$

$$6V_B + 4H_B = 45 \quad \text{---------- (3)}$$

(2) x 2 $\quad 8V_B - 4H_B = 0 \quad \text{---------- (4)}$

(3) + (4) $\quad 14V_B = 45$

$$V_B = 3.214 \text{ ก}$$

$\Sigma V = 0$ ได้ $V_A = 1.786$ ก

แทนค่า V_B (2) ได้ $H_B = 6.428$ ก

$\Sigma H = 0$ ได้ $H_A = 3.572$ ก

$V_A = 1.786$ ก ↑ $\quad V_B = 3.214$ ก ↑ <u>ตอบ</u>

$H_A = 3.572$ ก ← $\quad H_B = 6.428$ ก ←

<u>หรืออีกวิธีหนึ่ง</u>

$\Sigma M_A = 0$: $4H_C + 6V_C = 10x3+5x3 = 45 \quad \text{---------- (1)}$

$\Sigma M_B = 0$: $2H_C - 4V_C = 0 \quad \text{---------- (2)}$

(2) x 2 $\quad 4H_C - 8V_C = 0 \quad \text{---------- (3)}$

(1) - (3) $\quad 14V_C = 45$

$$V_C = 3.214 \text{ ก}$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แทนค่า V_C ใน (2) ได้ $2H_C = 12.856$

$H_C = 6.428$

ในรูป (ข) $H_A = 10 - 6.428 = 3.572$ ท ←

$V_A = 5 - 3.214 = 1.786$ ท ↑ ตอบ

ในรูป (ค) $H_B = H_C = 6.428$ ท ←

$V_B = V_C = 3.214$ ท ↑

หมายเหตุ ค่าบวก แสดงว่าทิศทางของแรงเหมือนที่สมมติ

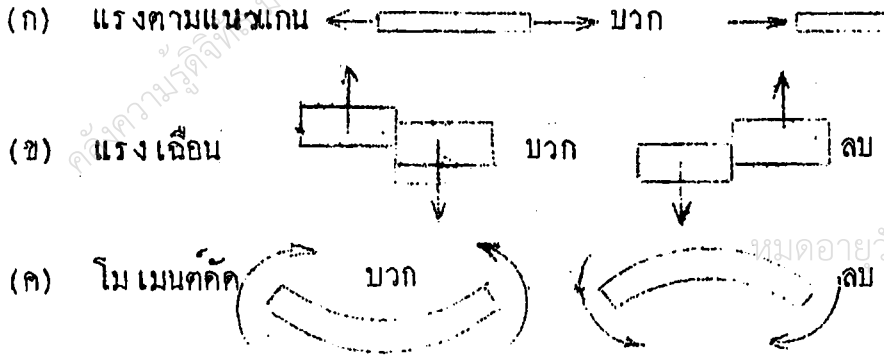
2.2 คาน (Beams)

เป็นส่วนโครงสร้างที่พบเห็นอยู่เสมอ อาคารโดยทั่วไปพื้นจะวางอยู่บนคาน คานจะติดและถ่ายน้ำหนักลงเสาบางครั้งคานย่อยจะวางหรือฝากกับคานใหญ่แล้วจึงติดกับเสา ปลายของคานมีความสำคัญเกี่ยวกับความแข็งแรงในการใช้งานมาก การวิเคราะห์คานนั้นที่สำคัญคือรู้ค่าแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์คาน จึงได้มีการกำหนดเครื่องหมายของคาน (Beam sign convention) ดังต่อไปนี้

แรงตามแนวแกน ใช้แรงดึงเป็นบวก แรงอัดเป็นลบ

แรงเฉือน เมื่อทำให้ชีกซ้ายมือขาดเคลื่อนขึ้นจากชีกขวา หรือแรงภายนอกทางซ้ายขึ้นมากกว่าลง ถือว่าค่าเป็นบวก

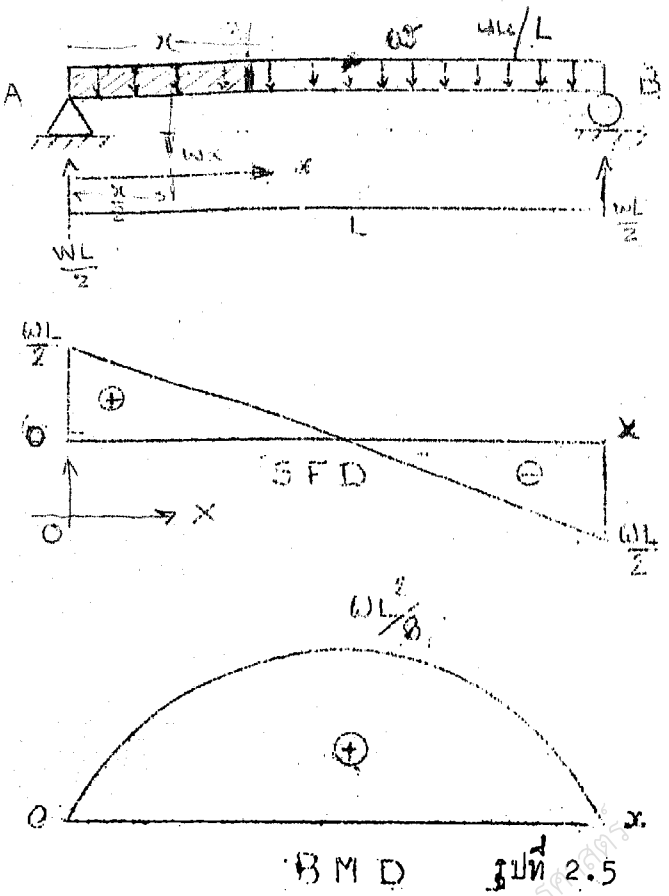
โมเมนต์ดัด เป็นบวก เมื่อทำให้ผิวบนเกิดแรงอัด หรือคานแอ่นหรือโค้งขึ้น



รูปที่ 2.4 เครื่องหมายของคาน

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(1) คานช่วงเดี่ยวมีน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอกระทำ



รูปที่ 2.5

การคำนวณใช้ $\Sigma M_A = 0$ และ $\Sigma F_y = 0$

ได้ $R_A = R_B = \frac{wL}{2}$

เมื่อ A เป็นจุดเริ่มต้น

แรงเฉือนที่ A $= \frac{wL}{2}$

แรงเฉือนทั่วไปที่ x $= \frac{wL}{2} - wx$

แรงเฉือนที่กึ่งกลาง $= 0$

แรงเฉือนที่ B $= -\frac{wL}{2}$

โมเมนต์ดัดที่ A $= 0$

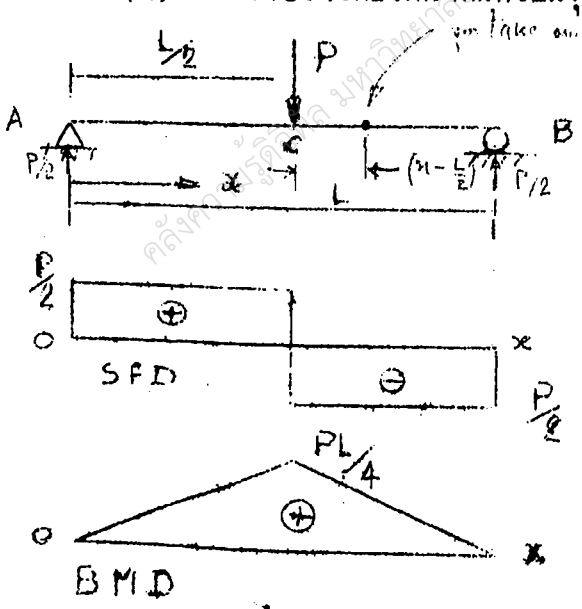
โมเมนต์ดัดทั่วไปที่ x $= \frac{wL}{2} \cdot x - \frac{wx^2}{2}$

โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลาง $= +\frac{wL^2}{8}$

โมเมนต์ดัดที่ B $= 0$

ภาพแรงเฉือน (Shear force diagram) และภาพโมเมนต์ดัด (Bending moment diagram) ดังรูป

(2) คานช่วงเดียวมีน้ำหนักเป็นจุดกระทำที่กึ่งกลาง



รูปที่ 2.6

การคำนวณใช้ $\Sigma M_A = 0$ และ $\Sigma F_y = 0$

$R_A = R_B = P/2$

แรงเฉือนระหว่าง A - C $= +P/2$

แรงเฉือนระหว่าง C - B $= -P/2$

โมเมนต์ดัด

$M_A = M_B = 0$

โมเมนต์ที่ระยะ x จาก A

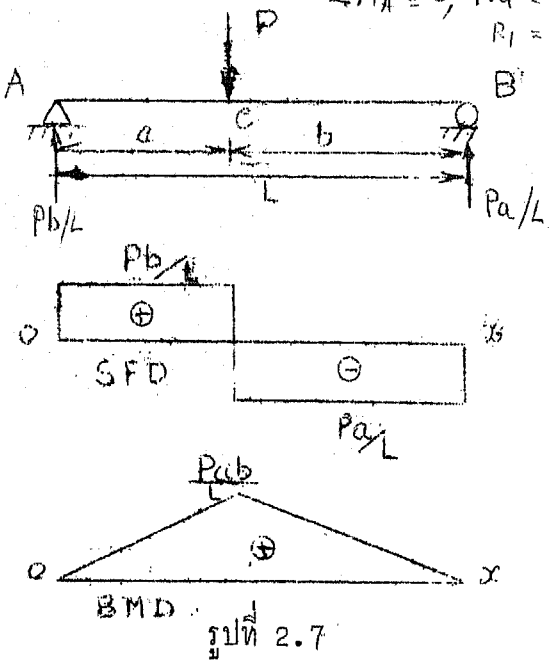
M_x ระหว่าง A - C $= +P/2 \cdot x$

M_x ระหว่าง C-B $= \frac{P}{2} x - P(x - L/2$

$M_c = +\frac{PL}{4}$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ห้ามดาวน์โหลดวันที่ 11-09-2566

(3) คานช่วงเดียว มีน้ำหนักเป็นจุดกระทำ ณ ที่ใด ๆ



รูปที่ 2.7

การคำนวณใช้ $\Sigma M_A = 0$ และ $\Sigma F_y = 0$

ได้ $R_A = \frac{Pb}{L}$ และ $R_B = \frac{Pa}{L}$

แรงเฉือนระหว่าง A - C $= + \frac{Pb}{L}$

แรงเฉือนระหว่าง C - B $= - \frac{Pa}{L}$

โมเมนต์ที่จุดใด ๆ x จาก A

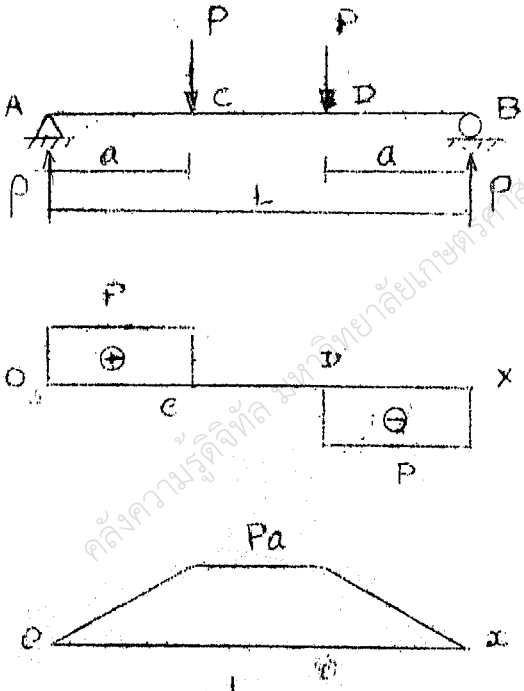
$M_A = M_B = 0$

โมเมนต์ระหว่าง A - C $= + \frac{Pbx}{L}$

$M_C = + \frac{Pab}{L}$

โมเมนต์ระหว่าง C - B $= + \frac{Pbx}{L} - P(x - a)$

(4) คานช่วงเดียวที่มีน้ำหนักจุดคู่ขนาดและตำแหน่งจากฐานเท่ากัน

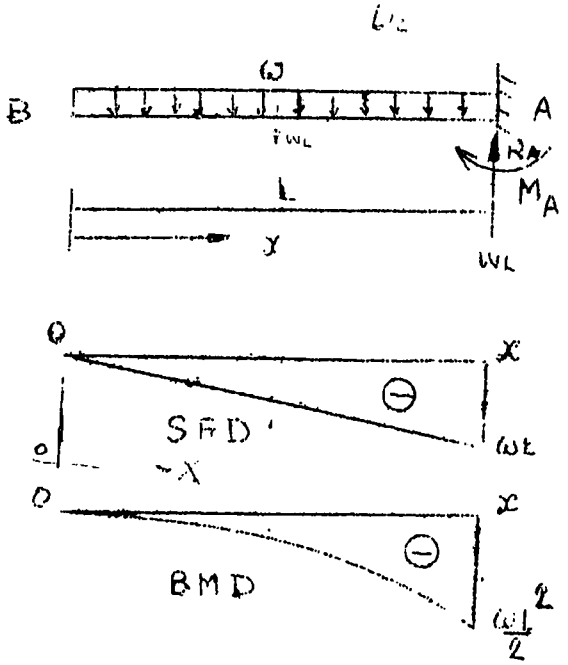


รูปที่ 2.8

การคำนวณ หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ทำได้เหมือนกัน ดังรูปที่ 2.8 แต่ที่ต่างกันก็คือ ระหว่าง C - D แรงเฉือนไม่มี คานช่วง CD จึงเรียกว่าเกิด Pure bending moment

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(5) คานยื่น มีน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอกระทำ



การคำนวณใช้ $\Sigma F_y = 0$, $\Sigma M = 0$

ได้ $R_A = wL$

$M_A = \frac{wL^2}{2}$

แรงเฉือนที่จุดใด ๆ x จาก B

$V_x = -wx$

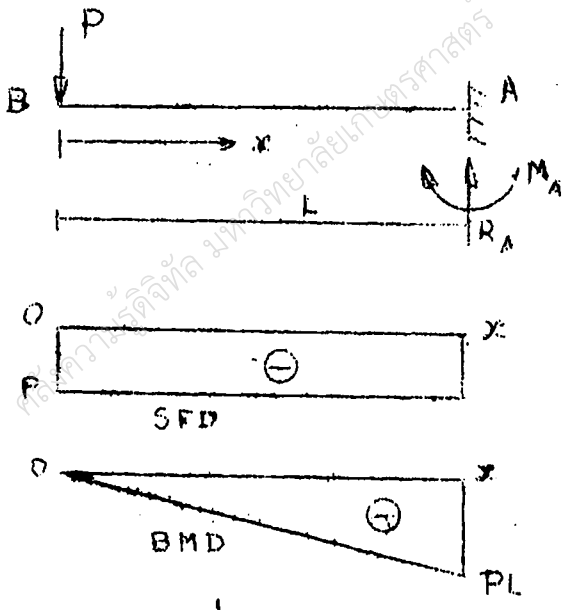
โมเมนต์ที่จุดใด ๆ x จาก B

$M_x = -\frac{wx^2}{2}$

กาพแรงเฉือนและโมเมนต์ ดังรูป

รูป 2.9

(6) คานยื่น มีน้ำหนักเป็นจุดกระทำที่ปลาย



การคำนวณใช้ $\Sigma F_y = 0$, $\Sigma M = 0$

ได้ $RA = P$

$M_A = -PL$

ที่จุดใด ๆ x จาก B

แรงเฉือน $V_x = -P$

โมเมนต์ $M_x = -P.x$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

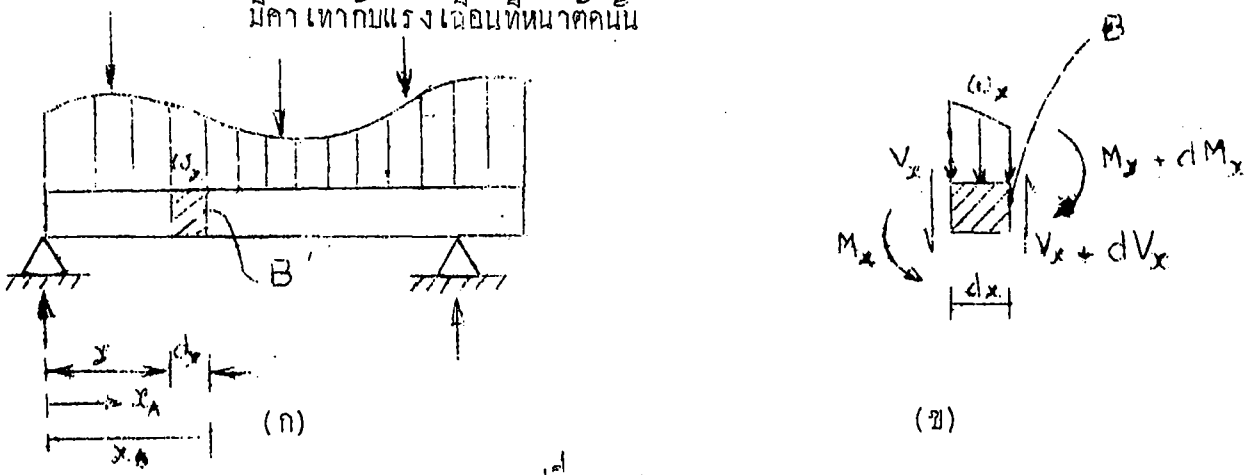
รูปที่ 2.10

(7) <u>ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก, แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด</u>

ความสัมพันธ์ดังกล่าวแบ่งออกได้เป็นสองข้อคือ

(ก) อัตราการลดของแรงเฉือนตามระยะ x จากปลายด้านซ้ายของคาน มีค่าเท่ากับความเข้มของแรงที่กระทำที่จุดนั้น

(ข) อัตราการเพิ่มของโมเมนต์ตามระยะ x จากปลายด้านซ้ายของคาน มีค่าเท่ากับแรงเฉือนที่หน้าตัดนั้น



รูปที่ 2.11

พิสูจน์ $\Sigma F_y = 0$; $V_x + dV_x = w_x dx + V_x$ รูป (ข)

$$\frac{dV_x}{dx} = w_x \quad \text{---} \quad \text{น้ำหนัก}$$

$\Sigma M_B = 0$; $V_x dx + M_x = (M_x + dM_x) + w_x dx \cdot \frac{dx}{2}$

$w_x \frac{dx^2}{2} \rightarrow 0$; $\frac{dM_x}{dx} = V_x$ ------ แรงเฉือน

$dM_x = V_x dx$

$$\int_A^B dM_x = \int_{x_A}^{x_B} V_x dx$$

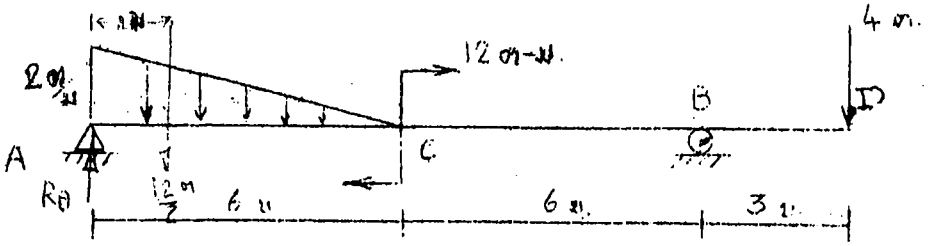
$$M_B - M_A = \int_{x_A}^{x_B} V dx = \text{พื้นที่กราฟแรงเฉือนระหว่าง B และ A}$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

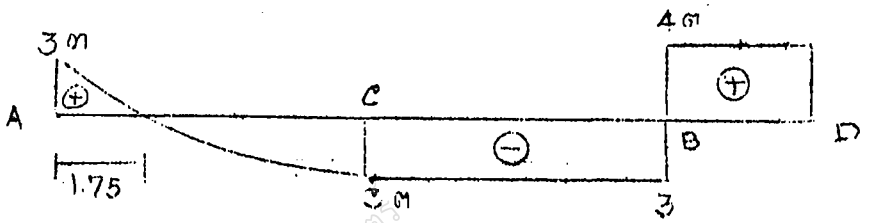
จาก $\frac{dMx}{dx} = V_x$ จะเห็นว่า ค่าโมเมนต์สูงสุดและต่ำสุดเกิดที่จุดที่แรงเฉือนเท่ากับศูนย์หรือแรงเฉือนเปลี่ยนเครื่องหมาย

คือ $\frac{dM}{dx} = V_x = 0$

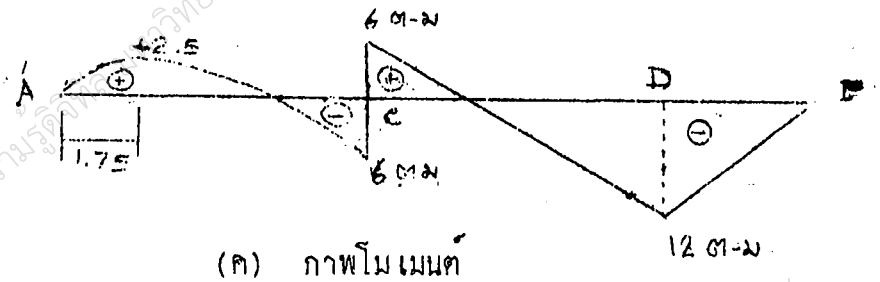
(8) วิเคราะห์คานที่กำหนดให้



(ก) คานที่กำหนด



(ข) ภาพแรงเฉือน



(ค) ภาพโมเมนต์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

รูปที่ 2.12

วิธีทำ $\Sigma M_B = 0$: $12\ R_A = 6(6+4) - 12 - 4 \times 3$

$R_A = 3$ ตัน ↑

$\Sigma F_y = 0$: $R_B = 6 + 4 - 3 = 7$ ตัน ↑

shear = 0 ที่ระยะ x จาก c

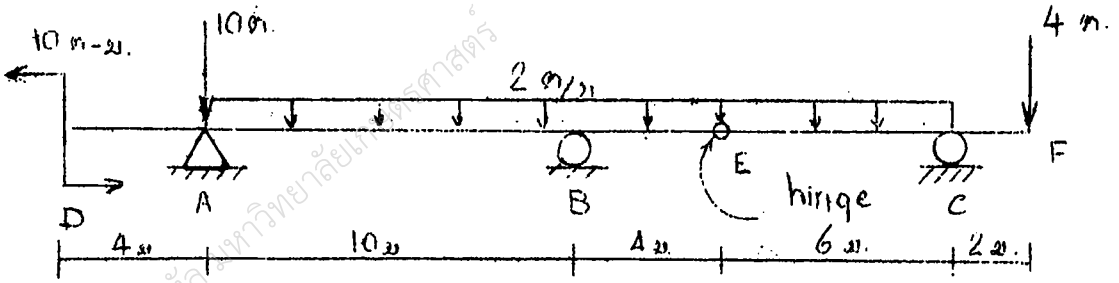
$$7 - 4 = \frac{1}{2} \times \frac{x}{3} \times x \times = \frac{x^2}{6}$$

$$x = \sqrt{6 \times 3} = 4.25 \text{ ม.}$$

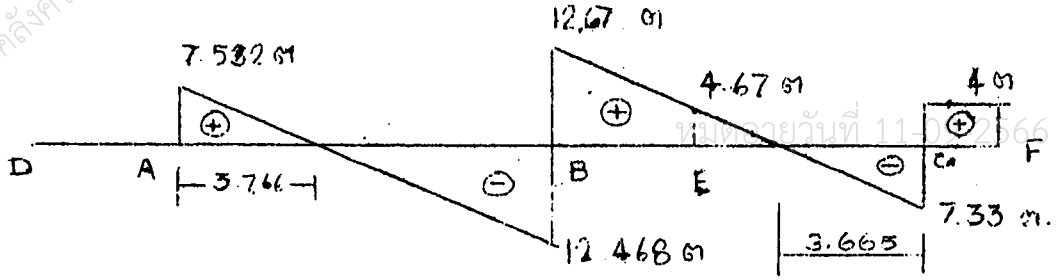
โมเมนต์ที่ขวาของ C $= M_c = 7 \times 6 - 4 \times 9 = 6$ ตัน-ม.

Max. $M^{(+)} = 7(6+4.25) - 12 - 4(9+4.25) - 3 \times \frac{4.25}{3} = +2.50$ ตัน-ม.

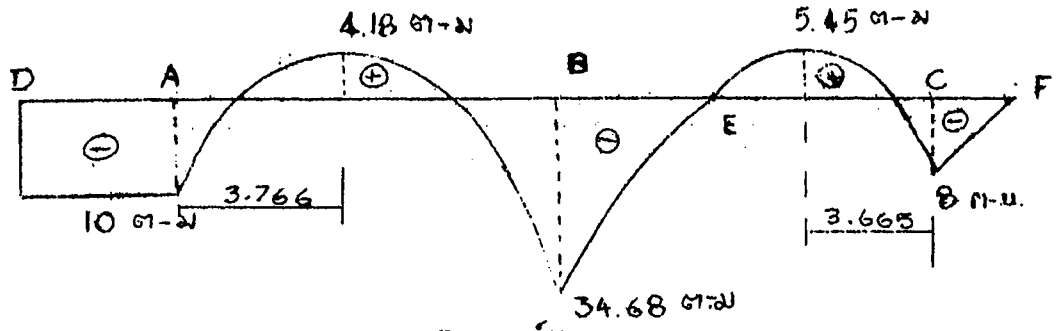
(9) วิเคราะห์คานที่กำหนดให้



(ก) คานที่กำหนด



(ข) กาพแรงเฉือน



(ก) กาพโมเมนต์ดัด

รูปที่ 2.13

วิธีทำ $\Sigma M_E = 0$ รูปคานช่วง ECF

$6V_c - 2 \times 6 \times 3 - 4 \times 8 = 0$ ได้ $V_c = 11.33$ ต ↑

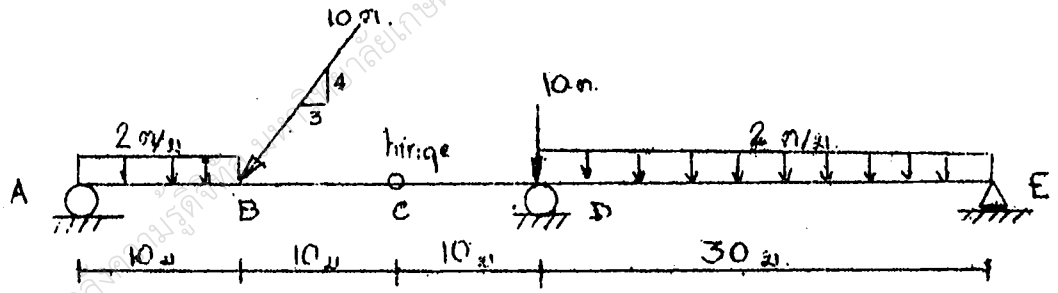
รูป ECF โดย $\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_E = 16-11.33 = 4.67$ ต

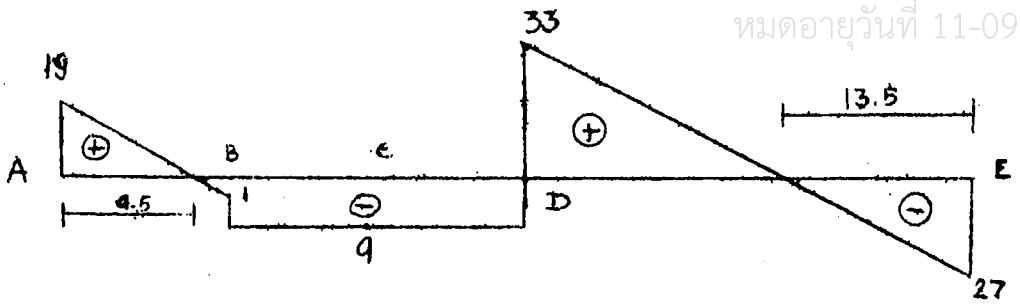
คานช่วง DABE

$\Sigma M_B = 0$ ได้ $V_A = 17.532$ ต ↑

$\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_B = 25.138$ ต ↑

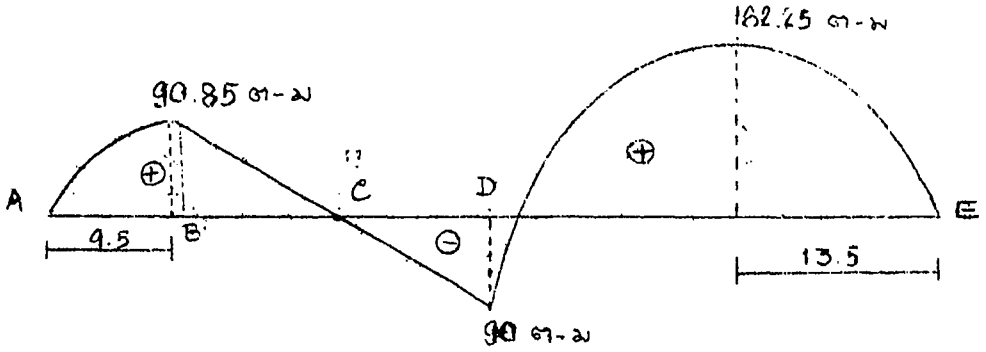
(10) วิเคราะห์คานที่กำหนดให้





SFD

หมดอายุวันที่ 11-09-2566



BMD

รูปที่ 2.14

วิธีทำ $\Sigma M_A = 0$ ช่วง ABC

$$20V_C = 2 \times 10 \times 5 + 8 \times 10$$

$$V_C = 5 + 4 = 9 \text{ ต} \quad \text{และ} \quad V_A = 28 - 9 = 19 \text{ ต} \uparrow$$

$\Sigma M_E = 0$: $30R_D = 9 \times 40 + 2 \times 30 \times 15 + 10 \times 30$

$$R_D = 12 + 30 + 10 = 52 \text{ ต} \uparrow$$

$$R_E = 9 + 70 - 52 = 27 \text{ ต} \uparrow$$

กาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ดังรูป ที่ 2.14

หมายเหตุ คานช่วง BCDE รับแรงตามแกนดึง = 6 ตัน

ดังนั้นคานช่วง AB เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

คาน BCDE เกิด 3 แรงคือ แรงตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

2.3 โครงข้อแข็ง (Rigid Frames)

เสมือนหนึ่งคานหลายตัวต่อยึดกันแน่น เป็นโครงรูปต่าง ๆ ทำให้ข้อต่อทำหน้าที่ประหนึ่งฐานรองรับที่ข้อต่อเกิดโมเมนต์ภายในสมดุลย์ คือโมเมนต์บวกเท่ากับโมเมนต์ลบ ส่วนโครงสร้างอาจจะรับแรง 1 ถึง 3 ชนิด พร้อมกันคือ แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด การโก่งงอหรือฐานรองรับเคลื่อนที่เป็นผลจากโมเมนต์ดัด

(1) ข้อควรระวังในการวิเคราะห์โครงข้อแข็ง

ก. เครื่องหมายให้ใช้เหมือนกันในโครงสร้างเดียวกัน เช่น โมเมนต์ภายในทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวก เป็นต้น

ข. เขียนรูปอิสระของแต่ละชิ้นส่วนอยู่ในสภาพสมดุลย์

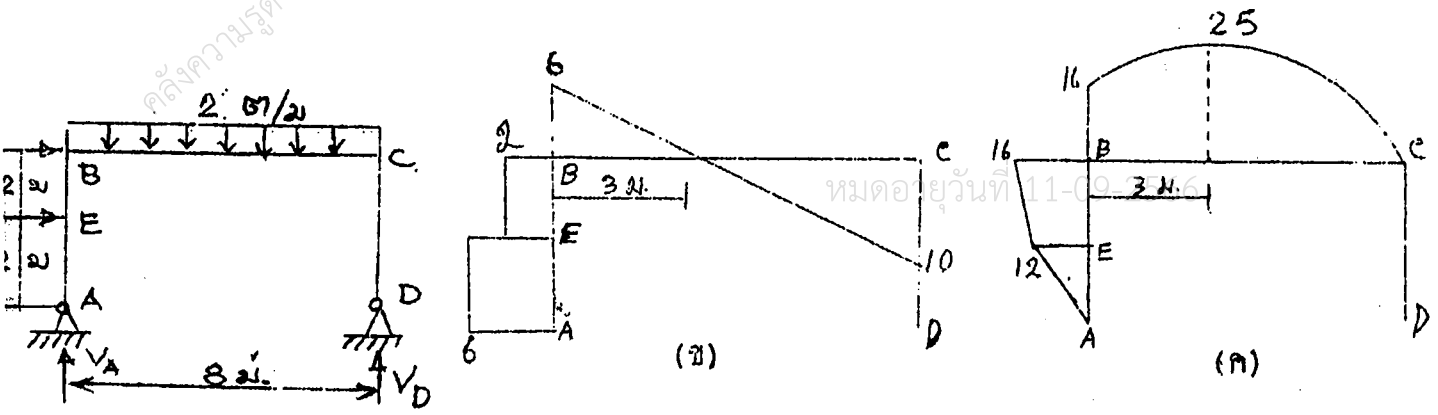
ค. เขียนกาพแรงเฉือนควรยึดตามเครื่องหมายของคาน แรงเฉือนต้องตั้งฉากกับแกนของส่วนโครงสร้าง

ง. กาพโมเมนต์ดัดเขียนทางเดียวกันทุกส่วนโครงสร้าง เช่น เขียนทางด้านเกิดแรงอัดหรือหด เป็นต้น

จ. ที่จุดเดียวกันหรือที่ข้อต่อ ผลรวมตามพีชคณิตของโมเมนต์เท่ากับสูญ คือโมเมนต์ทวนเท่ากับโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

ฉ. ค่าโมเมนต์สูงสุดเกิดที่จุดแรงเฉือนเปลี่ยนเครื่องหมายหรือแรงเฉือนเท่ากับสูญ

<u>ตัวอย่าง</u> (2) ให้วิเคราะห์โครงสร้างข้อแข็ง ซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของโครงสร้าง



รูปที่ 2.15

<u>วิธีทำ</u> $\sum MA = 0$

$8VD = 4 \times 2 + 2 \times 4 + 2 \times 8 \times 4$

$VD = 1 + 1 + 8 = 10$ ต ↑

$\sum F_y = 0$ ได้ $VA = 16 - 10 = 6$ ต ↑

$\sum F_x = 0$ ได้ $HA = 2 + 4 = 6$ ต ←

$M_{EA} = 6 \times 2 = 12$ ต – ม ↻

$M_{BE} = 6 \times 4 - 4 \times 2 = 16$ ต – ม ↻

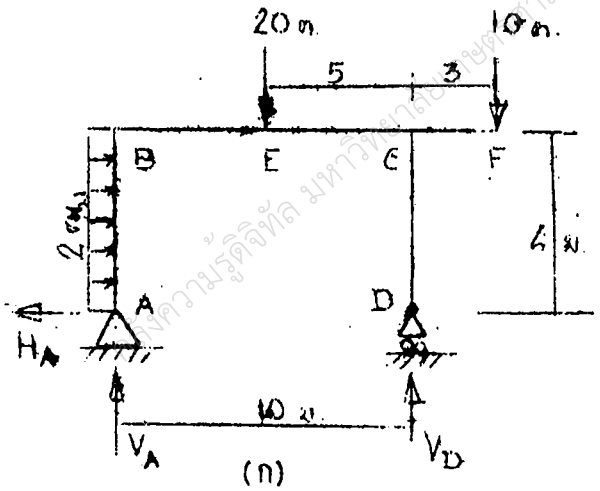
BC : $V = 0$ ที่ $x = \frac{V_A}{2} = 3$ ม. จาก B

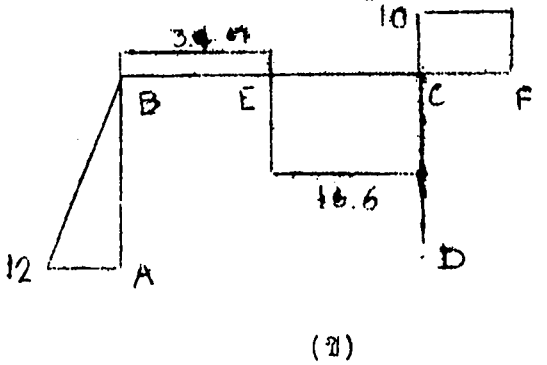
โมเมนต์สูงสุดที่ $x = 3$ คิดทางส่วนขวามือ $= 10 \times 5 - 2 \times \frac{5^2}{2} = 25$ ต – ม ↺

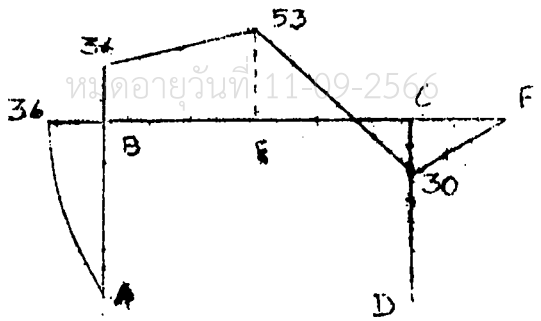
คิดทางส่วนซ้ายมือ $= 16 + 6\ 3 - 2 \cdot \frac{3^2}{2} = 25$ ต – ม ↻ ถูกต้อง

กาพแรงเฉือนและโมเมนต์คัดในรูป (ข) และ (ค) ตามลำดับ

(3) ให้วิเคราะห์โครงสร้างข้อแข็ง ซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูปเขียนกาพแรงเฉือนและโมเมนต์คัด







รูปที่ 2.16

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

<u>วิธีทำ</u> $\Sigma M_A = 0$

$10V_D = 2 \times 6 \times 3 + 20 \times 5 + 10 \times 13$

$V_D = 3.6 + 10 + 13 = 26.6$ ต ↑

$\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_A = 30 - 26.6 = 3.4$ ต ↑

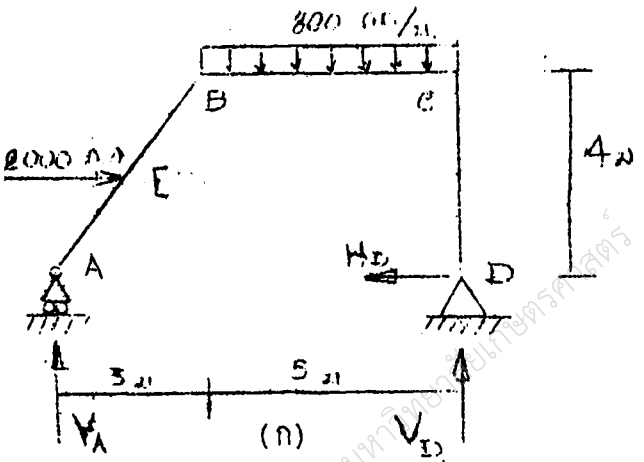
$\Sigma F_x = 0$ ได้ $H_A = 12$ ต ←

$M_{BA} = 12 \times 6 - 12 \times 3 = 36$ ต – ม. ↻

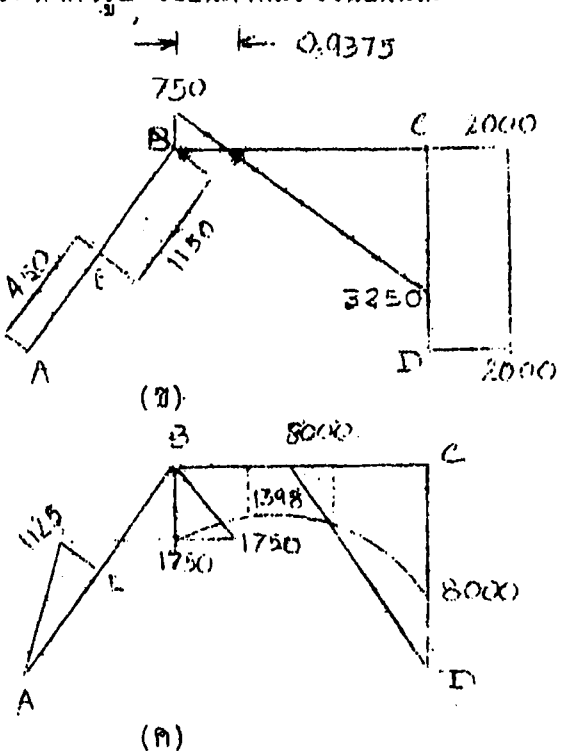
$M_{EC} = 26.6 \times 5 - 10 \times 8 = 53$ ต – ม. ↺

ภาพแรงเฉือนและภาพโมเมนต์ แสดงในรูป (ข) และ (ค) ตามลำดับ

(4) ให้วิเคราะห์โครงสร้างซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด



รูปที่ 2.17



หมดอายุวันที่ 11-09-2566

<u>วิธีทำ</u> $\Sigma M_D = 0$

$8V_A = 4000 \times 2.5 - 2000 \times 2$

$V_A = 1250 - 500 = 750$ กก.

$\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_D = 4000 - 750 = 3250$ กก.

$M_{BE} = 750 \times 3 - 2000 \times 2 = -1750$ กก. – ม. ↻

หรือ $M_{BC} = 3250 \times 5 - 2000 \times 4 - 4000 \times 2.5 = 1750$ ↺

$M_{AE} = 3250 \times 8 - 2000 \times 2 - 4000 \times 5.5 = 0$ CHECK

ช่วง BC จุดที่แรงเฉือน $= 0$ ที่ระยะ x

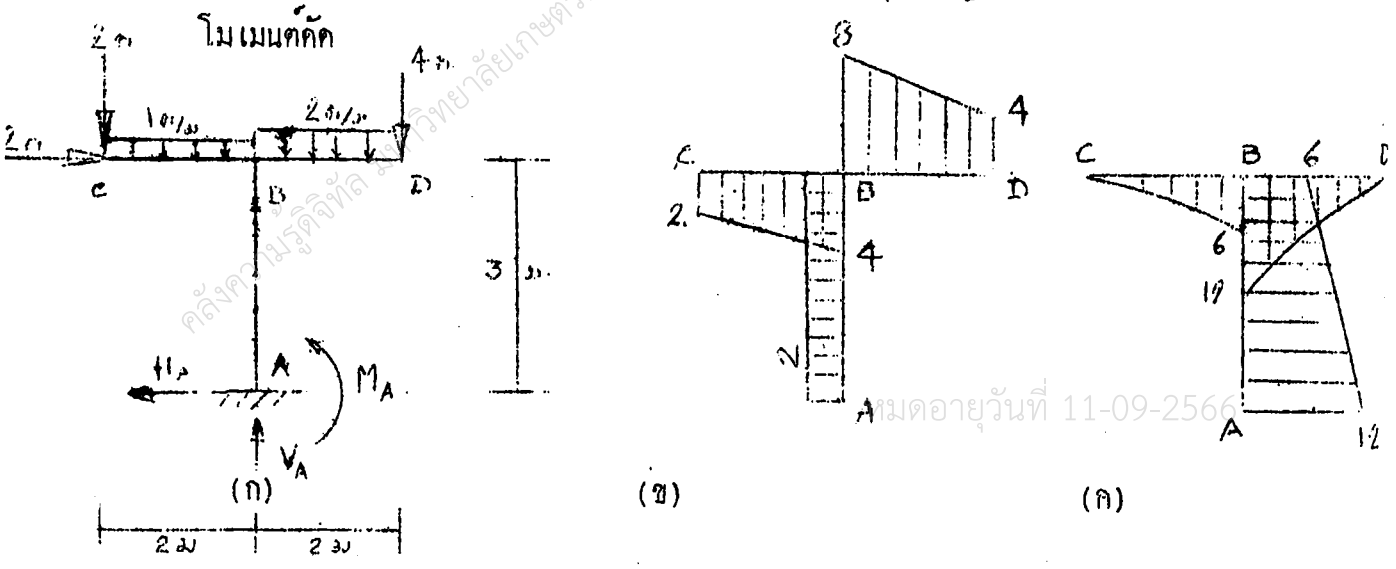
$$x = \frac{750}{800} = 0.9375 \text{ ม.}$$

โมเมนต์สูงสุดในช่วง BC $= 750 \times 0.9375 - 1750 - 800 \times \frac{(0.9375)^2}{2}$

$= 703 - 1750 - 351 = -1398$ กก – ม ↻

แสดงว่าจุดที่แรงเฉือนเปลี่ยนเครื่องหมาย (จุดที่แรงเฉือนเป็นศูนย์) เกิดโมเมนต์ดัดต่ำที่สุด คือ 1398 กก – ม และ BC เกิดแรงอัดที่ผิวล่างตลอด รูป (ข) แสดงภาพแรงเฉือน และรูป (ค) แสดงภาพโมเมนต์

(5) ให้วิเคราะห์โครงสร้างซึ่งมีน้ำหนักบรรทุก ดังรูป เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด



รูปที่ 2.18

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ $\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_A = 2 + 2 + 4 + 4 = 12$ ต ↑

$\Sigma F_x = 0$ ได้ $H_A = 2$ ต ←

$\Sigma M_A = 0$

ได้ $M_{AB} = 2 \times 3 + 2 \times 2 \times 1 + 4 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \times 2 \times 1 = 12$ ต – ม ↻

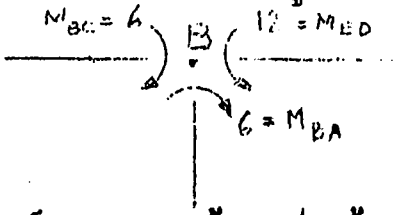
จะพบว่าส่วน AB และ BC มีแรงตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์คัด ส่วน BD นั้นมีลักษณะเหมือนคาน มีแรงเฉือนและโมเมนต์คัดเท่านั้น

$M_{BC} = 2 \times 2 + 1 \times 2 \times 1 = 6$ ต – ม ↺

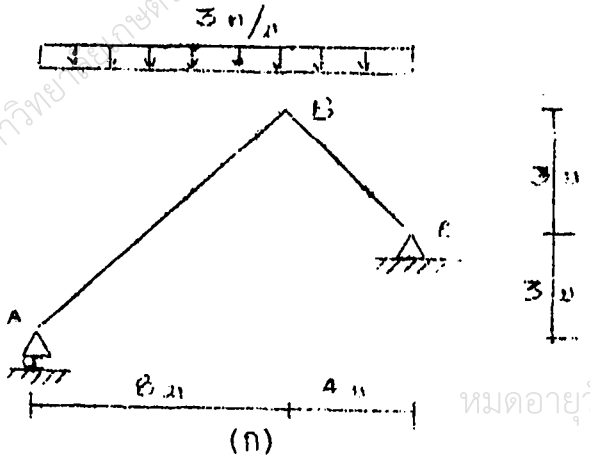
$M_{BD} = 2 \times 4 + 2 \times 2 \times 1 = 12$ ต – ม ↻

$\Sigma M_B = 0$ ได้ $M_{BA} = 12 - 6 = 6$ ต – ม ↺

รูป (ข) แสดงกาพแรงเฉือน และรูป (ค) แสดงภาพโมเมนต์



(6) ให้วิเคราะห์แรงในโครงข้อแข็งซึ่งมีน้ำหนักดังรูป เขียนกาพแรงเฉือนและโมเมนต์ของทุกชิ้นส่วน



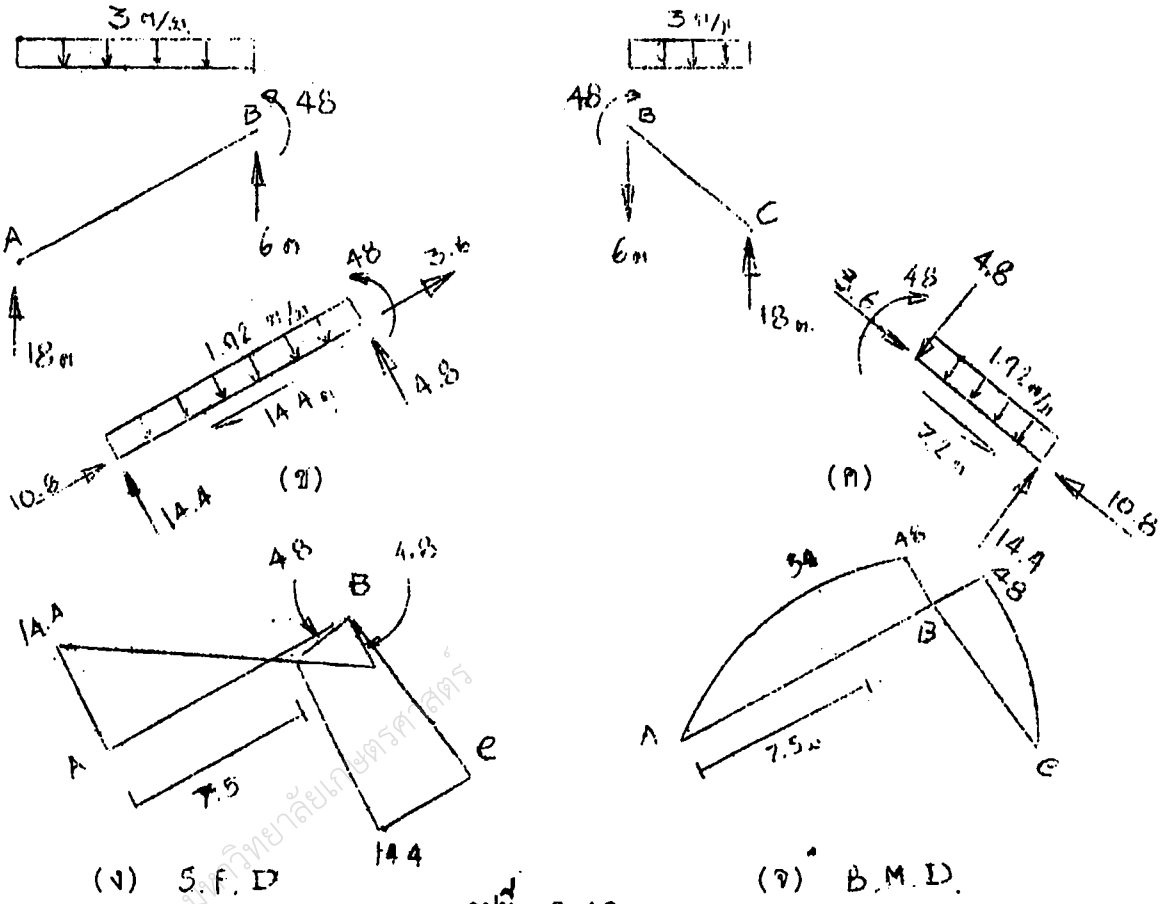
(ก)

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ $\sum M_C = 0$: $12R_A = 3 \times 12 \times 6$

$R_A = 18$ ตัน ↑

$\sum V = 0$: $R_C = 36 - 18 = 18$ ตัน ↑



รูปที่ 2.19

คลังความรู้ดิจิทัล ม. วิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

2.4 โครงสร้างข้อหมุน (Truss)

โครงข้อหมุนเกิดจากการต่อชิ้นส่วนตรงเป็นรูปสามเหลี่ยมต่อเนื่องกันด้วยข้อต่อ ถ้าให้จำนวนข้อต่อเป็น j และ m เป็นจำนวนชิ้นส่วน

โครงสามเหลี่ยมแรกจะมี m = 3 และ j = 3 สามเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นมาภายหลังจะมี m เพิ่มขึ้นรูปละ 2 ตัว แต่ค่า j เพิ่มขึ้นรูปละ 1 ข้อต่อเท่านั้น ดังนั้น m − 3 และ j − 3 จึงเป็น m และ j ที่เพิ่มขึ้นจากสามเหลี่ยมแรก คือค่านเพิ่มเป็น 2 เท่าของข้อต่อ คือ

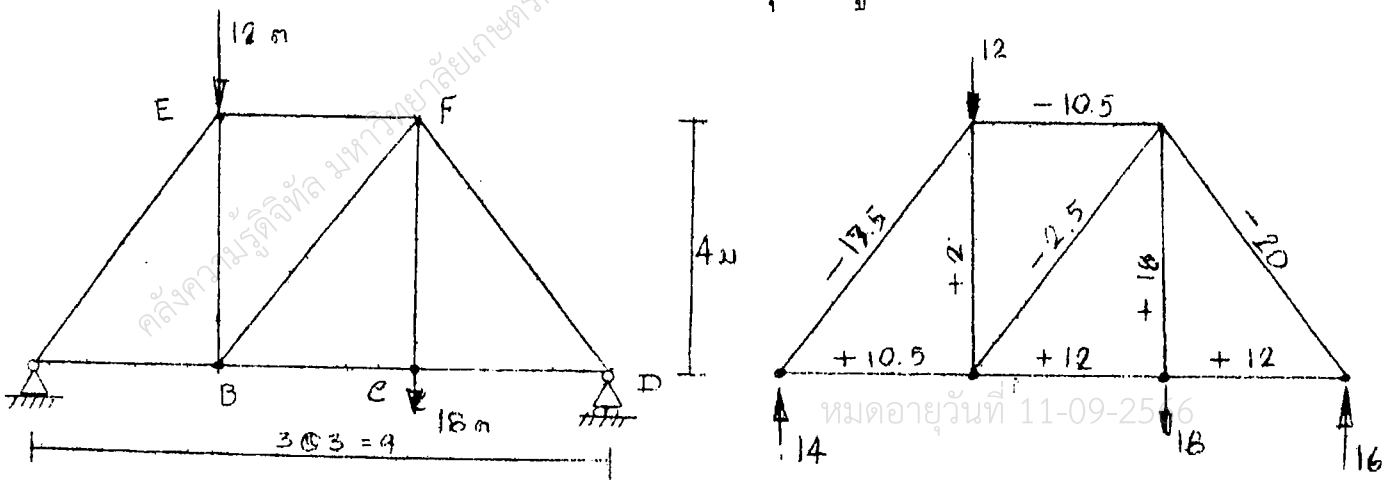
$$m-3 = 2(j-3)$$

$$m = 2j-3 \quad \text{-------- เป็นโครงข้อหมุนทั่วไป}$$

การวิเคราะห์โครงข้อหมุนทำได้ทั้งวิธีคำนวณและวิธีกราฟ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวิธีคำนวณโดยแยกออกได้ดังนี้

(1) วิธีข้อต่อ (Joint Method) โดยที่ข้อต่อของโครงหมุนได้ จึงไม่เกิดโมเมนต์ ดังนั้นผลรวมของแรงตามพีชคณิตที่ข้อต่อใด ๆ เท่ากับศูนย์ คือใช้ 2 สมการ $\Sigma F_y = 0$ และ $\Sigma F_x = 0$ ดังนั้นการคำนวณแต่ละข้อต่อจะมีแรงไม่รู้ค่าเพียง 2 ตัวเท่านั้น เริ่มแรกจะต้องคำนวณแรงปฏิกิริยาต่าง ๆ ให้หมดก่อน

ตัวอย่าง ให้วิเคราะห์โครงข้อหมุน ดังรูปที่ 2.20 (ก)



(ก) (ข)

รูปที่ 2.20

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

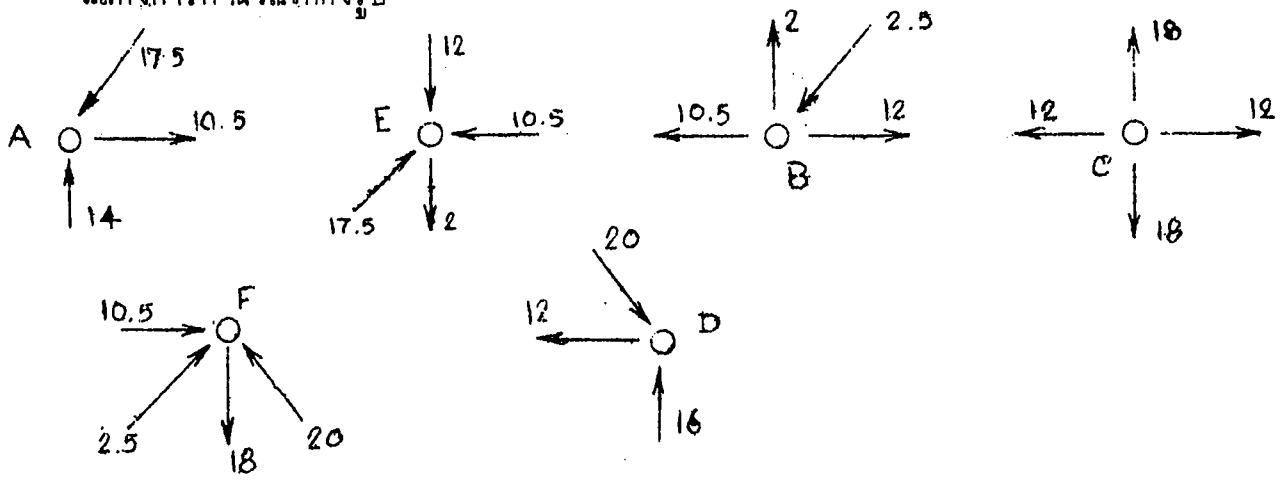
<u>วิธีทำ</u> $\Sigma M_A = 0$ ได้ $V_D = 12 + 4 = 16$ ต ↑

$\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_A = 6 + 8 = 14$ ต ↑

ข้อต่อ A $\Sigma F_y = 0$ ได้แรง $AE = \frac{5}{4} \times 14 = 17.5$ ต (อ)

$\Sigma F_x = 0$ ได้แรง $AB = \frac{3}{4} \times 14 = 10.5$ ต (ค)

แสดงการคำนวณได้ดังรูป



การคำนวณโดยเริ่มต้นจากข้อต่อ A, E, B, C, F และ D ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบเมื่อรู้ค่าแรงปฏิกิริยา V_D จากข้อต่อ D แรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นล่าง แสดงในรูปที่ 2.20 (ข) เมื่อใช้เครื่องหมาย + แทนแรงดึง (ค) และ − แทนแรงอัด (อ)

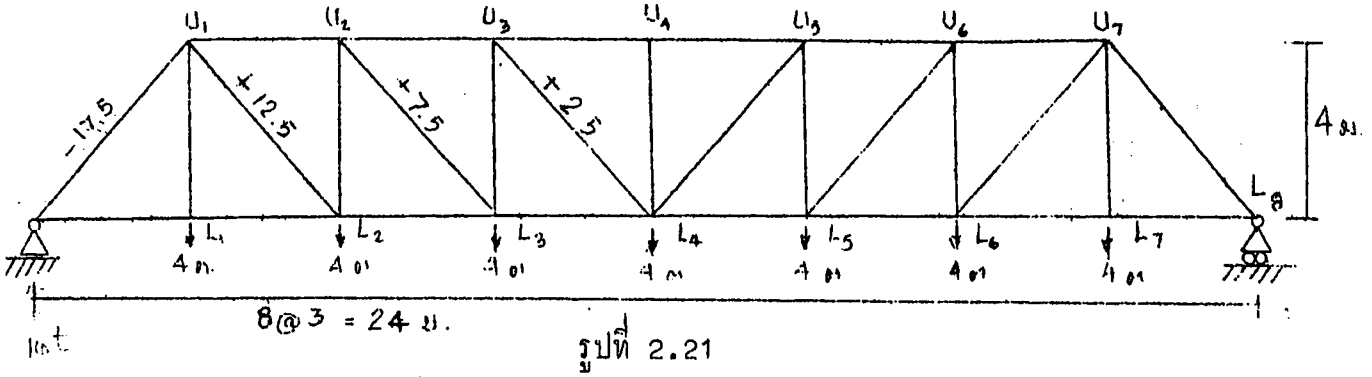
(2) วิธีรูปตัด (Method of Sections)

บางครั้งโครงต่อเนื่องกันมาก สามารถที่ตัดโครงเป็นส่วน ๆ และให้เกิดความสมดุลย์ของรูปอิสระ ซึ่งสามารถจะสมดุลย์โดยแรงเฉือนหรือโมเมนต์ได้ เพราะแรงที่เกิดในชิ้นส่วนของโครงเป็นแรงตามแกนเท่านั้น

ก. โดยวิธีแรงเฉือน (Method of shear) ในกรณีที่มีชิ้นส่วนแนวทะแยงเพียง 1 ตัวในรูปตัด

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง วิเคราะห์โครงข้อหมุนโดยรูปตัดแรงเฉือนสำหรับ L_0U_1 , U_1L_2, U_2L_3, U_3L_4, L_4U_5, L_5U_6, L_6U_7 และ U_7L_8



รูปที่ 2.21

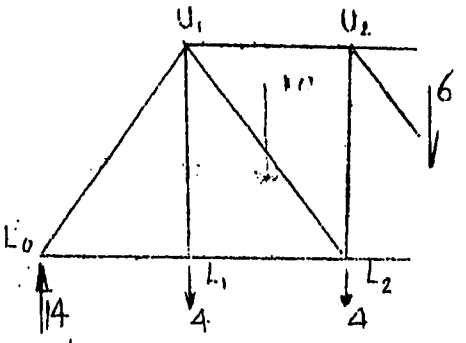
แรงปฏิกิริยาที่ L_0 และ L_8 = 14 ต ↑

แรง L_0U_1 = $\frac{5}{4}$ x 14 = 17.5 ต (อ)

แรง U_1L_2 = $\frac{5}{4}$ x 10 = 12.5 ต (ค)

แรง U_2L_3 = $\frac{5}{4}$ x 6 = 7.5 ต (ค)

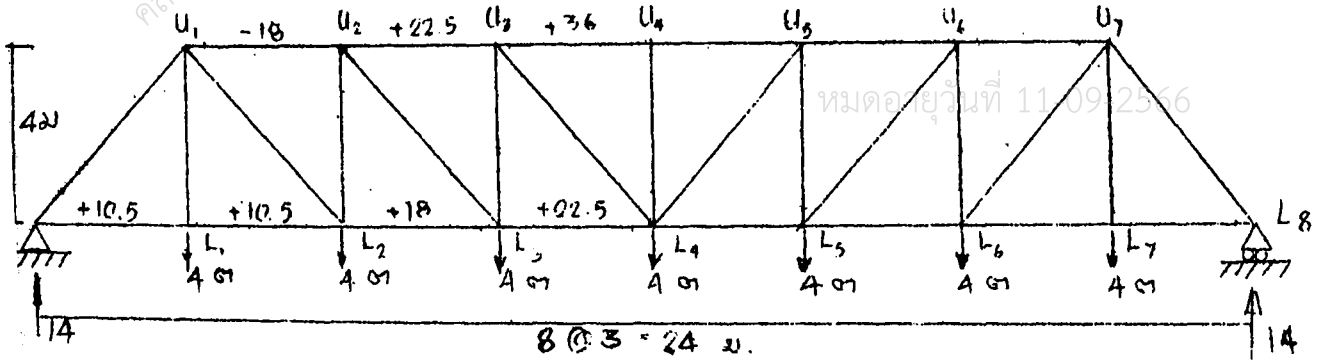
แรง U_3L_4 = $\frac{5}{4}$ x 2 = 2.5 ต (ค)



ผลการคำนวณดังแสดงในรูปเพียงครึ่งเดียว, ของรูปที่ 2.21

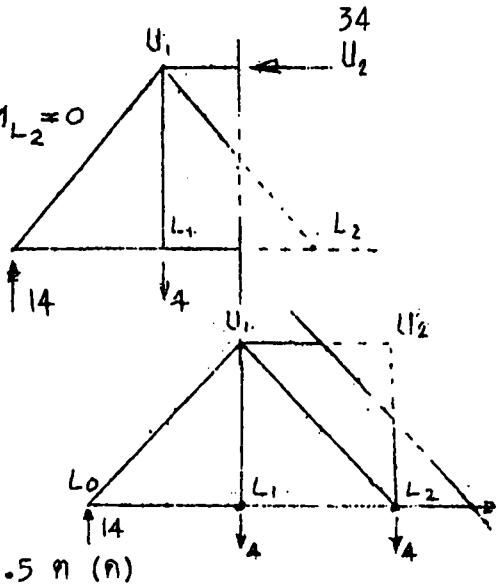
ข. โดยวิธีโมเมนต์ (Method of Moment) โครงบางรูปสามารถหาแนวตั้งฉากได้ง่าย เมื่อตัดรูปอิสระแล้วต่อแนวของชิ้นส่วน 2 แนวพบกันที่จุดหมุน ดังนั้นจึงเหลือเพียงชิ้นส่วนเดียว คำนวณหาโดยโมเมนต์ได้

ตัวอย่าง ต้องการคำนวณหาแรงของส่วนบน (Top chord) และส่วนล่าง (Bottom chord) สำหรับโครงที่มีแนวขนานดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22

คลังความรู้ดิจิทัล สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หมดอายุวันที่ 11/09/2566



ต้องการหาแรงใน U_1U_2 ตัดโครงดังรูป $\Sigma M_{L_2} = 0$

$4U_1U_2 = 14 \times 6 - 4 \times 3$

$U_1U_2 = 21 - 3 = 18$ ต (อ)

หรือต้องการหา L_2L_3 โดย $\Sigma M_{U_2} = 0$

$4L_2L_3 = 14 \times 6 - 4 \times 3$

$L_2L_3 = 18$ ต (ค)

$L_0L_1 = L_1L_2 = \frac{14 \times 3}{4} = 10.5$ ต (ค)

$\Sigma ML_3 = 0$ ได้ $U_2U_3 = (14 \times 9 - 4 \times 6 - 4 \times 3) \div 4 = 22.5$ ต (อ)

และ $L_3L_4 = 22.5$ ต (ค)

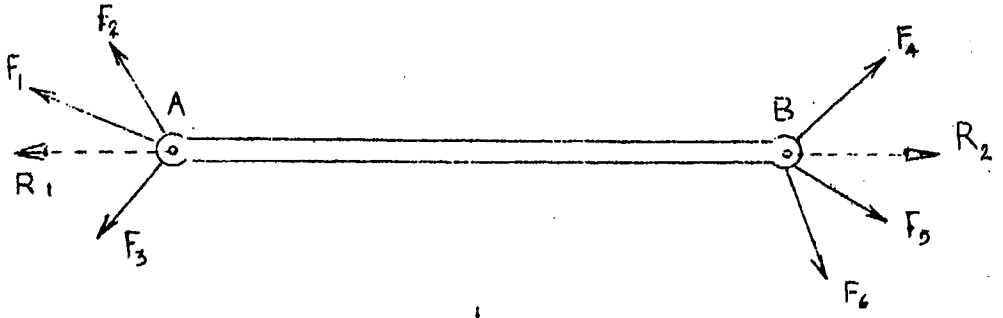
$\Sigma ML_4 = 0$ ได้ $U_3U_4 = 14x12-4(9+6+3) \div 4 = 36$ ต (อ)

สามารถเขียนแรงในชิ้นส่วนได้ในรูปที่ 2.22 เพียงครั้งเดียว

การที่จะเลือกว่าวิธีไหนจะสะดวกและได้ผลแม่นยำนั้น จะต้องรู้จักสังเกตและมีความชำนาญในการตัดสินใจ ผลการคำนวณสามารถตรวจสอบกันได้ทุกวิธี ตัวอย่างที่ยกขึ้นมาประกอบเป็นโครงที่มีส่วนบนและส่วนล่างขนานกัน ซึ่งเป็นโครงที่พบอยู่เสมอ ๆ ในอาคารทั่วไป

2.5 โครงสร้างเชิงประกอบ (Composite Structures)

โครงสร้างชนิดนี้ แต่ละชิ้นส่วนอาจจะรับจำนวนแรงต่างกัน เช่นแรงตามแกน แรงเฉือน และโมเมนต์คัด การวิเคราะห์โครงสร้างจะต้องรู้ว่าชิ้นส่วนใดจะรับแรงแบบไหน ได้แก่ชิ้นส่วน 2 แรง (Two force momber) และชิ้นส่วน 3 แรง (Three force member) ชิ้นส่วน 2 แรงคือ ปลายส่วนโครงสร้างเป็นข้อหมุนและไม่มีแรงกระทำทางขวางต่อชิ้นส่วน นอกจากนี้แล้วเรียกว่าชิ้นส่วน 3 แรง ตัวอย่างรูปที่ 2.23 คือชิ้นส่วน 2 แรง AB

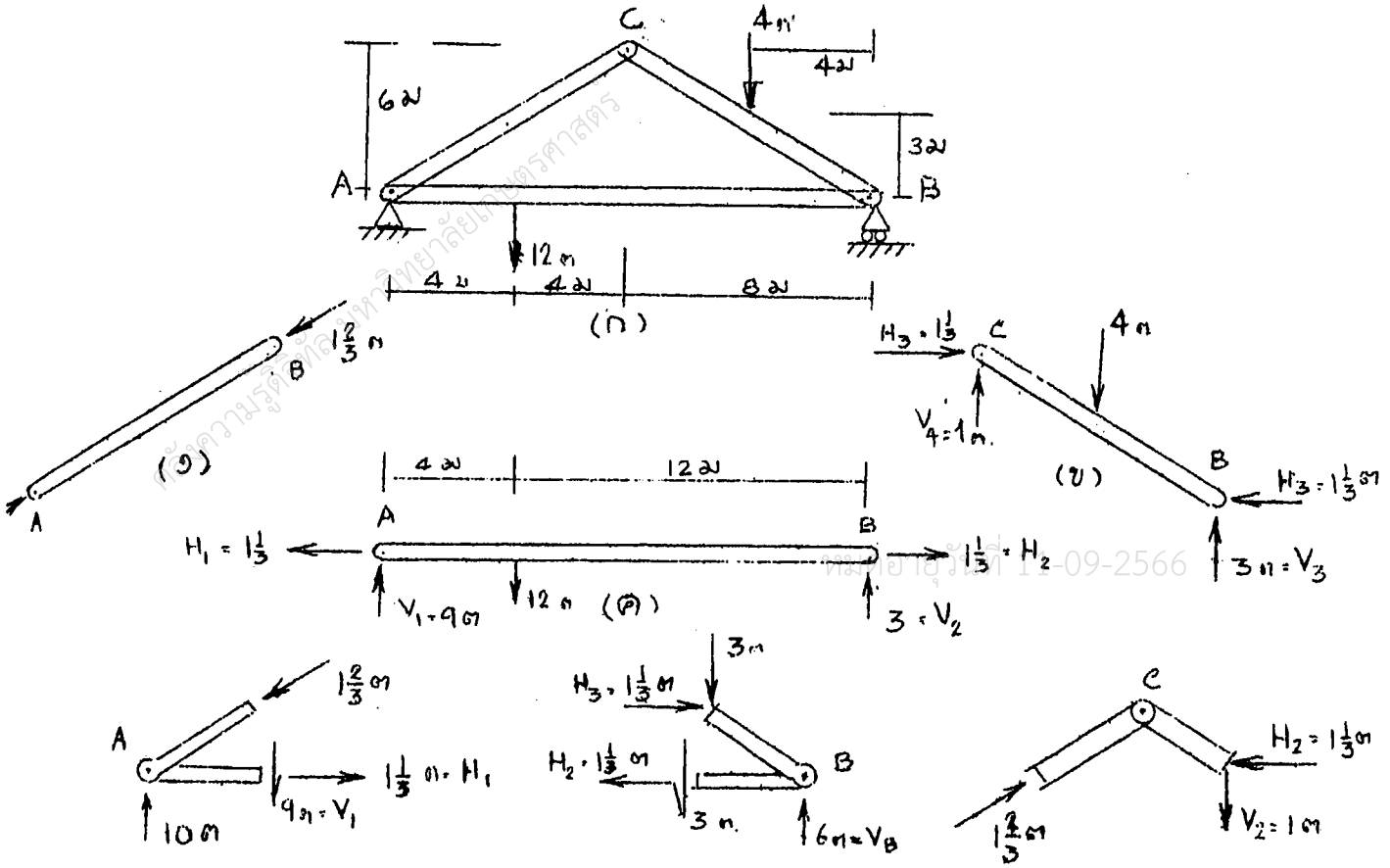


รูปที่ 2.23

ชิ้นส่วน AB ข้อต่อหมุนได้ ถ้า R_1 เป็นแรงรวมของแรง $F_1F_2F_3$ ที่ปลาย A และ R_2 เป็นแรงรวมของ F_4 F_5 F_6 ที่ปลาย B เมื่อชิ้นส่วนสมดุลย์ ขนาด $R_1 = R_2$ มีทิศทางตรงกันข้าม

ในการวิเคราะห์โครงสร้างชนิดนี้ จะต้องจำแนกออกได้ว่าชิ้นส่วน 2 แรงหรือ 3 แรง คำนวณหาแรงจากรูปอิสระทั้งหมดลงไปหาส่วนย่อย โดยใช้สมการ $\Sigma F_x = 0$ $\Sigma F_y = 0$ และ $\Sigma M = 0$ การคำนวณไม่นำค่าความยืดหรือหดของชิ้นส่วนมาเกี่ยวด้วย

(1) ให้วิเคราะห์โครงสร้างซึ่งมีแรงกระทำดังรูปที่ 2.24 (ก)



รูปที่ 2.24

รูปอิสระทั้งหมด ABC

$\Sigma M_A = 0 \therefore 16 V_D = 2 \times 4 + 4 \times 12$

$V_D = 6$ ต ↑

$\Sigma F_y = 0 \therefore V_A = 10$ ต ↑

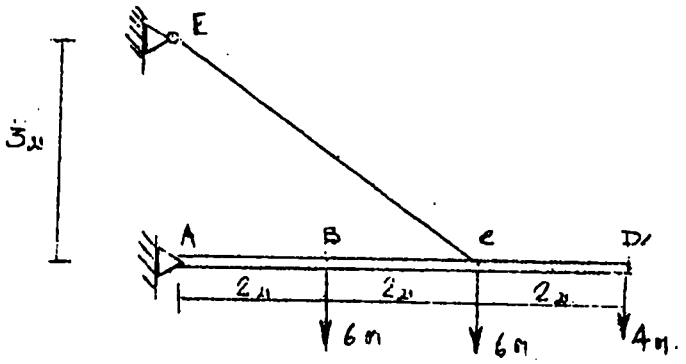
ชิ้นส่วน AB ได้ $V_1 = 9$ ต $V_2 = 3$ ต.

