

บทที่ 2

ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

เสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ใช้รองรับฐานราก เพื่อกระจายหรือถ่ายแรงลงสู่ดินชั้นล่างที่แข็งแรงกว่า ในกรณีที่ดินชั้นบนได้ระดับผิวดินเป็นชั้นดินอ่อนและไม่สามารถรับแรงได้

เสาเข็มสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้หลายวิธี เช่น

ลักษณะการถ่ายแรงสู่ดิน เช่น End Bearing Pile, Friction pile

- วิธีการตอกเสาเข็ม เช่น เสาเข็มตอก, เสาเข็มเสียบ, ฯลฯ
- วัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม เช่น เสาเข็มเหล็ก, เสาเข็มไม้
- อื่น ๆ

หลักเกณฑ์ในการออกแบบเสาเข็มโดยทั่วไปต้องคำนึงถึง

1. ตัวเสาเข็มเองสามารถรับน้ำหนักของอาคารได้โดยไม่เกิดการพิบัติในโครงสร้างของเสาเข็ม
2. สามารถรับน้ำหนักที่ถ่ายของมาจากอาคารหรือโครงสร้างได้โดยไม่เกิดการพิบัติของมวลดิน
3. มีการทรุดตัวของเสาเข็มอยู่ในขีดจำกัด

หลักเกณฑ์การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มมีหลายวิธี คือ

1. สแตติก ฟอรัลลา (Static Formula) เป็นวิธีคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านทานทั้งแรงต้านปลายของเสาเข็ม และแรงต้านด้านข้างเสาเข็ม เกิดจากแรงเสียดทานหรือแรงยึดเกาะของดินรอบเสาเข็ม ค่าคุณสมบัติของดินหาได้โดยการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ

2. โคนามิค ฟอรัลดา (Dynamic Formula) เป็นวิธีคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มกับระยะที่หัวเสาเข็ม เนื่องจากการตอก

3. การใช้เครื่องมือชนิดกรวยหยั่งแบบดัทช์ (Dutch Cone Penetration) เป็นวิธีคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม โดยใช้เครื่องมือชนิดกรวยหยั่งแบบดัทช์

4. การทดสอบกำลังการรับน้ำหนัก (Field Load Tests) เป็นวิธีทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยตรงในสนาม

แม้จะมีวิธีที่สามารถคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้หลายวิธีก็ตาม แต่ในงานที่ต้องการความแน่นอน ควรมีการเปรียบเทียบกับ การทดสอบเสาเข็มจริง (Field Load Tests) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าได้แน่นอนที่สุดวิธีหนึ่ง

จากการเปรียบเทียบผลการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ผ่านมา เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากสถิติ ฟอรัลดา มีหลักเกณฑ์ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง และได้รับผลใกล้เคียงกับการทดสอบเสาเข็มมากกว่าวิธีอื่น ในการศึกษาจึงเลือกใช้การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธี สถิติ ฟอรัลดา เพื่อเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบเสาเข็ม

1. สถิติ ฟอรัลดา

กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มหรือแรงพิบัติของเสาเข็ม (Ultimate Load) ประกอบด้วย แรงต้านของดินที่ปลายเสาเข็ม และแรงต้านด้านข้างเสาเข็มอันเกิดจากแรงเสียดทานและ/หรือแรงยึดเกาะระหว่างผิวเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม สามารถเป็นไปในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q_u = Q_p + Q_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

- เมื่อ Q_u = กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม
 Q_p = แรงต้านของดินที่ปลายเสาเข็ม
 Q_f = แรงต้านด้านข้างเสาเข็มอันเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและ/หรือแรงยึดเกาะระหว่างผิวเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม

1.1 แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Q_p)

แรงต้านของดินที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็มกับหน่วยแรงต้านทานของดินที่จุดปลายของเสาเข็ม สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Q_p = A_p \cdot q_u \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

- เมื่อ A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม
 q_u = หน่วยแรงต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม

ค่าหน่วยแรงต้านทานของดิน (q_u) ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เป็นของ Terzaghi (1943) มีพื้นฐานจาก Plasticity Theory แสดงค่าหน่วยแรงต้านทานของดินไว้ในรูปสมการคือ

$$q_u = CNc + \frac{\gamma BN_Y}{2} + \gamma dN_q \quad \dots\dots\dots (1.1.1)$$

