เสาเข็ม และการคำนวณ
การรับน้ำหนักของเสาเข็ม

กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา

สำนักควบคุมการก่อสร้าง

พฤศจิกายน 2547

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์ในการนำเสาเข็มไปใช้ในงานก่อสร้าง	1
3. ชนิดของเสาเข็ม	2
3.1 เสาเข็มไม้	2
3.2 เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ	2
3.3 เสาเข็มหล่อในที่	5
4. ข้อกำหนดเกี่ยวกับการตอกเสาเข็ม	7
4.1 การตอกเสาเข็ม	8
4.2 ข้อปฏิบัติในการตอกเสาเข็ม	8
4.3 การจัดเสาเข็มและระยะห่างของเสาเข็ม	9
4.4 ความลึกของเสาเข็มที่จมดิน	9
4.5 การใช้น้ำฉีดให้เสาเข็มจมลงในดิน	10
4.6 เสาเข็มเอียง	10
4.7 เสาเข็มรับแรงถอน	10
4.8 เสาเข็มสั้น Friction Piles ในกรุงเทพฯ	11
4.9 Nagative Skin Friction ของเสาเข็ม	11
4.10 เสาเข็มรับแรงในแนวราบ	12
4.11 น้ำหนักของลูกตุ้มตอกสำหรับเสาเข็ม คสล. และเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง	13
4.12 สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก	14
4.13 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม	17
4.14 ผลกระทบจากการตอกเสาเข็ม	19
5. เสาเข็ม กลุ่ม	21

- / 6. คำนวณน้ำหนัก

หน้า

6. คำนวณน้ำหนักบรรทุกจากคุณสมบัติของดิน 23
6.1 เสาเข็มที่ลอยอยู่ในชั้นดินอ่อน 23
6.2 เสาเข็มที่ปลายจมอยู่ในชั้นดินแข็ง 27
6.3 น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม 35

7. ตัวอย่างในการคำนวณเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง 36
7.1 ตัวอย่างในการคำนวณเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I 36
7.2 ตัวอย่างในการคำนวณเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยม 39
7.3 ตัวอย่างในการคำนวณแผ่นเหล็กเพื่อการเชื่อมต่อเสาเข็ม 40

เสาเข็ม และการคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

1. บทนำ

เสาเข็มเป็นวัสดุที่ใช้แพร่หลายมากที่สุดในการรับน้ำหนักของอาคาร โดยเสาเข็มจะรับน้ำหนักจากฐานรากก่อน แล้วจึงค่อยถ่ายให้ดิน ซึ่งจะต่างจากฐานรากแบบแผ่ ที่ดินรับน้ำหนักจากฐากรากโดยตรง การออกแบบฐานโดยใช้เสาเข็ม ก็เพราะดินที่อยู่ตื้นรับน้ำหนักได้น้อย จึงต้องใช้เสาเข็มเป็นตัวช่วยถ่ายน้ำหนักข้างบนลงไปยังดินชั้นล่างที่แข็งกว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มขึ้นอยู่กับตัวเสาเข็มเอง (วัสดุที่ใช้ในการทำเสาเข็ม) และความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน รอบตัวเสาเข็ม (Skin friction) และปลายเสาเข็ม (End Bearing)

2. วัตถุประสงค์ในการนำเสาเข็มไปใช้งานก่อสร้าง

2.1 เพื่อถ่ายน้ำหนักผ่านน้ำ หรือชั้นดินอ่อนไปยังชั้นดินแข็งที่เหมาะสม ได้แก่ เสาเข็มรับน้ำหนักที่ปลาย (End – Bearing – Piles)

2.2 เพื่อถ่ายน้ำหนักลึกลงไปในชั้นดินอ่อนด้วย แรงเสียดทาน (Skin Friction) ตลอดความยาวของเสาเข็ม ได้แก่ เสาเข็มเสียดทาน (Friction Piles)

2.3 เพื่ออัดให้ดินประเภท Granular soils ให้แน่นตัวเพื่อเพิ่ม Bearing Capacity ของมันได้แก่ Compaction piles

2.4 เพื่อขยายความลึกของฐานรากให้ผ่านบริเวณที่จะเกิด Scouring ป้องกันไว้เผื่อดินจะสึกกร่อนหนีไป

2.5 เพื่อเป็นสมอรั้งโครงสร้างต่าง ๆ ที่รับแรงถอน (uplift) เนื่องจากแรงดันของน้ำหรือ Overturning Moment ได้แก่ Tension piles หรือ Uplift piles

2.6 เพื่อเป็นสมอต้านแรงฉุดในแนวนอนจากกำแพงกันดิน หรือแรงฉุดอื่น ๆ ได้แก่ Anchor piles

2.7 เพื่อป้องกันเขื่อนเทียบเรือ จากการกระแทกของเรือ หรือวัตถุลอยน้ำอื่น ๆ ได้แก่ Fender piles และ Dolphins

2.8 เพื่อต้านทานแรงในแนวราบหรือแรงในแนวเอียงที่มีค่ามากต่าง ๆ ได้แก่ Batter piles

3. ชนิดของเสาเข็ม

ถ้าจำแนกเสาเข็มตามวัสดุที่ใช้ทำและการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.1 เสาเข็มไม้

เสาเข็มไม้ตามปกติเป็นไม้เบญจพรรณ ตัดกิ่ง และทุบเปลือกออก ตอนตอกเจาะด้าน-ปลายลงต้องมีลำต้นตรง ไม่ผุหรือมีราขึ้น เสาเข็มไม้จะต้องทุบเปลือกหรือถากเปลือกออกทั้งหมด ตาไม้ต่าง ๆ จะต้องตัดให้เรียบเสมอฝังของต้นเสาเข็ม ปลายและหัวเสาเข็มจะต้องเลื่อยตัดเรียบได้ฉากกับลำต้น

3.2 เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ

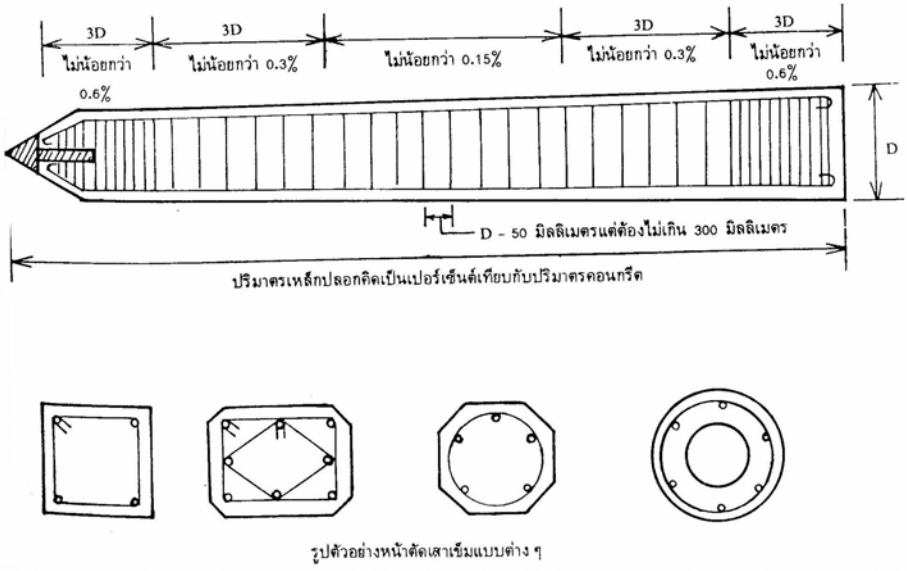
เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ ตามปกติเรามักจะหล่อเสาเข็มในโรงงานก่อน เมื่อคอนกรีตได้อายุแล้ว ค่อยขนย้าย จากโรงงาน ไปยังสถานที่ก่อสร้าง หรือในบางครั้ง เราอาจหล่อเสาเข็มในบริเวณที่ก่อสร้างเลยก็ได้

เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

3.2.1 เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforcement Precast Concrete piles)

เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปร่างจะเป็นแบบใดก็ได้แล้วแต่จะออกแบบ แต่ส่วนใหญ่ควรให้จุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดทับจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม เหล็กเสริมตามยาวต้องมีพอเพียงที่จะรับโมเมนต์ดัดเนื่องจากการขนส่งและยกตอก ต้องมีอย่างน้อย 4 เส้น เส้นผ่าศูนย์กลางไม่ควรเล็กกว่า 9 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กปลอก อาจเป็นปลอกแบบพัน หรือ แบบปลอกเดี่ยวก็ได้ ต้องเสริมบริเวณปลายและโคนเสาให้มาก เพราะทั้งที่โคนและที่ปลายเสาเข็ม อาจเสียหายเนื่องจากแรงกระแทกได้ การทำให้คอนกรีตแน่น อาจใช้เครื่องเขย่าคอนกรีต หรืออาจใช้แบบชนิดเหวี่ยง (Spun) ก็ได้

จำนวนเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอก เมื่อเทียบกับปริมาตรคอนกรีตในช่วงนั้น ๆ ไม่ควรน้อยกว่าที่กำหนดในรูปข้างล่างนี้



รูปตัวอย่างหน้าตัดเสาเข็มแบบต่าง ๆ

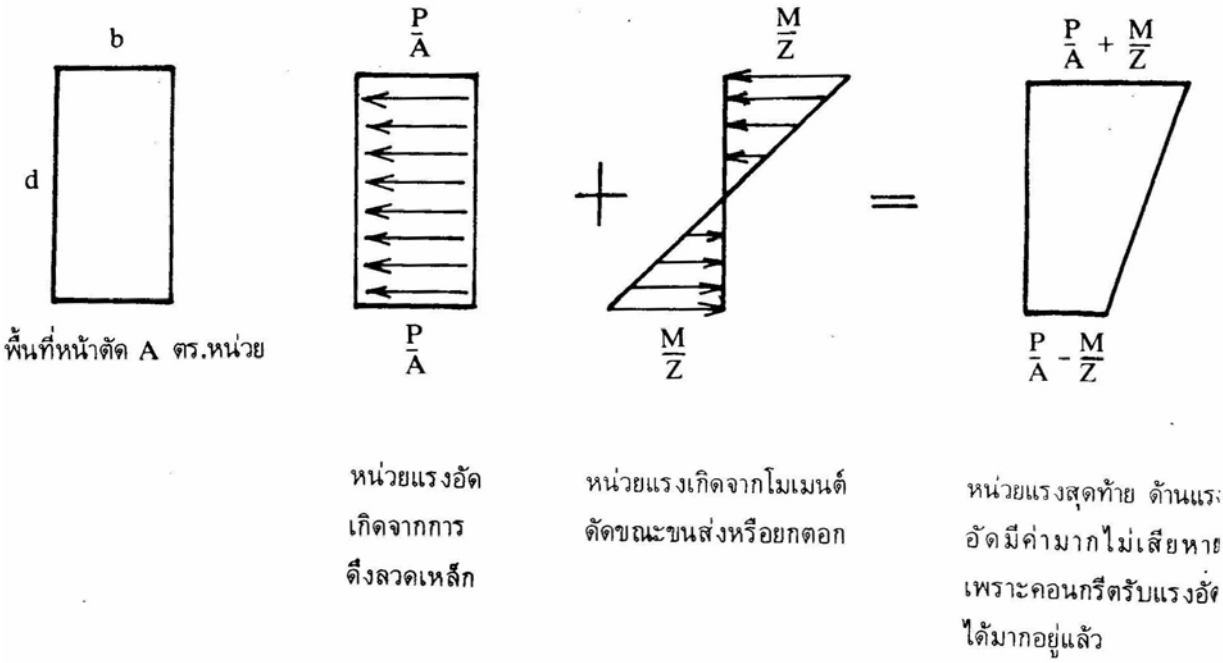
3.2.2 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Precast Prestressed Concrete piles)

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปร่างและหน้าตัดเหมือนกับเสาเข็มคอนกรีตธรรมดา แต่ได้เปรียบกว่าที่สามารถทำได้ยาวกว่า และมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่า สำหรับเหล็กเสริมตามยาวนั้น เป็นลวดเหล็กรับแรงดึงได้สูง ตาม มอก. 95- 2517 หรืออาจจะใช้ลวดเหล็กตาม ASTM 416-59 T หรือ JIS G 3536-1971

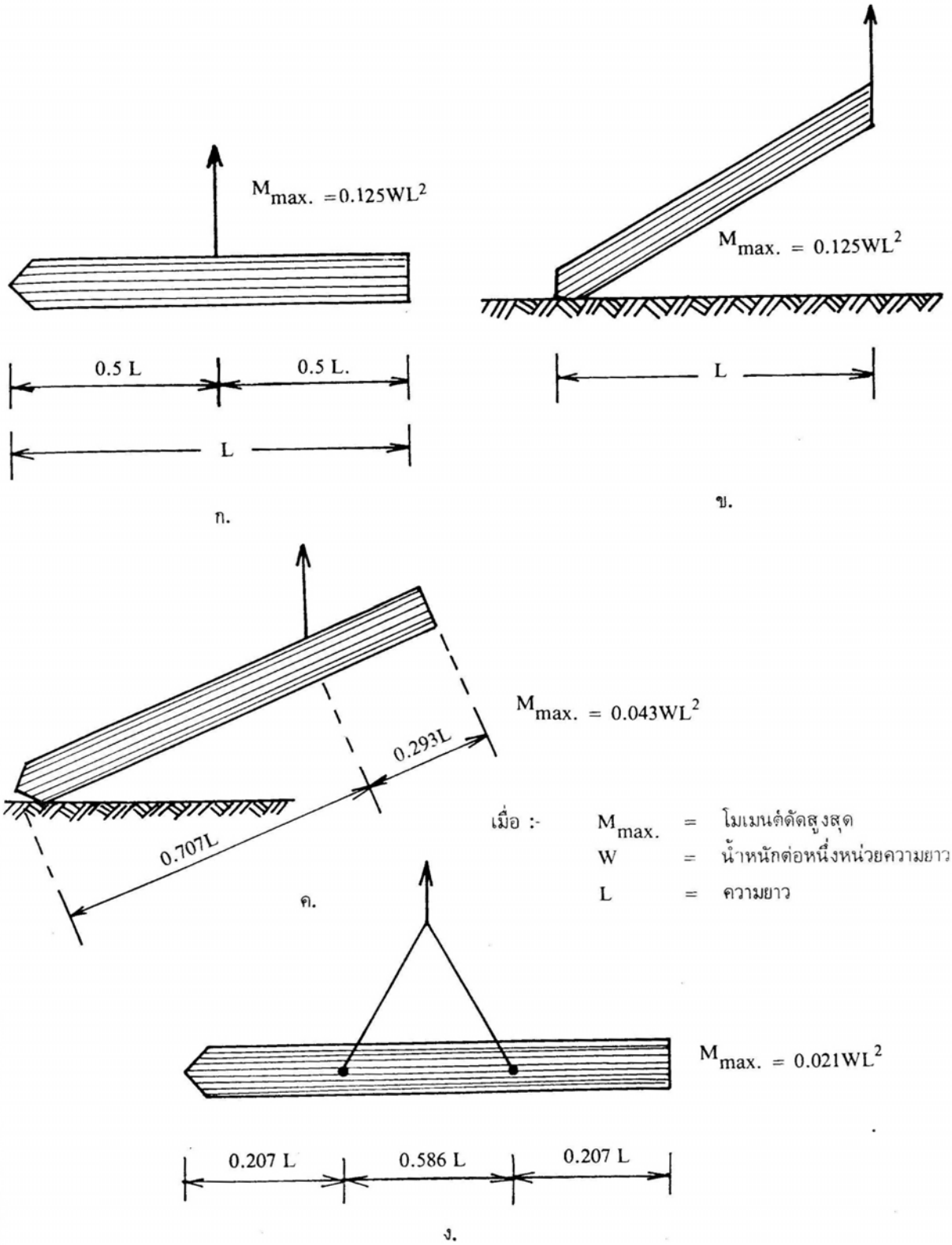
การดึงลวดเหล็กหรือเชือกเหล็กต้องไม่มากกว่า 0.7 f'_s (f'_s คือความเค้นดึงสูงสุดของเชือกหรือลวดเหล็ก) และหลังจากการตัดลวดเหล็ก เมื่อคอนกรีตรับความเค้นอัดได้ .45f'_c แล้ว ความเค้นดึงประสิทธิผล ต้องไม่มากกว่า 0.6 f'_s (f'_c คือความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน)