ชิ้นส่วน BC ได้ $V_3 = 6 - 3 = 3$ ต $V_4 = 1$ ต $H_3 = 1\frac{1}{3}$ ต

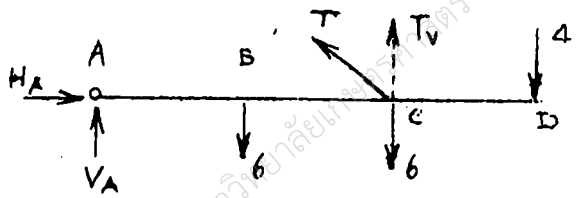
ชิ้นส่วน AC ได้ แรงตามแกน $= \frac{5}{4} \times H_3 = 1\frac{2}{3}$ ต. หรือ 1.667 ตัน

ทุกชิ้นส่วนและข้อต่อมีแรงสมดุลย์ดังรูป ซึ่งสามารถตรวจสอบกันได้ AC เป็นชิ้นส่วน 2 แรง ส่วน AB และ BC เป็นชิ้นส่วน 3 แรง

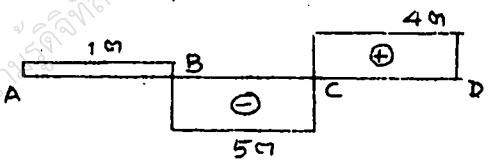
(2) ให้วิเคราะห์แรงในโครงสร้างเชิงประกอบ ดังรูปที่ 2.25



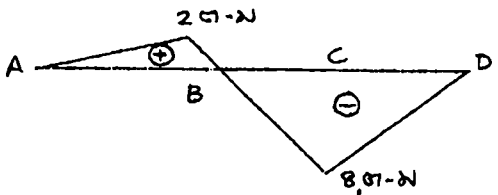
(ก) กำหนดให้



(ข) รูปอิสระ



(ค) ภาพแรงเฉือน



(ง) ภาพโมเมนต์

รูปที่ 2.25

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ $\Sigma M_A = 0$

$4T_V = 6 \times 2 + 6 \times 4 + 6 \times 4$

$T_V = 3 + 6 + 6 = 15$ ต ↑

$T = \frac{5}{3} \times 15 = 25$ ต

$T_H = \frac{4}{5} \times 25 = 20$ ต ←

$\Sigma F_x = 0$ ได้ $H_A = 20$ ต ←

$\Sigma F_y = 0$ ได้ $V_A = 6 + 6 + 4 - 15 = 1$ ต ↑

จากการวิเคราะห์โครงสร้างนี้จะพบว่า

CE เป็นส่วนโครงสร้างที่รับแรงดึงเท่านั้น ใช้สลิงรับได้

ABC เกิดแรงอัดตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ซึ่งกึ่งคานเสา (Beam-column)

CE เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด เป็นคานสมบูรณ์

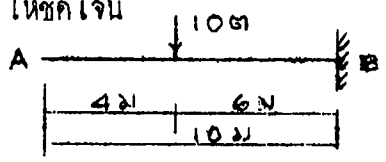
ดังนั้นการเลือกวัสดุมาประกอบเป็นโครงสร้าง เพื่อให้เกิดการประหยัดและปลอดภัย จึงเลือกวัสดุชนิดแตกต่างกันได้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

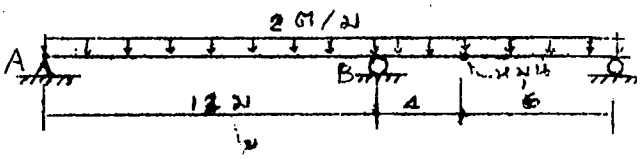
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แบบฝึกหัด

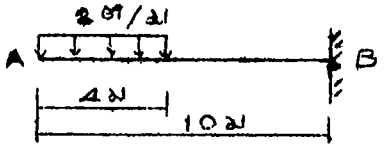
ให้วิเคราะห์แรงในคาน เนื่องจากมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนกาพแรงเฉือนและโมเมนต์
ให้ชัดเจน



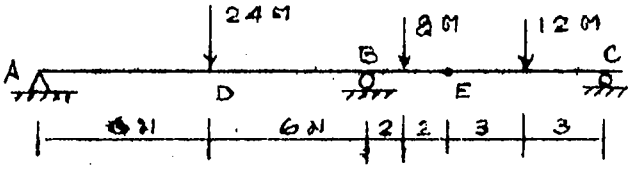
ข้อ 2 – 1



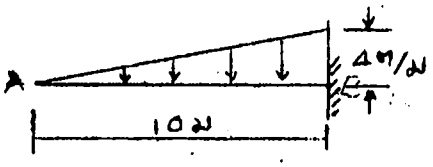
ข้อ 2 – 2



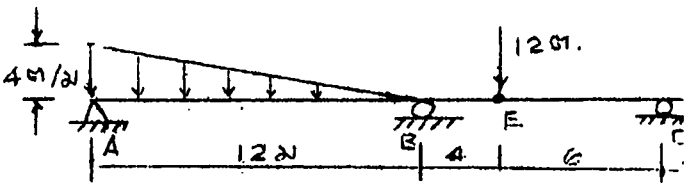
ข้อ2 – 3



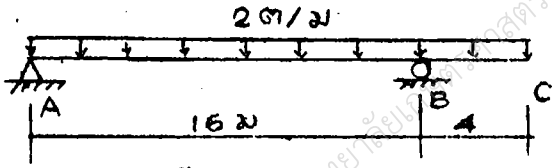
ข้อ 2 – 4



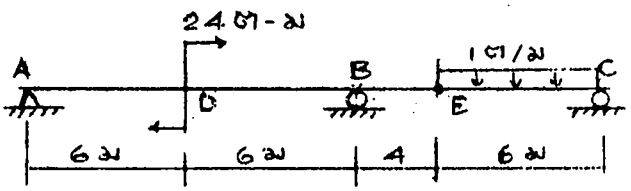
ข้อ2 – 5



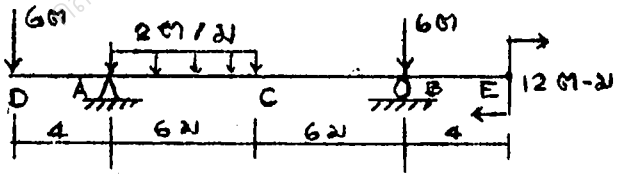
ข้อ2 – 6



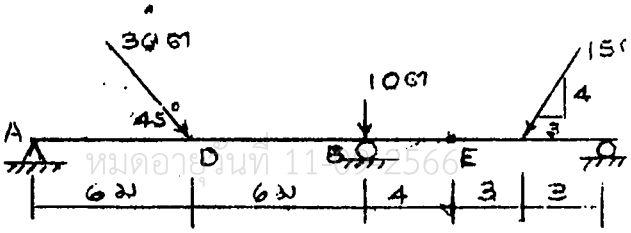
ข้อ 2– 7



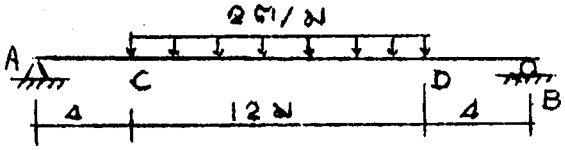
ข้อ2 – 8



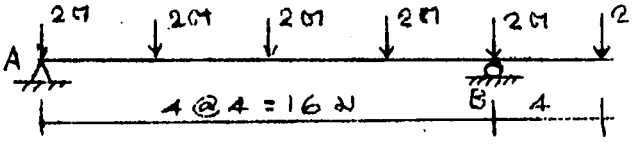
ข้อ2 – 9



ข้อ2 – 10



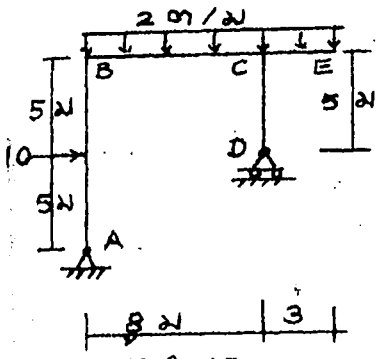
ข้อ2 – 11



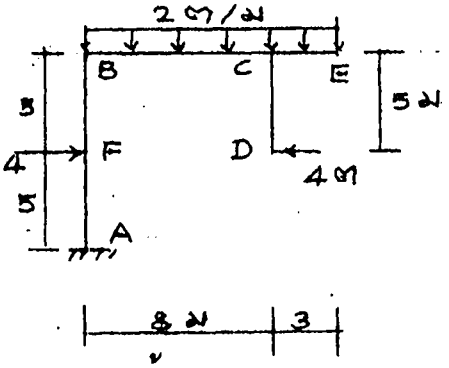
ข้อ 2 – 12

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11/[illegible]/2566

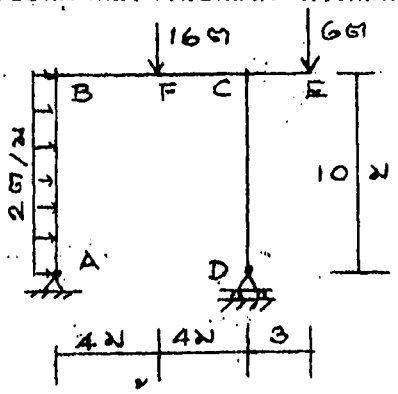
ให้วิเคราะห์แรงในโครงข้อแข็งเนื่องจากมีน้ำหนักกระทำดังรูป เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด



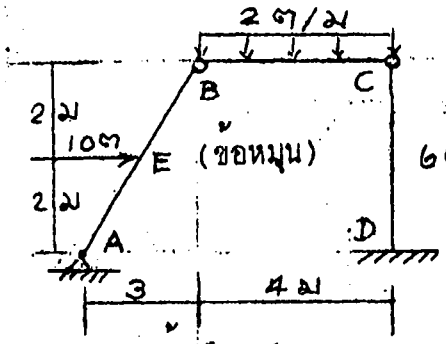
ข้อ 2-13



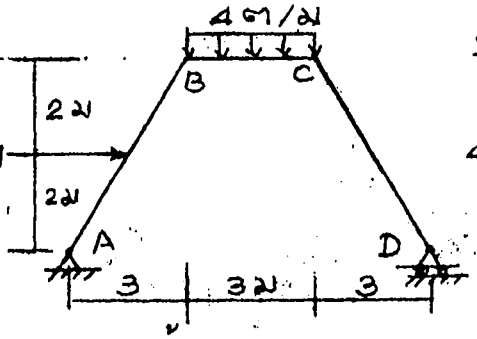
ข้อ 2-14



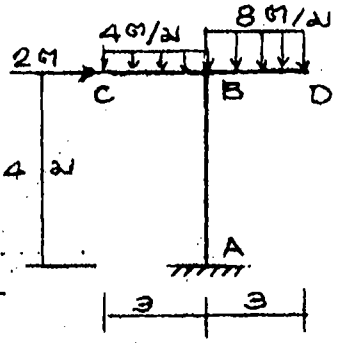
ข้อ 2-15



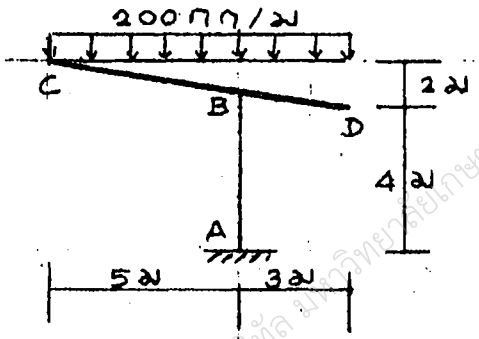
ข้อ 2-16



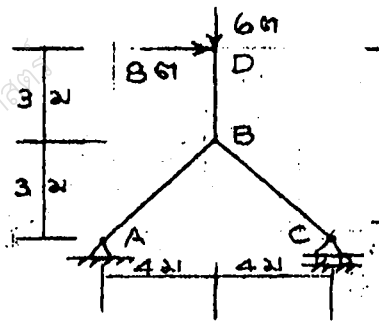
ข้อ 2-17



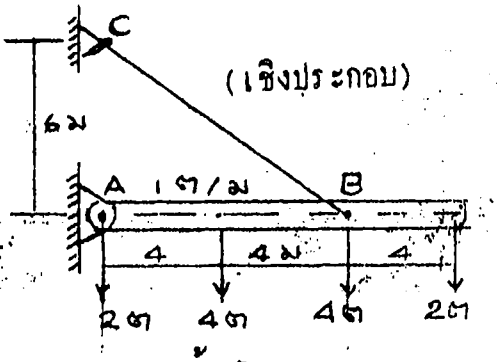
ข้อ 2-18



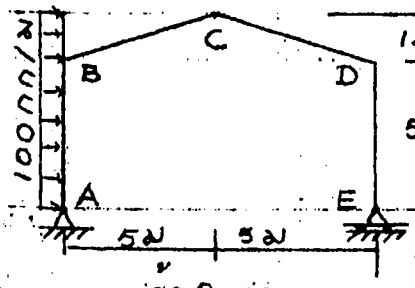
ข้อ 2-19



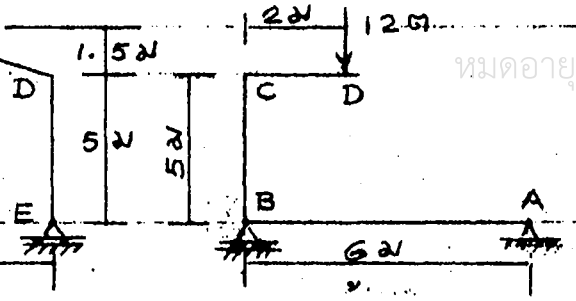
ข้อ 2-20



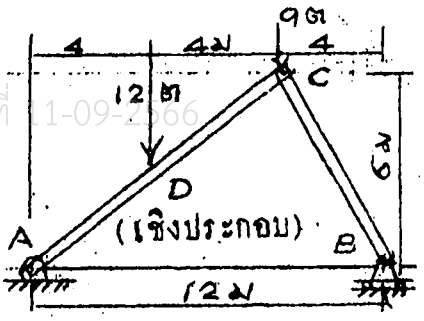
ข้อ 2-21



ข้อ 2-22



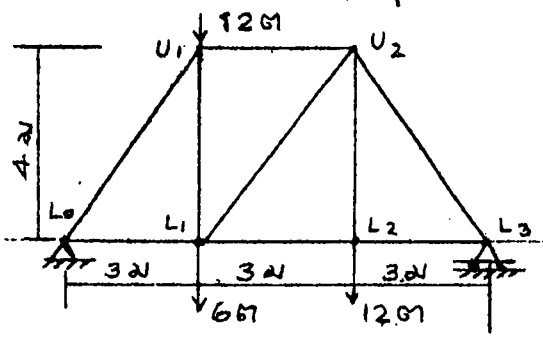
ข้อ 2-23



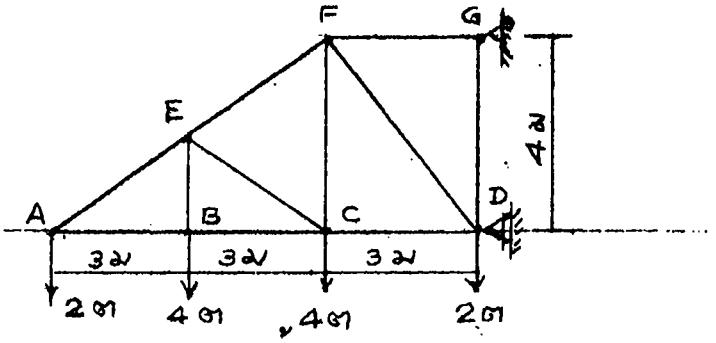
ข้อ 2-24

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

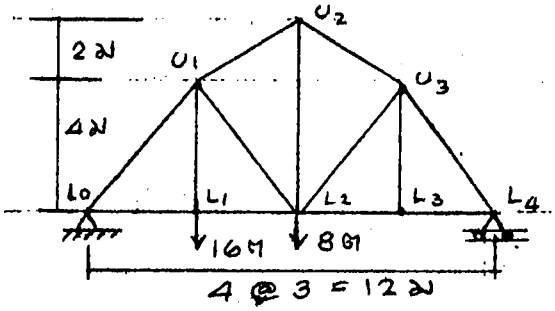
ให้วิเคราะห์แรงในโครงข้อหมุนเนื่องจากมีน้ำหนักกระทำดังรูป (ใช้เครื่องหมายแรงดึงเป็น บวก)



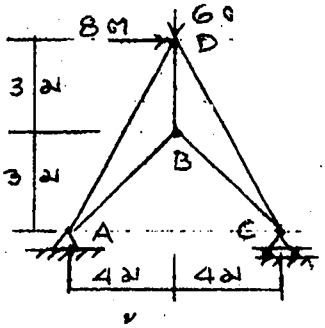
ข้อ 2-25



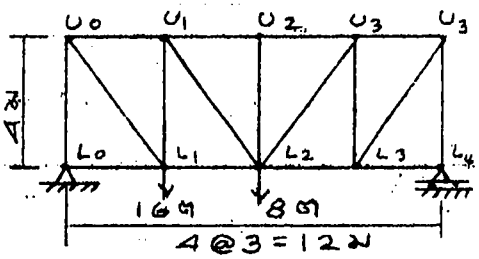
ข้อ 2-26



ข้อ 2-27

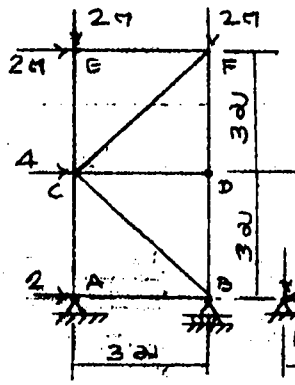


ข้อ 2-28

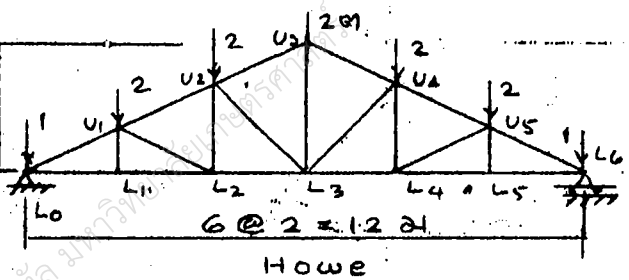


Pratt

ข้อ 2-29

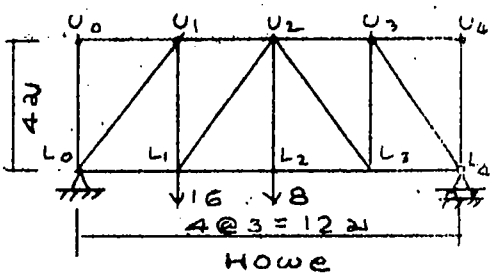


ข้อ 2-30



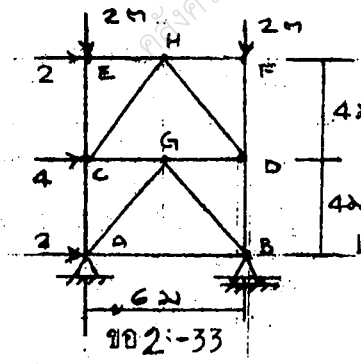
Howe

ข้อ 2-31

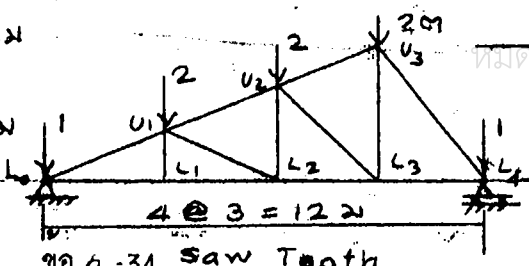


Howe

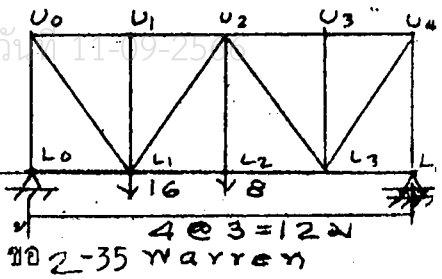
ข้อ 2-32



ข้อ 2-33



ข้อ 2-34 Saw Tooth



ข้อ 2-35 Warren

บทที่ 3
การโก่งของโครงสร้าง

การโก่ง (Deflection) ของโครงสร้างมีความสำคัญมากทั้งในแง่กำลังและประโยชน์การใช้งาน ในกรณีที่มีแรงตามแกนกระทำและมีแรงกายนอก (เช่นแรงทางขวาง) ทำให้การโก่งเพิ่มขึ้น แรงตามแกนเดิมจะกลายเป็นผิดศูนย์ (Eccentric load) ทันที ทำให้เกิดมีโมเมนต์คัดรวมกับแรงตามแกนวัสดุจะรับน้ำหนักได้น้อยลง ส่วนประโยชน์การใช้งานนั้น การที่สามารถคำนวณระยะโก่งของโครงสร้างได้ ย่อมสามารถกำหนดขนาดของโครงสร้างได้ถูกต้องตามความต้องการ ตัวอย่างเช่น สะพานหรือคานคอนกรีตช่วงยาว ต้องคำนวณระยะโก่งให้ได้เพื่อที่จะยกขึ้นให้พอในระหว่างก่อสร้าง เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจะทำให้โครงสร้างอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ดังนั้นจะพบว่า กฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับอาคารไม้, เหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น จะกำหนดระยะโก่งสูงสุดเอาไว้ การออกแบบจึงต้องให้อยู่ภายในค่าที่กำหนดไว้

การหาระยะโก่งของโครงสร้างมีหลายวิธี ในที่นี้จะขอแสดงเพียงวิธีเดียวที่เห็นว่าสามารถใช้ได้กับโครงสร้างทุกชนิด คำนวณได้ง่ายและแม่นยำ คือ Unit load method

3.1 Unit load method

ที่มาของสูตร สมมติว่าต้องการหาระยะโก่งทางดิ่งที่จุด C ของคานช่วงเดียว AB ในรูปที่ 3.1 (ก) เนื่องจากแรง P_1 , P_2 และ P_3

รูปที่ 3.1 (ก) เมื่อค่อย ๆ วางน้ำหนัก P_1 , P_2 และ P_3 บนคานเกิดระยะโก่ง Δ_1, Δ, Δ_2 และ Δ_3 ตามลำดับได้

$$\text{External work done} = \frac{P_1\Delta_1}{2} + \frac{P_2\Delta_2}{2} + \frac{P_3\Delta_3}{2}$$

ทำให้เกิดแรงภายในคาน เช่น แรงอัดรวม S ในชิ้น MN ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด dA หดไป dL

$$\text{Total internal energy ในคาน} = \frac{1}{2}\sum SdL$$

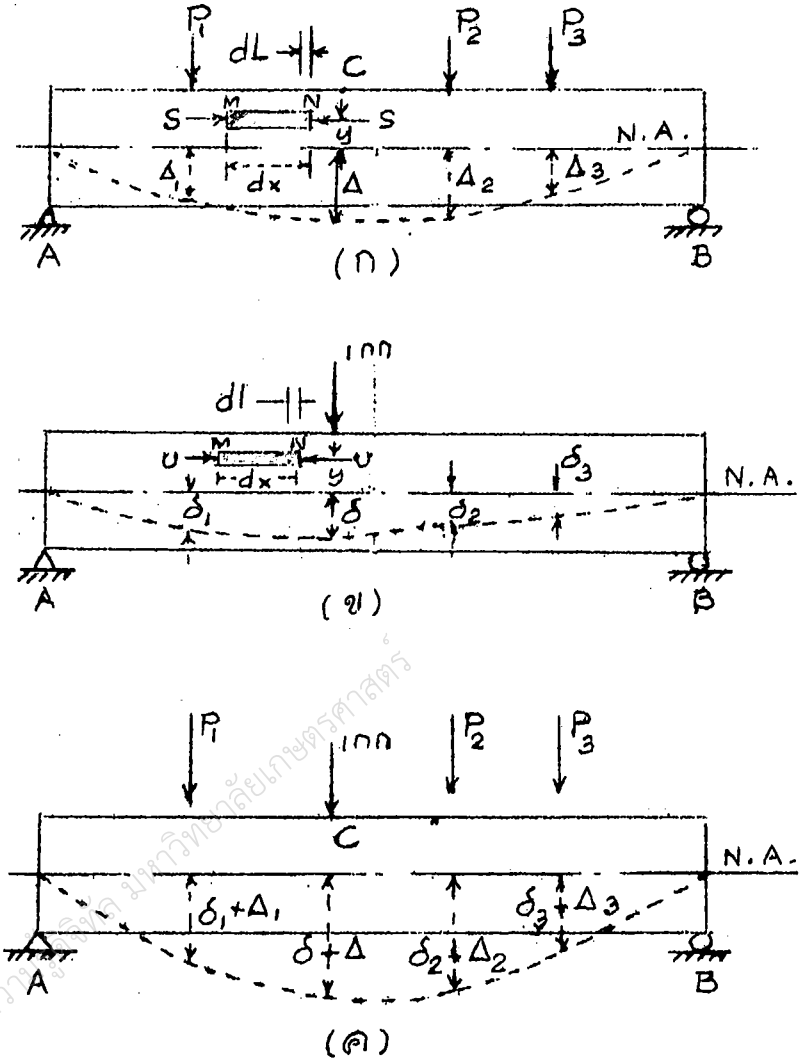
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

จาก Law of conservation of work or energy ได้

$$\frac{P_1 \Delta_1}{2} + \frac{P_2 \Delta_2}{2} + \frac{P_3 \Delta_3}{2} = \frac{1}{2} \Sigma \, SdL \quad \text{----------} \quad (1)$$

รูปที่ 3.1 (ข) เมื่อค่อย ๆ วาง Unit load ที่จุด C เกิด δ_1, δ, δ_2 และ δ_3 ตามลำดับ ให้ External work = Internal energy ได้

$$\frac{1}{2}(1)\delta = \frac{1}{2}\Sigma u dl \quad \text{--------} \quad (2)$$



รูปที่ 3.1

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

รูปที่ 3.1 (ค) คานมี Unit load อยู่แล้ว และค่อย ๆ วางน้ำหนัก P_1, P_2 และ P_3

งานภายนอกเพิ่มขึ้น $= \frac{P_1 \Delta_1}{2} + \frac{P_2 \Delta_2}{2} + \frac{P_3 \Delta_3}{2} + (1)\Delta$

งานภายในเพิ่มขึ้น $= \frac{1}{2} \Sigma \, SdL + \Sigma \, udL$

ในรูป 3.1(ค) ขณะนี้ Total external work $= \frac{1}{2}(1)\delta + \frac{P_1\Delta_1}{2} + \frac{P_2\Delta_2}{2} + \frac{P_3\Delta_3}{2} + (1)\Delta$

Total internal energy $= \frac{1}{2}\Sigma Udl + \frac{1}{2}\Sigma SdL + \Sigma udL$

กฎกำลังงานไม่สูญหายไปได้

$$\frac{1}{2}(1)\delta + \frac{P_1\Delta_1}{2} + \frac{P_2\Delta_2}{2} + \frac{P_3\Delta_3}{2} + (1)\Delta = \frac{1}{2}\Sigma Udl + \frac{1}{2}\Sigma SdL + \Sigma udL \quad \text{--------} \quad (3)$$

แทนค่าสมการ (1), (2) ใน (3) ได้

$$(1)\Delta = \Sigma udL \quad \text{----------} \quad (4)$$

สมการ (4) เป็นหลักของ Unit load method ที่จะนำไปคำนวณระยะโก่งต่อไป

3.2 การหาระยะโก่งของคานโดย Unit load method

สมมติต้องการหาระยะโก่งที่จุด C ของคาน AB ในรูปที่ 3.1 (ก) สูตรที่กล่าวมาแล้วคือ

$$\Delta = \Sigma udL \quad \text{----------} \quad (4)$$

ในรูปที่ 3.1 (ก) ที่ส่วนเล็ก ๆ MN เกิดโมเมนต์ดัด $= \boxed{M}$

รูปที่ 3.1 (ข) ที่ส่วนเล็ก ๆ MN เกิดโมเมนต์ดัด $= \boxed{m}$

ความยาวเดิมของ MN $= dx$ พื้นที่หน้าตัด dA

จากสูตร Stress $\sigma = \frac{u}{dA} = \frac{my}{I}$ ---------- รูปที่ 3.1(ข)

หรือ $u = \frac{my}{I}\,dA$ ---------- (5)

และจากสูตร strain $\epsilon = \frac{dL}{dx} = \frac{\sigma}{E} = \frac{S}{dA}\cdot\frac{1}{E}$

หรือ $dL = \frac{S}{dA}\cdot\frac{1}{E}\cdot dx$ ---------- (6)

แทนค่า $\sigma = \frac{S}{dA} = \frac{My}{I}$ ในสมการ (6) รูปที่ 3.1 (ก)

$$dL = \frac{My}{EI}\,dx \quad \text{----------} \quad (7)$$

แทนค่าสมการ (5) และ (7) ในสมการ (4) ได้

$$\Delta = \sum udL = \sum \left(\frac{my}{I}\, d\, A\right)\left(\frac{My}{EI}\, dx\right) = \int_0^L \int_0^A \frac{M\, my^2}{E\, I^2}\, dAdx$$

เพราะว่า $I = \int_0^A y^2 dA$

ดังนั้น $$\Delta = \int_0^L \frac{Mm.}{EI^2}\, dx \int_0^A y^2 dA = \int_0^L \frac{Mm}{EI}\, dx \quad \text{----------} \quad (8)$$

สมการ (8) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาระยะโก่งของคานต่อไป

3.3 การหามุม (Slope or rotation) ของคานโดย Unit load method

ที่มาของสูตร ทำนองเดียวกันกับการหาระยะโก่งของคานในข้อ 3.2 แต่ใช้หน่วยโมเมนต์ (Unit moment) กระทำตรงจุดที่ต้องการหามุมแทน ในเมื่อ

θ = มุมของ elastic curve เมื่อมีแรงกระทำค่าเป็น radian
(คือมุมระหว่างเส้นสัมผัส elastic curve กับแนวราบเดิมของคาน)

ϕ = มุมของ elastic curve เมื่อมีหน่วยโมเมนต์กระทำ

External work done = Internal energy

งานจากหน่วยโมเมนต์ ได้ $\frac{1}{2}(1)(\phi) = \frac{1}{2}\sum udL$

ดำเนินการเช่นเดียวกับการหาระยะโก่ง จะได้

$$\theta = \sum udL = \int_0^L \frac{Mm}{EI}\, dx \quad \text{----------} \quad (9)$$

ทิศทางของระยะโก่งหรือมุมตามทิศทางของหน่วยน้ำหนักหรือหน่วยโมเมนต์ (หน่วยควบคุม) เมื่อผลที่ได้ออกมามีเครื่องหมายเป็นบวก

ดังนั้นเรื่องเครื่องหมายมีความสำคัญมาก ในที่นี้ถือว่าถ้าคานมีระยะโก่งลงให้โมเมนต์เป็นลบ หรือคานเกิดแรงดึงผิวบนให้โมเมนต์เป็นลบ หรือใช้ตามข้อตกลงเรื่องเครื่องหมายของคาน

3.4 ขั้นตอนการใช้ Unit load method พอสรุปได้ดังนี้

(1) พิจารณาแบ่งคานออกเป็นชิ้นส่วน แต่ละส่วนมีสมการโมเมนต์หรือ $\frac{M}{EI}$ เหมือนกันตลอดทั้งที่เกิดจากน้ำหนักและหน่วยน้ำหนัก

(2) เลือกจุดเริ่ม (Origin) แต่ละส่วนในข้อ (1) โดยที่ทำให้สมการของโมเมนต์ไม่ยุ่งยากนัก (การเลือกจุดเริ่มจากไหนก็ตาม โมเมนต์ที่จุดเดียวกันต้องเท่ากันเสมอ)

(3) ให้ขีดจำกัดของชิ้นส่วนในข้อ (1) จากไหนถึงไหน

(4) เขียนสมการโมเมนต์ (M) เนื่องจากน้ำหนักกระทำบนชิ้นส่วนนั้น ๆ

(5) เขียนสมการโมเมนต์ (m) เนื่องจาก unit load ซึ่งใส่ที่จุดต้องการหาระยะโก่งหรือมุม

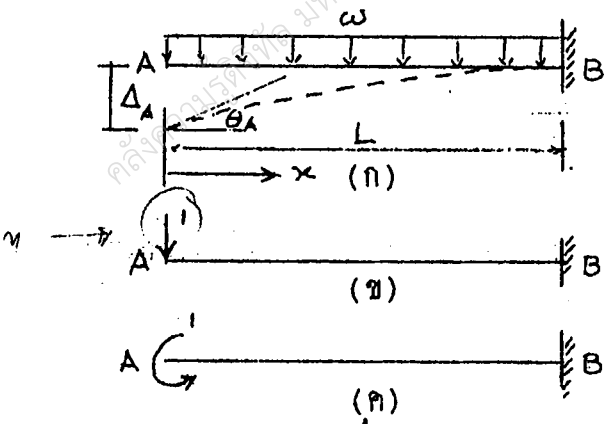
(6) Integrate ผลคูณของข้อ (4) และ (5) หารด้วย EI แล้วรวมกันจะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

(7) การใช้เครื่องหมายโมเมนต์และทิศทางของการโก่งหรือมุมเป็นไปตามข้อ 3.3

3.5 ตัวอย่าง การคำนวณหาระยะโก่งและมุมที่จุดต่าง ๆ ของคานซึ่งกำหนด EI และแรงกระทำดังต่อไปนี้

(1) จงคำนวณหาระยะโก่งและมุมที่ปลายคานอื่น ซึ่งมีน้ำหนักแผ่กระทำตลอดให้ EI = ค่าคงที่

<u>วิธีทำ</u> รูป (ก) เป็นโจทย์ รูป (ข) และ (ค) ให้ unit load เพื่อหาระยะโก่งและมุมที่ A



รูปที่ 3.2

ชิ้นส่วน	AB
จุดเริ่ม	A
ขีดจำกัด	$0 \longrightarrow L$
โมเมนต์อินเนอเชีย	I
M	$-\frac{wx^2}{2}$
m for Δ_A	$-x$
m for θ_A	-1

หมดอายุวันที่ -09-2566

$$\Delta_A = \int_A^B \frac{Mmdx}{EI} = \int_0^L \frac{(-wx^2)}{2}\frac{(-x)}{EI}dx$$

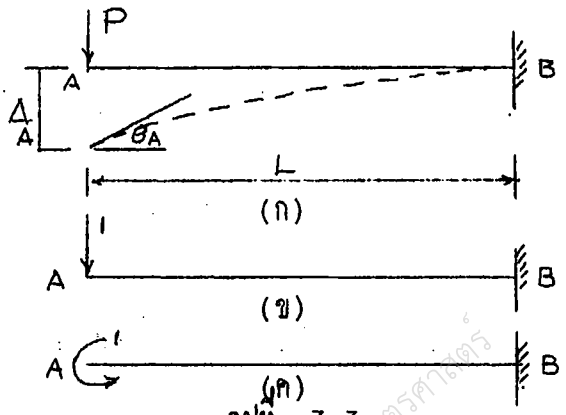
$$= \frac{wx^4}{8EI}\Big]_0^L = \frac{wL^4}{8EI} \downarrow$$

$$\theta_A = \int_0^L \frac{(-wx^2)}{2}\frac{(-1)}{EI}dx = \frac{wx^3}{6EI}\Big]_0^L = \frac{wL^3}{6EI} \circlearrowright$$

(2) หาระยะโก่งและมุมที่ปลายคานยื่น มีน้ำหนักกระทำดังรูป

ให้ EI = คงที่

วิธีทำ



รูปที่ 3.3

ชิ้นส่วน	AB
จุดเริ่ม	A
ขีดจำกัด	$0 \rightarrow L$
I	I
M	$-Px$
m of Δ_A	$-x$
m for θ	-1

$$A = \int_0^L \frac{(-Px)(-x)}{EI}\,dx = \frac{PL^3}{3EI} \downarrow$$

$$\theta_A = \int_0^L \frac{(-Px)(-1)}{EI}\,dx = \frac{PL^2}{2EI} \circlearrowright$$

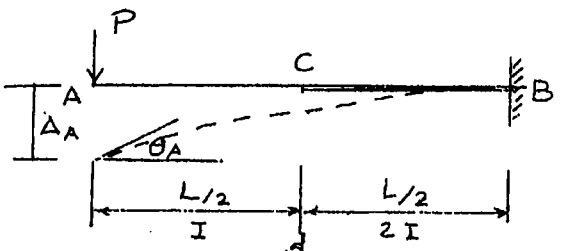
หมายเหตุ

หน่วยของระยะโก่งและมุม ซึ่งติดในเทอมของ EI นั้น ในการหาค่าจริงจะต้องแปลงหน่วยน้ำหนัก และหน่วยระยะทางให้เป็นหน่วยเดียวกันเสียก่อน หน่วยต่างๆจะตัดกันได้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(3) โจทย์ในข้อ (2) เมื่อมีค่า I เปลี่ยนแปลงที่กึ่งกลางคาน ดังรูปให้หาระยะโก่งและมุมที่ปลายคาน

วิธีทำ



รูปที่ 3.4

ชิ้นส่วน	AC	CB
จุดเริ่ม	A	A
ขีดจำกัด	0 → L/2	L/2 → L
I	I	2I
M	-Px	-Px
m for Δ	- x	- x
m for θ	- 1	- 1

$$\Delta_A = \int_0^{L/2} \frac{(-P_x)(-x)dx}{EI} + \int_{L/2}^{L} \frac{(-Px)(-x)}{2EI} dx$$

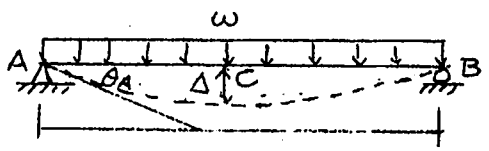
$$= \frac{PL^3}{3x8EI} + \frac{PL^3}{6EI} - \frac{PL^3}{6x8EI} = \frac{3PL^3}{16\ EI} \downarrow$$

$$\theta_A = \int_0^{L/2} \frac{(-Px)(-1)}{EI} dx + \int_{L/2}^{L} \frac{(-Px)(-1)}{2EI} dx = \frac{5PL^2}{16EI} \circlearrowright$$

(4) คำนวณหาระยะโก่งที่กึ่งกลางคาน AB และมุม ที่ปลาย A เมื่อ EI = คงที่

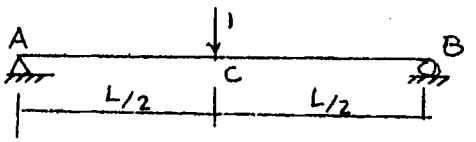
วิธีทำ

(ก)



M

(ข)



m for Δ_C

(ค)

m for θ_A

รูปที่ 3.5

คลังความรู้ดิจิทัลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ชิ้นส่วน	AC	BC
จุดเริ่ม	A	B
ขีดจำกัด	$0 \longrightarrow L/2$	$0 \longrightarrow L/2$
I	I	I
M	$\frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}$	$\frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}$
m for Δ_C	$\frac{x}{2}$	$\frac{x}{2}$
m for θ_A	$1 - \frac{x}{L}$	$\frac{x}{L}$

$$\Delta_C = \int_A^C \frac{Mmdx}{EI} + \int_B^C \frac{Mmdx}{EI}$$

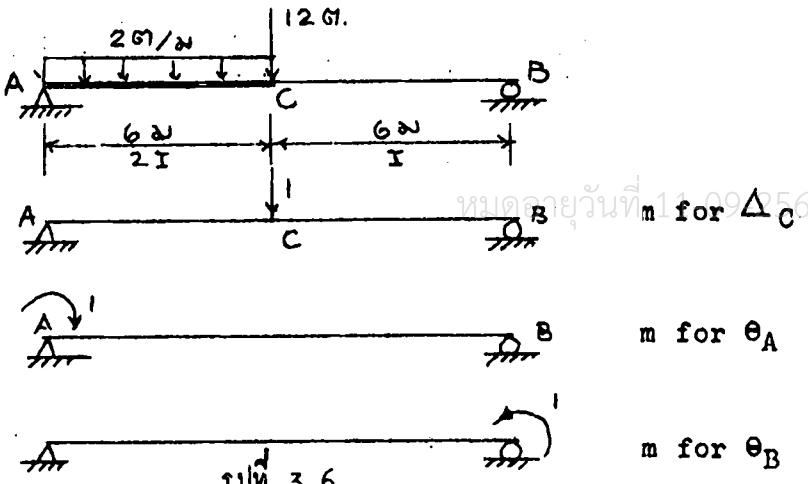
$$= 2\int_0^{L/2} \left(\frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}\right)\left(\frac{x}{2}\right)\frac{dx}{EI} = \frac{5}{384}\frac{wL^4}{EI} \downarrow$$

$$\theta_A = \int_0^{L/2} \left(\frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}\right)\left(1 - \frac{x}{L}\right)\frac{dx}{EI} + \int_0^{L/2} \left(\frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}\right)\left(\frac{x}{L}\right)\frac{dx}{EI}$$

$$= \frac{wL^3}{24EI} \circlearrowright$$

(5) คำนวณระยะโก่งที่ C และมุมที่ B ของคานที่กำหนดให้ มีค่า I ต่างกันครึ่งหนึ่ง

วิธีทำ



รูปที่ 3.6

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11 ก.ย. 2566

ชิ้นส่วน	AC	BC
จุดเริ่ม	A	B
ขีดจำกัด	$0 \longrightarrow 6$	$0 \longrightarrow 6$
I	2I	I
M	$15x - x^2$	$9x$
m for Δ_c	$\frac{x}{2}$	$\frac{x}{2}$
m for θ_B	$\frac{x}{12}$	$1 - \frac{x}{12}$

$$\Delta_C = \int_0^6 (15x - x^2)(1 - \frac{x}{12})\frac{dx}{2EI} + \int_0^6 (9x)(\frac{x}{12})\frac{dx}{EI}$$

$$= \left[15\frac{x^2}{2} - \frac{5x^3}{12} - \frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{48}\right]_0^6 \times \frac{1}{2EI} + \frac{3x^3}{12EI}\Big]_0^6$$

$$= [270 - 90 - 72 + 27]\frac{1}{2EI} + \frac{54}{EI}$$

$$= \frac{67.5}{EI} + \frac{54}{EI}$$

$$= \frac{121.5}{EI} \downarrow$$

$$\theta_B = \int_0^6 (15x - x^2)\frac{x}{12}\frac{dx}{2EI} + \int_0^6 (9x)(1 - \frac{x}{12})\frac{dx}{EI}$$

$$= \left[\frac{15x^3}{3x24} - \frac{x^4}{4x24}\right]_0^6 \times \frac{1}{EI} + \left[\frac{9x^2}{2} - \frac{9x^3}{3x12}\right]_0^6 \times \frac{1}{EI}$$

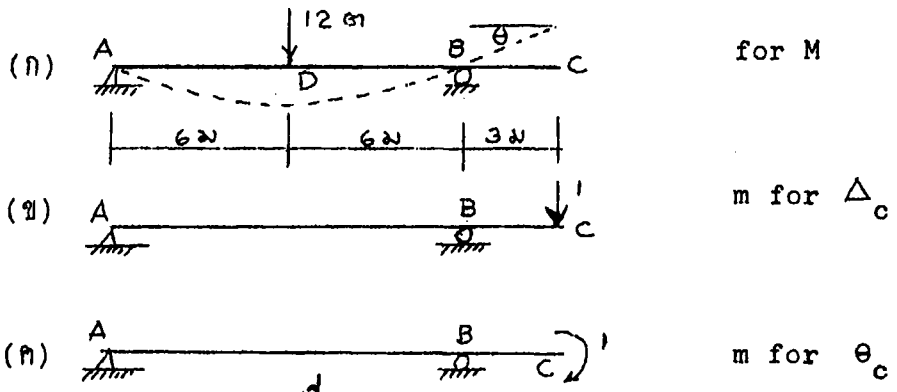
$$= \frac{45}{EI} - \frac{13.5}{EI} + \frac{162}{EI} - \frac{54}{EI}$$

$$= \frac{139.5}{EI} \circlearrowleft$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(6) ให้คำนวณระยะโก่งและมุมที่ปลายคาน C ของคาน ดังรูป EI = คงที่

วิธีทำ



รูปที่ 3.7

ชิ้นส่วน	AD	BD	BC
จุดเริ่ม	A	B	C
ขีดจำกัด	$0 \longrightarrow 6$	$0 \longrightarrow 6$	$0 \longrightarrow 3$
I	I	I	I
M	$6x$	$6x$	0
m for Δ_c	$-\frac{x}{4}$	$\frac{x}{4} - 3$	$-x$
m for θ_c	$-\frac{x}{12}$	$\frac{x}{12} - 1$	-1

$$\Delta_c = \int_0^6 6x\left(-\frac{x}{4}\right)\frac{dx}{EI} + \int_0^6 (6x)\left(\frac{x}{4} - 3\right)\frac{dx}{EI}$$

$$= -\frac{6x^3}{12EI}\Big]_0^6 + \left[\frac{6x^3}{12EI} - \frac{18x^2}{2EI}\right]_0^6$$

$$= -\frac{108}{EI} + \frac{108}{EI} - \frac{324}{EI} = -\frac{324}{EI} \uparrow \text{ ขึ้น (ตรงข้ามสมมติ)}$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

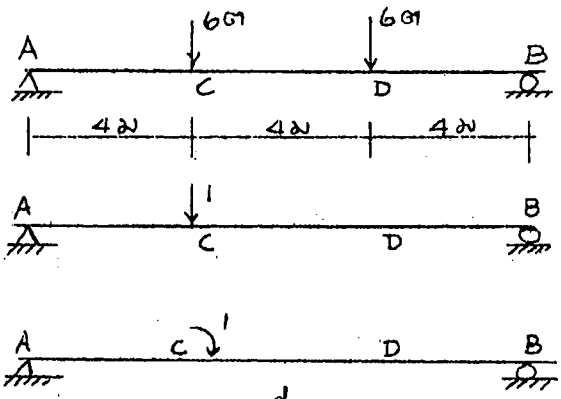
$$\theta_C = \int_0^6 (6x)\left(-\frac{x}{12}\right)\frac{dx}{EI} + \int_0^6 (6x)\left(\frac{x}{12}-1\right)\frac{dx}{EI}$$

$$= -\frac{x^3}{6EI}\Big]_0^6 + \left[\frac{x^3}{6EI} - \frac{6x^2}{2EI}\right]_0^6$$

$$= -\frac{108}{EI}$$) ทวนเข็มนาฬิกา, (ตรงข้ามสมมติ)

(7) หาระยะโก่งและมุมที่จุด C ของคาน AB เมื่อ EI = คงที่

วิธีทำ



รูปที่ 3.8

ชิ้นส่วน	AC	CD	BD
จุดเริ่ม	A	D	B
ขีดจำกัด	$0 \rightarrow 4$	$0 \rightarrow 4$	$0 \rightarrow 4$
I	I	I	I
M	6x	36	6x
m for Δ_c	$\frac{2}{3}x$	$\frac{4}{3} + \frac{x}{3}$	$\frac{x}{3}$
m for θ_c	$\frac{-x}{12}$	$\frac{1}{3} + \frac{x}{12}$	$\frac{x}{12}$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

$$EI\,\Delta_c = \int_0^4 (6x)(\tfrac{2}{3}x)dx + \int_0^4 36(\tfrac{4}{3} + \tfrac{x}{3})\,dx + \int_0^4 6x(\tfrac{x}{3})\,dx$$

$$\Delta_c = \frac{416}{EI} \downarrow$$

$$EI\,\theta_c = \int_0^4 6x(\tfrac{-x}{12})\,dx + \int_0^4 (36)(\tfrac{1}{3} + \tfrac{x}{12})\,dx + \int_0^4 6x(\tfrac{x}{12})\,dx$$

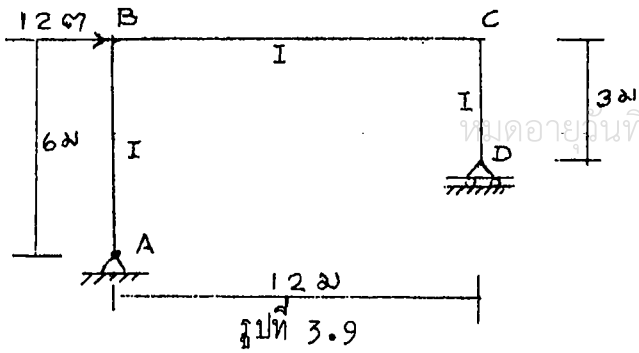
$$\theta_c = \frac{72}{EI} \circlearrowright$$

3.6 การหาระยะโก่งและมุมของโครงข้อแข็งโดย Unit load method

การคำนวณดำเนินตามขั้นตอนเช่นเดียวกับคาน คือ แบ่งชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งโดยยึดสมการของโมเมนต์เดียวกันเป็นหลัก มุมของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ข้อต่อเดียวกันเท่ากัน เพราะข้อต่อยึดกันแน่นจึงหมุนไปด้วยกัน ส่วนระยะโก่งของข้อต่อหรือจุดหนึ่ง ๆ ในชิ้นส่วนอาจมีระยะโก่งทั้งทางแนวดิ่งและแนวราบ แต่บางข้อต่ออาจจะมีระยะโก่งเพียงทิศทางเดียวก็ได้

การใส่หน่วยน้ำหนักหรือหน่วยโมเมนต์ที่จุดต้องการหาระยะโก่งหรือมุมนั้น ถ้าผลคำนวณออกมาเป็นบวกแสดงว่าทิศทางถูกต้องตามที่สมมติ แต่ถ้าค่าออกมาเป็นลบแสดงว่ามีทิศทางตรงกันข้าม เครื่องหมายของโมเมนต์มีความสำคัญมาก เช่น โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาให้เป็นค่าบวกตลอดเป็นต้น การพิจารณาระยะโก่งและมุมของโครงข้อแข็งนั้นมีผลจากโมเมนต์ดัดเท่านั้น เพราะการยึดหดเนื่องจากแรงตามแกนน้อยมากจึงละทิ้งเสีย

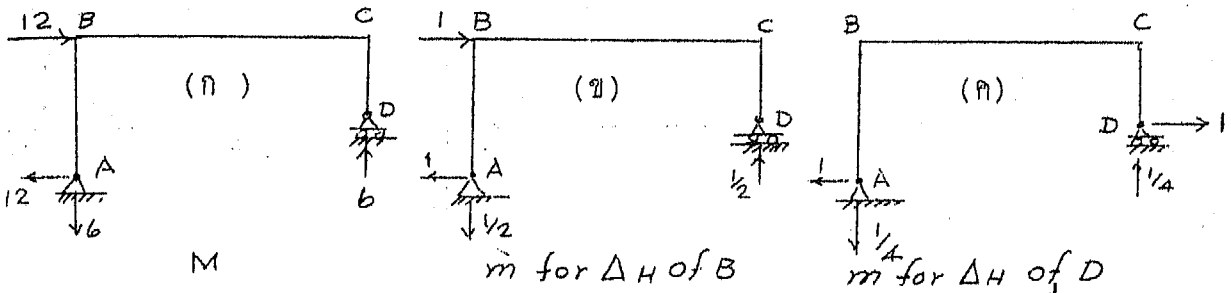
ตัวอย่าง (1) ให้คำนวณระยะโก่งของข้อต่อ B และ D ของโครงข้อหมุนในรูป



รูปที่ 3.9

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ



รูปที่ 3.9

ชิ้นส่วน	AB	BC	CD
จุดเริ่ม	A	C	D
ขีดจำกัด	$0 \longrightarrow 6$	$0 \longrightarrow 12$	$0 \longrightarrow 3$
I	I	I	I
M	$-12x$	$6x$	0
m for Δ^B_H	$-x$	$\frac{x}{2}$	0
m for Δ^D_H	$-x$	$3+x/4$	x

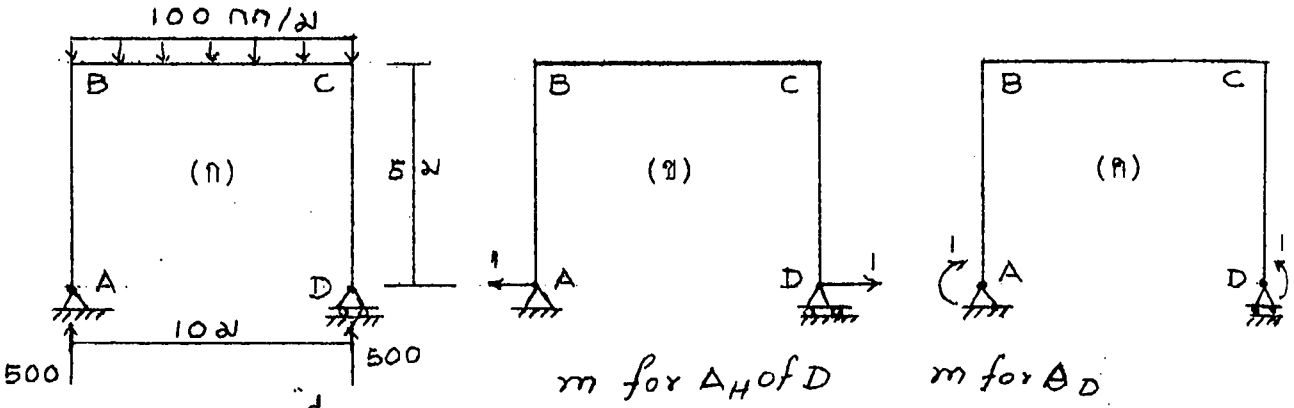
$$\Delta_H \text{ of B} = \int_0^6 (-12x)(-x)\frac{dx}{EI} + \int_0^{12} 6x(\frac{x}{2})\frac{dx}{EI} = \frac{2592}{EI} \rightarrow$$

$$\Delta_H \text{ of D} = \int_0^6 (-12x)(-x)\frac{dx}{EI} + \int_0^{12} (6x)(3+\frac{x}{4})\frac{dx}{EI} = \frac{3024}{EI} \rightarrow$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(2) ให้คำนวณระยะโก่งและมุมที่ D ของโครงข้อแข็งซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป 3.10

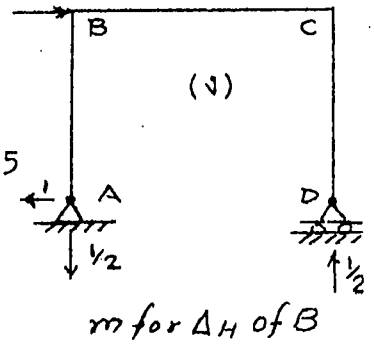
EI = คงที่



รูปที่ 3.10

วิธีทำ

ชิ้นส่วน	AB	BC	CD
จุดเริ่ม	A	C	D
ขีดจำกัด	$0 \rightarrow 5$	$0 \rightarrow 10$	$0 \rightarrow 5$
I	I	I	I
M	0	$500x-50x^2$	0
m for Δ_D	x	5	x
m for θ_D	1	1	1
m for Δ_B	x	$x/2$	0



$$\Delta_D = \int_0^{10} (500x - 50x^2)\,\frac{5dx}{EI}$$

$$= \left[2500\frac{x^2}{2} - 250\frac{x^3}{3}\right]_0^{10} \frac{}{EI} = \frac{125000}{3} \quad \frac{\text{กก} - \text{ม}^3}{EI} \rightarrow$$

$$\theta_D = \int_0^{10} (500x - 50x^2)(1)\,\frac{dx}{EI} = 25000\ \frac{\text{กก} - \text{ม}^2}{EI}\ \circlearrowright$$

หมายเหตุ เครื่องหมาย ในที่นี้ให้โมเมนต์ที่ทำให้เกิดแรงอัดภายนอกมีเครื่องหมาย บวก ตลอด

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เอกสารนี้ได้รับอนุญาตให้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ดาวน์โหลดเมื่อวันที่ 11-09-2566

$$\Delta_B \text{ or } \Delta_C = \int_0^{10} (500x - 50x^2)\,\frac{x}{2}\,\frac{dx}{EI} = \frac{62500}{3}\ \frac{\text{กก} - \text{ม}^3}{EI} \longrightarrow$$

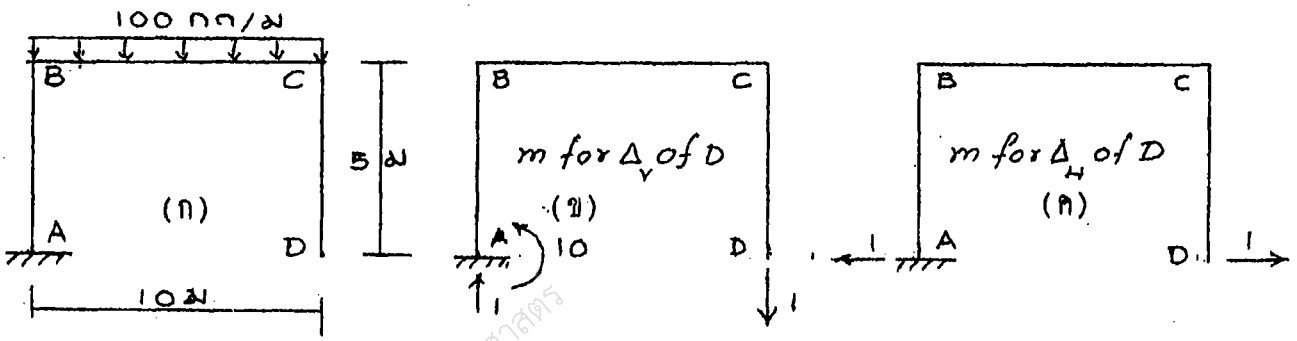
กรณีที่หน้าตัดของชิ้นส่วน 20 × 40 ซม. $I = \frac{0.2 \times 0.4^3}{12}$ ม.^{4}

$E = 2 \times 10^6$ กก/ซม.^{2} $= 20000 \times 10^6$ กก/ม.^{2}

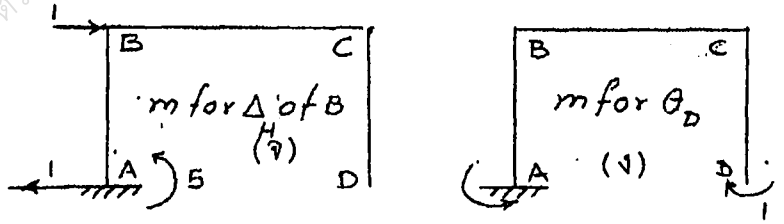
ดังนั้น $\Delta_D = \frac{125000 \times 12}{2\times10^6 \times 2\times4\times4\times4} = 0.00586$ ม. $\longrightarrow$

(3) ให้คำนวณระยะโก่งและมุมที่ D ของโครงข้อแข็งซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูป 3.11

EI = คงที่



รูปที่ 3.11



วิธีทำ

ชิ้นส่วน	AB	BC	CD
จุดเริ่ม	B	C	D
ขีดจำกัด	0 → 5	0 → 10	0 → 5
I	I	I	I
M	-5000	$-100\frac{x^2}{2}$	0
m for Δ^D_V	-10	-x	0
m for Δ^D_H	x	5	x
m for θ_D	-1	-1	-1
m for Δ_B	-x	0	0

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

$$\Delta_V \text{ of } D = \int_0^5 (5000)(10)\frac{dx}{EI} + \int_0^{10} (50x^2)\frac{xdx}{EI} = \frac{375000}{EI} \downarrow$$

$$\Delta_H \text{ of } D = \int_0^5 (-5000)\frac{xdx}{EI} + \int_0^{10} (-50x^2)(5)\frac{dx}{EI} = -\frac{362500}{EI} \leftarrow$$

$$\theta_D = \int_0^5 5000\frac{dx}{EI} + \int_0^{10} 50x^2\frac{dx}{EI} = \frac{125000}{EI} \circlearrowright$$

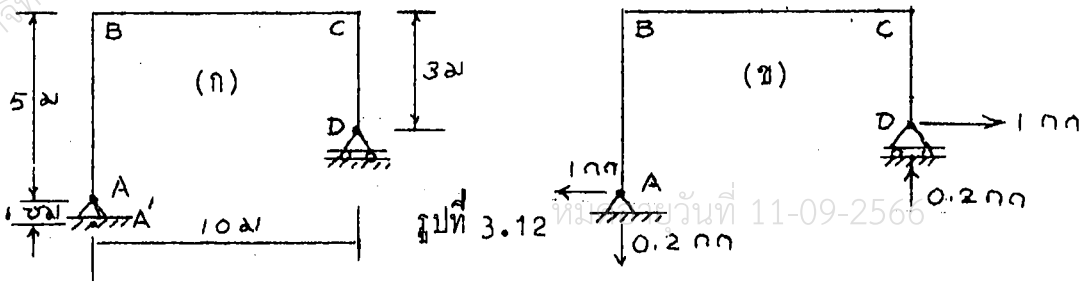
$$\Delta_H \text{ of } B = \int_0^5 5000\frac{xdx}{EI} = 62500 \quad \frac{\text{กก} - \text{ม}^3}{EI} \rightarrow$$

3.7 ระยะโก่งและมุมของโครงข้อแข็งเนื่องจากฐานรับเคลื่อนที่

เมื่อฐานรับของโครงข้อแข็งเคลื่อนที่ไปอยู่ตำแหน่งใหม่ ส่วนอื่นของโครงจะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย แต่ไม่ได้ทำให้ชิ้นส่วนของโครงเกิดแรงภายในขึ้นเลย ดังนั้นระยะโก่งหรือมุมของจุดต่าง ๆ ในโครงจะหาได้โดยวิธีเรขาคณิตก็ได้

ในสภาพเช่นนี้จะใช้ Unit load method คำนวณหาระยะโก่งหรือมุมของจุดต่าง ๆ ได้ เมื่อไม่เกิดแรงภายในชิ้นส่วน ดังนั้นจึงไม่มีกำลังงานเก็บไว้ในโครง สภาพสมดุลย์จึงเกิดจากงานภายนอกเท่านั้น

<u>ตัวอย่าง</u>ในรูปอิสระ เมื่อจุด A เลื่อนต่ำลง 1 ซม. อยากทราบว่าจุด D เลื่อนในแนวราบเท่าใด



รูปที่ 3.12

<u>วิธีทำ</u> เอาน้ำหนัก 1 กก. กระทำที่ D ไปทางขวา แรงทางราบที่ A เท่ากับ 1 กก. ด้วย ส่วนแรงทางดิ่งที่ A และ D เป็นแรงคู่ควบเท่ากับ 0.2 กก. จะได้

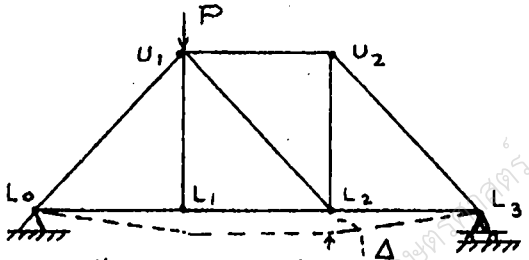
งานภายนอกทั้งหมด = (0.2 กก.)(1 ซม.) + (1 กก.) Δ_D = 0

Δ_H of D = − 0.2 ซม. หรือ 0.2 ซม. ไปทางซ้าย ←

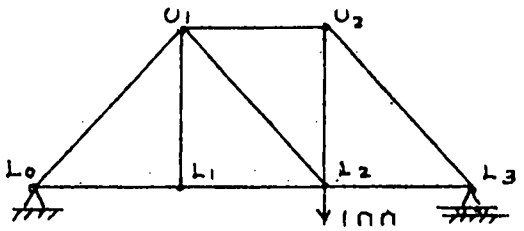
3.8 ระยะโก่งของโครงข้อหมุน (Deflection of Truss)

เมื่อโครงข้อหมุนในทางทฤษฎีรับแรงตามแกนซึ่งเป็นแรงดึงหรือแรงอัดเท่านั้น ดังนั้นชิ้นส่วนของโครงจึงเกิดแต่การยืดหรือหด ผลของการยืดหรือหดของชิ้นส่วนอันเนื่องจากโครงรับน้ำหนัก หรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหรือการตัดชิ้นส่วนผิดขนาดมาจากโรงงานเป็นต้น ทำให้เกิดระยะโก่งของข้อต่อต่าง ๆ ของโครงได้ การหาระยะโก่งของโครงข้อหมุนทำได้หลายวิธีโดยเฉพาะวิธีกราฟและ The Unit load method ซึ่งเป็นวิธีคำนวณที่ง่ายและแม่นยำ ในที่นี้จะกล่าวเพียงวิธีคำนวณเท่านั้น

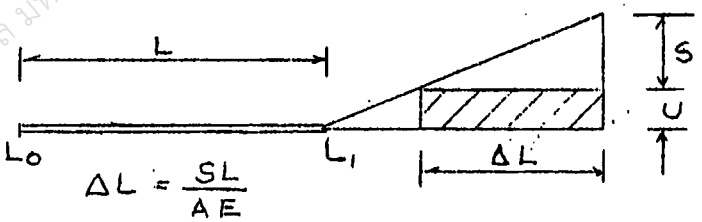
The Unit load method หรือ Virtual work and strain energy principles หลักโดยทั่วไปเหมือนกับที่ใช้ในเรื่องคานและโครงข้อแข็ง โดยที่โครงข้อหมุนได้เก็บกำลังภายในไว้ในรูปของการเปลี่ยนแปลงตามยาวของชิ้นส่วน



(ก) น้ำหนักกระทำได้ S-Stress



(ข) หน่วยน้ำหนักได้ U-Stress



(ค) แสดงผังแรงและงานของชิ้นส่วน L_0L_1

รูปที่ 3.13

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เอกสารนี้ 11-09-2566

สมมติโครงดังรูป 3.13(ก) มีแรงกายนอก P กระทำที่จุด U_1 ต้องการหาระยะโก่งทางดิ่งที่ L_2 วิธีดำเนินการมีดังต่อไปนี้

(1) หาแรง S ที่เกิดในชิ้นส่วนทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนัก P

(2) คำนวณหาการยืดหรือหดของชิ้นส่วนทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนักในข้อ (1) จากสูตร

$$\Delta L = \frac{SL}{AE}$$

(3) ใส่น้ำหนัก 1 หน่วย (หน่วยเดียวกับ P) ที่จุด L_2 ในแนวดิ่ง ขณะที่โครงไม่มีน้ำหนักใด ๆ

(4) คำนวณแรง u ที่เกิดในชิ้นส่วนทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนัก 1 หน่วย

(5) โดยทฤษฎีแล้ว เมื่อเอาน้ำหนัก P ใส่ทับเข้าไปกับโครงรูปที่ (ข) ทำให้น้ำหนัก 1 หน่วยเลื่อนต่ำลงไปเป็นระยะทาง Δ เสมือนเกิดงานกายนอกเท่ากับ $(1)\Delta$ ซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่เกิดขึ้นภายในเนื่องจากการยืดหรือหดของชิ้นส่วนทั้งหมดเท่ากับ $\sum u.\Delta L$

รูปที่ (ค) แสดงชิ้นส่วน L_0L_1 กับผังของแรงและการเปลี่ยนแปลงความยาว จากการพิจารณาผังจะเห็นว่าพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากับ $u.\Delta L$ แทน strain energy ซึ่ง u เป็นแรงในชิ้นส่วน $L_0 L_1$ เกิดจากน้ำหนัก 1 หน่วย และ ΔL เกิดจากน้ำหนักกระทำจริง พื้นที่ที่เกิดขึ้นเมื่อ unit load ใส่ไว้ที่โครงก่อนที่จะวางน้ำหนักจริง P โดยที่แรงเกิดจาก P ทำให้ชิ้นส่วนเปลี่ยนแปลงความยาวและชิ้นส่วนมีจำนวนนับได้ ดังนั้น ผลรวมของ $u.\Delta L$ จึงเขียนได้เป็น $\sum u.\Delta L$ สมการของงานจึงเป็น

$$\text{งานกายนอก} = \text{งานกายใน}$$

$$(1)\Delta = \sum u.\Delta L$$

แต่ $$\Delta L = \frac{SL}{AE}$$

ดังนั้น $$\Delta = \sum \frac{SUL}{AE}$$

ถ้าต้องการหาระยะโก่งที่ข้อต่อใด ๆ ให้ใส่ unit load ที่ข้อต่อนั้นในทิศทางเดียวกับทิศทางที่ต้องการหาระยะโก่ง ผลการคำนวณมีเครื่องหมายบวก แสดงว่าระยะโก่งมีทิศทางเดียวกับ unit load

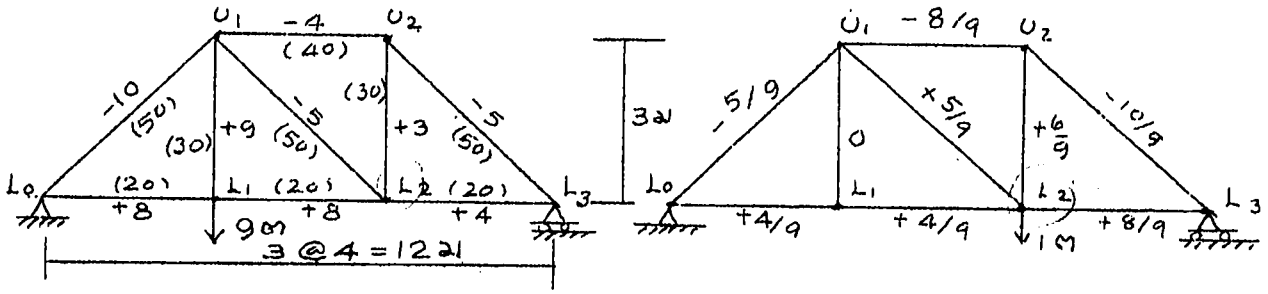
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

เครื่องหมายสำหรับโครงข้อหมุน มีความสำคัญมากในการคำนวณเกี่ยวกับระยะโก่งของโครง ให้ใช้ดังนี้

เครื่องหมายบวก + สำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงดึงหรือยืดออก

เครื่องหมายลบ − สำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงอัดหรือหดสั้นลง

ตัวอย่าง (1) โครงในรูปที่ (ก) มีน้ำหนักกระทำที่ L_1 = 9 ตัน ต้องการหาระยะโก่งทางดิ่งของ L_2 พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนให้ไว้ในวงเล็บ



(ก) แสดงน้ำหนักและขนาดโครง (ข) น้ำหนักหนึ่งกระทำที่ L_2

รูปที่ 3.14

ผลการคำนวณแรง S เนื่องจากน้ำหนัก 9 ตัน และแรง u เกิดจากน้ำหนัก 1 ตัน ได้แสดงไว้ในตารางดังนี้

ตารางคำนวณระยะโก่งของโครงที่จุด L_2 ทางดิ่ง

ชิ้นส่วน	L(ซม.)	A($ซม.^2$)	L/A	S(ตัน)	u(ตัน)	$\frac{SuL}{A}$
L_0 L_1	400	20	20	+ 8	+4/9	+640/9
L_1 L_2	400	20	20	+ 8	+4/9	+640/9
L_2 L_3	400	20	20	+ 4	+8/9	+640/9
L_0 U_1	500	50	10	−10	−5/9	+500/9
U_1 U_2	400	40	10	− 4	−8/9	+320/9
U_1 L_1	300	30	10	+ 9	0	0
U_1 L_2	500	50	10	− 5	+5/9	−250/9
U_2 L_2	300	30	10	+ 3	+6/9	+180/9
U_2 L_3	500	50	10	− 5	+10/9	+500/9
				$\Sigma \frac{SuL}{A}$		= +3170/9

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

เมื่อ $E = 2 \times 10^6$ กก/ซม^2

ดังนั้นระยะโก่งของ L_2 ทางดิ่ง $= \frac{317.0000}{9 \times 2 \times 10^6} = \frac{3.17}{18} = 0.176$ ซม.↓

ตัวอย่าง (2) ความบกพร่องในโรงงาน โครงรูปที่ (ก) เกิดตัด $U_1 L_2$ สั้นไป 1 ซม. ให้หาระยะโก่งทางดิ่งของ L_2

วิธีทำ วางน้ำหนัก 1 ตัน ทางดิ่งที่ L_2 ของรูปที่ (ข) คำนวณหา u stress ใน $U_1 L_2$ เท่านั้น ในเมื่อชิ้นส่วนอื่นความยาวไม่เปลี่ยนแปลง

ค่า u stress ของ $U_1 L_2 = \frac{1}{3} \times \frac{5}{3} = +\frac{5}{9}$ ตัน

จากสมการ (1) $\Delta = u \cdot \Delta L$

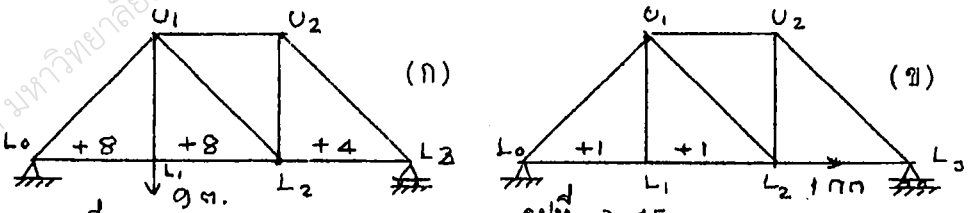
(1) $\Delta = (+\frac{5}{9})(-1)$

$\Delta = -\frac{5}{9}$ ซม. แสดงว่าจุด L_2 ↑

สูงขึ้นจากเดิม $\frac{5}{9}$ ซม. (เพราะเครื่องหมายลบตรงกันข้ามกับที่สมมติทิศทางของ unit load)

ในทำนองเดียวกันถ้าโครงข้อหมุนเกิดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ชิ้นส่วนต่าง ๆ จะยืดออก ย่อมทำให้จุดต่าง ๆ เปลี่ยนที่ได้ หรือถ้าอุณหภูมิลดลงชิ้นส่วนต่าง ๆ จะหดย่อมเกิดระยะโก่งเช่นเดียวกัน

ตัวอย่าง (3) โครงในตัวอย่าง (1) รูป (ก) ต้องการหาระยะโก่งทางราบของ L_2



รูปที่ 3.15

วิธีทำ ใส่แรง 1 กก.ที่ L_2

ระยะโก่งทางราบของ $L_2 = \sum \frac{SuL}{A} = 8000 \times 20 + 8000 \times 20$

$= 16000 \times 20$ กก/ซม.

เมื่อ $E = 2000000$ กก./ตร.ซม.