- C = ค่าหน่วยแรงเฉือนของดินที่ปลายเสาเข็ม
 Y = ค่าหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของดิน
 B = มิติที่น้อยที่สุดของหน้าตัดที่ปลายเสาเข็ม
 d = ความลึกของปลายเสาเข็มที่จมในดิน
 N_c, N_Y และ N_q = ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านทานของดิน

เมื่อพิจารณากรณีของดินเหนียว เมื่อดินรับแรงกระทำมีการระบายน้ำได้ช้ามาก ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือใช้เท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ 1.1.1 จะได้

$$q_u = C N_c + \gamma d \quad \dots\dots\dots(1.1.2)$$

เพื่อการคำนวณที่ง่ายขึ้น พิจารณาค่า γd มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $C N_c$ นำหนักสุทธิที่เสา เข็มรับได้ จะมีค่า

$$q_u = C N_c \quad \dots\dots\dots(1.1.3)$$

จาก MOHAN (1961) และ LADANYI (1963) "ค่า N_c ขึ้นกับ Stress-Strain behavior of soil"

ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านทางที่ปลายเสา เข็มจากการศึกษาที่ผ่านมา

BISHOP (1945)	$N_c = 1 + \frac{4}{3} [1 + \ln(\frac{E_u}{C_u})]$	
MEYERHOLF (1951)	$N_c = 9.3$	
SKEMPTON (1951)	$N_c = 9.0$	
CHIRUPPAPA (1968)	$N_c = 6.2$	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
SUWANAKUL (1969)	$N_c = 8.1$ และ 10.8	ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ
HOLMBERG (1970)	$N_c = 10.0$	ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ
ABDUL RAHIM (1970)	$N_c = 19.5$	ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ
MUKTABHANT & SUWANAKUL (1971)	$N_c = 19.7$	ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ
SURIVONGSE (1972)	$N_c = 14.1$	ดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ
JUTTUNIRASAI (1976)	$N_c = 9.0$	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

1.2 แรงต้านด้านข้างเสาเข็ม

ค่าแรงต้านด้านข้างของเสา เข็มเกิดจากแรงเสียดทานและ/หรือแรงยึด เกาะระหว่างผิวสัมผัสของเสา เข็มและดินโดยรอบเสา เข็ม ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q_f = A_s \cdot f_s \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ Q_f = แรงต้านต้านข้างของเสาเข็ม

A_s = พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม

f_s = หน่วยแรงเสียดทานและ/หรือแรงยึดเกาะของดินรอบเสาเข็ม

1.2.1 พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม

เสาเข็ม เหล็กรูปตัว เอช ได้มีการศึกษากันมานาน ซึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมาสามารถสรุปได้คือ

จาก EBEN VEY (1957) ในดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลางใช้พื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 2B และในดินเหนียวแข็ง เท่ากับ 4B

TOMLINSON (1957)	แนะนำให้ใช้ค่าผิวสัมผัส เท่ากับ 2B
CHELLIS (1961)	แนะนำให้ใช้ค่าผิวสัมผัส เท่ากับ 4B
BROM (1970)	แนะนำให้ใช้ค่าผิวสัมผัส เท่ากับ 4B
SIMONS & MENZIES (1975)	แนะนำให้ใช้ค่าผิวสัมผัส เท่ากับ 4B

1.2.2 แรงยึดเกาะของดินรอบเสาเข็ม

ในกรณีของเสาเข็มในดินเหนียว เมื่อดินเหนียวรับแรงจะสามารถระบายน้ำได้ช้ามาก ซึ่งจะพิจารณาว่าเป็นกรณีที่ไม่ระบายน้ำ ค่ามุมเสียดทานภายในมวลดิน $\phi=0$

ผลของการตอกเสาเข็ม

1. รบกวนโครงสร้างของมวลดินรอบเสาเข็ม หน่วยแรงเฉือนของดินลดลง
2. เปลี่ยนแปลงสถานะของหน่วยแรงในมวลดินรอบเสาเข็ม
3. แรงดันของน้ำในมวลดินมีค่าสูงขึ้น และระบายออกด้านข้าง
4. หน่วยแรงเฉือนของดินจะกลับคืนมาเมื่อทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง