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ ชนิดดึงลวดเหล็กก่อน แล้วค่อยหล่อคอนกรีต กับชนิดหล่อคอนกรีตก่อน แล้วค่อยดึงลวดเหล็ก แต่สำหรับในบ้านเรา นิยมทำชนิดดึงลวดเหล็กก่อนแล้วค่อยหล่อคอนกรีต

การอัดแรงเข้าไปในคอนกรีตก่อน โดยการดึงเหล็กให้ยืดตัวออก แล้วปล่อยให้หดเข้า ในขณะที่เหล็กหดเข้านั้น มันจะอัดคอนกรีต ทำให้คอนกรีตรับแรงอัดอยู่ก่อนใช้งาน การอัดแรงให้คอนกรีตนี้ทำให้คอนกรีตสามารถรับแรงโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น นี้เป็นข้อได้เปรียบของเสาเข็มชนิดคอนกรีตอัดแรง การขนส่ง และยกตอก ต้องยกตามจุดยก ที่ผู้ผลิตกำหนด เพราะผู้ผลิต ได้คำนวณออกแบบไว้แล้ว ถ้าผู้ใช้ไม่ปฏิบัติตาม เสาเข็มอาจเสียหายได้



ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มทุกชนิด ณ จุดยกต่าง ๆ กัน ดังนี้:-

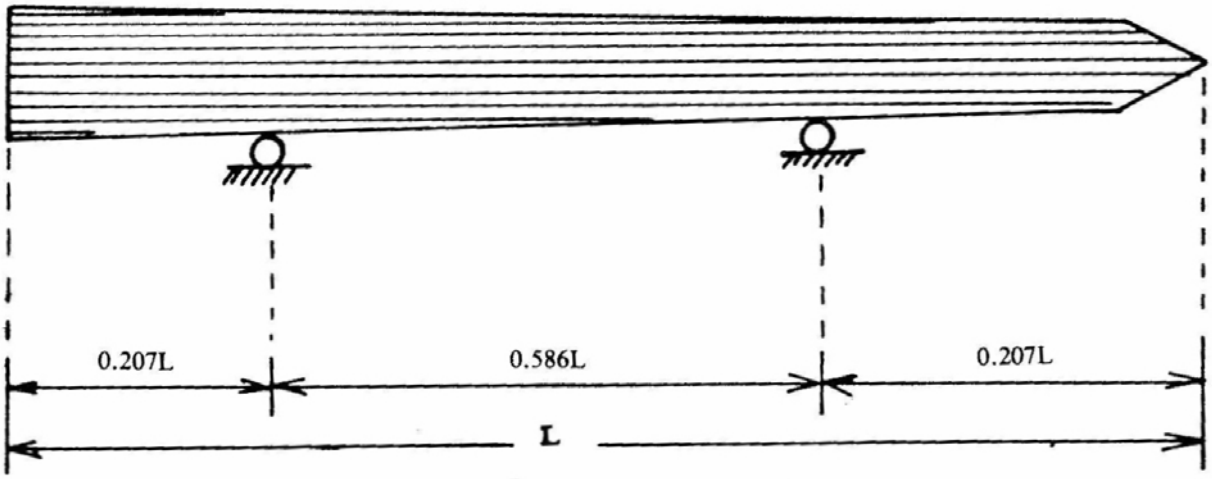


เมื่อ :- $M_{max.}$ = โมเมนต์ดัดสูงสุด

W = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาว

L = ความยาว

การจะตัดสินใจใช้เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จนั้น ผู้ซื้อควรจะแน่ใจว่าเสาเข็มชนิดนั้น ๆ สามารถรับแรงอัด และโมเมนต์ดัด ได้ตามที่ผู้ซื้อต้องการ การจะทดสอบว่าเสาเข็มนั้น จะเสียหายเนื่องจากขนส่ง หรือยกตอกหรือไม่ เราสามารถทดสอบก่อนที่จะซื้อได้ โดยเอาเสาเข็มวางบนเหล็กเส้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มม. ซึ่งวางอยู่บนพื้นคอนกรีต โดยให้จุดยกอยู่ตรงเหล็กเส้นพอดี (ดูรูปประกอบ) แล้วเพิ่มน้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งความยาวของเสาเข็ม โดยปกติใช้น้ำหนักกด 30% ถึง 50% ของน้ำหนักของเสาเข็มต้นนั้น แล้วสังเกตรอยร้าวถ้ารอยร้าวเกิดขึ้น กว้างกว่า 0.2 มิลลิเมตร ถือว่าเข็มนั้นใช้ไม่ได้ และถ้ารูปหน้าตัดของเสาเข็ม เป็นรูปตัว I หรือรูปอื่นใดก็ตาม ควรเลือกเสาเข็มที่มีพื้นที่หน้าตัดมาก ๆ เพราะสามารถรับแรงกระแทกเนื่องจากการตอกได้มาก และถ้าช่วงดินอ่อนลึก ๆ เสาเข็มที่มีพื้นที่หน้าตัดโตจะทำหน้าที่เสาได้ดีกว่าเสาเข็มที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก



ตัวอย่างการวางเสาเข็มเพื่อทดสอบสำหรับเสาเข็มมีจุดยกสองจุด

3.3 เสาเข็มหล่อในที่ (Cast-in-place Concrete Piles)

เสาเข็มหล่อในที่ทำโดยเจาะรูลงไปในดินจนได้ความลึกตามที่ต้องการ แล้วเทคอนกรีตจนเต็มรูที่เจาะอาจใช้สว่านเจาะ ตอกแบบหรือปลอกเหล็ก หรืออาจจะกดปลอกเหล็กลงไปขุดดินภายในปลอกเหล็กขึ้น แล้วจึงเทคอนกรีต

โดยปกติเข็มหล่อในที่แบ่งตามลักษณะได้ 3 ชนิด Shell type (case type) , Shell-less type (Uncased type) และ Pedestal (enlarged bulb)

3.3.1 Shell type ทำโดยตอกปลอกเหล็กกลวงปิดปลายลงไปในดิน เมื่อถึงระดับที่ต้องการแล้วจึงเทคอนกรีตลงไปในปลอกเหล็ก โดยทิ้งปลอกเหล็กไว้เป็นส่วนหนึ่งของเสาเข็ม

3.3.2 Shell-less type ทำโดยตอกหรือกดปลอกเหล็กกลวงลงไปในดิน ถ้าเป็นปลอกเหล็กชนิดตอก มักจะมีแกนกลางสำหรับตอก เมื่อตอกถึงระดับที่ต้องการ ดึงแกนกลางออกแล้วเทคอนกรีตลงไป กระแทกคอนกรีตให้แน่นแล้วค่อยๆ ดึงปลอกขึ้นก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัว ถ้าเป็นปลอกเหล็ก

ชนิดใช้กดลงไปมักจะเปิดปลาย เมื่อกดถึงระดับที่ต้องการจึงขุดดินออก แล้วจึงเทคอนกรีต และค่อยๆ ดึงปลอกเหล็กขึ้นเป็นระยะๆ ก่อนคอนกรีตก่อตัวเช่นเดียวกัน

3.3.3 Pedestal Type เป็นเสาเข็มที่มีเชิงหรือกระเปาะอยู่ที่ปลายเสาเข็ม เชิงหรือกระเปาะอาจเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ รูปกรวย หรืออาจจะตอกคอนกรีตที่เพิ่งผสมใหม่ด้วยลูกตุ้มหนักๆ ให้ลูกตุ้มดันดินกระจายออกไปรอบๆ ปลายปลอกเหล็กคอนกรีตก็จะแข็งตัวเป็นเชิงอยู่ใต้เสาเข็มในชั้นดินลึกๆ

3.3.4 เสาเข็มเหล็ก (Steel Piles)

เสาเข็มเหล็ก ถ้าทำด้วยท่อเหล็ก มักจะเทคอนกรีตใส่ในท่อหลักจากตอกได้ถึงระดับที่ต้องการแล้ว แต่เสาเข็มเหล็กที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมักจะเป็นรูปตัว H เพราะสามารถตอกลงในดินได้ดีกว่าชนิดอื่นๆ สามารถตอกทะลุชั้นหินบางได้ และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่ารูปอื่นๆ

ข้อเสียของเสาเข็มเหล็กนั้นเห็นจะเนื่องจากการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าตอกในชั้นดินที่ไม่ถูกรบกวนการกัดกร่อนจะน้อยมาก การป้องกันการกัดกร่อนนั้น เรามักจะเผื่อความหนาของเหล็กไว้ 1/16 นิ้ว จากรูปหน้าตัดที่คำนวณได้ หรืออาจจะเลือกใช้โลหะชนิดพิเศษ ซึ่งเขาทำไว้สำหรับป้องกันการกัดกร่อนโดยเฉพาะก็ได้

สำหรับเสาเข็มเหล็กที่ฝังอยู่ในชั้นดินที่ถูกรบกวน หรือชั้นดินถมบริเวณที่มีน้ำขึ้นน้ำลง หรือบริเวณที่เรียกว่าเปียกๆ แห้งๆ นั้น เราต้องป้องกันบริเวณนี้เป็นกรณีพิเศษ เช่น เทคอนกรีตหุ้มก่อนถมดิน หรือ ทายางมะตอยก่อนถมดินเหล่านี้ เป็นต้น

3.3.5 เสาเข็มประกอบ (Composite Piles)

เสาเข็มประกอบเป็นเสาเข็มที่ประกอบด้วยวัสดุสองอย่างประกอบขึ้นเป็นเข็มต้นเดียวกัน เช่น ไม้กับคอนกรีต หรือเหล็กกับคอนกรีตข้อสำคัญที่สุดของเสาเข็มประเภทนี้คือ “ข้อต่อ” ข้อต่อต่อสัมผัสแนบสนิทกันสามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกได้โดยตรงข้อต่อต้องทนทานต่อแรงโมเมนต์ดัด และแรงดึงขึ้นหรือแรงยกขึ้น (Uplift force) ได้ดีและข้อต่อต้องประกอบกันในสนามได้สะดวก

3.3.6 เสาเข็มเจาะเสียบ (Pre-bored Pile)

เป็นเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปธรรมดาทั่วไปแต่แทนที่จะทำการตอกตั้งแต่เริ่มแรก กลับทำการเจาะรูนำเสียก่อนจนเลยระดับความลึกของชั้นดินอ่อน เพื่อให้ เมื่อตอกเสาเข็มแล้ว แรงสั่นสะเทือนเกิดขึ้นน้อย จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาข็มประเภทนี้ปรากฏว่า การใช้เข็มเจาะเสียบนี้ไม่ทำให้การรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลงเลย

ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มชนิดนี้ก็คือ

1. ลดปริมาตรในการแทนที่ด้วยเสาเข็ม

2. ลดค่า Negative Skin Friction เพราะก่อนการตอกได้ขุดเอาดินอ่อนในตำแหน่งที่จะตอกเสาเข็มออกไปก่อนแล้วโดยที่หลุมเจาะมีขนาดโตกว่าเสาเข็มประมาณ 5-10 ซม.

3. ลดความสั่นสะเทือนในส่วนดินชั้นบนๆ เพราะหลุมเจาะมีขนาดใหญ่กว่าเสาเข็ม

4. ลดการเคลื่อนตัวของดินชั้นบนๆ ซึ่งอาจจะทำให้ตำแหน่งของเสาเข็มผิดไปจากที่ต้องการ

5. ลดความเสียหายอันอาจจะเกิดต่ออาคารข้างเคียงได้มาก

6. มีความมั่นใจในการตอกเสาเข็มคือมีความมั่นใจว่าเสาเข็มจะไม่เกิดการหักขึ้น

3.3.7 เสาเข็มไมโคร (Micro – Piles)

เป็นเสาเข็มเจาะขนาดเล็กมีขนาดระหว่าง 150 – 250 มม. ใช้ผงดินเหนียว (Bentonite) ผสมน้ำใส่ลงไปในรูเจาะเพื่อป้องกันดินพัง รับน้ำหนักส่วนใหญ่ด้วยความฝืดของผนังเสาเข็ม ท่อเหล็กที่ใช้ทำเสาเข็มไมโครจะต้องเป็นชนิดไม่มีตะเข็บ (Seamless pipe) ท่อเหล็กที่ใช้ที่มีกำลังคลาก (yield point) สูงจะประหยัดกว่าชนิดที่มีกำลังคลากต่ำ ปกติมักใช้ท่อเหล็กยาวประมาณท่อนละ 2 – 3 เมตร ปลายทั้ง 2 ข้างเป็นเกลียว ต่อกันด้วย Coupling ตัวท่อปลายของท่อนสุดท้ายทำเป็น non-return valve เพื่อใช้สำหรับการอัดน้ำปูนครั้งแรก ส่วนของท่อนเหล็กบริเวณที่จะทำ non-return valve เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. ปกติใช้ 4 รู ห่างเท่าๆ กันโดยระยะระหว่างรูแต่ละชุดประมาณ 50 ซม. สำหรับการอัดน้ำปูนครั้งที่ 2

4. ข้อกำหนดเกี่ยวกับการตอกเสาเข็ม

การจัดตำแหน่งของเสาเข็มที่จะตอก ต้องให้อยู่ในตำแหน่งที่วิศวกรกำหนด ให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน 5-10 ซม. ถ้าตอกผิดมากกว่านี้ จะเกิดแรงหนีศูนย์ขึ้น และเสาเข็มจะรับแรงโมเมนต์ดัด จะเป็นอันตรายได้ ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมงานอย่างใกล้ชิด ถ้าเป็นชนิดเข้มกลุ่มให้ตอกจากภายในมาสู่ภายนอก หรือถ้าตอกเข็มใกล้อาคารข้างเคียง ให้ตอกจากใกล้อาคารข้างเคียงก่อน แล้วค่อยตอกไล่ออกมาภายนอก เพราะปริมาตรดินที่เข็มแทนที่นั้น จะไปดันเข็มเดิม หรือเข็มที่ตอก ก็มีความสำคัญมาก การตอกเข็มต้องใช้หมอนรองรับ เช่น อาจใช้กระสอบหรือไม้ เพื่อลดแรงกระแทกจากลูกตุ้ม เมื่อตอกได้ความต้านทานที่ต้องการแล้ว ให้หยุดตอก เพราะถ้าเค้นต่อไป หัวเสาเข็มอาจเสียหายได้ เช่น ควรหยุดเมื่อผลการตอกเสาเข็มดังนี้

เสาเข็มไม้	4 – 5 ครั้ง / การจม 1 นิ้ว
เสาเข็มคอนกรีต	6 – 8 ครั้ง / การจม 1 นิ้ว
เสาเข็มเหล็ก	12 – 15 ครั้ง / การจม 1 นิ้ว