ดังนั้นระยะโก่งทางราบของ $L_2 = \frac{16000 \times 20}{2000000} = 0.16$ ซม.→ ตอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แบบฝึกหัด

(1) ให้คำนวณหาระยะโก่งและมุมที่จุดต่าง ๆ ของโครงสร้าง เมื่อ EI เท่ากัน เว้นแต่แสดงเป็นอย่างอื่น (หน้า 38 – 39)

ข้อ 3 – 1 ระยะโก่งและมุมที่จุด A ในข้อ 2 – 1

3 – 2 " " " A " 2 – 3

3 – 3 " " " A " 2 – 5

3 – 4 " " " A และ C ในข้อ 2 – 7

3 – 5 " " " C และ E " 2 – 9 เมื่อ $I_{CD} = 2I_{CE}$

3 – 6 " " " กึ่งกลางคานข้อ 2 –11 เมื่อ $I_{CD} = 2I_{CA} = I_{DB}$

3 – 7 " " " D และ E

3 – 8 " " " D และ E ในข้อ 2 – 4

3 – 9 " " " A และ E " 2 – 6

3 – 10 " " " D และ E " 2 – 8

3 – 11 " " " D และ E " 2 – 10 เมื่อ $I_{AB} = 2I_{BC}$

3 – 12 " " " D และ C " 2 – 12 " " "

3 – 13 " " " B และ D " 2 – 13 เมื่อ I เสา = 2 I คาน

3 – 14 " " " B และ D " 2 – 14

3 – 15 " " " B และ D " 2 – 15 เมื่อ I เสา = 2 I คาน

3 – 16 " " " B และ D " 2 – 17

3 – 17 " " " D ในข้อ 2 – 18

3 – 18 " " " D " 2 – 20

3 – 19 " " " D " 2 – 22

3 – 20 " " " D " 2 – 23

(2) ให้คำนวณระยะโก่งที่จุดต่าง ๆ ของโครงข้อหมุน (หน้า 40)

กำหนดให้ $E = 2 \times 10^6$ กก/ซม^2

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ข้อ	3 – 21	ระยะโก่งที่จุด	L_2	ในข้อ	2 – 25	เมื่อ	L/A	=	10	ทุกชิ้นส่วน
	3 – 22	"	" A	"	2 – 26	"	L/A	=	15	"
	3 – 23	"	" L_2	"	2 – 27	"	L/A	=	15	"
	3 – 24	"	" C	"	2 – 28	"	L/A	=	20	"
	3 – 25	"	" L_2	"	2 – 29	"	L/A	=	20	"
	3 – 26	ระยะโก่งที่จุด	E	ในข้อ	2 – 30	เมื่อเสา	L/A	=	15	นอกนั้น L/A = 20
	3 – 27	"	" L_3	"	2 – 31	เมื่อ	L/A	=	20	ตลอด
	3 – 28	"	" L_2	"	2 – 32	"	L/A	=	20	"
	2 – 29	"	" F	"	2 – 33	"	L/A	=	20	"
	2 – 30	"	" L_2	"	2 – 34	"	L/A	=	20	"
	2 – 31	"	" L_c	"	2 – 35	"	L/A	=	20	"

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

บทที่ 4
โครงสร้างอินดิเทอมิเนท

โครงสร้างที่กล่าวในบทที่ 2 และ 3 นั้น สามารถวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นด้วยการใช้ 3 สมการสมดุลย์ได้ เพราะมีตัวไม่รู้ค่าไม่เกิน 3 ตัว เรียกโครงสร้างดิเทอมิเนท แต่โดยทั่วไปแล้วอาคารมักจะมีการต่อเนื่องหรือปลายขึ้นส่วนยึดแน่น ทำให้มีตัวไม่รู้ค่าเกินความจำเป็น (Redundants) เพิ่มขึ้น การที่จะใช้เพียง 3 สมการ เดิมวิเคราะห์แรงนั้นทำไม่ได้ ต้องใช้วิธีการอื่นเพื่อหาค่าที่เกิน 3 นั้นเสียก่อน วิธีการหนึ่งที่ใช้หาได้ทั่วไปคือการนำหลักของระยะโก่งมาใช้ เช่นเมื่อมีฐานรองรับเพิ่มขึ้น ที่จุดรองรับนั้นโครงสร้างจะถูกบังคับในเรื่องระยะโก่งหรือมุมไปในตัว เมื่อไม่ใช่โครงสร้างธรรมดาที่จะวิเคราะห์กันได้ง่าย ๆ แล้ว จึงให้ชื่อแตกต่างไปคือ โครงสร้างอินดิเทอมิเนท วิธีวิเคราะห์โครงสร้างอินดิเทอมิเนทนั้นทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะ เลือกแสดงวิธีคำนวณซึ่งใช้โดยทั่วไป สะดวก แม่นยำ และตรวจสอบได้ง่ายดังต่อไปนี้

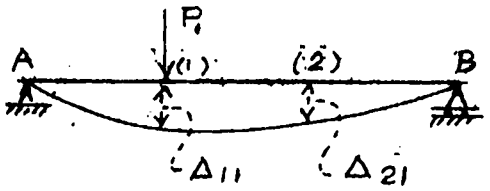
4.1 วิธีการไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรง (Method of Consistent Deformation)

นับเป็นวิธีการวิเคราะห์แรงอย่างธรรมดาที่สุด ในกรณีที่ตัวไม่รู้ค่าเกินนั้นเป็นฐานรองรับ (Redundant reactions) เมื่อเอาฐานรองรับนั้นออก จะกลายเป็นโครงสร้างดิเทอมิเนทซึ่งสามารถหาระยะโก่งหรือมุมได้ตามบทที่ 3 คราวนี้เมื่อเอาน้ำหนักออกจากโครงสร้างแล้วใส่แรงปฏิกิริยาที่ยังไม่รู้ค่า (Unknow reactions) คืนที่ตำแหน่งฐานรับ โดยให้ระยะโก่งทั้งสองค่านี้เท่ากันก็จะสามารถหาค่าแรงปฏิกิริยาได้ แต่ถ้า Redundant recations มีมาก หรือในกรณีโครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนทซึ่งมีทั้งแรงส่วนเกินเป็นแรงปฏิกิริยากายนอกและแรงภายในคือชิ้นส่วนที่เกิน (Redundant members) อาจจะต้องใช้กฎการแลกเปลี่ยนระยะโก่ง (Law of Reciprocal Deflections) หรือ Maxwell's Reciprocal Theorem เข้าช่วยก็ได้

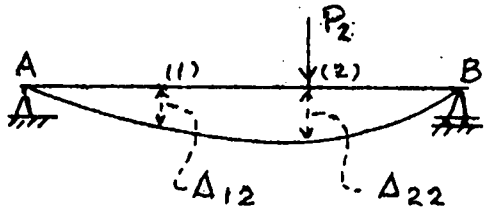
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(1) The Law of Reciprocal Deflections

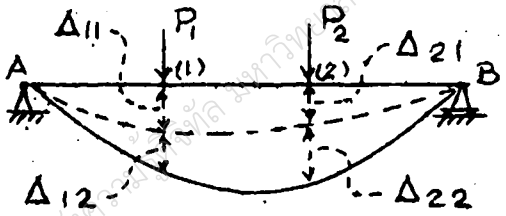
การวิเคราะห์แรงของโครงสร้างอินดิเทอมิเนทโดยวิธีนี้ มีการคำนวณมากเกี่ยวกับการหาระยะโก่งและมุมถ้าใช้ Law of reciprocal deflections เข้าช่วยด้วยอาจจะทำให้ลดงานและสะดวกแก่การคำนวณขึ้น



(ก) คาน AB มี P_1 กระทำที่ (1)



(ข) คาน AB มี P_2 กระทำที่ (2)



(ค) คาน AB มี P_1, P_2 กระทำที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

รูปที่ 4.1

การพิจารณาสูตรดำเนินดังต่อไปนี้

1. ค่อย ๆ ใส่ P_1 ที่จุด (1) ได้

External work = $W_1 = \frac{P_1 \Delta_{11}}{2}$

2. คาน AB มี load P_1 อยู่แล้ว ค่อย ๆ ใส่ P_2 ที่จุด (2) งานที่เพิ่มขึ้นเฉพาะ external work = W_2 = $P_1 \Delta_{12} + \frac{P_2 \Delta_{22}}{2}$

3. จากข้อ 1 และ 2 ทำให้มี P_1, P_2 วางอยู่บนคาน AB ได้ Total external work = $W_3 = W_1 + W_2$

$$\therefore W_3 = \frac{P_1 \Delta_{11}}{2} + P_1 \Delta_{12} + \frac{P_2 \Delta_{22}}{2}$$

4. ถ้าคานว่างและค่อย ๆ ใส่ P_1 , P_2 พร้อม ๆ กัน จะได้ระยะโก่งเหมือนรูป (ค) ได้ Ext. work = W_4

$$\therefore W_4 = \frac{P_1(\Delta_{11} + \Delta_{12})}{2} + \frac{P_2(\Delta_{21} + \Delta_{22})}{2}$$

สภาพของคาน AB ในข้อ 3 และข้อ 4 เกิดงานขึ้นเท่ากันคือ

$$W_3 = W_4$$

$$\therefore \quad \frac{P_1 \Delta_{11}}{2} + P_1 \Delta_{12} + \frac{P_2 \Delta_{22}}{2} = \frac{P_1(\Delta_{11} + \Delta_{12})}{2} + \frac{P_2(\Delta_{21} + \Delta_{22})}{2}$$

ได้ $P_1 \Delta_{12} = P_2 \Delta_{21}$

ถ้าเป็น Unit load หรือ $P_1 = P_2$ จะได้ $\Delta_{12} = \Delta_{21}$

หรือ $\delta_{12} = \delta_{21}$ ---------- *

หรือ $\delta_{AB} = \delta_{BA}$ ---------- สูตรทั่วไป

คือระยะโก่งที่ A เมื่อใส่แรงหนึ่งที่ B เท่ากับระยะโก่งที่ B เมื่อใส่แรงหนึ่งที่ A

<u>หมายเหตุ</u> δ_{AB} มีความหมายดังนี้

A คือจุดที่ต้องการหาระยะโก่ง

B คือจุดที่น้ำหนักกระทำ

(2) ให้คำนวณแรงปฏิกิริยาทั้งหมด เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของคานรูปที่ 4.2 (ก)

การคำนวณดำเนินตามขั้นดังนี้

ก. ทำให้คานเป็นโครงสร้างดิเทอมิเนท ในที่นี้ลดฐานรับ A ในรูป (ข) ได้

$$\Delta_{AP} = \frac{2 \times (10)^4}{8\ EI} \downarrow$$ (หน้า 46)

ข. ใส่แรงปฏิกิริยา V_A คืนในขณะที่คานว่างรูป (ค) ได้

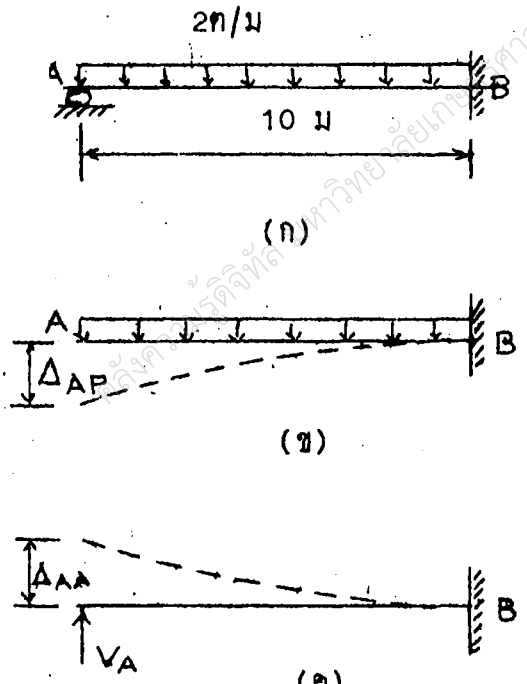
$$\Delta_{AA} = \frac{V_A(10)^3}{3\ EI} \uparrow$$ (หน้า 46)

ค. เมื่อฐานรับ A อยู่ที่เดิมได้

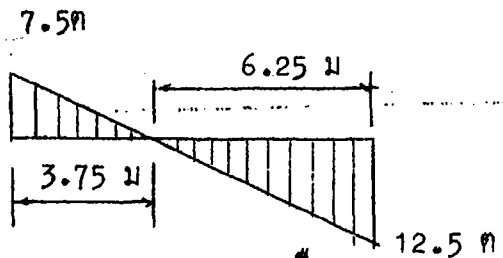
$$\Delta_{AA} = \Delta_{AP}$$

$$V_A = \frac{2(10)^4}{8\ EI} \times \frac{3EI}{(10)^3}$$

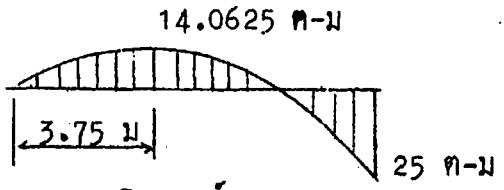
$$= 7.5 \text{ ต} \uparrow$$



รูปที่ 4.2



(ง) ภาพแรงเฉือน



(จ) ภาพโมเมนต์

รูปที่ 4.2

ดังนั้น $M_A = 7.5 \times 10 - \frac{2 \times 10^2}{2}$

$= -25$ ต-ม

จุดที่แรงเฉือน $= 0$

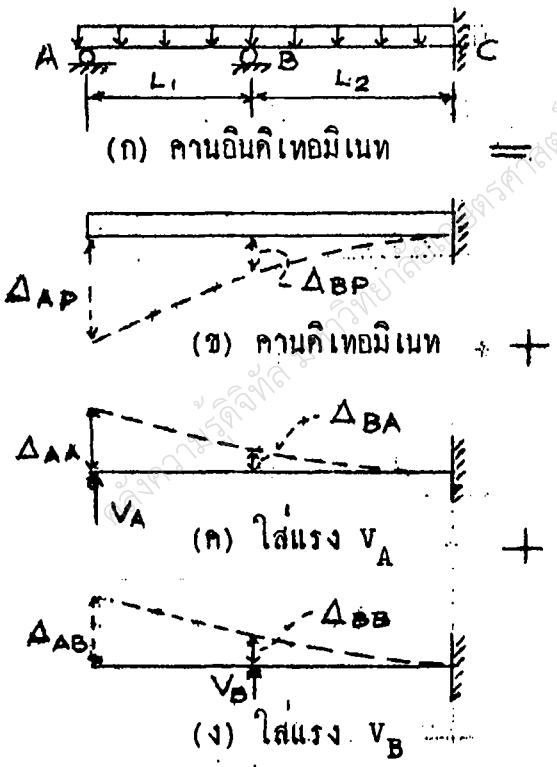
$x = \frac{7.5}{2} = 3.75$ ม

โมเมนต์สูงสุด $= 7.5 \times 3.75 - 2 \times \frac{3.75^2}{2}$

$= 28.125 - 14.0625$

$= 14.0625$ ต-ม

(3) แสดงสมการวิเคราะห์แรงปฏิกิริยาคานอินดิเทอมิเนท 2 ดีกรี โดยใช้หลักของระยะโก่งและการไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรง ดังรูปที่ 4.3



(ก) คานอินดิเทอมิเนท = (ข) คานดิเทอมิเนท + (ค) ใส่แรง V_A + (ง) ใส่แรง V_B

รูปที่ 4.3

<u>วิธีทำ</u> เมื่อ A และ B อยู่ในตำแหน่งเดิม จะได้

$\Delta_{AA} + \Delta_{AB} = \Delta_{AP}$

$\Delta_{BA} + \Delta_{BB} = \Delta_{BP}$

สมการทั้ง 2 ข้างบนนี้แม้จะมีตัวไม่รู้ค่าเพิ่มขึ้นมาเพียง 2 ตัวเท่านั้น แต่การจะวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิกิริยาได้ จะต้องหาค่าระยะโก่งทั้งหมดถึง 6 ตัว จำนวน 4 ค่าทางซ้ายมือจะอยู่ในเทอมของแรงที่ยังไม่รู้ค่า 2 ตัว คือ V_A และ V_B แม้ว่าวิธีการหาระยะโก่งจะไม่ยากนัก แต่การคำนวณอาจจะใช้เวลาและการตรวจสอบไม่สะดวกนัก สมการข้างต้นจะเขียนใหม่ได้คือ

$$\delta_{AA} V_A + \delta_{AB} V_B = \Delta_{AP} \quad \text{---------- (1)}$$

$$\delta_{BA} V_A + \delta_{BB} V_B = \Delta_{BP} \quad \text{---------- (2)}$$

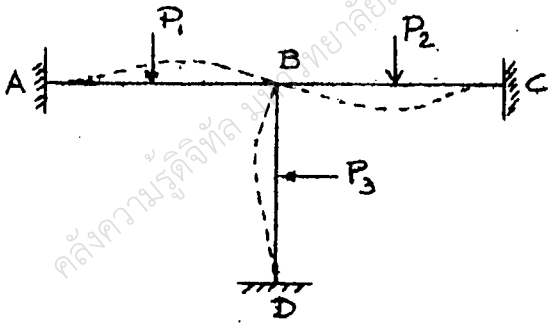
สมการ (1) และ (2) สามารถคำนวณหาแรงปฏิกิริยา V_A และ V_B ได้ เมื่อรู้ค่าระยะโก่งต่าง ๆ แล้ว

δ_{AA} , δ_{AB} , δ_{BA} และ δ_{BB} คือระยะโก่งของคานเนื่องจาก unit load การใช้ $\delta_{AB} = \delta_{BA}$ โดย Law of reciprocal deflections ทำให้ลดการหาค่าระยะโก่งไปได้ 1 ค่า แต่งานก็ยังมากอยู่ จึงขอแสดงไว้เพียงเท่านี้ วิธีที่สะดวกสำหรับการวิเคราะห์โครงข้อแข็งจะได้กล่าวต่อไปในข้อ 4.2 และ 4.3

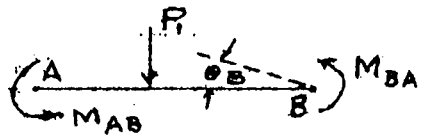
4.2 The Slope-deflection Method

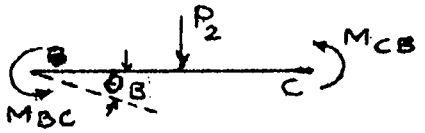
วิธีนี้ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอินดิเทอมิเนทที่มีข้อต่อยึดแน่น เช่น คานและโครงข้อแข็ง ซึ่งถือว่ามุมระหว่างชิ้นส่วนไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากรับน้ำหนัก เช่น คานก็ยังรักษามุม 180° ที่ฐานรองรับเป็นต้น มุมของข้อต่อจะมีส่วนสัมพันธ์กับโมเมนต์ที่ปลายของชิ้นส่วนนั้น ๆ เมื่อสภาพสมดุลย์ผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์ที่ข้อต่อหนึ่ง ๆ จะเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นกุญแจสำหรับถอดสมการ

ตัวอย่างรูปที่ 4.4 (ก) เป็นโครงข้อแข็ง 6 ดีกรี ถ้าจะใช้สมการของวิธีในข้อ 4.1 ต้องทำงานมาก โอกาสผิดพลาดได้ง่าย โครงนี้ไม่มีระยะโก่งเนื่องจากปลายถูกยึดแน่นทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ข้อต่อ B เท่านั้นที่มีโอกาสหมุนทำมุมกับแนวเดิม A , C , D ยึดแน่นมุมเป็นศูนย์

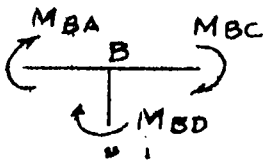


(ก) รูปโครงเดิม





(ข) รูปอิสระของโมเมนต์



(ค) รูปอิสระของข้อต่อแสดงเฉพาะโมเมนต์

รูปที่ 4.4

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

<u>เครื่องหมาย</u> ในการคำนวณมีความสำคัญมากให้ไว้ดังนี้

มุมหมุนตามเข็มนาฬิกา เป็นบวก (รูป ก)

โมเมนต์ที่ปลายทวนเข็มนาฬิกา เป็นบวก (รูป ข)

โครงที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ก) มี 3 ชิ้นส่วน ดังนั้นจึงมีโมเมนต์ที่ปลาย 6 ตัว ซึ่งจะแสดงด้วยตัวไม่รู้ค่าเพียง 1 ตัว คือมุม B เท่านั้น

ในสภาพสมดุลย์ ผลรวมโมเมนต์ที่ข้อต่อ = 0 ได้

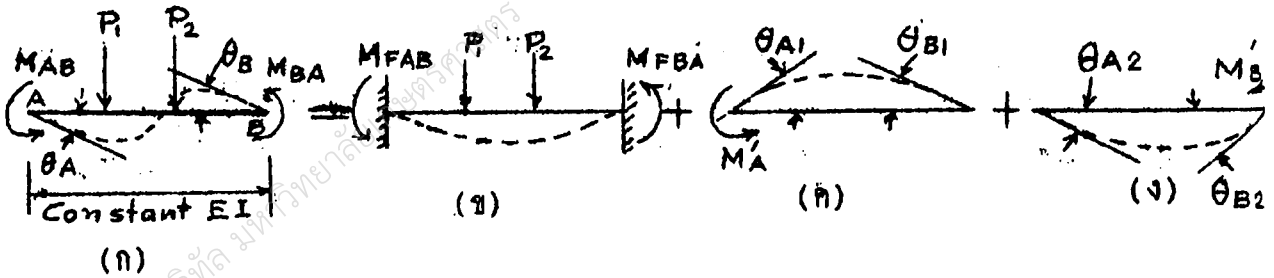
ข้อต่อ B : $M_{BA} + M_{BC} + M_{BD} = 0$

สมการนี้ติดตัวไม่รู้ค่าในเทอมของ θ_B ดังนั้นสมการ slope deflection จะสามารถถอดสมการได้ง่ายมาก

ในกรณีที่ข้อต่อมีการเคลื่อนที่ (Side sway) โดยปลายบนของโครงข้อแข็งไม่มีการยึดไว้เลยเป็นต้น จะต้องมีความเข้าใจในเรื่องเรขาคณิตและสแตติคส์พอสมควร เช่น Gable frame เป็นต้น

(1) <u>การพิจารณาที่มาของ Slope deflection equations</u>

ในสมการ slope deflection นั้น end moments แสดงในเทอมของ end rotations และแรงกระทำ (loading)



รูปที่ 4.5 แสดงคาน AB เมื่อมีแรงกระทำปลายคาน มีโมเมนต์และมุม

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

สภาพทางเรขาคณิต

$$\left.\begin{aligned} \theta_A &= -\theta_{A1} + \theta_{A2} \\ \theta_B &= \theta_{B1} - \theta_{B2} \end{aligned}\right\} \text{---------- (1)}$$

โดยการวางซ้อน (by superposition)

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= M_{FAB} + M'_A \\ M_{BA} &= M_{FBA} + M'_B \end{aligned}\right\} \text{---------- (2)}$$

มุมที่ปลายเนื่องจากโมเมนต์กระทำได้

$$\left.\begin{aligned} \theta_{A1} &= \frac{M'_A L}{3EI} & \theta_{B1} &= \frac{M'_A L}{6EI} \\ \theta_{A2} &= \frac{M'_B L}{6EI} & \theta_{B2} &= \frac{M'_B L}{3EI} \end{aligned}\right\} \text{---------- (3)}$$

แทนค่าของสมการ (3) ในสมการ (1) ได้

$$\left.\begin{aligned} \theta_A &= -\frac{M'_A L}{3EI} + \frac{M'_B L}{6EI} \\ \theta_B &= \frac{M'_A L}{6EI} - \frac{M'_B L}{3EI} \end{aligned}\right\} \text{---------- (4)}$$

ถอดสมการ (4) ได้

$$\left.\begin{aligned} M'_A &= +\frac{2EI}{L}(-2\theta_A - \theta_B) \\ M'_B &= +\frac{2EI}{L}(-2\theta_B - \theta_A) \end{aligned}\right\} \text{---------- (5)}$$

แทนสมการ (5) ในสมการ (2) ได้

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= M_{FAB} + \frac{2EI}{L}(-2\theta_A - \theta_B) \\ M_{BA} &= M_{FBA} + \frac{2EI}{L}(-2\theta_B - \theta_A) \end{aligned}\right\} \text{---------- (6)}$$

สมการ (6) คือ Slope-deflection equations ซึ่ง End moments ในเทอมของ end rotations และ applied loading

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(2) ลำดับการใช้ slope deflection method มีดังนี้

(ก) หา Fixed end moments เนื่องจากน้ำหนักกระทำ

(ข) เขียน slope deflection equations

(ค) Joint conditions เช่น ผลรวมโมเมนต์ที่ข้อต่อ = 0

(ง) ถอดสมการหาค่า θ ทุกข้อต่อ

(จ) แทนค่า θ ที่ได้จากข้อ (ง) ใน slope deflection equations ในข้อ (ข) ได้ค่า end moments

(ฉ) เขียนรูปอิสระของทุกชิ้นส่วน คำนวณหาค่าแรงปฏิกิริยา เขียนภาพแรงเฉือน ภาพโมเมนต์ และ sketch the elastic curve

สมการ (6) ในข้อ (1) จะเขียนเป็นตัวหนังสือได้ดังนี้

$$\text{End moment} = \text{Fixed moment} + \frac{2EI}{L}(-2\theta_{near} - \theta_{far}) \quad \text{----------} \quad (7)$$

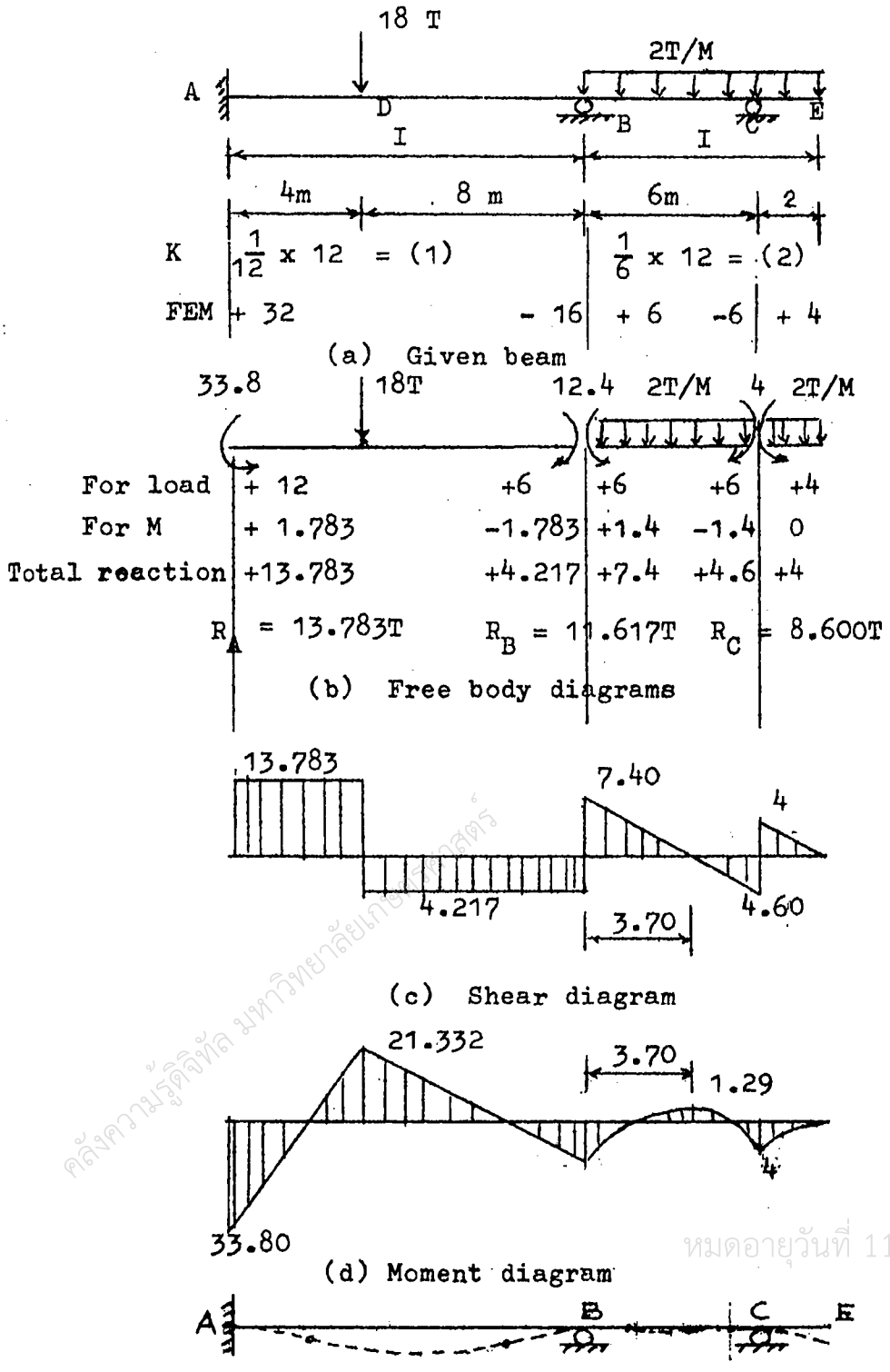
สัมประสิทธิ์ $\frac{2EI}{L}$ ข้างหน้าวงเล็บของสมการ (6) และ (7) มีค่าแตกต่างกันแต่ละชิ้นส่วนหรือช่วงคาน ถ้าค่า $\frac{2EI}{L}$ ของทุกชิ้นส่วนทำให้เป็น n เท่าของค่า $\frac{2EI}{L}$ น้อยที่สุด ผลเพียงทำให้ได้ค่า θ ทุกแห่งเป็น n เท่า ซึ่งผลคูณของ $\frac{2EI}{L}$ และ $(-2\theta_{near} - \theta_{far})$ หรือค่าของ End moments ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง ถ้ามุม θ ที่แท้จริงไม่ต้องรู้ค่าแล้ว ดังนั้นการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของ $\frac{2EI}{L}$ หน้าวงเล็บก็ใช้ได้ ถ้าค่าสัมพันธ์ของ $\frac{I}{L}$ เรียกว่า Relative stiffness K แล้ว slope deflection equations ดังกล่าวจะเขียนใหม่ได้

$$\begin{aligned} M_{AB} &= M_{FAB} + K_{AB}(-2\theta_A - \theta_B) \\ M_{BA} &= M_{FBA} + K_{BA}(-2\theta_B - \theta_A) \end{aligned} \quad \text{----------} \quad (8)$$

คลังความรู้ดิจิทล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง (1) ให้วิเคราะห์แรงในคาน เขียนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ของคานดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

Rilative stiffness K

SPAN	AB	BC
I	I	I
L	12	6
I/L	I/12	I/6
K	1	2

Fixed end moments

$$MFAB = + 18 \times \frac{4 \times 8^2}{12^2} = + 32 \text{ T - M.}$$

$$MFBA = - 18 \times \frac{8 \times 4^2}{12^2} = - 16 \text{ T - M.}$$

$$MBC = + \frac{2 \times 6^2}{12} = + 6 \text{ T - M} = - M_{FCB}$$

Slope deflection equations , Using K

$$M_{AB} = + 32 + 1(-2\theta_A - \theta_B) = + 32 - 2\theta_A - \theta_B$$

$$M_{AA} = - 16 + 1(-2\theta_B - \theta_A) = - 16 - 2\theta_B - \theta_A$$

$$M_{BC} = + 6 + 2(-2\theta_B - \theta_C) = + 6 - 4\theta_B - 2\theta_C$$

$$M_{CB} = - 6 + 2(-2\theta_C - \theta_B) = - 6 - 4\theta_C - 2\theta_B$$

Joint conditions

Joint A $\quad \theta_A = 0$

Joint B $\quad M_{BA} + M_{BC} = 0$

Joint C $\quad M_{CB} = - M_{CE} = - 2 \times \frac{2^2}{2} = - 4 \text{ T - M}$

By substituting the slope deflection equations and solve

$$\sum M_B = 0 : - 6\theta_B - 2\theta_C = 10 \quad \text{---------- (a)}$$

$$\sum M_C = 0 : - 2\theta_B - 4\theta_C = 2 \quad \text{---------- (b)}$$

$$\text{(b) x 3} : - 6\theta_B - 12\theta_C = 6 \quad \text{---------- (c)}$$

$$\text{(a) - (c)} \qquad 10\theta_C = 4$$

$$\theta_C = 0.4$$

$$\text{(b)} \longrightarrow \quad - 2\theta_B = 2 + 1.6$$

$$\theta_B = -1.8$$

Computation for End Moments

$M_{AB} = +32 - 0 - \theta_B = +32 + 1.8 = +33.8$ T - M

$M_{BA} = -16 - 2\theta_B - 0 = 16 + 3.6 = -12.4$ T - M

$M_{BC} = +6 - 4\theta_B - 2\theta_C = +6 + 7.2 - 0.8 = +12.4$ T - M

$M_{CB} = -6 - 4\theta_C - 2\theta_B = -6 + 3.6 = -4$ T - M

$M_{CE} = +4$ T - M

$M_D = 13.783 \times 4 - 33.80$

$= 55.132 - 33.80 = 21.332$ T - M

SPAN BC

SHEAR = 0 at $x = \frac{7.40}{2} = 3.70$ m from B

Max. M = $7.4 \times 3.7 - 12.4 - 2 \times \frac{3.7^2}{2}$

$= 27.38 - 12.4 - 13.69$

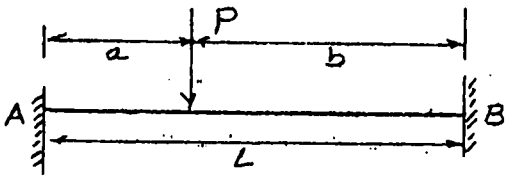
$= 1.29$ T - M

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(3) ค่าโมเมนต์ที่ปลายคานยึดแน่น ที่รับน้ำหนักบรรทุกในลักษณะต่าง ๆกัน

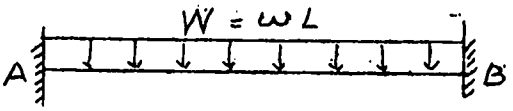
1



$$M_A = + \frac{Pab^2}{L^2}$$

$$M_B = - \frac{Pa^2b}{L^2}$$

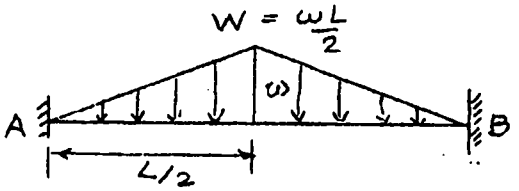
2



$$M_A = + \frac{WL}{12}$$

$$M_B = - \frac{WL}{12}$$

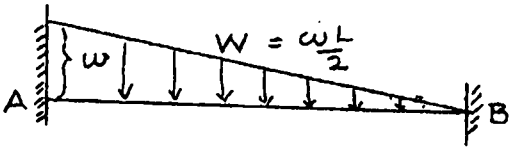
3



$$M_A = + \frac{5}{48} WL$$

$$M_B = - \frac{5}{48} WL$$

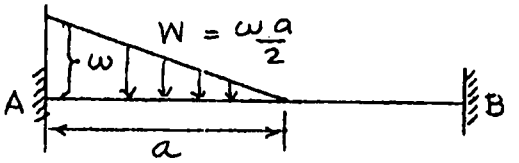
4



$$M_A = + \frac{WL}{10}$$

$$M_B = - \frac{WL}{15}$$

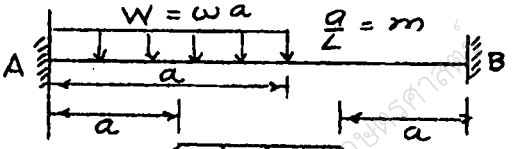
5



$$M_A = + \frac{Wa}{30L^2}(10L^2 - 10aL + 3a^2)$$

$$M_B = - \frac{Wa^2}{30L^2}(5L - 3a)$$

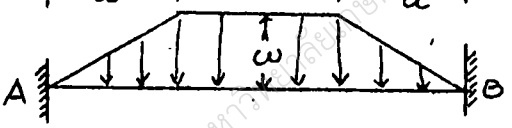
6



$$M_A = + \frac{WL}{12}(m)(3m^2 - 8m + 6)$$

$$M_B = - \frac{WL}{12}(m)^2(4 - 3m)$$

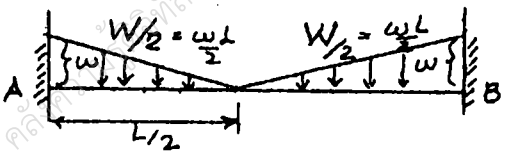
7



$$M_A = + \frac{\omega L^2}{12}\left[1 - 2\left(\frac{a}{L}\right)^2 + \left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$$

$$M_B = - \frac{\omega L^2}{12}\left[1 - 2\left(\frac{a}{L}\right)^2 + \left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$$

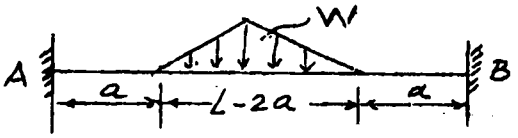
8



$$M_A = + \frac{WL}{16}$$

$$M_B = - \frac{WL}{16}$$

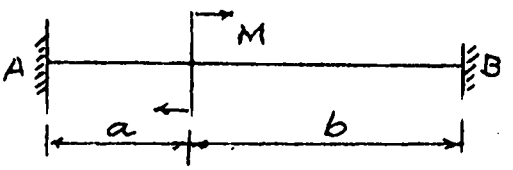
9



$$M_A = + \frac{W}{48L}(5L^2 + 4aL - 4a^2)$$

$$M_B = - \frac{W}{48L}(5L^2 + 4aL - 4a^2)$$

10



$$M_A = - \frac{Mb}{L^2}(3a - L)$$

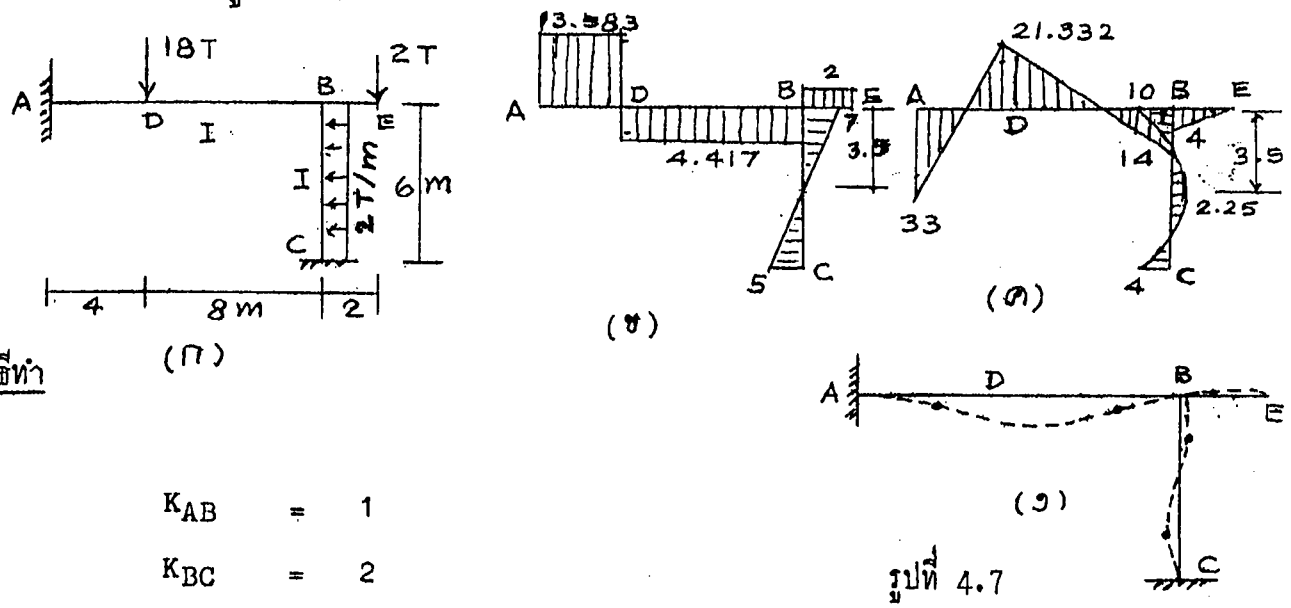
$$M_B = - \frac{Ma}{L^2}(3b - L)$$

ω = น้ำหนักแผ่ต่อหน่วยความยาว

W = น้ำหนักทั้งหมดบนคาน

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง (2) ให้วิเคราะห์แรงในโครงสร้างข้อแข็ง เขียนภาพแรงเฉือน โมเมนต์และการเปลี่ยนรูป ตามรูปที่ 4.7



วิธีทำ

$K_{AB} = 1$

$K_{BC} = 2$

รูปที่ 4.7

FEM

$M_{FAB} = +32\ T - M,\quad M_{FBA} = -16\ T - M,\quad M_{FBC} = -M_{FCB} = +6\ T - M$

Slope deflection equations

$M_{AB} = M_{FAB} + K_{AB}(-2\theta_A - \theta_B) = 32 + 1(0 - \theta_B) = +33\ T - M$

$M_{BA} = M_{FBA} + K_{AB}(-2\theta_B - \theta_A) = -16 + 1(-2\theta_B - 0) = -14$ "

$M_{BC} = +6 + 2(-2\theta_B - \theta_C) = +6 - 4\theta_B - 0 = +10$ "

$M_{CB} = -6 + 2(-2\theta_C - \theta_B) = -6 - 0 - 2\theta_B = -4$ "

$M_{BE} = +2 \times 2 = 4\ T - M$

Joint Conditions $\theta_A = \theta_C = 0$

$M_{BA} + M_{BC} + M_{BE} = 0$

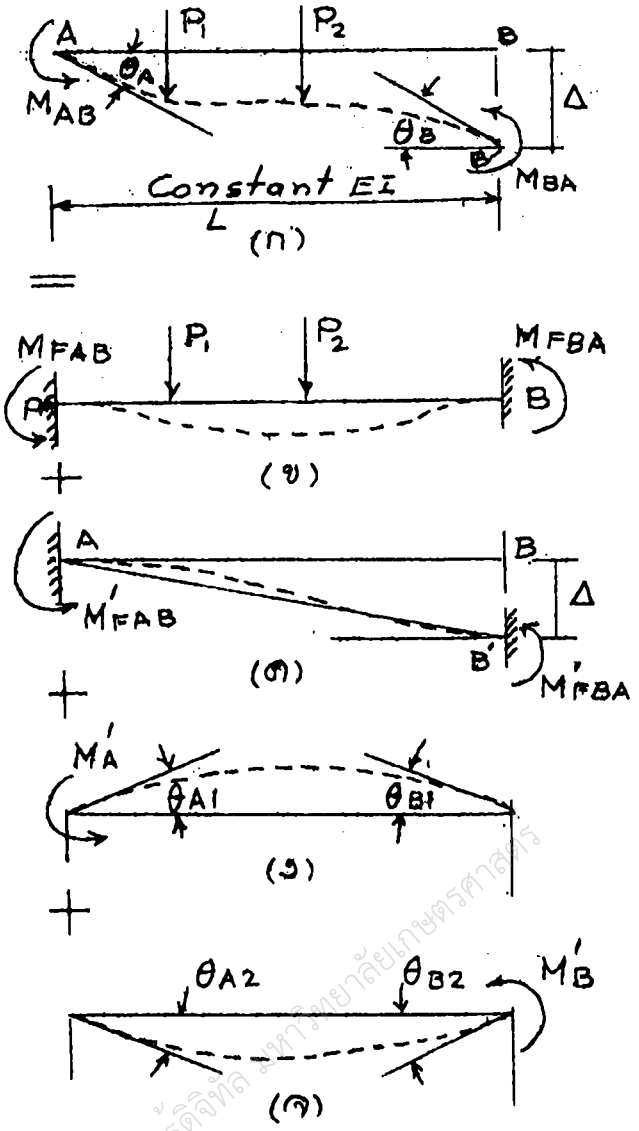
or $-16 - 2\theta_B + 6 - 4\theta_B + 4 = 0$

$\theta_B = -1$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แทนค่า θ_B ในสมการข้างบนได้ค่าโมเมนต์ที่ต้องการ ภาพแรงเฉือนโมเมนต์ดัด และการเปลี่ยนรูป แสดงในรูปที่ 4.7 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ

(4) ในกรณีที่ข้อต่อ (joint) ของคานหรือโครงข้อแข็งเคลื่อนที่ (Joint movement)



สมการจะ เป็นดังต่อไปนี้

สมการที่ (6) แสดงโมเมนต์ที่ปลายใน เทอมของมุมที่ปลายและน้ำหนักบรรทุกเท่านั้น ในกรณีที่ปลายชิ้นส่วน เลื่อนไปในแนวตั้งฉากกับแกนจะต้องรวมค่า FEM เนื่องจากกรณีนี้ด้วย คือ M'_{FAB} และ M'_{FBA} ในรูปที่ 4.8 (ค) ซึ่งทำให้มุมที่ปลายมีสภาพเหมือนปลายยึดแน่น M'_A และ M'_B ใส่เพื่อให้ปลายหมุนเป็นมุม θ_A และ θ_B ตามลำดับ ในทางเรขาคณิตได้

$$\theta_A = -\theta_{A1} + \theta_{A2}$$
$$\theta_B = \theta_{B1} - \theta_{B2} \quad \text{---} \quad (9)$$

โดยการจับวางซ้อนได้

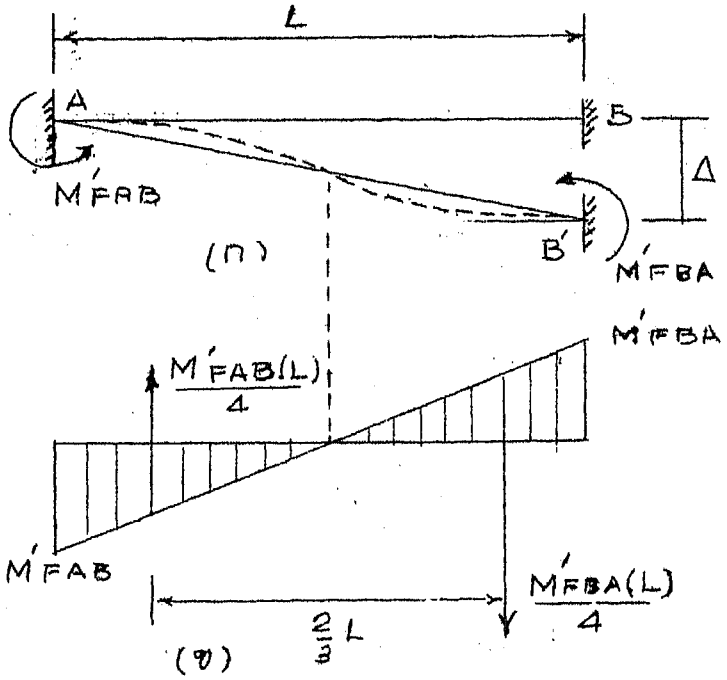
$$M_{AB} = M_{FAB} + M'_{FAB} + M'_A$$
$$M_{BA} = M_{FBA} + M'_{FBA} + M'_B \quad \text{-----} \quad (10)$$

จากสมการที่ (5)

$$M'_A = +\frac{2EI}{L}(-2\theta_A - \theta_B)$$
$$M'_B = +\frac{2EI}{L}(-2\theta_B - \theta_A) \quad (5)$$

<u>รูปที่ 4.8 แสดงคานที่มี Joint เคลื่อนที่</u>

ค่า M'_{FAB} และ M'_{FBA} หาได้จากรูปที่ 4.9 โดยกำหนดให้ $R = \frac{1}{L}$ ถ้าชิ้นส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกา ค่า R เป็นบวกจาก moment area method ข้อ 1 ให้ไว้ว่า " การเปลี่ยน



รูปที่ 4.9 แสดง FEM เนื่องจากข้อต่อเคลื่อนที่

มุมระหว่าง A และ B เท่ากับศูนย์ ได้พื้นที่ $\frac{M}{EI}$ diagram ระหว่าง A และ B เท่ากับศูนย์ หรือ $M'_{FAB} = M'_{FBA}$

จาก Moment area method ข้อ 2 ได้

$$\Delta = \frac{1}{EI}\left[\frac{M'_{FAB}(L)}{4}\right]\frac{2}{3}L = M'_{FAB}\cdot\frac{L^2}{6EI}$$

หรือ $$M'_{FAB} = M'_{FBA} = \frac{6EI\Delta}{L^2} = \frac{6EIR}{L} \qquad \text{----------} \quad (11)$$

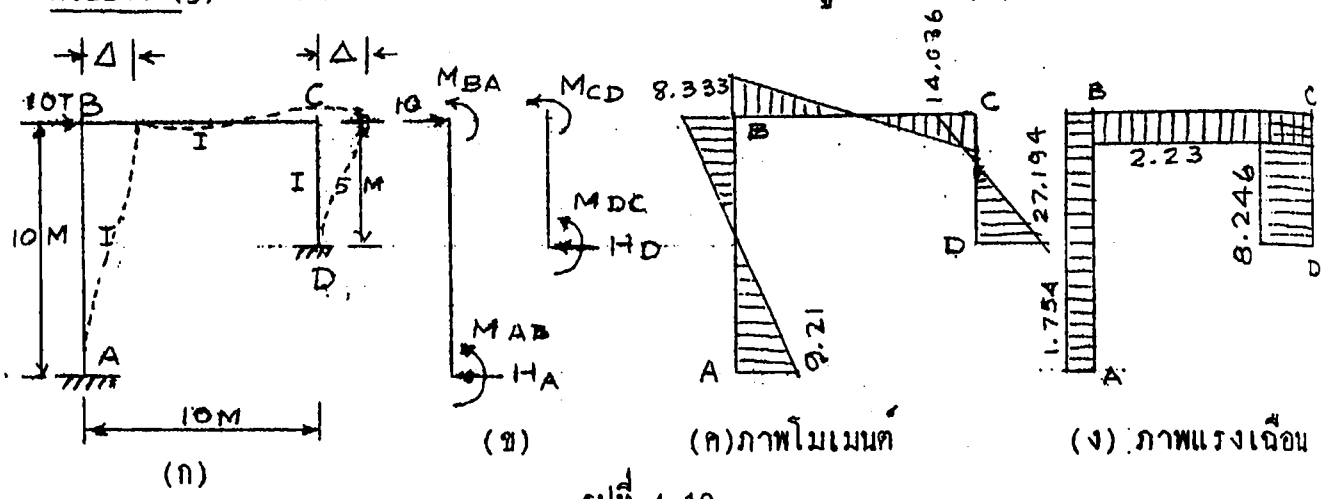
แทนค่าสมการ (5) และ (1) ใน (10) ได้

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= M_{FAB} + \frac{2EI}{L}(-2\theta_A - \theta_B + 3R) \\ M_{BA} &= M_{FBA} + \frac{2EI}{L}(-2\theta_B - \theta_A + 3R) \end{aligned}\right\} \quad \text{----------} \quad (12)$$

สมการที่ (12) เป็นสมการทั่วไป สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างที่มีข้อต่อเคลื่อนที่

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง (3) ให้วิเคราะห์โครงข้อแข็งซึ่งมีแรง กระทำดังรูปที่ 4.10 (ก)



รูปที่ 4.10

Solutions

Relative stiffness $I_{AB} : I_{BC} : I_{CD} = 1 : 1 : 2$

FEM $M_{FAB} = M_{FBA} = 0$

$M_{FBC} = M_{FCB} = M_{FCD} = M_{FDC} = 0$

Relative values of R

$R_{AB} = \frac{\Delta}{10} \times 10 = 1$

$R_{BC} = 0$

$R_{CD} = \frac{\Delta}{5} \times 10 = 2$

If $R_{AB} = R$, $R_{CD} = 2R$

Slope deflection Equations using relative values

$M_{AB} = M_{FAB} + K_{AB} (-2\theta_A - \theta_B + Rrel)$

$M_{BA} = M_{FBA} + K_{AB} (-2\theta_B - \theta_A + Rrel)$

Slope deflection equations for $\theta_A = \theta_D = 0$

$M_{AB} = 0 + 1(0 - \theta_B + R) = -\theta_B + R$

$M_{BA} = 0 + 1(-2\theta_B - 0 + R) = -2\theta_B + R$

$M_{BC} = 0 + 1(-2\theta_B - \theta_C) = -2\theta_B - \theta_C$

$M_{CB} = 0 + 1(-2\theta_C - \theta_B) = -\theta_B - 2\theta_C$

$M_{CD} = 0 + 2(-2\theta_C - 0 + 2R) = -4\theta_C + 4R$

$M_{DC} = 0 + 2(-0 - \theta_C + 2R) = -2\theta_C + 4R$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมดอายุวันที่ 11-09-2566

Joint conditions

$$M_{BA} + M_{BC} = 0 \quad \text{---------- (a)}$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0 \quad \text{---------- (b)}$$

Shear condition ดูรูปที่ 4.10(ข)

$$H_A + H_D = 10 \quad \text{---------- (c)}$$

(a) $-4\theta_B - \theta_C + R = 0$ ---------- (a)

(b) $-\theta_B - 6\theta_C + 4R = 0$ ---------- (b)

(c) $$\frac{-3\theta_B + 2R}{10} + \frac{-6\theta_C + 8R}{5} = 10$$

$$-3\theta_B + 2R - 12\theta_C + 16R = 100$$

$$-3\theta_B - 12\theta_C + 18R = 100 \quad \text{---------- (c)}$$

solving the 3 simultaneous equations,

$$\theta_B = 0.878$$

$$\theta_C = 6.579$$

$$R = 10.088$$

Computations for end moments

$M_{AB} = -0.878 + 10.088 = 9.210$ T - M

$M_{BA} = -1.756 + 10.088 = 8.332$ T - M } คลาดเคลื่อนจากการปัดเศษ

$M_{BC} = -1.756 - 6.579 = -8.335$ T - M }

$M_{CB} = -0.878 - 13.158 = -14.036$ T - M

$M_{CD} = -26.316 + 40.352 = 14.036$ T - M

$M_{DC} = -13.158 + 40.352 = 27.194$ T - M

$H_A = 1.754$ T ←

$H_D = 8.246$ T ←

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

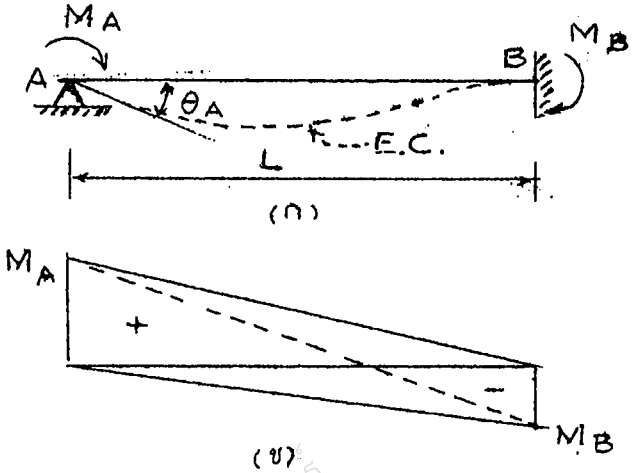
ภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ จะเขียนได้ โดยเอาค่าโมเมนต์ต่าง ๆ เขียนรูปอิสระแต่ละชิ้นส่วน และคำนวณออกมาได้ การเปลี่ยนรูปเขียนได้จากมุมและการเคลื่อนที่ ดูรูปที่ 4.10 (ค),(ง) และ(จ) การวิเคราะห์โครงสร้างอินดิเทอมิเนทจะแสดงอย่างละเอียดในข้อ 4.3

4.3 The Moment-distribution Method

วิธีนี้สะดวก รวดเร็วและตรวจสอบได้ง่ายในการใช้วิเคราะห์โครงข้อแข็ง เช่นเดียวกับวิธี Slope-deflection แต่ไม่ต้องใช้สมการดังกล่าว เพื่อความสะดวกจะใช้ตารางในการคำนวณได้ ผลลัพธ์จะต้องการความละเอียดมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับรอบของการกระจายโมเมนต์ เครื่องหมายใช้อย่างเดียวกับวิธี Slope deflection

(1) หลักการ

สมมติคาน AB ซึ่งมี EI คงที่ ปลาย A ยึดหมุนได้ ส่วนปลาย B ยึดแน่น มีโมเมนต์ภายนอก MA กระทำที่ A



รูปที่ 4.11 เครื่องหมายโมเมนต์ตามข้อกำหนดคาน

ระยะโก่งที่ A ไม่มี คือ $\Delta_A = 0$

โดย Moment area method ข้อ (2) ได้

$$\frac{1}{EI}\left(\frac{M_A \cdot L}{2} \times \frac{L}{3} - \frac{M_B \cdot L}{2} \times \frac{2}{3} L\right) = 0$$

หรือ $$M_B = \frac{1}{2} M_A \qquad \text{----------} \quad (1)$$

จะเห็นว่า M_B เท่ากับครึ่งหนึ่งของ M_A เสมอไป ถ้าปลาย B ยึดแน่นและคาน AB มี EI

คงที่ ค่า $\frac{1}{2}$ เรียกว่า " Carry Over factor " หรือ C.O.F. เทอม Carry over จะเป็นขั้นตอนในวิธี Moment distribution ซึ่งจะกล่าวต่อไป

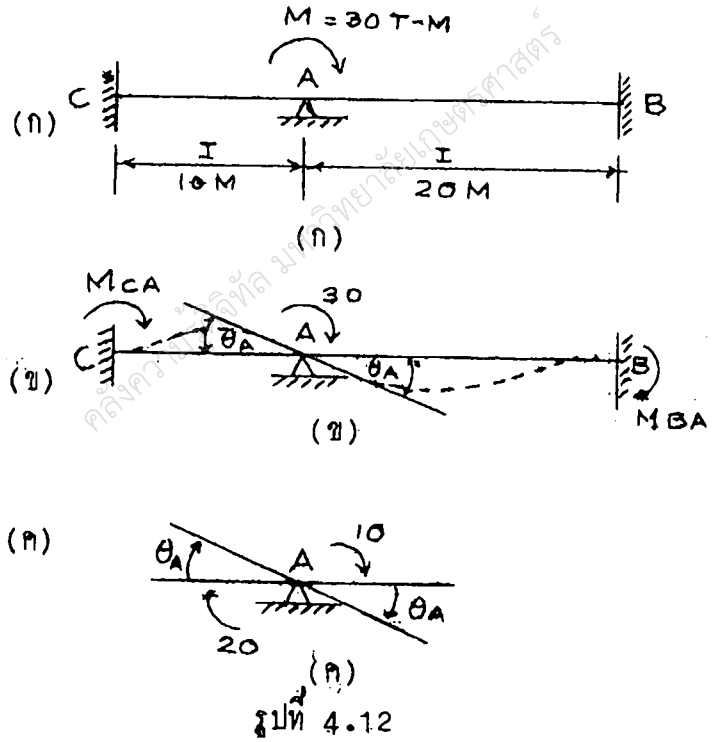
เมื่อ $M_B = \frac{1}{2} M_A$ ค่าของ θ_A ย่อมหาได้จาก Moment area method ข้อ (1) คือ

$$EI\,\theta_A = \frac{M_A \cdot L}{2} - \frac{M_B L}{2} = \frac{M_A L}{4}$$

หรือ $$M_A = \frac{4EI}{L} \cdot \theta_A \qquad \text{----------} \qquad (2)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า M_A เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ θ_A สำหรับคานถ้า θ_A เป็นหนึ่งเรเดียน $M_A = \frac{4EI}{L}$ ถ้า $M_A = \frac{4EI}{L}$ นี้ให้เป็น absolute stiffness หรือ Stiffness factor ถ้ามีหลายช่วงคานซึ่งค่า I และ L ต่างกันแต่ละช่วงคาน การเปรียบเทียบค่า stiffness $\frac{I}{L}$ ให้เป็นสัดส่วนกันสามารถทำได้ สมการ (2) จะแสดง Relative stiffness ของชิ้นส่วนได้อย่างชัดเจน จากสมการ (2) จะเห็นได้ว่า ถ้าค่า $\frac{I}{L}$ มากต้องใช้โมเมนต์กายนอกมากเพื่อที่จะดัดคานให้ได้ θ_A เท่ากัน

พิจารณาคาน CAB ซึ่งยึดแน่นที่ C และ B รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12

สภาพของมุม

$$M_{AB} + M_{AC} = 30 \qquad \text{----------} \qquad (3)$$

จากสมการ (2) ถ้า θ_A ได้

$$M_{AB} = \frac{4EI}{20} \cdot \theta_A$$

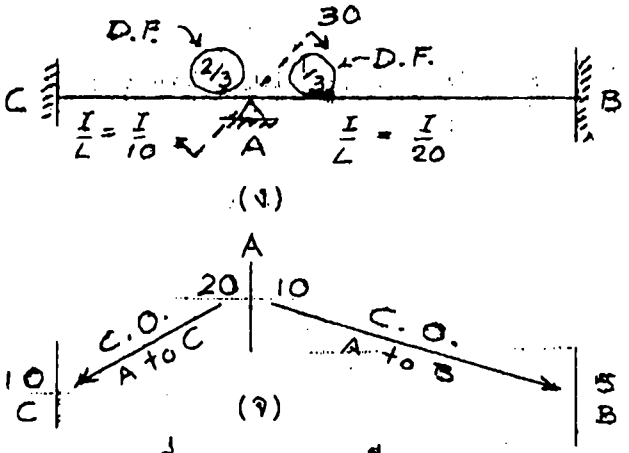
$$M_{AC} = \frac{4EI}{10} \cdot \theta_A$$

แทนค่า M_{AB} และ M_{AC} ใน (3) ได้

$$\frac{4EI}{20}\theta_A + \frac{4EI}{10}\theta_A = 30$$

$$\theta_A = \frac{30}{4E\left(\frac{I}{10} + \frac{I}{20}\right)}$$

ทดสอบวันที่ 11-09-2566



รูปที่ 4.12 แสดงการแจกและกระจายโมเมนต

แทนค่า θ_A ในสมการ (2)

$$M_{AB} = \frac{4EI}{20}\left(\frac{30}{4E(\frac{I}{10}+\frac{I}{20})}\right) = 10 \text{ T}$$

$$M_{AC} = \frac{4EI}{10}\left(\frac{30}{4E(\frac{I}{10}+\frac{I}{20})}\right) = 20 \text{ T}$$

จากสมการ (1) $M_B = \frac{1}{2} M_A$

ดังนั้น M_{BA} = 5 T - m M_{CA} 10 T - m ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของ Carry Over

รูปที่ 4.12 $M_{AB} = \frac{4EI}{20}\theta_A$ และ $M_{AC} = \frac{4EI}{10}\theta_A$ ซึ่งค่า $\frac{I}{L}$ หรือ $\frac{I}{20}$ และ $\frac{I}{10}$ ทำเป็น relative stiffness ของชิ้นส่วนจะได้ผลรวมของ relative stiffness ที่จุด A $= \frac{I}{20} + \frac{I}{10} = \frac{3I}{20}$

อัตราส่วนของ relative stiffness เดียวเช่น AC $= \frac{I/10}{3I/20} = \frac{2}{3}$ เรียกว่า Distibution factor หรือ ratio

D.F. ของ AB $= \frac{I/20}{3I/20} = \frac{1}{3}$

ดังนั้นสรุปเป็นกฎได้คือ $D.F. = \frac{I/L}{\Sigma I/L}$

จะเห็นว่าผลรวมของ D.F. แต่ละข้อต่อ = 0

Unbalanced external moments ที่ A จะถูกต้านด้วย Internal moments หรือ resisting moments ซึ่งโมเมนต์เหล่านี้มีค่าเท่ากับ D.F. x Unbalanced moment คือ

M_{AB} = $\frac{1}{3}$ x 30 = 10 T - m

M_{AC} = $\frac{2}{3}$ x 30 = 20 T - m

Total = 30 T - m

สมมติตอนแรกให้ข้อต่อยึดแน่นทั้งหมด จะได้ค่า FEM. เมื่อคลายที่ยึดให้เป็นสภาพจริง จะเกิดผลต่างของโมเมนต์ซึ่งทำให้ข้อต่อหมุนและแบ่งโมเมนต์ตามสัดส่วนของความแข็งชิ้นส่วน

(2) การตรวจสอบผลการคำนวณโดยวิธี Moment Distribution อาศัยหลักเกณฑ์จากสมการ Slope defection คือ

$$M_{AB} = M_{FAB} + K_{rel}(-2\theta_A - \theta_B)$$

$$M_{BA} = M_{FBA} + K_{rel}(-2\theta_B - \theta_A)$$

หรือ $$2\theta_A + \theta_B = \frac{M_{AB} - M_{FAB}}{(-K_{rel})} \qquad \text{----------} \quad (4)$$

และ $$\theta_A + 2\theta_B = \frac{M_{BA} - M_{FBA}}{(-K_{rel})}$$

หรือ $$\frac{\theta_A}{2} + \theta_B = \frac{1}{2}\left(\frac{M_{BA} - M_{FBA}}{(-K_{rel})}\right) \qquad \text{----------} \quad (5)$$

(4) − (5) $$\frac{3}{2}\theta_A = \frac{(M_{AB} - M_{FBA}) - \frac{1}{2}(M_{BA} - M_{FBA})}{(-K_{rel})}$$

ดังนั้น เมื่อใช้มุมสัมพันธ์ (θ_{rel}) ค่า $\frac{3}{2}$ หรือ 1.5 หน้า θ_A จะละไว้ก็ได้ สมการจะเป็น

$$(\theta_A)_{rel} = \frac{(M_{AB} - M_{FAB}) - \frac{1}{2}(M_{BA} - M_{FBA})}{(-K_{rel})} \qquad \text{----------} \quad (6)$$

หรือจะเขียนบรรยายได้

$$\theta_{\text{near end}} = \frac{(\text{Change})\text{near end} - \frac{1}{2}(\text{Change})\text{ far end}}{(-K_{rel})} \qquad \text{---------} \quad (7)$$

(3) สรุปลำดับการใช้ Moment Distribution Method มีดังนี้

(ก) หา Relative stiffness $K_{rel} = \frac{I}{L} \times$ ค.ร.น.

(ข) หา Fixed end moment (FEM) เนื่องจากน้ำหนักกระทำ

(ค) หา Distribution Factor DF. $= \frac{K}{\Sigma K}$

DF.สำหรับปลายยึดแน่น = 0 และปลายยึดหมุนได้ DF. = 1

(ง) Distributed cycles การคำนวณหลายวงจรผลจะถูกต้องกว่า

ลิขสิทธิ์ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
พิมพ์อนุมัติ 11-09-2566

(จ) Final Moment คือผลรวมของแต่ละช่องตามเครื่องหมายเมื่อกระจายโมเมนต์พอแล้ว ผลรวมของโมเมนต์แต่ละข้อต่อเท่ากับศูนย์ หมายความว่าโมเมนต์ซ้ายเท่ากับโมเมนต์ขวา

(ฉ) การตรวจสอบผลการคำนวณแต่ละครั้งโดยลำดับดังนี้

(a) change = Final moment - FEM

(b) $(-\frac{1}{2}$ change) = กระจายไปอีกปลายหนึ่ง

(c) Sum = (a) + (b)

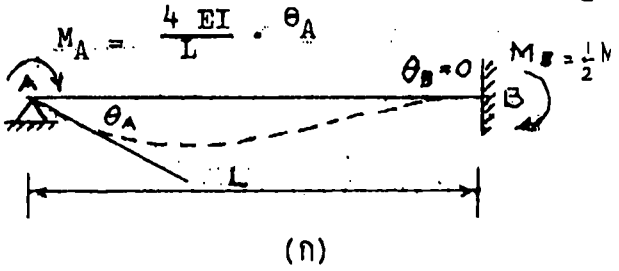
(d) $\theta_{rel} = \frac{Sum}{K_{rel}}$ มุมที่ข้อต่อเดียวกันต้องเท่ากัน

(4) Stiffness Factor ที่ปลายใกล้ของชิ้นส่วน เมื่อปลายไกลยึดหมุนได้

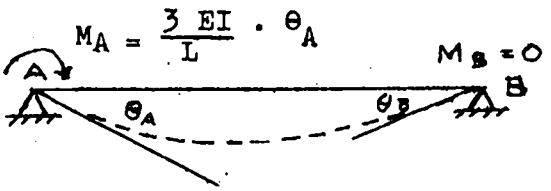
Stiffness factor แสดงถึงขนาดของโมเมนต์ที่จะทำให้ข้อต่อหมุนไป 1 เรเดียน เมื่อปลายข้างหนึ่งยึดแน่น สำหรับชิ้นส่วนที่มีขนาดเท่ากันตลอด (EI คงที่) Stiffness factor = $\frac{4EI}{L}$

แต่ถ้าปลายไกลยึดหมุนได้ การที่จะทำให้ปลายใกล้หมุนไป 1 เรเดียน ต้องใช้โมเมนต์ $\frac{3EI}{L}$ ซึ่งค่าเหล่านี้หาได้โดยวิธี moment area หรือวิธี conjugate beam ดังรูปที่ 4.13

ดังนั้น Stiffness factor เมื่อปลายข้างหนึ่งหมุนได้จะมีค่า $\frac{3}{4}$ เท่าของชิ้นส่วนที่มีปลายยึดแน่น ซึ่งหมายความว่าชิ้นส่วนที่มีปลายหมุนได้จะแข็งเป็น $\frac{3}{4}$ เท่าของชิ้นส่วน ที่มีปลายยึดแน่น



(ก)

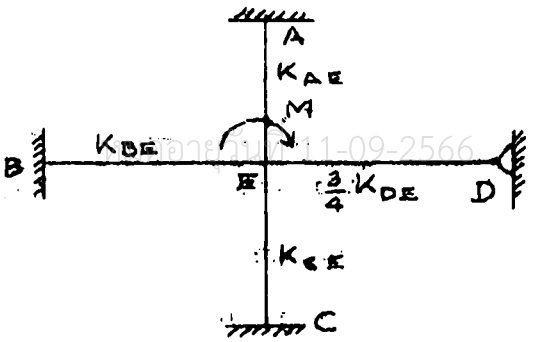


(ข)

รูปที่ 4.13

ตัวอย่างโครงข้อแข็ง

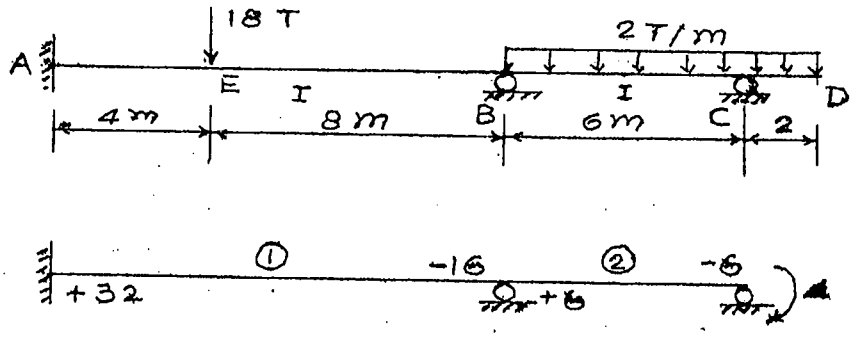
รูปที่ 4.14 มีข้อต่อรวม E เกิด Unbalanced moment M ที่ข้อต่อ E การแบ่งโมเมนต์ที่ E ไปตามชิ้นส่วน EA , EB , EC และ ED จะเป็นไปตาม Stiffness factor คือชิ้นส่วนใดแข็งจะรับโมเมนต์ไปมากกว่า



รูปที่ 4.14

เมื่อใช้ $\frac{3}{4}$ K_{DE} แล้ว ที่ D จะถือเสมือนหนึ่งยึดแน่นและโมเมนต์ที่ D จะเป็นศูนย์เลย ที่เดียว ตัวเลขการคำนวณจะน้อยลงไป ป้องกันความผิดพลาดได้ง่าย จังนั้นในช่องปลายยึดหมุนได้จะไม่ต้องคำนวนเลย แต่ถ้าใช้ K เท่ากับชิ้นส่วนปลายยึดแน่นแล้ว เนื่องจาก Distribution factor D.F. = $\frac{K}{\Sigma K}$ = 1 ดังนั้น balanced moment จะต้องกระจายกลับไป เพื่อปลายยึดหมุนจะได้สมดุลย์ในวงจรแรก ค่า $\frac{3}{4}$ K เรียกว่า Modified Sitiffness factor การเปรียบเทียบวิธีคำนวณจะได้แสดงต่อไป

ตัวอย่าง (1) ให้วิเคราะห์แรงในคานซึ่งมีแรงกระทำดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15

วิธีทำ

Relative stiffness K

$$K_{AB} = \frac{I}{12} \times 12 = 1$$

$$K_{BC} = \frac{I}{6} \times 12 = 2$$

Fixed end moments FEM

$$M_{FAB} = + 18 \times \frac{4 \times 8^2}{12^2} = 32 \text{ T - M}$$

$$M_{FBA} = - 18 \times \frac{8 \times 4^2}{12^2} = -16 \text{ T - M}$$

$$M_{FBC} = + \frac{2 \times 6^2}{12} = + 6 \text{ T - M} = - M_{FCB}$$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

1. ตารางการกระจายโมเมนต์

ข้อต่อ		A	B		C	
ชิ้นส่วน		AB	BA	BC	CB	CD
K		1	1	2	2	
cycle	DF	0	0.333	0.667	1.0	
1	FEM	+ 32	- 16	+ 6	- 6	+4
	Bal.	0	+ 3.333	+ 6.667	+ 2	
2	CO	+ 1.667	0	+ 1.000	+ 3.333	
	Bal	0	- 0.333	- 0.667	- 3.333	
3	CO	- 0.167	0	- 1.667	- 0.333	
	Bal	0	+ 0.555	+ 1.112	+ 0.333	
4	CO	+ 0.278	0	+ 0.167	+ 0.556	
	Bal	0	- 0.056	- 0.111	- 0.556	
5	CO	- 0.028	0	- 0.278	- 0.055	
	Bal	0	+ 0.093	+ 0.185	+ 0.056	
6	CO	+ 0.047	0	+ 0.028	+ 0.092	
	Bal	0	- 0.009	- 0.019	- 0.092	
7	CO	- 0.005	0	- 0.046	- 0.009	
	Bal	0	+ 0.015	+ 0.031	+ 0.009	
Final moment		+33.792	-12.402	+12.402	- 4.00	+ 4.00
Check						
Change		+ 1.792	+ 3.598	+ 6.402	+ 2.000	
$-\frac{1}{2}$ change		- 1.799	- 0.896	- 1.000	- 3.201	
Sum		0.007	+ 2.702	+ 5.402	- 1.201	
$\theta_{rel} = \frac{Sum}{-K_{rel}}$		-0.007	- 2.702	- 2.701	+ 0.600	
		Check	- (Check)			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

2. ตารางกระจายโมเมนต์โดยใช้ Modified K

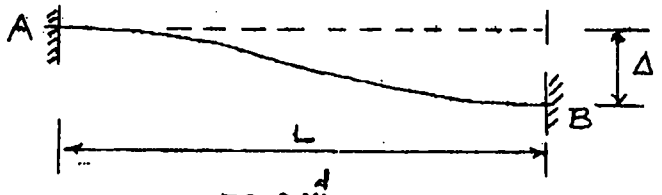
ข้อต่อ		A	B		C	
ชิ้นส่วน		AB	BA	BC	CB	CD
K		1	1	2	2	-
Modified K		1	1	1.5	1.5	-
Cycle	DF	-	0.4	0.6	-	-
1	FEM	+ 32	- 16	+ 6	- 6	+ 4
	Bal	0	+ 4	+ 6	+ 2	
2	CO	+ 2	0	+ 1	↑	
	Bal	0	- 0.4	- 0.6		
3	CO	- 0.2	-	-		
	Bal	0	-	-	↓	
Final moment		+ 33.8	-12.4	+12.4	- 4	+ 4
check						
change		+ 1.80	+ 3.60	+ 6.40	+ 2	
$-\frac{1}{2}$ change		- 1.80	- 0.90	- 1.00	- 3.20	
Sum		0	+ 2.70	+ 5.40	- 1.20	
$\theta_{rel} = \frac{sum}{(-K)}$		0	- 2.70	- 2.70	+ 0.60	
		(check)	(check)			

จะเห็นว่าการใช้ Modified K ในการคำนวณตารางที่ 2 ได้ผลแม่นยำกว่า คือถูกต้องตามตัวอย่าง (1) หน้า 71 วิธี slope deflection ในตารางที่ 1 แม้จะคำนวณถึง 7 วงจร แล้วผลยังคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

ภาพแรงเฉือนโมเมนต์ดัดและการเปลี่ยนรูปแสดงในรูปที่ 4.6 หน้า 71

(5) การวิเคราะห์คานกรณีที่ฐานรองรับทรุด

เมื่อฐานรองรับคานทรุดตัวไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดโมเมนต์ในชิ้นส่วนขึ้น ดังกล่าวแล้วในเรื่อง slope deflection method การหา FEM เนื่องจากฐานรองรับทรุดแสดงในรูปที่ 4.16



EI คงที่

$$R = \frac{\Delta}{L}$$

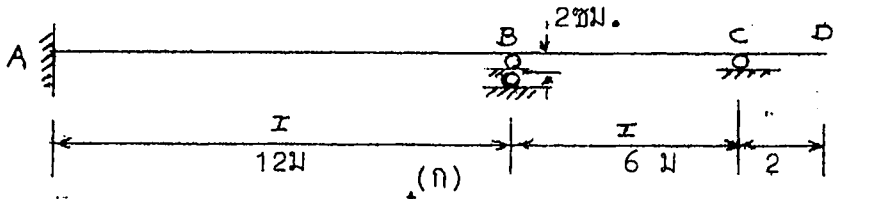
รูปที่ 4.16

$$M_{FAB} = M_{FBA} = + \frac{6EI\Delta}{L^2} = + \frac{6EIR}{L}$$

เมื่อเกิด FEM ที่ข้อต่อของแต่ละชิ้นส่วนต่างกัน เพราะมี Stiffness ไม่เท่ากัน จะทำให้เกิด Unbalanced moment ขึ้น ที่ข้อต่อต้องมี Balanced moment ต้านไว้เพื่อให้เกิดสมดุลย์ในข้อต่อ ส่วนขนาดของ Balanced moment แต่ละชิ้นส่วนนั้นขึ้นอยู่กับ Stiffness การแจกและกระจายโมเมนต์เป็นไปตามวงจรของ Moment distribution method ดังกล่าวแล้ว

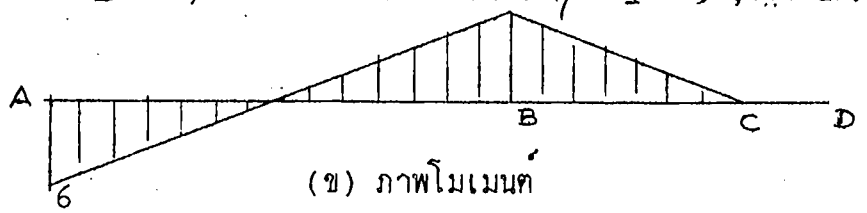
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง (2) วิเคราะห์คานเมื่อมีฐานรองรับ ทุกตัวไป 2 ซม. รูปที่ 4.17 (ก)

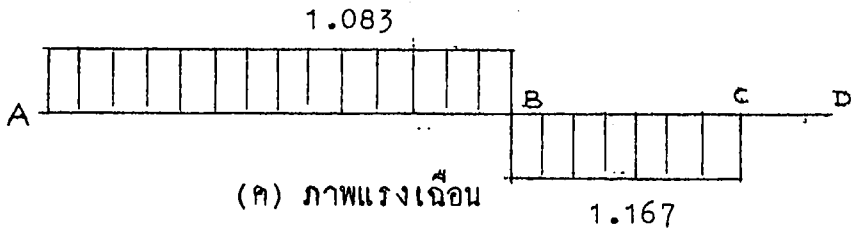


(ก)

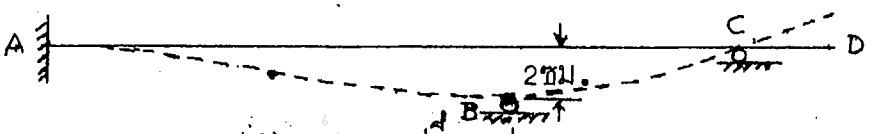
E = 2,000.000 กก.ตอตร.ซม. I = 30,000 ซม.^{4}



(ข) ภาพโมเมนต์



(ค) ภาพแรงเฉือน



(ง)ภาพการเปลี่ยนรูป

รูปที่ 4.17

วิธีทำ

Relative Stiffness K

$K_{AB} = 1 \qquad K_{BC} = 2$

Fixed end moment FEM

$$M_{FAB} = M_{FBA} = + \frac{6EIR}{L} = + \frac{6x2x10^6x3x10^4}{1200} \times \frac{2}{1200} \quad KG - CM$$

$$= \frac{+6x2x10^6x3x2}{12x12x10^5} \quad T - M$$

$$= + 5 \quad T - M$$

$$M_{FBC} = M_{FCB} = \frac{-6x2x10^6x3x10^4}{600} \times \frac{2}{600} \times \frac{1}{10^5}$$

$$= - 20 \quad T - M$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตารางกระจายโมเมนต์ใช้ Modified K

ข้อต่อ		A	B		C	
ชิ้นส่วน		AB	BA	BC	CB	CD
K		1	1	2	2	-
Modified K		1	1	1.5	1.5	-
Cycle	DF	-	0.4	0.6	-	-
1	FEM	+ 5	+ 5	- 20	- 20	
	Bal	0	+ 6	+ 9	+ 20	
2	CO	+ 3	-	+ 10	↑	
	Bal	0	- 4	- 6		
3	CO	- 2	-	-	↓	
	Bal	0	-	-		
Final moment		+ 6	+ 7	- 7	0	
check						
change		+ 1	+ 2	+13	+ 20	
$-\frac{1}{2}$ change		- 1	- 0.5	-10	- 6.5	
Sum		0	+ 1.5	+ 3	+13.5	
$\theta_{rel} = \frac{Sum}{-K}$		0	- 1.5	- 1.5	- 6.75	
		(check)	(check)			

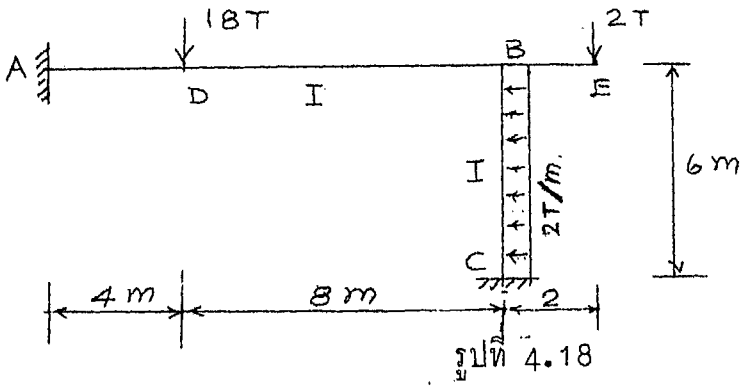
ภาพโมเมนต์คัด ภาพแรงเฉือนและการเปลี่ยนรูปแสดงในรูปที่ 4.17 (ข) (ค) และ (ง)