การที่หน่วยแรงเฉือนของดินที่กลับคืนมานี้ เนื่องจาก

1. Thixotropic Processes

2. Local Consolidations ค่าแรงดันของน้ำในมวลดินจะลดลงแต่เพิ่มค่าหน่วยแรงในมวลดิน

ซึ่งอัตราการคืนสภาพของแรงเฉือนของดินนี้มีความสัมพันธ์กับอัตราการระบายน้ำของมวลดิน

เนื่องจากผลของการคอกของเสา เข็มนี้ทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนของดินมีค่าลดลงและจะกลับคืนมาตามเวลาที่ทิ้งไว้ซึ่งค่าแรงยึดเกาะของดินต่อเสา เข็มมีค่าสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดิน

SKEMPTON (1957)

$$C_a = \alpha \cdot S_u \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

เมื่อ C_a = หน่วยแรงยึดเกาะเฉลี่ยระหว่างเสา เข็มกับดินเหนียว

S_u = หน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

α = สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของเสา เข็มกับดิน

จากสมการที่ 2.1 จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_f = \alpha \cdot S_u \cdot A_s \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

1.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว (α)

ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่า 1.0 เพราะค่าหน่วยแรงเฉือนของดินเหนียวลดลง เนื่องจากผลของการคอกเสา เข็ม แต่ในบางครั้งค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวอาจมากกว่า 1.0 ได้เนื่องจากผลของการคอกเสา เข็มทำให้ค่าสถานะของหน่วยแรงในมวลดินเปลี่ยนไป เช่น ค่าอัตราส่วนความควบแน่น (Consolidation ratio) เมื่อดินเกิดการควบแน่น (Consolidation) จะทำให้ค่าหน่วยแรงยึดเกาะมีค่าสูงกว่าค่าของหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์ความเกาะตัวของดิน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น

1. ชนิดและคุณสมบัติของดิน

- ค่าหน่วยแรงเฉือนของดิน
- ลักษณะของชั้นดิน
- ปริมาณน้ำในมวลดิน (Degree of Saturation)
- Degree of Consolication

2. ระยะเวลาที่ทิ้งไว้หลังจากการคอกเสา เข็ม

3. ชนิดของวัสดุหรือผิวของ เสา เข็ม

4. รูปร่างของ เสา เข็ม

5. วิธีการคอกเสา เข็ม

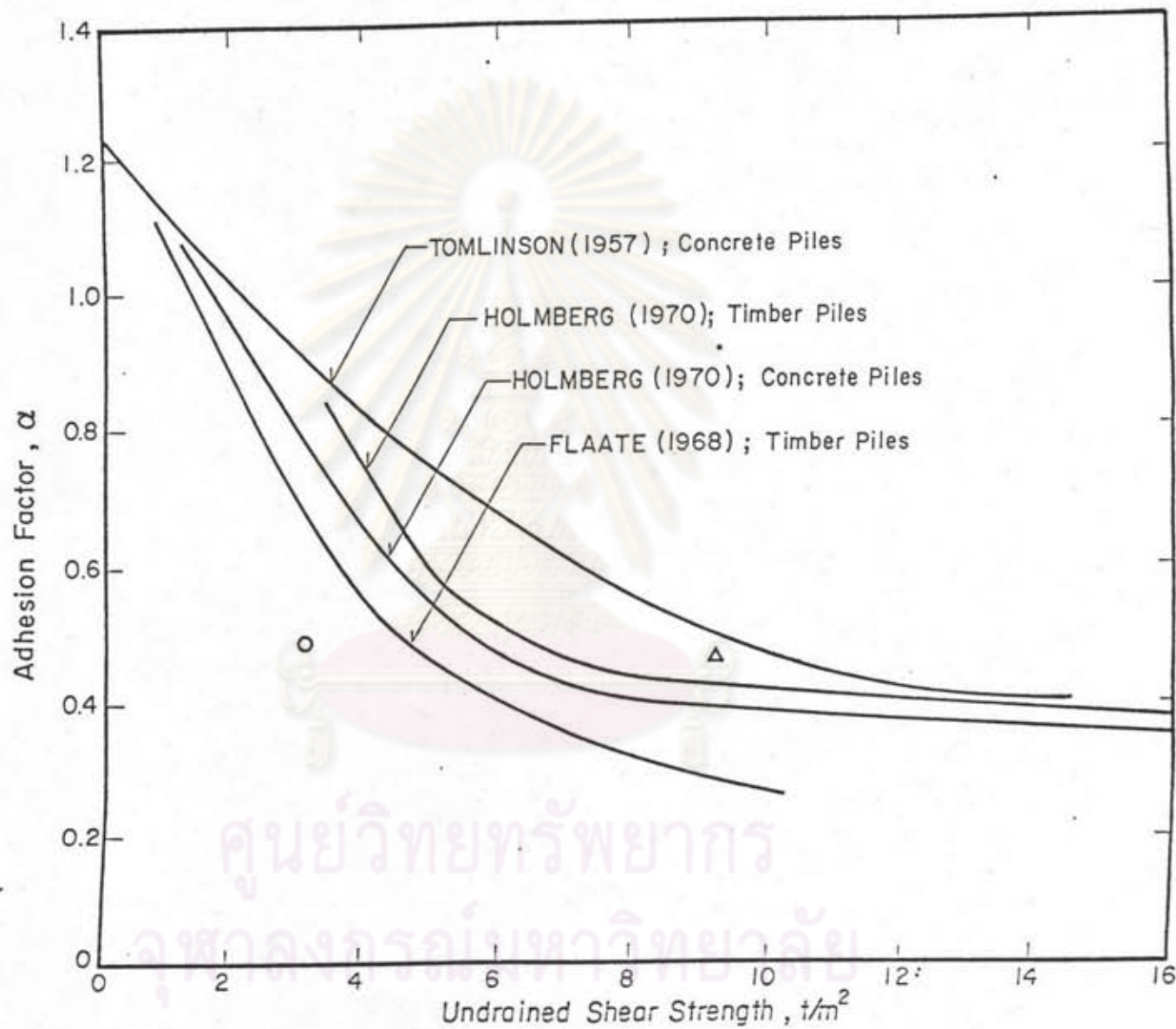
6. ชนิดของเข็ม เช่น เข็มคอก, เข็มเจาะ (ซึ่งมีหลายวิธี)