ระหว่างตอกเข็ม ต้องคอยแก้ทิศทางของเสาเข็ม ถ้าผิวหน้าไม่เรียบ เข็มอาจเปลี่ยนทิศทางได้ ถ้าระหว่างตอกเสาเข็มเปลี่ยนทิศทาง หรือตอกจมผิดปกติ เสาเข็มอาจจะหัก เสาเข็มต้นนั้นใช้ไม่ได้

การตอกเสาเข็มบริเวณดินเหนียว หรือดินตะกอน (Silt) คือดินพวกที่น้ำหนีได้ช้า เมื่อเสาเข็มแทนที่ดินทำให้แรงดันของน้ำในดิน (pore water pressure) เพิ่มขึ้น ทำให้มีกำลังดันเสาเข็มให้ลอยขึ้นมา หรือเรียกว่า เสาเข็มจะรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าปกติในช่วงแรกของการตอก ไม่มีผลเท่าไรนัก ถ้าเข็มนั้นเราออกแบบให้รับน้ำหนักแบบเสียดทาน แต่ถ้าเป็นเสาเข็มชนิดรับน้ำหนักที่ปลายจะทรุดตัวเร็วในช่วงแรก และจะเป็นข้อผิดพลาดมากถ้าเราตอกเข็ม เพื่อทำเป็นหมุดหลักฐาน ของการสำรวจค่าระดับ เว้นแต่ได้ตอกเสาเข็มต้นใกล้เคียง เสร็จเรียบร้อยแล้ว

การตอกเข็มในดินเหนียวบางชนิด ดินจะถูกรบกวนมาก ทำให้ดินรับน้ำหนักได้น้อยลง อาจทิ้งไว้หลังจากตอกเสาเข้มเสร็จแล้ว หนึ่งถึงสองเดือนหรืออาจมากกว่า จึงทำการก่อสร้างได้

4.1 การตอกเสาเข็ม

การตอกเสาเข็ม หมายถึงกรรมวิธีใดๆ ก็ตาม ที่ทำให้เข็มอยู่ใต้ดิน ณ ตำแหน่งที่เราต้องการ พร้อมที่จะรับน้ำหนักบรรทุกจากอาคารได้ วิธีการตอกเสาเข็มมีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น

1. Drop hammer เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดและยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน ประกอบด้วยปั้นจั่นตัวใหญ่พร้อมทั้งลูกตุ้มที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ ตามความต้องการโดยใช้สายลวดสลิงเป็นตัวยกลูกตุ้มให้สูงขึ้นแล้วปล่อยตกลงมาบนหัวเสาเข็มลูกตุ้มที่ต้องไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. Steam hammer ประกอบด้วยกรอบเหล็กสั้นๆ ซึ่งเป็นรางวางให้ลูกตุ้มวิ่งขึ้นวิ่งลงการบังคับลูกตุ้มบังคับด้วยการระเบิดของไอน้ำหรือแรงกดของอากาศ Steam hammer มีระยะยกคงที่ตอกรัวและเร็วทำการตอกสม่ำเสมอ มีการสั่นสะเทือนคงที่ การเสียหายเนื่องจากการตอกวิธีนี้น้อยกว่าวิธี Drop hammer

3. Water jet การตอกวิธีนี้เราต้องฝังท่อไว้ในเสาเข็ม แล้วอัดน้ำลงไปตามท่อด้วยความดันสูงไปยังปลายของเสาเข็ม แรงกดดันน้ำจะทำให้ดินรอบๆ ปลายเสาเข็มหลวม ทำให้เข็มจมลงด้วยน้ำหนักตัวมันเอง การตอกเข็มวิธีนี้ เหมาะที่จะใช้กับดินกรวดหรือทราย หรือกับเสาเข็มที่ออกแบบให้รับน้ำหนักที่ปลาย เพราะถ้าตอกบริเวณดินหนียวจะทำให้ดินเหนียวรอบๆ เสาเข็มเป็นน้ำโคลน ถ้าตอกบริเวณดินตะกอนทำให้ดินตะกอนมีลักษณะกึ่งของไหล

4. Jacking ถ้าต้องการตอกบริเวณที่มีระยะยกไม่สูงนัก หรือบริเวณที่จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนไม่ได้ เราต้องใช้ Hydraulic Jack กดเสาเข็มให้เสาเข็มจมลง

4.2 ข้อปฏิบัติในการตอกเสาเข็ม

1. จะต้องมีครอบหัวเสาเข็ม และหมอนรองรับหัวเสาเข็ม กันเสาเข็มแตก
2. การกระแทกของลูกตุ้มตอกบนหัวเสาเข็ม จะต้องลงเต็มหน้า และได้ฉากกับแกนของเสาเข็ม
3. ต้องหยุดการตอกเสาเข็มให้ทันทีก่อนที่เสาเข็มจะเสียหายเพราะ Overdriving เมื่อ

ปรากฏการณ์ในขณะตอกเสาเข็มดังต่อไปนี้

- เสาเข็มมีอาการสั่นและสะบัดใกล้ระดับผิวดิน
- ลูกตุ้มตอกเด้งขึ้นโดยเสาเข็มไม่ทรุดจมเลย
- หัวเสาเข็มแตกทั้งที่ทำการตอกตามปกติ

4. ต้องหยุดการตอกทันทีที่การทรุดตัวของเสาเข็มแสดงถึงความต้านทานการตอกสูงพอความต้องการ เมื่อผลการตอกเป็นดังนี้

- เสาเข็มไม้	4 – 5	blows	ต่อนิ้ว
- เสาเข็มคอนกรีต	6 – 8	blows	ต่อนิ้ว
- เสาเข็มเหล็ก	12 – 15	blows	ต่อนิ้ว

5. ลักษณะของเสาเข็มที่ตอกซึ่งแสดงว่าชำรุดเสียหายแล้ว มีลักษณะอาการให้เห็นดังนี้
   - การทรุดตัวของเสาเข็มขณะตอกเพิ่มขึ้นทันที หรือขึ้นๆ ลงๆ ขณะที่ลักษณะของชั้นดินไม่อำนวยให้เป็นเช่นนั้น
   - เสาเข็มเปลี่ยนทิศทางทันทีทันใด

6. ในการตอกเสาเข็มจำนวนมากๆ ภายในบริเวณที่ก่อสร้างนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งของห้องใต้ดิน เมื่อตอกเสาเข็มเสร็จใหม่ๆ แล้วไม่ควรขุดดินทันที ควรปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน ทั้งนี้เพราะดินเมื่อถูกเสาเข็มตอกจะถูกรบกวน (disturbed) ทำให้ค่า Shear Strength ของดินลดน้อยลง ซึ่งจะกลับคืนกำลังประมาณ 90 % ภายใน 30 – 50 วัน ดังนั้น หากรีบทำการขุดดินจะเกิดการเลื่อนไถลของดิน ทำให้เสาเข็มที่ตอกไว้แล้วเสียหายได้

7. การตอกเข็มกลุ่มให้ตอกเสาเข็มจากต้นกลางกลุ่มออกไป

4.3 การจัดเสาเข็มและระยะห่างของเสาเข็ม

1. เสาเข็มใต้ฐานรากจะต้องจัดเรียงสม่ำเสมอเหมือนกันทุกด้าน

2. สำหรับเสาเข็ม End Bearing Piles ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มจะต้องห่างกันอย่างน้อย 2 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับเสาเข็มกลม หรือ 2 เท่าของเส้นทแยงมุมสำหรับเสาเข็มสี่เหลี่ยม หรือเสาเข็มเหล็กแต่ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 ฟุต หรือ 75 ซม. หรือผิวต่อผิวห่างกัน 12 นิ้วฟุต หรือ 30 ซม.

3. สำหรับเสาเข็ม Friction Piles ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มจะต้องห่างกันอย่างน้อย 3 – 5 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือ 3 ฟุต 6 นิ้ว (1.00 ม.)

4. เสาเข็มสำหรับโครงสร้างในทะเลที่รับคลื่นกระแทกจะต้องห่างกันอย่างน้อย 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง

4.4 ความลึกของเสาเข็มที่จมดิน

1. เสาเข็มจะต้องตอกให้จมดินไม่น้อยกว่า 3 เมตร (10 ฟุต) ในชั้นดินแข็ง และไม่น้อยกว่า 1 ใน 3 ของ ความยาวของเสาเข็ม หรือ 6 เมตร (20 ฟุต) ในชั้นดินอ่อน

2. สำหรับเสาเข็ม Friction Piles ตอกลงในชั้นดินประเภทต่าง ๆ กัน ซึ่งคาดว่าจะตอกจมลงไปได้นั้น ได้แสดงไว้ในตารางข้างล่าง

ชั้นวัสดุ	**ความลึกที่คาดว่าจะตอกจมลงได้**			**หมายเหตุ**
ทรายสะอาดแน่น	เล็กน้อย			ปกติใช้น้ำฉีด
ทรายอื่น ๆ	20 ฟุต	หรือ	6 เมตร	
ดินปนทราย	30 ฟุต	“	9 เมตร	
ดินล้วน ๆ	35 ฟุต	“	10 เมตร	
ดินปนซิลท์	45 ฟุต	“	13.50 เมตร	
ซิลท์ปนโคลน	50 – 100 ฟุต	“	15 - 30 เมตร	

4.5 การใช้น้ำฉีดให้เสาเข็มจมลงในดิน

การใช้น้ำฉีดช่วยในขณะตอกเสาเข็มเพื่อให้เสาเข็มจมลงไปนั้นจะใช้ในดินทรายร่วน, จะไม่ดีนักเมื่อเป็นกรวดเพราะน้ำไล่ไม่ค่อยขึ้น และไม่ควรใช้ในดินประเภทซิลท์ ส่วนในดินเหนียวใช้ไม่ได้ผล

น้ำที่ฉีดจะฉีดออกที่ปลายเสาเข็มโดย ใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ถึง 3 นิ้ว ตรงปลายมีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 -2 นิ้ว สำหรับเสาเข็ม ขนาด 10 ถึง 14 นิ้ว (25 – 35 ซม.) จะใช้ปริมาณน้ำ 15 -60 ลิตรต่อวินาที (200 – 850 แกลลอน ต่อนาที) สำหรับ Fine sand through sandy gravels ปั๊มน้ำจะต้องมี capacity ประมาณ 500 แกลลอน ต่อนาที ที่แรงดัน 100 – 300 ปอนด์ ต่อ ตร.นิ้ว การฉีดน้ำจะต้องหยุด เมื่อเข็มจมลงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้โดยทั่วไปควรเหลือระยะประมาณ 1.00 เมตร เพื่อใช้วิธีตอกลงไป, เสาเข็มต้นข้างเคียง หากกระทบกระเทือนจากการฉีดน้ำแล้ว เสาเข็มต้นนั้น ๆ จะต้องตอกซ้ำลงไปอีก

4.6 เสาเข็มเอียง

ในการตอกเสาเข็มเอียงนั้น ทั่วไปแล้วจะตอกเอียง 1 : 12 ถึง 5 : 12 ถ้าตอกเอียงเกิน 3 : 12 (1:4) แล้วจะต้องใช้เครื่องมือตอกพิเศษ

การตอกเสาเข็มเอียงนั้น มีประโยชน์สำหรับต้านแรงในแนวราบแต่ยุ่งยากในด้านปฏิบัติ

4.7 เสาเข็มรับแรงถอน

1. เสาเข็มที่รับแรงถอนนั้น เหล็กหัวเสาเข็มจะต้องโผล่ฝังเข้าไปในฐานรากอย่างน้อย 60 ซม.

2. Friction Piles ในดินเหนียว ทรายหรือกรวดค่าแรงถอนที่ปลอดภัยจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าปลอดภัยที่เสาเข็มนั้นจะรับได้

3. End – Bearing Piles ค่าแรงถอนโดยปลอดภัยคำนวณได้จากค่าเนื้อที่ผิวสัมผัสรอบนอก x หน่วย แรงเฉือนของวัสดุที่เสาเข็มนั้นจมอยู่ สำหรับทรายแล้วค่าหน่วยแรงเฉือนให้ใช้ค่า 250 ปอนด์ ต่อ ตร.ฟุต (1.2 t/m^2)

4.8 เสาเข็มสั้น Friction Piles ในกรุงเทพฯ

จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มสั้น ค.ส.ล. ยาวประมาณ 10 เมตร ของเสาเข็มรูปต่าง ๆ กัน 6 แบบ คือเสาเข็มรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปดีเอช รูปกลม รูปตัววาย และรูป 8 เหลี่ยม โดยวิธีการ Maintain Loading Test เพิ่มน้ำหนักทุก ๆ 2 เมตริกตัน จนถึงจุด (Ultimate load) วิบัติ และหลังจากนั้นทำการ Quick Test อีกครึ่งหนึ่ง ได้ผลสรุปดังนี้

1. เสาเข็มสั้นทุกต้นจะถึงจุดวิบัติทันทีเมื่อค่าความฝืดด้านข้างมีค่าสูงสุด
2. ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มสั้นที่จุดวิบัติมีค่าประมาณ 4.4 -5.5 มม. (Maintain Loading Test) เฉลี่ยประมาณ 5 มม.
3. ค่าน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มสั้นควรใช้เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม (F.S =2)
4. ในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มอาจใช้การทดลองแบบ Quick Test ได้ เพราะให้ผลใกล้เคียงกับ Maintain Load test ถ้าหากว่าค่าการทรุดตัวไม่มีผลต่อโครงสร้างมาก
5. ในการคิดค้นค่าเส้นรอบรูปของเสาข็ม ควรใช้เส้นรอบรูปประสิทธิผล สำหรับเสาเข็มที่มีหน้าตัดเป็นรูปเรขาคณิตง่าย ๆ หรือที่มีเส้นรอบรูปเรียบสม่ำเสมอตลอด อาทิเช่น รูปสี่เหลี่ยม แปดเหลี่ยม วงกลม สามเหลี่ยม มีค่า Reduction Factor = 1 เสาเข็มที่มีหน้าตัดไม่ใช่รูปทรงเรขาคณิตง่าย ๆ อาทิเช่น รูปตัวไอ รูปดีเฮช และ รูปตัววาย มีค่า Reduction Factor = 0.86 ยกเว้นเสาเข็มรูปตัววายมีค่าเท่ากับ 1
6. เส้นรอบรูปประสิทธิผล Reduction Factor x เส้นรอบรูปน้อยสุด

4.9 Negative Skin Friction ของเสาเข็ม

1. Negative Skin Friction คือแรงฉุดลง (Downward Drag) ที่กระทำต่อเสาเข็มเนื่องจากการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในที่ที่ดินเป็น Compressible Soil ซึ่งได้แก่ Soft to Medium Clay, Soft silt, Peat และ Mud หรือในที่ที่ดินถมใหม่ เมื่อดินเหล่านั้นเกิดการยุบตัวจะเกิด Negative Skin Friction ซึ่งเป็นการเพิ่ม Axial Load แก่เสาเข็มทำให้เสาเข็มทรุดตัวมากขึ้น ทำให้อาหารเสียหายได้ ระดับน้ำใต้ดินที่ลดลง ก็ทำให้เกิด Negative skin Friction ได้เช่นกัน
2. สาเหตุใหญ่ที่ทำให้เกิด Negative Skin Friction ก็คือ
   - การทรุดตัวของชั้นดินถมใหม่โดยรอบเสาเข็ม
   - การทรุดตัวของดินเนื่องจากดินถูกรบกวน (Disturbed)
   - ระดับน้ำใต้ดินลดลง
3. การลดค่า Negative Skin Friction บนเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จหรือเสาเข็มเหล็ก กลม กลวง สามารถลดลงได้โดยการทำลำตัวเสาเข็มส่วนที่จมอยู่ในดินถมด้วย soft Bitumen ซึ่งต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

   Penetration at 25 ^{o}C = 53 to 70 mm.