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(6) การวิเคราะห์โครงข้อแข็งที่ข้อต่อไม่เคลื่อนที่

โครงข้อแข็งที่ข้อต่อไม่เคลื่อนที่ (without joint movement or no sidesway) ดำเนินการเช่นเดียวกับเรื่องคาน การใช้ตารางสำหรับการคำนวณจะเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด ควรระวังในเรื่องกระจายหรือตอน Carry Over จากปลายหนึ่งของชิ้นส่วนไปยังอีกปลายหนึ่งของชิ้นส่วนเดียวกัน เพราะชิ้นส่วนมีมากอาจสับสนผิดได้ง่าย

ตัวอย่าง (3) ให้วิเคราะห์แรงในโครงสร้างข้อแข็ง ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18

วิธีทำ ค่า k และ FEM เหมือนในรูปที่ 4.7 หน้า 75

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตารางการกระจายโมเมนต์

ข้อต่อ		A	B			C
ชิ้นส่วน		AB	BA	BE	BC	CB
K		1	1	-	2	2
cycle	DF	0	0.333	-	0.667	0
1	FEM	+ 32	- 16	+ 4	+ 6	- 6
	Bal	0	+ 2		+ 4	0
2	CO	+ 1	-		-	+ 2
	Bal	0	-		-	0
Final moment		+ 33	- 14	+ 4	+ 10	- 4
check						
change		+ 1	+ 2	-	+ 4	+ 2
$-\frac{1}{2}$ change		- 1	- 0.5	-	- 1	- 2
Sum		0	+ 1.5	-	+ 3	0
$\theta_{rel} = \frac{Sum}{-K}$		0	- 1.5	-	- 1.5	0
		(check)	(check)			(check)

ภาพโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการเปลี่ยนรูป ดูรูปที่ 4.7 หน้า 75 เป็นการทดสอบอีกวิธีหนึ่ง

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

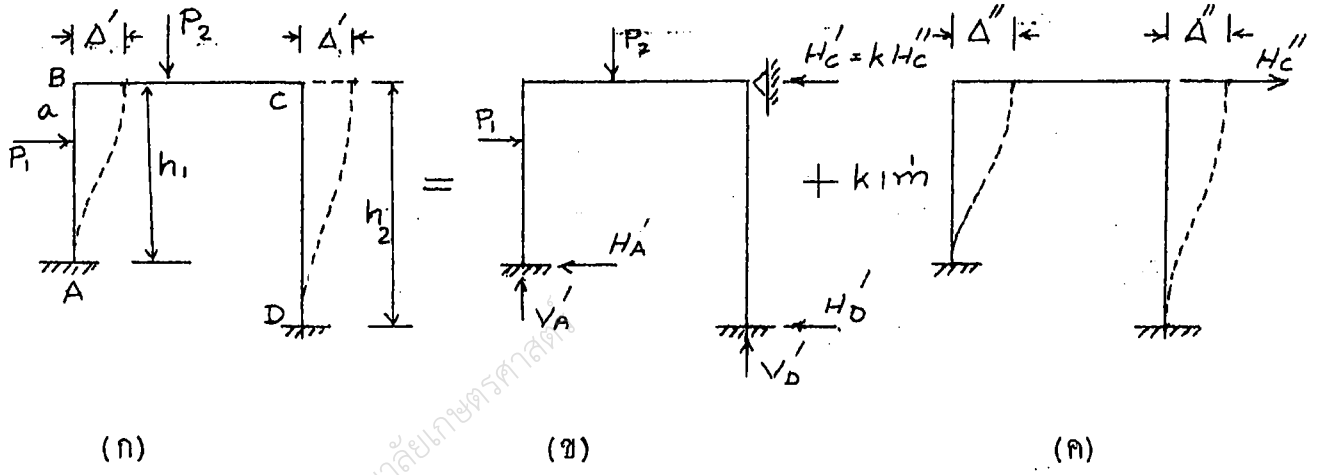
(7) การวิเคราะห์โครงข้อแข็งที่ข้อต่อมีการเคลื่อนที่

โครงข้อแข็งที่มีข้อต่อเคลื่อนที่ (with joint movement or sidesway) จะต้องมี shear condition มาเกี่ยวเช่นเดียวกับในวิธี slope deflection ทำดังนี้คือ

(ก) คำนวณการแจกและกระจายโมเมนต์ เมื่อโครงมีน้ำหนักบรรทุก แต่ตรึงไม่มีการเคลื่อนที่ได้ ตาราง I

(ข) คำนวณการแจกและกระจายโมเมนต์ เมื่อโครงมีข้อต่อเคลื่อนที่โดยไม่มีน้ำหนัก ได้ตาราง II

(ค) ผลรวมของตาราง I กับสัดส่วนของตาราง II อันเนื่องจาก shear condition จะได้เป็น Total balanced moment ที่เกิดในโครงนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19

รูป (ก) คือโครงข้อแข็งมีน้ำหนักกระทำเกิด M_{AB} , M_{BA} , -------- M_{DC}

รูป (ข) คือโครง (ก) ถูกตรึงไม่ให้เคลื่อนที่เกิด M'_{AB} , M'_{BA} ------ M'_{DC}

รูป (ค) คือโครง (ก) ไม่มีน้ำหนัก แต่เคลื่อนที่เกิด M''_{BA} , M''_{BA} --- M''_{DC}

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 11-09-2566

รูปที่ 4.19 (ค) นั้นเป็นการสมมติว่าโครงเกิดเคลื่อน Δ'' ซึ่งต่างจากที่เกิดจริง คือ Δ' ดังนั้นแรง H'_c ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมมติว่ามีฐานรับ c ยันไว้ไม่ให้เคลื่อนที่จะเท่ากับแรง H''_c คูณด้วย k ซึ่ง k เป็นสัดส่วนที่ยังไม่รู้ค่า ซึ่งได้

$$H'_c = k H''_c \quad \text{และ} \quad \Delta' = k\Delta''$$

shear condition ของรูปที่ 4.19 (ก) คือ

$$H_A + H_D = P_1$$

แต่ $H_A = \dfrac{M_{AB} + M_{BA}}{h_1} + \dfrac{P_1 a}{h_1}$ $\qquad H_D = \dfrac{M_{CD} + M_{DC}}{h_2}$

shear condition จะเป็น

$$\frac{M_{AB} + M_{BA}}{h_1} + \frac{P_1 a}{h_1} + \frac{M_{CD} + M_{DC}}{h_2} = P_1 \qquad \text{----------} \qquad (8)$$

โดยการวางซ้อนกันได้

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= M'_{AB} + k(M''_{AB}) & M_{BA} &= M'_{BA} + k(M''_{BA}) \\ M_{BC} &= M'_{BC} + k(M''_{BC}) & M_{CB} &= M'_{CB} + k(M''_{CB}) \\ M_{CD} &= M'_{CD} + k(M''_{CD}) & M_{DC} &= M'_{DC} + k(M''_{DC}) \end{aligned}\right\} \qquad \text{--------} \qquad (9)$$

แทนค่าสมการ (9) ในสมการ (8) ได้

$$\frac{M'_{AB} + M'_{BA} + k(M''_{AB} + M''_{BA})}{h_1} + \frac{P_1 a}{h_1} + \frac{(M'_{CD} + M'_{DC}) + k(M''_{CD} + M''_{DC})}{h_2} = P_1 \qquad \text{----------} \qquad (10)$$

ค่าของ k ได้จากการแก้สมการ (10) เมื่อได้ค่า k แล้ว ค่า End moments ของข้อต่อต่าง ๆ จะได้จากสมการ (9)

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ห้ามดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงที่มา

ในกรณีที่โครงเกิดการเคลื่อนที่มี Unknown movement หลายค่า ได้แก่โครงหลายชั้น เช่นมี Δ_1, Δ_2 ---- สามารถใช้ moment distribution method คำนวณได้ดังนี้

(ก) ตาราง I คำนวณโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักกระทำและกันไม่ให้เคลื่อนที่ได้ M'_{AB} , M'_{BA} , M'_{BC} ---------

(ข) ตาราง II คำนวณโมเมนต์เนื่องจากข้อต่อเคลื่อน Δ_1 เท่านั้น ได้ M''_{AB} , M''_{BA} , M''_{BC} --------

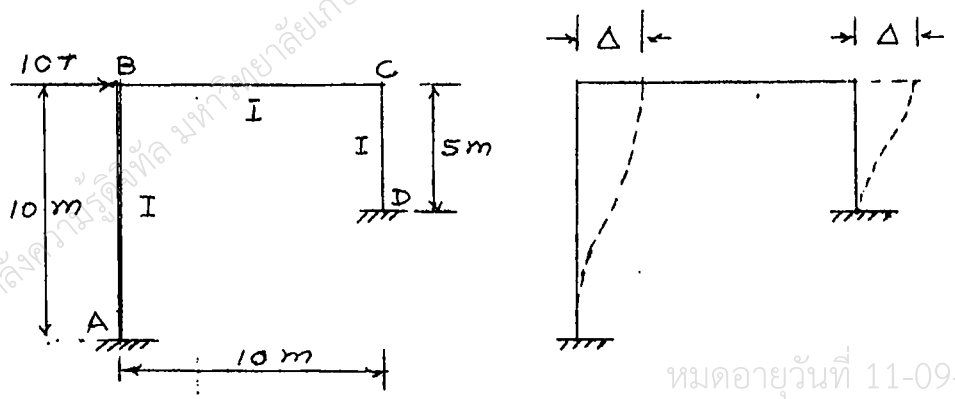
(ค) ตาราง III คำนวณโมเมนต์เนื่องจากข้อต่อยื่นเคลื่อนที่ Δ_2 เท่านั้น ได้ M'''_{AB} , M'''_{BA} , M'''_{BC} --------

โดยการวางซ้อนจะได้

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= M'_{AB} + k_1(M''_{AB}) + k_2(M'''_{AB}) \\ M_{AB} &= M'_{BA} + k_1(M''_{BA}) + k_2(M'''_{BA}) \end{aligned}\right\} \quad \text{---------- (11)}$$

จาก shear conditions ซึ่งในที่นี้มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัวคือ k_1 และ k_2 ซึ่งได้จาก 2 shear conditions เช่นเดียวกับสมการ (10) ถอดสมการหาค่า k_1 และ k_2 แทนในสมการ (11) ได้โมเมนต์ที่ต้องการ

ตัวอย่าง (4) ให้วิเคราะห์โครงข้อแข็งซึ่งมีแรงกระทำดังรูปที่ 4.20 (ก)



(ก) (ข)

รูปที่ 4.20

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ

Relative stiffness K $K_{AB} : K_{BC} : K_{CD} = 1 : 1 : 2$

FEM due to the applied loading = 0 for all members

FEM due to sidesrvay

$$M_{FAB} = M_{FBA} = +\frac{6EI\Delta}{(10)^2} = \frac{6}{100} \times 100 = +6$$

$$M_{FCD} = M_{FBC} = +\frac{6EI\Delta}{(5)^2} = \frac{6}{25} \times 100 = +24$$

ตาราง I โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกไม่มี

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตาราง II โมเมนต์เนื่องจากข้อต่อเคลื่อนที่

Joint		A	B		C		D
Member		AB	BA	BC	CB	CD	DC
K		1	1	1	1	2	2
Cycle	DF	0	0.5	0.5	0.333	0.667	0
1	FEM	+ 6	+6	0	0	+ 24	+ 24
	Bal	0	-3	- 3	- 8	- 16	0
2	CO	- 1.5		- 4	- 1.5	-	- 8
	Bal	-	+2	+ 2	+ 0.5	+ 1.0	-
3	CO	+ 1.0		+ 0.25	+ 1.0	-	+ 0.5
	Bal	-	+0.125	- 0.125	- 0.333	- 0.667	-
4	CO	- 0.063	-	- 0.160	- 0.063	-	- 0.333
	Bal	-	+0.083	+ 0.083	+ 0.021	+ 0.042	-
5	CO	+ 0.042	-	+ 0.010	+ 0.042	-	+ 0.021
	Bal	-	-0.005	- 0.005	- 0.014	- 0.028	-
6	CO	- 0.002	-	- 0.007	- 0.003	-	- 0.014
	Bal	-	+0.003	+ 0.004	+ 0.001	+ 0.002	-
Final	M	+ 5.447	+4.956	- 4.956	- 8.349	+ 8.349	+16.174
Check							
	change	- 0.523	-1.044	- 4.956	- 8.349	-15.651	- 7.826
$-\frac{1}{2}$	change	+ 0.522	+0.262	+ 4.175	+ 2.478	+ 3.913	+ 7.826
	Sum	0	-0.782	- 0.781	- 5.871	-11.738	- 0
$\theta_{rel} = \frac{Sum}{-K}$		0	+0.782	+ 0.781	+ 5.871	+ 5.869	- 0
		Check	Check		Check		Check

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

พิจารณา สัดส่วนของโมเมนต์โดยสภาพแรงเฉือน

$$H_A + H_D = 10$$

$$\frac{M_{AB} + M_{BA}}{10} + \frac{M_{CD} + M_{DC}}{5} = 10$$

$$M_{AB} + M_{BA} + 2(M_{CD} + M_{DC}) = 100$$

แทนค่า $M_{AB} = 0 + k(+ 5.477)$

$M_{BA} = 0 + k(+ 4.956)$

$M_{CD} = 0 + k(+ 8.349)$

$M_{DC} = 0 + k(+16.174)$

ในสมการข้างต้น แล้วถอดหาค่า k

$$k\ (+ 10.433) + 2k(+ 24.523) = 100$$

$$k(59.479) = 100$$

$$k = +1.681266$$

ดังนั้น Final Moment ต่าง ๆ คือ

M_{AB}	$= k(+ 5.477)$	$= + 9.209$	T - M
M_{BA}	$= k(+ 4.956)$	$= + 8.333$	T - M
M_{BC}	$= k(- 4.956)$	$= - 8.333$	T - M
M_{CB}	$= k(- 8.349)$	$= -14.036$	T - M
M_{CD}	$= k(+ 8.349)$	$= +14.036$	T - M
M_{DC}	$= k(+16.174)$	$= +27.193$	T - M

ผลการคำนวณถูกต้องตามการคำนวณในวิธี slope defletion ของตัวอย่าง (3) หน้า 78 ภาพแรงเฉือนโมเมนต์และการเปลี่ยนรูป เขียนได้เช่นเดียวกับตัวอย่างดังกล่าวแล้ว

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(8) Gable Frames

ในบางกรณีอาคารอาจจะต้องการบริเวณกว้างปราศจากเสา เช่นโรงงานหรือโรงฝึกงาน เป็นต้น จำเป็นต้องทำโครงสร้างเป็นรูปจั่ว เพื่อความแข็งแรงของอาคารในการรับหลังคา สามารถจะทำในรูปโครงเดี่ยวหรือโครงแฝดที่มีเสากลางร่วมกันก็ได้ โดยมีรางน้ำฝนอยู่ในแนวเสากลาง การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักของเรขาคณิตประกอบในการคำนวณความสัมพันธ์ข้อต่อเคลื่อนที่ และเป็นการอธิบายสำหรับการใช้สมการที่ (11) หน้า 95

ตัวอย่าง (5) ให้คำนวณโครงข้อแข็ง Gable Frame โรงงานแห่งหนึ่งช่วงเสา 10 เมตร ระยะระหว่างเสา 4 เมตร สมมติชิ้นส่วนโครงคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 x 40 ซม. หลังคามุงด้วยกระเบื้องลอนคู่ มีฝ้าเพดาน อาคารนี้อยู่กลางทุ่งนามีแรงลมกระทำด้วย

ในที่นี้เพื่อสะดวกในการคำนวณและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำจึงให้แรงกระทำเป็น 100 กก/ม. โดยแยกเป็น

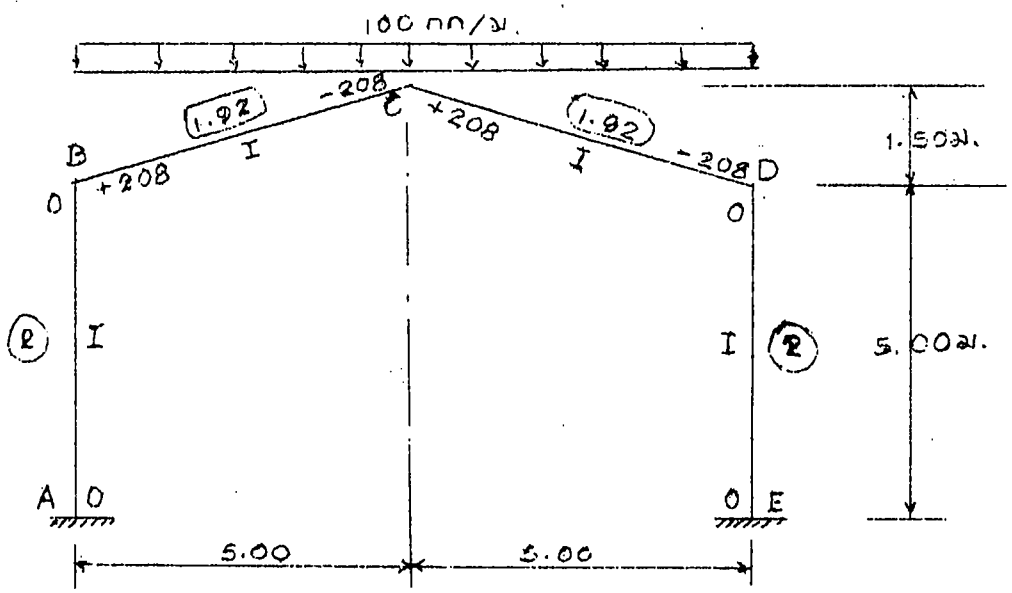
ก. เนื่องจากน้ำหนักอาคาร

ข. เนื่องจากแรงลม

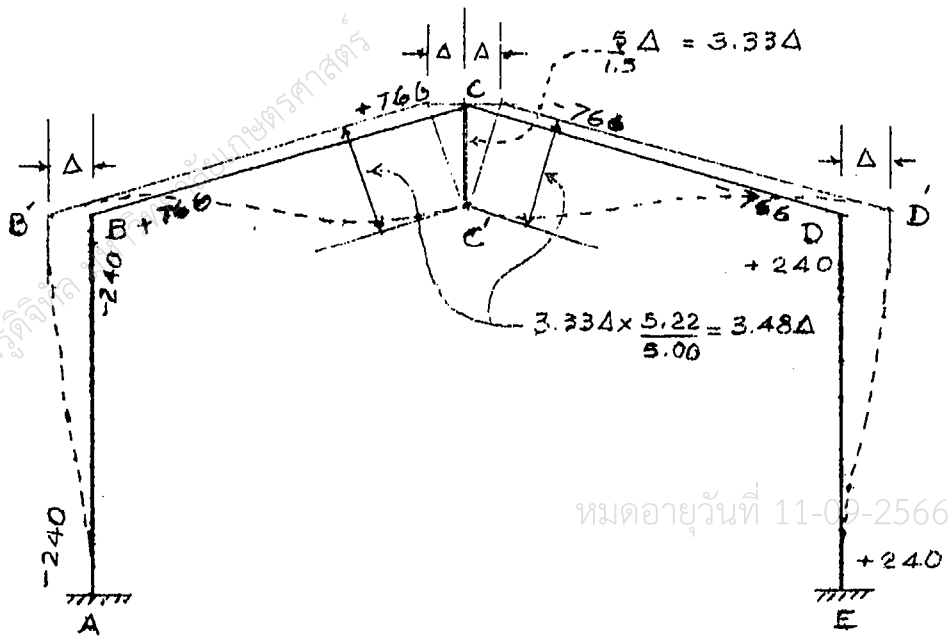
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ก. เนื่องจากน้ำหนักอาคาร



(ก) Relative Stiffness and FEM



(ข) FEM due to sidesway

รูปที่ 4.21

คลังความรู้ดิจิทัล สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

Relative stiffness

AB, DE $= \frac{I}{5} = 0.2I = 2.0$

BC, CD $= \frac{I}{5.22} = 0.192I = 1.92$

Fixed-end moments due to applied load

$M_{FBC} = M_{FCD} = + \frac{100}{12} \times 5^2 = + 208$ kg - m.

$M_{FCB} = M_{FDC} = - 208$ kg - m.

Fixed-end moments due to sidesway

$M_{FAB} = M_{FBA} = - \frac{6E(I)}{(5)^2} (\Delta) = - 0.24 = -240$

$M_{FBC} = M_{FCB} = + \frac{6E(I)}{(5.22)^2} (3.48\Delta) = + 0.766 = +766$

$M_{FCD} = M_{FDC} = - \frac{6E(I)}{(5.22)^2} (3.48\Delta) = - 0.766 = -766$

$M_{FDE} = M_{FED} = + \frac{6E(I)}{(5)^2} (\Delta) = + 0.24 = +240$

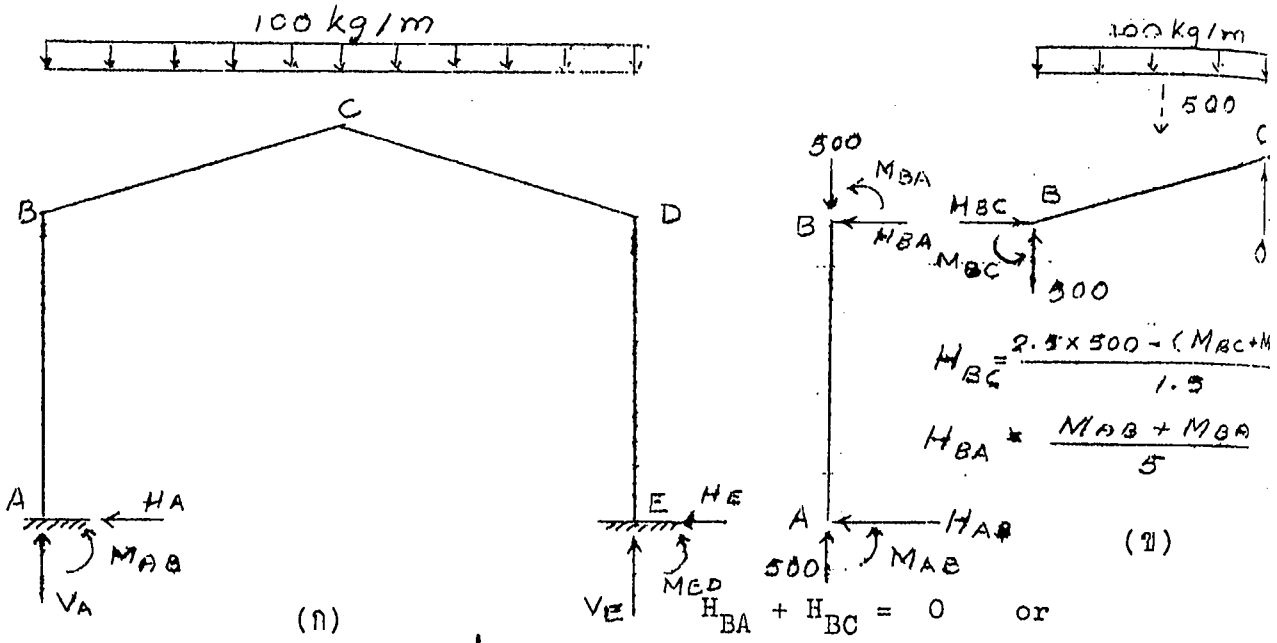
Distribution of FEM due to Applied Loading (Table 1)

Joint		A	B		C		D		E
Member		AB	BA	BC	CB	CD	DC	DE	ED
K		2	2	1.92	1.92	1.92	1.92	2	2
Cycle	DF	-	0.51	0.49	0.50	0.50	0.49	0.51	-
1	FEM	-	-	+208	-208	+208	-208	-	-
	Bal		-106	-102	-	-	+102	+106	-
2	CO	-53.0	-	-	-51.0	+51.0	--	-	+53.0
	Bal	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		-53.0	-106.0	+106.0	-259.0	+259.0	-106.0	+106.0	+53.0

Distribution of FEM due to sidesway (Table 2)

1	FEM	-240	-240	+766	+766	-766	-766	+240	+240
	Bal	-	-268	-258	-	-	+258	+268	-
2	CO	-134	-	-	-129	+129	-	-	+134
	Bal	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		-374	-508	+508	+637	-637	-508	+508	+374

Determination of Ratio. The shear condition is



รูปที่ 4.22

$$H_{BA} + H_{BC} = 0 \quad \text{or}$$

$$\frac{M_{AB} + M_{BA}}{5} + \frac{1250-(M_{BC}+M_{CB})}{1.5} = 0$$

$$M_{AB} + M_{BA} - 3.33(M_{BC}+M_{CB}) = -4170$$

Substituting

$$M_{AB} = -53.0 - 374\ k$$

$$M_{BA} = -106.0 - 508\ k$$

$$M_{BC} = +106.0 + 508\ k$$

$$M_{CB} = -259.0 + 637\ k$$

into the above equation and solving for the ratio k,

$$(-159 - 882k) - 3.33(-153 + 1145\ k) = -4170$$

$$-159 - 882k + 510 - 3820\ k = -4170$$

$$-4702\ k = -4521$$

$$k = +0.96$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สืบค้นเมื่อวันที่ 11-09-2566

Combination of the two sets of Balanced Moments

Joint	A	B		C		D		E
Member	AB	BA	BC	CB	CD	DC	DE	ED
FEM from Table 1	-	-	+208.0	-208.0	+208.0	-208.0	-	-
+0.96 FEM Table 2	-230.0	-230.0	+735.0	+735.0	-735.0	-735.0	+230.0	+230.0
Total FEM	-230	-230	+943	+527	-527	-943	+230	+230
Balanced M. Table 1	-53.0	-106.0	+106.0	-259.0	+259.0	-106.0	+106.0	+53.0
+0.96 Bal.M. Table 2	-358.0	-488.0	+488.0	+613.0	-613.0	-488.0	+488.0	+358.0
Total Balanced M.	-411	-594	+594	+354	+354	-594	+594	+411
heck								
Change	-181.0	-364	-349.0	-173.0	+173.0	+349.0	+364	+181
$-\frac{1}{2}$ (change)	+182.0	+ 90.5	+ 86.5	+174.5	-174.5	- 86.5	- 90.5	-182.0
Sum	+ 1	-253.5	-262.5	+ 1.5	- 1.5	+262.5	+253.5	- 1
θvel = Sum/K	0	+132.0	+132.0	0	0	-132.0	-132.0	0
	Check	Check		Check		Check		Check

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

$$H_B = H_C = \frac{500 \times 2.5 - (594+354)}{1.5}$$

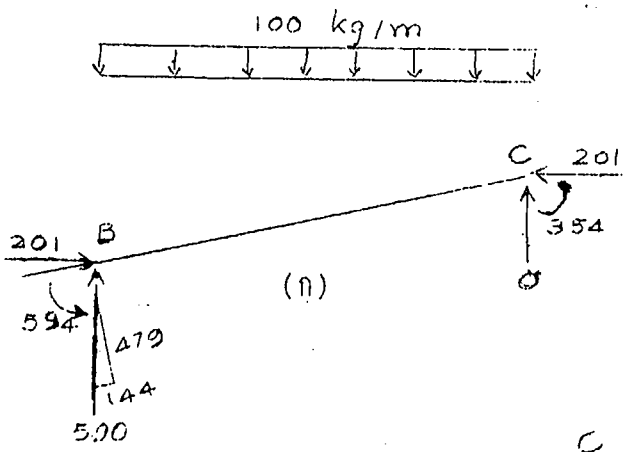
$$= \frac{1250-948}{1.5} = \frac{302}{1.5} = 201 \text{ kg.}$$

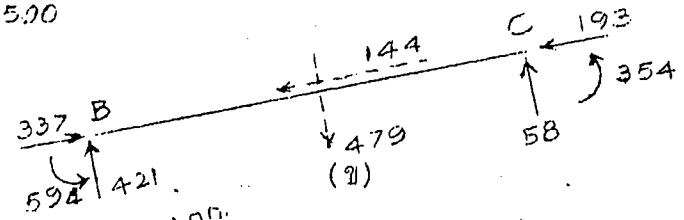
Max.Mat $= \frac{58}{479} \times 5.22 = 0.63$ m from C.

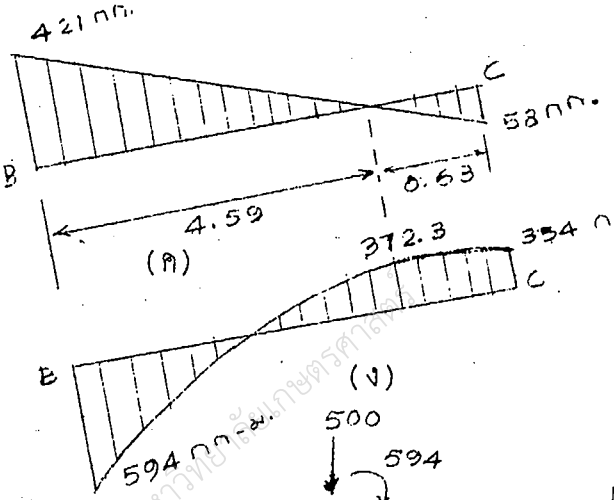
Max.M $= 354 + 58 \times .63 - 91.7 \times .\frac{63^2}{2}$

$= 354 + 36.5 - 18.2$

$= 372.3$ kg - m.





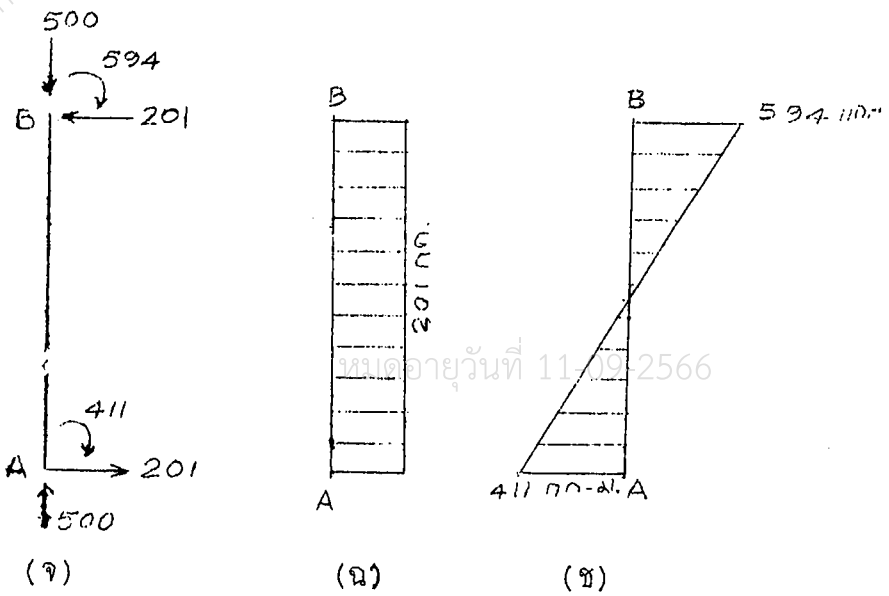


รูปที่ 4.23

(ก) (ข) (จ) รูปอิสระ

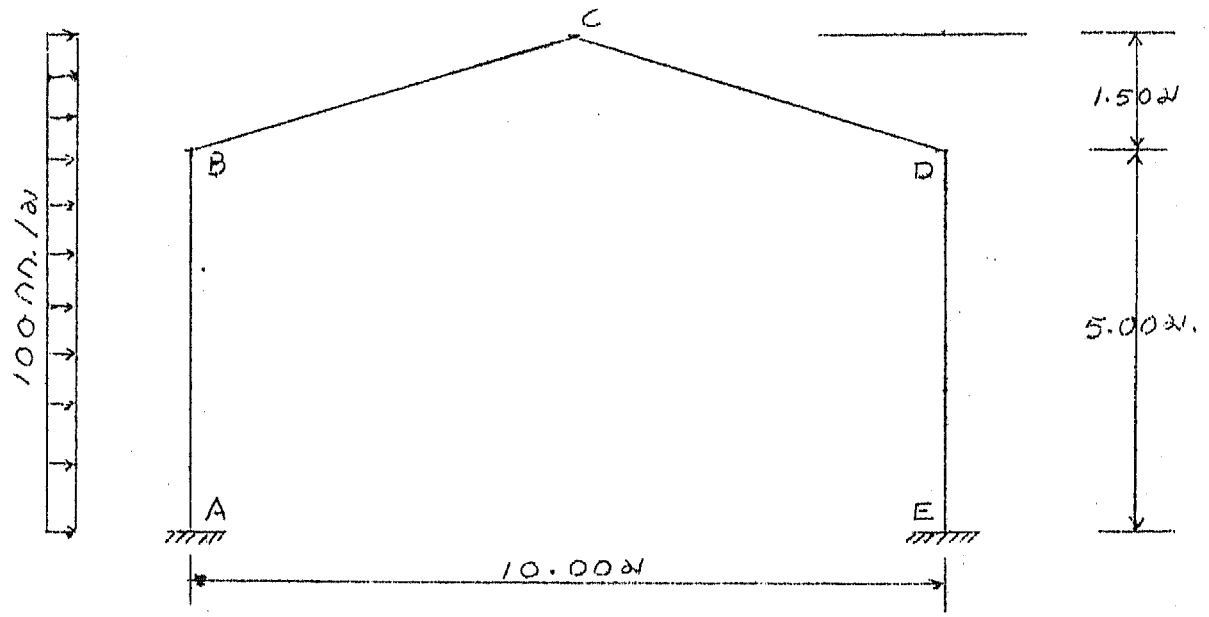
(ค) (ฉ) ภาพแรงเฉือน

(ง) (ช) ภาพโมเมนต์



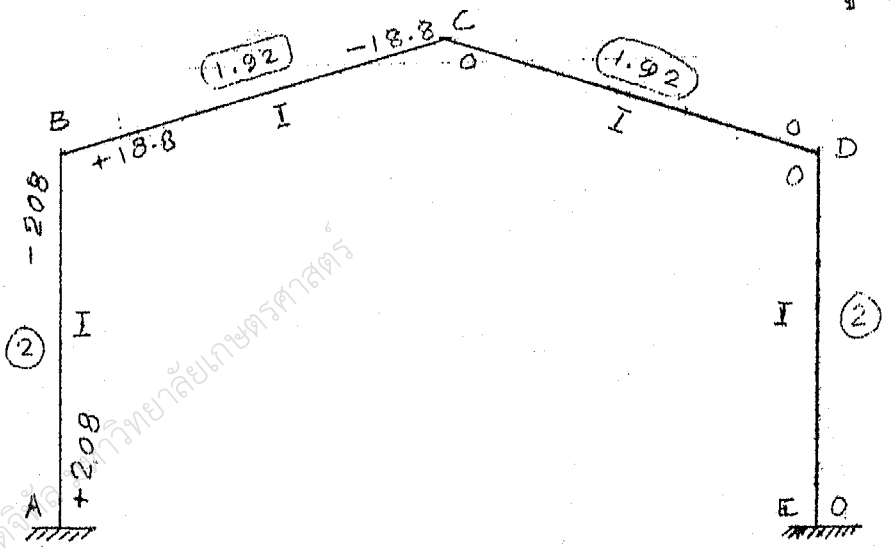
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11/09/2566

ข. เนื่องจากแรงลม



(ก) wind load condition

รูปที่ 4.24

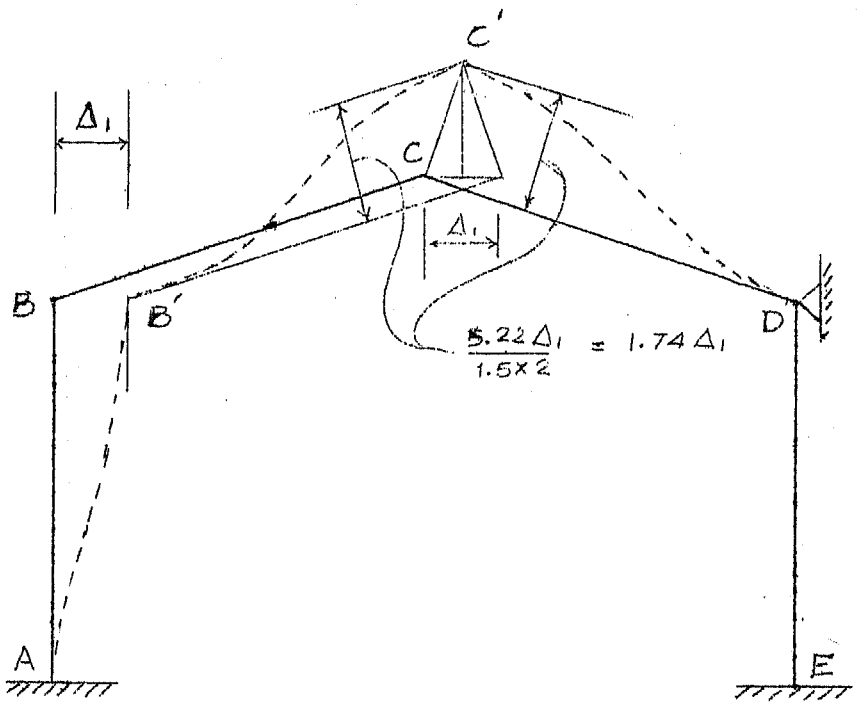


(ข) Relative Stiffness and fixed end moments

$$M_{FAB} = + \frac{100 \times 5^2}{12} = +208 \quad kg - m \qquad M_{FBA} = - 208 \quad kg - m$$

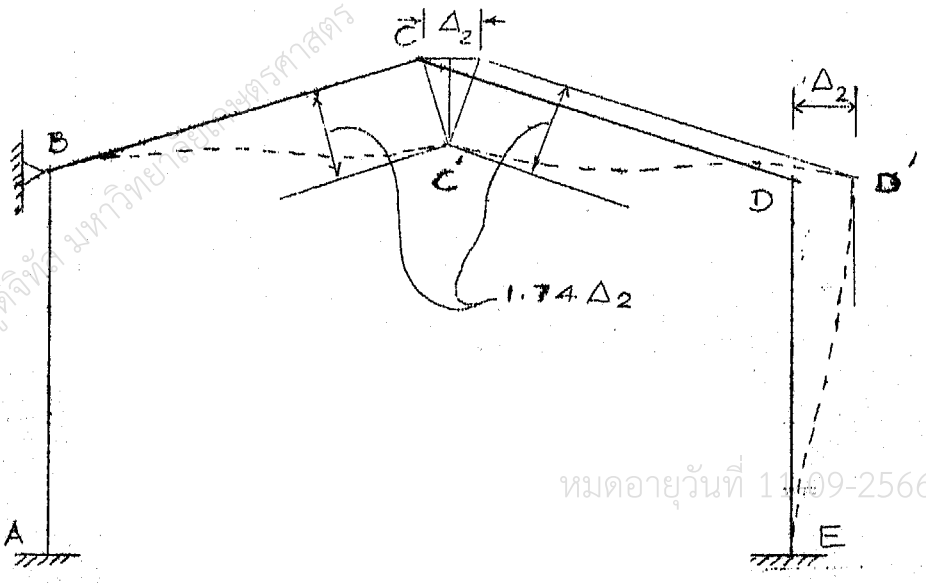
$$M_{FBC} = + \frac{100 \times 1.5^2}{12} = + 18.8 \quad " \qquad M_{FCB} = - 18.8 \quad "$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566



(ก) Fixed end moment due to sidesway at B

รูปที่ 4.25



(ข) Fixed end moment due to sidesway at D

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยศิลปากร
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

FEM due to sidesway at B.

$$M_{FAB} = M_{FBA} = + \frac{6E(I)}{(5)^2} (\Delta_1) = + 0.24$$

$$M_{FBC} = M_{FCB} = - \frac{6E(I)(1.74\Delta_1)}{(5.22)^2} = - 0.383 = - M_{FCD} = - M_{FDC}$$

$$M_{FDE} = M_{FED} = 0$$

FEM due to sidesway at D

$$M_{FAB} = M_{FBA} = 0$$

$$M_{FBC} = M_{FCB} = + \frac{6E(I)(1.74\Delta_2)}{(5.22)^2} = + 0.383$$

$$M_{FCD} = M_{FDC} = - \frac{6E(I)(1.74\Delta_2)}{(5.22)^2} = - 0.383$$

$$M_{FDE} = M_{FED} = + \frac{6E(I)(\Delta_2)}{5^2} = + 0.24$$

Table I Distribution of FEM due to applied loading

Joint		A	B		C		D		E
Member		AB	BA	BC	CB	CD	DC	DE	ED
K		2	2	1.92	1.92	1.92	1.92	2	2
Cycle	DF	-	0.51	0.49	0.50	0.50	0.49	0.51	-
1	FEM	+208	-208	+18.8	-18.8	-	-	-	-
	Bal	-	+96.6	+92.6	+ 9.4	+9.4	-	-	-
2	CO	+48.3	-	- 4.7	+46.3	-	+4.7	-	-
	Bal	-	-2.4	-2.3	-23.15	-23.15	-2.3	-2.4	-
3	CO	-1.20	-	-11.58	-1.15	-1.15	-11.58	-	-1.20
	Bal	-	+5.92	+5.66	+1.15	+1.15	+5.66	+5.92	-
4	CO	+2.96	-	+0.58	+2.83	+2.83	+0.58	-	+2.96
	Bal	-	-0.30	-0.28	-2.83	-2.83	-0.28	-0.30	-
5	CO	-0.15	-	-1.42	-0.14	-0.14	-1.42	-	-0.15
	Bal	-	+0.72	+0.70	+0.14	+0.14	+0.70	+0.72	-
6	CO	+0.36	-	+0.07	+0.35	+0.35	+0.07	-	+0.36
	Bal	-	-0.04	-0.03	-0.35	-0.35	-0.03	-0.04	-
Total		+258.27	-107.5	+107.5	+13.75	-13.75	-3.90	+3.90	+1.96

Table II Distribution of FEM. due to sidesway at D ------- k_1

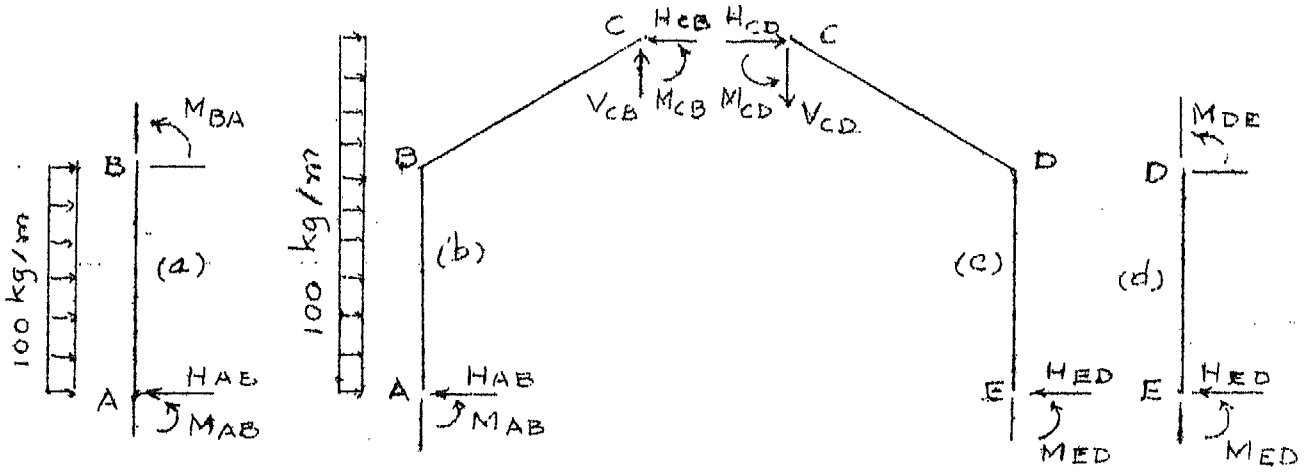
Joint		A	B		C		D		E
Member		AB	BA	BC	CB	CD	DC	DE	ED
K		2	2	1.92	1.92	1.92	1.92	2	2
Cycle	DF	0	0.51	0.49	0.50	0.50	0.49	0.51	0
1	FEM.	+240	+240	-383	-383	+383	+383	-	-
	Bal	-	+ 73	+ 70	-	-	-188	-195	-
2	CO	+36.50	-	-	+35.0	-94.0	-	-	-97.50
	Bal.	-	-	-	+29.50	+29.50	-	-	-
3	CO	-	-	+14.75	-	-	+14.75	-	-
	Bal.	-	-7.53	-7.22	-	-	- 7.22	-7.53	-
4	CO	-3.77	-	-	-3.61	-3.61	-	-	-3.77
	Bal.	-	-	-	+3.61	+3.61	-	-	-
5	CO	-	-	+1.81	-	-	+1.81	-	-
	Bal	-	-0.93	-0.88	-	-	-0.88	-0.93	-
6	CO	-0.47	-	-	-0.44	-0.44	-	-	-0.47
	Bal	-	-	-	+0.44	+0.44	-	-	-
Total		+272.26	+304.54	+304.54	-318.50	+318.50	+203.46	-203.46	-101.7

Table III Distribution of FEM. due to sidesway at D -------- k_2

1	FEM.	-	-	+383	+383	-383	-383	+240	+240
	Bal	-	-195	-188	-	-	+70	+73	-
2	CO	-97.50	-	-	-94.00	+35.00	-	-	+36.5
	Bal	-	-	-	+29.50	+29.50	-	-	-
3	CO	-	-	+14.75	-	-	+14.75	-	-
	Bal	-	-7.53	-7.22	-	-	- 7.22	-7.53	
4	CO	-3.77	-	-	-3.61	-3.61	-	-	-3.77
	Bal	-	-	-	+3.61	+3.61	-	-	-
5	CO	-	-	+1.81	-	-	+1.81	-	-
	Bal	-	-0.93	-0.88	-	-	-0.88	-0.93	-
6	CO	-0.47	-	-	-0.44	-0.44	-	-	-0.47
	Bal	-	-	-	+0.44	+0.44	-	-	-
Total		-101.74	-203.46	+203.46	+318.50	-318.50	-304.54	+304.54	+272.26

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เมื่อวันที่ 11-09-2566

Determination of Ratio. The shear conditions are shown as below



รูปที่ 4.26

Fig. (a) $\sum M_B = 0 : H_{AB} = \frac{100 \times 5}{2} + \frac{M_{AB} + M_{BA}}{5} = 250 + \frac{M_{AB} + M_{BA}}{5}$

Fig. (b) $\sum F_x = 0 : H_{CB} = 100 \times 6.5 - H_{AB} = 400 - \frac{M_{AB} + M_{BA}}{5}$

Fig. (d) $\sum M_D = 0 : H_{ED} = \frac{M_{DE} + M_{ED}}{5}$

Fig. (c) $\sum F_x = 0 : H_{CD} = H_{ED} = \frac{M_{DE} + M_{ED}}{5}$

$\therefore$

$\therefore \quad H_{CB} = H_{CD}$

$\therefore \quad 400 - \frac{M_{AB} + M_{BA}}{5} = \frac{M_{DE} + M_{ED}}{5}$

or $\quad M_{AB} = M_{BA} + M_{DE} + M_{DE} = 2000 \quad$ ---------- (1)

Fig. (b) $\sum M_A = 0$

$$V_{CB} = \frac{650 \times 3.25 - 6.5H_{CB} - (M_{AB} + M_{CB})}{5}$$

$$= \frac{2110 - 2600 + 1.3(M_{AB} + M_{BA}) - (M_{AB} + M_{CB})}{5}$$

$$= \frac{0.3M_{AB} + 1.3M_{BA} - M_{CB} - 490}{5}$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

Fig. (c) $\sum M_E = 0$

$$V_{CD} = \frac{6.5H_{CD} - (M_{CD} + M_{ED})}{5}$$

$$= \frac{1.3M_{DE} + 1.3M_{ED} - M_{CD} - M_{ED}}{5} = \frac{1.3M_{DE} + 0.3M_{ED} - M_{CD}}{5}$$

$\therefore V_{CB} = V_{CD}$

$\therefore 0.3M_{AB} + 1.3M_{BA} - M_{CB} - 490 = 1.3M_{DE} + 0.3M_{ED} - M_{CD}$

$$0.3(M_{AB} - M_{ED}) + 1.3(M_{BA} - M_{DE}) - (M_{CB} - M_{CD}) = 490 \text{ -------- (2)}$$

Substituting

$M_{AB} = +258.27 + 272.26k_1 - 101.74k_2$

$M_{BA} = -107.50 + 304.54k_1 - 203.46k_2$

$M_{CB} = +13.75 - 318.50k_1 + 318.50k_2$

$M_{CD} = -13.75 + 318.50k_1 - 318.50k_2$

$M_{DE} = + 3.90 - 203.46k_1 + 304.54k_2$

$M_{ED} = + 1.96 - 101.74k_1 + 272.26k_2$

into the two conditions (1) and (2) above

$$+156.66 + 271.60k_1 + 271.60k_2 = 2000$$

$$k_1 + k_2 = 7.375 - 0.577 = 6.798 \text{ ---- (3)}$$

$$0.3(256.31 + 374.00k_1 - 374.00k_2) + 1.3(-111.40 + 508.00k_1 - 508.00k_2)$$

$$-(27.50 - 637.00k_1 + 637.00k_2) = 490$$

$$77.00 + 112.00k_1 - 112.00k_2 - 145.00 + 661.00k_1 - 661.00k_2 - 27.50 + 637k_1 - 637k_2 = 4$$

$$1410k_1 - 1410k_2 = 490 + 95.50 = 585.50$$

$$k_1 - k_2 = 0.415 \text{ ---------- (2)}$$

(1) + (2) $\quad 2k_1 = 7.213$

$$k_1 = \underline{+3.606}$$

$$k_2 = +6.798 - 3.606 = \underline{+3.192}$$

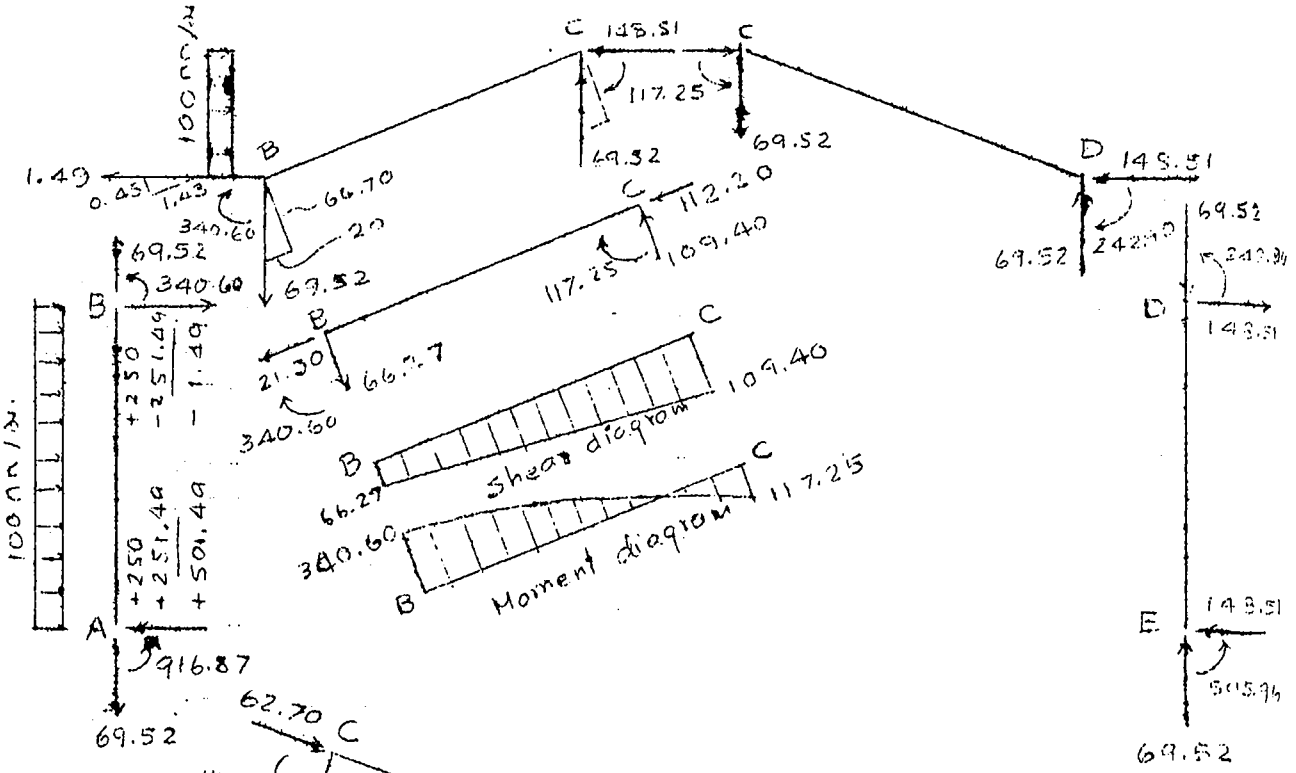
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

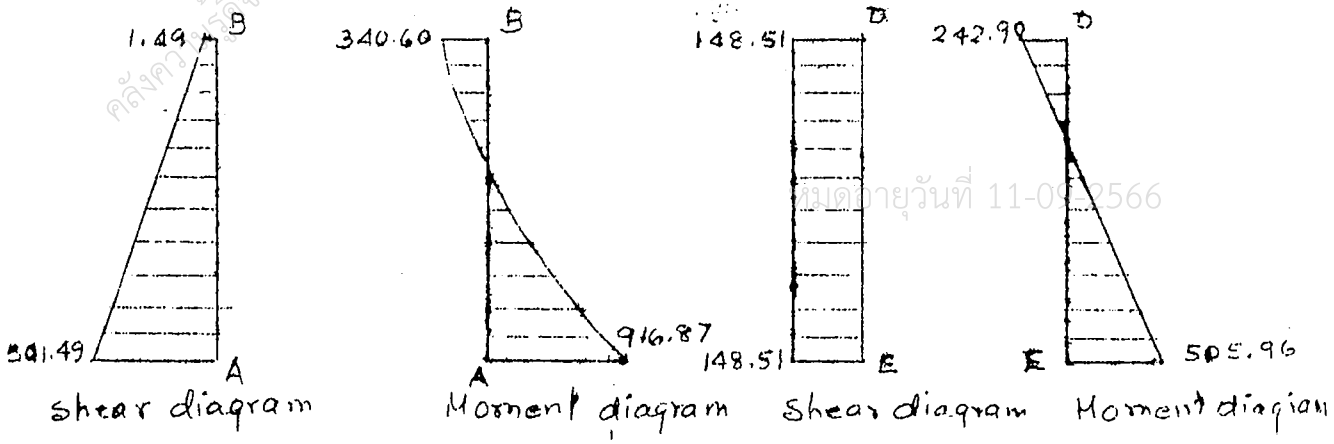
Combination ofthe three sets ofthe Balanced Moments and Check

Joint	A	B		C		D		E
Member	AB	BA	BC	CB	CD	DC	DE	ED
FEM Table I	+208.00	-208.00	+ 18.80	- 18.80	-	-	-	-
+3.606xFEM.Table II	+867.00	+867.00	-1380.00	+1380.00	+1380.00	+1380.00	-	-
+3.192xFEM.Table III	-	-	+1222.00	+1222.00	-1222.00	-1222.00	+767.00	+767.00
Total FEM	+1075.00	+659.00	-139.20	-176.80	+158.00	+158.00	+767.00	+767.00
Bal.Moments Table I	+258.27	-107.50	+107.50	+13.75	-13.75	- 3.90	+ 3.90	+ 1.96
+3.606(Bal.M.Table II)	+983.00	+1098.00	-1098.00	-1147.00	+1147.00	+733.00	-733.00	-367.0
3.192(Bal.M.Table III)	-324.40	-649.90	+649.90	+1016.00	-1016.00	-972.00	+972.00	+871.0
Total Balanced M.	+916.87	+340.60	-340.60	-117.25	+117.25	-242.90	+242.90	+505.9
Check: Change	-158.13	-318.40	-201.40	+59.55	-40.75	-400.90	-524.10	-261.04
$-\frac{1}{2}$ change	+195.20	+ 79.56	- 29.77	+100.70	+200.45	+20.38	+130.52	+262.05
Sum	+ 1.07	-238.84	-231.17	+160.25	+159.70	-380.52	-393.52	+ 101
θ_{rel} = Sum/-K	0	+119.42	+120.00	-83.50	-83.25	+197.80	+196.71	0
	Check	Check		Check		Check		Check

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แสดงรูปอีก : ภาพแรงเฉือน และภาพโมเมนต์ ของชิ้นส่วน.





คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

การพิจารณาแรงที่กระทำต่ออาคาร

ก. เนื่องจากน้ำหนักอาคาร

กระเบื้องลอนคู่ขนาด0.5 x1.2 ม.^{2} แผนละ6.7กก. หนัก 15 กก/ม^2

รวมหลังคา เพดาน แป กระทงฝ้า หนัก40 กก/ม^2 หรือ 160 กก/ม ของคาน

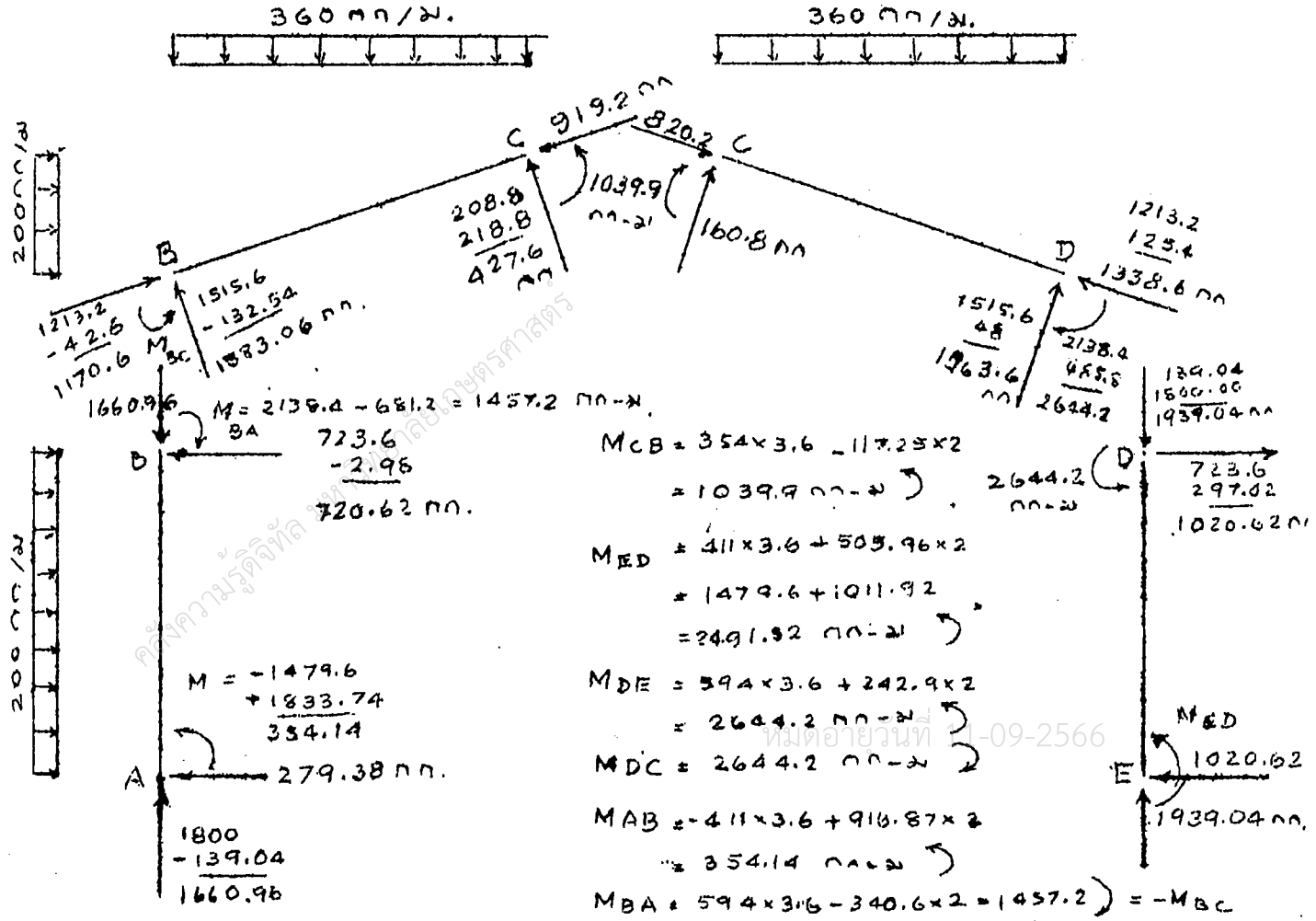
น้ำหนักคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 200 " "

รวมน้ำหนักทางดิ่ง 360 " "

ข. เนื่องจากแรงลม

แรงลม 50 กก/ม^2 คิดเป็น 200 กก/ม ของเสา

ผลรวมของแรงในข้อ ก. และ ข.ดังแสดงในรูปอิสระของรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28

4.4 Statically Indeterminate trusses

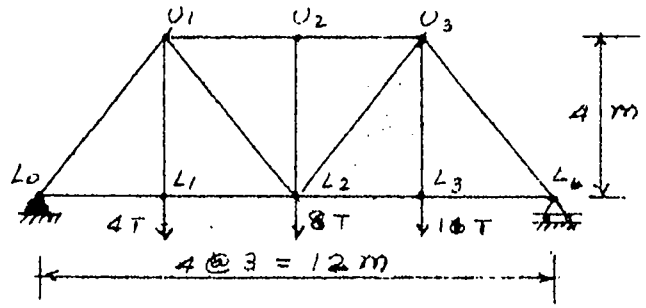
การวิเคราะห์โครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนท ขั้นแรกจะต้องคำนวณหาค่าของ redundant reactions (members) โดย The method of consistent deformation ขั้นต่อไปก็ดำเนินการคำนวณเช่นเดียวโครงข้อหมุนธรรมดา การเกิดเป็นโครงอินดิเทอมิเนทนั้นมี 3 ลักษณะคือ

(1) เกิดจากมีฐานรองรับมากเป็น Redundant reactions

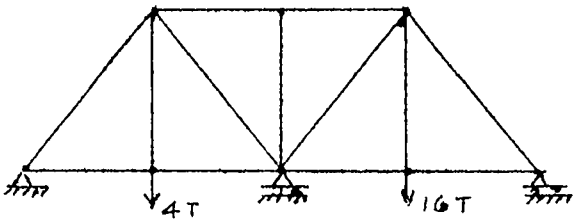
(2) เกิดจากมีชิ้นส่วนมากกว่าธรรมดา เป็น Redundant members

(3) เกิดจากมีทั้งฐานรองรับและชิ้นส่วนมากเกินกว่าโครงข้อหมุนธรรมดา

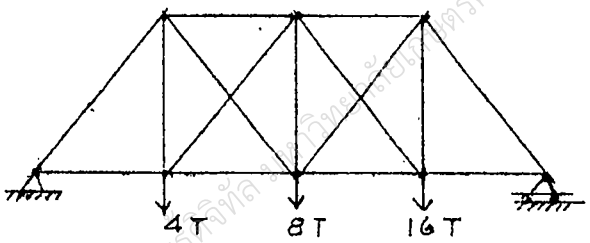
ตัวอย่าง



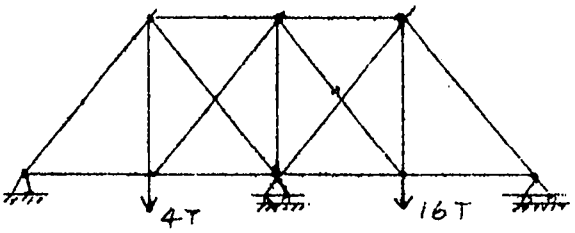
(ก)



(ข) = 1 ดีกรี



(ค) = 2 ดีกรี



(ง) = 3 ดีกรี

รูปที่ 4.29

คลังความรู้ดิจิทัล สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

รูป (ก) เป็นโครงข้อหมุนดิเทอมิเนท เพราะ $m = 2j - 3$ เมื่อ $m = 13$, $j = 8$

รูป (ข) เป็นโครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนท 1 ดีกรี เพราะมีฐานรองรับเกินมา 1 ตัว

รูป (ค) เป็นโครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนท 2 ดีกรี เพราะปกติชิ้นส่วนควรจะมี 13 ตัว แต่กลับมี 15 ตัว แสดงว่าเกิน 2 ตัว

รูป (ง) เป็นโครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนท 3 ดีกรี เพราะมีชิ้นส่วนเกินมา 2 ตัว และฐานรองรับเกินมา 1 ตัว รวมตัวไม่รู้ค่าเกินมา 3 ตัว

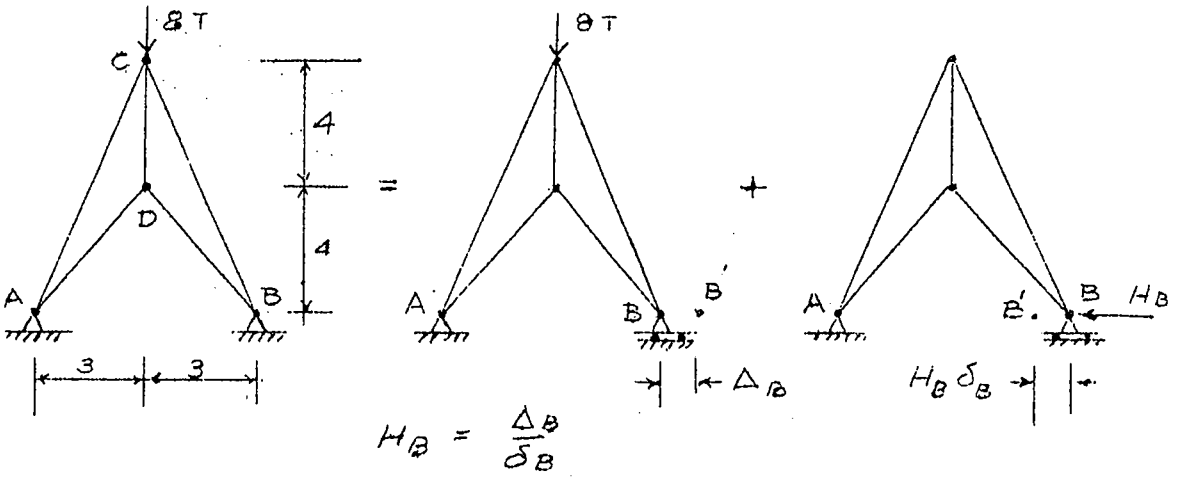
การวิเคราะห์แรงที่เกิดในชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนอินดิเทอมิเนทนั้น ใช้วิธีลดตัวไม่รู้ค่าเกิน (Redundants) ต่าง ๆ ออกให้เหลือเป็นโครงดิเทอมิเนท คำนวณหาระยะโก่งหรือการเคลื่อนที่สัมพันธ์ (Relative movement) ที่เกิดขึ้นในโครงดิเทอมิเนท เพื่อใช้สำหรับพิจารณาสภาพของ Redundants ที่เอาออก แต่การใส่ Redundant คืนทีละแห่งเพื่อให้โครงสร้างพื้นฐาน (Basic structure) กลับไปเป็นโครงอินดิเทอมิเนทตามเดิมนั้น ถ้าใส่ในลักษณะชิ้นส่วนที่เกิดแรงดึง ค่าแรงตามแกนจะทำให้ชิ้นส่วนยืดออกด้วย ดังนั้นจะต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับ Relative movement ของปลายทั้งสองข้างของ Redundant member ด้วย

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

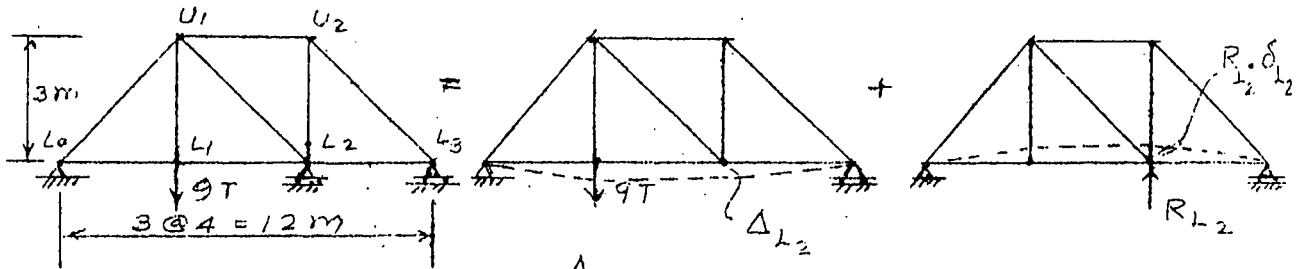
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงข้อหมุน

1. โครงข้อหมุนที่มีฐานรองรับมากเกินธรรมดา รูปที่ 4.30



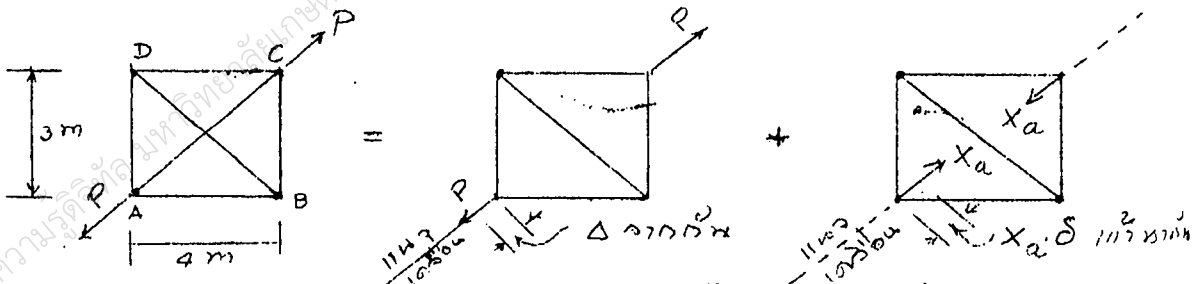
$$H_B = \frac{\Delta_B}{\delta_B}$$



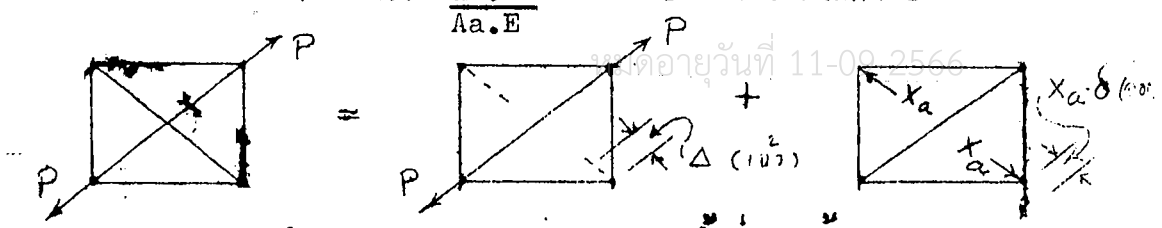
$$R_{L_2} = \frac{\Delta_{L_2}}{\delta_{L_2}}$$

รูปที่ 4.30

2. โครงข้อหมุนที่มีชิ้นส่วนมากเกินธรรมดา รูปที่ 4.31



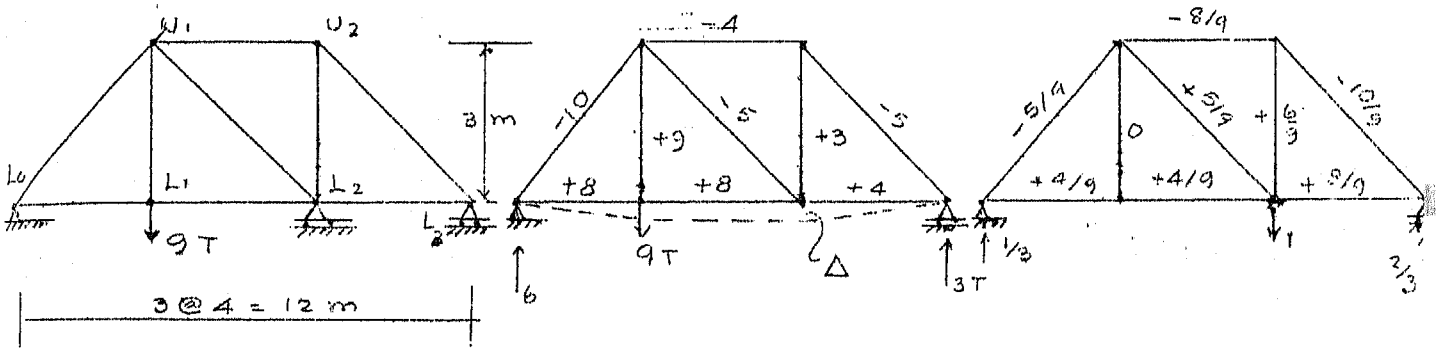
$$\Delta = Xa.\delta + \frac{Xa.La}{Aa.E}$$ เพราะชิ้นส่วนตัวเองยืดก้วย



รูปที่ 4.31 $\Delta = Xa.\delta - \frac{Xa.La}{Aa.E}$ เพราะชิ้นส่วนหดก้วย

ตัวอย่าง (5) ให้วิเคราะห์โครงข้อหมุน ซึ่งมีน้ำหนักกระทำดังรูปที่ 4.24 (ก) กำหนดให้

L/A = 10 ทุกชิ้นส่วน



(ก) โครงที่กำหนด (ข) โครงพื้นฐาน (ค) น้ำหนัก 1 หน่วย ที่ L_2

รูปที่ 4.32

วิธีทำ

members	L/A	S	u	$\frac{SuL}{A}$	$\frac{u^2L}{A}$
L_0L_1	10	+8	$+\frac{4}{9}$	$+\frac{320}{9}$	$\frac{160}{81}$
L_1L_2	10	+8	$+\frac{4}{9}$	$+\frac{320}{9}$	$\frac{160}{81}$
L_2L_3	10	+4	+8/9	$+\frac{320}{9}$	$\frac{640}{81}$
L_0U_1	10	-10	-5/9	$+\frac{500}{9}$	$\frac{250}{81}$
U_1U_2	10	-4	-8/9	$+\frac{320}{9}$	$\frac{640}{81}$
U_1L_1	10	+9	0	0	0
U_1L_2	10	-5	+5/9	$-\frac{250}{9}$	$\frac{250}{81}$
U_2L_2	10	+3	+6/9	$+\frac{180}{9}$	$\frac{360}{81}$
U_2L_3	10	-5	-10/9	$+\frac{500}{9}$	$\frac{1000}{81}$