ค่าหน่วยแรงเฉือนของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์ความเกาะตัวจะมีค่าสูง เมื่อเสา เข็มอยู่ในชั้นดินที่มีค่าหน่วยแรงเฉือนต่ำ และจะมีค่าน้อยลง เมื่ออยู่ในชั้นดินที่มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูง ซึ่ง เป็นผลเนื่องจากขบวนการ Thixotropy ของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

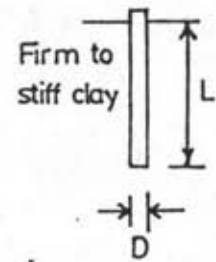
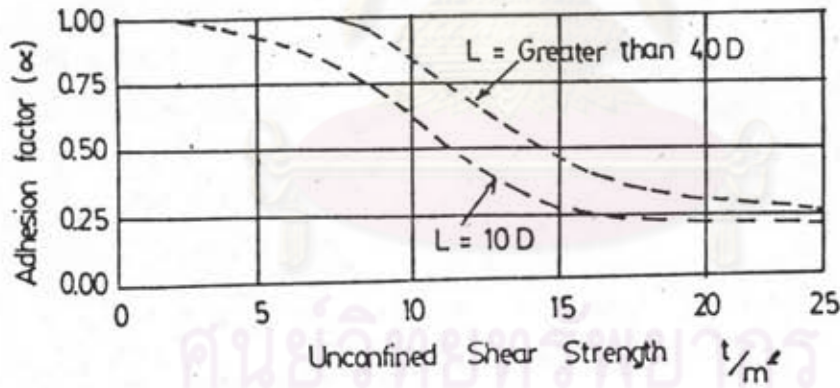
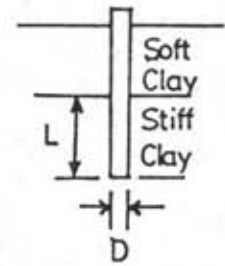
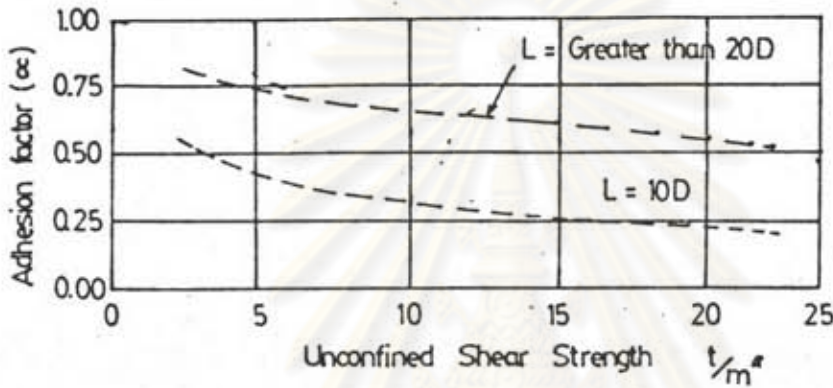
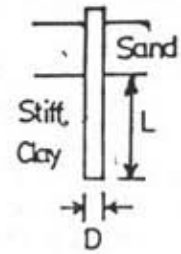
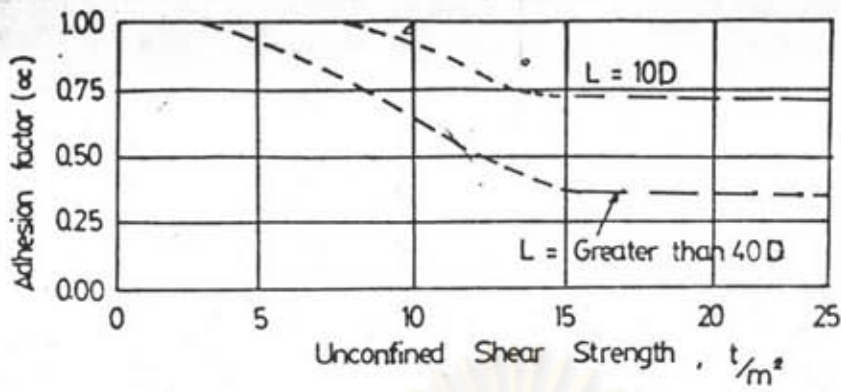
ลักษณะของชั้นดิน