Soft Point (R and B) = 57°C to 63 °C

Penetration Index = Less than + 2

Bitumen จะต้องทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 180°ซ (Max) แล้วพ่นหรือเทลาดเสาเข็ม ความหนาของ Coating 10 มม. หรือ 3/8 นิ้ว ก่อน Coating จะต้องทำความสะอาดผิวหน้าเสาเข็มและทาทับหน้า (Prime) ด้วย Shell Composites Bitumen Solvent Primer โดยใช้แปลงทาหรือพ่นในอัตราประมาณ 2 กก. ต่อ 10 ตร.เมตร

เมื่อต้องการให้ได้รับ Full End – Bearing Resistance แล้วปลายล่างสุดของเสาเข็ม ยาวประมาณ 10 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือความกว้างของเสาเข็มไม่ต้อง Coating ถ้า Coating ด้วยแล้วจะทำให้ค่า End – Bearing Resistance ลดลง

การใช้ Bitumen ดังกล่าว Coat เสาเข็มหนา 1 ซม. นั้น สามารถลด Negative Skin Friction ได้มากกว่า 90%

4.10 เสาเข็มรับแรงในแนวราบ

1. ถ้าแรงรวมกระทำเอียงเป็นมุมมากกว่า 5 องศา แต่ไม่เกิน 15 องศา กับแนวดิ่งแล้วจะต้องใช้เสาเข็มเอียงรับแรงในแนวราบ

ถ้ามุมเอียงไม่เกิน 5 องศา แล้วควรใช้ Vertical Pile แต่ถ้ามุมเอียงเกินกว่า 15 องศา แล้วควรใช้เสาเข็มแบบ Dead Man

2. เมื่อไม่มีการทดสอบ และไม่คำนึงถึงประเภทเสาเข็ม หรือดินที่เสาเข็มตอกแล้ว Vertical Pile ยอมให้รับแรงในแนวราบได้ 1,000 ปอนด์ (500 กก.)

3. Menulty (1956) ได้แนะนำค่าแรงในแนวราบที่เสาเข็ม Vertical Pile รับได้โดยปลอดภัยไว้ดังนี้

	แรงที่เสาเข็ม Vertical Pile รับได้โดยปลอดภัย (ปอนด์)				
ประเภท		ขนาดเส้น			
ของเสาเข็ม	สภาพของ	ผ่าศูนย์กลาง	ทราย	ทราย	ดินแน่น
	เสาเข็ม	ของเสาเข็ม	หยาบ	ละเอียด	ปานกลาง
		(นิ้ว)			
ไม้	ปลายอิสระ	12	1,500	1,500	1,500
	ปลายยึดแน่น*	12	5,000	4,500	4,000
คอนกรีต	ปลายอิสระ	16	7,000	5,500	5,000
	ปลายยึดแน่น*	16	7,000	5,500	5,000

* ปลายยึดแน่น หมายถึง เสาเข็มที่มีเหล็กหัวเสาเข็มฝังยึดในคอนกรีตฐานรากอย่างน้อย 24 นิ้วฟุต (60 ซม.)

4. จากผลการทดสอบของ vertical Pile ที่ Full Embedded นั้นเสาเข็มจะสามารถรับแรงในแนวราบได้เพียง 1/10 ถึง 1/5 ของความสามารถรับน้ำหนักในแนวดิ่งของมันโดย Deflection ไม่มากกว่า 1/2 นิ้วฟุต (12.5 มม.)

4.11 น้ำหนักของลูกตุ้มตอกสำหรับเสาเข็ม ค.ส.ล. และเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

1. น้ำหนักมากสุดของลูกตุ้มตอก (Milligan)

$$W_{max} = \frac{0.0764A\sqrt{B}}{h}$$

ในเมื่อ W_{max} = น้ำหนักมากสุดของลูกตุ้มตอก , เมตริกตัน

A = เนื้อที่หนักกว้างของเสาเข็ม , ตร.ซม.

B = หน้ากว้างของเสาเข็ม , ซม.

h = ระยะตกของลูกตุ้มตอก , ซม.

2. น้ำหนักน้อยสุดของลูกตุ้มตอก (Humes)

ความยาวของเสาเข็ม	**W_{min}**
(เมตร)	**(เมตริกตัน)**
15	P
15 - 18	3/4 P
มากกว่า 18	2/3 P
P = น้ำหนักของเสาเข็ม	

3. น้ำหนักของลูกตุ้มตอกนั้นควรสัมพันธ์กับน้ำหนักของเสาเข็ม กล่าวคือหนัก 1 - 2 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม

4. CP 2004 กำหนดไว้ว่า น้ำหนักของลูกตุ้มตอกจะต้องหนักพอที่แน่ใจว่าสามารถตอกเสาเข็มจมสุดท้ายได้ประมาณ 2.5 มม. (1/10 นิ้วฟุต) ต่อครั้ง และไม่ควรจะหนักน้อยกว่าเสาเข็ม

Swedish Code กำหนดอย่างน้อย 3 ต้น แต่น้ำหนักตุ้มตอกอาจใช้ 2 ตันได้ ถ้าเสาเข็มยาวไม่เกิน 10 เมตร และรับน้ำหนักมากสุด 45 ตัน สำหรับเสาเข็มยาวใน Compact Material แล้วควรใช้ลูกตุ้มตอกหนัก 4 ตัน

5. ระยะยกของลูกตุ้มตอก

สำหรับ Drop Hammer ระยะสูงของการยกลูกตุ้มตอกควรยกต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะเริ่มตอกในระยะที่เสาเข็มจมง่าย ทั้งนี้เพื่อป้องกันหัวเสาเข็มช้ำ , โดยทั่วไปแล้วจะยกลูกตุ้มตอกสูงประมาณ 3 ฟุต (90 ซม.) และไม่ควรเกิน (2.40 เมตร) 8 ฟุต

4.12 สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก (Dynamics Pile Driving Formula)

. Engineering News Formula (แนะนำให้ใช้ F.S. = 4)

$$Q_u = \frac{Wh}{S + 2.54C}$$

Q_U = Ultimate bearing capacity เป็นต้น

W = น้ำหนักของลูกตุ้มเป็นต้น

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็น ซม.

S = ระยะที่เสาเข็มจมเป็นเซ็นติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

C = 0.9 สำหรับลูกตุ้มปล่อย (drop hammer)

F.S. = Factor safety

. Hiley's Formula* (แนะนำให้ใช้ F.S. = 4)

$$Q_u = \frac{eWhZ}{S + C/2}$$

Q_U = Ultimate bearing capacity เป็นตัน

$$e = \text{Efficiency factor} = \frac{W + Pr^2}{W + P}$$

W = น้ำหนักของลูกตุ้มเป็นตัน

P = น้ำหนักของเสาเข็มเป็นตัน

r = Coefficient of restitution = 0.25
ในกรณีที่เสาเข็มคอนกรีตถูกตอกด้วยลูกตุ้มปล่อยรองด้วยกระสอบ

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็นเซ็นติเมตร

Z = Equipment Loss Factor
= 1 สำหรับ Falling hammer

= 0.80 Drop hammer with Friction winch

S = ระยะที่เสาเข็มจมเป็นเซ็นติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

C = Temporary Compression = $C_1+C_2+C_3$

C_1 = การยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L_2 (ม.)

$$=1.8\frac{Q_u L_2}{A} \quad \text{ซม.}$$

C_2 = การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยาว L (ม.)

$$=0.72\frac{Q_u L_2}{A} \quad \text{ซม.}$$

. Janbu's Formula (แนะนำให้ใช้ F.S. = 4)

$$Q_u = \frac{Wh}{K_u S}$$

$$K_u = C_d\left[1+\sqrt{1+\frac{\lambda}{C_d}}\right]$$

$$C_d = 0.75 + 0.15\frac{P}{W}$$

$$\lambda = \frac{WhL}{AES^2}$$

W = น้ำหนักของลูกตุ้มเป็นตัน

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็นเซ็นติเมตร

P = น้ำหนักของเสาเข็มเป็นตัน

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม, เป็นตารางเซ็นติเมตร

S = ระยะที่เสาเข็มจมเป็นเซ็นติเมตร โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

E = พิกัดยืดเป็นตัน/ซม^2

L = ความยาวของเสาเข็มเป็นเซ็นติเมตร

Load Bearing Capacity (แนะนำให้ใช้ F.S. = 5)

$$Qu = \frac{a}{S + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}}$$

เมื่อ a = กำลังงานจากการตอกที่หัวเข็ม = eWh

e = 1 สำหรับ falling hammer

= 0.8 สำหรับ drop hammer with friction Winch

b = $\frac{L}{AE}$ = พลังงานที่สูญเสียไปในตัวเสาเข็ม

W = น้ำหนักของลูกตุ้มเป็นตัน

P = น้ำหนักของเสาเข็มเป็นตัน

L = ความยาวของเสาเข็มเป็นเซ็นติเมตร.

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีต เสริมเหล็กเป็นตารางเซ็นติเมตร

E = พิกัดยืดเป็นตัน/ซม.^{2}

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็นเซ็นติเมตร

Qu = Ultimate bearing capacity เป็นต้น

S = ระยะที่เสาเข็ม จมเป็นเซ็นติเมตร/ครั้ง โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

. Gates formula (แนะนำให้ใช้ F.S = 3)

$$p_u = a\sqrt{e_h E_h (b - \log s)}$$

P_U = kips or kN E_h = kips ft or kN m

	s	a	b
Fps	in	27	1.0
SI	mm	104.5	2.4

e_h = 0.75 for drop and 0.85 for all other hammers

P_U = Ultimate pile capacity

e_h = hammer efficiency

E_h = manufacturer's hammer – energy rating

S = ระยะที่เสาเข็มจม (amount of point penetration per blow)

ฉ. Danish formula (แนะนำให้ใช้ F.S. = 3 ถึง 6)

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + C_1} \qquad C_1 = \sqrt{\frac{e_h E_h L}{2AE}} \text{ (units of s)}$$

L = ความยาวของเสาเข็ม

4.13 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกนั้นเป็นสูตรที่วิเคราะห์เชิงสถิติอาจไม่ถูกต้องตรงกับความเป็นจริง ดังนั้น ผู้ใช้สูตรเหล่านี้ในการคำนวณจึงควรมีข้อพิจารณา ดังนี้

1. สูตรการตอกเสาเข็มเพื่อใช้ประเมินค่าว่าเสาเข็มที่ตอกนั้นจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่าใดนั้น มีอยู่หลายสูตร ซึ่งให้ผลแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกใช้จะต้องเลือกสูตรที่ให้ค่าถูกต้องใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักจริงที่เสาเข็มต้นนั้นสามารถรับได้

2. สูตรต่าง ๆ ที่ตอกด้วยเครื่องจักรนั้น จะให้ค่าผิดไปมาก หากดินเป็น ดินเหนียว จึงไม่ควรใช้สูตรเหล่านี้ในสภาพดินดังกล่าว นอกจากจะได้ปรับแก้แล้วโดยผู้ชำนาญการ

3. สูตรต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ทั่วไปนั้นเป็นสูตรสำหรับ End Bearing Pile จริง ๆ กล่าวคือ ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่บนชั้นลูกรังหรือชั้นหิน ดินดาล หรือในสภาพที่เสาเข็มตอกไม่ลงจริง ๆ ในสภาพดังกล่าวนี้ สูตรของ Janbu จะให้ผลดีที่สุด ส่วนสูตรของ Hiley ให้ผลดี

4. จากผลการทดลองเสาเข็มจำนวน 88 ต้นของ Michigan State Highway Commission (1965) ได้แสดงให้เห็นว่าสูตรของ Gate เหมาะสมมากสำหรับน้ำหนักสูงสุดไม่เกิน 400 Kips (ประมาณ 200 เมตริกตัน) Olson และ Flaate (1967) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติของเสาเข็มจำนวน 93 ตัน สรุปได้ว่าสูตรการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมที่จะใช้ได้แก่สูตรของ Hiley, Janbu และ Gate

5. เนื่องจากชั้นดินในกรุงเทพฯ และบริเวณจังหวัดข้างเคียงไม่เหมาะสมที่จะใช้สูตรการตอกเข็ม เนื่องจากให้ค่าต่างมากจากความเป็นจริงที่เสาเข็มนั้นจะรับได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์-มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิเคราะห์สูตรการตอกเสาเข็ม โดยการหาว่าสูตรใดจะให้ค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักจริงที่ได้จากการ load test จน failure ปรากฏว่าทุกสูตรให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- สำหรับเสาเข็มรูป DH สูตรที่ให้ผลดีคือสูตรของ Gate Hiley, Engineering News และ So ซึ่งสูตรของ Gate ให้ค่าใกล้เคียงที่สุดคือต่ำกว่าความเป็นจริง 1.63 เท่า
- สำหรับเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สูตรที่ให้ผลดีคือสูตรของ Janbu, Hiley, So และ Modified Eng News ซึ่งสูตรของ Janbu ให้ค่าใกล้เคียงที่สุดคือต่ำกว่าความเป็นจริง 1.54 เท่า
- สำหรับเสาเข็มรูปตัวไอ แนะนำให้ใช้สูตรของ Gate

6. จากข้อมูลดังกล่าวพอจะสรุปได้ดังนี้

6.1 ในกรณีที่เสาเข็มตอกไม่ลงจริง ๆ หรือเป็น End Bearing Pile จริง ๆ แล้ว สูตรที่ควรใช้คือสูตรของ Janbu หรือสูตรของ Gate เมื่อน้ำหนักสูงสุดไม่เกิน 200 เมตริกตัน

6.2 ในกรณีที่เสาเข็มตอกลงและตอกอยู่ในบริเวณกรุงเทพฯ และจังหวัดข้างเคียง ความยาวของเสาเข็มที่ตอกลงไปประมาณ 20 เมตร จากผิวดินแล้ว ถ้าเป็นเสาเข็มรูป DH หรือรูปตัวไอ ควรใช้สูตรของ Gate ที่ได้ปรับแก้แล้วโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ ถ้าเป็นเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ควรใช้สูตรของ Janbu ที่ได้ปรับแก้แล้วซึ่งมีสูตรดังนี้

- Modified Gate Formula

$$R_u = \sqrt{W_r.h}\left(44.6\log {}^{t}\!/_{s} + 8.22\right)$$

ใช้สำหรับเสาเข็มรูป DH หรือ รูปตัวไอ

- Modified Janbu Formular

$$R_u = \frac{2.14W_r.h}{Ku.s + \frac{1}{2}\sqrt{ab}}$$

ใช้สำหรับเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในเมื่อ R_U = น้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม, เมตริกตัน

W_r = น้ำหนักของลูกตุ้มตอก, เมตริกตัน

h = ระยะของลูกตุ้มตอก, เมตร

t = ด้านแคบของหน้าตัดเสาเข็ม, เมตร

s = ระยะจมเฉลี่ยของเสาเข็ม, เมตรต่อครั้ง

$$K_u = C_d\left[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}}\right]$$

$$C_d = 0.75 + 0.15\frac{W_P}{W_r}$$

W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม, เมตริกตัน

$$\lambda = \frac{W_r.h.L}{A.E.s^2}$$

E = Mod. Of E = 1.8×10^6 เมตริกตัน/ตร.ม.

L = ความยาวของเสาเข็ม, เมตร

a = $e.W_r h$: (e = 0.80)

b = L/A.E.