$\frac{SuL}{A} = \frac{2210}{9}$ $\frac{u^2L}{A} = \frac{3460}{81}$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

$$\Delta_{L_2} = R_{L_2} \cdot \delta_{L_2}$$

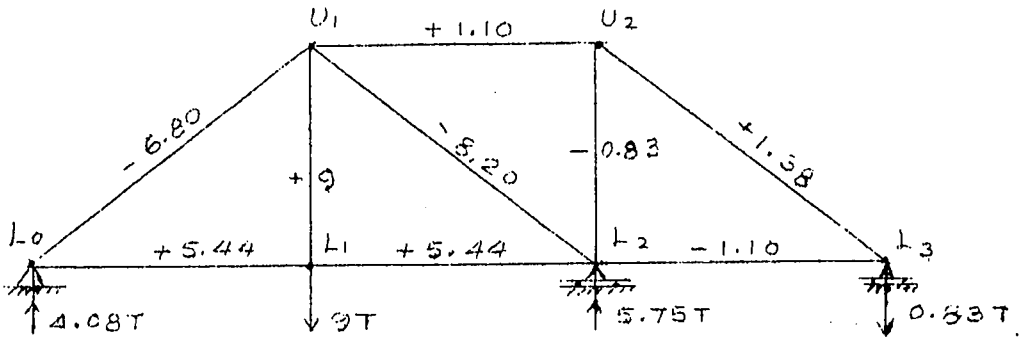
$$R_{L_2} = \frac{\Delta_{L_2}}{\delta_{L_2}} = \frac{2210}{9E} \div \frac{3460}{81E} = 5.75 \text{ T} \uparrow$$

$$\sum M_{L_0} = 0 \qquad 12R_{L_3} + 5.75 \times 8 = 9 \times 4$$

$$R_{L_3} = \frac{36 - 46}{12} = -0.83 \text{ T} \downarrow$$

$$\sum F_y = 0 \qquad R_{L_0} = 9 + 0.83 - 5.75 = 4.08 \text{ T} \uparrow$$

คำตอบจะเป็นดังนี้



(ง) คำตอบ

รูปที่ 4.22

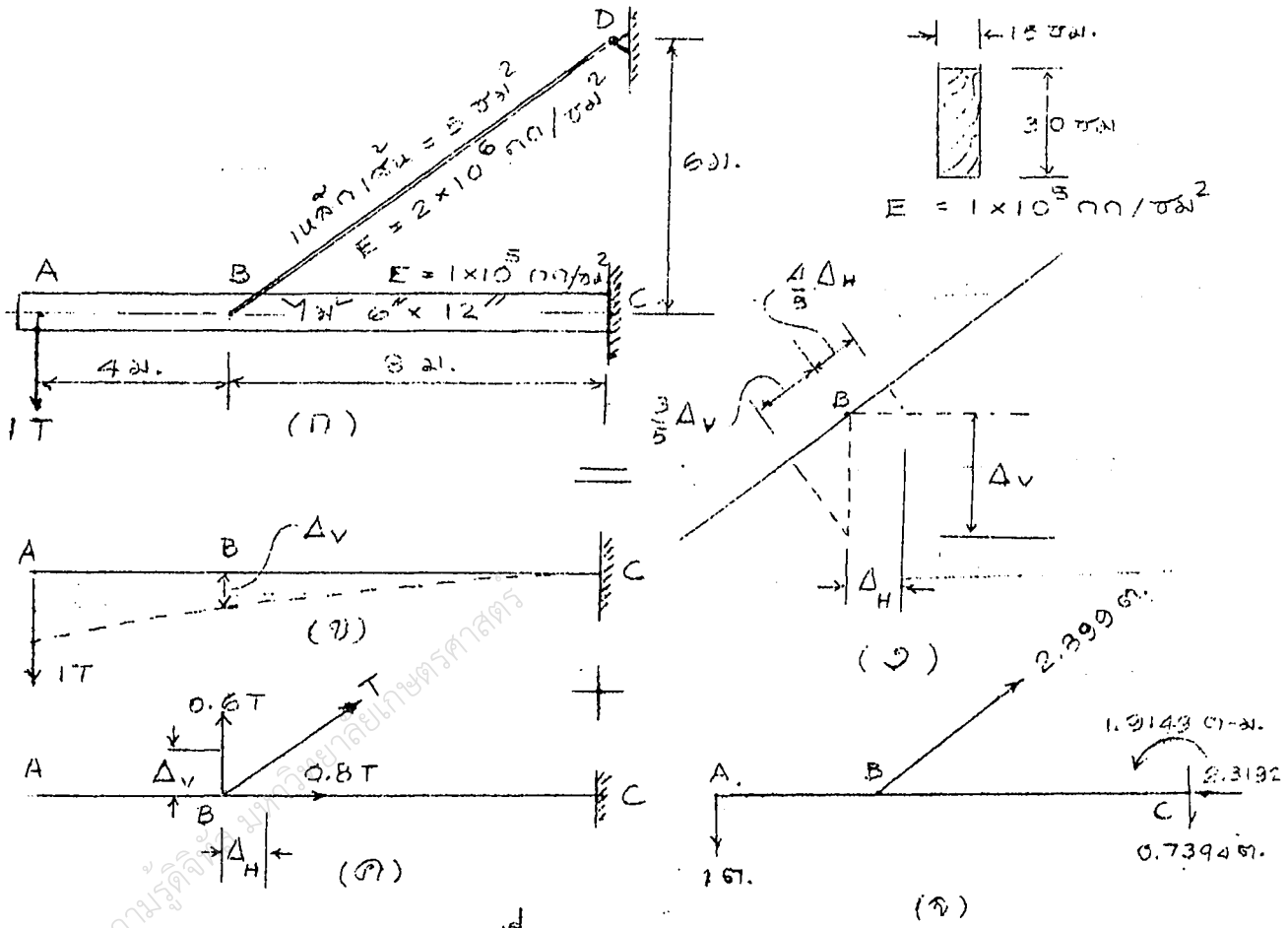
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

4.5 โครงสร้างเชิงประกอบ (Composite Structures)

เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยชิ้นส่วนหลายชนิดตามสภาพที่รับแรง มีตัวไม่รู้ค่ามากเกินจะใช้ 3 สมการหาได้ ต้องใช้วิธีอื่นช่วยก่อน การยืดหรือหดมีค่างกันตามค่า E ดังนั้นการคำนวณจึงต้องใช้ method of consitent deformation เหมาะที่สุดโดยการลด redundant member ให้เป็นโครงสร้างพื้นฐาน แล้วคำนวณระยะโก่งตามสภาพที่เป็นจริง

ตัวอย่าง (6) ให้วิเคราะห์แรงในโครงสร้างเชิงประกอบ ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

วิธีทำ สมมติแรงดึงในเหล็กเส้น = T ตัน

ดังรูป (ง) เหล็กเส้นยืดออก $= \frac{TL}{AE} = \frac{3}{5}\cdot\Delta_V - \frac{4}{5}\cdot\Delta_H$

$$EI\,\Delta_V \text{ of } B = \int_0^8 (4+x)(x)\,dx - \int_0^8 (0.6Tx)x\,dx$$

$$= \left[\frac{4x^2}{2} + \frac{x^3}{3}\right]_0^8 - \left[0.6\,\frac{Tx^3}{3}\right]_0^8$$

$$\Delta_V \text{ of } B = 298.667 - 102.4T \quad \frac{T\text{-}M^3}{EI}$$

$$\Delta_V \text{ of } B = (298.667 - 102.4T)\,\frac{1000 \times (100^3)}{10^5 \times 33750} \qquad \frac{\text{กก} - \text{ซม}^3}{EI}$$

$$\Delta_V \text{ of } B = (298.667 - 102.4T)\,0.2963 \text{ cm.}$$

$$\Delta_H \text{ of } B = \frac{0.8TL}{AE} = \frac{0.8T \times 1000 \times 800}{15 \times 30 \times 10^5}$$

$$= 0.01422T \text{ cm.}$$

For equation $\frac{TL}{AE} = \frac{3}{5}\cdot\Delta_V - \frac{4}{5}\cdot\Delta_H$

$$\frac{T \times 1000 \times 10 \times 100}{5 \times 2 \times 10^6} = \frac{3}{5}(298.667 - 102.4T)0.2963 - \frac{4}{5}(0.01422T)$$

$$0.1T = 53.097 - 18.20467T - 0.011376T$$

$$18.316T = 53.097$$

$$T = 2.899 \text{ ton.(t)}$$

$$M_c = 1 \times 12 - 0.6 \times 2.899 \times 8$$

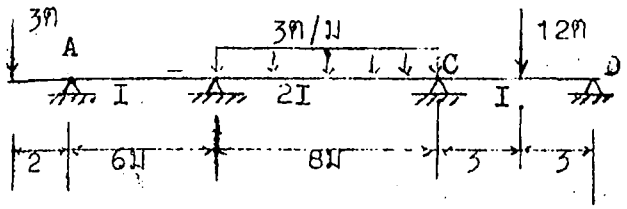
$$= -1.9149 \quad T - M \text{ ↻}$$

$$V_c = 1 - 0.6 \times 2.899 = -0.7394 \text{ ton} \downarrow$$

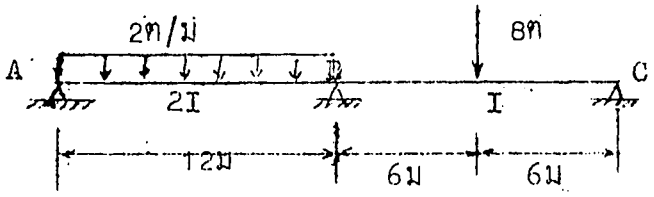
ต่อไปก็ดำเนินการคำนวณหาแรงต่าง ๆ เหมือนในโครงสร้างคิเทอมิเนท

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

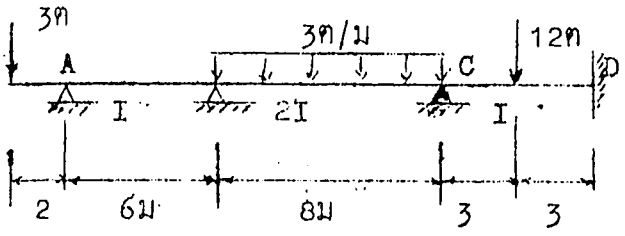
ให้วิเคราะห์แรงในคานเนื่องจากมีน้ำหนักกระทำ หรือการทรุดต่างของฐานรองรับ ดังรูป เขียนภาพแรงเฉือน ภาพโมเมนต์ดัด และการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง



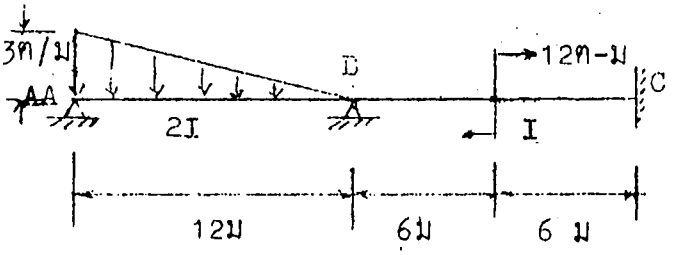
ข้อ 4 _ 1



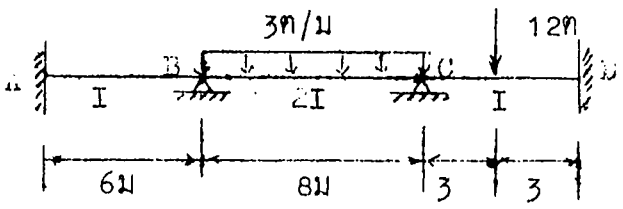
ข้อ 4 - 2



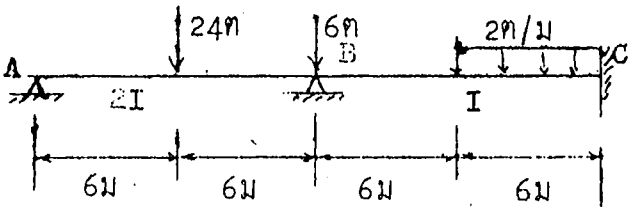
ข้อ 4- 3



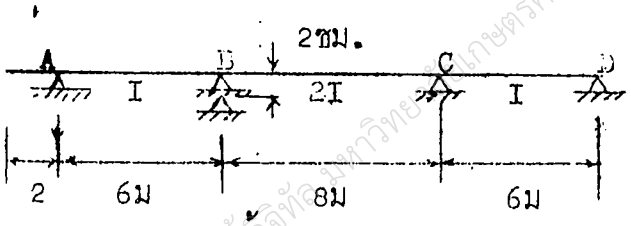
ข้อ 4 - 4



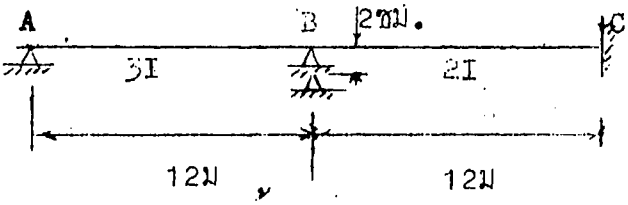
ข้อ 4 - 5



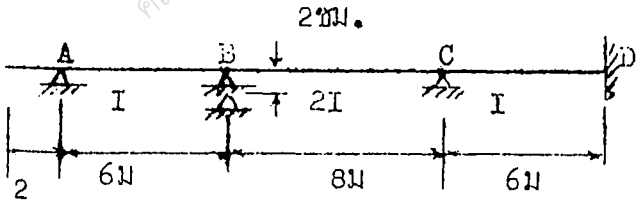
ข้อ 4 - 6



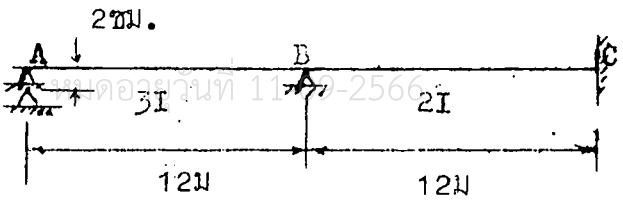
ข้อ 4 - 7



ข้อ 4 - 8



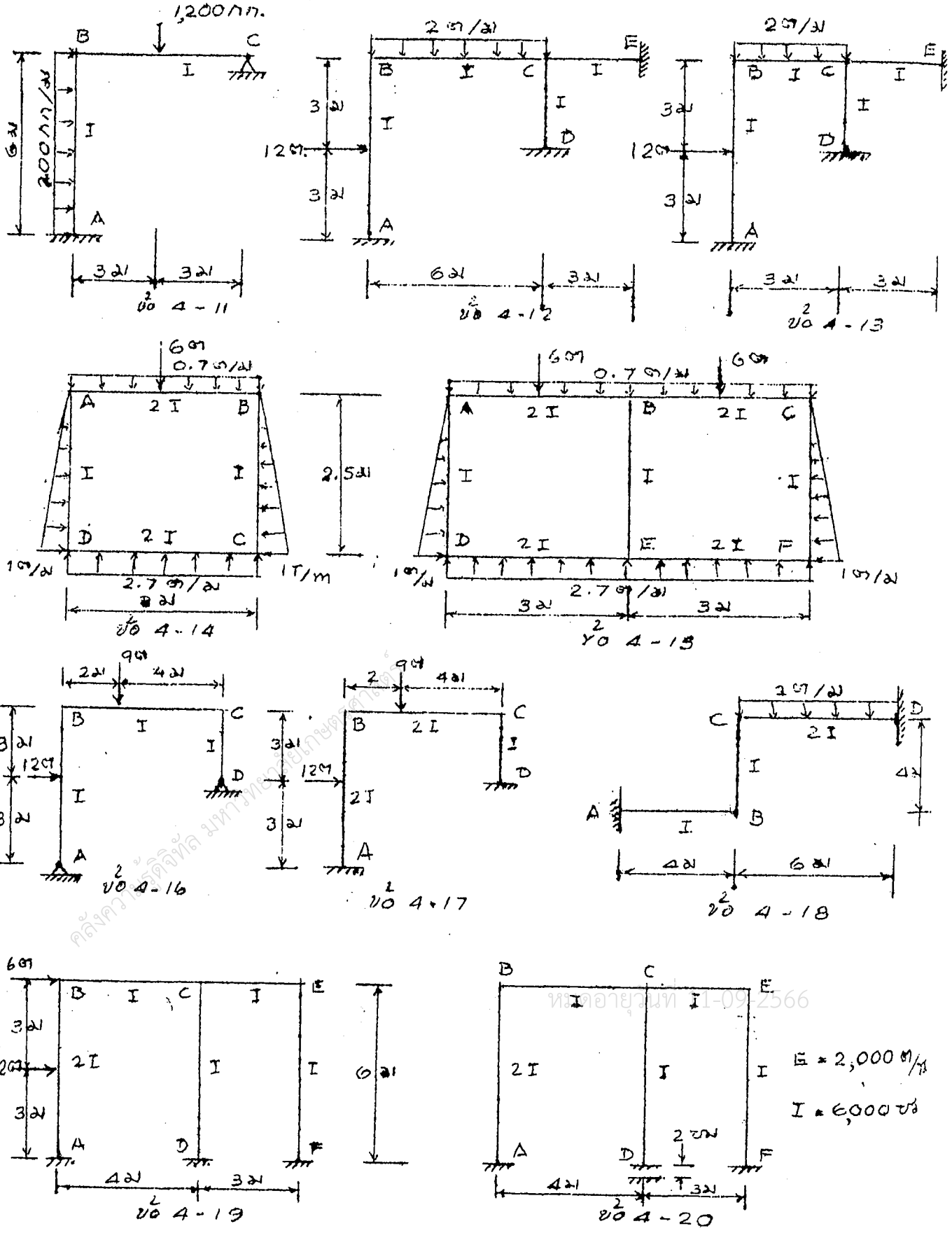
ข้อ 4 - 9



ข้อ 4 - 10

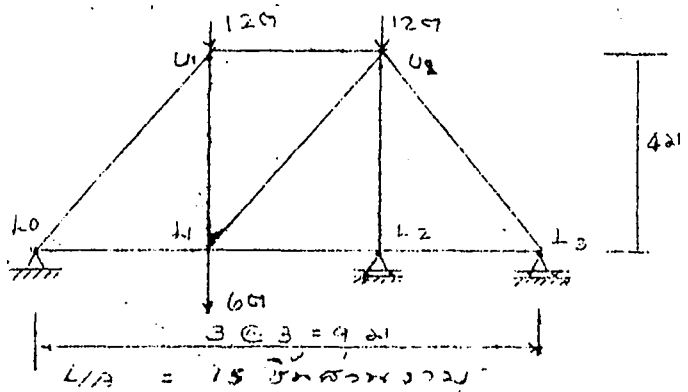
ข้อ 4 - 7 ถึง ข้อ 4 - 10 ให้ $E = 2000$ ต/ซม^2 $I = 6000$ ซม^4

ให้วิเคราะห์แรงในโครงข้อแข็งเนื่องจากมีน้ำหนักกระทำ และ/หรือข้อต่อเคลื่อนที่ ดังรูป เขียนภาพแรงเฉือน ภาพโมเมนต์ดัด และการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง



คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หทัยอายุวนท์ 081-092-2566

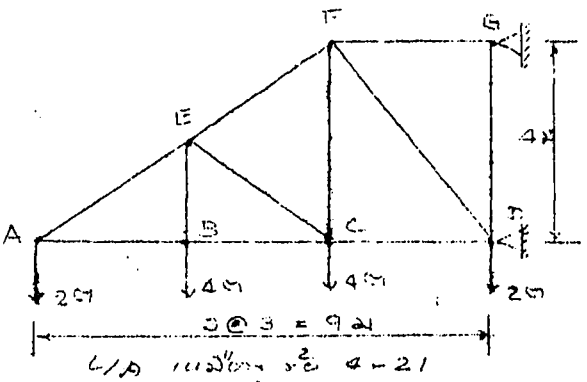
จงวิเคราะห์แรงในชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งระนาบที่กำหนดให้ โดยกำหนดให้ E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเป็น ksc. A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนเป็น ซม.^{2}



L/A = 15 ชิ้นส่วนรวม

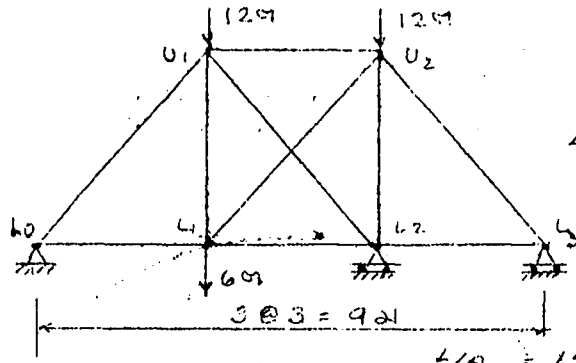
L/A = 20 สำหรับชิ้นส่วนที่เหลือ

ข้อ 4-21

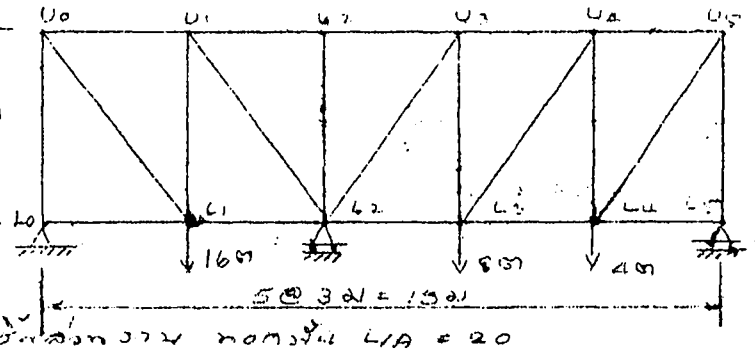


L/A เหมือนข้อ 4-21

ข้อ 4-22

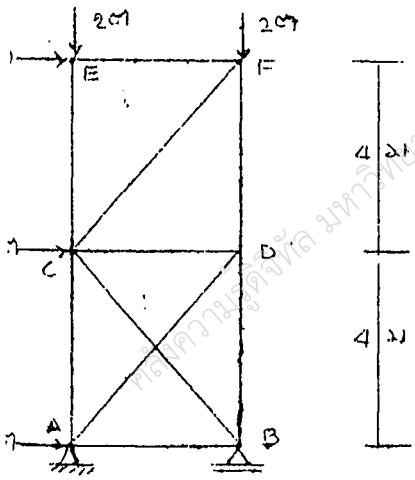


ข้อ 4-23

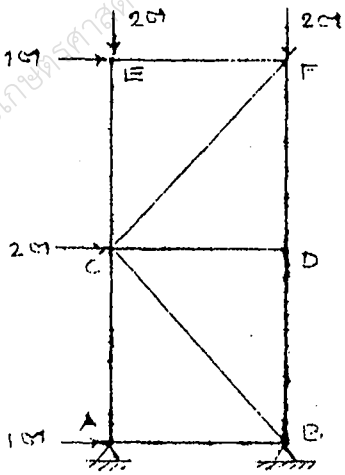


L/A = 15 ชิ้นส่วนรวม ที่เหลือ L/A = 20

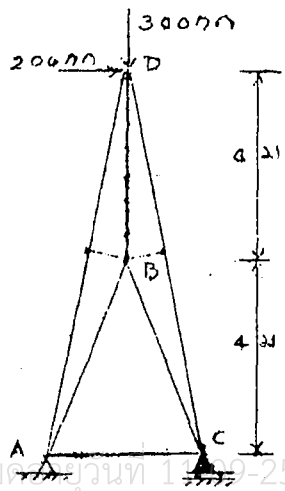
ข้อ 4-24



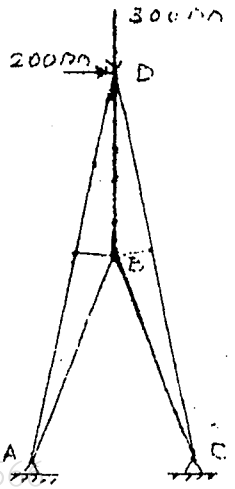
ข้อ 4-25



ข้อ 4-26



4-27



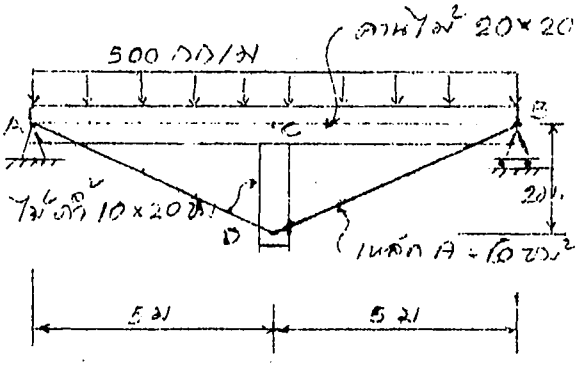
4-28

ข้อ 4-25 ถึง 4-28 กำหนด L/A = 15 ทุกชิ้นส่วน

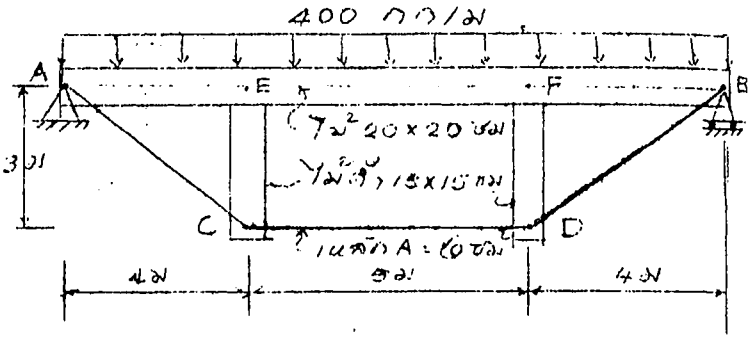
E = 2,000,000 กก/ซม^2 ทุกข้อ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-25

ข้อ 4-29 ถึง 4-31 เป็นโครงสร้างเชิงเส้นระนาบ ที่ประกอบด้วยวัสดุเหมือนกันทั้งหมด ที่มีสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น และมีโมดูลัสของความแข็งเกร็งดัดของคาน AB เท่ากับ $E_S = 2 \times 10^6$ กก/ซม^2 และ $E_T = 14 \times 10^4$ กก/ซม^2.

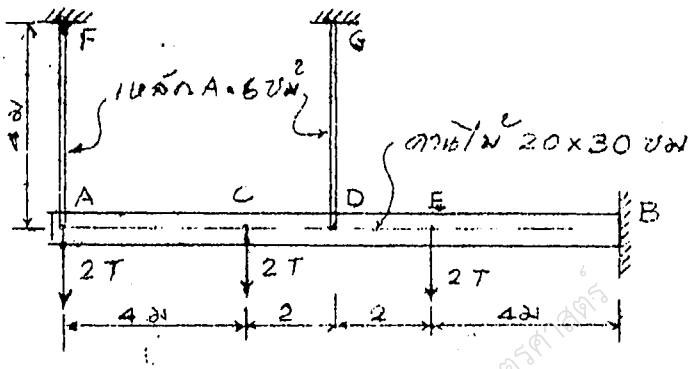


4-29

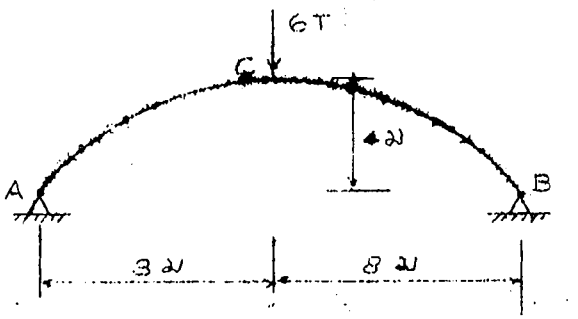


4-30

ข้อ 4-32 เป็นส่วนของซุ้มประตู ที่มีหน้าตัดคงที่ เท่ากันตลอด รับแรงกดดังรูป

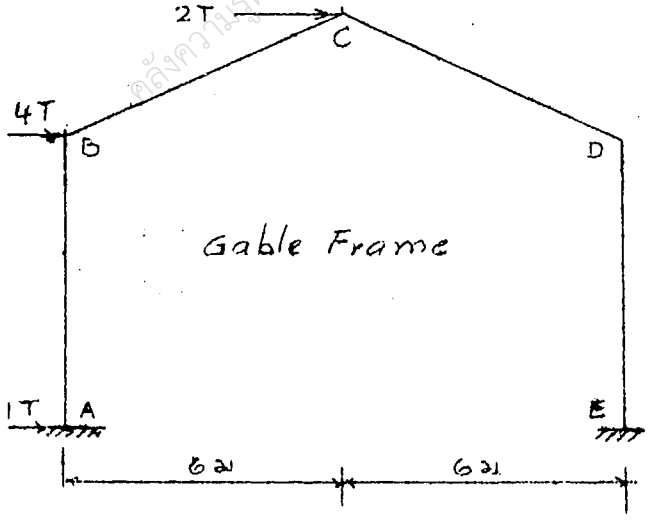


4-31

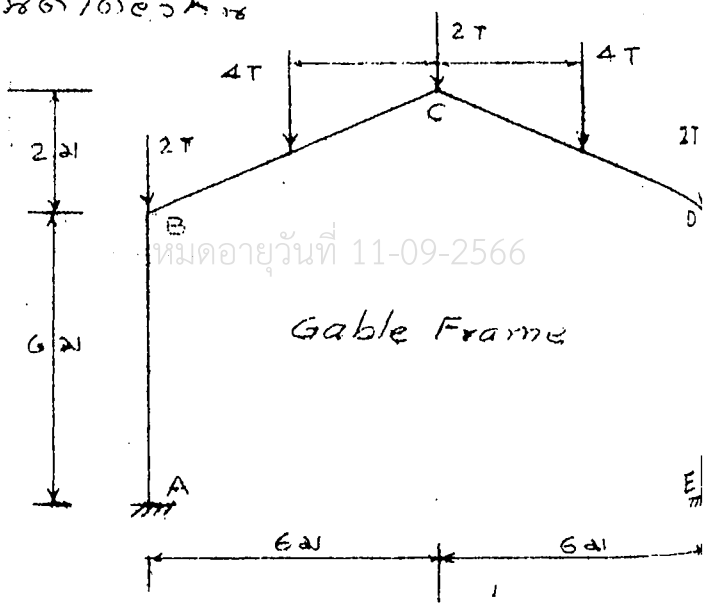


4-32 (Two-hinged arch)

ข้อ 4-32 ถึง 4-34 เป็นโครงสร้างข้อแข็ง ซึ่งมีส่วนที่เป็นหน้าตัดคงที่ (I) เท่ากันตลอด และมีหน้าตัดยืดหยุ่นเกี่ยวข้องกัน



4-33



4-34

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

บทที่ 5
การออกแบบโครงสร้างไม้

5.1 ความทั่วไป

ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มนุษย์รู้จักและใช้มาตั้งแต่โบราณ ไม้เป็นองค์ประกอบของอาคารหลายอย่างมาช้านาน นอกจากจะใช้ทำที่พักอาศัยแล้ว อาคารสำคัญเช่นหลังคาโบสถ์ พระราชวังโบราณทั้งในยุโรปและประเทศไทย ส่วนมากใช้ไม้ในรูปคานหรือโครงหลังคา อาคารเหล่านี้มีอายุนานเป็นร้อยปีก็มี เมืองไทยเคยใช้ไม้ซุงท่อนยาวตรงอาบน้ำยาเป็นเสาไฟฟ้าในกรุงเทพ มีอายุกว่า 20 ปี เนื่องจากมนุษย์รู้จักเรื่องไม้มานาน การก่อสร้างทำได้ง่ายใช้เครื่องมือไม่มากนัก เช่น ขวาน ตะปู เลื่อย สิ่วและกบไสไม้เป็นต้น ไม้ยังหาได้ง่ายโดยทั่วไป ดังนั้นไม้จึงเป็นที่นิยมอยู่เสมอทั้งงานถาวรและงานชั่วคราว โดยเฉพาะไม้แบบหล่อคอนกรีต ไม้ค้ำยัน นั่งร้านเป็นต้น ไม้สามารถใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่หลังคา พื้น คาน เสา ลงไปจนถึง เข็มไม้รับน้ำหนักซึ่งถ้าจมในดินใต้น้ำแล้วจะมีอายุเป็นร้อย ๆ ปี ส่วนโครงสร้างไม้ที่อยู่ในร่มหาสีหรืออาบน้ำยาจะมีอายุได้นานเช่นกัน ไม้สามารถทำเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงได้ทุกชนิด เช่นรับแรงตามแกน รับแรงเฉือน รับแรงบิดและโมเมนต์ดัดเป็นต้น การต่อไม้ทำได้ง่ายโดยใช้ตะปู สลักหรือกาวเป็นต้น ไม้มีหลายประเภทตามลักษณะเนื้อไม้ ได้แก่ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อปานกลาง ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้อแข็งมาก ประโยชน์การใช้งานในสภาวะไม้แห้งธรรมดาแสดงไว้ในตารางที่ 1 เนื่องจากไม้มีการเจริญเติบโตตามฤดูกาล มีวงประจำปี มีตา มีรอยตำหนิ ดังนั้นหน่วยแรงที่ยอมให้ใช้งานโดยทั่วไปจึงมักจะต่ำเพื่อความปลอดภัย ทำให้โครงสร้างไม้ส่วนมากจะแสดงอาการให้เห็นได้ชัดก่อนที่จะถึงขั้นพังทลาย ในกรณีที่ไม้เปียกหรือใช้ในน้ำจะรับแรงได้น้อยกว่าแสดงไว้ในตารางที่ 1 อาจจะรับน้ำหนักได้น้อยกว่าร้อยละ 10

5.2 สูตรการคำนวณองค์อาคารและข้อกำหนด

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสิ่งที่สำคัญและเป็นหลักสำหรับโครงสร้างไม้เท่านั้น ดังต่อไปนี้

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(1) คานรับโมเมนต์ดัด

ก. หน่วยแรงดัดสำหรับคานคือ

$$f = \frac{M}{S} = \frac{MC}{I}$$

เมื่อ M = โมเมนต์ดัดหรือโมเมนต์ต้านแรงดัด

C = ระยะจากแกนสะเทินถึงแนวเสี้ยนไกลสุดในหน้าตัดรับแรงดัด

I = โมเมนต์อินเนอร์เชี่ยของหน้าตัด

S = โมดูลัสของหน้าตัดองค์อาคาร

ข. คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความกว้าง b ความลึก h หน่วยแรงดัด $f = \frac{6M}{bh^2}$

(2) คานรับแรงเฉือน

ก. แรงเฉือนขวางเสี้ยน สำหรับคานไม่ต้องคำนวณออกแบบ เพราะรับแรงได้สูง

ข. แรงเฉือนตามแนวนอนในคาน

$$H = \frac{VQ}{It}$$

เมื่อ H = หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามเสี้ยน

V = แรงเฉือนรวมขวางเสี้ยนที่ปลายคาน

Q = โมเมนต์สถิตของเนื้อที่หน้าตัดส่วนบนหรือส่วนล่างของแกนสะเทิน

t = ความกว้าง(หนา)ของคานที่แกนสะเทิน

สำหรับคานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความกว้าง b ความสูง h

$$H = \frac{3}{2}\frac{V}{bh}$$

ค. แรงเฉือนในแนวนอนในคานบาก

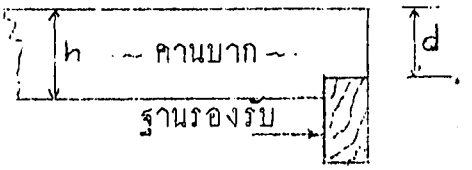
คานบาก ซึ่งเป็นคานช่วงสั้นมีความลึกค่อนข้างมาก บากที่ผิวล่างบริเวณปลายคานกำลังรับแรงเฉือนจะลดลง โดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความลึกของรอยบากกับความลึกของคาน ในการคำนวณออกแบบคานบากที่ปลายคาน จะต้องตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกที่กระทำให้เกิด

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

แรงดัดกับค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ $H' = H\frac{d}{h}$ และ $H' = \frac{3V}{2bd}$

โดยที่ d เป็นความลึกจริงของคานที่ตรงรอยบาก



(3) คานรับแรงอัด(กด)ตั้งฉากเสี้ยน

บริเวณฐานรองรับและบริเวณที่มีแรงกระทำเป็นจุด จะต้องตรวจสอบค่าหน่วยแรงกดต้องไม่เกินหน่วยแรงกดหรือหน่วยแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนที่ยอมให้ตามตารางที่ 1 สำหรับพื้นที่รับแรงกดที่ยาวกว่า 15 ซม. ในกรณีที่ความยาวน้อยกว่านี้ให้เพิ่มหน่วยแรงกดด้วยตัวคูณ $\frac{L+0.95}{L}$ เมื่อ L เป็นความยาวของระยะที่กดเป็นซม. เช่น หน่วยแรงอัดยอมให้ 30 กก/ซม^2 ควนางพาดบนที่รองรับระยะยาว 5 ซม.

หน่วยแรงอัดที่ใช้ $= 30\ (\frac{5+0.95}{5}) = 35.7$ กก/ซม^2

(4) ระยะโก่ง

ก. ระยะโก่งทางดิ่งซึ่งคำนวณหาได้ตามบทที่ 3 โดยทั่วไปจะยอมให้มีได้ 1 ใน 360 ของช่วงคาน (span) สำหรับอาคาร และ 1 ใน 200 ของช่วงคานสำหรับสะพานทางหลวง

ข. ระยะโก่งด้านข้าง ในกรณีตงหรือคานที่มีสัดส่วนความลึกต่อความหนาต่างกัน

ตงพื้น ความลึก 6 เท่า ความหนาต้องมีค้ำยันทางข้างทุกระยะ 2.50 ม.

คานและตง โครงหลังคาอาจจะกำหนดค้ำยันด้านข้างดังนี้

ความลึก 2 เท่า ความหนา ไม่ต้องค้ำยันด้านข้าง

" 3 " " ต้องยึดปลายคานให้อยู่ในตำแหน่ง

" 4 " " ต้องยึดปลายข้างหนึ่งให้อยู่ในแนวกำหนด

คลังความรู้ดิจิทัล บรรณาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ความลึก 7 เท่า ความหนาต้องยึดปลายคานทั้งสองให้อยู่ในแนวกำหนด

ถ้าคานรับทั้งแรงดัดและแรงอัดขนานแนวเสี้ยน ความลึกต้องไม่เกิน 5 เท่าความหนา

(5) ชิ้นส่วนรับแรงดึง เช่นชิ้นส่วนด้านล่าง(ขื่อ) ของโครงข้อหมุนเป็นต้น การคำนวณขนาดชิ้นส่วนดังนี้

$$t = \frac{P}{A}$$ ไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 1

t = หน่วยแรงดึงขนานเสี้ยน = $\frac{\text{แรงดึง}}{\text{พื้นที่หน้าตัดจริง}}$

พื้นที่หน้าตัดจริง (สุทธิ) = พื้นที่หน้าตัด — พื้นที่รูเจาะ

ในกรณีที่ไม่มีตำหนิ เช่นตาไม้เป็นต้น เมื่อหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ให้ลดหน่วยแรงดึงตามเสี้ยนลง หรือลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับตาไม้

(6) ชิ้นส่วนรับแรงอัด ได้แก่ชิ้นส่วนด้านบน (จันทัน) ของโครงข้อหมุนและเสาเป็นต้น เมื่อชิ้นส่วนรับแรงอัดตามแกนจะมีโอกาสคุ้ง (Buckle) ได้ ซึ่งผลเนื่องจากอัตราส่วนของความชะลูด (Slenderness ratio) จึงจำเป็นต้องลดหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เพื่อเป็นไปตามสภาพที่เป็นจริง ตามสูตรของออยเลอร์ (Euler's formula) คือ

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$ หรือ

$$\frac{P_E}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2}$$

เมื่อ P_E = Critical Load

A = Cross-sectional area

P_E/A = Critical stress

E = modulus of elasticity

I = moment of inertia = Ar^2

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

r = radius of gyration

L = length of unsupported column

L/r = Slenderness ratio

ก. เสาตัน

กำหนดให้อัตราส่วนของความชะลูด = $\frac{L}{d}$ ไม่เกิน 50

L = ความยาวชิ้นส่วนรับแรงอัด ไม่มีค้ำยัน ซม.

d = ขนาดทางด้านแคบของชิ้นส่วน ซม.

กรณีสูตรคำนวณหน่วยแรงอัดไม่ใช้ค่า E

เมื่อ $\frac{L}{d} \leq 12$ ใช้ $\frac{P}{A} = F_c$

" $L/d > 12$ " $\frac{P}{A} = F_c \left(1.33 - \frac{L}{35d}\right)$

โดย P = แรงอัดขนานเสี้ยน กก.

A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง ซม^2

F_c = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ กก/ซม^2

กรณีสูตรคำนวณใช้ค่า E ตามสูตรเดิม

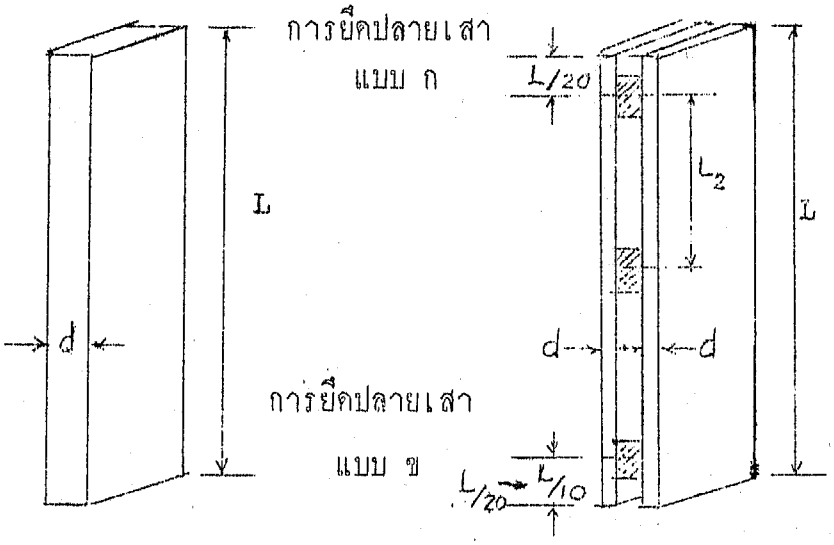
เมื่อ $L/d \leq 12$ ใช้ $\frac{P}{A} = F_c$

$L/d > 12$ ใช้ $P/A = \frac{3.619\ E}{(L/r)^2}$

สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะได้

$$P/A = \frac{0.30\ E}{(L/d)^2}$$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566



(ก) เสาไม้ตัน (ข) เสาประกอบไม้แผ่น

รูปที่ 5.1

ข. <u>เสาประกอบไม้แผ่น</u> (เสาปะกับพุกและแหวน)

ในกรณีที่ไม่สามารถจะหาเสาตันได้ และเป็นการประหยัดสามารถเอาไม้แผ่นมาทำเสาได้ โดยมีพุกแทรกกลาง การยึดไม้ 2 แผ่นมีพุกกลางใช้ตะปูหรือแหวนยึดไม้ทั้ง 3 แผ่นให้ติดกัน โดยตะปูตอกทะลุทั้ง 3 แผ่น ระยะห่างกันไม่เกิน 6 เท่าความหนา

แบบ ก. หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับเสาแต่ละต้นที่ประกอบเป็นเสาปะกับพุก โดยที่แหวนยึดพุกปลายเสาอยู่ห่างปลายเสาไม่เกิน $\frac{L}{20}$ ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ คือ

$$\frac{P}{A} = \frac{0.75\ E}{(L/d)^2}$$

แบบ ข. หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับเสาแต่ละต้นที่ประกอบเป็นเสาปะกับพุก ที่ใช้แหวนยึดพุกปลายเสาอยู่ภายในระยะห่างจากปลายเสาระหว่าง $\frac{L}{20}$ ถึง L/10 และพุกยาวจนสุดปลายเสา ค่าหน่วยแรงคือ

$$\frac{P}{A} = \frac{0.90\ E}{(L/d)^2}$$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

เมื่อ P = น้ำหนักที่ยอมให้เสารับได้ กก.

A = ผลรวมของพื้นที่ไม้แผ่นทำเสา ซม^2

E = โมดูลัสยืดหยุ่น กก/ซม^2

L = ความยาวเสา ซม.

d = ความหนาของไม้แต่ละแผ่น ซม.

แต่ถึงอย่างไรก็ตามต้องไม่เกิน $\frac{P}{A} = \frac{0.30E}{(L/d)^2}$ เมื่อคิดอย่างเสาตัน โดยไม่คำนึงถึงสภาพของปลาย เนื่องจากระยะวางของพุก และต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

เสาประกอบไม้แผ่น ค่า $\frac{L}{d}$ สำหรับไม้แต่ละต้นต้องไม่มากกว่า 80 และค่า $\frac{L^2}{d}$ จะต้องไม่มากเกินกว่า 40

ค. <u>เสากลม</u>

น้ำหนักที่ยอมให้สำหรับเสาที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมจะต้องไม่มากกว่าเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน หรือคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{P}{A} = \frac{3.619E}{(L/r)^2}$$

(7) ชิ้นส่วนรับโมเมนต์และแรงตามแกน (Combined Bending and Axial Force)

โครงสร้างที่รับทั้งโมเมนต์ดัดและแรงตามแกนพร้อมกัน สูตรคำนวณดังนี้

ก. แรงดัดและแรงดึงตามแกน

$$\frac{P/A}{t} + \frac{M/S}{f} \qquad \text{ไม่เกิน } 1$$

ข. แรงดัดและแรงอัดตามแกน

$$\frac{P/A}{C} + \frac{M/S}{f} \qquad \text{ไม่เกิน } 1$$

เมื่อ P = แรงดึงหรือแรงอัดตามแกน กก.

A = พื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วน ซม^2

M = โมเมนต์ดัด กก – ซม.

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

S = โมดูลัสของหน้าตัด = I/c

t = หน่วยแรงดึงขนานเสี้ยนที่ยอมให้ กก/ซม^2

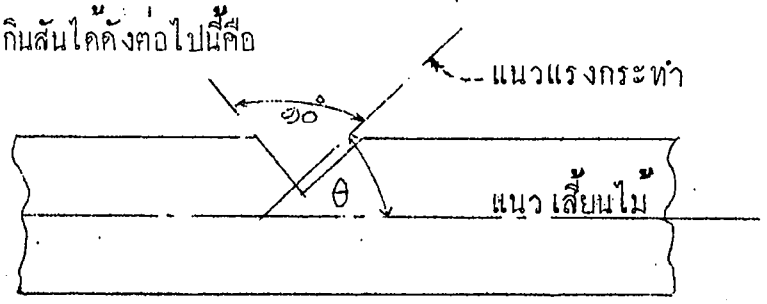
C = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ กก/ซม^2

f = หน่วยแรงดัดในเสี้ยน กก/ซม^2

(8) แรงอัดทำมุมกับแนวเสี้ยน

สูตรฮันกินสัน

ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับแรงกระทำทำมุมกับแนวเสี้ยนระหว่าง 0° ถึง 90 คำนวณโดยใช้สูตรฮันกินสันได้ดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 5.2

$$N = \frac{PQ}{P \sin^2\theta + Q \cos^2\theta}$$

เมื่อ N = หน่วยแรงที่ยอมให้กระทำตั้งได้ฉากกับผิวเอียง กก/ซม^2

P = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ กก/ซม^2

Q = หน่วยแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนที่ยอมให้ กก/ซม^2

θ = มุมระหว่างแนวแรงกระทำกับแนวเสี้ยน

(9) การยึดไม้หรือการต่อไม้

การนำเอาไม้ประกอบขึ้นเป็นคานขนาดใหญ่ หรือโครงหลังคา จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ยึดไม้ให้ติดกันเพื่อชิ้นไม้จะได้กระทำหน้าที่ร่วมกัน โดยทั่วไปได้แก่ กาวยึดไม้ ตะปู ตะปูควง ตะปูเกลียว สลักไม่มีเกลียว สลักเกลียว และแหวนยึดไม้ต่าง ๆ โดยทั่วไปอุปกรณ์ยึดไม้เหล่านี้ใช้เพื่อต้านทานทั้งแรงถอนและแรงต้านทานทางข้าง ได้แก่ตะปู ตะปูควง ตะปูเกลียว เป็นต้น

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมดอายุวันที่ 11-09-2564

ก. <u>แรงถอนของตะปู</u> มีส่วนสำคัญมากในการเลือกชนิดของตะปู โดยทั่วไปตะปูปลายแหลมจะรับแรงถอนได้สูงกว่าตะปูปลายตัด ทั้งนี้เพราะตะปูปลายตัดจะทำลายเสี้ยนไม้มากกว่าตะปูปลายแหลม จากการทดลองและกำหนดส่วนปลอดภัยเท่ากับ 6 ของแรงประลัย จะใช้สูตรแรงถอนคือ

$P = 95 G^{2.5} d$ สำหรับตะปูที่ตอกตั้งฉากกับเสี้ยนไม้ในสภาพแห้ง

เมื่อ P = แรงถอนที่ปลอดภัยเป็น กก ต่อ 1 ซม.ของระยะฝัง

G = ค่าความถ่วงจำเพาะของไม้อบแห้ง

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของตะปู เป็น ซม.

ขนาดของตะปูนิยมเรียกเป็น "เพนนี" เช่นตะปูขนาด 10 เพนนี (10 d) หนัก 10 ปอนด์ ในจำนวน 1,000 ตัว 20 d หนัก 20 ปอนด์ในจำนวน 1000 ตัว เป็นต้น

ถ้าตอกตะปูขนานเสี้ยนไม้ ค่าแรงถอนจะลดลง 33% ไม้สดจะหดตัวมากทำให้กำลังของแรงถอนลดลงตามส่วน จำเป็นต้องใช้ตะปูที่มีผิวบั้ง

ข. <u>การจัดระยะของตะปูและตะปูควง</u> ควรมีระยะดังนี้

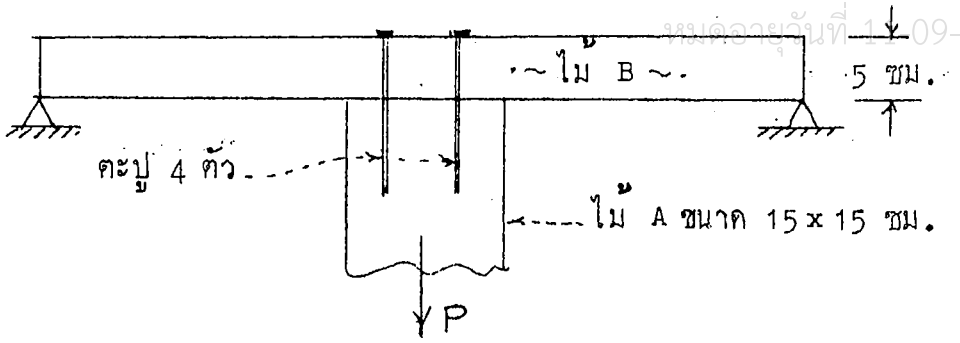
ระยะจากปลาย 20 d

ระยะจากขอบ 5 d

ระยะระหว่างแถว 10 d

ระยะระหว่างศูนย์กลางในแถวเดียวกัน 20 d

<u>ตัวอย่าง</u> จงหา P ที่จะถอนไม้ท่อน A ออกจากไม้แผ่น B กำหนดให้ไม้แผ่น B หนา 5 ซม. ไม้ท่อน A ขนาด 15 x 15 ซม. ไม้ทั้ง 2 ยึดด้วยตะปูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. ยาว 15 ซม. จำนวน 4 ตัว ถพ. ของไม้ท่อน A และไม้ B เท่ากับ 0.9 และ 0.8 ตามลำดับ



คลังความรู้ดิจิทัลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 1-09-2566

วิธีทำ

แรงถอน = $95 G^{2.5} d$ กก/ซม ของความลึกที่ฝัง

= $95(0.9)^{2.5} \times 0.6$ กก/ซม

= 43.8 "

แรงถอนที่ปลายไม้ลด 33% = $43.8 \times 2/3$ = 29.2 "

ความลึกตะปูฝังในไม้ A = 15 − 5 = 10 ซม.

แรงถอนทั้งหมด = $4 \times 10 \times 29.2$ = 1168 กก.

แรง P = 1168 กก. ตอบ

ค. แรงถอนของสลักไม่มีเกลียวหรือลิ่มเหล็ก (Bolts)

สลักไม่มีเกลียวมีรูปตัดกลม ตอกลงในรูเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าสลักไม่มีเกลียว 3 มม. หาได้จากสูตร

$$P = 85 G^2 d$$

เมื่อ P = แรงถอนที่ปลอดภัยเป็น กก.ต่อ 1 ซม. ของระยะฝัง

G = ถ.พ.ของไม้อบแห้ง

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของลิ่มเหล็ก — ซม.

ระยะระหว่างลิ่มเหล็กต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง

ง. แรงถอนของตะปูควงและตะปูเกลียว

ตะปูควงและตะปูเกลียวนี้จะขันลงในรูเจาะขนาด 0.7 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางตะปูสำหรับไม้แห้ง แต่บางครั้งก็ขันลงไปเลยก็มี แรงถอนที่ตั้งฉากกับเสี้ยนไม้ หาได้จากสูตร

$P = 200 G^2 d$ สำหรับตะปูควง

และ $P = 160 G^{1.5} d^{0.75}$ สำหรับตะปูเกลียว

เมื่อ P = แรงถอนที่ปลอดภัย กก/1 ซม. ของระยะฝัง

G = ถพ.ของไม้อบแห้ง

d = เส้นผ่าศูนย์กลางตะปู ซม.

สำหรับตะปูเกลียวที่ขันในแนวขนานเสี้ยน จะต้องลดแรงถอนลง 25%

ตะปูเกลียวใช้แทนสลักเกลียวในโอกาสที่ไม่ต้องการให้หัวเกลียวขันยื่นออกมานอกผิวไม้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

จ. <u>การจัดตำแหน่งของสลักเกลียว</u>

ต้องพยายามจัดให้สลักเกลียวรับแรงเท่ากันทุกตัว . ศูนย์ถ่วงของกลุ่มสลักเกลียวผ่านแนวแรงรวม ระยะต่าง ๆ จัดดังนี้

ระยะจากศูนย์กลางระหว่างสลักเกลียว 4 d

ระยะจากปลายไม้ 7d สำหรับแรงดึง หรือ 4d สำหรับแรงอัด

ระยะจากขอบไม้ 1.5d เมื่อแรงขนานเสี้ยน 4d เมื่อแรงตั้งฉากเสี้ยน

เมื่อ d = เส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียว และเจาะรูไม้ใหญ่กว่าสลักเกลียว 1.5 มม. สำหรับระยะระหว่างแถวจะต้องพิจารณาสำหรับท่อนรับแรงดึง

การคำนวณความต้านทานแรงในแนวเฉียง หาได้จากสูตร

$$N = \frac{PQ}{P \sin^2\theta + Q \cos^2\theta}$$

เมื่อ N = ความต้านทานแรงในแนวเฉียง

P = ความทานแรงทางด้านข้างของสลักเกลียวทางขนานเสี้ยน

Q = " " " " ตั้งฉากเสี้ยน

θ = แรงทางข้างทำมุม θ กับเสี้ยนไม้

เมื่อใช้เหล็กประกับค่า P เพิ่มได้ 25% เว้นไว้แต่ค่า P ได้จากการทดลองแบบใช้แผ่นเหล็กประกับ ค่า Q ไม่ต้องเพิ่ม

<u>ตัวอย่าง</u>

ให้ออกแบบจุดต่อ A ด้วยสลักเกลียวสำหรับไม้หนา 2 นิ้ว ประกอบกันดังรูป กำหนดให้ P = 1400 กก. Q = 500 กก. สำหรับสลักเกลียวขนาด ϕ 5/8" สำหรับไม้หนา 2 นิ้ว เมื่อ P และ Q เป็นค่าที่ได้จากการใช้ไม้ประกับ

<u>วิธีทำ</u>

ค่า P เพิ่มได้ 25% เมื่อมีเหล็กประกับ

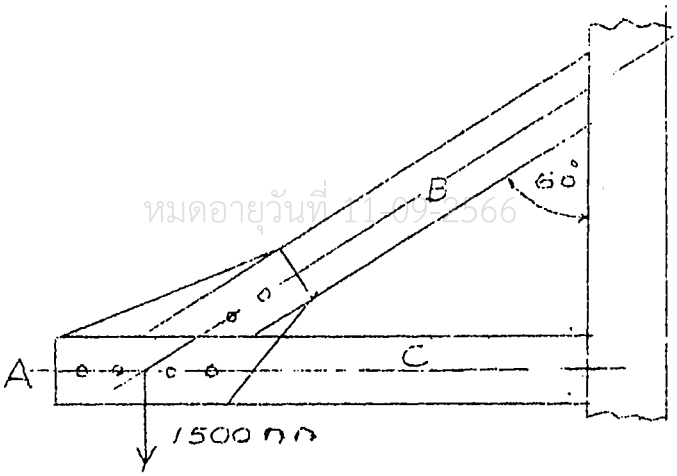
P = 1400 x 1.25 = 1750 กก.

ค่า Q ไม่เพิ่ม

θ = 30°

sin30° = 0.5

cos30° = 0.866



คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11/09/2566

$$N = \frac{P \times Q}{P \sin^2\theta + Q \cos^2\theta} = \frac{1400 \times 500}{1750x(0.5)^2 + 500(0.866)^2}$$

$= 861.56$ กก.

แรงดึงในไม้แผ่นเอียง $B = \frac{1500}{0.5} = 3000$ กก.

จำนวนสลักเกลียวในแผ่น $B = \frac{3000}{1750} = 1.71$ ใช้ 2 ตัว

จำนวนสลักเกลียวในไม้แผ่น $C = \frac{3000}{861.56} = 3.48$ ใช้ 4 ตัว

5.3 ตัวอย่างการออกแบบอาคารไม้

ก. พื้นบ้านหรือพื้นที่ทำการ

โดยทั่วไปพื้นเป็นไม้เนื้อแข็งเข้าลิ้น วางอยู่บนตงระยะห่างกัน 50 ซม.

น้ำหนักพื้นไม้หนา 1 นิ้ว คิดเป็น 25 กก/ม.^{2}

น้ำหนักจร 150 "

รวมน้ำหนัก 175 " หรือใช้ 200

เมื่อพื้นวางต่อเนื่องเกิดโมเมนต์เฉลี่ย $\frac{wl^2}{10}$

โมเมนต์ $= 200 \times \frac{0.5^2}{10} = 5$ กก – ม./ม.

แรงเฉือน $= 200 \times \frac{0.5}{2} = 50$ กก /ม.

$$f = \frac{MC}{I} = \frac{6M}{bd^2} = \frac{6x500}{100x(2.0)^2} = 7.5 \text{ กก/ซม}^2$$

น้อยกว่า 120 กก/ซม.^{2}

$$v = 1.5 \frac{V}{bd} = \frac{1.5 \times 50}{100 \times 2} = 0.375 \text{ กก/ซม}^2$$

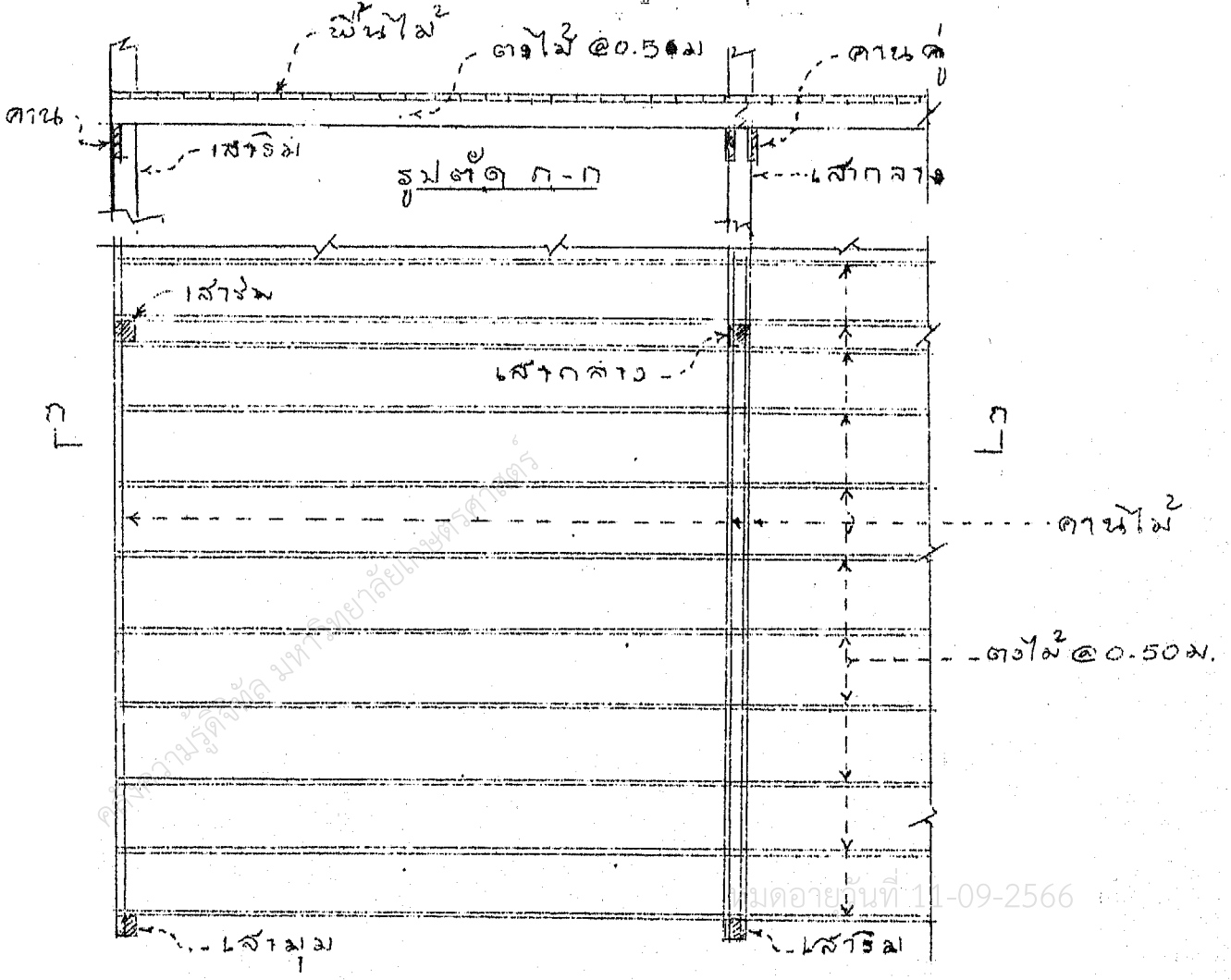
น้อยกว่า 12 กก/ซม.^{2}

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ดังนั้นพื้นไม้จึงไม่สู้จะมีปัญหามากนัก ความหนา 2 ซม. ก็ใช้ได้อย่างเหลือเฟือ สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 400 กก/ม^2 อย่างสบาย

ข. <u>การออกแบบตงและคานไม้</u>

ให้ออกแบบตงและคานของที่พักอาศัย ซึ่งมีระยะระหว่างเสา 4 เมตร ก็อช่วงตง 4 เมตร ช่วงคาน 4 เมตร กำหนดให้น้ำหนักจร 150 กก/ม^2 หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ 120กก/ซม^2 หน่วยแรงเฉือนขนานเสี้ยนที่ยอมให้ 12 กก/ซม^2 หน่วยแรงกดที่ยอมให้ 30 กก/ซม^2 ระยะโก่งของคานในแนวดิ่งไม่เกิน 1 ใน 300 ของช่วงคาน โมดูลัสยืดหยุ่น E = 140,000 กก/ซม^2



<u>แปลน</u>

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โมดอายันที่ 11-09-2566

วิธีทำ

การออกแบบตง

ตงโดยทั่วไปวางห่างกัน 50 ซม. น้ำหนักพื้น 50 กก/ม^2

น้ำหนักพื้นไม้และน้ำหนักจรบนตง = 0.5 x 1 x (50 + 150)

= 100 กก/ม.

แรงเฉือนที่ปลายตง = $\frac{1}{2}$ x 100 x 4 = 200 กก.

โมเมนต์สูงสุด = $\frac{wl^2}{8}$ = $100 \times \frac{4}{8}^2$ = 200 กก – ม

$$f = \frac{6M}{bd^2}$$

$$bd^2 = \frac{6 \times 200 \times 100}{120} = 1000 \text{ ซม}^3$$

ใช้ไม้ตงหนา 2 นิ้ว = 5 ซม.

$$d^2 = \frac{1000}{5} = 200 \text{ ซม}^2$$

$$d = 14.14 \text{ ซม.}$$

หรือ = 15 ซม. = 6 นิ้ว

หน่วยแรงกดที่เกิดขึ้นจริง = $\frac{200}{5x5}$ = 8 กก/ซม^2

< 30 "

ดังนั้นตงขนาด 2"x 6" วางห่างกัน 50 ซม. บนคาน 2 นิ้ว

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน = $1.5 \frac{V}{bd}$ = $1.5 \frac{200}{5x15}$ = 4 กก/ซม^2

< 12 กก/ซม^2 ใช้ได้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุ 11-09-2566

การออกแบบคาน (เสา 15 x 15 ซม.)

น้ำหนักลงบนคาน = 2 x 1 (50+150) = 400 กก/ม.

แรงเฉือนสูงสุด = $400 \times \frac{4}{2}$ = 800 กก.

โมเมนต์สูงสุด = $\frac{1}{8} \times 400 \times 4^2$ = 800 กก – ม.

$bd^2 = \frac{6 \times 800 \times 100}{120}$ = 4000 ซม^3

b = 2 นิ้ว หรือ 5 ซม.

d^2 = 800 ซม^2

d = 28.28 ซม.

ใช้ไม้ขนาด 2" x 10"

หน่วยแรงเฉือน = $\frac{3}{2} \frac{800}{5 \times 25}$ = 9.6 กก/ซม^2 12 ใช้ได้

หน่วยแรงกด = $\frac{800}{2.5 \times 15}$ = 21.3 " 30 ใช้ได้

สมมติคานวางบนเสาที่บากไว้ 2.5 ซม. ตลอดความกว้างเสา 15 ซม. และเสากลางใช้คานคู่ ส่วนเสาริมใช้คานเดี่ยว

ระยะโก่งของคาน = $\frac{5}{384} \frac{wL^4}{EI}$ = $\frac{5}{384} \times \frac{4 \times (400)^4 \times 12}{140000 \times 5 \times (25)^3}$

= 1.46 ซม.

ระยะโก่งที่ยอมให้ = $\frac{400}{300}$ = 1.33 ซม.

$f = \frac{6M}{bd^2} = \frac{6 \times 800 \times 100}{5 \times 25 \times 25}$ = 153.6 กก/ซม^2

คานขนาด 2" x10" พอใช้ได้ เพราะคิดน้ำหนักพื้นไม้สูงไป ซึ่งโดยทั่วไปพื้นหนาไม่เกิน 1 นิ้ว น้ำหนักพื้นไม้จะไม่เกิน 25 กก/ม^2

น้ำหนักลงคานจะเป็น = 2 x1 (25+150) = 350 กก/ม.

โมเมนต์สูงสุด = $\frac{1}{8} \times 350 \times 4^2$ = 700 กก – ม

หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น = $\frac{6 \times 700 \times 100}{5 \times 25 \times 25}$ = 134.4 กก/ซม^2

โดยเฉพาะไม้เนื้อแข็งขนาดคานนี้ใช้ได้ ตารางแสดงขนาดตงและคานไม้เนื้อแข็ง

ดูหน้า 140

ตารางแสดงขนาดของตงและคานไม้เนื้อแข็ง

ตง		คาน ช่วงคาน(ม.) และขนาดคาน(นิ้ว)							
ขนาด – นิ้ว	ช่วงตง	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50
1 $\frac{1}{2}$ x 3	2.00	1 $\frac{1}{2}$ x 5	1 $\frac{1}{2}$ x 6	2 x 6	2 x 7	2 x 8	2 x 8	2 x 9	2 x 10
1 $\frac{1}{2}$ x 4	2.50	1 $\frac{1}{2}$ x 5	1 $\frac{1}{2}$ x 6	2 x 6	2 x 7	2 x 9	2 $\frac{1}{2}$ x 9	2 x 10	2 $\frac{1}{2}$ x 10
1 $\frac{1}{2}$ x 5	3.00	1 $\frac{1}{2}$ x 6	1 $\frac{1}{2}$ x 7	2 x 7	2 x 8	2 x 9	2 x10	2 $\frac{1}{2}$ x 10	2 x 12
1 $\frac{1}{2}$ x 6	3.50	1 $\frac{1}{2}$ x 6	1 $\frac{1}{2}$ x 7	2 x 8	2 x 8	2 x10	2 $\frac{1}{2}$ x10	2 x 12	2 $\frac{1}{2}$ x 12
2 x 6	4.00	1 $\frac{1}{2}$ x 6	1 $\frac{1}{2}$ x 8	2 x 8	2 x 9	2 x 10	2 x12	2 $\frac{1}{2}$ x 12	3 x 12
2 x 7	4.50	1 $\frac{1}{2}$ x 7	1 $\frac{1}{2}$ x 8	2 x 8	2 x10	2 x 12	2 x 12	3 x 12	3 x 12
2 x 8	5.00	1 $\frac{1}{2}$ x 8	2 x 8	2 x 9	2 x10	2 x 12	2 $\frac{1}{2}$ x 12	3 x 12	3 $\frac{1}{2}$ x 12
2 x 9	5.50	1 $\frac{1}{2}$ x 8	2 x 8	2 x 9	2 $\frac{1}{2}$ x10	2 x 12	2 $\frac{1}{2}$ x 12	3 $\frac{1}{2}$ x 12	4 x 12
2 x10	6.00	1 $\frac{1}{2}$ x 8	2 x 8	2 x 10	2 $\frac{1}{2}$ x10	2 $\frac{1}{2}$ x 12	3 x 12	3 $\frac{1}{2}$ x 12	4 x 12

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ค. <u>การออกแบบเสา</u>

<u>ให้ออกแบบเสาไม้ตัน</u> ซึ่งรับน้ำหนัก 12,000 กก. ความยาวเสา 3.0 ม. หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ 120 กก/ซม^2

<u>วิธีทำ</u> สมมติ $\frac{P}{A} = 90$ กก/ซม^2

พื้นที่หน้าตัดเสา $= \frac{12000}{90} = 138$ ซม^2

เลือกเสาขนาด 6"x 6"

$\frac{L}{d} = \frac{300}{15} = 20 > 12$

$\frac{P}{A} = 120(1.33 - \frac{20}{35}) = 91.2$ กก/ซม^2

น้ำหนักปลอดภัย $= 91.2 \times 15 \times 15$

$= 20520$ กก $>$ 12000 กก ใช้ได้

ถ้าเลือกขนาด 5" x 5"

$L/d = \frac{300}{12.5} = 24$

$\frac{P}{A} = 120(1.33 - \frac{24}{35}) = 77.3$ กก/ซม^2

น้ำหนักปลอดภัย $= 77.3 \times 12.5 \times 12.5$

$= 12080 > 12000$ กก ใช้ได้

ใช้ขนาดเสา 5" x 5"

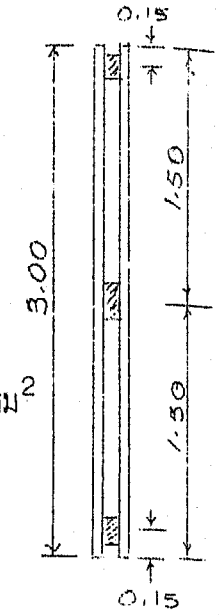
<u>ให้ออกแบบเสาประกอบไม้แผ่น</u> รับน้ำหนัก 6000 กก. ไม้หนา 2 นิ้ว ยาว 3 ม. ยึดปลายที่ 15 ซม. จากปลายเสา หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ 120 กก/ซม^2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 140,000 กก/ซม^2

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

<u>วิธีทำ</u>

ระยะการยึดปลาย $= \frac{15}{300} = \frac{1}{20}$

ใช้ $\frac{P}{A} = \frac{0.75E}{(L/d)^2} = \frac{0.75 \times 140000}{(\frac{300}{5})^2} = 29.17$ กก/ซม^2



พื้นที่หน้าตัดเสาที่ต้องการ $= \frac{6000}{29.17} = 205.7$ ซม.^{2}

ความกว้างที่ต้องการ $= \frac{205.7}{2x5} = 20.56$ ซม.

ใช้ไม้แผ่นขนาด 2 – 2"x 8"

ตรวจสอบ โดยคิดอย่างเสาตันด้านลึก

$$\frac{P}{A} = \frac{0.30\ E}{(L/d)^2} = \frac{0.3 \times 140000}{(\frac{300}{20})^2} = 186.6 \text{ กก/ซม}^2$$

$$= 186.6 \times 2(5 \times 20) = 37333 > 6000 \text{ กก}$$

ดังนั้นเสาขนาด 2 – 2"x8" ใช้ได้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

5.4 การออกแบบโครงหลังคา

โรงฝึกงานแห่งหนึ่งกว้าง 12.00 ม. ระยะระหว่างเสาหรือโครง 4.05 ม. หลังคามุงด้วยกระเบื้องลอนคู่ หลังคายื่นออกข้างละ 2.50 ม. (ดังรูป)

วิธีทำ สมมติน้ำหนักหลังคา+โครง+แป+แรงลม = 100 / ม^2

แรงปฏิกิริยาจากหลังคาลงเสา = 100×4.05×8.5 = 3420 กก.

โมเมนต์ที่กึ่งกลางโครง = $3420\times6-3420\times\frac{8.5}{2}$

= 20520−14500 = 6020 กก.ม.

แรงที่เกิดในจันทัน (ประมาณ) = $\frac{6020}{2.7}$ = 2230 กก.(อัด)

สมมติไม้ที่ใช้ขนาดปานกลาง แรงอัดที่ยอมให้ 75 กก./ซม^2

เนื้อที่หน้าตัดไม้จันทัน = $\frac{2230}{75}$ = 29.7 ซม^2.

ใช้ไม้ขนาด 2-6" × $1\frac{1}{2}$" เผื่อสำหรับการเจาะฝังน็อต

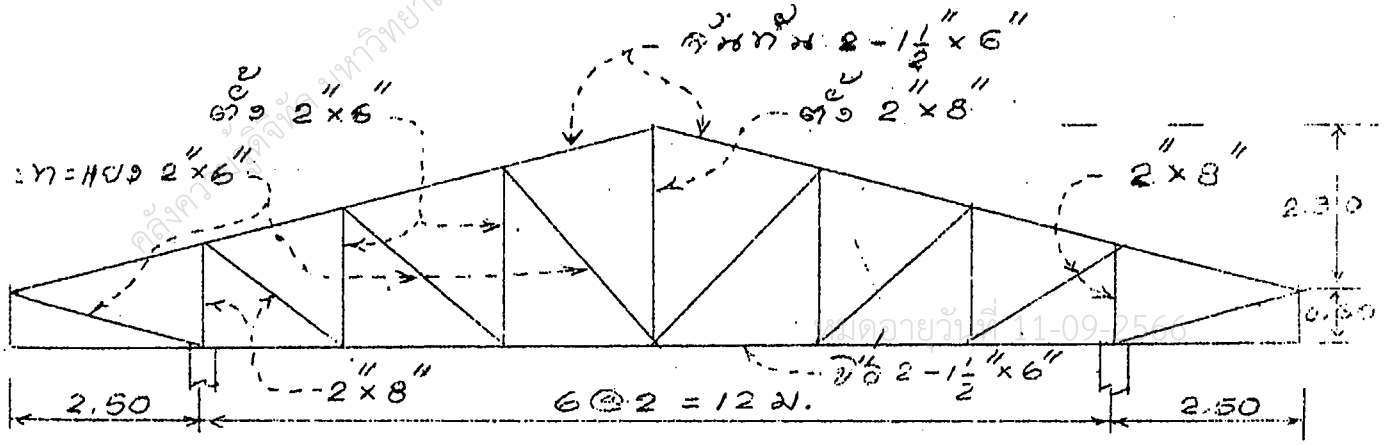
ขื่อใช้ขนาด 2-6" × $1\frac{1}{2}$"

ไม้ตั้งพื้นที่ = $\frac{3420}{75}$ = 45.6 ซม^2

ใช้ไม้ขนาด 2"×8"

ไม้ทะแยงใกล้เสาขนาด 2"×8" และที่ศูนย์กลางโครงขนาด 2"×6" จุดต่อใช้น็อตขนาดเส้นผ่าศูนย์ 12 มม. 2 ตัวทุก ๆ ชิ้นส่วน โดยใช้แผ่นเหล็กขนาดหนา 6 มม. ขนาดของโครงหลังแสดงในรูป

แป้ใช้ขนาด 2"×5" ตั้งห่างกัน 1 ม.



รูปโครงหลังคา (ควรยกที่กึ่งกลางประมาณ 12 ซม.)

บทที่ 6
การออกแบบโครงสร้างเหล็ก

6.1 ความทั่วไป

เหล็กเป็นวัสดุยืดหยุ่นที่คุ้นเคยใช้ในการก่อสร้างอาคารต่าง ๆ ในที่นี้หมายถึงเหล็กรูปพรรณที่ผลิตขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป โดยเอาชิ้นส่วนเหล็กเหล่านั้นมาประกอบเป็นโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักที่ต้องการ เหล็กรูปพรรณมีคุณสมบัติสามารถรับแรงตามแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดได้

การทดลอง เมื่อนำแท่งเหล็กที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานกำหนดให้มาดึงโดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุ วัดขนาดของแท่งเหล็กและคำนวณได้ดังนี้

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็ก เป็น ตร.ซม.

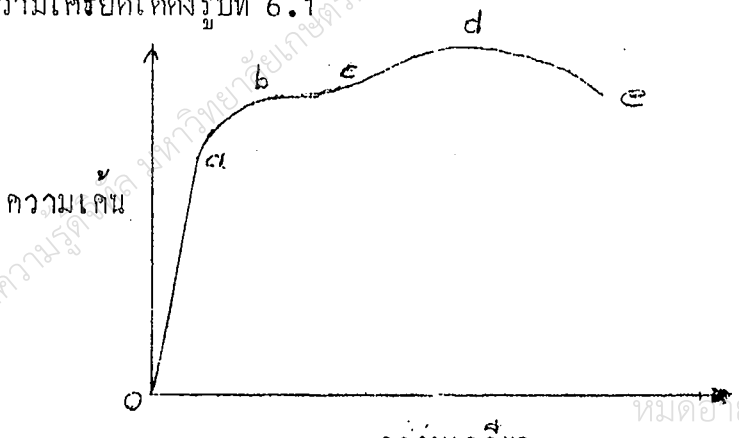
L = ระยะระหว่างจุดที่กำหนดให้ในแท่งเหล็ก เป็น ซม.(50 ซม.)

การทดลองวัดแรงดึงและระยะยืดของแท่งเหล็กอย่างสม่ำเสมอ เช่น P = แรงดึง เป็น กก. ความยาว L ยืดออก e ซม.