TOMLINSON (1977) แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของชั้นดินมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของดินคือเสา เข็ม ซึ่งผลนี้เกิด เนื่องจากดินชั้นบนเกาะผิวของเสา เข็มลงสู่ดินชั้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดิน (S_u) และค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว (α) จากการศึกษาที่ผ่านมา

DRIVEN PILE, ONLY



รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของดินสำหรับอกแบบ (dotted line มาจาก Tomlinson 1977)

ปริมาณน้ำในมวลดิน (Degree of Saturation)

ปริมาณน้ำในมวลดินจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว เช่นการทดลองของ SKEMPTON (1959) พบว่า เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นเพียง 1 % จะทำให้ค่า α เปลี่ยนแปลงถึง 20 %

ความควบแน่นของดิน (Degree of Consolidation)

เมื่อ Degree of Consolidation ของดินสูงขึ้นจะทำให้ค่าการเกาะตัวมากขึ้น BURLAND (1973) แสดงไว้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนความควบแน่น (Consolidation ratio) มากขึ้นจะทำให้ค่า α สูงขึ้น

ระยะเวลาที่ทิ้งไว้หลังจากการคอกเสา เข็ม

จากผลของการคอกเสา เข็มทำให้หน่วยแรงเฉือนของดินต่ำลงและแรงดันของน้ำในมวลดินสูงขึ้น เมื่อทิ้งระยะเวลาทิ้งไว้เวลาหนึ่ง หน่วยแรงเฉือนของดินจะกลับคืนมาเนื่องจาก Thixotropic Processes และ Local Consolidation ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4

ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเวลาที่ควรทิ้งไว้หลังจากการคอกเสา เข็มมีดังนี้

MUKTABHANT (1975)

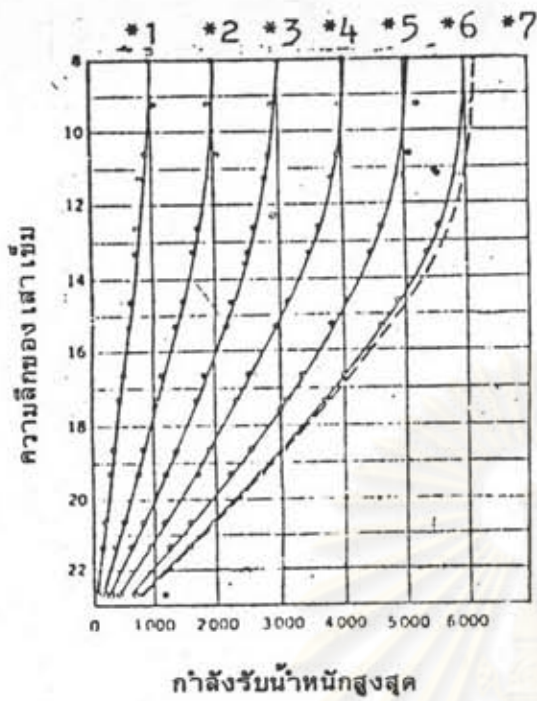
กำลังเฉือนของดินจะคืนมาในเวลา 14 วัน และแรงดันของน้ำในมวลดินจะกระจายไปในเวลา 1 เดือน สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ