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็ม, ตร.เมตร

7. สำหรับเสาเข็มตอกในบริเวณกรุงเทพฯ และจังหวัดข้างเคียง (ยกเว้นจังหวัดสมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม และฉะเชิงเทรา) นั้น สามารถจะหาค่าน้ำหนักพิบัติที่เสาเข็มนั้นจะสามารถรับได้โดยอาศัยความเสียดทานของดินโดยรอบ เสาเข็มและแรงแบกทานตรงปลายเสาเข็ม ดร.ชัย มุกตพันธุ์

ได้เสนอสูตรดังกล่าวนี้ไว้ (ดูรายละเอียดใน) ซึ่งจัดว่าเป็นที่เหมาะสมสูตรหนึ่ง เมื่อไม่ใช้สูตรตอกเสาเข็ม

8. เสาเข็มที่ตอกในดินเหนียว นั้นค่า Safe load อาจหาได้จากสูตรของ Faber's Formula

$$P_a = \frac{W.\left(H - d/7\right)}{F.\left(\frac{1}{n} + 0.8H\right)} + \frac{a_2.A_s}{20}$$

ในเมื่อ	P_a	=	Safe load, KN. หรือ tons
	W	=	น.น.ของลูกตุ้มตอก, KN. หรือ tons
	H	=	ระยะของลูกตุ้มตอก, มม. หรือ นิ้ว
	d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางหรือด้านของเสาเข็ม, มม. หรือ นิ้ว
	A_S	=	เนื้อที่ของด้านของเสาเข็มที่จมในดิน, ตร.ม. หรือ ตร.ฟุต
	n	=	จำนวนครั้งที่ตอกจมครั้งสุดท้าย (ครั้งต่อ มม. หรือต่อนิ้ว)
	a_2	=	1 เมื่อเป็น Imperial unit
		=	107.3 เมื่อเป็น SI unit
	F	=	ส่วนปลอดภัย (1.5 ถึง 2.5)

4.14 ผลกระทบจากการตอกเสาเข็ม

ก. การตอกเสาเข็มในดินเหนียว (Cohesive Soil) เกิดผลกระทบดังนี้

1) เกิดปริมาตรเสาเข็มแทนที่ (Pile Volume displacement) ทำให้ดินบริเวณพื้น 2-5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเสียรูป (remold) และ pore pressure มีค่าเพิ่มขึ้นและจะกลับคืนประมาณ 30 วัน ค่า Shear Strength และ Skin resistance ในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ Consolidation เมื่อ pore pressure ลดลง

2) เมื่อเสาเข็มตอกผ่านชั้นกรวด ไปยัง ชั้นดินเหนียว เข็มจะพาเอากรวดเข้าไปในดินเหนียวลึกประมาณ 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งจะเพิ่มค่า Skin friction

3) เสาเข็มเมื่อตอกผ่านชั้นดินเหนียวแข็ง ที่อยู่ด้านใต้ของชั้น ดินเหนียวย่อย ชั้นดินเหนียวแข็งจะแตกและดินเหนียวย่อยจะเข้าไปในรอยร้าว เนื่องจากการตอกระหว่างเสาเข็มในความลึกประมาณ 20 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ผลกระทบนี้ไม่ร้ายแรง เพราะดินอัดเข้าไปในรอยแตก ซึ่งจะให้ค่า adhesion สูงกว่า ดินเหนียวย่อย ข้างบน

4) เสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งจะเกิดรอยแตกที่ผิวหน้าและด้านข้างของเสาเข็ม ลึกประมาณ 20 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ทำให้ค่า adhesion ในช่วงนี้ไม่มี ปกติแล้วในความลึก 1.2-1.8 เมตร จากหัวเสาเข็มจะไม่คิดค่า Skin resistance capacity

5) เมื่อตอกเสาเข็มลงในดินเหนียวโดยทั่วไปจะทำให้เกิดการปูดของผิวดิน (Heave) หรือเกิดการแทนที่ การปูดขึ้นของดินหากเป็น plastic Soil แล้วอาจสูงขึ้นเป็นฟุตได้ การปูดของดินนี้อาจจะทำให้เกิดการทรุดตัวติดตามมาก็ได้ หลังจากตอกเสาเข็มเสร็จแล้ว เสาเข็มที่ถูกยกตัวลอยขึ้น เพราะการปูดของดินจะต้องตอกย้ำลงไป และเพื่อเป็นการป้องกันการปูดของดินการตอกเสาเข็มควรเริ่มตอกบริเวณกึ่งกลางออกไปยังริมบริเวณก่อสร้าง

ในประเทศไทยผลการตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียวบริเวณกรุงเทพ จะเกิดผลกระทบพอสรุปได้ดังนี้

1) การสั่นสะเทือนของการตอกเข็มทำให้กำลังของดินเสียไปประมาณ 28% ของ Undisturbed Strength ซึ่งวัดโดย field vane test

2) ระยะที่กระทบกระเทือนต่อ Undrain Shear Strength นั้น ห่างจากผิวเสาเข็มโดยประมาณเท่ากับระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

3) กำลังของดินที่เสียไปจะกลับคืนมา หลังจากการตอกเสาเข็มแล้ว 14 วัน

4) Induced pore pressure จะมีค่าสูงสุดภายในบริเวณ local Shear failure Zone

5) โดยส่วนใหญ่แล้ว excess pore pressure จะกระจายออกไปหมดภายใน 1 เดือน หลังจากที่ตอกเข็มแล้ว

(ข) การตอกเสาเข็มในทราย

การตอกเสาเข็มในทรายแล้วจะเกิดผลต่าง ๆ ดังนี้

1) การทรุดตัวลง (Subsidence) แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มในบริเวณที่เป็นดินทรายหลวม ๆ จะทำให้ทรายเกิดการแน่นตัว ทำให้บริเวณข้างเคียงเกิดการทรุดตัวลง สิ่งก่อสร้างในบริเวณนั้นจะเสียหาย ในทรายละเอียด หรือ Silt ที่ saturated แรงสะเทือนอาจจะทำให้เกิดการทรุดตัวเสียหายอย่างมากมายได้

2) การแน่นตัว (Compaction) เมื่อตอกเสาเข็มเดี่ยวใน loose Sand (relative density D_r = 17%) ทรายที่อยู่ห่างจากด้านข้างของเสาเข็ม ประมาณ 3 ถึง 3 เท่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม และระยะห่างใต้ปลายเสาเข็ม ประมาณ 2.5 – 3.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจะแน่นตัว ใน medium dense Sand (D_r = 3.5%) ทรายที่อยู่ห่างจากด้านข้างของเสาเข็มประมาณ 4.5 – 5.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มและระยะห่างใต้ปลายเสาเข็ม ประมาณ 3.0 - 4.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจะแน่นตัวเนื่องจากเสาเข็มจมแทนที่ลงไป เมื่อตอกเสาเข็มกลุ่มใน loose Sand ทรายรอบ ๆ และระหว่างเสาเข็มจะแน่นตัวมาก ถ้าระยะห่างของเสาเข็มห่างไม่มาก (น้อยกว่าประมาณ 6 เท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม) ค่า Ultimate load capacity ของกลุ่มเข็มจะต้องมีค่ามากกว่าผลรวมของเสาเข็มแต่ละต้นรับได้ (i.e efficiency ของกลุ่มเข็มจะต้องมีค่ามากกว่า 1) แต่ถ้าตอกใน dense Sand แล้วการตอกจะทำให้ทรายหลวมตัวมากกว่าแน่นตัวขึ้น group efficiency อาจมีค่าน้อยกว่า 1

5. เสาเข็มกลุ่ม

เมื่อตอกเสาเข็มเป็นกลุ่มแล้ว ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก Stress overlap กัน หากจะไม่ให้ Stress overlap กันแล้วจะต้องตอกเสาเข็มแต่ละต้นห่างกันมาก ซึ่งในทางปฏิบัติไม่กระทำกัน เพราะ Pile cap จะโตทำให้ค่าก่อสร้างสูง ดังนั้น เมื่อมีการตอกเสาเข็มมีระยะห่างตามที่ได้กำหนดไว้ข้างบนแล้ว จะต้องทำการ check effect ของกลุ่มด้วย เว้นแต่ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่บนชั้นหิน

การลดกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มนั้นหาได้จากสูตรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) Converse Labarre Method

$$E = \frac{1+\phi(n-1)m+(m-1)n}{90m.n}$$

ในเมื่อ E = ประสิทธิภาพของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเข็ม

m = จำนวนแถวของกลุ่มเข็ม

n = จำนวนเข็มในแต่ละแถว

ø = d/s มีค่าเป็นองศา

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม

s = ระยะห่างของศูนย์กลางของเสาเข็ม

ค่า E นี้อาจหาโดยตรงจาก กราฟ

2) Feld Method วิธีนี้ลดกำลังของเสาเข็มลง 1/16 ของเข็มเดี่ยวต่อจำนวนเส้นที่ลากจากเข็มต้นหนึ่งไปยังเข็มใกล้เคียงในกลุ่ม ซึ่งมีผลสรุปดังนี้

จำนวนสาเข็ม (ต้น)	2	3	4	5	6	9
E (%)	94	87	82	80	77	72

3) Keriselos Method

ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางองเสาเข็ม คิดเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง	E
10	1.0
8	0.95
6	0.90
5	0.85
4	0.75
3	0.65
2.5	0.55

4) Sowers ได้กำหนดระยะห่างของเสาเข็มยาวใน clay และ Group Efficiency ไว้ดังนี้

ระยะห่าง $So = 1.1 + 0.4n^{0.4}$

$$E = 0.5 + \frac{0.4}{(n - 0.9)^{0.1}}$$

ในเมื่อ n จำนวนเข็มทั้งหมด

ปกติแล้วใน Clay ระยะห่างของเสาเข็มศูนย์ถึงศูนย์ประมาณ 2 – 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มส่วนใน Cohesionless Soil จะห่าง 2.5 – 4 เท่า

3. ความสามารถในการรับน้ำหนักของกลุ่มเข็ม จะมีค่าเท่ากับจำนวนเสาเข็มทั้งหมด x น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับได้ x E

6. คำนวณน้ำหนักบรรทุกจากคุณสมบัติของดิน (Static pile formula)

6.1 เสาเข็มที่ลอยอยู่ในชั้นดินอ่อน (Friction Pile)

การคำนวณเพื่อหาน้ำหนักบรรทุก ควรคำนวณเปรียบเทียบระหว่างแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มแต่รวมกันกับแรงต้านของเสาเข็มกลุ่ม (Pile group) ค่าใดน้อยกว่าให้ถือค่านั้นเป็นแรงต้านที่เสาเข็มชุดนั้นสามารถรับน้ำหนักได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของเสาเข็ม การคำนวณค่าทั้งสองเป็นดังต่อไปนี้ .-

. แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มแต่ละต้นรวมกัน = $n.\ A_P.\ C_a$ ……. (2) (แรงเสียดทานสูงสุด)

เมื่อ n = จำนวนเสาเข็มในกลุ่ม

A_p = พื้นที่ผิวส่วนที่ฝังอยู่ในดินของเสาเข็ม 1 ต้น

C_a = adhesion ระหว่างดินกับเสาเข็ม = oc c. (เสาเข็มคอนกรีต ค่า c_a มีค่าประมาณร้อยละ 90 ของ ค่า cohesion ของดิน, ส่วนเสาเข็มเหล็กคิดประมาณร้อยละ 80 ของ cohesion ของดินในช่วงที่เป็นดินอ่อน หรือจะดูค่า adhesion factor ของเสาเข็มคอนกรีตได้จาก curve ในรูปที่ 4) ส่วนปลอดภัยให้ใช้ $\geq$ 8

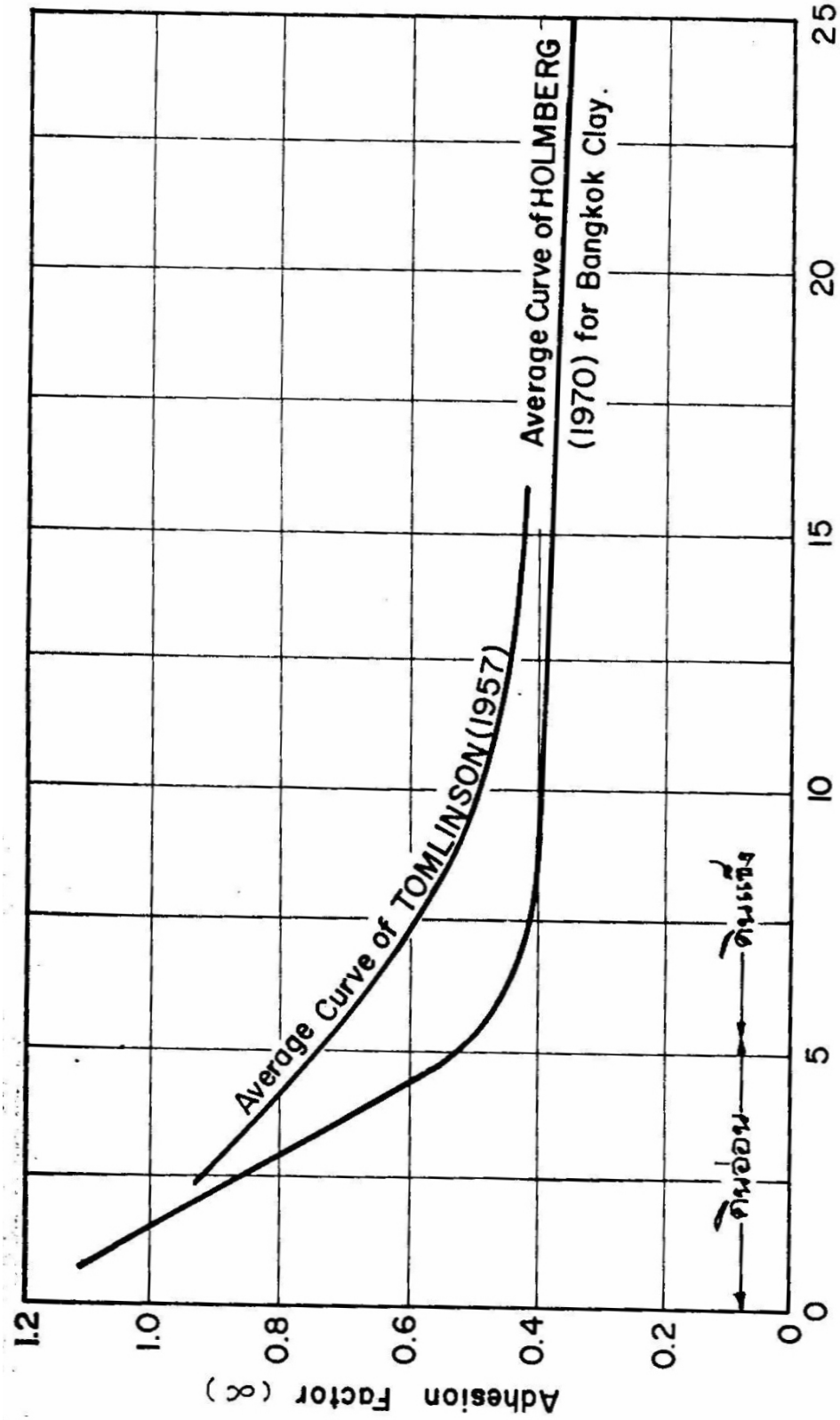
α = adhesion factor

ข. แรงต้าน (สูงสุด) ของเสาเข็มกลุ่ม = $c.L.P. + N_{c.}\ c.\ A_g$ …….(8)