ดังนั้น ความเค้น (Stress) = $\frac{P}{A}$ กก/ซม^2

ความเครียด (Strain) = $\frac{e}{L}$ ซม/ซม (ไม่มีหน่วย)

เอาผลการทดลองนี้มาบันทึกลงเป็นกราฟแสดงไดอะแกรมของความเค้น–ความเครียดได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1

รูปที่ 6.1 แสดง Stress-strain curve ของเหล็กมาตรฐานเมื่อรับแรงดึง

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ระยะจาก O ถึง a แรงดึงเป็นสัดส่วนกับการยืด ตามกฎของฮุกเป็นเส้น ตรง. ที่จุด a แรงเค้นเรียกว่า Proportional limit ความชันของเส้น Oa หรือ Stress ÷ Strain ระหว่าง Oa เรียกว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ซึ่งมีค่าคงตัว แทนด้วย E เรียกว่า Young's Modulus ค่า E ของเหล็กกล้าทั่วไปมีค่าระหว่าง 2,000 ถึง 2,100 ตัน/ซม.^{2} ช่วงนี้ถ้าเอาแรงดึงออกเหล็กจะหดกลับที่เดิม เลยจุด a เหล็กจะยืดไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดึง จุด b – เหล็กเริ่มยืดโดยไม่ได้เพิ่มแรง เรียกว่าจุดครากของเหล็ก (Yield Strength, Fy) เมื่อเพิ่มแรงต่อไปอีกความเครียดจะเพิ่มมากจนถึง c เริ่มแสดงความแข็งเพิ่มขึ้น ลาดของเส้นชันกว่าในช่วง bc. จนกระทั่งถึงจุด d ซึ่งสูงสุด เรียกว่า แรงประลัย (Ultimate strength , Fu) ความเค้นจะลดลงจุดกระทั่งแห่งเหล็กขาดที่จุด e

ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างเหล็ก สำคัญอยู่ที่การจะเลือกหน่วยแรงในการใช้ให้เหมาะสมกับสภาพเป็นจริงของโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนที่รับแรงอัดตามแกน ถ้ามีความยาวมาก (มีความชลูดมาก คือ ความยาวเทียบกับขนาด) จะมีโอกาสพับได้ง่าย นั่นคือ หน่วยแรงปลอดภัยสำหรับแรงอัดของเหล็กต้องใช้น้อยลง มาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กรูปพรรณของประเทศไทยคือมาตรฐาน วสท.1003–18 ซึ่งมีความคล้ายกับมาตรฐาน AISC (American Institute of Steel Construction) นอกจากนั้นมีมาตรฐานอื่น ๆ แต่จะไม่กล่าวในที่นี้ สำหรับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กนั้นได้มีการปรับปรุงให้ใกล้เคียงกับธรรมชาติมาตลอด สูตรในการใช้จะสลับซับซ้อนมากขึ้นตามลำดับ แต่ถ้าอาคารขนาดเล็กอาจจะออกแบบอย่างง่ายก็ได้

6.2 สูตรการคำนวณ และข้อกำหนดที่สำคัญ

ตามมาตรฐาน วสท.1003 – 18 ข้อ 4200 หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับเหล็กก่อสร้างให้คำนวณออกแบบโดยใช้ค่า Fy ตามเกณฑ์ต่อไปนี้ คือ

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

สำหรับเหล็กทั่วไปซึ่งหนาไม่เกิน 40 มม. ถ้าไม่มีเอกสารแสดงผลการทดสอบ ให้ใช้ F_y ได้ไม่เกิน .....2,500 กก/ซม^2

สำหรับเหล็กทั่วไปซึ่งหนากว่า 40 มม. ถ้าไม่มีเอกสารแสดงผลการทดสอบ ให้ใช้ F_y ได้ไม่เกิน ..... 2,200 กก/ซม^2

(ก) <u>หน่วยแรงดึงที่ยอมให้</u>

พิจารณาจากเนื้อที่หน้าตัดสุทธิ

$$F_t = 0.60\ F_y \qquad \text{.....(6 - 1)}$$

โดยที่ F_t = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (กก/ซม^2)

(ข) <u>หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้</u>

$$F_v = 0.40\ F_y \qquad \text{.....(6 - 2)}$$

โดยที่ F_v = หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ (กก/ซม^2)

(ค) <u>หน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกน</u>

(1) พิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดขององค์อาคารรับแรงอัดเหล็ก (Main member) ซึ่งมีค่ามากของอัตราความชลูด $\frac{KL}{r} < \lambda_c$ หน่วยแรงอัดในแนวแกนที่ยอมให้ คือ

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2\lambda_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8}\left(\frac{KL/r}{\lambda_c}\right) - \frac{(KL/r)^3}{8\lambda_c^3}} \qquad \text{.....(6 - 3)}$$

เมื่อ λ_c = อัตราส่วนความชลูดวิกฤต

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \qquad \text{.....(6 - 4)}$$

(2) องค์อาคารที่รับแรงอัดเหล็กที่มี $\frac{KL}{r} > \lambda_c$ หน่วยแรงที่ยอมให้

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \qquad \text{.....(6 - 5)}$$

(3) องค์อาคารรับแรงอัดรอง (Secondary member) และค้ำยัน (Bracing) ที่มี $\frac{L}{r} > 120$

ในกรณีนี้ k = 1

F_{as} = หน่วยแรงที่ยอมให้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
หมดอายุวันที่ 1[illegible]-09-2566

F_{as} = $\dfrac{F_a \text{ จากสมการ(6 – 3) หรือ(6 – 5)}}{1.6 - \frac{L}{200r}}$ .....(6 – 6)

โดยใช้ค่า Fa ที่น้อยกว่ามาคำนวณ

(4) สำหรับแผ่นเหล็กเสริมข้างทางตั้งของคานประกอบบนพื้นที่ทั้งหมด หน่วยแรงที่ยอมให้

$$F_a = 0.6 F_y \quad \text{.....(6 - 7)}$$

(5) สำหรับการโก่งของแผ่นแกนของคานรูปพรรณที่รอยต่อก หน่วยแรงที่ยอมให้

$$F_a = 0.75 F_y \quad \text{.....(6 - 8)}$$

เมื่อ $\Lambda = \dfrac{KL}{r}$ .....(6 - 9)

โดยที่ KL = ความยาวประสิทธิผลขององค์อาคารที่จะเกิดการโค้งงอเป็น ซม.

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = รัศมีไจเรชันของพื้นที่รอบแกนที่เกิดการโค้งงอเป็น ซม.

I = โมเมนต์อิเนอเชียรอบแกนที่จะเกิดการโค้ง $ซม^4$

A = พื้นที่หน้าตัดองค์อาคาร $ซม^2$

K = ตัวคูณประกอบของความยาวประสิทธิผล

L = ช่วงยาวอิสระที่ไม่มีสิ่งยึดหางข้าง

Λ = อัตราส่วนความชลูด (Slemderness ratio)

Λ_c = อัตราส่วนความชลูดวิกฤต

ค่าของ K = 0.65 เมื่อปลายทั้งสองข้างยึดแน่นไม่เคลื่อนที่

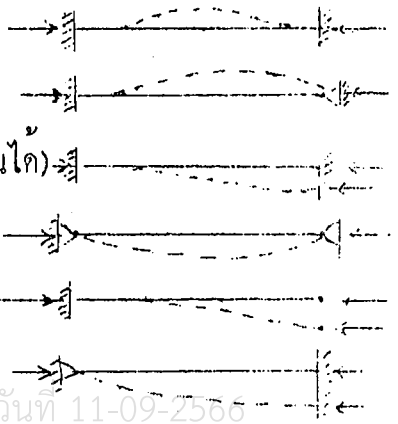
= 0.80 เมื่อปลายหนึ่งยึดแน่นอีกปลายหนึ่งยึดหมุนได้

= 1.2 เมื่อปลายทั้งสองยึดแน่น (แต่ปลายหนึ่งเลื่อนได้)

= 1.0 เมื่อปลายทั้งสองยึดหมุนได้ไม่เคลื่อนที่

= 2.1 เมื่อปลายข้างหนึ่งเคลื่อนที่โดยอิสระ

= 2.0 เมื่อปลายยึดแน่นเคลื่อนที่ ปลายหมุนอยู่ที่



คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(ง). หน่วยแรงดัดที่ยอมให้

(1) สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด เช่น คานเหล็กรูปพรรณ คานเหล็กประกอบ และองค์อาคารประกอบอื่น ๆ (นอกจากองค์อาคารที่มีหน้าตัดเป็นกล่อง) ความกว้างและความหนาของส่วนต่าง ๆ คือ $\frac{b}{t}$ ไม่เกิน $\frac{74}{\sqrt{F_y}}$ และรับแรงดัดรอบแกน หลัก หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเนื้อที่รับแรงอัดที่ผิวริมนอกสุดคือค่ามากที่สุดได้จากการคำนวณจากสมการ (6 – 10) และ (6 – 11) และ (6 – 12) แต่ไม่ว่ากรณีใดต้องไม่เกิน $0.6\ F_y$

เมื่อ $\sqrt{\frac{717(10)^4\ C_b}{F_y}} \leq \frac{L}{r_t} \leq \sqrt{\frac{3585(10)^4\ C_b}{F_y}}$

ใช้ $F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y\left(\frac{L}{r_t}\right)^2}{10756(10)^4\ C_b}\right] F_y$ ..... (6 – 10)

เมื่อ $\frac{L}{r_t} \geq \sqrt{\frac{3585(10)^4 C_b}{F_y}}$

ใช้ $F_b = \frac{1195(10)^4\ C_b}{\left(\frac{L}{r_t}\right)^2}$ ..... (6 – 11)

หรือเมื่อปีกรับแรงอัดเป็นแผ่นเต็มแผ่น หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเนื้อที่หน้าตัดไม่น้อยกว่าเนื้อที่หน้าตัดปีกรับแรงดึง

ใช้ $F_b = \frac{843600\ C_b}{L\ h/A_f}$ ..... (6 – 12)

โดยที่ F_b = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ (กก/ซม^2)

L = ความยาวที่ไม่มีการค้ำยึดของปีกคานรับแรงอัด ซม.

r_t = รัศมีไจเรชัน ดัดรอบแกนในระนาบของแผ่นเอวคานของหน้าตัดรูป T ซึ่งประกอบด้วยปีกคานรับแรงอัดบวก $\frac{1}{6}$ ของความลึกของคาน

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2$$

แต่ต้องมีค่าไม่สูงกว่าหรือเท่ากับ 2.3 โดยที่ M_1 และ M_2 เป็นโมเมนต์ดัดที่มีค่าน้อยกว่าและสูงกว่าตามลำดับรอบแกนหลักที่ปลายของช่วงคานที่ไม่ค้ำยัน $\left(\frac{M_1}{M_2}\right)$ มีค่าเป็นบวกเมื่อเกิดการดัดโค้งกลับกัน และมีค่าเป็นลบเมื่อเกิดการดัดโค้งเดี่ยว ในกรณีที่โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของช่วงคาน M_1 มีค่ามากกว่า M_2 ค่า $C_b = 1$ ถ้าโมเมนต์ในช่วงคานมากกว่าโมเมนต์ที่ปลายคาน

h = ความลึกของคาน (ซม)

A_f = พื้นที่หน้าตัดของปีกคานรับแรงอัด

(2) สำหรับองค์อาคารเหล็กแบบหล่อหลอมและแบบกลอง ใช้หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดที่ยอมให้เนื่องจากแรงอัดที่ผิวนอก มีค่าเท่ากับ $F_t = 0.6 F_y$

(จ) หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้

สำหรับพื้นที่สัมผัสกับหมุดและแผ่นเสริมกำลังแบกทานและสำหรับผิวกลึงต่างๆ หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ คือ

$$F_p = 0.90 F_y \quad \text{---------- (6 - 13)}$$

ถ้าวัสดุ 2 ชนิดสัมผัสกันโดยการกดให้ใช้ค่า F_p ของวัสดุที่มีค่าน้อยกว่า

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

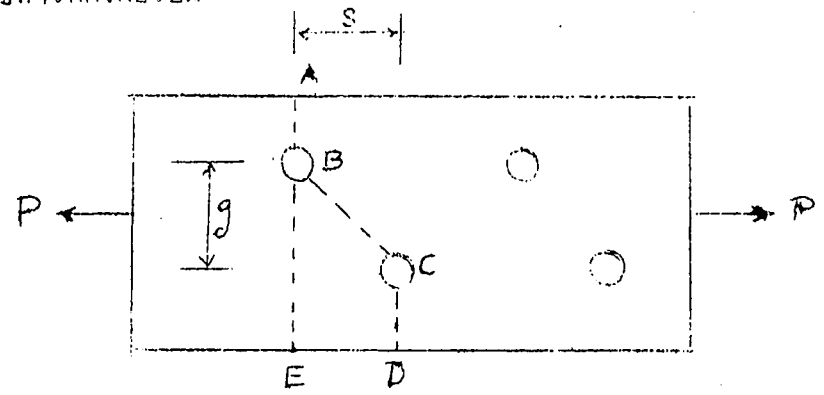
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

6.3 การออกแบบเหล็กรับแรงดึง

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าชิ้นส่วนเหล็กที่ประกอบเป็นโครงสร้างนั้น ใช้ต่อด้วย 2 วิธี คือ ใช้เชื่อม และต่อโดยใช้น็อตหรือหมุดย้ำ การต่อโดยเชื่อมจะไม่มีปัญหาเรื่องเนื้อที่เหล็กหายไป เพราะชิ้นส่วนรับแรงดึงจะไม่มีผลในเรื่องการโค้ง โก่ง งอ สูตรทั่วไป คือ

$$F_t = \frac{P}{A}$$

ในกรณีที่มีการเจาะรูต่อด้วยน็อตหรือหมุดย้ำ ดังรูปที่ 6.2 การคิดเนื้อที่หน้าตัดสุทธิทำได้ดังต่อไปนี้



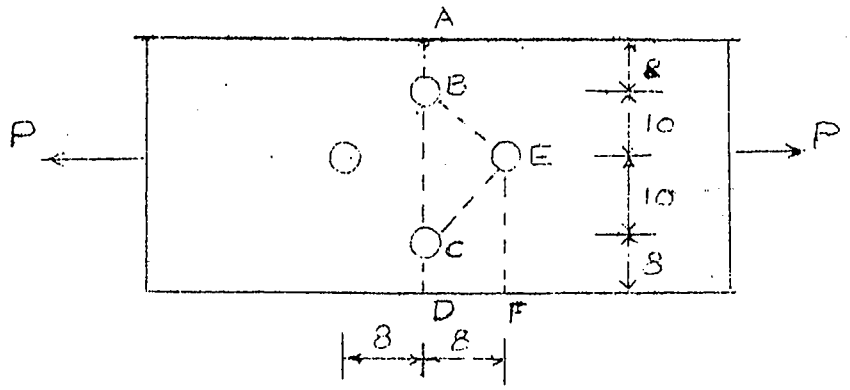
รูปที่ 6.2

ให้ระยะระหว่างรูที่ขนานกับแกนชิ้นส่วนเป็น s ระยะระหว่างรูที่แนวตั้งฉากกับแกน เป็น g เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะเป็น d ความกว้างสุทธิแนว ABE $= (b-d)$

ความกว้างสุทธิแนว ABCD $= \left(b-2d+\frac{s^2}{4g}\right)$ แต่ถึงอย่างไรก็ตามความกว้างสุทธิจะต้องหาหลาย ๆ แนว จะต้องไม่เกินกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างทั้งหมดในแนวตั้งฉากกับแรง

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง เหล็กแผ่นกว้าง 36 ซม. หนา 12 มม. มีการเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มม. กำหนดหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ F_t = 1400 กก/ซม^2 ให้หาแรงดึงทั้งหมดที่ยอมให้สำหรับเหล็กแผ่นนี้ดังรูป



รูปที่ 6.3

วิธีทำ ความกว้างสุทธิของเหล็กแผ่นตามแนว

ABCD = 36 − 2 × 2.5 = 31 ซม.

ABEF = $36 - 2 \times 2.5 + \frac{8^2}{4 \times 10}$ = 32.6 ซม.

ABECD = $36 - 3 \times 2.5 + \frac{8^2}{4 \times 10} + \frac{8^2}{4 \times 10}$ = 31.7 ซม.

ดังนั้นความกว้างสุทธิน้อยที่สุด = 31 ซม.

เนื้อที่หน้าตัดสุทธิน้อยที่สุด = 31 × 1.2 = 37.2 ซม^2.

เนื้อที่หน้าตัดสุทธิตามมาตรฐาน AISC = 0.85 (36×1.2) = 36.72 ซม^2.

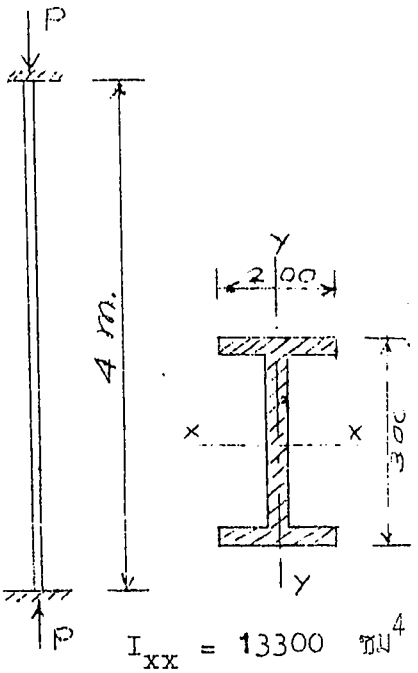
ดังนั้นแรงดึงที่ยอมให้ = 1400 × 36.72 = 51,408 กก.

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

6.4 การออกแบบเหล็กรับแรงอัดตามแกน

ในกรณีที่เป็นเสาหรือชิ้นส่วนของโครงสร้างข้อหมุนที่เกิดรับแรงอัด ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเสา เมื่อมีแรงอัดตามแกนย่อมอาจจะเกิดการโก่งงอหรือพังก่อนที่เหล็กจะรับแรงถึงขีดที่ยอมให้ตามธรรมดาเช่น ในเรื่องแรงดัง

ตัวอย่าง เหล็ก WF = 300 $\times$ 200 มม. 65.4 กก/ม ยาว 4 เมตร รับแรงอัดตามแกนดังรูป โดยมาตรฐาน AISC และใช้เหล็กชนิด A 36 (F_y = 2520 กก/ซม^2 โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก 2.1 $\times$ 10^6 กก/ซม^2) อยากทราบว่าเสาเหล็กนี้รับแรงที่ย่อมให้ได้เท่าใด



I_{xx} = 13300 ซม^4

I_{yy} = 1900 ซม^4

A = 83.36 ซม^2

r_x = 12.6 ซม.

r_y = 4.77 ซม.

วิธีทำ จาก $\Lambda_c = \sqrt{2\frac{\pi^2 E}{F_y}}$

$$= \sqrt{\frac{2(3.14)^2 \times 2.1 \times 10^6}{2520}}$$

$$= 128.2$$

อัตราส่วนความชลูด $= \frac{KL}{r}_c = \frac{0.65 \times 400}{4.77} = 54.50$

$$\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2\Lambda_c}\right] F_y = \left[1 - 0.090\right] 2520 = 2293.2 \text{ กก/ซม}^2$$

ส่วนปลอดภัย $= \frac{5}{3} + \frac{3}{8}\left(\frac{KL/r}{\Lambda_c}\right) - \left(\frac{KL/r}{8\Lambda_c^3}\right) = 1.817$

$$F_a = \frac{2293.2}{1.817} = 1262 \text{ กก/ซม}^2$$

ดังนั้นเสาเหล็กนี้ย่อมให้รับแรง = 1262 $\times$ 83.36 = 105,200 กก

ในกรณีที่เป็นการออกแบบอาจจะสมมติขนาดของหน้าตัดเสาก่อน แล้วจึงหาแรงที่ย่อมให้ การที่เสาจะพังนั้นจะเกิดในแกนที่มีค่ารัศมีไจเรชันน้อยที่สุด คือ 4.77 ซม. สำหรับชิ้นส่วนที่มีความยาวพอสมควรอาจจะใช้ค่า F_a = 1200 กก/ซม^2 เลยที่เดียว ก็ได้เท่าที่มีประสบการณ์มา

6.5 การออกแบบคานเหล็ก

คานจะต้องมีคุณสมบัติต้านทานแรงดัดและแรงเฉือนได้

สูตรแรงดัด $f_b = \frac{My}{I}$

หรือ $f_{b_{max}} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S}$

สูตรแรงเฉือน $f_v = \frac{VQ}{It}$

เมื่อ f_b = หน่วยแรงดัดเนื่องจากโมเมนต์ที่ระยะ y จากแกนสะเทิน

y = ระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน

S = โมดูลัสหน้าตัด

c = ระยะมากที่สุดจากแกนสะเทินถึงขอบนอกคาน

I = โมเมนต์อินเนอร์เชียของรูปหน้าตัดของแกนสะเทิน

f_v = หน่วยแรงเฉือนในเหล็กแผ่นตั้ง (web) ของคานที่ระยะห่าง y จากแกนสะเทิน

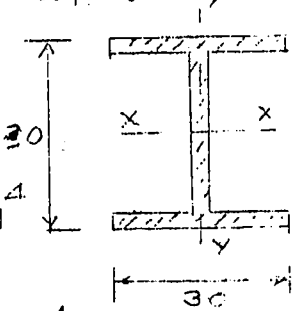
V = แรงเฉือนทั้งหมดในแกนตั้ง

Q = โมเมนต์รอบแกนสะเทินของเนื้อที่ส่วนที่อยู่นอกแนวที่ต้องการหา

t = ความหนาของหน้าตัดที่ต้องการหาแรงเฉือน

ตัวอย่าง เหล็ก $f_y = 2500$ กก/ซม^2 ให้ $F_b = 0.6 f_y$ และ $F_v = 0.4 f_y$

สมมติเหล็กดังรูปขนาด 30 + 30 ซม หนา 1 ซม



$A = 30 + 30 + 28 = 88$ ซม^2

$I_{xx} = \frac{30 \times 30^3}{12} - \frac{29 \times 28^3}{12} = 67500 - 53050 = 14,450$ ซม^4

$I_{yy} = 2 \times \frac{2 \times 30^3}{12} + \frac{28 \times 1^3}{12} = 9000 + 2.3 = 9002.3$ ซม^4

$Q = A'\bar{y} = 30 \times 1 \times 14.5 + 14 \times 1 \times 7 = 533$ ซม^3

รับโมเมนต์สูงสุด $M = \frac{1500 \times 14450}{15} = 1,445,000$ กก-ซม

รับแรงเฉือนสูงสุด $V = \frac{1000 \times 14450 \times 1}{538} = 27,110$ กก ตามต้องการ

หรือ $V = f_v A_w = 1000 \times 30 \times 1 = 30,000$ กก. ใกล้เคียงกัน

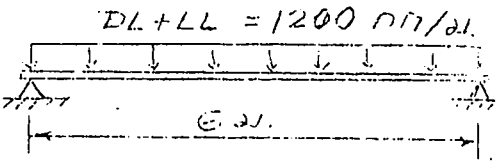
คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ห้องสมุดวันที่ 11-09-2566

ตัวอย่าง ให้คำนวณและออกแบบคานซึ่งรับน้ำหนักแผ่ดังรูป สมมติว่าปีกของเหล็กมีค้ำยันกันบิดอย่างเพียงพอ กำหนดให้

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ = 1500 กก/ซม.^{2}

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ = 900 กก/ซม.^{2}

การโก่งของคานไม่เกิน $\frac{1}{360}$ ของช่วงคาน



วิธีทำ

ค่าโมเมนต์มากที่สุด = $\frac{1200 \times 6^2}{8}$ = 5400 กก.ม.

ค่าแรงเฉือนมากที่สุด = $\frac{1200 \times 6}{2}$ = 3600 กก.

ค่าโมดูลัสของหน้าตัด S = $\frac{5400 \times 100}{1500}$ = 360 ซม.^{3}

เลือกให้ WF 300×150 มม – 32 กก/ม S = 424 ซม.^{3} ความหนาของแผ่นตั้ง t_w = 8 มม.

พื้นที่ของแผ่นตั้ง A_w = 0.8×30 = 24 ซม.^{2}

ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น = $\frac{3600}{24}$ = 150 กก/ซม.^{2} < 900 กก/ซม.^{2}

ตรวจการโก่งของคาน = $\frac{5}{384} W \frac{L^4}{EI}$

= $\frac{5}{384} \times \frac{12 \times (600)^4}{2.1 \times 10^6 \times 6320}$ = 1.525 ซม.

$\frac{L}{360}$ = $\frac{600}{360}$ = 1.667 > 1.525 ซม. ใช้ได้

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

5.6 การออกแบบโครงหลังคา

ตัวอย่างการออกแบบโครงหลังคาของอาคารขนาด 13 x 45 ม. มุงด้วยกระเบื้องลอนคู่ แป็เหล็กรูปซี โครงวางอยู่บนเสาที่มั่นคงแข็งแรง

ที่ทำ กำหนดให้ช่วงโครง 13 เมตร ยื่นออกข้างละ 2.50 ม. ระยะระหว่างโครง 4.50 ม. แปวางห่างกัน 1 ม.

มติ น้ำหนักหลังคาและเพดาน = 40 กก/ม^2

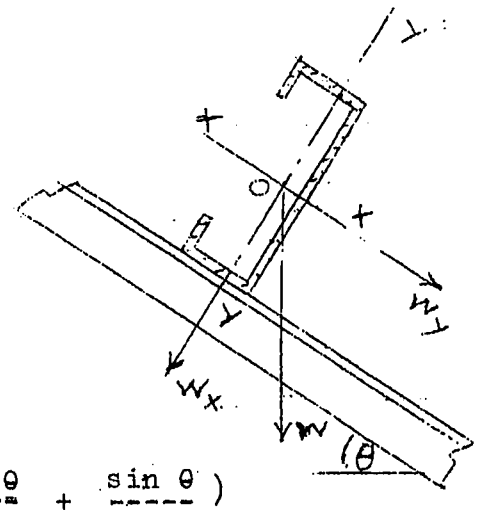
แรงลมในทิศตั้งฉากกับหลังคา = 20 "

โครงหลังคาและแป = 20 "

รวมน้ำหนักลงโครง = 80 "

พิจารณาแป โดยทั่วไปแปจะวางในลักษณะเอียง

ตามหลักน้ำหนักที่ลงแปจะเป็นดังรูป



$W_x = W\cos\theta$

$W_y = W\sin\theta$

เมื่อถือว่าแปวางเป็นคานธรรมดา

$M_x = W\cos\theta \cdot \frac{\ell^2}{8}$

$M_y = W\sin\theta \cdot \frac{\ell^2}{8}$

เมื่อแรงที่เกิดไม่เกินหน่วยแรงที่กำหนดให้จะได้

$$f \leq \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} = w\frac{\ell^2}{8}\left(\frac{\cos\theta}{S_x} + \frac{\sin\theta}{S_y}\right)$$

ในกรณีที่มุมลาดหลังคาน้อยอาจจะคำนวณโดยคำประมาณ เช่น ใช้หน่วยแรงยอมให้ 1000 กก/ซม^2 คำนวณเฉพาะแกน x ก็ได้

น้ำหนักลงแป = 60 x 1 = 60 กก/ม.

M_x = $60 \times \frac{4.5^2}{8}$ = 152 กก-ม.

$S_x = \frac{M_x}{f} = \frac{15200}{1000} = 15.2$ ซม^3

ใช้แป [100 x 50 x 20 x 2.3 มม หนัก 4.06 กก/ม. เนื้อที่หน้าตัด 5.17 ซม^2

S_x = 16.1 ซม^3

ในกรณีที่ช่วงแปยาวเช่นเกิน 4.50 ม. ควรมีเหล็กยึดกลางคันโก่ง

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

พิจารณาโครง (เพดานแขวนกับแป)

น้ำหนักลงข้อต่อกลาง = 80 + 2.167 + 4.50 = 780 กก.

ข้อต่อร่วมรางน้ำ = 80 + 1.25 + 4.50 + 50 = 500 กก.

น้ำหนักลงเสา = 500 + 2340 + 390 = 3230 กก.

โมเมนต์รอบกึ่งกลางโครง = 3230 + 6.5 − 780 (2.17 + 4.33 + 6.5) − 500 + 9

= 6330 กก-ม

แรงอัดบนจันทัน = $\frac{\text{โมเมนต์}}{\text{ระยะตงฉาก}} = \frac{6330}{2.80}$ = 2260 กก.

โดยทั่วไปจันทันจะเกิดแรงรวมของแรงอัดและโมเมนต์ เนื่องจากแปวางไม่ตรงข้อต่อ ในที่นี้สมมติแปบางตัววางตรงกลางช่วงข้อต่อ

$$M = \frac{P\ell}{4} = (40 + 4.5)\frac{2.17}{4} = 97.65 \text{ กก-ม}$$

สมมติใช้ 2 ⌐ L 60 + 60 + 4 มม. A = 2 + 4.69 = 9.38 ซม^2

S_x = 2 + 3.66 = 7.32 ซม^3

W = 2 + 3.68 = 7.36 กก/ม

$$f = \frac{P}{A} + \frac{M}{S_x} = \frac{2260}{9.38} + \frac{9765}{7.32} = 241 + 1334 = 1575 \text{ กก/ซม}^2$$

อยู่ในเกณฑ์ใช้ได้เนื่องจากข้อต่อจริงไม่หมุนเต็มที่

ใช้ 2 L 65 + 65 + 4 มม น.น. = 2 + 3.88 กก/ม.

ส่วนชื่อนั้นไม่มีโมเมนต์เนื่องจากแปจึง

ใช้ 2 L 50 + 50 + 4 มม น.น. 2 + 2.93 กก/ม.

สำหรับเหล็กตั้งรับแรงสูงสุด = 3230 − 780 = 2450 กก.

$$A = \frac{P}{f} = \frac{2450}{1200} = 2.04 \text{ ซม}^2$$

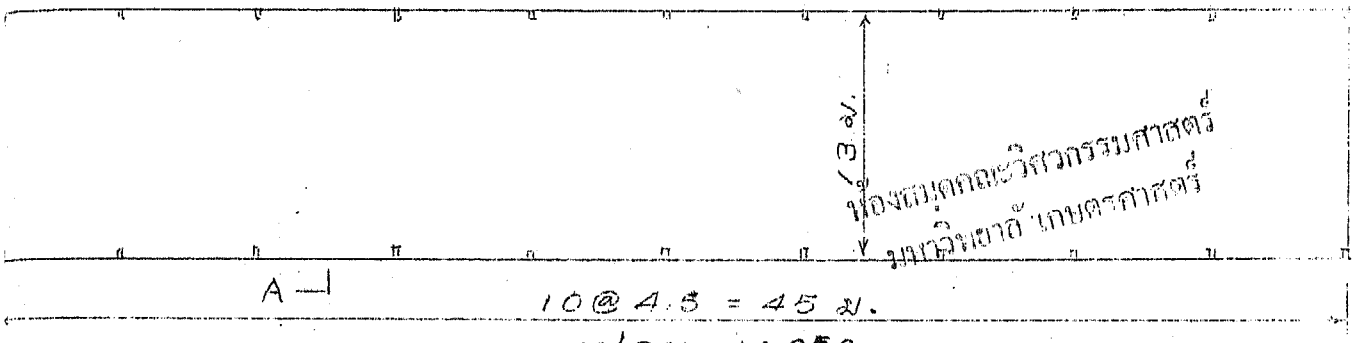
ใช้ 1 L 50 + 50 + 4 มม A = 3.74 ซม^2

เหล็กเอียงรับแรงสูงสุด = $(3230 - 1280)\frac{2.5}{1.3}$ = 3750 กก.

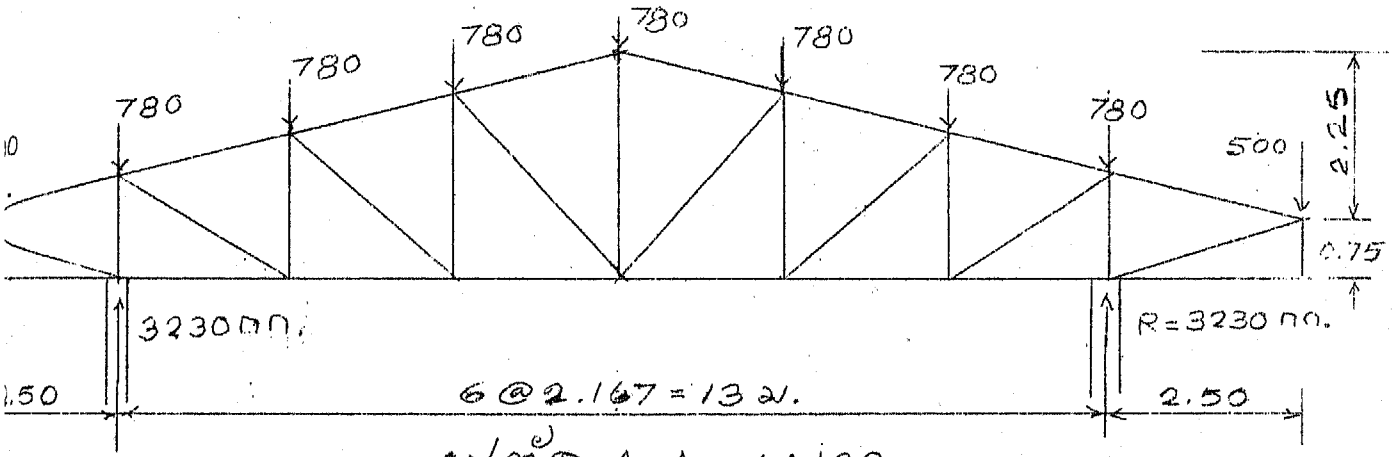
ใช้ 1 L 50 + 50 + 4 มม เช่นเดียวกับเหล็กตั้งรายละเอียดดูรูปที่ 6.4

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

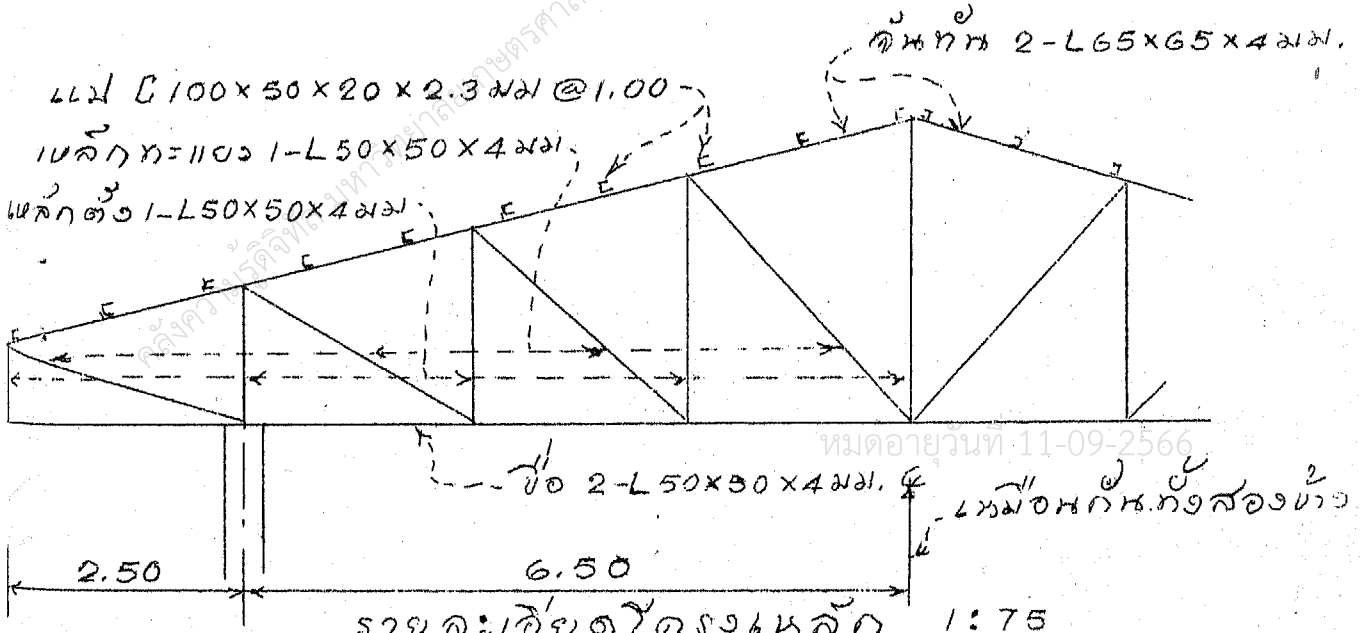
อาคารโรงปูนซีเมนต์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการอาคาร



แปลน 1:250



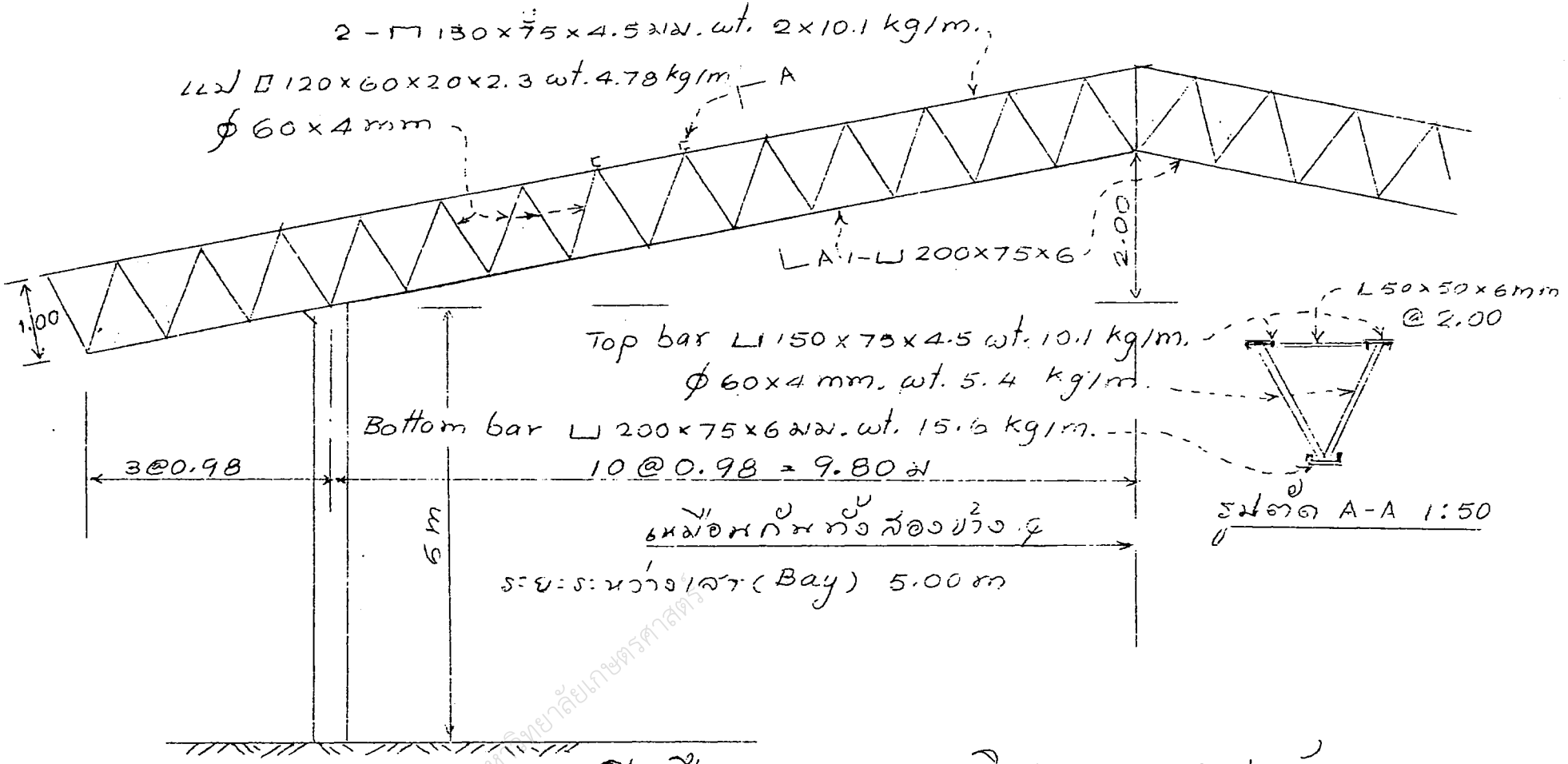
รูปตัด A-A 1:100



รายละเอียดโครงหลัก 1:75
(ข้อต่อของโครงอาคารชั้นเดียว)

รูปที่ 6.4

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พลังความรู้คือพลังของแผ่นดิน
หมดอายุวันที่ 11-09-2566



รูปด้านข้าง 6 คณะวิศวกรรมศาสตร์ 1:75

(สร้าง ปี พ.ศ. 2515)

รูปที่ 6.5

คลังความรู้ดิจิทัลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

6.7 โครงสร้างรับแรงแนวแกนและแรงดัดพร้อมกัน

สูตรทั่วไปเมื่อมีแรงดัดแกนเดียว

$$f = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I}$$

เมื่อมีโมเมนต์ดัดเกิดกับ 2 แกนสูตรจะเป็น

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Mx.Y}{I_x} \pm \frac{My.X}{I_y}$$

เขียนในรูปของหน่วยแรงที่กำหนดให้จะได้ดังนี้

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

การคำนวณออกแบบจะต้องพิจารณาดูว่าหน่วยแรงใดที่เสริมกันเช่น แรงดัดรวมกับแรงอัด และแรงดัดลบแรงดึงเป็นต้น

(1) แรงอัดกระทำร่วมกับโมเมนต์ ตาม AISC เมื่อ $\frac{f_a}{F_a} > 0.15$

ผลของความชลูดจะเกี่ยวข้องด้วยมี 2 สูตร ในที่นี้แสดงเพียงสูตรเดียวคือ

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

แต่ถ้า $\frac{f_a}{F_a} < 0.15$ ใช้ $\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$

เมื่อ f_a หน่วยแรงตามแกนที่เกิดจริง $= \frac{P}{A}$

F_a หน่วยแรงตามแกนที่ยอมให้

f_b หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริง $(\frac{M_c}{I})$

F_b หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ คือ $F_{bx} = F_{by}$

(2) แรงดึงกระทำร่วมกับโมเมนต์รอบแกนเดียว

$$\frac{f_t + f_{bt}}{F_t} \leq 1.0$$

และ $$\frac{f_{bc} - f_a}{Fb} \leq 1.0$$

เมื่อ $f_t = \frac{T}{A_n}$ = หน่วยแรงดึงเฉลี่ยเป็น กก/ซม^2

T = แรงดึงเป็น กก.

A_n = เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ ซม^2

f_b = หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น กก/ซม^2

F_t = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ $= 0.6 F_y$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

บทที่ 7
การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

7.1 ทั่วไป

โครงสร้างหรืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปจัดอยู่ในประเภทถาวรวัตถุ ทนต่อกินฟ้าอากาศ ทนความร้อน และไฟ เป็นต้น วัสดุที่ใช้ผสมเป็นคอนกรีตก็สามารถหาได้ง่ายในแทบทุกแห่งที่ผอจะขนส่งได้ คอนกรีตประกอบด้วย ซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ ซึ่งผสมคลุกเคล้ากันอย่างดี คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูงและรับแรงดึงได้ต่ำมากคือ ประมาณ 10 เปอร์เซนต์ของแรงอัด ดังนั้น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจึงยอมให้คอนกรีตรับแรงอัดเท่านั้น ส่วนด้านที่เกิดแรงดึงให้เป็นหน้าที่ของเหล็กเสริมไป ในบางกรณีคอนกรีตรับแรงอัดไม่ดีก็สามารถเสริมเหล็กช่วยรับแรงอัดได้ด้วย คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์มากจะสามารถรับกำลังได้สูง และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำให้กำลังสูงกว่า

อากาศ	น้ำ	ปูนซีเมนต์	วัสดุผสมละเอียดและหยาบ (ทรายและหิน)
2 – 5%	10 – 20%	10 – 20%	66 – 78%

รูปที่ 7.1 ปริมาณของส่วนประกอบของส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ได้มีวิวัฒนาการมาโดยลำดับ เริ่มด้วยทฤษฎีอีลาสติก หรือโดยใช้หน่วยแรงที่ยอมให้ ทฤษฎีกำลังประลัย หรือการยึดกำลังประลัยของคอนกรีตเป็นหลัก มีส่วนปลอดภัยตามชนิดของน้ำหนักบรรทุก และทฤษฎีคอนกรีตอัดแรง ซึ่งใช้เหล็กชนิดพิเศษ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะทฤษฎีอีลาสติกซึ่งยังมีความนิยมใช้โดยทั่วไป วิธีการคำนวณออกแบบก็ไม่ยุ่งยากนัก และใช้ประกอบการเสนออนุญาตก่อสร้างได้

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

7.2 ปูนซีเมนต์

เป็นส่วนสำคัญเมื่อผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพส (Cement Paste) จะทำหน้าที่เป็นเชื้อประสานระหว่างวัสดุละเอียด กับวัสดุหยาบ คือน้ำซีเมนต์จะเข้าแทรกในช่องว่างของทราย และทรายจะเข้าในช่องว่างของหิน เมื่อมีการสั่นหรือเขย่าวัสดุละเอียดจะแทรกในช่องว่างของวัสดุ

หยาบกว่าตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก.15 เล่ม 1 – 2514) เกณฑ์คุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้

ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาสำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป – ขณะนี้ได้แก่ ปูนตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง– ได้แก่ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดแรงสูงเร็ว (High early strength portland cement) คือเกิดแรงสูงเร็วกว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราสามเพชร

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง ได้แก่ตราปลาฉลาม

นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่พบทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งจะเป็นประเภทหนึ่งผสมทราย 25% ได้แก่ ตราเสือ ตรางูเห่า ตรานกอินทรีย์ ซึ่งทำให้แข็งช้าลงไม่ยึดหดมากนัก เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังสูงนัก ใช้กออิฐถือปูนดี นอกจากนี้มีปูนซีเมนต์สีขาว ซึ่งมีความละเอียดมากเหมาะสำหรับงานจำพวกตบแต่ง เช่น หินขัด ก่อกระเบื้องห้องน้ำเป็นต้น

7.3 วัสดุผสมละเอียดและหยาบและน้ำ

ทรายที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต้องเป็นทรายน้ำจืดที่หยาบ มีลักษณะเม็ดแกร่ง ต้องสะอาดและปราศจากอินทรีย์สาร หรือวัตถุอื่นเจือปน ขนาดของทรายควรค้างตะแกรงเบอร์ 4 ไม่เกิน 5 เปอร์เซนต์ คละลดหลั่นกันไป และมีส่วนละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ไม่เกิน 10 เปอร์เซนต์

วัสดุหยาบ ซึ่งจะเป็นกรวดหรือหิน แต่ที่ใช้กันโดยทั่วไปคือหินย่อย ซึ่งแบ่งขนาดดังนี้

ก. หินเบอร์ 1 เป็นหินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว และมีขนาดเล็กลดหลั่นลงไปจนถึงหินที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับตะแกรงเบอร์ 4 หรือขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว มีส่วนคละกันไป

ข. หินเบอร์ 2 เป็นหินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน $1\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีขนาดเล็กลดหลั่นกันไปจนถึงหินที่มีขนาดเล็กที่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว โดยมีส่วนคละกัน

ค. หินเบอร์ 3 เป็นหินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน $2\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีขนาดเล็กลดหลั่นกันไปจนถึงหินที่มีขนาดเล็กที่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว โดยมีส่วนคละกัน

กรวดและหินย่อยที่ใช้ผสมคอนกรีต มีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมค่อนข้างกลม มีส่วนแบนเรียวเล็กน้อย ต้องเป็นหินที่แข็ง ทนทาน ไม่ผุกร่อน สะอาดปราศจากสารที่ผุอ่อน และอินทรีย์สารอื่นๆ เจือปน

น้ำมีความสำคัญมากในการผสมคอนกรีต ต้องเป็นน้ำประปา หรือน้ำที่ใช้ดื่มได้ หรือพิจารณาว่าเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสิ่งเจือปน

7.4 สิ่งที่มีผลต่อกำลังคอนกรีต

เนื่องจากคอนกรีตเป็นส่วนผสมของวัสดุหลายอย่าง ดังนั้นนอกจากวัสดุต่าง ๆ แล้ว กรรมวิธีที่ทำคอนกรีต ย่อมมีผลต่อกำลังคอนกรีตด้วย พอสรุปได้ดังนี้

1. ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันจะให้กำลังคอนกรีตแตกต่างกันไป สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไป กำลังคอนกรีตในระยะแรกสูงเร็ว ถ้าเม็ดซีเมนต์ยิ่งละเอียดแต่ในระยะยาวเช่นอายุ 28 วันจะใกล้เคียงกัน

2. ลักษณะของรูปร่าง และขนาดของวัสดุผสม สำหรับส่วนผสมที่มีความข้นเท่ากัน การใช้วัสดุผสมนี้มีรูปร่างค่อนข้างกลมนั้นจะให้กำลังสูงกว่า เพราะต้องการอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า ฉะนั้นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์น้อยจึงควรใช้วัสดุผสม ที่มีรูปร่างลักษณะค่อนข้างกลม วัสดุไม่สะอาดกำลังคอนกรีตลดลง

3. อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตที่กำหนดให้อย่างหนึ่ง ๆ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (โดยน้ำหนัก) น้อยจะให้กำลังคอนกรีตสูงกว่า เพราะคอนกรีตมีโอกาสแน่นได้มากกว่า แต่ถึงอย่างไรส่วนผสมควรเหลวพอเทในแบบได้

4. ช่วงเวลาที่มีการผสมคอนกรีตและสภาพแวดล้อม เวลาที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องนานพอสมควร เช่น ประมาณ 3 นาที การผสมในอุณหภูมิพอเหมาะเช่น 20 องศาเซลเซียส จะให้กำลังคอนกรีตสูง ส่วนที่มีแดดร้อนจัด หรือมีลมแรงย่อมทำให้คอนกรีตกำลังลดลงได้

ห้องสมุดอายุวันที่ 11-09-2566

5. การกระทุ้งและการสั่นคอนกรีตให้แน่น เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้วัสดุมีโอกาสไหลแทรกตัวตามช่องว่างมากที่สุด ทำให้ฟองอากาศมีน้อย การสั่นจะต้องไม่นานเกินไปจนวัสดุแยกจากกัน หรือน้ำปูนขึ้นปนจนเห็นชัด การสั่นคอนกรีตให้เหมาะสมกำลังจะสูงต่างกันถึง 30 เปอร์เซนต์

6. วิธีการบ่มและอายุของคอนกรีต การบ่มคอนกรีตโดยใช้ความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น เพราะเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดความร้อน การบ่มจะช่วยถ่ายๆลดความร้อนในคอนกรีต ช่วยผ่อนการระเหยของน้ำในคอนกรีตให้ช้าลง และเป็นไปโดยสม่ำเสมอ คอนกรีตจะไม่เกิดการแตกร้าว การบ่มที่ดีจะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มเลยถึง 50% คอนกรีตจะให้กำลังสูงเร็วในระยะแรก เช่น อายุ 7 วัน จะมีกำลังประมาณ 70 % ของอายุ 28 วัน และกำลัง 7 วัน จะประมาณ 55% ของอายุ 90 วัน ซึ่งเกือบจะคงที่

7. ผลจากการแห้งตัวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วในคอนกรีตที่ยังผสมใหม่ ๆ จะลดกำลังของคอนกรีต และค่าพิกัดยืดหยุ่นของมัน ซึ่งกำลังของมันอาจลดลงถึง 50% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการเก็บรักษา และป้องกันการระเหยของน้ำ

8. การกระทบกระเทือนคอนกรีต ในระยะเวลาที่คอนกรีตกำลังแข็งตัว เช่นเริ่มแข็งประมาณ 90 นาที ถึงหนึ่งวัน ไม่ควรจะมีการกระเทือนคอนกรีตโดยเด็ดขาด เพราะจะทำให้คอนกรีตเสียกำลังอย่างมาก

7.5 การควบคุมคุณภาพของคอนกรีต

โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้ในการสร้างอาคารหนึ่ง มักจะกำหนดกำลังคอนกรีตไว้ เช่น คอนกรีตอายุ 28 วัน จะต้องมีกำลังไม่ต่ำกว่า 210 กก/ซม^2 ของแท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 12 นิ้ว เป็นต้น

การหล่อแท่งคอนกรีตทำเป็น 3 ชั้น โดยใส่คอนกรีตชั้นละ 1 ใน 3 ของความจุแบบแต่ละชั้นให้กระทุ้งโดยสม่ำเสมอ 25 ครั้ง ด้วยเหล็กกระทุ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{5}{8}$ นิ้ว ยาว 24 นิ้ว และปลายมนแบบหัวลูกปืน เมื่อกระทุ้งชั้นสุดท้ายแล้วปาดหน้าให้เรียบ

ส่วนอีกวิธีหนึ่งกำหนดกำลังคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 6 นิ้ว

โดยทั่วไปกำลังคอนกรีตแท่งทรงกระบอก (Cylinder strength fc') ประมาณ 0.8 เท่าของแท่งลูกบาศก์ (Cube strength) ทั้งนี้เพราะเกี่ยวกับความชลูดของแท่งด้วย

การควบคุมให้กำลังคอนกรีตได้สม่ำเสมอโดยการกำหนดอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ ซึ่งตรวจสอบได้โดยการตรวจสอบการยุบตัว (slump) จากแบบกรวยทดสอบ (slump cone)

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ซึ่งขนาดด้านบน 4 นิ้ว ด้านล่าง 8 นิ้ว สูง 12 นิ้ว การทดสอบใส่ที่ละ 1 ใน 3 กระทุ้ง 25 กรั้ง แล้วปาด คอนกรีตที่น้ำมากเมื่อคืงกรวยขึ้นจะยุบตัวมาก อาจจะทำสัก 2 กรั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

ส่วนผสมของคอนกรีตโดยทั่วไปใช้ตวงเป็นปริมาตร เช่น ปูน : ทราย : หิน เป็น 1 : 2 : 4 สำหรับคอนกรีตธรรมดา ในคอนกรีต 1 $ม^3$ ใช้ปูนซีเมนต์ 300 กก.(6 ถุง) กำลังอัด 240 กก/$ซม^2$ และซีเมนต์ 350 กก.(7 ถุง) กำลังอัดแท่งลูกบาศก์ 300 กก./$ซม^2$ เป็นต้น

7.6 กำลังและส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งพอจะสรุปพอเป็นแนวในตารางต่อไปนี้

(ก) กำลังแรงอัดคอนกรีตอายุ 28 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ค่ากำลังแรงอัดคอนกรีตอายุ 28 วัน		หมายเหตุ
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	
0.35	500	420	เหมาะสำหรับการหล่อที่มีการควบคุมอย่างดี เช่น ในโรงงาน. ต่าง ๆ
0.40	450	380	
0.45	410	340	
0.50	350	280	
0.55	320	250	เหมาะสำหรับอาคารทั่ว ๆ ไป
0.60	280	210	
0.65	250	190	
0.70	210	170	
0.75	185	150	

(ข) อัตราส่วนผสมสำหรับกำลังแรงอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

กำลังแรงอัด กก./$ซม^2$	อัตราส่วนผสมใช้ทรายละเอียด				อัตราส่วนผสมใช้ทรายหยาบ			
	ซีเมนต์ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน (กก.)	น้ำ (กก.)	ซีเมนต์ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน (กก.)	น้ำ (กก.)
150	250	665	1275	170	250	735	1205	170
200	270	655	1275	180	270	725	1205	180
250	290	630	1275	180	290	705	1205	180
300	335	595	1275	180	335	665	1205	180
350	405	540	1275	180	405	610	1205	180
400	450	490	1275	180	450	575	1205	180

หินที่ใช้เป็นหินเบอร์ 2 ขนาด $\frac{3}{4}$" – $1\frac{1}{2}$"

7.7 สูตรการคำนวณของค่าความและข้อกำหนด

สูตรและข้อกำหนดที่อ้างถึงต่อไปนี้ ยึดตามมาตรฐาน ว.สก.1001-16 พิมพ์ครั้งที่ 3 (มีนาคม 2522) ซึ่งมาตรฐานนี้สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้กำหนดกฎเกณฑ์เพื่อการปฏิบัติไว้มากมาย เช่น ตัวอย่าง ทางทั่วไป ความต้านทาน สัดส่วนของค่าความต้านทานต่างๆ ของวัสดุ การออกแบบองค์อาคาร หน้าตัดปฏิบัติการ และหน้าตัดที่ต้องประลัย รวมทั้งกำหนดกฎเกณฑ์ที่เกี่ยวกับการออกแบบอาคารตอบสนองต่างๆ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการคำนวณและข้อกำหนดที่ใช้อยู่เป็นประจำ ส่วนอื่นๆ ก็ให้ดูและอ่านต่อการคำนวณออกแบบ

องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบอยู่เป็นประจำ คือ พื้น คาน และฐานราก เป็นต้น องค์อาคารแต่ละชนิดมีลักษณะการออกแบบได้หลายอย่าง ตามลักษณะการใช้งานและรูปร่าง

พื้น อาจจะออกแบบเป็น เสริมเหล็กทางเดียว - ยังทาง พื้นไร้คาน แบนต่างๆ เป็นต้น

คาน ที่เป็นตามสี่เหลี่ยม ตามรูป L ตามรูป T ตามการออกแบบการเสริมเหล็ก อาจจะเสริมเหล็กทางรับแรงอัดก็ได้

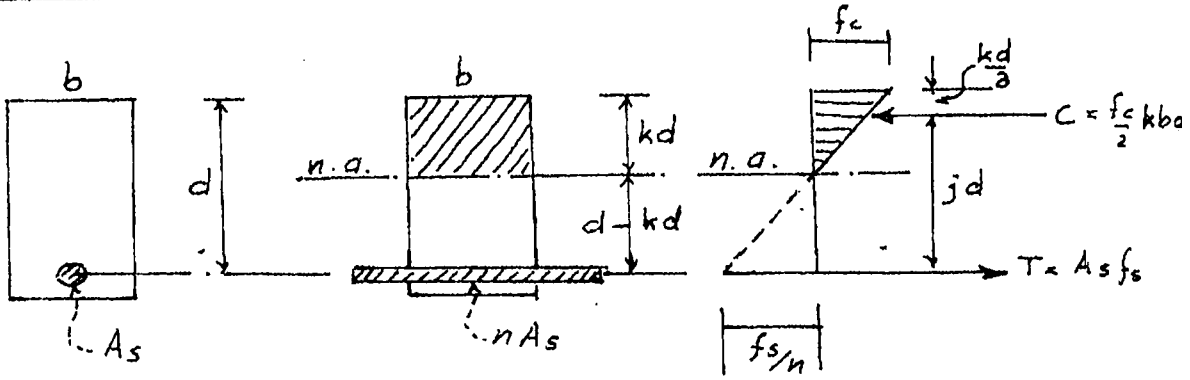
เสา มีหลายแบบ เช่น เสาสี่เหลี่ยม เสากลม การเสริมเหล็กที่ใช้หลายแบบ เช่น เสาปลอกเกลียว เสาปลอกเดี่ยว เสา ค.ส.ล.แกนเหล็ก เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เสาท่อเหล็กแกนคอนกรีต และเสารับหน้าตามแกน และแรงอัดพร้อมกัน เป็นต้น

ฐานราก ที่ใช้หลายอย่าง เช่น ฐานเดี่ยว ฐานรวม ฐานแผ่ และฐานแพ การออกฐานรากอาจจะออกแบบต้านทานหรือการลื่นไหล เป็นต้น

สำหรับพื้น และคาน พื้นการออกแบบจะต้องเผื่อรายการในเรื่องของการรับแรงอัดหรือไม่เผื่อก็ได้ แรงเฉือน และการยึดเหล็กเส้นตอนกรีต เป็นต้น

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(ก) การคำนวณสำหรับแรงดัด (Flexural computations) ตามสมมติฐานว่าเสริมเหล็กเดี่ยว



การออกแบบ (Design) คำนวณการเสริมขั้นต่ำดังนี้

(1) คำนวณหาโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักจรและน้ำหนักอาคาร = M

(2) คำนวณหาค่า balanced $k = \frac{f_c}{f_c + f_s/n}$

(3) ค่า balanced $j = 1 - k/3$

(4) คำนวณขนาดของคาน จาก $bd^2 = \frac{2M}{f_c k j}$ โดยสมมติค่า b แล้วหาค่า d (ทับขนาดตามใช้ที่ใกล้เคียงข้อ (1) หรือพอยกว่าใช้ได้)

(5) คำนวณหาเนื้อที่เหล็กเสริม $A_s = \frac{M}{f_s j d}$

ในข้อ (4) และ (5) เป็น balanced beam คือเหล็กและคอนกรีตกับหน่วยแรงที่ยอมให้รับอัดพร้อมกัน ท่านปฏิบัติมักให้ขนาดคานลงตัว

การวิเคราะห์ (Analysis) ทำได้ 2 วิธีคือ

ก. โดยวิธี Transformed area หา n.a. ซึ่งอยู่ที่จุด Centroid ของ Transformed area จะได้ kd และ jd ใช้ $M_c = \frac{f_c}{2} k j b d^2$ และ $M_s = A_s f_s j d$ ค่าน้อยคือค่าที่ยอมให้

ข. โดยวิธีใช้สูตร ซึ่งดำเนินการดังนี้

(1) คำนวณค่า $p = A_s/bd$ และค่า pn

(2) หาค่า $k = \sqrt{2pn + (pn)^2} - pn$

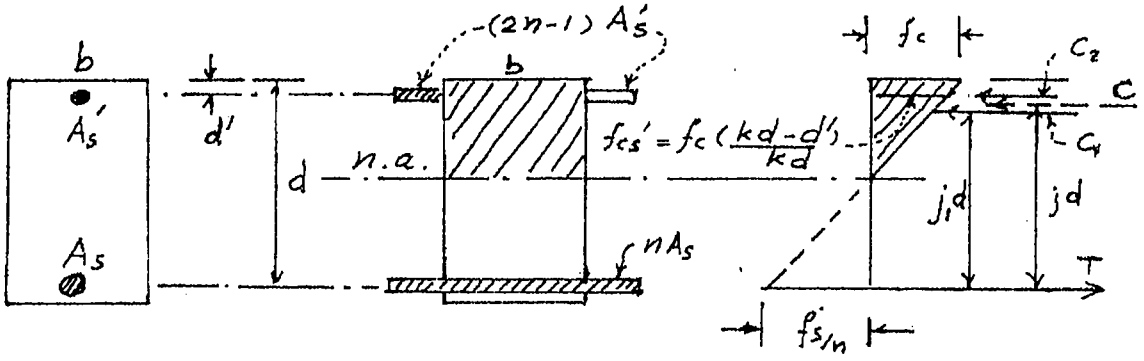
(3) หาค่า $j = 1 - k/3$

(4) $M_c = \frac{1}{2} f_c k j b d^2$ และ $M_s = A_s f_s j d$ ใช้ f_c และ f_s ที่ยอมให้

(5) ที่กำหนด M หาค่า $f_c = \frac{2M}{kjbd^2}$ และ $f_s = \frac{M}{A_s j d}$ เทียบ $f_c = \frac{f_s}{n}\left(\frac{k}{1-k}\right)$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

การพิจารณาคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด (เสริม 2 ข้าง)



การออกแบบ (Design) ทำได้หลายวิธี ดังนี้

(1) คำนวณหาโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักโครงสร้าง = M

(2) หา balanced $k = \frac{fc}{fc + fs/n}$ และ $j = 1 - k/3$

เพื่อจากขนาดของคานที่ยังไม่ทราบค่า b และ d ได้ $M_1 = \frac{fc}{2} kjbd^2$

(3) เหล็กเสริมสมดุลย์กับคอนกรีต คือ $As_1 = \frac{M_1}{fs\, j\, d}$

(4) โมเมนต์ที่เหลือที่จะต้องต้านทาน คือ $M_2 = M - M_1$

(5) เพื่อที่เหล็กรับแรงดึงเพิ่ม คือ $As_2 = \frac{M_2}{fs(d-d')}$

(6) เพื่อที่เหล็กรับแรงดึงทั้งหมด $As = As_1 + As_2$

(7) $C_2 = \frac{M_2}{d-d'} = As'(2n-1)fcs'$ จะได้ $As' = \frac{M_2}{(2n-1)fcs'(d-d')}$

(8) หา $fs' = 2n\, fcs'$ ถ้าค่าน้อยเกินให้ใช้เท่ากับ fs จะได้

$$As' = \frac{M_2}{(fs - fcs')(d-d')}$$

การวิเคราะห์ (Analysis) โดยวิธี Transformed area ดังนี้

(1) เหล็กรับแรงอัดใช้ Effective area $= (2n-1)As'$ และ Effective stress $fs'' = (2n-1)fcs'$ โดย n.a. อยู่ที่ Centroid

(2) หาค่าหน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัด $fs' = 2n\, fcs'$ ต้องไม่เกิน fs

(3) ถ้า $fs' > fs$ ให้ใช้เท่ากับ fs

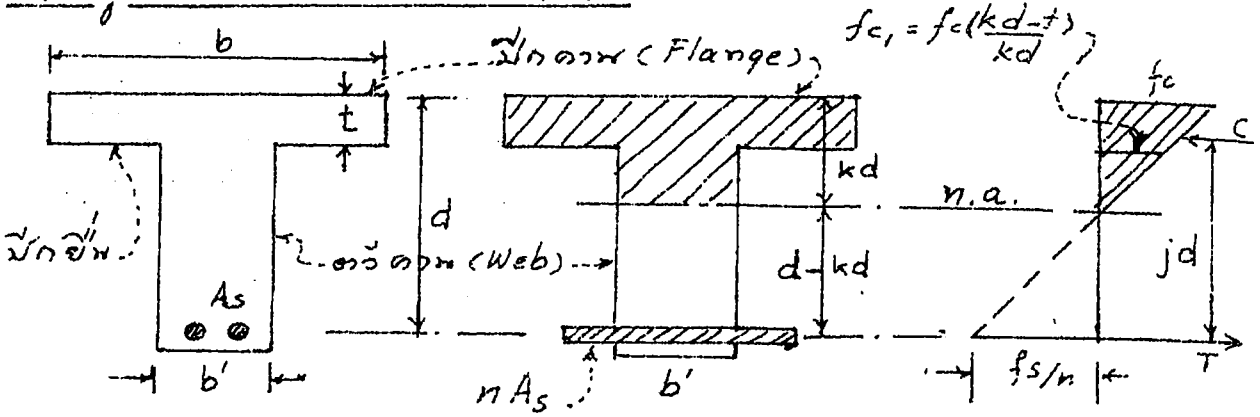
(4) โมเมนต์ที่ต้องการ $M = C_1 jd_1 + C_2(d-d')$

(5) เหล็กรับแรงดึงใช้ nAs และ $fs = nfc$

ความลึกของกับคานและตำแหน่งของแรงรวม คือ $C = C_1 + C_2$

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

คานรูปที T ที่หน้าตัดของแรงดัด



ลักษณะของคานรูปT ที่หน้าตัดไว้ดังนี้

(ก) ตัวคาน และปีกคาน ต้องหล่อพร้อมกัน หรือหล่อยึดต่อกัน

(ข) b ≤ 1/4 span หรือ (b-b') ≤ 16t หรือ b ≤ ระยะระหว่างตัวคาน

(ค) คานที่ดีๆต้องมี t > b'/2 และ b ≤ 4b'

(ง) คานมีปีกข้างเดียว (รูปL) ปีกยื่นจากตัวคาน ≤ 1/12 span หรือ ปีกยื่น ≤ 6t หรือ ≤ 1/2 ของระยะห่างว่างระหว่างคานตัวถัดไป

(จ) ปีกยื่นออกแบบเหมือนคานยื่น เหล็กห่วงคันไม่เกิน 3t หรือ 30 cm

การออกแบบ (Design) หลักการก็คือ cut-and-try คือ การสมมติขึ้นแล้วตรวจสอบหาเหล็กเสริม-ตรวจสอบให้ใกล้เคียง อีกวิธีหนึ่งคือใช้ประมาณค่า jd ให้ใกล้เคียงพอมาคำนวณ ดังนี้

(1) กำหนดค่า jd = 0.9d หรือ jd = d - t/2 ใช้ค่า jd ที่มากในการคำนวณ

(2) คำนวณ As = M/(fs jd)

(3) เอาค่าประมาณ As ที่ได้คิด Transformed area หาค่า jd ใหม่ ซึ่งจะได้ค่า jd ที่ใกล้เคียงของจริงขึ้น

(4) เอาค่า jd ใหม่ไปคำนวณหาเนื้อที่เหล็ก As = M/(fs jd)

(5) ทำให้ละเอียดขึ้น ทำตาม ข้อ (3) และ (4) ซ้ำ ตามต้องการ

การวิเคราะห์ (Analysis) ที่ถูกต้องและไม่ต้องลองมาก คือ อาศัย Transformed area หา n.a. หรือ Centroid แล้วหา C และ jd ส่วนอีกประมาณก็ไม่คิดแรงดึงในตัวคานที่ส่วนปีกคาน คือคิดสมดุลกับแรงอัดเท่านั้น ดู

(ข) การคำนวณสำหรับแรงเฉือน และแรงยึดหน่วง

หน่วยแรงเฉือน

(ก) หน่วยแรงเฉือน ซึ่งใช้วัดแรงยึดหน่วง ใช้ $v = \frac{V}{bd}$ หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเกิดที่ระยะ d จากขอบของที่รองรับ

(ข) สำหรับคานรูป I หรือ T ให้ใช้ b' แทน b ในสมการข้อ (ก)

(ค) หน่วยแรงเฉือน v_c ในตารางไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ต้อง $v_c < 0.29\sqrt{f'_c}$ ที่ระยะ d จากขอบของที่รองรับ

เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

(ก) หน่วยแรงเฉือนในตาราง $v = \frac{V}{bd}$ มากกว่า v_c แล้วต้องเสริมเหล็กช่วยรับแรงเฉือน ต่างของ $v < 1.32\sqrt{f'_c}$

(ข) เหล็กเสริมรับแรงเฉือน ได้แก่ เหล็กลูกตั้ง เหล็กดอม หรือใช้ร่วมกัน

(ค) ปลายเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กอื่นที่รับแรงเฉือน จะต้องมีการยึดปลายทั้งสองข้างเพียงพอ เช่น การงอของรูป ข หรือเหล็กปลอก หรือมีการยึดตาม 24 เท่า ϕ

ขนาดและระยะเหล็กเสริม คำนวณดังนี้

V = แรงเฉือนที่เกิดในตาราง กก.

$V_c = v_c bd$ = แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้ กก.

$V' = V - V_c$ = แรงเฉือนที่ให้เหล็กเสริมรับ กก.

$s = \frac{A_v f_v d}{V'} = \frac{A_v f_v}{(v - v_c)b} = \frac{A_v f_v}{v'b}$ = ระยะห่างเหล็กลูกตั้ง ซม.

A_v = เนื้อที่ทั้งหมดของเหล็กลูกตั้งระยะห่างกัน s เป็น ซม.^{2}

f_v = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน กก/ซม.^{2}

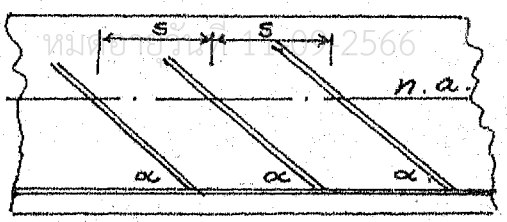
เหล็กดอมเส้นเดียว หรือหลายเส้นแต่เอียงกัน

$$A_v = \frac{V'}{f_v \sin\alpha}$$

เหล็กดอมหลายๆ เส้นขนานกัน ใช้

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

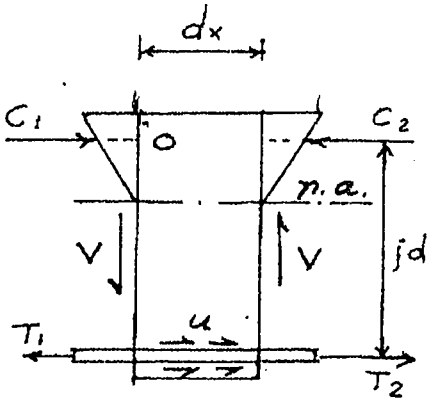
เมื่อ α = มุมที่กับแนวหอม-ของดัว



(ค) การคำนวณสำหรับแรงยึดหน่วง และการต่อ

เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึง ส่วนของเหล็กเสริมที่รับแรงดึงจะมากกว่าในคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตจะต้องยึดเหล็กเสริมไว้เพื่อมิให้หลุดออกจากกัน ดังนี้

จากรูปลำหรับหาค่าความยาวหน่วงฝังเหล็กข้อ dx เป็นแรงต่างกัน



$\Sigma M_O = 0$ เมื่อ $C_1 = T_1$, $C_2 = T_2$

$(T_1 - T_2)jd = V dx$

$T_1 - T_2$ ถูกต้านด้วยแรงยึดหน่วย u ได้

$T_1 - T_2 = u(\Sigma o)dx$

แทนค่าได้ $u \Sigma o\, dx\, jd = V dx$

$u(\Sigma o)jd = V$

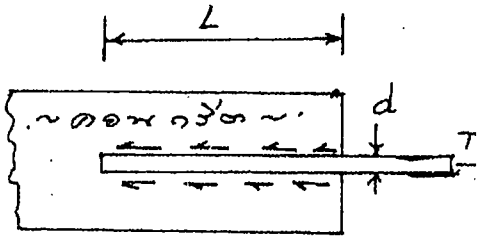
หรือ $u = \dfrac{V}{(\Sigma o)jd}$ หน่วยแรงยึดหน่วย กก/ซม^2

Σo = ผลบวกของเส้นรอบรูปของเหล็กเสริม ซม.

jd = ระยะแขนของโมเมนต์ ซม.