เมื่อ c = แรงเฉือน (shear strength) หรือแรงเกาะกันของดิน (cohesion) ได้จากการเจาะสำรวจเป็นตัน/ม

L = ความยาวของส่วนที่ฝังในดินของเสาเข็ม (รวมความหนาของฐานรากด้วย

p = เส้นรอบรูปของกลุ่มเสาเข็ม = 2 (F + B)

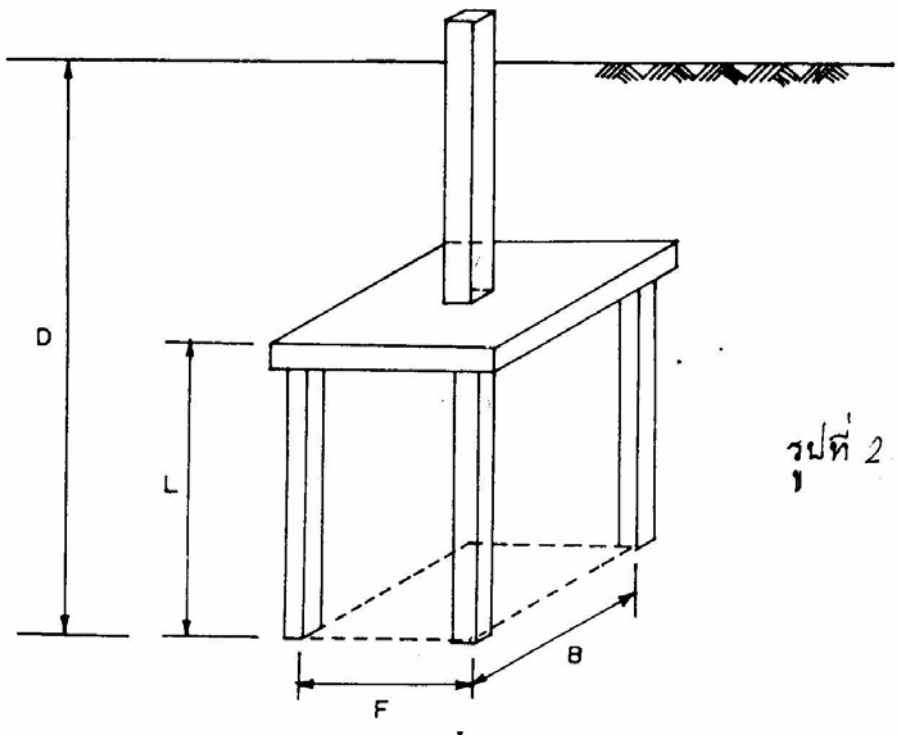


Undrained Shear Strength , c, tons / m.^{2}

รูปที่ 1. Adhesion Factors for Clays $C_a = \propto C$

A_g = พื้นที่ของกลุ่มเสาเข็ม (= F.B.)

N'_c = ค่าสัมประสิทธิการรับน้ำหนัก ดูได้จากตารางที่ 2. ส่วนปลอดภัยควรใช้ไม่น้อยกว่า 3



รูปที่ 2

ตารางที่ 1

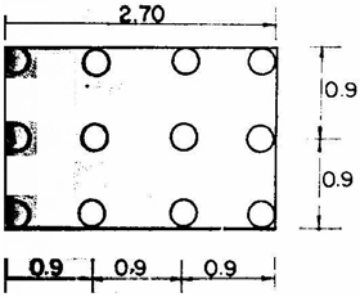
D / B	N'_c	
	กลุ่มเข็มกลมหรือสี่เหลี่ยมจตุรัส	กลุ่มเข็มสี่เหลี่ยมผืนผ้า
1	7.8	6.4
2	8.4	7
3	8.8	7.8
4	8.9	7.5
5	8.9	7.5

F = ความยาวของหน้าตัด, B = ความกว้างของหน้าตัด,

D = ความลึกของปลายเข็มจากผิวดิน

ตัวอย่างการคำนวณ 1

จงหา น.น. บรรทุกทุกส่วนปลอดภัยของเข็มกลุ่มบนดินอ่อน โดยกำหนดให้



L	=	ความยาวของเสาเข็ม 8.0 ม.
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม 80 ซม.
q_u	=	Unconfined Compressive Strength 5.0 ตัน / ม.^{2}
n	=	จำนวนเข็ม = 12 ต้น
F	=	1.8 ม.
B	=	2.7 ม.

(1) สำหรับเข็มเดี่ยว

แรงเสียดทานรวม = $n.\ A_p\ .\ c_a$

= $n.\ A_p\ .\ \propto c$

q_u = 5 ตัน / ม^2

c = 2.5 ตัน / ม^2

จากรูปที่ 4 $\propto$ = 0.85

N = 12

$A_p = (\pi)(D)(L)$

= (3.14) (0.30) (8.0)

= 7.536 ม^2

c_a = 0.85 x 2.5

= 2.125 ตัน/ ม^2

∴ แรงเสียดทานรวม = (12) (7.536) (2.125)

= 192.2 ตัน

ใช้ F.S = 3.0

∴ Allowable load = $\frac{192.2}{3}$ = 64.1 ตัน

2. สำหรับเข็มกลุ่ม

แรงต้านของเสาเข็มกลุ่ม $= cLp + N'_c c.A_g$

c = 2.5 ตัน / ม^2

L = 8.0 ม.

P = 2 (1.8 + 2.7) = 9.0

A_g = 1.8 x 2.7 = 4.86 ม^2

D/B = 4.4 , N'_c = 7.5

∴ แรงต้านทานของเสาเข็มกลุ่ม 2.5 x 8 x 9 x 7.5 x 2.5 x 4.86

= 271 ตัน

ใช้ F.S = 3

Allowable load on pile group = $\frac{271}{3}$

= 90.3 ตัน

∴ Allowable load on pile group

= 64.1 ตัน

6.2 สำหรับเสาเข็มที่ปลายจมอยู่ในดินแข็ง

สำหรับเสาเข็มที่อยู่ในบริเวณที่มีชั้นดินอ่อนอยู่เหนือดินแข็ง ซึ่งเป็นลักษณะชั้นดินคล้ายกับบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ถ้าปลายของเสาเข็มผ่านทะลุชั้นดินอ่อนลง ไปจมอยู่ในชั้นดินแข็ง ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมักจะไม่คิดแรงต้านที่ผิวในส่วนของเสาเข็มที่จมอยู่ในดินอ่อน ทั้งนี้เพราะหลังจากที่ตอกเสาเข็มทะลุชั้นดินอ่อนลงไปนั้นในระยะแรกที่ดินอ่อนรับน้ำหนักจะเกิดการยุบตัว เนื่องจากขบวนการ Consolidation ได้มาก ระหว่างที่เกิดการยุบตัวนี้น้ำหนักบรรทุกส่วนที่รับโดยดินอ่อนจะถูกถ่ายไปยังส่วนที่เป็นดินแข็งเสียส่วนใหญ่ ฉะนั้นสำหรับเสาเข็มที่ปลายจมอยู่ในชั้นดินแข็งโดยมีส่วน 20 บนเป็นดินอ่อน จึงมักจะคิดค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม แรงต้านที่ว่าของส่วนที่จมอยู่ในดินแข็งเท่านั้น

หรือ Ultimate Bearing Load = $\frac{\text{Ultimate End Bearing}}{FS_o}$

+ Skin Friction Capacity - น.น. ของเสาเข็ม

เมื่อ Ultimate End Bearing (Q_b) เป็นค่าที่หาได้จากข้อ ก.

Skin Friction Capacity (Q_f) เป็นค่าที่หาได้จากข้อ ข.

และ FS_o คือส่วนปลอดภัยอันเนื่องจากการสูญเสียกำลังของแรงต้านที่ปลายและที่รอบ ๆ เสาเข็มไม่พร้อมกัน (สำหรับบริเวณกรุงเทพฯ ขอแนะนำให้ใช้ค่าประมาณ 3)

ก. Ultimate End Bearing of a Single Pile

จาก Terzaghi's Equation

$$q_b = 1.2cN_c + \gamma DN_q + 0.4B\gamma N_\gamma \text{.....} (4)$$

เมื่อ q_b Ultimate End Bearing Capacity ตัน / ม.^{2}

c = แรงเฉือนของดิน

γ = Effective Unit Weight ของดินรอบเสาเข็ม ตัน/ ม.^{3}

D = ความลึกของปลายล่างของเสาเข็ม ม.

B = ส่วนที่แคบที่สุดของหน้าตัดเสาเข็ม ม.

สำหรับ Clay ϕ = 0, N_C = 5.7 , N_q = 1, N_γ = 0

จาก Equation (4) จะได้

$$q_b = 7.4c + \gamma D$$

แต่สำหรับเสาเข็มที่มี $\frac{D}{B} \rangle 25$

$\therefore$ จะได้ $q_b = 9c + \gamma D$ (Terzaghi)

ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า จากผลการทดลองในห้องทดลองได้ ก็อาจจะใช้ผลการทำ standard penetration test ในสนามมาหาค่า c โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6. ก็จะได้ค่า c โดยประมาณซึ่งไม่ถูกต้องมากนัก

สำหรับทราย C = 0

$$q_b = \gamma D N_q + 0.4 B \gamma N \gamma$$

เมื่อ Nq, N_γ = Bearing Capacity Factor ดูได้จากกร๊าฟ รูปที่ 7.

ข. Skin Friction Capacity

$$q_f = c_a D + K_s \gamma D^2 \tan\delta \text{ .....(5)}$$

q_f = Ultimate Skin Friction Capacity, ตัน / ม.

C_a = Adhesion ระหว่างดินกับเสาเข็ม ตัน / ม.^{2}

= $\propto$ c

$\propto$ = Adhesion Factor ดูจากกร๊าฟรูปที่ 4

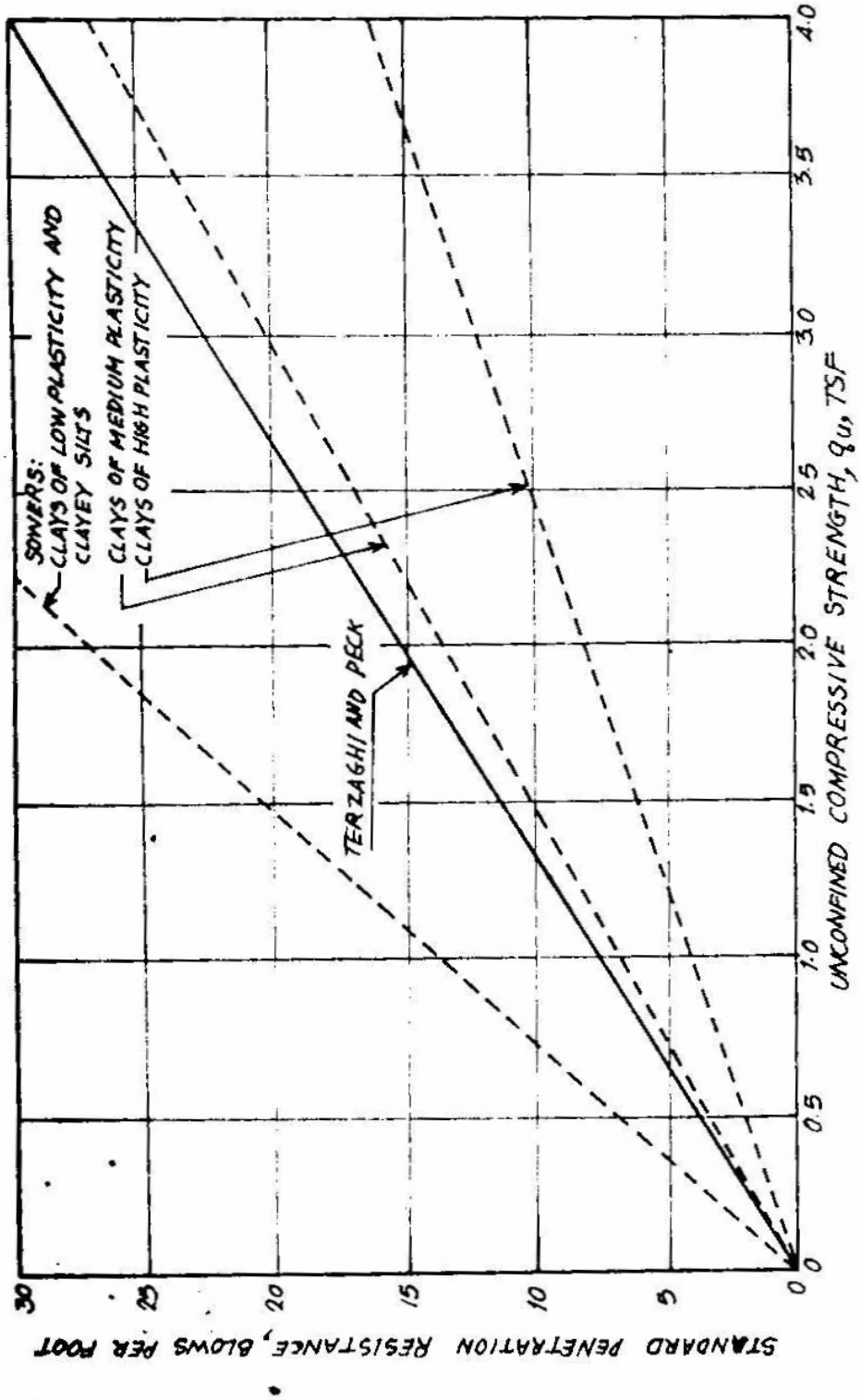
δ = Angle of Friction ระหว่างดินกับผิวเสาเข็มเป็นองศา

$\simeq \frac{3}{4}\phi$

K_s = Coefficient of Earth pressure

ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ . -

N'	Ks
0 – 4	0.5
4 – 10	0.6
10 – 30	0.7
30 – 50	0.8

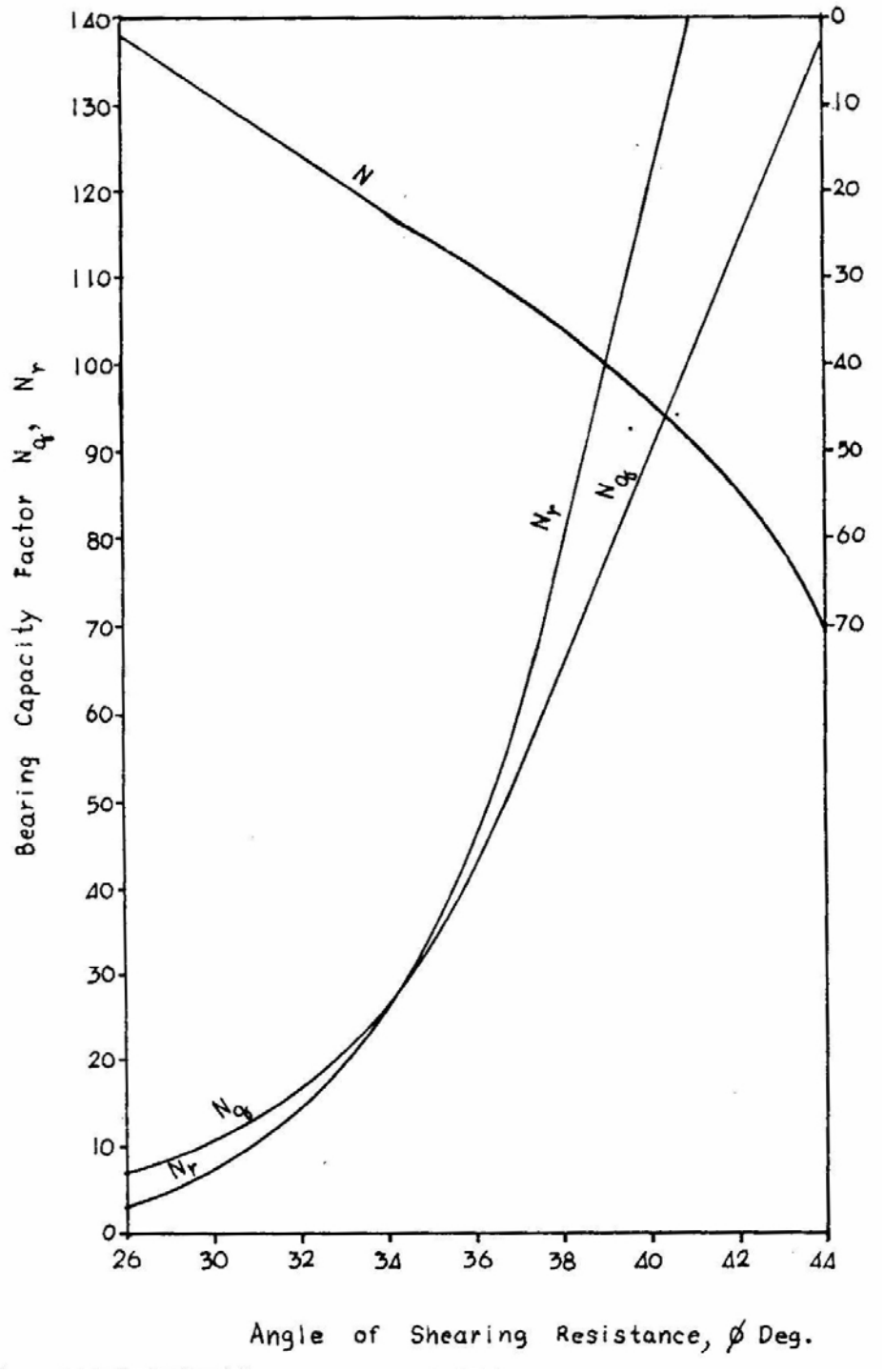


รูปที่ 6

PENETRATION RESISTANCE

VS. UNCONFINED STRENGTH OF CLAY

กราฟหาค่า N_q N_r



รูปที่ 7 Corelation of Standard Penetration with Bearing Capacity Factors and Angle of Shearing Resistance (Peck , Hanson, Thornburn 1953)

เมื่อ N' = adjusted number of blow

$$= 15 + \frac{1}{2}(N - 15)$$

N = observed number of blow

<u>Skin Friction For Clay</u>

ϕ = 0

จาก Equation (5) $q_f = \alpha e D$

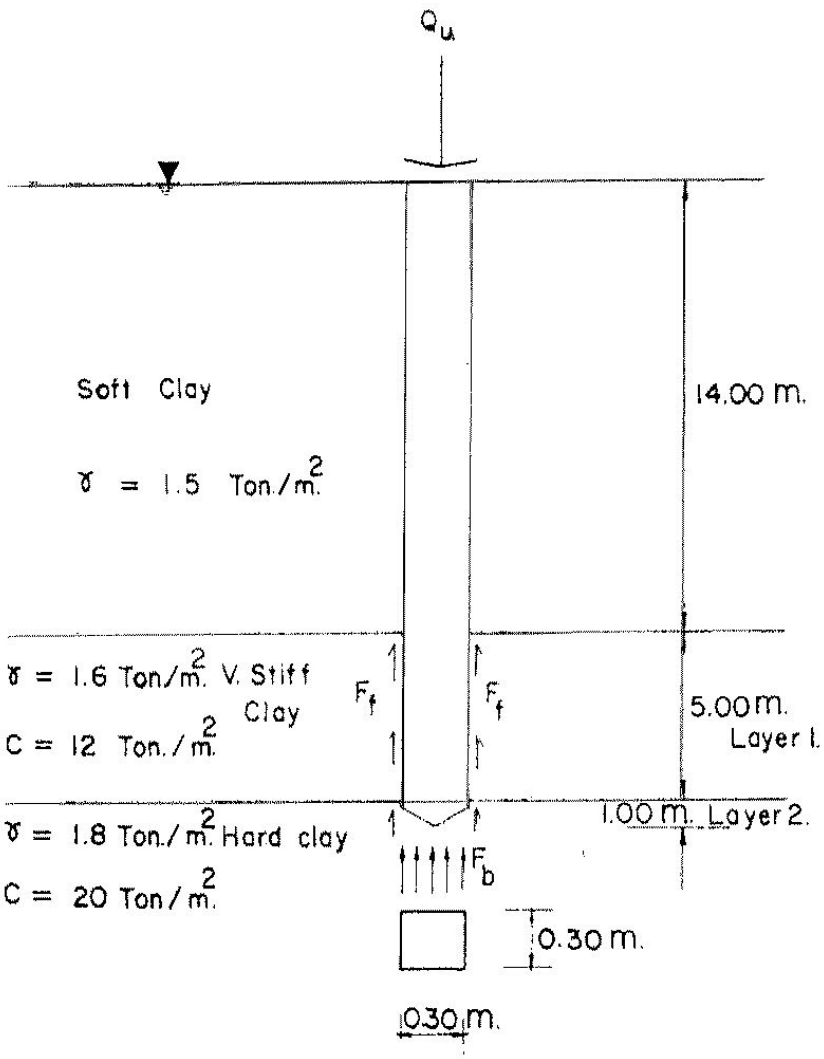
<u>Skin Friction For Sand</u>

C = 0

Equation (5) จะกลายเป็น

$$q_f = K_s \gamma D^2 \tan\left(\frac{3}{4}\phi\right)$$

ตัวอย่างการคำนวณ 2 เมื่อปลายล่างของเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินแข็ง กำหนดข้อมูลต่าง ๆ ดังรูป จงคำนวณหา น.น. บรรทุกส่วนปลอดภัย (allowable load) ของเสาเข็มนี้



จาก Q_u + น.น. ของเสาเข็ม = $\frac{F_b}{FS_0} + F_f$ ..... (a)

น.น. ของเสาเข็ม = 0.30 x 0.30 x 2400 x 20

= 4320 Kg.

F_b = q_b x A_b

q_b = 9c + γD

= 9 x 20 + (0.5 x 14 x 0.6 x 5 + 08. x 1.0)

190.8 ตัน / ม^2

A_b = 0.30 x 0.30 = 0.09 ม^2

∴ F_b = 190.8 x 0.09

= 17.1 ตัน

F_f = Q_f x A_s

= $\propto_1 c_1 D_1 A_s + \propto_2 c_2 D_2 A_s = A_s(\propto_1 c_1 D_1 + \propto_2 c_2 D_2)$

A_s = 0.30 x 4 = 1.20 ม^2 / ม.

$\propto_1 c_1 D_1$ = 0.4 x 12 x 5.0

= 24

$\propto_2 c_2 D_2$ = 0.30 x 20 x 1.0

= 7.6

∴ F_f = 1.2 (24 + 7.6)

= 37.9

∴ แทนค่าใน (a) โดยใช้ FS_o = 3

$$Q_u + 4.3 = \frac{17.1}{3} + 37.9$$

= 43.6 ตัน

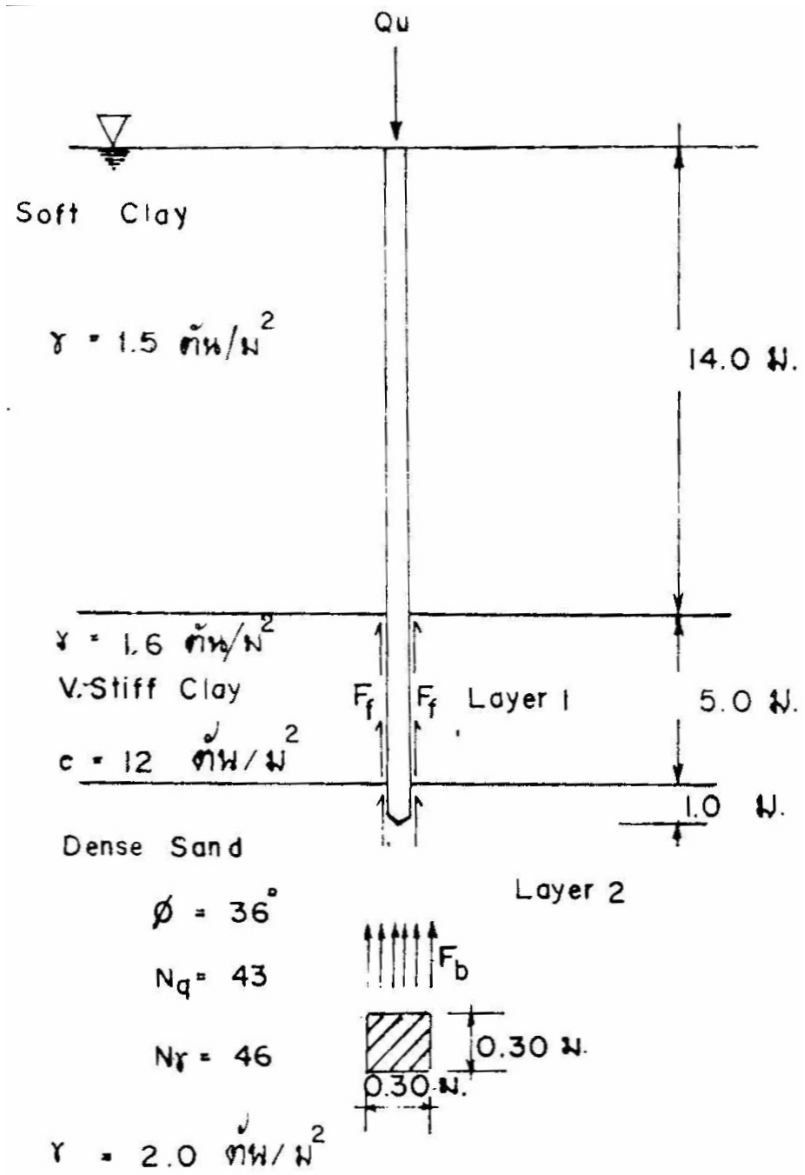
Q_u = 43.6 – 4.3

= 39.3

ใช้ค่าส่วนปลอดภัย = 2.5

$$Q_a = \frac{39.3}{2.5} = 15.72 \text{ ตัน / เสาเข็มหนึ่งต้น}$$

ตัวอย่างการคำนวณ 3 เมื่อปลายล่างของเสาเข็มจมอยู่ในชั้นทราย กำหนดข้อมูลต่าง ๆ ดังรูป จงคำนวณหาน้ำหนักบรรทุก ส่วนปลอดภัย (allowable load) ของเสาเข็มนี้



จาก Q_u + น.น. เสาเข็ม $= \dfrac{F_b}{FS_0} + F_f$ .....(b)

Q_u = ?

น.น.เสาเข็ม = 4.3 ตัน

F_b = q_b x A_b

$$q_b = \gamma D N_q + 0.4 B \gamma N_\gamma$$

γD = 0.5 x 14 + 0.6 x 5 + 1.0 x 1

= 11 ตัน / ม^2

$0.4\,B\gamma\,N\gamma$ = 0.4 x 0.30 x 1.0 x 46

= 5.52 ตัน / ม^2

$$q_b = \gamma D N_q + 0.4 B \gamma N_\gamma$$

= 11 x 43 + 5.52

= 478.5 ตัน / ม^2

F_b = 478.5 x 0.09

= 43.1 ตัน

$$F_f = F_{f_1} + F_{f_2}$$

F_{f1} = Friction เนื่องจาก very stiff clay

= $Q_{f_1} \times A_s$

$$q_{f_1} = \alpha C D_1$$

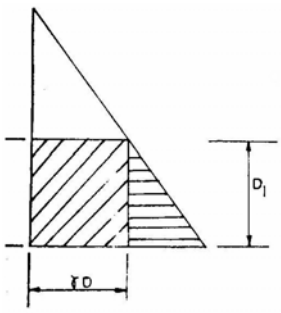
= 0.4 x 12 x 5.0

= 24.0 ตัน / ม.

F_{f1} = 24 x 1.20 = 28.8 ตัน

F_{f2} = Friction เนื่องจากชั้นทราย 1.0 ม.

= q_{f2} x A_s



$$q_{f2} = K_S\left(\gamma D D_1 + \frac{1}{2}\gamma D_1^{\,2}\right)\tan\frac{3}{4}\phi$$

= 0.7 (10.0 + ½ x 1.0 x (1.0)^2 tan ¾ x 36°

= 0.7 (10.0 + 0.5) tan 27°

= 7.35 x tan 27°

= 3.75

F_{f2} = 3.75 x 1.20

= 4.50 ตัน

F_f = F_{f1} + F_{f2}

= 28.8 + 4.50

= 33.3 ตัน

แทนค่าใน (b) โดยใช้ FS_o = 3

Q_u + น.น.เสาเข็ม = $\dfrac{F_b + F_f}{3}$

Q_u + 4.3 = $\dfrac{43.1 + 33.3}{3}$

= 47.7 ตัน

Q_u = 47.7 - 4.3 = 43.4 ตัน

ใช้ค่าส่วนปลอดภัย = 2.5

Q_u = $\frac{43.4}{2.5}$ = 17.35 ตัน

6.3 น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม Dutch Cone Penetration Test

เป็นการหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จากคุณสมบัติของดินอีกวิธีหนึ่ง แต่คุณสมบัติของดินที่ใช้กับวิธีนี้ต้องหาได้มาจากการทดสอบจากการกดหัว dutch cone ในดิน ตามวิธีการที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อนี้ ผลที่ได้จะเป็นหน่วยแรงยึดและหน่วยแรงบรรทุกที่วัดได้ก็สามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้ดังต่อไปนี้

$$Q_u = \alpha \sum_{i=1}^{n} \left(Q_{fi} \Delta L_i P \right) + \lambda Q_{ca} A - W \text{ .....(6)}$$

เมื่อ Q_u = น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม

Q_{fi} = หน่วยแรงยึดที่วัดได้ ณ. ตำแหน่งใด ๆ

Q_{ca} = หน่วยแรงบรรทุกเฉลี่ย โดยหาค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงบรรทุกที่ระดับ 4d เหนือปลายเสาเข็มกับที่ระยะ d ใต้ปลายเสาเข็ม (d = เส้นผ่านศูนย์กลางหรือส่วนกว้างน้อยที่สุดของหน้าตัดเสาเข็ม)

$\bullet L_i$ = ส่วนของความยาวเสาเข็ม

P = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

W = น้ำหนักของเสาเข็ม

และ $\propto, \lambda$ = สัมประสิทธิ์แรงยึดและแรงบรรทุกตามลำดับมีค่าที่พอจะแนะนำได้ดังตารางที่ 3 (ค่าเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพของดินที่แตกต่างไป)

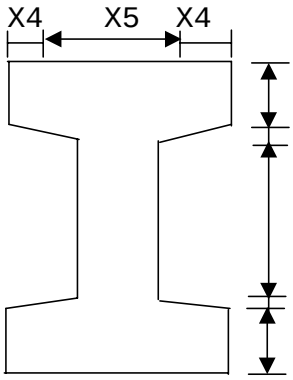
ที่มา การคำนวณเสาเข็มของ วสท.