(ง) การฝังเหล็กเสริมในคอนกรีต

เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตรับแรงดึง ถ้าระยะฝังของเหล็กไม่พอจะทำให้เหล็กหลุดจากคอนกรีตได้



ก็ต้องคำนวณหาระยะแรงดึงพอเหมาะกับแรงยึดหน่วยของคอนกรีตกับเหล็กเสริมดังรูป เมื่อเกิดการสมดุลย์ระหว่างแรงดึงกับแรงยึด จะได้สมการดังนี้

$T = A_s f_s = u \Sigma o . L$

$\dfrac{\pi d^2}{4} f_s = u \pi d . L$

$L = \dfrac{f_s d}{4u}$ เมื่อระยะฝังของเหล็กเสริม

ค่า u จะเพิ่มได้เมื่อมีขอ หรือมีปุ่มระ เช่นเหล็กข้อ

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

(จ) เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาสั้นรับน้ำหนักตามแกนโดยทั่วไปที่ใช้งานเสมอมี 2 ชนิด มีสูตรสำหรับหาหน้าตัดปลอดภัยที่รับได้ดังนี้

(1) เสาปลอกเกลียว คือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปลอกพันเป็นเกลียวรอบเหล็กยืนที่เสริมเป็นรูปวงกลม ใช้สูตร

$$P = A_g(0.25f_c' + f_s p_g)$$

(2) เสาปลอกเดี่ยว คือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปลอกเดี่ยวพันหรือผูกรอบเหล็กยืนเป็นระยะๆ โดยทั่วไปเป็นรูปสี่เหลี่ยม ใช้สูตร

$$P = 0.85A_g(0.25f_c' + f_s p_g)$$

เมื่อ P = หน้าหนักปลอดภัยตามแกนของเสาสั้น

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต, A_s = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กยืน

$p_g = \frac{A_s}{A_g}$ ไม่น้อยกว่า 0.01 และไม่เกิน 0.08

f_s = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม $= 0.40f_y$ แต่ไม่เกิน 2,100 กก/ซม.^{2}

f_c' = กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก ϕ15x30 ซม อายุ 28 วัน

ในกรณีที่เป็นเสายาว หน้าหนักปลอดภัยจะลดลงเพื่องจากความยาวเพื่อปลายทั้งสองของเสาไม่เคลื่อนที่ แต่ไม่ควรโก่งแบนได้ดังเดิม ใช้สูตร

$$P' = RP$$

เมื่อ P' = หน้าหนักปลอดภัยตามแกนของเสายาว

$R = 1.07 - 0.008\frac{h}{r} \leq 1$ = ตัวคูณเพื่องจากความยาวไม่เกิน 1

h = ระยะจากจุดกึ่งกลางของแผ่นพื้นถึงจุดกึ่งกลางล่างสุดของเสา

r = รัศมีไจเรชันของเนื้อที่คอนกรีตทั้งหมดของหน้าตัดเสา

$= \sqrt{I/A}$ สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม $r = 0.3t$ หน้าตัดกลม $r = 0.25D$

I = โมเมนต์อินเนอร์เชียของเสา

A = เนื้อที่หน้าตัดเสา $= A_g$

$p_s = \frac{V_s}{V_c} = 0.45\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)\frac{f_c'}{f_y}$ สำหรับการหาระยะห่างปลอกเกลียว

= อัตราส่วนของปริมาตรของเหล็กปลอกเกลียวต่อปริมาตรของแกนเสา

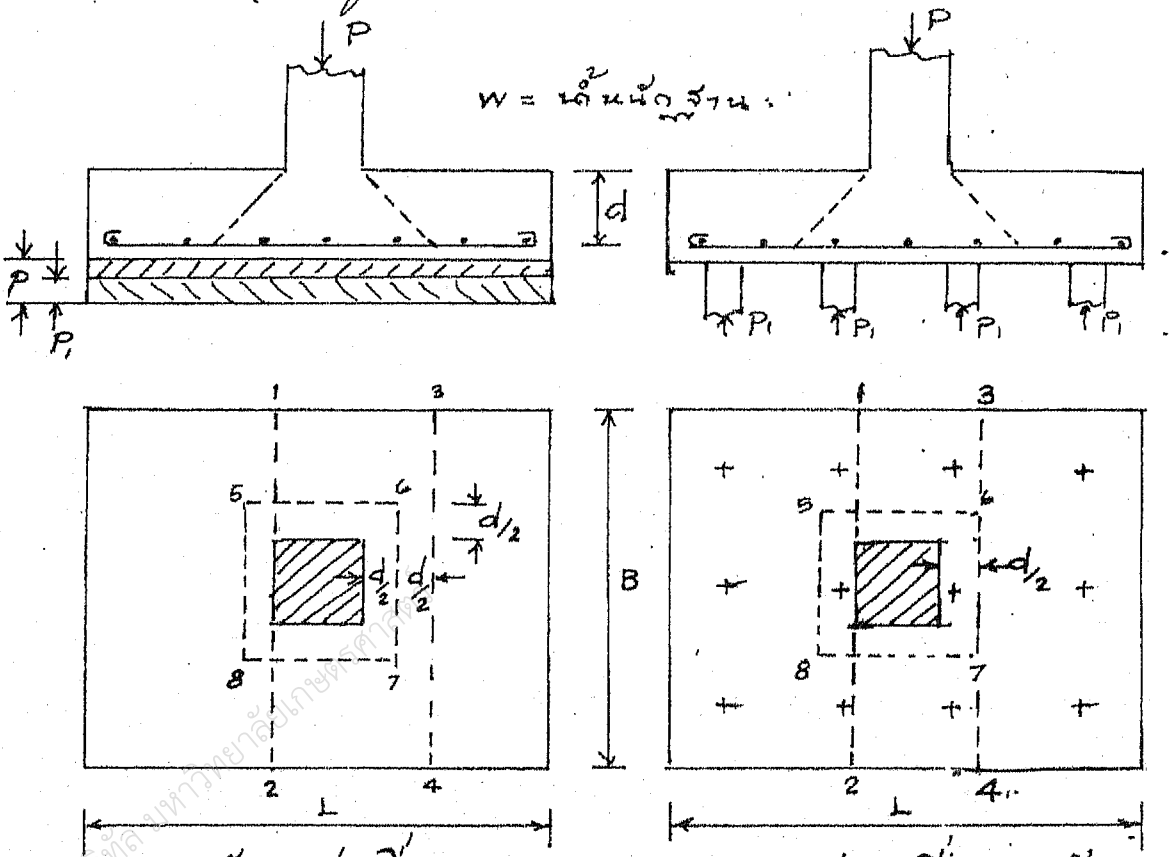
f_y = กำลังคลากของเหล็กปลอกเกลียว ไม่เกิน 4,200 กก/ซม.^{2}

เหล็กยืนของเสาไม่เล็กกว่า 12มม. เสากลมใช้ไม่น้อยกว่า 6 เส้น เสาเหลี่ยมเป็นสี่เหลี่ยม เหล็กปลอกเดี่ยวโตกว่า ϕ6มม : ระยะ $\leq 16\phi$เหล็กยืน, $\leq 48\phi$เหล็กปลอก, $\leq$ ขนาดเสา

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พิมพ์เมื่อวันที่ 11 ต.ค. 2546

(ค) ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าที่ทั้งหมดของอาคารรวมทั้งน้ำหนักจรจะต้องถ่ายลงสู่ดินอย่าง ปลอดภัย และสม่ำเสมอทั่วกัน ถึงแม้ว่าพื้นจะรับน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่ฐานได้ดีแต่ ในกรณีที่ดินไม่สามารถรับแรงกดของฐานรากได้ดี ฐานรากจึงมีหน้าที่ช่วย กระจายน้ำหนักให้แผ่กว้างออกไปจนถึงชั้นดินแข็งแรงพอ ฐานรากที่ใช้กันทั่วไปมี 2 แบบ คือ ฐานรากเดี่ยว และฐานรากต่อเนื่อง ซึ่งได้แก่ ฐานแผ่เดี่ยว ฐานแผ่ต่อเนื่อง และฐานแบบรวม เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะฐานรากเดี่ยว



(ก) ฐานแผ่เดี่ยว (ข) ฐานเดี่ยวมีหน้าตัด

$P = \frac{P+W}{BL}$ หน่วยแรงกดบนดิน

P_1 = หน่วยแรงสุทธิที่กดลงบนฐาน $= \frac{P+W}{L/2}$ = น้ำหนักลงต่อ 1 ตร.ม.

แนว 1-2 สำหรับโมเมนต์หา $A_s = \frac{M}{f_s j d}$ และแรงเฉือนหา $v = \frac{V}{ujd}$

แนว 3-4 สำหรับแรงเฉือน ซึ่งหน่วยแรงเฉือนที่ยอม $v_c = 0.29\sqrt{f'_c}$

แนว 5-6-7-8 สำหรับแรงเฉือนตามเส้นรอบ (ก.ค) ใช้ $v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$

ในที่นี้แสดงเฉพาะด้าน B ส่วนด้านยาว L ใช้แนวทำนองเดียวกัน

ตัวอย่าง

7.8 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบองค์อาคาร ศ.ส.ล. (มาตรฐาน)

รายการคำนวณตึก 4 ชั้น

(พ.ศ. 2523)

เกณฑ์การคำนวณ

1. ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522
2. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก วสท. 1004-16

ทำหมด $f_c = 50$ กก/ซม^2

$n = 13$

$v_c = 3.1$ กก/ซม^2

$v = 13.9$ " เมื่อมีเหล็กลงตั้ง

$f_s = 1,200$ " เหล็กเกลี้ยง

$= 1,400$ " เหล็กข้ออ้อย

$$k = \frac{f_c}{f_c + \frac{f_s}{n}} = 0.352$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 0.883$$

$$R = \frac{1}{2} f_c k j = 7.75$$

$$M_c = Rbd^2$$

$$A_s = \frac{M}{f_s j d}$$

เหล็กเกลี้ยง $A_s = \frac{M \times 100}{1200 \times 0.883 d} = \frac{M}{10.6d}$

เหล็กข้ออ้อย $A_s = \frac{M \times 100}{1400 \times 0.883 d} = \frac{M}{12.36d}$

เมื่อ M = โมเมนต์ที่เกิดขึ้น กก-ม.

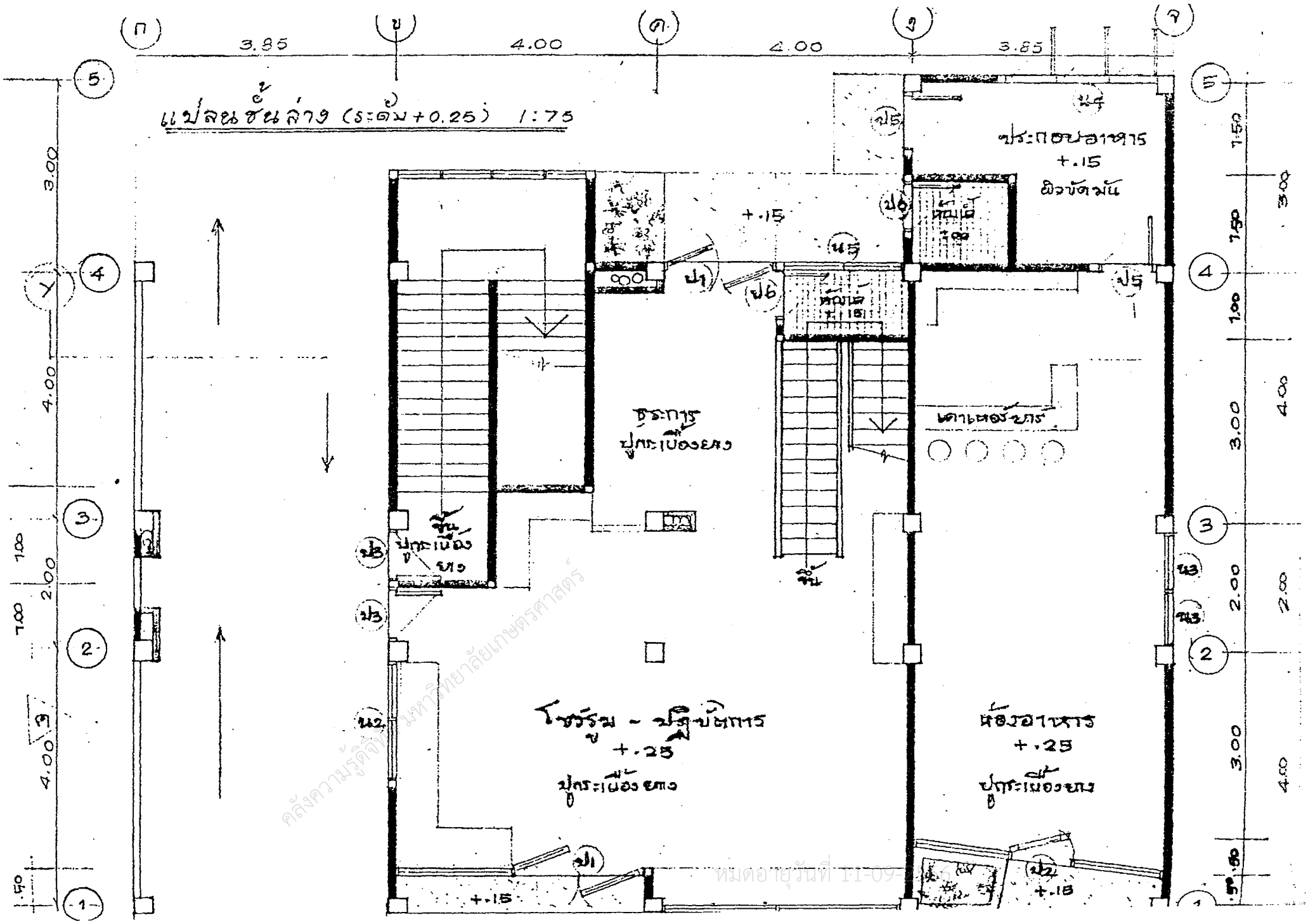
d = ความลึกประสิทธิผลของคาน - ซม.

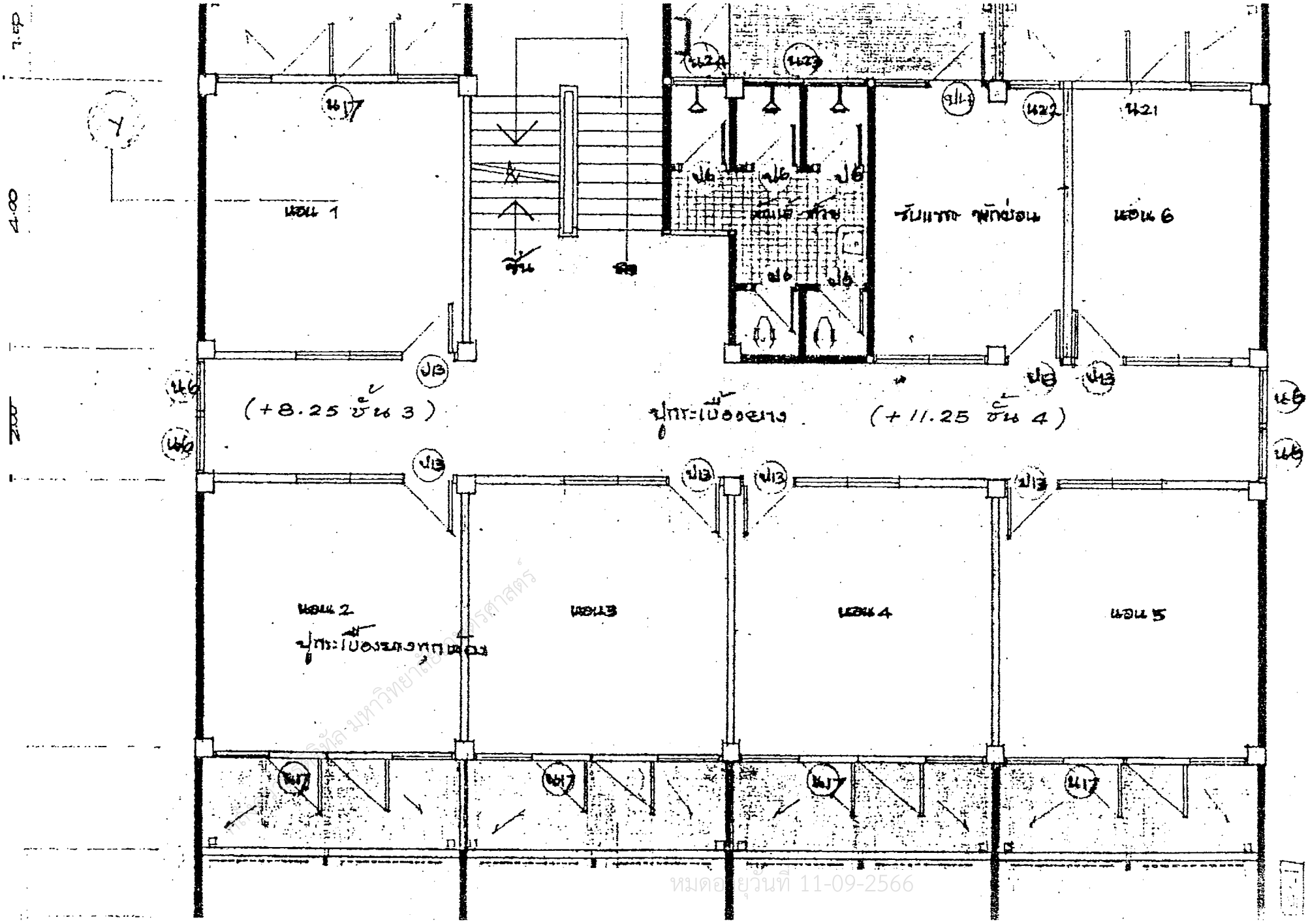
A_s = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริม - ซม.^{2}

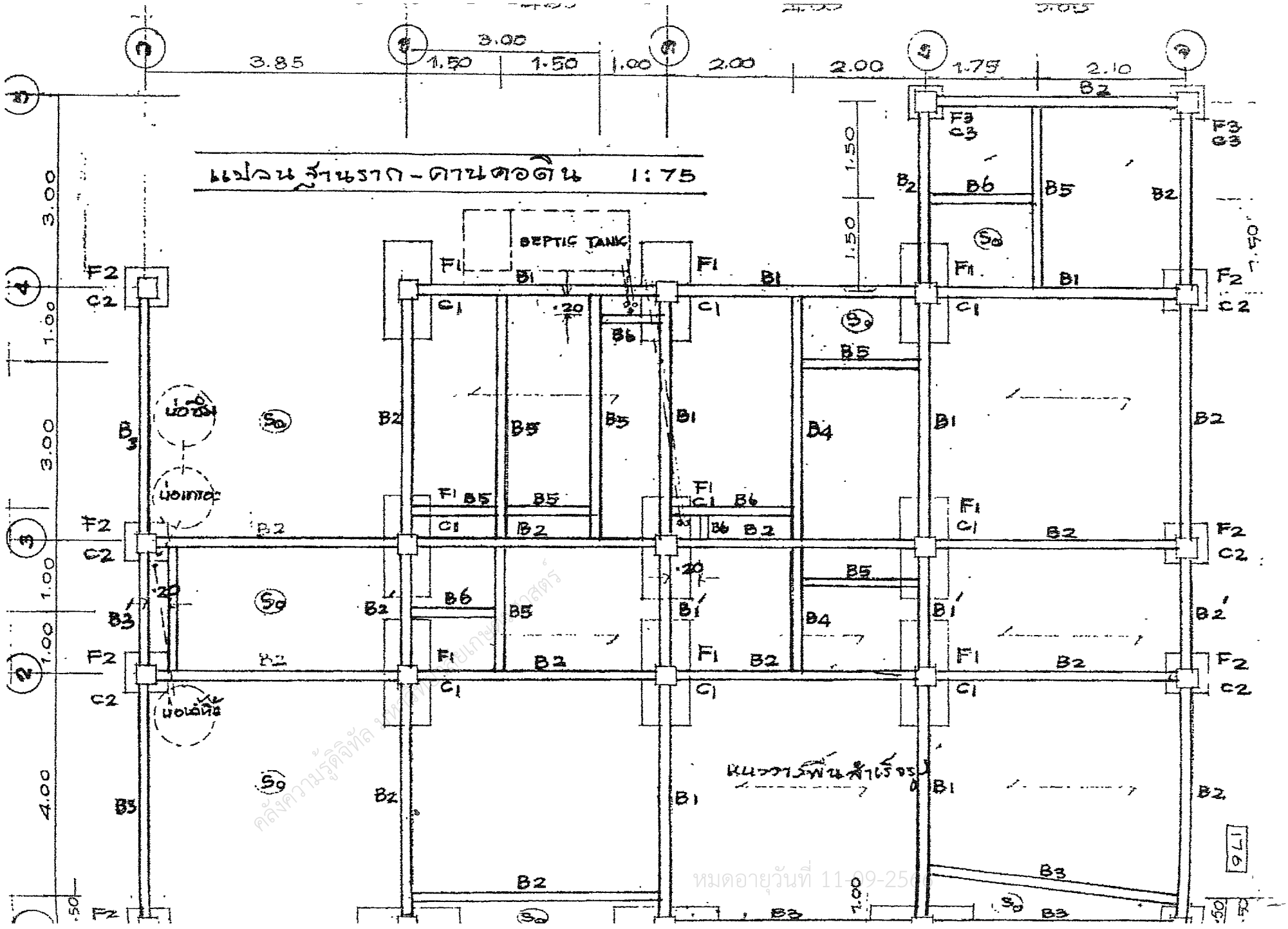
3. การคำนวณออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก.

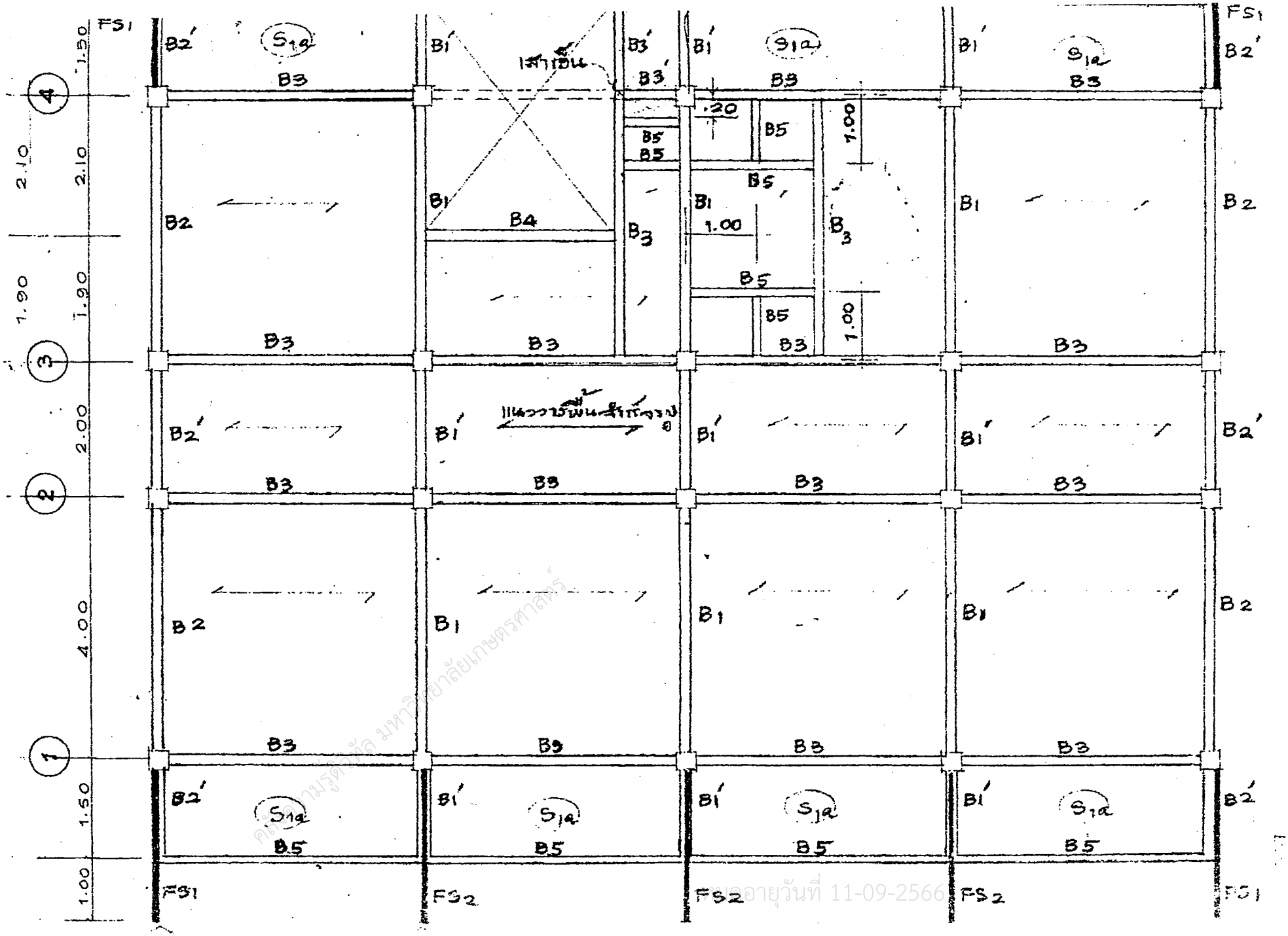
* ในที่นี้จะแสดงแบบแปลนเฉพาะชั้นที่ 1 และชั้นที่ 3-4 เท่านั้น

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์


แปลนชั้นล่าง (ระดับ +0.25) 1:75
ก
ข
ค
ง
จ
3.85
4.00
4.00
3.85
ประกอบอาหาร
+.15
ผิวขัดมัน
+.15
ธุรการ
ปูกระเบื้องยาง
โถงรับรอง
ปูกระเบื้องยาง
โถงรับรอง - ปฏิบัติการ
+.25
ปูกระเบื้องยาง
ห้องอาหาร
+.25
ปูกระเบื้องยาง
+.15
+.15
ป1
ป2
ป3
ป4
ป5
ป6


ห้องนอน 1
(+8.25 ชั้น 3)
ห้องนอน 2
ห้องนอน 3
ห้องนอน 4
ห้องนอน 5
ห้องนอน 6
(+11.25 ชั้น 4)


แปลนฐานราก-คานคอดิน 1:75
SEPTIC TANK
หมดอายุวันที่ 11-09-25



คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สืบค้นเมื่อวันที่ 11-09-2566

พื้น คสล. ตอพื้นขนาด 2.50×4.00 ม. หนา 8 ซม.

$m = 2.5/4 = 0.625$

น้ำหนักพื้น + น้ำหนักจร = (200+150) = 350 กก/ม²

Two-way slab, Method 2 Case I

ช่วงสั้น $M = 0.061 \times 350 \times 2.5^2 = 133.44$ กก-ม

$As = \frac{133.44}{10.6 \times 5} = 2.52$ ซม²

ใช้ ⌀6 มม @ 0.11 $As = 2.55$ ซม²

ช่วงยาว $M = 0.033 w s^2 = 0.033 \times 350 \times 2.5^2$

$= 72.19$ กก-ม

$As = 1.36$ ซม²

ใช้ ⌀6 มม @ 0.15 $As = 1.88$ ซม²

พื้นทั่วไปตอนกลางใช้พื้นสำเร็จรูป น้ำหนักจร 150 กก/ม²

น.น.พื้น + น.น.จร = 200 + 150 = 350 กก/ม²

คานกลางช่วง 4 ม. ขนาด 0.2×0.4 ม. (B2)

น้ำหนักของคานจากพื้น = 350×4 = 1400 กก/ม

น้ำหนักคาน 0.2×0.4×2400 ≈ 200 "

รวมน้ำหนักของคาน = 1600 "

$M = \frac{wl^2}{10} = \frac{1600 \times 4^2}{10} = 2560$ กก-ม

$M_c = Rbd^2 = 7.75 \times 20 \times 36^2 = 194,400$ กก-ซม

$As_1 = \frac{M_c}{10.6d} = \frac{1944}{10.6 \times 36} = 5.09$ ซม²

$As_2 = \frac{61600}{1200(36-4)} = 1.60$ ซม²

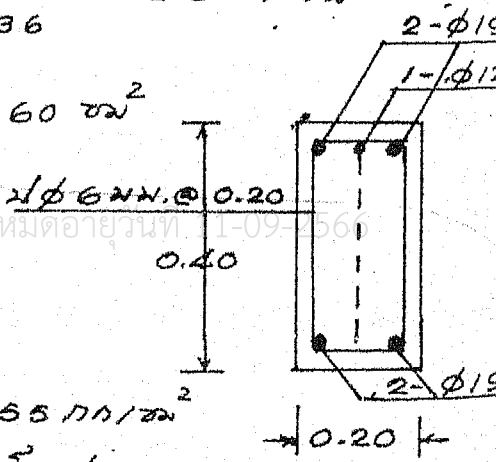
$As = As_1 + As_2 = 6.69$ ซม²

ใช้ 2-⌀19 มม + 1-⌀12 มม. ค.ม.

$As = 6.80$ ซม²

$v = \frac{V}{bd} = \frac{1600 \times 2}{20 \times 36} = 3.55$ กก/ซม²

ใกล้ $V_c \approx V$ ใช้ ⌀6@0.20 เหล็กปลอก.



(รูปตัดใกล้เสา ของคาน B

คานริม ช่วง 4 เมตร ขนาด 0.2×0.4 ม. (B3)

น.น. พื้น + น.น.จร = 350×2 = 700 กก/ม.

น.น.คาน = 200 "

น.น. ผนังเสี้ยง สูง 1.0 ม = 100 "

รวมทั้งหมดลงคาน = 1000 "

$M = 1000 \times \frac{4^2}{10} = 1600$ กก-ม. < Mc

$A_s = \frac{1600}{10.6 \times 36} = 4.19$ ซม.^{2}

ใช้ 3-Ø15 มม. As = 5.3 ซม.^{2}

ปลอก Ø6 มม. @0.25

คานยื่นช่วง 2.50 ม ขนาด 0.2×0.4 ม.

น.น.แผ่จากพื้น = $200 + \frac{5}{3} \times 2 = 300 \times \frac{2.5}{3} \times 2 + 200 = 700$ กก/ม

น.น.ที่ปลายคาน = 300×1×4 = 1200 กก.

$M = 700 \times \frac{2.5^2}{2} + 1200 \times 2.5 = 5187$ กก-ม

การเผื่อที่ใช้พื้นสำเร็จ

น.น.พื้น + น.น.จร = 300×4 = 1200 กก/ม

น.น.คาน = 200 "

รวมทั้งหมด = 1400 "

$M = 1400 \times \frac{2.5^2}{2} = 4375$ กก-ม.

ใช้เหล็ก 3-Ø19 มม. As = 8.50 ซม.^{2} เท่า (B1)

$M_s = A_s f_s j d = 8.5 \times 1200 \times 0.883 \times 36$

$= 324,200$ กก-ซม.

M ที่เหลือ = 4375 - 3242 = 1133 กก-ม.

ใช้ FIN รับ

ถ้าการเผื่อสำเร็จ น.น. = 200×4 + 200 = 1000 กก/ม

$M = 1000 \times \frac{2.5^2}{2} = 3125 < M_s$ OK.

ถ้าใช้พื้นสำเร็จถ้าขวางพื้นสาย

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 11-09-2566

พื้นชั้นที่ 1-2-3-4 ใช้พื้นสำเร็จ น.น.จร 250 กก/ม²

คานริม ช่วง 4 ม. ขนาด 0.2×0.4 ม. (B2)

น.น.พื้น + น.น.จร = (200+250)2 = 900 กก/ม

น.น.คาน = 200 "

น.น.ด้านข้าง = 200 "

รวมน้ำหนัก = 1300 "

$M = 1300 \times 4^2/10 = 2080$ กก-ม.

$A_s = \frac{2080}{10.6 \times 36} = 5.45$ ซม²

ใช้ 2-ϕ19มม. $A_s = 5.67$ ซม²

ปลอก ϕ6มม @ 0.20

คานกลาง ช่วง 4 ม. ขนาด 0.25×0.4 ม. (B1)

น.น.พื้น + น.น.จร = (200+250)4 = 1800 กก/ม.

น.น.คาน = 0.25×0.4×2400 = 240 "

รวมน้ำหนัก = 2040 "

$M = 2040 \times 4^2/10 = 3264$ กก-ม.

$M_c = Rbd^2 = 7.75 \times 25 \times 36^2 = 251100$ กก-ซม

$A_{s1} = \frac{251100}{1060 \times 36} = 6.58$ ซม²

$M_2 = M - M_c = 75300$ กก-ซม

$A_{s2} = \frac{75300}{1200(36-4)} = 1.96$ ซม²

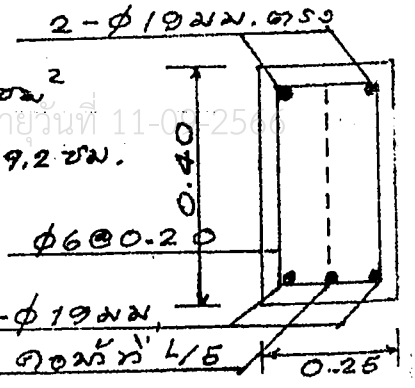
$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 8.54$ ซม² ใช้ 3-ϕ19มม.

$V = 2040 \times 2 = 4080$ กก.

$v = \frac{4080}{25 \times 36} = 4.53$ กก/ซม²

$s = \frac{A_v f_v}{v' b} = \frac{0.57 \times 1200}{(4.53-3.1)25} = 19.2$ ซม.

ใช้ปลอก ϕ6มม @ 0.20 เมื่อพ้นจากปลอก



(รูปตัดกลางคาน B_1)

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตรี
พิมพ์อาจวันที่ 11-08-2564

พื้น คสล. ขนาด 4×4 ม. หนา 10 ซม

Two-way slab, Method 2 case 5

$m = 4/4 = 1$

น.น.พื้น + น.น.จร = 240 + 250 = 490 กก/ม²

$M^{\oplus} = 0.05wS^2 = 0.05 \times 490 \times 4^2 = 392$ กก-ม.

$M_r = Rbd^2 = 7.75 \times 1 \times 7.5^2 = 430 > 392$ OK

$As = \frac{M}{f_s j d} = \frac{392}{12 \times 0.883 \times 7.5} = 4.93$ ซม²

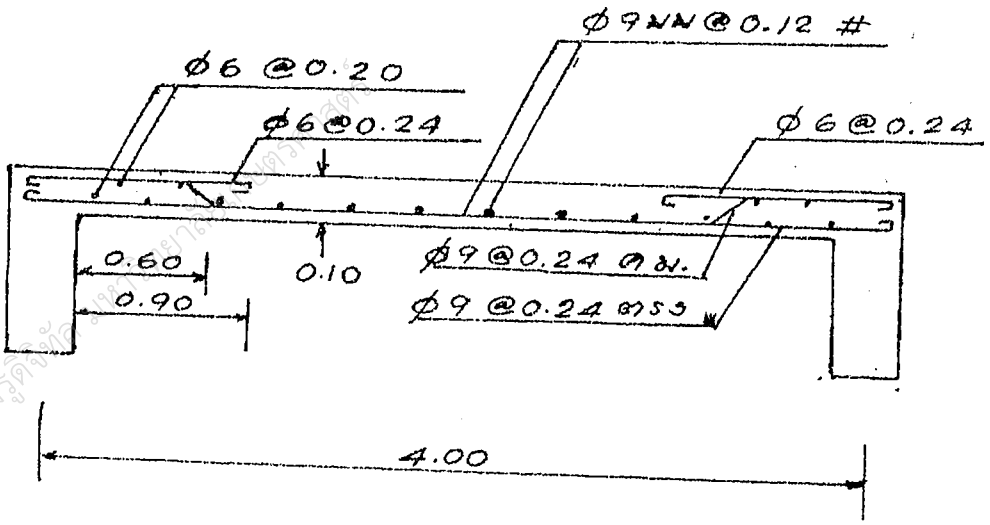
ใช้ ⌀ 9 มม @ 0.12 ม. ($A_s = 5.33$ ซม²)

$M^{\ominus} = 0.033 \times 490 \times 4^2 = 259$ กก-ม

$As = \frac{259}{12 \times 0.883 \times 6.6} = 3.70$ ซม²

ใช้ ⌀ 9 มม @ 0.24 + ⌀ 6 มม @ 0.24 สลับกัน

$As = 2.67 + 1.17 = 3.84$ ซม²



คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

หมายเหตุ พื้น แถบตามขวางเลยพื้นไม่แสดงการออกแบบ ให้ช่าง เสาและจำนวนรากพื้นไม่แสดง เพราะการออกแบบสลักเพชรและวิธีการตลอดกัน.

คานยื่น 1.50 ม ขนาด 0.2×0.4 ม. (B_3')

$M = 1400 \times \frac{1.5^2}{2} = 1575$ กก-ม

$A_s = \frac{1575}{10.6 \times 36} = 4.12$ ซม^2

ใช้ 3-ϕ15 มม. $A_s = 5.30$ ซม^2

ปลอก ϕ6 มม @ 0.20

คานรับพื้นยื่น 2.0 ม ขนาด 0.2×0.4 ม (B_3')

น.น.พื้น + น.น.จร = (200+150)2 = 700 กก/ม

น.น.คาน = 200 "

รวมน้ำหนัก = 900 "

$M = 900 \times 4^2/10 = 1440$ กก-ม

$A_s = \frac{1440}{10.6 \times 36} = 3.77$ ซม^2

ใช้ 3-ϕ15 มม $A_s = 5.30$ ซม^2

ปลอก ϕ6 มม @ 0.25

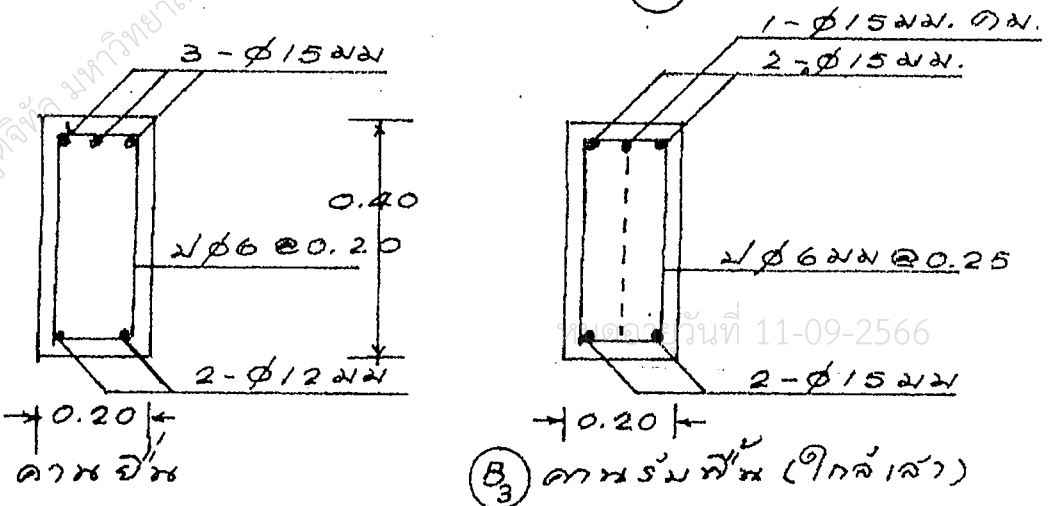
คานรับพื้นคอนกรีตหล่อในที่ ช่วง 3.85 ม

น.น.พื้น + น.น.จร = 350×2 = 700 กก/ม

น.น.คาน = 200 "

รวมน้ำหนัก = 900 "

ใช้ขนาดและเหล็กเสริมเท่า (B_3)



(B_3') คานยื่น (B_3) คานรับพื้น (ทางซ้าย)

* คาน-พื้น-บันได ส่วนที่ไม่แสดงการออกแบบ

การออกแบบเสากลาง (ไม่ต้องสนใจรายละเอียดการหาตัวหนัง)

หน้าตัดเหนือพื้นชั้น 4 ลงมารับโมเมนต์ได้ = 6330 กก.

" " 3 " " ชั้น 4 = 13860 "

" " 2 " " " 3 = 21,390 "

" " ดาดฟ้า " " " 2 = 28,920 "

" " ใต้ " " " ดาดฟ้า = 32,520 "

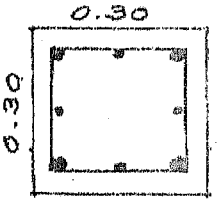
" " ดาดฟ้า " " " 1 = 40,050 "

ออกแบบสำหรับ ขนาด 0.3 × 0.3 ม. A_g = 900 ซม.^{2}

เสาปลอกเฉียง $P = 0.85(0.25A_g f_c' + A_s f_s)$

$$A_s = \frac{40050 - 0.85\times0.25\times900\times110}{0.85\times1200}$$

$$= \frac{40050-21037.5}{1020} = 18.64 \text{ ซม.}^2$$



ใช้ 4-ϕ15 มม + 4-ϕ19 มม A_s = 18.42 ซม.^{2}

4-ϕ 19 มม.
4-ϕ 15 มม.
ปลอก ϕ6 มม @0.20

การออกแบบคานรับแรง

ที่ชั้นหนึ่ก 40,050 กก

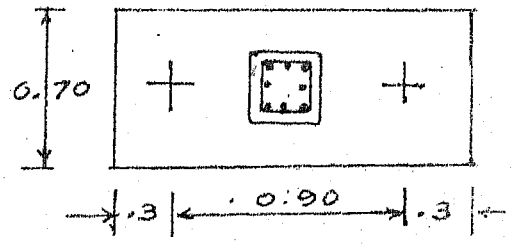
ใช้เหล็กยาว 2 ชั้น หน้ากว้าง 90 ซม. ความกว้าง 70 ซม.

$M = 20025\times0.3 = 6007.5$ กก-ม (ที่ขอบเสา)

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{600750}{7.75\times70}} = 33.28 \text{ ซม.}$$

ใช้ 35 ซม.

$$A_s = \frac{M}{f_s jd} = \frac{60075}{10.6\times35} = 16.19 \text{ ซม.}^2$$



ใช้ 6-ϕ19 มม A_s = 17.01 ซม.^{2}

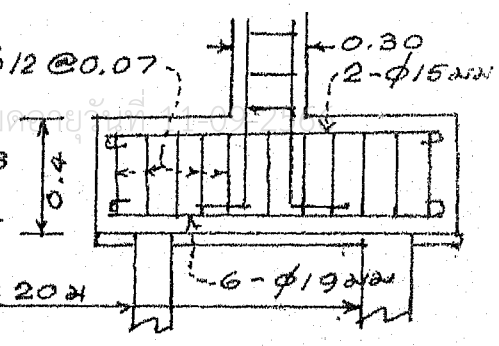
$$v = \frac{V}{bd} = \frac{20025}{70\times35} = 8.17 \text{ กก/ซม.}^2$$

ใช้เหล็กปลอก ϕ9 มม A_v = 1.27 ซม.^{2}

ระยะเหล็กปลอก $S = \frac{A_v f_v}{bv'} = \frac{1.27\times1200}{70\times5.07} = 4.3$

เหล็ก ϕ12 มม $S = \frac{2.26\times1200}{70\times5.07} = 7.64$

ใช้ปลอก ϕ12 มม @0.07



การออกแบบฐานแผ่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตัวอย่าง เสาต้นหนึ่งรับน้ำหนักบรรทุกจร 15,000 กก. ขนาดของเสา 20×20 ซม. ดินรับน้ำหนักปลอดภัยได้ 10 ตัน/ม.² จงออกแบบฐานราก

สมมติน้ำหนักฐานราก = 2000 กก.

น้ำหนักรวมลงดิน = 15000+2000 = 17000 กก.

พื้นที่ฐานราก = $\frac{17000}{10000}$ = 1.7 ม.²

ใช้ขนาดฐานราก = 1.3×1.3 ม. (กลัวเตี้ย)

หน่วยแรงดันดินสุทธิ = $\frac{15000}{1.3\times1.3}$ = 8876 กก./ม.²

โมเมนต์ที่ขอบเสา = $\frac{1}{2}\times8876\times0.55^2$ = 1342 กก-ม

$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} = \sqrt{\frac{134200}{7.75\times130}}$ = 11.54 ซม.

เลือกฐานรากหนา 20 ซม. d = 15 ซม.

พิจารณาแรงเฉือน

แนว 1-2 ห่างจากขอบเสา = d = 15 ซม.

$v_c = 0.29\sqrt{110}$ = 3.04 กก./ซม.²

เกิด $v = \frac{V}{bd} = \frac{8876\times(.55-.15)\times1.3}{130\times15}$

= 2.37 < 3.04 OK.

แนว 3-4-5-6 ห่างจากขอบเสา 7.5 ซม.

หน่วย $v_c = 0.53\sqrt{110}$ = 5.56 กก./ซม.²

เกิด $v = \frac{V}{bd} = \frac{8876(1.3^2-0.55^2)}{(4\times35)15}$

= 6.62 > 5.56 กก./ซม.² NO

หา d ใหม่ $d = \frac{V}{v_c b} = \frac{13913}{5.56\times140}$ = 17.87 ซม.

ใช้ฐานหนา 1.30×1.30×0.25 ; d = 20 ซม.

น้ำหนักฐาน = 1.69×.25×2400 = 1014 กก.

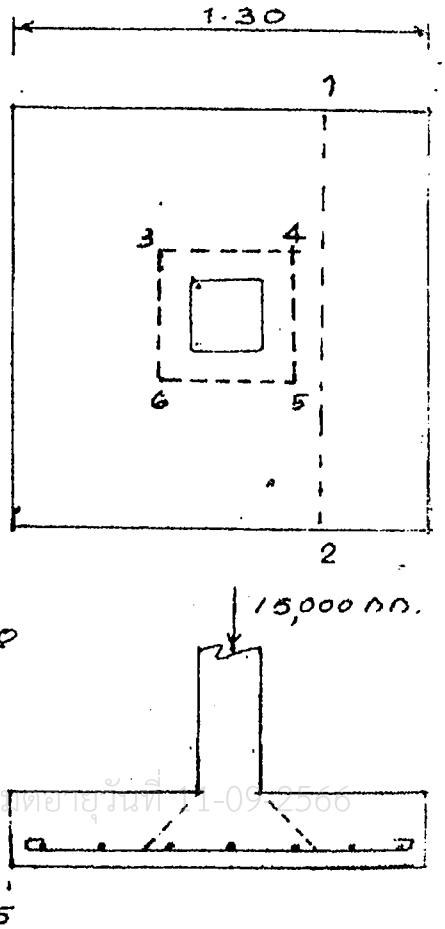
< 2000 กก. (ที่สมมติ) OK.

$A_s = \frac{134200}{1200\times0.88\times20}$ = 6.35 ซม.²

$\Sigma_o = \frac{V}{\mu jd} = \frac{8876\times1.30\times.55}{11\times0.88\times20}$ = 32.78 ซม.

* ควรใช้เหล็กข้ออ้อย

ใช้ 7-ϕ15 มม. A_s = 12.39 ซม.² Σ_o = 33.00 ซม. ระยะระหว่างแท่ง



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หมายเลขโทรศัพท์ 01-0922566

(ก) ตารางที่ 6001 — หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต

รายการ		หน่วยแรงที่ยอมให้ กก./ซม.^{2}						
		สำหรับกำลังอัดต่างๆ ของคอนกรีต	สำหรับคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดตามที่แจง σ_c					
			100	150	200	250	300	350
าส่วนโมดูลัส n รับคอนกรีตหนัก 2.33 ต/ม^3 อ 6200)	n	$\frac{2,040,000}{w^{1.5}\ 4270\sqrt{\sigma_c}}$ $\frac{2,040,000}{15,210\sqrt{\sigma_c}}$	14	11	10	9	8	7
กัด : น่วยแรงอัดที่ผิว	f_c	$0.45\sigma_c$	45	67.5	90	112.5	135	157.5
น่วยแรงดึงที่ผิวในฐานราก และ ำแพงคอนกรีตลวน	f_c	$0.42\sqrt{\sigma_c}$	4.2	5.2	6.0	6.6	7.3	7.9
เฉือน : านที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	v_c	$0.29\sqrt{\sigma_c}$	2.9	3.6	4.1	4.6	5.0	5.4
งที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	v_c	$0.32\sqrt{\sigma_c}$	3.2	3.9	4.5	5.0	5.5	6.0
งก่อการเสริมลูกตั้งหรือคอมา รือใช้ประกอบกันอย่างเหมาะสม	v	$1.32\sqrt{\sigma_c}$	13.2	16.2	18.7	20.9	22.9	24.7
ยนพื้นและฐนราก (แรงเฉือน ามเสนขอบ)	v_c	$0.53\sqrt{\sigma_c}$	5.3	6.5	7.5	8.4	9.2	9.9
แบกทาน :	f_c							
บเต็มเนื้อที่		$0.25\sigma_c$	25.0	37.5	50.5	62.5	75.0	87.5
ยหนึ่งในสามของเนื้อที่หรือ อยกว่า *		$0.37\sigma_c$	37.0	55.5	74.0	92.5	111.0	129.5

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

าที่เพิ่มให้นี้ใช้เฉพาะเมื่อระยะสิ้นสุดระหว่างขอบของเนื้อที่แบกทาน และไม่แบกทาน มีความยาวไม่น้อยกว่า นึ่งในสี่ของมิติดานขนานของเนื้อที่แบกทาน สำหรับเนื้อที่แบกทาน ซึ่งนับว่าเรียงศูนย์รวมและมีเนื้อที่มากกว่า นึ่งในสามของเนื้อที่เต็ม ให้ใช้หน่วยแรงที่ยอมให้เป็นสัดส่วนระหว่างค่าทั้งสองที่กำหนดให้

$\sigma_c = \beta f_c$ ให้ $\beta = 1$ สำหรับคอนกรีตที่มีการควบคุมอย่างเข้มงวด $\beta = 5/6$ คอนกรีตควบคุมหย่อน

6103 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

เหล็กเส้นที่ใช้เสริมคอนกรีตจะรับแรงได้ไม่เกินพิกัดดังต่อไปนี้

(ก) รับแรงดึง

– สำหรับเหล็กเส้นซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน ซึ่งไม่มีผลทดสอบกำลังดึง

.....1200 กก./ซม.^{2}

– สำหรับเหล็กเสริมเอกซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. หรือเล็กกว่าในพื้นทางเดียว ช่วงไม่เกิน 3.0 เมตร ใช้ร้อยละ 50 ของกำลังคลากต่ำสุด แต่ต้องไม่เกิน

..... 2100 กก./ซม.^{2}

– สำหรับเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีกำลังคลากไม่น้อยกว่า 3400 กก./ซม.^{2} ให้ใช้ร้อยละ 50 ของกำลังคลาก แต่ต้องไม่เกิน 1500 กก./ซม.^{2}

– สำหรับเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีกำลังคลาก ไม่น้อยกว่า 4200 กก./ซม.^{2} ใช้ได้ไม่เกิน

..... 1700 กก./ซม.^{2}

– สำหรับเหล็กขวั้น ให้ใช้ร้อยละ 50 ของกำลังพิสูจน์ แต่ต้องไม่เกิน

..... 2400 กก./ซม.^{2}

(ข) รับแรงอัดในเสา ค.ส.ล.

– เสาเหล็กปลอดเกลียว ใช้ร้อยละ 40 ของกำลังคลากต่ำสุด แต่ต้องไม่เกิน

..... 2100 กก./ซม.^{2}

– เสาปลอกเกลียว ใช้ร้อยละ 85 ของค่าที่กำหนดสำหรับเสาปลอกเกลียว แต่ต้องไม่เกิน ..... 1750 กก./ซม.^{2}

– เสาแบบผสม เหล็กรูปพรรณ ASTM A36

..... 1250 กก./ซม.^{2}

เหล็กรูปพรรณ ASTM A 7

..... 1100 กก./ซม.^{2}

– เหล็กหล่อ ..... 700 กก./ซม.^{2}

– ท่อเหล็ก ..... ดูพิกัดในข้อ 6606 (อาจใช้1000กก/ซม.^{2})

(ค) รับแรงอัด ในองค์อาคารรับแรงดัด

เหล็กเสริมอัด จะรับแรงได้ไม่เกินที่กำหนดไว้ในข้อ 6200 (ดูคานเสริมเหล็กรับแรงอัด)

(ง) เหล็กปลอกเกลียว (สำหรับกำลังคลากที่ใช้ในสมการ 48 – 1)

ใช้ค่ากำลังคลาก ..... 2800 กก./ซม.^{2}

คลังความรู้ดิจิทัลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

รายการ	f_c กก/ซม^2	f_c' กก/ซม^2	หน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้ กก/ซม^2 สำหรับเหล็กข้ออ้อยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.						
			6	9	12	15	19	25	28
สำหรับเหล็กบนรับแรงดึง $u=\frac{2.29\sqrt{f_c'}}{D}$ ไม่เกิน 25 กก/ซม^2	45	100	25	25	19.08	15.27	12.05	9.16	8.18
	63	140	25	25	22.58	18.06	14.26	10.84	9.68
	67.5	150	25	25	23.33	18.67	14.77	11.20	10.0
	90	200	25	25	25	21.59	17.04	12.95	11.56
	112.5	250	25	25	25	24.13	19.05	14.48	12.93
	135	300	25	25	25	25	20.88	15.86	14.16
	157.5	350	25	25	25	25	22.55	17.24	15.30
เหล็กอื่นๆที่รับแรงดึง $u=\frac{3.23\sqrt{f_c'}}{D}$ ไม่เกิน 25 กก/ซม^2	45	100	35	35	26.92	21.53	17.00	12.92	11.54
	63	140	35	35	31.85	25.48	20.12	15.29	13.65
	67.5	150	35	35	32.96	26.37	20.81	15.82	14.13
	90	200	35	35	35	30.45	24.57	18.67	16.67
	112.5	250	35	35	35	34.00	26.88	20.40	18.21
	135	300	35	35	35	35	29.44	22.38	19.98
	157.5	350	35	35	35	35	31.80	24.10	21.57

หมายเหตุ (1) เหล็กบน คือ เหล็กเส้นตามแนวราบที่มีคอนกรีตหล่ออยู่ใต้เหล็กเส้นนั้นมากกว่า 30 ซม.ขึ้นไป

(2) เหล็กอื่น เช่น เหล็กเสริมทางตั้งของกำแพงและเหล็กผิวล่างต่างๆ

(3) เหล็กเส้นผิวเรียบยอมให้แรงยึดหน่วงเป็นครึ่งหนึ่งของเหล็กข้ออ้อย แต่ไม่เกิน 11 กก/ซม^2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมดอายุวันที่ 11-09-2566

5200 แผ่นพื้นและคาน

5201 โมเมนต์และแรงเฉือน

ในกรณีที่โครงสร้างมีช่างตั้งแต่สองช่วงขึ้นไป และความยาวช่วงเกือบเท่ากัน โดยความยาวของช่วงที่เกียงกันยาวกว่าช่วงสั้นไม่เกิน 1.2 เท่า และน้ำหนักบรรทุกแผ่เท่ากันเต็มช่วงบนของโครงการดังกล่าว และน้ำหนักบรรทุกจรมากกว่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่เกิน 3 เท่าแล้ว หากไม่หาโมเมนต์และแรงเฉือนโดยการวิเคราะห์อย่างละเอียด อาจใช้ค่าที่ให้ไว้ดังต่อไปนี้ :-

โมเมนต์บวก

คานช่วงนอก :

- ปลายไม่ยึดรั้งกับที่รองรับ $\frac{1}{11} wL'^2$
- ปลายหล่อเป็นเนื้อเดียวกับที่รองรับ $\frac{1}{14} wL'^2$

คานช่วงใน : ..... $\frac{1}{16} wL'^2$

โมเมนต์ลบ

- โมเมนต์ที่ขอบนอกของที่รองรับ
  ตัวในแรก เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกัน 2 ช่วง $\frac{1}{9} wL'^2$
- เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกันมากกว่า 2 ช่วง $\frac{1}{10} wL'^2$
- โมเมนต์ที่ขอบของที่รองรับตัวในอื่น ๆ $\frac{1}{11} wL'^2$
- โมเมนต์ที่ขอบของที่รองรับทุกแห่งสำหรับ
  (ก) แผ่นพื้นที่มีช่วงยาวไม่เกิน 3.00 ม. และ
  (ข) คานที่มีอัตราส่วนผลรวมของสติฟเนสของเสา
  ต่อของคานที่มาบรรจบกันมากกว่า 8 $\frac{1}{12} wL'^2$
- โมเมนต์ที่ขอบในของที่รองรับตัวริมและ
  องค์อาการหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ
  เมื่อที่รองรับเป็นคานขอบ $\frac{1}{24} wL'^2$
  เมื่อที่รองรับเป็นสา $\frac{1}{16} wL'^2$

แรงเฉือน :

- แรงเฉือนที่ขอบของที่รองรับตัวในแรก $1.15 \frac{wL'}{2}$
- แรงเฉือนที่ขอบของที่รองรับตัวอื่น ๆ $\frac{wL'}{2}$

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมดอายุวันที่ 11-09-2566

9102 วิธีที่ 2

C = สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์สำหรับแผ่นพื้นสองทาง ซึ่งให้ไว้ในตาราง 9103

m = อัตราส่วนระหว่างช่วงสั้นต่อช่วงยาว สำหรับแผ่นพื้นสองทาง

S = ความยาวของช่วงสั้นสำหรับแผ่นพื้นสองทาง โดยคิดระยะศูนย์ถึงศูนย์ระหว่างที่รองรับหรือช่วงว่างบวกกับอีก 2 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น แล้วแต่ค่าไหนจะน้อยกว่ากัน

w = น้ำหนักแผ่กระจายทั้งหมดต่อตารางเมตร

(ก) พิกัดต่าง ๆ — ค่าสัมประสิทธิ์ต่อไปนี้ ใช้สำหรับแผ่นพื้น (ตันหรือเป็นครีบ), ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง, มีผนังหรือคานรองรับทั้งสี่ด้าน ซึ่งหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับแผ่นพื้น

วิธีที่ 2 ตาราง 9103 สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์

โมเมนต์	ช่วงสั้น ค่าต่าง ๆ ของ						ช่วงยาว สำหรับ
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5 และต่ำกว่า	m ทุกค่า
ที่ 1 ช่วงพื้นภายใน							
โมเมนต์ลบ—ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.033	0.040	0.048	0.055	0.063	0.083	0.033
—ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	—	—	—	—	—	—	—
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.025	0.030	0.036	0.041	0.047	0.062	0.025
ที่ 2 ไม่ต่อเนื่องกันด้านเดียว							
โมเมนต์ลบ—ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	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
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.031	0.036	0.041	0.047	0.052	0.064	0.031
ที่ 3 ไม่ต่อเนื่องกันสองด้าน	0.049	0.057	0.064	0.071	0.078	0.090	0.049
โมเมนต์ลบ—ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.025	0.028	0.032	0.036	0.039	0.045	0.025
—ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.037	0.043	0.048	0.054	0.059	0.068	0.037
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง							
ที่ 4 ไม่ต่อเนื่องกันสองด้าน							
โมเมนต์ลบ—ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	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
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.044	0.050	0.056	0.062	0.068	0.074	0.044
ที่ 5 ไม่ต่อเนื่องกันทั้งสี่ด้าน							
โมเมนต์ลบ—ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	—	—	—	—	—	—	—
—ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.033	0.	0.043	0.047	0.053	0.055	0.033
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.050	0.057	0.064	0.072	0.080	0.083	0.050

แผ่นพื้นสองทาง ให้ถือว่าประกอบด้วยแถบต่าง ๆ ในแต่ละทิศทางดังนี้ :-

แถบกลาง มีความกว้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของช่วงพื้น มีสภาพเหมือนกันทั้งสองข้างของเส้นแบ่งศูนย์กลางของช่วง และต่อเลยออกไปในช่วงพื้นในทิศทางที่คิดโมเมนต์

แถบเสา มีความกว้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของช่วงพื้น มีขนาดเท่ากับพื้นที่หนึ่งในสี่ของช่วงพื้นสองแผ่น ภายนอกของแถบกลาง

ถ้าอัตราส่วนระหว่างด้านสั้นต่อด้านยาว มีค่าน้อยกว่า 0.5 ให้ถือว่าแถบกลางในด้านสั้นมีความกว้างเท่ากับผลต่างระหว่างช่วงยาวกับช่วงสั้น, พื้นที่ที่เหลือจะเป็นแถบเสาสองแบบ

ให้ถือว่า หน้าตัดวิกฤตสำหรับการคำนวณหาโมเมนต์เป็นหน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ ซึ่งจะหาได้ดังนี้ :-

สำหรับโมเมนต์ลบ ให้คิดที่โคนรอบของช่วงพื้นตรงขอบของคานซึ่งรองรับ

สำหรับโมเมนต์บวก ให้คิดที่เส้นแบ่งศูนย์กลางของช่วงพื้น

(ข) โมเมนต์คัด – จะหาค่าโมเมนต์คัด สำหรับแถบกลางได้โดยใช้สูตร = ค่าโมเมนต์เฉลี่ยต่อความกว้าง 1 เมตรของแถบเสาเท่ากับสองในสามของโมเมนต์เฉลี่ยอย่างเดียวกันในแถบกลาง ในการหาระยะเรียงของเหล็กเสริมในแถบเสาให้ถือว่าโมเมนต์มีค่าสูงสุดที่ขอบของแถบกลางและลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าต่ำสุดที่ขอบของช่วงพื้น

ถ้าโมเมนต์ลบที่ด้านใดของที่รองรับ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 80 ของโมเมนต์อีกด้านหนึ่งให้กระจายสองในสามของผลต่างของโมเมนต์ออกไป ตามสัดส่วนของสติฟเนสสัมพัทธ์ของแผ่นพื้น

(ค) แรงเฉือน – อาจคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนในแผ่นพื้นได้ โดยสมมุติว่า การกระจายน้ำหนักไปยังที่รองรับเป็นไปตามที่ระบุไว้ในข้อ (ง)

(ง) คานรองรับ – สำหรับช่วงพื้นสองทางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ให้ถือว่าน้ำหนักที่ลงบนคานรองรับคือ น้ำหนักที่อยู่ภายในพื้นที่ของช่วงพื้นซึ่งล้อมรอบโดยเส้นที่ลาก 45 องศา จากมุมทั้งสี่ ตัดกับเส้นมีเดียนของช่วงพื้นที่ขนานกับด้านยาว

อาจหาค่าประมาณของโมเมนต์คัดได้โดยใช้น้ำหนักเฉลี่ยต่อเมตรของคาน สำหรับช่วงพื้นและช่วงที่มีการรองรับ ดังนี้ :-

สำหรับช่วงสั้น : $\frac{wS}{3}$

สำหรับช่วงยาว : $\frac{wS}{3} \quad \frac{(3-m^2)}{2}$

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

USEFUL TABLES

Most Tables are reproduced from View point Publication

METRIC CONVERSIONS

Table 1

Basic conversion factors

The following equivalents of SI units are given in imperial and, where applicable, metric technical units

1 mm	= 0.03937 in	1 in	= 25.4 mm	1 m²	= 1.196 yd²	1 yd²	= 0.8361 m²
1 m	= 3.281 ft	1 ft	= 0.3048 m	1 hectare	= 2.471 acres	1 acre	= 0.4047 hectares
	= 1.094 yd	1 yd	= 0.9144 m	1 mm³	= 0.00006102 in³	1 in³	= 16,390 mm³
1 km	= 0.6214 mile	1 mile	= 1.609 km	1 m³	= 35.31 ft³	1 ft³	= 0.02832 m³
1 mm²	= 0.00155 in²	1 in²	= 645.2 mm²		= 1.308 yd³	1 yd³	= 0.7646 m³
1 m²	= 10.76 ft²	1 ft²	= 0.0929 m²	1 mm⁴ (M. of I.)	= 0.000002403 in⁴	1 in⁴	= 416,200 mm⁴

Force

1 N	= 0.2248 lbf = 0.1020 kgf	1 kN	= 0.1004 tonf = 102.0 kgf = 0.1020 tonne f
4.448 N	= 1 lbf = 0.4536 kgf	9.964 kN	= 1 tonf = 1,016 kgf = 1.016 tonne f
9.807 N	= 2.205 lbf = 1 kgf	9.807 kN	= 0.9842 tonf = 1,000 kgf = 1 tonne f

Force per unit length

1 N/m	= 0.06852 lbf/ft = 0.1020 kgf/m	1 kN/m	= 0.0306 tonf/ft = 0.1020 tonne f/m
14.59 N/m	= 1 lbf/ft = 1.488 kgf/m	32.69 kN/m	= 1 tonf/ft 3.333 tonne f/m
9.807 N/m	= 0.672 lbf/ft = 1 kgf/m	9.807 kN/m	= 0.3000 tonf/ft 1 tonne f/m

Force per unit area

1 N/mm²	= 145.0 lbf/in² = 10.20 kgf/cm²	1 N/mm²	= 0.06475 tonf/in² = 10.20 kgf/cm²
0.006895 N/mm²	= 1 lbf/in² = 0.0703 kgf/cm²	15.44 N/mm²	= 1 tonf/in² = 157.5 kgf/cm²
0.09807 N/mm²	= 14.22 lbf/in² = 1 kgf/cm²	0.09807 N/mm²	= 0.006350 tonf/in² = 1 kgf/cm²
1 N/m²	= 0.02089 lbf/ft² = 0.102 kgf/m²	1 N/mm²	= 9.324 tonf/ft² = 10.20 kgf/cm²
47.88 N/m²	= 1 lbf/ft² = 4.882 kgf/m²	0.1073 N/mm²	= 1 tonf/ft² = 1.094 kgf/cm²
9.807 N/m²	= 0.2048 lbf/ft² = 1 kgf/m²	0.09807 N/mm²	= 0.9144 tonf/ft² = 1 kgf/cm²

Force per unit volume

1 N/m³	= 0.006366 lbf/ft³ = 0.102 kgf/m³	1 kN/m³	= 0.002842 tonf/ft³ = 0.1020 tonne f/m³
157.1 N/m³	= 1 lbf/ft³ = 16.02 kgf/m³	351.9 kN/m³	= 1 tonf/ft³ = 35.88 tonne f/m³
9.807 N/m³	= 0.0624 lbf/ft³ = 1 kgf/m³	9.807 kN/m³	= 0.02787 tonf/ft³ = 1 tonne f/m³
1 kN/m³	= 0.003684 lbf/in³ = 0.1020 tonne f/m³		
271.4 kN/m³	= 1 lbf/in³ = 27.68 tonne f/m³		
9.807 kN/m³	= 0.03613 lbf/in³ = 1 tonne f/m³		

Moment

1 N-m	= 8.851 lbf-in = 0.7376 lbf-ft = 0.1020 kgf-m		
0.1130 N-m	= 1 lbf-in = 0.08333 lbf-ft = 0.01152 kgf-m		
1.356 N-m	= 12 lbf-in = 1 lbf-ft = 0.1383 kgf-m		
9.807 N-m	= 86.80 lbf-in = 7.233 lbf-ft = 1 kgf-m		

Fluid capacity

1 litre	= 0.22 imperial gallons	= 0.2642 USA gallons	
4.546 litres	= 1 imperial gallon	= 1.201 USA gallons	
3.785 litres	= 0.8327 imperial gallons	= 1 USA gallon	

Useful data

1,000 kg/m³ = 62.4 lb/ft³ (densit. of water)
23.6 kN/m³ = 2,400 kg/m³ = 150 lb/ft³ (nominal weight of reinforced concrete)
14 kN/mm² (approx) = 140 × 10³ kg/cm² (approx) = 2 × 10⁶ lb/in² (nominal elastic modulus of concrete)
10 × 10⁻⁶ per °C = 5.5 × 10⁻⁶ per °F (nominal coefficient of linear expansion of concrete).

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

BENDING MOMENTS AND SHEARING FORCES: Basic data

Basic relation

At any section:

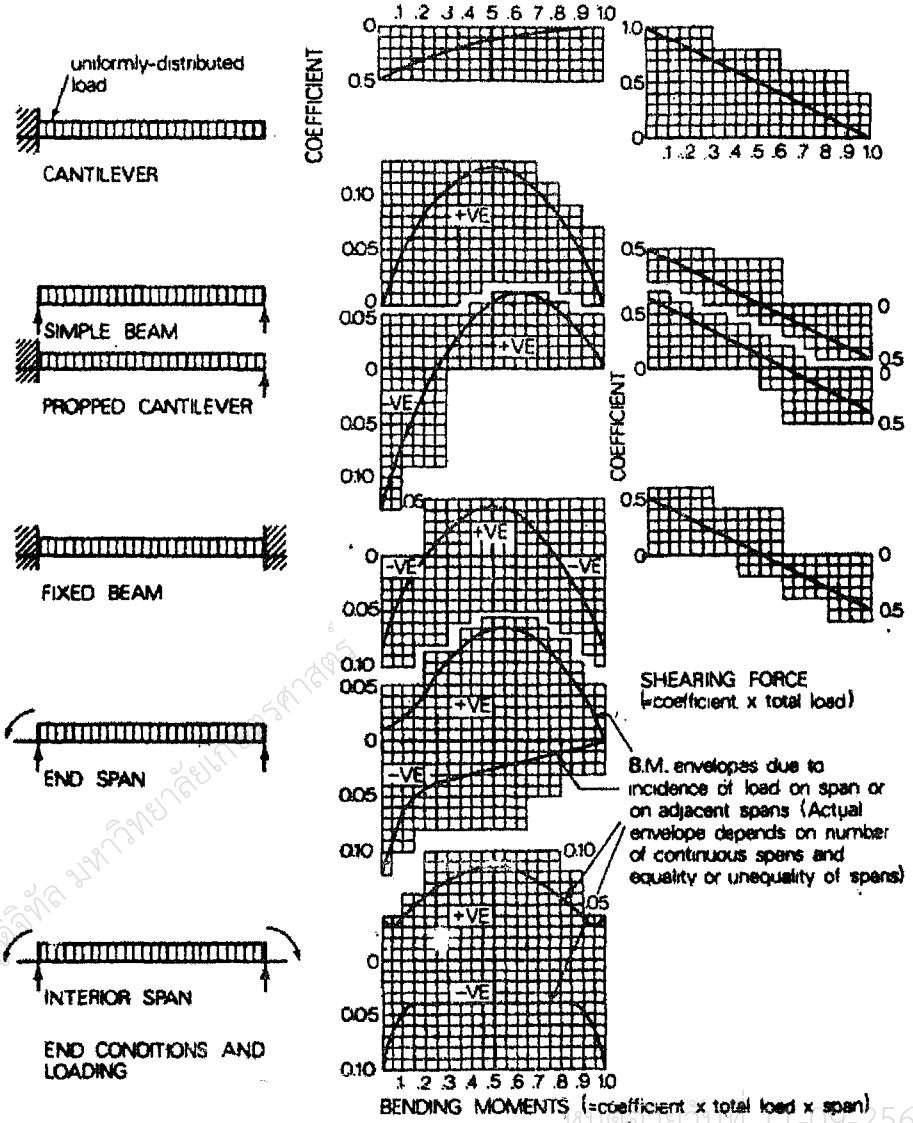
Shearing force $V = \Sigma$ [loads and reactions on one side of section] = rate of change of M — **Deflection (elastic)** $e = \int \theta$.

Bending moment $M = \Sigma$ [moments of loads and reactions on one side of section] = rate of change of $EI\theta$

Slope $\theta = \int \frac{M}{EI}$ rate of change of e

I = moment of inertia of member at section
E = elastic modulus of material

Diagrams of bending moment and shearing force



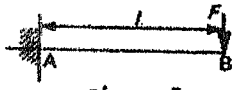
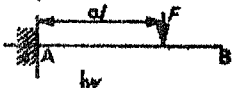
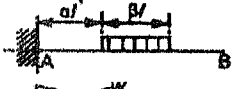
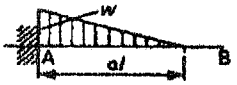
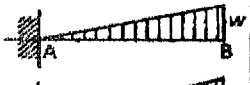
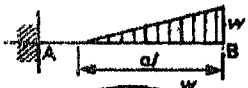
Maximum $\frac{\text{span}}{\text{depth}}$ ratios (CP 114)

Structural condition		Beams			Solid slabs: Spanning in one direction			Solid slabs: Spanning in two directions			Flat slabs: minimum thickness 125 mm (5 in)		
Stresses N/mm²	f_{sc}	≯140	>140		≯140	>140		≯140	>140		Panels	With drops	Without drops
	f_{cr}	≯10	≯10	>10	≯10	≯10	>10	≯10	≯10	>10			
Cantilever		10	9	8.5	12	10.8	10.2	—	—	—	Edge	36	32
Freely-supported		20	18	17	30	27	25.5	35	31.5	29.8	Interior	40	36
Continuous		25	22.5	21.2	35	31.5	29.8	40	36	34			

CANTILEVERS AND FREELY-SUPPORTED BEAMS (Table 10)

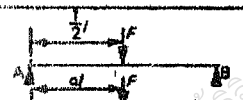
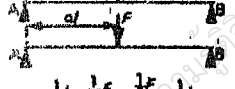
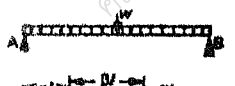
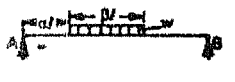
Total load on cantilever = F. Length of cantilever = l.
Reaction at A = maximum shearing force = F.
Bending moment at A = (tabulated or calculated coefficient k_A) × F × l.
Bending moment at B = zero
Maximum deflection at B = (tabulated or calculated coefficient a_B) × $\frac{Fl^3}{EI}$

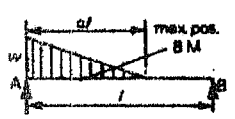
Cantilevers

Loading	Total load F	Bending-moment coefficient k_A	Deflection coefficient a_B
	F	-1.0	$\frac{1}{3}$
	F	$-a$	$\frac{a^2}{6}(3-a)$
	wl	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$
	$w\beta l$	$-\left(a+\frac{1}{2}\beta\right)$	$\frac{1}{24}(-4a^3+12a^2-8a^2\beta+12a\beta-4a\beta^2+4\beta^2-\beta^3)$
	$\frac{1}{2}wl$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{15}$
	$\frac{1}{2}wal$	$-\frac{a}{3}$	$\frac{a^2}{60}(5-a)$
	$\frac{1}{2}wl$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{11}{60}$
	$\frac{1}{2}wal$	$-\left(1-\frac{a}{3}\right)$	$\frac{1}{60}[20-10a+a^3]$
	$\frac{2}{3}wl$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{7}{60}$
	$\frac{1}{2}wl$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{11}{96}$

Freely-supported beams

Total load on span = F.
Length of span = l.
Reaction at A = $r_A F$.
Reaction at B = $r_B F$.
Maximum positive bending moment = $k_C Fl$.
Maximum deflection = $a_{max}\left(\frac{Fl^3}{EI}\right)$.
Bending moment at A and B = 0.

Loading	Total load F	Reaction coefficients r_A	Reaction coefficients r_B	Coefficient for maximum positive bending moment k_C	Coefficient for maximum deflection a_{max}
	F	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{4}$	$\frac{1}{48}$
	F	$1-a$	a	$+a(1-a)$	$\frac{1}{3}a^2(1-b)^2$
	F	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{8}$	$\frac{23}{1296}$
	wl	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{8}$	$\frac{5}{384}$
	$w\beta l$	$1-\left(a+\frac{1}{2}\beta\right)$	$a+\frac{1}{2}\beta$	$+\left(a+\frac{1}{2}\beta\right)\times\left(1-a-\frac{1}{2}\beta\right)\left(1-\frac{1}{2}\beta\right)$	—
	$\frac{1}{2}wl$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{6}$	$\frac{1}{60}$
	$wl(1-a)$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{3-4a^2}{24(1-a)}$	$\frac{25-40a^2+16a^4}{1920(1-a)}$

	a	$\frac{1}{2}wal$				
	1.0	0.5 wl	0.67	0.33	0.128	1/76.75
	0.9	0.45 wl	0.70	0.30	0.129	
	0.8	0.4 wl	0.73	0.27	0.127	
	0.7	0.35 wl	0.77	0.23	0.123	
	0.6	0.3 wl	0.80	0.20	0.116	
	0.5	0.25 wl	0.83	0.17	0.106	

BEAMS FIXED AT ONE OR BOTH ENDS: General formulae (Table 10)

F = Total load on beam — Span = l

Reaction at B = $r_B F$ — Reaction at A = $F - r_B F$

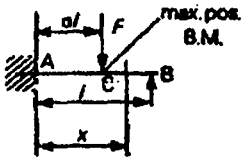
Bending moments:

Negative at support A = $K_A Fl$ — At support B = $K_B Fl$

Maximum positive (at C) = $K_C Fl$ — Distance of C from B = ψl

Maximum deflection = $s_{max} \times \frac{Fl^3}{EI}$

Beams fixed at support A, freely supported at B ($K_B = 0$)



Reaction at B: $r_B = \frac{1}{2}\alpha^2(3-\alpha)$

Bending moments: $K_A = -\frac{1}{2}\alpha(1-\alpha)(2-\alpha)$; $K_C = \frac{1}{2}\alpha^2(1-\alpha)(3-\alpha)$

Deflection:

Maximum deflection occurs when $\alpha = 2-\sqrt{2} = 0.586$. Then $s_{max} = \frac{1}{101.9}$

When $\alpha \leqslant 0.586$,

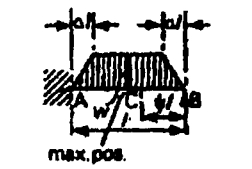
Maximum deflection occurs at $x = \frac{2\alpha(2-\alpha)}{2+2\alpha-\alpha^2}$

$s_x = -\frac{1}{12}(1-x)\alpha^2[2\alpha - x(2-x)(3-\alpha)]$

When $\alpha > 0.586$,

Maximum deflection occurs at $x = 1 - \sqrt{\frac{1-\alpha}{3-\alpha}}$

$s_x = -\frac{1}{12}(1-\alpha)x^2[2x - \alpha(2-\alpha)(3-x)]$



Total load = $F = (1-\alpha)wl$

Reaction at B: $r_B = \frac{1}{2}(3-\alpha+\alpha^2)$

Bending moments: $K_A = -\frac{1}{2}(1+\alpha-\alpha^2)$ $\quad K_C = r_B\psi - \frac{1}{2(1-\alpha)}[\psi(1+\alpha) - \alpha(1+\frac{1}{3}\alpha)]$

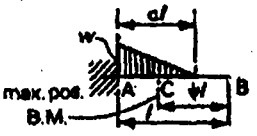
where $\psi = \frac{1}{2}(3+2\alpha^2-\alpha^3)$

Deflection:

When $\alpha = \frac{1}{2}$, $s_{max} = \frac{1}{139.5}$

When $\alpha = 0$, $s_{max} = \frac{1}{185}$

} Intermediate values can be interpolated.



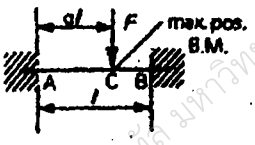
Total load = $F = \frac{1}{2}wαl$

Reaction at B: $r_B = \frac{1}{20}\alpha^2(5-\alpha)$

Bending moments: $K_A = -\frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^3}{20}$ $\quad K_C = r_B\psi - \frac{1}{3\alpha^2}(\alpha+\psi-1)^3$

where $\psi = 1-\alpha+\alpha^2\sqrt{\frac{5-\alpha}{20}}$

Beams fixed at both supports



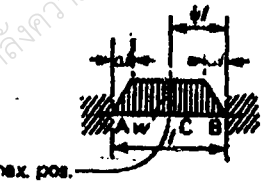
Reaction at B: $r_B = \alpha^2(3-2\alpha)$

Bending moments: $K_A = -\alpha(1-\alpha)^2$ $\quad K_B = -\alpha^2(1-\alpha)$; $K_C = 2\alpha^2(1-\alpha)^2$

Deflection:

When $\alpha \geqslant \frac{1}{2}$, $s_{max} = \frac{2\alpha^3(1-\alpha)^2}{3(1+2\alpha)^2}$

When $\alpha \leqslant \frac{1}{2}$, $s_{max} = \frac{2\alpha^2(1-\alpha)^3}{3(1+2\alpha)^2}$



Total load = $F = (1-\alpha)wl$

Reaction at B: $r_B = \frac{1}{2}$ $\quad \psi = \frac{1}{2}$

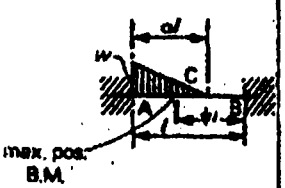
Bending moments: $K_A = K_B = -\frac{1}{12(1-\alpha)}(1-2\alpha^2+\alpha^3)$; $K_C = \frac{1-2\alpha^2}{24(1-\alpha)}$

Deflection:

When $\alpha = \frac{1}{2}$, $s_{max} = \frac{7}{1,920}$

When $\alpha = 0$, $s_{max} = \frac{1}{384}$

} Intermediate values can be interpolated



Total load = $F = \frac{1}{2}wαl$

Reaction at B: $r_B = \frac{\alpha^2}{10}(5-2\alpha)$

Bending moments: $K_A = -\frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha^2}{3} - \frac{\alpha^3}{10}$ $\quad$ where $\psi = 1-\alpha+\alpha^2\sqrt{\frac{5-2\alpha}{10}}$

$K_B = -\frac{\alpha^2}{6} + \frac{\alpha^3}{10}$

$K_C = r_B\psi - \frac{1}{3\alpha^2}(\alpha+\psi-1)^3 + K_B$

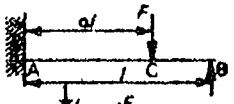
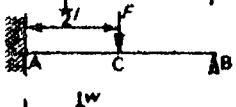
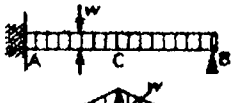
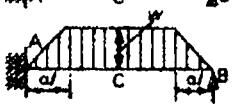
Note: Values of coefficients for special cases of loading are given in Table 11.

BEAMS FIXED AT ONE OR BOTH ENDS: Special cases (Table 11)

Total load on span $l = F$.
Reaction at B = (tabulated or calculated coefficient r_B) × F; reaction at A = $F(1 - r_B)$.
Negative bending moment at A = (tabulated or calculated coefficient k_A) × Fl.
Maximum positive bending moment at C = (tabulated or calculated coefficient k_C) × Fl.
Position of plane of maximum bending moment = ψl = distance CB.
Maximum deflection = (tabulated or calculated coefficient a_{max}) × $\frac{Fl^3}{EI}$.

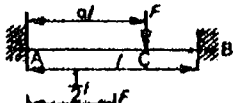
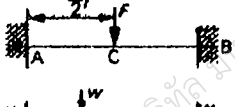
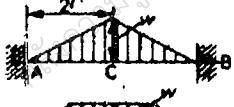
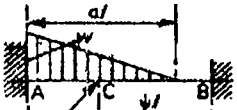
Beams fixed at one support, freely supported at other support

Bending moment at B = 0

Loading		Total load F	Reaction coefficient r_B	Bending moment coefficients k_A (at support A)	k_C	ψ	Deflection coefficient a_{max}
		F	$\frac{1}{2}a^2(3-a)$	$-\frac{1}{2}a(1-a)(2-a)$	$\frac{1}{2}a^3(1-a)\times(3-a)$	$1-a$	See formula on Table 10
		F	$\frac{5}{16}$	$-\frac{3}{16}$	$+\frac{5}{32}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{107.3}$
		wl	$\frac{3}{8}$	$-\frac{1}{8}$	$+\frac{9}{128}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{185}$
		$\frac{1}{2}wl$	$\frac{11}{32}$	$-\frac{5}{32}$	$+\frac{1}{9.5}$	$\frac{27}{64}$	$\frac{1}{139.5}$
		$(1-a)wl$	See formula on Table 10	$-\frac{1}{8}(1+a-a^2)$	See formula on Table 10	$\frac{3+2a^2-a^3}{8}$	See Table 10
	a	$\frac{1}{2}wal$					
	1.0	0.5 wl	0.20	−0.133	+0.060	0.45	1/210
	0.9	0.45 wl	0.17	−0.133	+0.057	0.47	} —
	0.8	0.4 wl	0.13	−0.132	+0.053	0.49	
	0.7	0.35 wl	0.10	−0.128	+0.047	0.53	
	0.6	0.3 wl	0.08	−0.121	+0.041	0.57	
See formulae on *Table 25*	0.5	0.25 wl	0.06	−0.111	+0.032	0.62	

Beams fixed at both supports

Negative bending moment at B = (tabulated or calculated coefficient k_B) × Fl.

Loading		Total load F	Reaction coefficient r_B	Bending moment coefficients k_A	k_B	k_C	ψ	Deflection coefficient a_{max}
		F	$a^2(3-2a)$	$-a(1-a)^2$	$-a^2(1-a)$	$+2a^2(1-a)^2$	$1-a$	See formula on Table 10
		F	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{8}$	$-\frac{1}{8}$	$+\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{192}$
		wl	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{12}$	$-\frac{1}{12}$	$+\frac{1}{24}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{384}$
		$\frac{1}{2}wl$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{5}{48}$	$-\frac{5}{48}$	$+\frac{1}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{274}$
		$(1-a)wl$	$\frac{1}{2}$	$k_A = k_B = -\frac{1-2a^2+a^3}{12(1-a)}$		$+\frac{1-2a^2}{24(1-a)}$	$\frac{1}{2}$	See Table 10
	a	$\frac{1}{2}wal$						
	1.0	0.5 wl	0.30	−0.100	−0.067	+0.043	0.55	1/382
	0.9	0.45 wl	0.26	−0.103	−0.062	+0.042	0.58	} —
	0.8	0.4 wl	0.22	−0.105	−0.056	+0.041	0.57	
	0.7	0.35 wl	0.18	−0.104	−0.047	+0.040	0.59	
	0.6	0.3 wl	0.14	−0.102	−0.038	+0.036	0.62	
See formulae on Table 10	0.5	0.25 wl	0.10	−0.098	−0.029	+0.032	0.66	

Note: See table 12 for other factors for beams fixed at both ends

CONTINUOUS BEAMS: Equal loads on equal spans

	Load	All spans loaded (*e.g.* dead load)	Imposed load (sequence of loaded spans to give max. bending moment or shearing force)
Coefficients for maximum bending moments	Uniformly-distributed	0.125 0.071 0.071 0.100 0.100 0.080 0.025 0.080 0.107 0.072 0.107 0.077 0.036 0.036 0.077 0.105 0.080 0.080 0.105 0.078 0.033 0.046 0.033 0.078	0.12 0.096 0.096 0.117 0.117 0.101 0.075 0.101 (0.116) (0.107) (0.116) 0.121 0.107 0.121 0.099 0.081 0.081 0.099 (0.116) (0.107) (0.107) (0.116) 0.120 0.111 0.111 0.120 0.100 0.080 0.086 0.080 0.100
	Concentrated at midspan	0.188 0.156 0.156 0.150 0.150 0.175 0.100 0.175 0.161 0.107 0.161 0.169 0.116 0.116 0.169 0.158 0.119 0.119 0.158 0.171 0.110 0.130 0.110 0.171	0.183 0.203 0.203 0.175 0.175 0.213 0.175 0.213 (0.174) (0.160) (0.174) 0.181 0.160 0.181 0.210 0.183 0.183 0.210 (0.174) (0.160) (0.160) (0.174) 0.179 0.167 0.167 0.179 0.211 0.181 0.191 0.181 0.211
	Concentrated at third points	0.167 0.111 0.111 0.133 0.133 0.123 0.034 0.123 0.143 0.096 0.143 0.119 0.056 0.056 0.119 0.141 0.106 0.106 0.141 0.120 0.050 0.061 0.050 0.120	0.167 0.139 0.139 0.157 0.157 0.145 0.100 0.145 (0.155) (0.143) (0.155) 0.160 0.144 0.160 0.143 0.111 0.111 0.143 (0.155) (0.142) (0.142) (0.155) 0.159 0.148 0.148 0.159 0.144 0.103 0.115 0.103 0.144
Coefficients for max. shearing force	Uniformly-distributed	0.38 0.62 0.62 0.38 0.40 0.50 0.50 0.60 0.50 0.40 0.39 0.54 0.46 0.61 0.61 0.46 0.54 0.39 0.40 0.53 0.50 0.47 0.50 0.50 0.47 0.50 0.53 0.40	0.44 0.62 0.62 0.44 0.45 0.58 0.62 0.62 0.58 0.45 0.45 0.60 0.57 0.62 0.62 0.57 0.60 0.45 0.45 0.60 0.59 0.58 0.62 0.62 0.58 0.59 0.60 0.45

Bending moment = (coefficient) × (total load on one span) × (span).
Shearing force = (coefficient) × (total load on one span).
Bending moment coefficients: above line apply to negative bending moment at supports.
below line apply to positive bending moment in span.
Shearing force coefficients: above line apply to shearing force at right-hand side of support.
below line apply to shearing force at left-hand side of support.
Coefficients apply when all spans are equal (or shortest ≥ 15% less than longest.) Loads on each loaded span are equal.
Moment of inertia same throughout all spans.
Bending moments coefficients (imposed load) in brackets apply if two spans only are loaded.

CROSS SECTION, WEIGHT AND PERIMETER OF REINFORCEMENT BARS

Size in mm	Weight in kg		Number of Bars									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RB 6	0.222	A	0.28	0.57	0.85	1.13	1.42	1.70	1.98	2.26	2.55	2.83
		O	1.89	3.77	5.66	7.54	9.43	11.32	13.20	15.09	16.97	18.86
RB 9	0.499	A	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	3.82	4.45	5.09	5.72	6.36
		O	2.83	5.66	8.49	11.32	14.14	16.97	19.80	22.63	25.46	28.29
9.5 DB	0.556	A	0.71	1.42	2.13	2.84	3.55	4.25	4.96	5.67	6.38	7.09
		O	2.99	5.97	8.96	11.94	14.93	17.91	20.90	23.89	26.87	29.86
10 DB	0.617	A	0.78	1.56	2.34	3.12	3.90	4.68	5.46	6.24	7.02	7.80
		O	3.14	6.28	9.42	12.56	15.70	18.84	21.98	26.12	28.26	31.40
RB 12 DB	0.888	A	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.78	7.91	9.04	10.17	11.30
		O	3.77	7.54	11.31	15.08	18.86	22.63	26.40	30.17	33.94	37.71
RB 15	1.39	A	1.77	3.54	5.31	7.08	8.85	10.62	12.39	14.16	15.93	17.70
		O	4.71	9.43	14.14	18.86	23.57	28.28	33.00	37.71	42.43	47.14
16 DB	1.58	A	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.09	20.10
		O	5.03	10.06	15.09	20.12	25.14	30.17	35.20	40.23	45.26	50.29
RB 19 DB	2.23	A	2.84	5.68	8.52	11.36	14.20	17.04	19.88	22.72	25.56	28.40
		O	5.97	11.94	17.91	23.88	29.86	35.83	41.80	47.77	53.74	59.71
20 DB	2.470	A	3.14	6.28	9.42	12.56	15.70	18.84	21.98	25.12	28.26	31.40
		O	6.29	12.58	18.87	25.16	31.45	37.74	44.03	50.32	56.61	62.90
RB 22	2.98	A	3.80	7.60	11.40	15.20	19.00	22.80	26.60	30.40	34.20	38.00
		O	6.91	13.83	20.74	27.66	34.57	41.48	48.40	55.31	62.23	69.14
RB 25 DB	3.85	A	4.91	9.82	14.73	19.64	24.55	29.46	34.37	39.28	44.19	49.10
		O	7.86	15.71	23.57	31.43	39.28	47.14	55.00	62.86	70.71	78.57
RB 28 DB	4.83	A	6.16	12.32	18.48	24.64	30.80	36.96	43.12	49.28	55.44	61.60
		O	8.80	17.60	26.40	35.20	44.00	52.80	61.60	70.40	79.20	88.00

A=Total cross sections in cm^2
O=Total perimeters in cm.

DB=Deformed Bar *RB=Round Bar* *A=Total cross sections in cm^2*

ตารางที่ 1

ขนาดระบุของเหล็กข้ออ้อยและเกณฑ์สำหรับข้อ

(ข้อ 4.4)

หมายเลขขนาด	ขนาดระบุ				เกณฑ์สำหรับข้อ			
	เส้นผ่าศูนย์กลาง มิลลิเมตร	เส้นรอบวง มิลลิเมตร	เนื้อที่หน้าตัดตาราง มิลลิเมตร	น้ำหนัก กิโลกรัมต่อเมตร	ช่วงระหว่างบั้งไม่มากกว่า มิลลิเมตร	ส่วนสูงของบั้ง ไม่น้อยกว่า มิลลิเมตร	ส่วนสูงของบั้ง ไม่มากกว่า มิลลิเมตร	ผลรวมของช่องว่างไม่มากกว่า มิลลิเมตร
DB 10	10	31.4	78	0.617	7.0	0.4	0.8	7.9
DB 12	12	37.7	113	0.888	8.4	0.5	1.0	9.4
DB 16	16	50.3	201	1.58	11.2	0.7	1.4	12.6
DB 20	20	62.9	314	2.47	14.0	1.0	2.0	15.7
DB 22	22	69.1	380	2.98	15.4	1.1	2.2	17.3
DB 25	25	78.6	491	3.85	17.5	1.3	2.6	19.7
DB 28	28	88.0	616	4.83	19.6	1.4	2.8	22.0
DB 32	32	100.6	804	6.31	22.4	1.6	3.2	25.2

ขนาดนอกเหนือจากที่ได้ระบุไว้ในตารางนี้จะนำมาใช้ได้แล้วแต่ข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

เหล็กเส้นกลม

ขนาดและน้ำหนักระบุ

หมายเลขขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง มม.	น้ำหนัก กก./ ม.	พื้นที่หน้าตัด ตร. ซม.	เส้นรอบวง ซม.
RB 6	6	0.222	0.283	1.886
RB 9	9	0.499	0.636	2.829
RB 12	12	0.888	1.13	3.771
RB 15	15	1.39	1.77	4.714
RB 19	19	2.23	2.84	5.971
RB 22	22	2.98	3.80	6.914
RB 25	25	3.85	4.91	7.857
RB 28	28	4.83	6.16	8.800

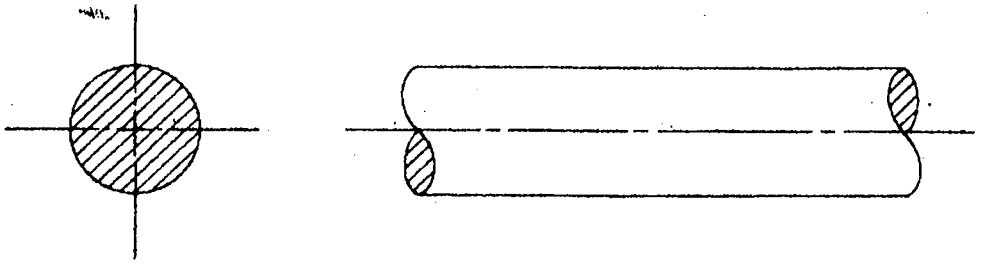
คุณสมบัติทางกล

ชั้นคุณภาพ	แรงเค้นดึงที่จุดยืด กก./ต.ร. มม. ไม่น้อยกว่า	แรงเค้นดึงสูงสุด กก./ตร. มม. ไม่น้อยกว่า	ความยืด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	การทดสอบการดัดโค้งเย็น	
				มุมดัดโค้งเย็น	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนโค้ง
SR 24	24	39	21	180°	1.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุ

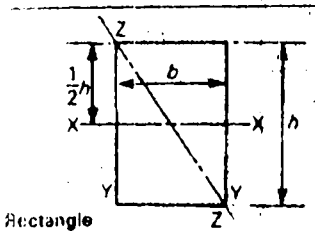
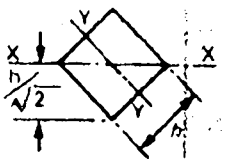
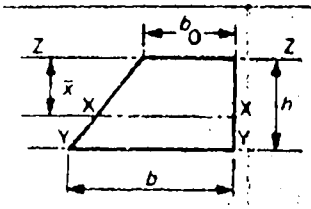
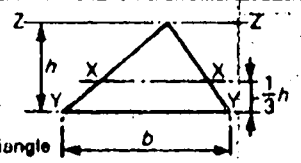
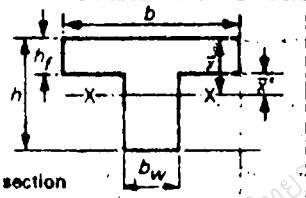
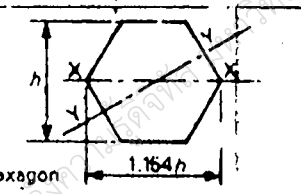
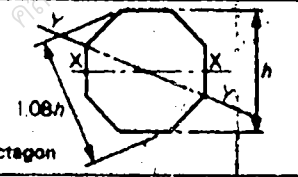
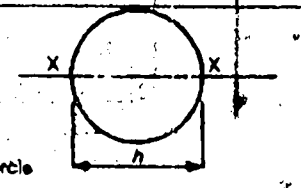
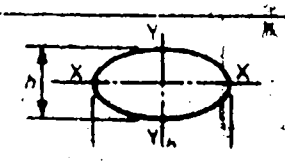
ส่วนประกอบทางเคมีไม่เกินร้อยละ (โดยน้ำหนัก)

ถ่าน	ซิลิกอน	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
0.25	—	—	0.05	0.05

หมดอายุวันที่ 11-09-2566



GEOMETRIC PROPERTIES OF SECTIONS

Section	Area A	Section modulus J_e	Second moment of area I	Radius of gyration i
 Rectangle	bh	*About xx* $\frac{1}{6}bh^2$ *About zz* $\frac{1}{6}\frac{b^2h^2}{\sqrt{b^2+h^2}}$	*About xx* $\frac{1}{12}bh^3$ *About yy* $\frac{1}{12}hb^3$ *About zz* $\frac{1}{6}\frac{b^3h^3}{(b^2+h^2)}$	*About xx* $0.285h$
 Square	h^2	*About xx* $0.118h^3$ *About yy* $\frac{1}{6}h^3$	*About xx or yy* $\frac{1}{12}h^4$	*About xx or yy* $0.289h$
 Trapezium	$\frac{1}{2}h(b_0+b)$	*About xx to* b_0 $\frac{(b^2+4bb_0+b_0^2)h^3}{12(b+2b_0)}$ *To b:* $I_{xx}+(h-\bar{x})$ where $\bar{x}=\frac{1}{3}h\left(\frac{2b+b_0}{b+b_0}\right)$	*About xx* $\frac{(b^2+4bb_0+b_0^2)h^3}{36(b+b_0)}$ *About yy* $I_{yy}+A(h-\bar{x})^2$ *About zz* $I_{zz}+A(\bar{x})^2$	*About xx* $\sqrt{\frac{I_{xx}}{A}}$
 Triangle	$\frac{1}{2}bh$	*About xx to apex* $\frac{1}{12}bh^2$ *About xx to base* $\frac{1}{12}bh^2$	*About xx* $\frac{1}{36}bh^3$ *About yy* $\frac{1}{12}bh^3$ *About zz* $\frac{1}{24}bh^3$	*About xx* $0.236h$
 T-section	$bh_f+b_w(h-h_f)$	*About xx* $\frac{I_{xx}}{\bar{x}}$ or $\frac{I_{xx}}{h-\bar{x}}$ $\bar{x}=\frac{h_f^2(b-b_w)+h^2b_w}{2[h_f(b-b_w)+hb_w]}$	*About xx* $\frac{1}{3}[b\bar{x}^3+b_w(h-\bar{x})^3-(\bar{x}')^3(b-b_w)]$ where $\bar{x}'=\bar{x}-h_f$	*About xx* $\sqrt{\frac{I_{xx}}{A}}$
 Hexagon	$0.866h^2$ (side $=0.577h$)	*About xx* $0.32h^3$ *About yy* $0.104h^3$	*About xx or yy* $0.06h^4$	*About xx or yy* $0.263h$
 Octagon	$0.828h^2$ (side $=0.413h$)	*About xx* $0.109h^3$ *About yy* $0.1016h^3$	*About xx or yy* $0.055h^4$	*About xx or yy* $0.257h$
 Circle	$0.7854h^2$ $=\frac{\pi}{4}h^2$	*About xx* $\frac{1}{32}\pi h^3=0.0982h^3$	*About xx* $\frac{1}{64}\pi h^4=0.0491h^4$	*About xx* $0.25h$
	$\frac{1}{4}\pi bh$ $=0.7854bh$	*About xx* $\frac{1}{32}\pi bh^2=0.0982bh^2$	*About xx* $\frac{1}{64}\pi bh^3=0.0491bh^3$	*About xx* $0.25h$

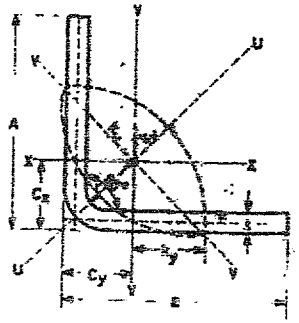
ตารางที่ 2 ขนาดระบุของเหล็กฉาก ขาเท่ากันชนิดผลิตเย็น (light equal angles)

(ข้อ 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

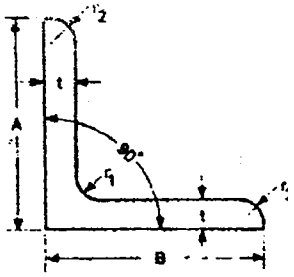
เซ็กชันโมดุลัส $z = \frac{I}{c}$



ขนาด มิลลิเมตร A × B × t	น้ำหนัก กิโลกรัม ต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้าน A = B มิลลิเมตร	ความหนา t มิลลิเมตร	รัศมีความโค้ง r มิลลิเมตร	ระยะห่างจากศูนย์ถ่วง $C_x = C_y$ เซนติเมตร	โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4			รัศมีไจเรชัน เซนติเมตร			เซ็กชันโมดุลัส (เซนติเมตร)^3
							$I_x = I_y$	I_u	I_v	$k_x = k_y$	k_u	k_v	$Z_x = Z_y$
40 × 40 × 3	1.77	2.25	40	3	3	1.14	3.50	5.71	1.29	1.25	1.59	0.76	1.22
40 × 40 × 4	2.31	2.94	40	4	4	1.19	4.45	7.39	1.55	1.23	1.57	0.73	1.54
50 × 50 × 4	2.93	3.74	50	4	4	1.43	9.04	14.7	3.36	1.56	1.98	0.95	2.53
65 × 65 × 4	3.88	4.94	65	4	4	1.81	20.5	33.4	7.72	2.04	2.60	1.25	4.98
75 × 75 × 4	4.53	5.74	75	4	4	2.06	32.0	51.9	12.2	2.36	3.01	1.46	5.89

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566



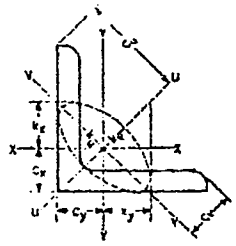
ตารางที่ 8 ขนาดระบุของเหล็กฉาก ขาเท่ากัน ชนิดผลิตร้อน (equal angles)

(ข้อ 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

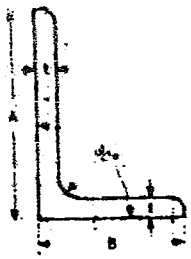
รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

เซ็คชันโมดูลัส $Z = \frac{I}{c}$



ขนาด A × B × t มิลลิเมตร	น้ำหนักกิโลกรัมต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้าน A = B มิลลิเมตร	ความหนา t มิลลิเมตร	รัศมีส่วนโค้ง มิลลิเมตร		ระยะห่างจากศูนย์ถ่วง เซนติเมตร			โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4			รัศมีไจเรชัน เซนติเมตร			เซ็คชันโมดูลัส (เซนติเมตร)^3
					r_1	r_2	$C_x=C_y$	C_u	C_v	$I_x=I_y$	I_u	I_v	$k_x=k_y$	k_u	k_v	$Z_x=Z_y$
40 × 40 × 3	1.84	2.35	40	3	6	3.0	1.07	2.83	1.52	3.45	5.46	1.44	1.21	1.52	0.78	1.18
40 × 40 × 4	2.42	3.08	40	4	6	3.0	1.12	2.83	1.58	4.47	7.09	1.85	1.21	1.52	0.78	1.55
50 × 50 × 4	3.06	3.89	50	4	7	3.5	1.36	3.54	1.92	8.97	14.2	3.72	1.52	1.91	0.98	2.46
50 × 50 × 6	4.47	5.69	50	6	7	3.5	1.45	3.54	2.04	12.8	20.4	5.33	1.50	1.89	0.97	3.61
50 × 50 × 8	5.82	7.41	50	8	7	3.5	1.52	3.54	2.16	16.3	25.7	6.87	1.48	1.86	0.96	4.68
65 × 65 × 6	5.91	7.53	65	6	9	4.5	1.80	4.60	2.55	29.2	46.3	12.1	1.98	2.49	1.27	6.21
65 × 65 × 8	7.73	9.85	65	8	9	4.5	1.89	4.60	2.67	37.5	59.4	15.3	1.95	2.46	1.26	8.13
65 × 65 × 11	10.3	13.2	65	11	9	4.5	2.00	4.60	2.85	48.8	76.8	20.7	1.91	2.42	1.25	10.8
75 × 75 × 6	6.87	8.75	75	6	10	5.0	2.04	5.30	2.89	45.6	72.2	18.9	2.28	2.87	1.47	8.35
75 × 75 × 10	11.1	14.1	75	10	10	5.0	2.21	5.30	3.12	71.4	113	29.8	2.25	2.83	1.45	13.5
75 × 75 × 12	13.1	16.7	75	12	10	5.0	2.29	5.30	3.24	82.4	130	34.7	2.22	2.79	1.44	15.8
90 × 90 × 6	8.30	10.6	90	6	11	5.2	2.41	6.36	3.40	80.3	127	33.3	2.76	3.47	1.78	12.2
90 × 90 × 10	13.4	17.1	90	10	11	5.2	2.58	6.36	3.65	127	201	52.8	2.72	3.42	1.76	19.8
90 × 90 × 12	15.9	20.3	90	12	11	5.2	2.66	6.36	3.76	148	234	62.0	2.70	3.40	1.75	23.3
100 × 100 × 8	12.2	15.5	100	8	12	6.0	2.74	7.07	3.87	145	230	59.9	3.06	3.85	1.96	15.5
100 × 100 × 10	15.0	19.2	100	10	12	6.0	2.82	7.07	3.99	177	280	72.9	3.04	3.83	1.95	24.6
100 × 100 × 12	17.8	22.7	100	12	12	6.0	2.90	7.07	4.11	207	328	85.7	3.02	3.80	1.94	29.1
120 × 120 × 8	14.7	18.7	120	8	13	6.5	3.23	8.49	4.56	255	405	105	3.69	4.65	2.37	29.1
120 × 120 × 10	18.2	23.2	120	10	13	6.5	3.31	8.49	4.69	313	597	129	3.67	4.63	2.36	36.0
120 × 120 × 12	21.6	27.5	120	12	13	6.5	3.40	7.49	4.80	368	584	151	3.65	4.60	2.35	42.7
150 × 150 × 10	23.0	29.3	150	10	16	8.0	4.03	10.6	5.71	624	991	259	4.62	5.82	2.97	56.9
150 × 150 × 12	27.3	34.8	150	12	16	8.0	4.12	10.6	5.83	737	1170	303	4.60	5.80	2.95	67.7
150 × 150 × 15	33.8	43.0	150	15	16	8.0	4.25	10.6	6.01	898	1430	370	4.57	5.76	2.93	69.5
200 × 200 × 16	48.5	61.8	200	16	18	9.0	5.52	14.1	7.81	2340	3720	959	6.16	7.76	3.94	162
200 × 200 × 18	54.2	69.1	200	18	18	9.0	5.60	14.1	7.93	2600	4130	1070	6.13	7.73	3.93	181
200 × 200 × 20	59.9	76.3	200	20	18	9.0	5.68	14.1	8.04	2850	4530	1170	6.11	7.70	3.92	199

หมดอายุวันที่ 11-09-2566



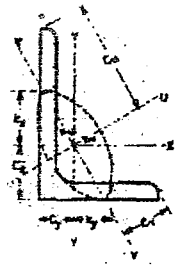
ตารางที่ 4 ขนาดระบุของเหล็กฉากข้าไม่เท่ากันชนิดผลิตร้อน (unequal angles)

(ข้อ 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

เซ็กชันโมดูลัส $Z = \frac{I}{c}$



ขนาด A x B x t มิลลิเมตร	น้ำหนักกิโลกรัมต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด ตารางเซนติเมตร	ความยาวขา มิลลิเมตร A	ความยาวขา มิลลิเมตร B	ความหนา t มิลลิเมตร	รัศมีส่วนโค้ง r มิลลิเมตร	ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วง เซนติเมตร C_x	C_y	C_u	C_v	โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)⁴ I_x	I_y	I_u	I_v	รัศมีไจเรชัน (เซนติเมตร) k_x	k_y	k_u^*	k_v	เซ็กชันโมดูลัส (เซนติเมตร)³ Z_x	Z_y
40 x 20 x 3	1.36	1.73	40	20	3	4	1.42	0.44	2.61	1.19	2.80	0.47	2.96	0.31	1.27	0.52	1.31	0.42	1.09	0.30
40 x 20 x 4	1.77	2.26	40	20	4	4	1.47	0.48	2.58	1.17	3.59	0.60	3.80	0.39	1.26	0.51	1.30	0.42	1.42	0.39
40 x 30 x 5	3.37	4.29	60	30	5	6	2.15	0.69	3.39	1.77	15.6	2.60	16.5	1.69	1.90	0.78	1.96	0.63	4.04	1.12
60 x 30 x 6	3.99	5.08	60	30	6	6	2.20	0.72	3.86	1.75	18.2	3.02	19.2	1.99	1.89	0.77	1.96	0.63	4.78	1.32
75 x 50 x 6	5.65	7.19	75	50	6	-	2.44	1.21	5.12	2.64	40.5	14.4	46.6	8.36	2.37	1.42	2.55	1.08	8.01	3.81
75 x 50 x 8	7.39	9.41	75	50	8	-	2.52	1.29	5.08	2.62	52.0	18.4	59.6	10.8	2.35	1.40	2.52	1.07	10.4	3.85
100 x 50 x 6	6.65	8.47	100	50	6	9	2.49	1.04	5.56	3.00	69.7	15.3	95.1	9.85	3.21	1.32	3.30	1.08	13.6	4.98
100 x 50 x 8	8.69	11.03	100	50	8	9	3.59	1.12	6.49	2.96	116	19.5	123	12.7	3.18	1.31	3.28	1.05	18.1	5.04
100 x 50 x 10	11.0	14.1	100	50	10	9	3.67	1.20	6.43	2.93	141	23.4	149	15.4	3.16	1.29	3.25	1.05	22.2	6.17
100 x 75 x 8	10.6	13.5	100	75	8	10	3.10	1.87	6.95	3.65	133	64.1	163	34.8	3.14	2.18	3.47	1.60	19.3	11.4
100 x 75 x 10	13.0	16.5	100	75	10	10	3.19	1.95	6.92	3.65	162	77.6	197	42.1	3.12	2.16	3.45	1.59	23.8	14.0
100 x 75 x 12	15.4	19.5	100	75	12	10	3.27	2.03	6.89	3.65	189	90.2	230	49.5	3.10	2.14	3.42	1.59	28.0	16.5
125 x 75 x 8	12.2	15.5	125	75	8	11	4.14	1.68	8.44	4.34	247	67.6	276	41.1	4.00	2.09	4.20	1.63	29.8	11.8
125 x 75 x 10	15.0	19.1	125	75	10	11	4.23	1.76	8.39	4.24	302	82.1	334	50.0	3.97	2.07	4.18	1.62	36.5	14.3
125 x 75 x 12	17.9	22.77	125	75	12	11	4.31	1.84	8.33	4.14	354	96.5	391	58.8	3.95	2.05	4.15	1.61	43.2	16.9
150 x 75 x 9	15.4	19.59	150	75	9	11	5.27	1.57	9.81	4.49	456	78.3	484	50.0	4.83	2.00	4.98	1.60	46.9	13.2
150 x 75 x 12	20.2	25.70	150	75	12	11	5.41	1.69	9.71	4.45	589	99.9	624	64.9	4.79	1.97	4.93	1.59	61.4	17.2
150 x 75 x 15	24.8	31.60	150	75	15	11	5.53	1.81	9.62	4.41	713	120	754	73.9	4.75	1.94	4.86	1.58	75.3	21.0
150 x 100 x 9	17.5	22.25	150	100	9	12	4.77	2.22	10.3	5.26	502	170	630	101	4.79	2.86	5.15	2.15	49.0	23.3
150 x 100 x 12	22.4	28.49	150	100	12	12	4.88	2.41	10.2	5.24	642	229	735	133	4.74	2.53	5.03	2.15	63.4	30.2
150 x 100 x 15	27.7	35.20	150	100	15	12	5.01	2.53	10.2	5.22	781	276	897	161	4.71	2.80	5.04	2.14	78.2	37.0
200 x 100 x 10	23.0	29.26	200	100	10	15	6.93	2.01	13.2	6.25	1220	210	1290	135	6.46	2.68	6.65	2.15	93.2	26.3
200 x 100 x 12	27.3	34.80	200	100	12	15	7.03	2.10	13.1	6.00	1440	247	1530	159	6.43	2.67	6.63	2.14	111	31.3
200 x 100 x 15	33.6	43.40	200	100	15	15	7.16	2.22	13.0	5.95	1758	299	1863	194	6.40	2.64	6.58	2.13	137	38.4
200 x 150 x 10	26.9	34.62	200	150	10	15	5.99	3.53	14.0	8.16	1396	680	1710	365	6.36	4.46	7.07	3.27	99.6	59.2
200 x 150 x 12	32.0	40.91	200	150	12	15	6.08	3.61	13.9	8.03	1652	803	2024	431	6.36	4.44	7.04	3.25	119	70.5
200 x 150 x 15	39.8	50.85	200	150	15	15	6.21	3.73	13.9	7.85	2022	979	2475	527	6.33	4.40	7.00	3.23	147	88.9

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

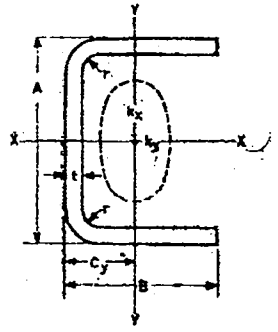
ตารางที่ 5 ขนาดระบุของเหล็กรูปรางน้ำชนิดผลิตเย็น (light channels)

(ชั้น 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

เซ็กชันโมดุลัส $z = \frac{I}{c}$

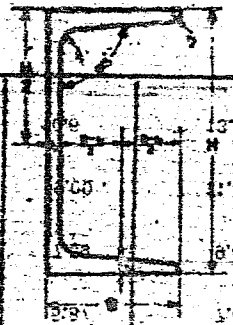


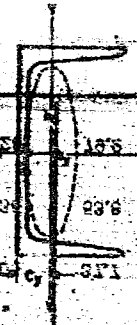
ขนาด A x B x t มิลลิเมตร	น้ำหนักกิโลกรัมต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้านมิลลิเมตร A	ความยาวด้านมิลลิเมตร B	ความหนา t มิลลิเมตร	รัศมีส่วนโค้ง r มิลลิเมตร	ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วง Cy เซนติเมตร	โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4 I_x	โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4 I_y	รัศมีไจเรชันเซนติเมตร k_x	รัศมีไจเรชันเซนติเมตร k_y	เซ็กชันโมดุลัส (เซนติเมตร)^3 z_x	เซ็กชันโมดุลัส (เซนติเมตร)^3 z_y
60 x 30 x 2.3	2.03	2.59	60	30	2.3	2.3	0.86	14.2	2.26	2.34	0.94	4.72	1.06
80 x 40 x 4	6.61	5.87	80	40	4.0	4.0	1.16	55.4	8.91	3.07	1.23	13.9	3.16
100 x 50 x 4	5.87	7.47	100	50	4.0	4.0	1.43	113	18.2	3.89	1.56	22.6	5.09
125 x 65 x 4	7.59	9.67	125	65	4.0	4.0	1.84	236	40.6	4.94	2.05	37.7	8.71
150 x 75 x 4	9.00	11.5	150	75	4.0	4.0	2.06	404	64.2	5.93	2.36	53.8	11.8
200 x 75 x 4	10.6	13.5	200	75	4.0	4.0	1.78	792	69.9	7.67	2.28	79.2	12.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

ตารางที่ 6 ขนาดระบุของเหล็กรูปร่างน้ำหนักพลิกร้อน (Channel)

(ข้อ 4.1)





ขนาด	น้ำหนัก	พื้นที่หน้าตัด													
										I_x	I_y	r_x	r_y	Z_x	Z_y
75 × 40	6.92	8.82	75	40	5	7	8	4	1.27	75.0	12.4	2.93	1.19	20.2	4.54
100 × 50	9.36	11.92	100	50	5	7.5	8	4	1.55	187	26.9	3.96	1.50	37.4	7.49
125 × 65	13.4	17.17	125	65	6	8	10	5	1.94	425	65.8	4.98	1.96	68.0	14.4
150 × 75	18.0	22.71	150	75	6.5	10	10	5	2.21	854	122	6.04	2.32	114	23.6
150 × 75	20.0	25.50	150	75	9	12.5	15	7.5	2.31	1 050	147	5.88	2.19	140	29.3
180 × 75	21.4	27.20	180	75	7	10.5	11	5.5	2.15	1 380	137	7.13	2.24	154	25.5
200 × 70	21.1	26.90	200	70	7	10	11	5.5	1.85	1 620	113	7.77	2.04	162	21.8
200 × 80	24.6	31.33	200	80	7.5	11	12	6	2.24	1 950	177	7.89	2.38	195	30.8
200 × 90	30.3	38.66	200	90	8	13.5	14	7	2.77	2 490	286	8.03	2.72	249	45.9
250 × 90	34.6	44.07	250	90	9	13	14	7	2.42	4 180	306	9.74	2.64	335	46.5
250 × 90	40.2	51.17	250	90	11	14.5	17	8.5	2.39	4 690	342	9.57	2.58	375	51.7
300 × 90	38.1	48.57	300	90	9	13	14	7	2.23	6 440	325	11.5	2.59	429	48.0
300 × 90	43.8	55.74	300	90	10	15.5	19	9.5	2.33	7 400	373	11.5	2.59	494	56.0
300 × 90	48.9	61.90	300	90	12	16	19	9.5	2.25	7 870	391	11.3	2.51	525	57.9
380 × 100	54.5	69.39	380	100	10.5	16	18	9	2.41	14 500	557	14.5	2.83	762	73.3
380 × 100	62.0	78.96	380	100	13	16.5	18	9	2.29	15 600	584	14.1	2.72	822	75.8
380 × 100	67.3	85.71	380	100	13	20	24	12	2.50	17 600	671	14.3	2.80	924	89.5

ร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ทมท.ย.ลุ่มน้ำที่ 11-09-2566

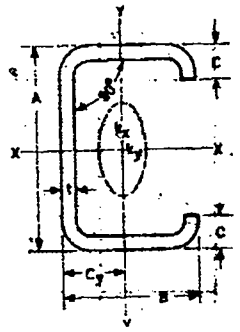
ตารางที่ 7 ขนาดระบุของเหล็กรูปตัว C ชนิดผลิตเย็น (light lip channels)

(ข้อ 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

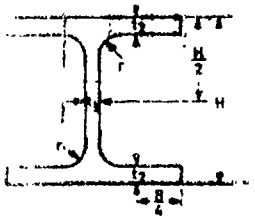
รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

เซ็กชันโมดูลัส $Z = \frac{I}{c}$



ขนาด A x B x C มิลลิเมตร	น้ำหนักกิโลกรัมต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้าน มิลลิเมตร			ความหนา t มิลลิเมตร	ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วง C_y เซนติเมตร	โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4		รัศมีไจเรชัน เซนติเมตร		เซ็กชันโมดูลัส (เซนติเมตร)^2	
			A	B	C			I_x	I_y	k_x	k_y	z_x	z_y
60 x 30 x 10	2.25	2.872	60	30	10	2.3	1.06	15.8	3.32	2.33	1.07	5.20	1.71
75 x 45 x 15	3.26	4.137	75	45	15	2.3	1.72	37.1	11.8	3.00	1.69	9.90	4.24
100 x 50 x 20	4.06	5.172	100	50	20	2.3	1.86	80.7	19.0	3.95	1.92	16.1	6.06
100 x 50 x 20	5.50	7.007	100	50	20	3.2	1.86	107	24.5	3.90	1.87	21.3	7.81
125 x 50 x 20	4.51	5.747	125	50	20	2.3	1.69	137	20.6	4.88	1.89	21.9	6.22
125 x 50 x 20	6.1a	7.807	125	50	20	3.2	1.68	181	26.6	4.82	1.85	29.0	8.02
150 x 50 x 20	4.96	6.322	150	50	20	2.3	1.55	210	21.9	5.77	1.86	28.0	6.33
150 x 50 x 20	6.76	8.607	150	50	20	3.2	1.54	280	28.3	5.71	1.81	37.4	8.19
150 x 65 x 20	5.50	7.012	150	65	20	2.3	2.12	248	41.1	5.94	2.42	33.0	9.37
150 x 65 x 20	7.51	9.57	150	65	20	3.2	2.11	332	53.8	5.89	2.37	44.3	12.2
150 x 75 x 20	8.01	10.21	150	75	20	3.2	2.51	366	76.4	5.99	2.74	48.9	15.3
150 x 75 x 20	9.85	12.55	150	75	20	4.0	2.51	445	91.0	5.95	2.69	59.3	18.2
200 x 75 x 20	9.52	12.13	200	75	20	3.2	2.19	716	84.1	7.79	2.67	71.6	15.8
200 x 75 x 20	11.7	14.95	200	75	20	4.0	2.19	871	100	7.74	2.62	87.1	18.9
250 x 75 x 25	14.9	18.92	200	75	20	4.5	2.07	1 690	129	9.44	2.62	135	23.8

หมดอายุวันที่ 11-09-2566



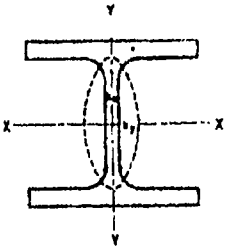
ตารางที่ ๘ ขนาดระบุของเหล็กรูปตัว H (H- section)

(ข้อ 4.1)

โมเมนต์ความเฉื่อย I หน่วย หน่วยยาว^4

รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

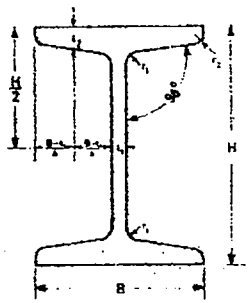
เซ็กชันโมดุลัส $Z = \frac{I}{c}$



น้ำหนักกิโลกรัมต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้าน มิลลิเมตร H	B	ความหนา มิลลิเมตร t_1	t_2	รัศมีส่วนโค้ง r มิลลิเมตร	โมเมนต์อิเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4 I_x	I_y	รัศมีไจเรชัน เซนติเมตร k_x	k_y	เซ็กชันโมดุลัส (เซนติเมตร)^3 Z_x	Z_y
16.7	21.2	96	100	5	8	12	349	134	4.06	2.51	72.8	26.8
20.4	26.0	100	100	6	10	12	450	167	4.16	2.53	89.9	33.5
19.9	25.3	111	120	5	8	12	606	231	4.89	3.02	106	38.6
26.1	34.0	120	120	6.5	11	12	864	318	5.04	3.06	144	52.9
24.7	31.4	133	140	5.5	8.5	12	1 030	389	5.73	3.52	155	55.6
33.1	43.0	140	140	7.0	12	12	1 510	550	5.93	3.58	216	78.5
30.4	38.8	152	160	6	9	15	1 870	616	6.57	3.98	220	76.9
42.6	54.3	160	160	8	13	15	2 490	889	6.78	4.05	311	111
38.5	45.3	171	180	8	9.5	15	2 510	925	7.45	4.52	294	103
51.2	65.3	180	180	8.5	14	15	3 830	1 360	7.66	4.57	426	151
42.3	53.8	190	200	6.5	10	18	3 690	1 340	8.28	4.98	389	134
61.3	78.1	200	200	9	15	18	5 700	2 000	8.54	5.07	570	200
50.5	64.3	210	220	7	11	18	5 410	1 950	9.17	5.51	515	178
71.5	91.0	220	220	9.5	16	18	8 090	2 840	9.43	5.59	736	258
60.3	76.8	230	240	7.5	12	21	7 760	2 770	10.1	6.00	675	231
83.2	106	240	240	10	17	21	11 260	3 920	10.3	6.08	938	327
68.2	86.1	250	250	7.5	12.5	24	10 450	3 650	11.0	6.50	836	292
93.0	118	260	260	10	17.5	24	14 920	5 130	11.2	6.58	1 150	395
76.4	97.3	270	280	8	13	24	13 670	4 760	11.9	7.00	1 010	340
103	131	280	280	10.5	18	24	19 270	6 590	12.1	7.09	1 380	471
88.3	112	290	300	8.5	14	27	16 260	6 310	12.7	7.49	1 280	421
117	149	300	300	11	18	27	25 170	8 560	13.0	7.58	1 680	571
97.6	124	310	300	9	15.5	27	22 930	6 990	13.6	7.49	1 480	466
127	161	320	300	11.5	20.5	27	30 820	9 240	13.8	7.57	1 930	616
105	133	330	300	9.5	16.5	27	27 690	7 440	14.4	7.46	1 680	496
134	171	340	300	12	21.5	27	36 660	9 690	14.6	7.53	2 150	646
112	143	350	300	10	17.5	27	33 090	7 890	15.2	7.43	1 890	526
142	181	360	300	12.5	22.5	27	43 190	10 140	15.5	7.49	2 400	676
125	159	390	300	11	19	27	45 070	8 660	16.8	7.34	2 310	571
155	198	400	300	13.5	24	27	57 680	10 820	17.1	7.40	2 880	721
140	178	440	300	11.5	21	27	63 720	9 470	18.9	7.29	2 900	631
171	218	450	300	14	26	27	79 890	11 720	19.1	7.33	3 550	781
155	198	490	300	12	23	27	86 970	10 370	21.0	7.24	3 550	691
187	239	500	300	14.5	28	27	107 200	12 620	21.2	7.27	4 290	842
166	212	540	300	12.5	24	27	111 900	10 820	23.0	7.16	4 150	721
199	254	550	300	15	29	27	136 700	13 080	23.2	7.17	4 970	872
178	226	590	300	13	25	27	141 200	11 270	25.0	7.06	4 790	751
212	270	600	300	15.5	30	27	171 000	13 530	25.2	7.08	5 700	902
190	242	640	300	13.5	28	27	175 200	13 720	26.9	7.07	5 470	782
225	288	650	300	16	31	27	210 600	13 980	27.1	6.99	6 480	932
204	260	690	300	14.5	27	27	216 900	12 160	28.8	6.84	6 240	812
241	306	700	300	17	32	27	256 900	14 440	29.0	6.87	7 340	963
224	286	790	300	15	28	30	303 400	13 640	32.6	6.65	7 690	843
262	334	800	300	17.5	33	30	359 100	14 900	32.8	6.66	8 980	994
252	320	890	300	16	30	30	422 100	13 550	36.3	6.50	9 480	903
291	371	900	300	18.5	35	30	494 100	15 820	36.6	6.53	10 980	1050
272	347	990	300	16.5	31	30	583 800	14 000	40.0	6.35	11 790	934
314	400	1000	300	19	36	30	644 700	16 280	40.1	6.38	12 890	1050

ลิขสิทธิ์ของ มหาวิทยาลัย ... หมายเลขทะเบียน 11-09-2556

ตารางที่ 9 ขนาดระบุของเหล็กรูปตัว I (I–sections)

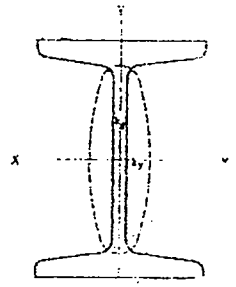


(ข้อ 4.1)

โมเมนต์อินเนอร์เชีย $I = ak^2$

รัศมีไจเรชัน $k = \sqrt{\frac{I}{a}}$

เซ็คชันโมดุลัส $a = \frac{I}{c}$



ขนาด ระบุ	น้ำหนัก กิโลกรัม ต่อเมตร	พื้นที่หน้าตัด a ตารางเซนติเมตร	ความยาวด้าน มิลลิเมตร		ความหนา มิลลิเมตร		รัศมีส่วนโค้ง มิลลิเมตร		โมเมนต์อินเนอร์เชีย (เซนติเมตร)^4		รัศมีไจเรชัน เซนติเมตร		เซ็คชันโมดุลัส (เซนติเมตร)^3	
			H	B	t_1	t_1	r_2	r_2	J_x	J_y	k_x	k_y	z_x	z_y
80	5.94	7.57	80	42	3.9	5.9	3.9	2.3	77.8	6.29	3.20	0.91	19.5	3.00
100	8.34	10.6	100	50	4.5	6.8	4.5	2.7	171	12.2	4.01	1.07	34.2	4.88
120	11.1	14.2	120	58	5.1	7.7	5.1	3.1	328	21.5	4.81	1.23	54.7	7.41
140	14.3	18.2	140	66	5.7	8.6	5.7	3.4	573	35.2	5.61	1.40	81.9	10.7
160	17.9	22.8	160	74	6.3	9.5	6.3	3.8	935	54.7	6.40	1.55	117	14.8
180	21.9	27.9	180	82	6.9	10.4	6.9	4.1	1 450	81.3	7.20	1.71	161	19.8
200	26.2	33.4	200	90	7.5	11.3	7.5	4.5	2 140	117	8.00	1.87	214	26.0
220	31.1	39.5	220	98	8.1	12.2	8.1	4.9	3 060	162	8.80	2.02	278	33.1
240	36.2	46.1	240	106	8.7	13.1	8.7	5.2	4 250	221	9.59	2.20	354	41.7
260	41.9	53.3	260	113	9.4	14.1	9.4	5.6	5 740	288	10.4	2.32	442	51.0
280	47.9	61.0	280	119	10.1	15.2	10.1	6.1	7 590	364	11.1	2.45	542	61.2
300	54.2	69.0	300	125	10.8	16.2	10.8	6.5	9 800	451	11.9	2.56	653	72.2
320	61.0	77.7	320	131	11.5	17.3	11.5	6.9	12 510	555	12.7	2.67	782	84.7
340	68.0	86.7	340	137	12.2	18.3	12.2	7.3	15 700	674	13.5	2.80	923	98.4
360	76.1	97.0	360	143	13.0	19.5	13.0	7.8	19 610	818	14.2	2.90	1 090	114
380	84.0	107	380	149	13.7	20.5	13.7	8.2	24 010	975	15.0	3.02	1 260	131
400	92.4	118	400	155	14.4	21.6	14.4	8.6	29 210	1 160	15.7	3.13	1 460	149
425	104	132	425	163	15.3	23.0	15.3	9.2	36 970	1 440	16.7	3.30	1 740	176
450	115	147	450	170	16.2	24.3	16.2	9.7	45 850	1 730	17.7	3.43	2 040	203
475	128	163	475	178	17.1	25.6	17.1	10.3	56 480	2 090	18.6	3.60	2 380	235
500	141	179	500	185	18.0	27.0	18.0	10.8	68 740	2 480	19.6	3.72	2 750	268
550	166	212	550	200	19.0	30.0	19.0	11.9	99 180	3 490	21.6	4.02	3 610	349
600	199	254	600	215	21.6	32.4	21.6	13.0	139 000	4 670	23.4	4.30	4 630	434

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ทัศนียาธุวันที่ 11-09-2566

RECTANGULAR BEAMS: Resistance and reinforcement: SI units
Modular-ratio method

Maximum stress in concrete $f_{c'} = 8\frac{1}{2}$N/mm² $\quad a_e = 15$

Effective depth d mm	$f_{s1} = 140$N/mm²				$f_{s1} = 210$N/mm²				f_{s1} 230N/mm²			
	$A_s' = 0$		$A_s' = 4\%$		$A_s' = 0$		$A_s' = A_s$		$A_s' = 0$		$A_s' \quad A_s$	
	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s
250	106	3.62	318	10.3	87.7	1.91	152	3.28	83.5	1.65	134	2.62
275	129	3.98	385	11.4	106	2.10	184	3.60	101	1.81	162	2.89
300	153	4.34	458	12.4	126	2.29	219	3.93	120	1.98	193	3.15
325	180	4.70	538	13.4	148	2.48	257	4.26	141	2.14	227	3.41
350	209	5.06	623	14.5	172	2.68	298	4.59	164	2.31	263	3.67
375	240	5.43	716	15.5	197	2.87	342	4.91	188	2.47	302	3.94
400	273	5.79	814	16.5	225	3.06	390	5.24	214	2.64	343	4.20
425	308	6.16	919	17.6	253	3.25	440	5.57	241	2.80	387	4.46
450	345	6.51	1,030	18.6	284	3.44	493	5.90	270	2.97	434	4.72
475	384	6.87	1,150	19.6	317	3.63	550	6.23	301	3.13	484	4.99
500	426	7.23	1,270	20.7	351	3.82	609	6.55	334	3.30	536	5.25
525	470	7.60	1,405	21.7	387	4.01	671	6.88	368	3.48	591	5.51
550	515	7.96	1,540	22.7	425	4.21	737	7.21	404	3.62	649	5.77
575	563	8.32	1,685	23.8	464	4.40	805	7.54	442	3.79	709	6.04
600	613	8.68	1,830	24.8	506	4.59	877	7.86	481	3.95	772	6.30
625	666	9.04	1,990	25.8	548	4.78	951	8.19	522	4.12	838	6.56
650	720	9.41	2,150	26.9	593	4.97	1,030	8.52	564	4.28	906	6.82
675	776	9.77	2,320	27.9	639	5.16	1,110	8.85	609	4.45	977	7.09
700	835	10.1	2,495	28.9	688	5.35	1,195	9.17	654	4.61	1,050	7.35
725	896	10.5	2,675	30.0	738	5.54	1,280	9.50	702	4.78	1,125	7.61
750	958	10.9	2,865	31.0	789	5.73	1,370	9.83	761	4.94	1,205	7.87
775	1,025	11.2	3,055	32.0	843	5.93	1,465	10.2	802	5.11	1,290	8.14
800	1,090	11.6	3,255	33.1	898	6.12	1,560	10.5	855	5.27	1,375	8.40
825	1,160	11.9	3,465	34.1	955	6.31	1,660	10.8	909	5.44	1,460	8.66
850	1,230	12.3	3,675	35.1	1,015	6.50	1,760	11.1	965	5.60	1,550	8.92
875	1,305	12.7	3,895	36.2	1,075	6.69	1,865	11.5	1,025	5.77	1,640	9.19
900	1,380	13.0	4,120	37.2	1,135	6.88	1,975	11.8	1,080	5.93	1,735	9.45
925	1,460	13.4	4,355	38.2	1,200	7.07	2,085	12.1	1,145	6.10	1,835	9.71
950	1,540	13.7	4,595	39.3	1,265	7.26	2,200	12.5	1,205	6.26	1,935	9.97
975	1,620	14.1	4,840	40.3	1,335	7.45	2,315	12.8	1,270	6.43	2,040	10.24
1,000	1,705	14.5	5,090	41.3	1,405	7.65	2,435	13.1	1,335	6.59	2,145	10.50
Factors*	$1.70d^2$	1.45%	$5.09d^2$	4.13%	$1.40d^2$	0.76%	$2.43d^2$	1.31%	$1.34d^2$	0.66%	$2.14d^2$	1.05%

M_d = Service moment of resistance in N-m per mm width of beam

A_s, A_s' = Areas of tension and compression reinforcement in mm² per mm width of beam

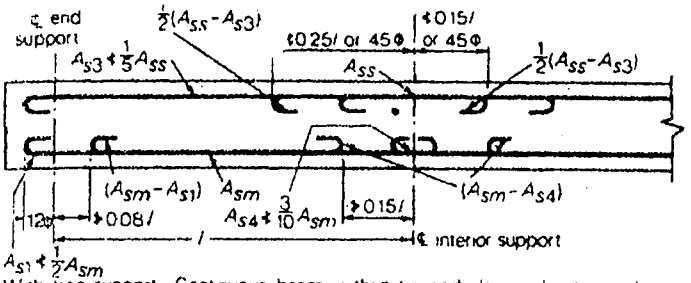
*Resistance-moment *factors* are given in N-mm

Distance between centres of compression and tension reinforcement assumed to be equal to $0.9d$; if any other distance, M_d and A_s for $A_s' = A_s$ must be adjusted.

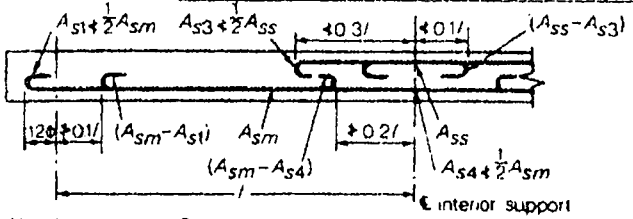
หมดอายุวันที่ 11-09-2566

RECTANGULAR BEAMS AND SLABS: Detailing data

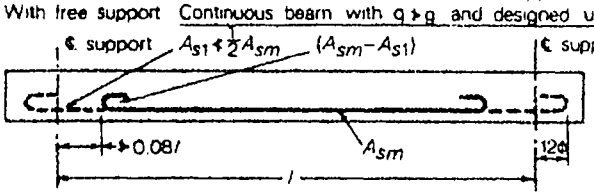
Simplified detailing requirements per CP 110



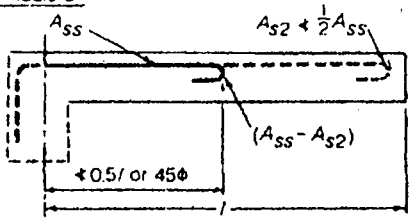
With free support Continuous beam with $g+q$ and designed using values given in Table 31



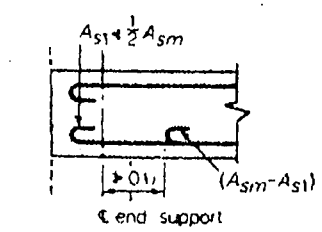
With free support Continuous beam with $g+q$ and designed using values given in Table 31



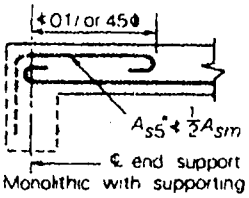
Freely supported beam or slab



Cantilevered beam or slab



Monolithic with supporting member



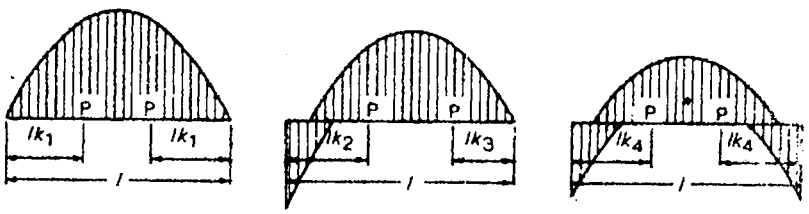
Monolithic with supporting beam or wall

The simplified requirements illustrated are in accordance with Clauses 3.11.7.2 and 3.11.7.3 of CP 110 and apply to members supporting substantially uniform loads.
If A_{sm} is the area of tension steel required in the bottom of the member at midspan, and A_{ss} is the area of tension steel required in the top of the member over a support then A_{s1} to A_{s5} are the areas of tension reinforcement required at various points, in terms of A_{sm} and A_{ss}, and terminating at the positions indicated.

* A_{s5} depends on fixity provided: $\frac{1}{2}A_{sm}$ generally sufficient.

Terminating or bending-up bars: general requirements.

Position P at which bars in the bottom of beams can be stopped or bent up. Maximum distance from support P is kl. If bar is not bent up at P, a sufficient bond length beyond P must be provided. Applicable to uniform load only.



Order of stopping-off or bending-up bars		Values of coefficient k																					
		k_1						k_2						k_3						k_4					
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Number of bars at midspan	1	0	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—
	2	0.15	0	—	—	—	—	0.24	0.11	—	—	—	—	0.13	0	—	—	—	—	0.21	0.09	—	—	—	—
	3	0.21	0.09	0	—	—	—	0.30	0.19	0.11	—	—	—	0.18	0.08	0	—	—	—	0.27	0.16	0.09	—	—	—
	4	0.25	0.15	0.07	0	—	—	0.33	0.24	0.17	0.11	—	—	0.22	0.13	0.05	0	—	—	0.30	0.21	0.15	0.09	—	—
	5	0.27	0.19	0.12	0.06	0	—	0.35	0.28	0.21	0.16	0.11	—	0.24	0.15	0.09	0.04	0	—	0.31	0.24	0.18	0.13	0.09	—
	6	0.30	0.21	0.15	0.09	0.04	0	0.36	0.30	0.24	0.19	0.14	0.11	0.25	0.18	0.13	0.08	0.03	0	0.33	0.27	0.21	0.16	0.12	0.09
	7	0.31	0.23	0.17	0.12	0.08	0.04	0.39	0.32	0.26	0.22	0.18	0.14	0.29	0.20	0.15	0.11	0.07	0.03	0.34	0.29	0.23	0.19	0.15	0.12
	8	0.32	0.25	0.19	0.15	0.10	0.07	0.40	0.33	0.27	0.24	0.20	0.17	0.30	0.22	0.17	0.13	0.09	0.05	0.35	0.30	0.25	0.21	0.18	0.15

RECTANGULAR BEAMS: Resistance and reinforcement: SI units
Modular-ratio method

Maximum stress in concrete $f_{cr} = 7N/mm^2$ $\quad \alpha_e = 15$

Effective depth d mm	$f_{st} = 140N/mm^2$				$f_{st} = 210N/mm^2$				$f_{st} = 230N/mm^2$			
	$A_s' = 0$		$A_s' = A_s$		$A_s' = 0$		$A_s' = A_s$		$A_s' = 0$		$A_s' = A_s$	
	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s	M_d	A_s
250	80.4	2.68	178	5.78	64.8	1.39	96.7	2.06	61.4	1.19	86.6	1.66
275	97.2	2.95	215	6.36	78.4	1.53	117	2.27	74.3	1.31	105	1.85
300	116	3.21	256	6.94	93.3	1.67	139	2.48	88.4	1.43	125	2.02
325	136	3.48	301	7.52	110	1.81	163	2.68	104	1.55	146	2.18
350	157	3.75	349	8.09	127	1.94	189	2.89	120	1.67	170	2.35
375	181	4.02	401	8.67	146	2.08	217	3.09	138	1.79	195	2.52
400	206	4.29	456	9.25	166	2.22	247	3.30	157	1.91	222	2.69
425	232	4.55	515	9.83	187	2.36	279	3.51	177	2.03	250	2.86
450	260	4.82	577	10.4	210	2.50	313	3.71	199	2.15	281	3.02
475	290	5.09	643	11.0	234	2.64	349	3.92	222	2.27	313	3.19
500	321	5.36	712	11.6	259	2.77	387	4.13	246	2.38	346	3.36
525	354	5.62	785	12.1	286	2.92	426	4.33	271	2.50	382	3.53
550	389	5.89	862	12.7	314	3.06	468	4.54	297	2.62	419	3.70
575	425	6.16	942	13.3	343	3.19	511	4.74	325	2.74	458	3.86
600	463	6.43	1,026	13.9	373	3.33	557	4.95	354	2.86	499	4.03
625	502	6.70	1,115	14.5	405	3.47	604	5.18	384	2.98	541	4.20
650	543	6.96	1,205	15.0	438	3.61	653	5.36	415	3.10	586	4.37
675	586	7.23	1,300	15.6	472	3.75	705	5.57	448	3.22	631	4.54
700	630	7.50	1,395	16.2	508	3.89	758	5.77	481	3.34	679	4.70
725	676	7.77	1,500	16.8	545	4.03	813	5.98	516	3.46	728	4.87
750	723	8.04	1,605	17.3	583	4.17	870	6.19	553	3.58	780	5.04
775	772	8.30	1,710	17.9	623	4.31	929	6.39	590	3.70	832	5.21
800	823	8.57	1,825	18.5	664	4.44	990	6.60	629	3.82	887	5.38
825	875	8.84	1,940	19.1	706	4.58	1,055	6.81	669	3.93	943	5.54
850	925	9.11	2,060	19.7	749	4.72	1,115	7.01	710	4.05	1,000	5.71
875	984	9.37	2,180	20.2	794	4.86	1,185	7.22	752	4.17	1,060	5.88
900	1,040	9.64	2,310	20.8	840	5.00	1,255	7.43	796	4.29	1,125	6.05
925	1,100	9.91	2,440	21.4	887	5.14	1,325	7.63	841	4.41	1,185	6.22
950	1,160	10.2	2,570	22.0	936	5.28	1,395	7.84	887	4.53	1,250	6.38
975	1,220	10.4	2,710	22.5	986	5.42	1,470	8.04	934	4.65	1,320	6.55
1,000	1,285	10.7	2,850	23.1	1,035	5.56	1,545	8.25	982	4.77	1,385	6.72
Factors*	$1.29d^2$	1.07%	$2.85d^2$	2.31%	$1.04d^2$	0.56%	$1.55d^2$	0.83%	$0.98d^2$	0.48%	$1.39d^2$	0.67%

M_d = Service moment of resistance in N-m per mm width of beam

A_s, A_s' = Areas of tension and compression reinforcement in mm^2 per mm width of beam

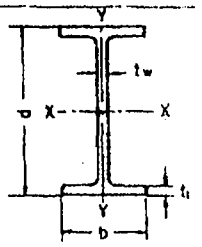
* Resistance-moment *factors* are in N-mm

Distance between centres of compression and tension reinforcement assumed to be equal to $0.9d$; if any other distance, M_d and A_s for $A_s' = A_s$ must be adjusted.

หมดอายุวันที่ 11-09-2566

SIZES, WEIGHTS AND SECTION PROPERTIES OF STEEL I SECTION

Wide Flange (Metric Sizes)



Nominal Size,	Weight per Meter,	Area of Section A,	Depth of Section d,	Flange		Web Thickness tw,	AXIS X–X			AXIS Y–Y		
				Width b,	Thickness tf,		Ixx,	Sxx,	rxx,	Iyy,	Syy,	ryy,
mm	kg	cm²	mm	mm	mm	mm	cm⁴	cm³	cm	cm⁴	cm³	cm
900×300	286	364.0	912	302	34	18	498000	10900	37.0	15700	1040	6.56
	243	309.8	900	300	28	16	411000	9140	36.4	12600	843	6.39
	213	270.9	890	299	23	15	345000	7760	35.7	10300	688	6.16
800×300	241	307.6	808	302	30	16	339000	8400	33.2	13800	915	6.70
	210	267.4	800	300	26	14	292000	7290	33.0	11700	782	6.62
	191	243.4	792	300	22	14	254000	6410	32.3	9930	662	6.36
700×300	215	273.6	708	302	28	15	237000	6700	29.4	12900	853	6.86
	185	235.5	700	300	24	13	201000	5760	29.3	10800	722	6.78
	166	211.5	692	300	20	13	172000	4980	28.6	9020	602	6.53
600×300	175	222.4	594	302	23	14	137000	4620	24.9	10600	701	6.90
	151	192.5	588	300	20	12	118000	4020	24.8	9020	601	6.85
	137	174.5	582	300	17	12	103000	3530	24.3	7670	511	6.63
600×200	120	152.5	606	201	20	12	90400	2980	24.3	2720	271	4.22
	106	134.4	600	200	17	11	77600	2590	24.0	2280	228	4.12
	94.6	120.5	596	199	15	10	68700	2310	23.9	1980	199	4.05
500×300	128	163.5	488	300	18	11	71000	2910	20.8	8110	541	7.04
	114	145.5	482	300	15	11	60400	2500	20.4	6760	451	6.82
500×200	103	131.3	506	201	19	11	56500	2230	20.7	2580	257	4.43
	89.7	114.2	500	200	16	10	47800	1910	20.5	2140	214	4.33
	79.5	101.3	496	199	14	9	41900	1690	20.3	1840	185	4.27
450×300	124	157.4	440	300	18	11	56100	2550	18.9	8110	541	7.18
450×200	76.0	96.76	450	200	14	9	33500	1490	18.6	1870	187	4.40
	66.2	84.30	446	199	12	8	28700	1290	18.5	1580	159	4.33
400×400	605	770.1	498	432	70	45	298000	12000	19.7	94400	4370	11.1
	415	528.6	458	417	50	30	187000	8170	18.8	60500	2900	10.7
	283	360.7	428	407	35	20	119000	5570	18.2	39400	1930	10.4
	232	295.4	414	405	28	18	92800	4480	17.7	31000	1530	10.2
	172	218.7	400	400	21	13	66600	3330	17.5	22400	1120	10.1
	147	186.8	394	398	18	11	56100	2850	17.3	18900	951	10.1
400×300	107	136.0	390	300	16	10	38700	1980	16.9	7210	481	7.28
400×200	66.0	84.12	400	200	13	8	23700	1190	16.8	1740	174	4.54
	56.6	72.16	396	199	11	7	20000	1010	16.7	1450	145	4.48
350×350	159	202.0	356	352	22	14	47600	2670	15.3	16000	909	8.90
	136	173.9	350	350	19	12	40300	2300	15.2	13600	776	8.84
	115	146.0	344	348	16	10	33300	1940	15.1	11200	646	8.78
350×250	79.7	101.5	340	250	14	9	21700	1280	14.6	3650	292	6.00
350×175	57.8	73.68	354	176	13	8	16100	909	14.8	1180	134	4.01
	49.6	63.14	350	175	11	7	13600	775	14.7	984	112	3.95
	41.4	52.68	346	174	9	6	11100	641	14.5	792	91.0	3.88
300×300	106	134.8	304	301	17	11	23400	1540	13.1	7730	515	7.57
	94.0	119.8	300	300	15	10	20400	1360	13.1	6750	450	7.51
	87.0	110.8	298	299	14	9	18800	1270	13.0	6240	417	7.51
300×200	56.8	72.38	294	200	12	8	11300	771	12.5	1600	160	4.71
300×150	42.6	54.21	302	151	10	8	8210	544	12.3	576	76.3	3.26
	36.7	46.78	300	150	9	6.5	7210	481	12.4	508	67.7	3.29
	32.0	40.80	298	149	8	5.5	6320	424	12.4	442	59.3	3.29

Continued

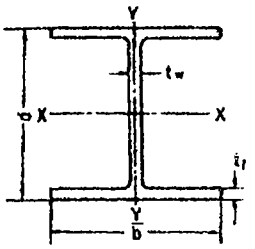
70

Nominal Size, mm	Weight per Meter, kg	Area of Section A, cm²	Depth of Section d, mm	Flange Width b, mm	Flange Thickness t_f, mm	Web Thickness t_w, mm	AXIS X–X I_{xx}, cm⁴	AXIS X–X S_{xx}, cm³	AXIS X–X r_{xx}, cm	AXIS Y–Y I_{yy}, cm⁴	AXIS Y–Y S_{yy}, cm³	AXIS Y–Y r_{yy}, cm
250×250	81.1	103.3	250	250	14	14	11300	903	10.5	3650	292	5.95
	72.4	92.18	250	250	14	9	10800	867	10.8	3650	292	6.29
	66.5	84.70	248	249	13	8	9930	801	10.8	3350	269	6.29
250×175	44.1	56.24	244	175	11	7	6120	502	10.4	984	113	4.18
250×125	36.1	45.99	252	125	11	7.5	4910	390	10.3	359	57.5	2.80
	32.3	41.18	250	125	9.9	6.3	4450	356	10.4	324	51.8	2.80
	29.6	37.66	250	125	9	6	4050	324	10.4	294	47.0	2.79
	25.7	32.68	248	124	8	5	3540	285	10.4	255	41.1	2.79
200×200	65.7	83.69	208	202	16	10	6530	628	8.83	2200	218	5.13
	57.8	73.57	204	201	14	9	5600	549	8.73	1900	189	5.08
	49.9	63.53	200	200	12	8	4720	472	8.62	1600	160	5.02
	41.4	52.69	196	199	10	6.5	3850	392	8.54	1310	132	4.99
200×150	30.6	39.01	194	150	9	6	2690	277	8.30	507	67.6	3.61
200×100	28.0	35.68	203	100	10	8	2360	232	8.12	168	33.6	2.17
	22.4	28.48	200	100	8.5	5.6	1940	194	8.26	142	28.5	2.24
	21.3	27.16	200	100	8	5.5	1840	184	8.24	134	26.8	2.22
175×175	54.1	68.87	183	177	15	9.5	4110	449	7.72	1390	157	4.49
	47.1	60.00	179	176	13	8.5	3480	389	7.62	1180	134	4.44
	44.4	56.57	175	175	11	11	2990	342	7.27	985	113	4.17
	40.2	51.21	175	175	11	7.5	2880	330	7.50	984	112	4.38
	32.8	41.74	171	174	9	6	2300	269	7.43	791	90.9	4.35
175×90	20.7	26.32	175	90	9	6	1350	154	7.17	110	24.4	2.04
	18.1	23.04	175	90	8	5	1210	139	7.26	97.5	21.7	2.06
150×150	43.4	55.30	158	152	14	9	2420	306	6.61	821	108	3.85
	37.4	47.68	154	151	12	8	2020	262	6.51	690	91.3	3.80
	34.6	44.04	150	150	10	10	1700	226	6.21	564	75.2	3.58
	31.5	40.14	150	150	10	7	1640	219	6.39	563	75.1	3.75
150×100	21.1	26.84	148	100	9	6	1020	138	6.17	151	30.1	2.37
150×75	18.9	24.10	150	75	9	7.5	844	113	5.92	64.0	17.1	1.63
	14.0	17.85	150	75	7	5	666	88.8	6.11	49.5	13.2	1.66
125×125	23.8	30.31	125	125	9	6.5	847	136	5.29	293	47.0	3.11
	21.3	27.09	125	125	8	6	766	122	5.32	261	41.7	3.10
	20.3	25.82	125	125	7	7	706	113	5.23	228	36.5	2.97
	18.5	23.60	125	125	7	5	683	109	5.38	228	36.5	3.11
125×60	13.2	16.84	125	60	8	6	413	66.1	4.95	29.2	9.73	1.32
	10.5	13.39	125	60	6.5	4.5	343	54.9	5.06	23.6	7.86	1.33
100×100	17.2	21.90	100	100	8	6	383	76.5	4.18	134	26.7	2.47
	16.1	20.57	100	100	7	7	350	69.9	4.12	117	23.4	2.39
	14.8	18.85	100	100	7	5	339	67.8	4.24	117	23.4	2.49
100×50	9.30	11.85	100	50	7	5	187	37.5	3.98	14.8	5.91	1.12
	7.80	9.940	100	50	6	4	163	32.6	4.05	12.6	5.04	1.13

LIST OF SYMBOLS

- **A** Area of section, in.² or cm²
- **b** Width of flange, in. or mm
- **d** Depth of section, in. or mm
- I_{xx} Moment of inertia about axis X-X, in.⁴ or cm⁴
- I_{yy} Moment of inertia about axis Y-Y, in.⁴ or cm⁴
- r_{xx} Radius of gyration about X-X axis, in. or cm
- r_{yy} Radius of gyration about Y-Y axis, in. or cm
- S_{xx} Section modulus about axis X-X, in.³ or cm³
- S_{yy} Section modulus about axis Y-Y, in.³ or cm³
- t_f Flange thickness for shapes with no flange slope, in. or mm
- t_w Web thickness, in. or mm
- x, y Distances from outside face of section to neutral axes Y-Y and X-X, respectively, in. or mm

4. Bearing Piles (Metric Sizes)



Nominal Size, mm	Weight per Foot, kg	Area of Section A, mm^2	Depth of Section d, mm	Flange Width b, mm	Flange Thickness t_f, mm	Web Thickness t_w, mm	AXIS X–X I_{xx}, mm^4	AXIS X–X S_{xx}, mm^3	AXIS X–X r_{xx}, mm	AXIS Y–Y I_{yy}, cm^4	AXIS Y–Y S_{yy}, cm^3	AXIS Y–Y r_{yy}, cm
400×400	197	250.7	400	408	21	21	70900	3540	16.8	23800	1170	9.75
	168	214.4	394	405	18	18	59700	3030	16.7	20000	985	9.65
	140	178.5	388	402	15	15	49000	2520	16.6	16300	809	9.54
350×350	156	198.4	350	357	19	19	42800	2450	14.7	14400	809	8.53
	131	166.6	344	354	16	16	35300	2050	14.6	11800	669	8.43
	106	135.3	338	351	13	13	28200	1670	14.4	9380	534	8.33
300×300	106	134.8	300	305	15	15	21500	1440	12.6	7100	466	7.26
	84.5	107.7	294	302	12	12	16900	1150	12.5	5520	365	7.16
250×250	82.2	104.7	250	255	14	14	11500	919	10.5	3880	304	6.09
	64.4	82.06	244	252	11	11	8790	720	10.3	2940	233	5.98
200×200	56.2	71.53	200	204	12	12	4980	498	8.35	1700	167	4.88

คลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมดอายุวันที่ 11-09-2566