7. ตัวอย่างในการคำนวณ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

7.1 ตัวอย่างในการคำนวณ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I

Design of prestress concre I PILE

1. PILE SECTION PROPERTIES



SIZE OF PILE		=	18.000	CM.
LENGTH		=	14.00	M.
X1	X1	=	3.00	CM.
	X2	=	2.00	CM.
X2	X3	=	8.00	CM.
	X4	=	6.00	CM.
X3	X5	=	6.00	CM.
Ag		=	204.00	CM^2
PERIMETER		=	89.30	CM.
X2	DEAD LAOD	=	48.96	KG/M
	MIN MOMENT	=	205.36	KG-(2 POINT PIC
X1	IMPACT LOAI	=	30.00	%
	MAX MOMENT	=	266.97	KG-M

MOMENT OF INERTIA	Ix	=	7,708.00	CM^4
SECTION MODULUS(TOP)	Zt	=	856.44	CM^3
SECTION MODULUS(BOT)	Zb	=	856.44	CM^3

2. DESIGN CRITERIA

1. fc'	=	400.00	KSC.
2. fci' = 0.8fc'	=	320.00	KSC.
3. fci = 0.6fci'	=	192.00	KSC.
4. fti = -0.8 SQR fci'	=	-14.31	KSC.
5. fca = 0.45fc'	=	180.00	KSC. (BENDING)
= 0.33fc'	=	132.00	KSC. (BEARING)
6. fta = -1.59 SQR fc'	=	-31.80	KSC.
7. fr = -1.99 SQR fc'	=	-39.80	KSC.

3. P.C. WIRE OR STRAND

TYPE OF P.C. WIRE OR STRAND		P.C.WIRE	
DIAMETER OF P.C.WIRE OR STRAND	=	5.000	m.m.
CROSSECTIONAL AREA (a)	=	0.1964	CM^2
fs'	=	18,000.00	KSC.
fsi = 70% OF fs'	=	12,600.00	KSC.
Fi/Wire = fsi*a	=	2474.64	KG.
Fe/Wire (LOSS 20%)	=	1,979.71	KG.
NO. OF P.C. WIRE OR STRAND	=	8.00	
PERCENTAGE OF STEEL (Pg)	=	0.7702	

4. CHECK STRESS

Fe/Ag =EFFECTIVE PRESTRESS	=	77.64	KSC.
Mmax/Zt	=	31.17	KSC.
Mmax/Zb	=	31.17	KSC.
Mmin/Zt	=	23.98	KSC.
Mmin/Zb	=	23.98	KSC.

4.1 Fe/Ag+Mmax/Zt (pc)	=	108.81	KSC.

	IF pc IS LESS THAN fca	=	180 KSC.
			(CONDITION A) O.K.
4.2	Fe/Ag-Mmax/Zb (pt)	=	46.46 KSC.
	IF pt IS MORE THAN fta	=	-31.80 KSC.
			(CONDITION B) O.K.
4.3	Fi/Ag+Mmin/Zt (pci)	=	121.02 KSC.
	IF pci IS LESS THAN fci	=	192 KSC.
			(CONDITION C) O.K.
4.4	Fi/Ag-Mmin/Zb (pti)	=	73.07 KSC.
	IF pti IS MORE THAN fti	=	-14.31 KSC.
			(CONDITION D) O.K.

5. CONCLUSION OF CONDITION

CONDITION A	O.K.
CONDITION B	O.K.
CONDITION C	O.K.
CONDITION D	O.K.

6. CRACKING MOMENT

Mcr =(Fe/Ag-fr)*Zb	=	1,005.77 KG-M

7. ALLOWABLE CONCENTRIC LOAD

Na	=	(0.33fc'-0.27Fe/Ag)Ag
	=	22,651.82 K.G.
	=	22.65 TONS

8. ALLOWABLE LOAD AT DRIVING

Ncr	=	(3.1416^2*Ec*I)/L^2
Ec	=	4270*W^1.5* SQR fc'
	=	327,496.75 KSC.
Ix	=	7,708.00 CM^4
Ncr	=	12,711.43 K.G.
	=	12.71 TONS

9. ULTIMATE DESIGN

As	=	0.7856 CM^2
b = d	=	18.000 CM
d'	=	2.200 CM
dp = d - d'	=	15.800 CM
p = As/bdp	=	0.0028
fs'	=	18,000.00 KSC.
fc'	=	400 KSC.
fsu fs'(1-0.5pfs'/fc')	=	16,881.27 KSC.
q = pfsu/fc'	=	0.12 (UNDERREINFORCED)
Mu	=	0.9*{As*fsu*dp(1-0.59q)}
	=	1,756.13 KG-M
CRACKING MOMENT	=	1,005.77 KG-M
F.S.	=	1.75

RECOMMEND

1 TO ECONOMIZE AND CONTROL CRACKING pt SHOULD BE NEARLY 0
2 EFFECTIVE PRESTRESS SHOULD BE LESS T = 80 KSC.
3 SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR <12 METERS LONG = 20 KSC.
4 SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR 13-21 METERS LONG = 30 KSC.
5 SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR >21 METERS LONG = 40 KSC.

7.2 ตัวอย่างในการคำนวณเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยม

DESIGN OF P.C. SQUARE PILE

1. PILE SECTION PROPERTIES

DIMENTION		=	40.00	CM.
LENGTH		=	13.50	M.
DEAD LOAD OF PILE		=	392.00	KG/M
MINIMUM MOMENT(TWO POINT PICK)		=	1,528.86	KG-M
PROVIDE IMPACT LOAD		=	30.00	%
MAXIMUM MOMENT		=	1,987.52	KG-M
CROSSECTION AREA	Ag	=	1,600.00	CM^2
SECTION MODULUS(	Zt	=	10,666.67	CM^3
SECTION MODULUS(	Zb	=	10,666.67	CM^3

2. DESIGN CRITERIA

1. fc'		=	400.00	KSC.
2. fci'	= 0.8fc'	=	320.00	KSC.
3. fci	= 0.6fci'	=	192.00	KSC.
4. fti	= -0.8 SQR fci'	=	-14.31	KSC.
5. fca	= 0.45fc'	=	180.00	KSC. (BENDING)
	= 0.33fc'	=	132.00	KSC. (BEARING)
6. fta	= -1.59 SQR fc'	=	-31.80	KSC.
7. fr	= -1.99 SQR fc'	=	-39.80	KSC.

3. P.C. WIRE OR STRAND

TYPE OF P.C. WIRE OR STRAND		STRAND GRADE 250K		
DIAMETER OF P.C.WIRE OR STRAND		=	0.375	inch
CROSSECTIONAL AREA (a)		=	0.5175	CM^2
fs'		=	18,300.00	KSC.
fsi	= 70% OF fs'	=	12,810.00	KSC.
Fi/Wire	= fsi*a	=	6629.175	KG.
Fe/Wire (LOSS 20%)		=	5,303.34	KG.
NO. OF P.C. WIRE OR STRAND		=	8.00	
PERCENTAGE OF ST(Pg)		=	0.2588	

4. CHECK STRESS

Fe/Ag	EFFECTIVE PRESTRESS	=	26.52	KSC.
	Mmax/Zt	=	18.63	KSC.
	Mmax/Zb	=	18.63	KSC.
	Mmin/Zt	=	14.33	KSC.
	Mmin/Zb	=	14.33	KSC.

4.1 Fe/Ag+Mmax/Zt	(pc)	=	45.15	KSC.
IF pc IS LESS THAN fca		=	180	KSC.
		(CONDITION A)		O.K.
4.2 Fe/Ag-Mmax/Zb	(pt)	=	7.88	KSC.
IF pt IS MORE THAN fta		=	-31.80	KSC.
		(CONDITION B)		O.K.
4.3 Fi/Ag+Mmin/Zt	(pci)	=	47.48	KSC.
IF pci IS LESS THAN fci		=	192	KSC.
		(CONDITION C)		O.K.
4.4 Fi/Ag-Mmin/Zb	(pti)	=	18.81	KSC.
IF pti IS MORE THAN fti		=	-14.31	KSC.
		(CONDITION D)		O.K.

5. CONCLUSION OF CONDITION

CONDITION A	O.K.
CONDITION B	O.K.
CONDITION C	O.K.
CONDITION D	O.K.

6. CRACKING MOMENT

Mcr =(Fe/Ag-fr)*Zb	=	7,073.78	KG-M

7. ALLOWABLE CONCENTRIC LOAD

Na	= (0.33fc'-0.27Fe/Ag)Ag		
	=	199,744.79	K.G.
	=	199.74	TONS

8. ALLOWABLE LOAD AT DRIVING

Ncr	= (3.1416^2*Ec*I)/L^2		
Ec	= 4270*W^1.5* SQR fc'		
	=	327,496.75	KSC.
I	= b^4/12		CM^4
	=	213,333.33	CM^4
Ncr	=	378,355.42	K.G.
	=	378.36	TONS

9. ULTIMATE DESIGN

As	=	2.0700	CM^2
b = d	=	40.000	CM
d'	=	4.500	CM
dp = d - d'	=	35.500	CM
p = As/bdp	=	0.0015	
fs'	=	18,300.00	KSC.
fc'	=	400	KSC.
fsufs'(1-0.5pfs'/fc')	=	17,689.77	KSC.
q = pfsu/fc'	=	0.06	(UNDERREINFORCED)
ULTIMATE MOMENT (Mu)	= 0.9*{As*fsu*dp(1-0.59q)}		
Mu	=	11,254.39	KG-M
CRACKING MOMENT (Mcr)	=	7,073.78	KG-M
F.S.= Mu/Mcr	=	1.59	

RECOMMEND

1. TO ECONOMIZE AND CONTROL CRACKING pt SHOULD BE NEARLY 0
2. EFFECTIVE PRESTRESS SHOULD BE LESS THAN 0.2fc' 80 KSC.
3. SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR <12 METERS LONG = 20 KSC.
4. SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR 13-21 METERS LONG = 30 KSC.
5. SUITABLE EFF.PRESTRESS FOR >21 METERS LONG = 40 KSC.

7.3 ตัวอย่างในการคำนวณแผ่นเหล็กเพื่อการเชื่อมต่อเสาเข็ม

DESIGN OF STEEL PLATE

1.SECTION OF PILE

DIMENTION (b)	=	25.00	CM.
LENGTH	=	10.50	M.

2.MATERIAL PROPRETY

STRENGTH OF CONCRETE (Fc')	=	350.00	KSC.
STRENGTH OF STEEL (Fy)	=	3,000.00	KSC.

3.LAOD-MOMENT

DEAD LOAD OF PILE	=	150.00	KG/M
MOMENT	=	353.90	KG-M
PROVIDE IMPACT LOAD	=	30.00	%
MAXIMUM MOMENT	=	460.07	KG-M

4.WELD JOINT DESIGN

CONSIDER MOMENT (M)	=	460.07	KG-M
REQUIRED ONE EDGE STRENGTH (T)	=	M*100/b	KG-M
	=	1,840.29	KG
USE WELDING ROD TYPE	=	E60	
SIZE OF THROAT	=	3.00	m.m.
WELD STRENGTH (Fv)	=	267.00	KG/CM
WELD LENGTH (Lw)	=	T/Fv	CM.
	=	6.89	CM.
IF Lw IS LESS THAN	=	25.00	CM.
		(CONDITION A)	O.K.

5.DOWEL BARS

CENTER OF STEEL FROM EDGE (d)	=	3.00	CM.
CONSIDER FORCE (P)	=	T*b/(b-2d)	KG.
	=	2,421.44	KG.
REQUIRED AREA OF STEEL	=	P/Fy*0.5	CM^2
	=	1.61	CM^2
DIAMETER OF DEFORMED BARS (Db)	=	12.00	m.m.
NO.OF DEFORMED BARS PER ONE EDGE	=	2.00	
AREA OF STEEL PER ONE EGDE (a)	=	2.26	CM^2
IF a IS GREATHER THAN	=	1.61	CM^2
		(CONDITION B)	O.K.
DEVELOPMENT LENGTH (ld)(ACI CODE)	=	0.0594Ab*Fy/SQRFc'	
	=	10.77	CM.
BUT NOT LESS THAN (ACI CODE)	=	0.006*(Db/10)/Fy	
	=	21.60	CM.
RECOMMEND ld	=	30	CM.

6.END PLATE

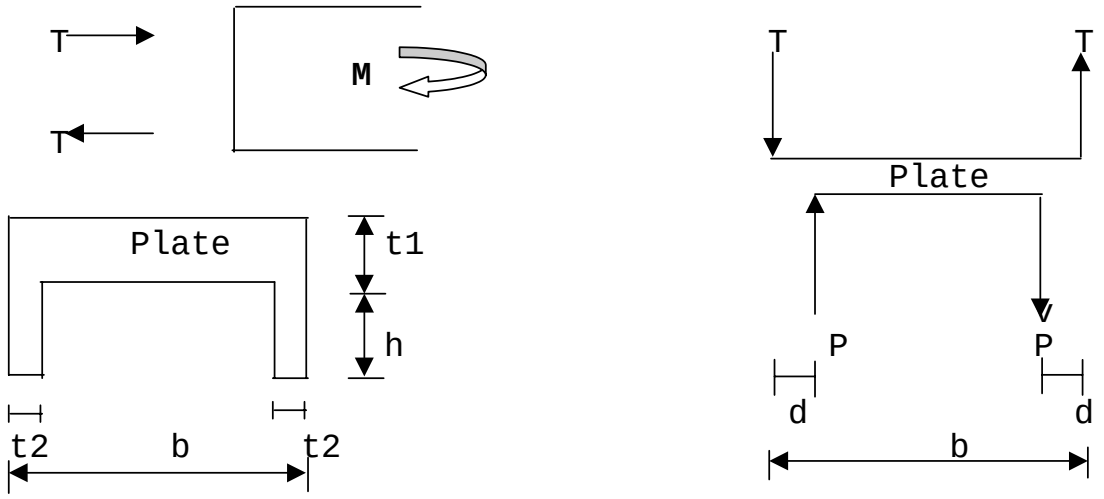
CONSIDER MOMENT		=	T*d	KG-CM
		=	5,520.88	KG-CM
THICKNESS OF END PLATE	(t1)	=	6.00	m.m.
THICKNESS OF SIDE PLATE	(t2)	=	3.00	m.m.
HEIGHT OF SIDE PLATE	(h)	=	5.00	CM.

7.FIND C.G. OF STEEL PLATE

CROSS SECTION AREA		=	18.00	CM^2
C.G. OF PLATE (X)		=	0.77	CM.
MOMENT OF INERTIA C.G. (I)		=	26.30	CM^4
STRESS (p)		=	MC/I	KSC.
	C	=	4.83	CM.
	p	=	1,014.61	KSC.
IF p IS LESS THAN		=	1,200.00	KSC.
			(CONDITION C)	O.K.

8.CONCLUSION OF CONDITION

CONDITION A	O.K.
CONDITION B	O.K.
CONDITION C	O.K.



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- ชมรมวิศวกรรมโยธา , เสาเข็ม , คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2524
- นายสมบูรณ์ สร้อยคีรี ข้อควรรู้ในการก่อสร้างเรื่องเสาเข็ม , สวัสดิการกรมโยธาธิการ 2530
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม , ตุลาคม 2521
- ศ.ดร. ชัย มุกตพันธ์ , นายคาซูโตะ นาคาซาวา , ปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก , สำนักพิมพ์ดวงกมล 2546
- ผศ. มานะ อภิพัฒนะมนตรี , วิศวกรรมปฐพีและฐานราก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น) , พฤษภาคม 2545

ภาษาอังกฤษ

- Ralph B. Peck , Water E. Hanson , Thomas H . Thornburn , Foundation Engineering. 2 nd Edition , June 1973
- Joseph E. Bowles , Foundation Analysis and Design 5 th Edition , 1997