SEED & REESE (1957)

กำลังของดินส่วนใหญ่จะคืนมาในเวลา 14 วัน

HOLMBERGS (1970)

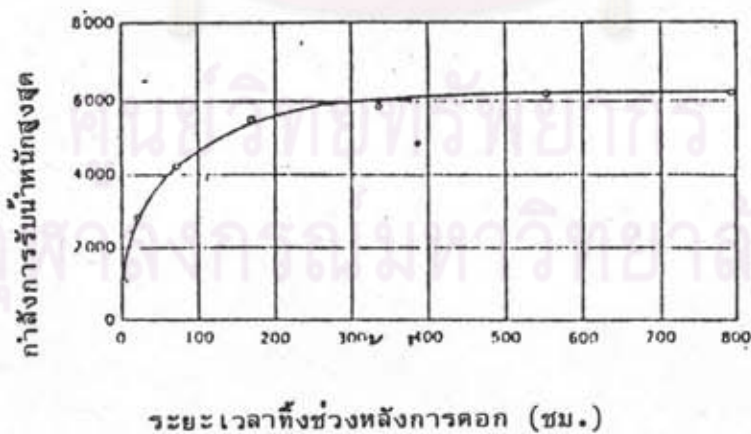
เวลาที่ทิ้งไว้หลังจากการคอกเสา เข็มควรเป็น 1-2 สัปดาห์



- * 1. ทดสอบหลังทิ้งช่วง 3 ชม.
- * 2. ทิ้งช่วง 18 วัน
- * 3. ทิ้งช่วง 3 วัน
- * 4. ทิ้งช่วง 7 วัน
- * 5. ทิ้งช่วง 14 วัน
- * 6. ทิ้งช่วง 28 วัน
- * 7. ทิ้งช่วง 33 วัน

- - น้ำหนักกดที่หัวเสาเข็ม
- - น้ำหนักจาก Strain Gage

รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายน้ำหนักจากเสาเข็มสู่ดิน (Seed & Reese, 1955)



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการรับน้ำหนักสูงสุดกับเวลา (Seed & Reese, 1957)

SIRIVONGSE (1972)

ควรรใช้เวลาประมาณ 20 วันที่ตั้งไว้ก่อนทดสอบเสาเข็ม

GEORGE & TOMLINSON (1976)

ระยะเวลาที่ควรทิ้งช่วงไว้ก่อนทดสอบเสาเข็มไม่ควรน้อยกว่า 2 สัปดาห์ แต่เวลาที่ควรรใช้ควรเป็น 1 เดือน

SASISUWAN (1972)

กำลังของดินจะกลับคืนมาในเวลา 2 สัปดาห์

ชนิดของวัสดุหรือผิวของเสาเข็ม

ผิวของเสาเข็มมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเกาะตัว เช่น

TOMLINSON (1957)

$$Q_s = M \cdot \alpha \cdot S_u \cdot A_s$$

เมื่อ M = ค่าตัวประกอบของผิวเสาเข็ม (Material Factor) สำหรับเหล็กมีค่า 0.7 (ไม่ได้ระบุว่าเป็นเสาเข็มรูปตัวเอช)

Danish Code for Foundation Design ให้ใช้ค่า $M = 0.7$

BROM (1970)

- a) เมื่อ $S_u < 5$ ตัน/ม²
สำหรับเหล็ก มีค่า $\alpha = 0.5$
- b) เมื่อ $S_u > 5$ ตัน/ม²
สำหรับเหล็ก มีค่า $\alpha = 1$ ตัน/ม²

POTYONDY, (1961)

ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของเหล็กในดินเหนียว มีค่าเท่ากับ 0.5 ในประเทศ
นอร์เวย์ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของเสาเข็มเหล็ก เท่ากับ 0.70

รูปร่างของเสาเข็ม

รูปร่างของเสาเข็มจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว เช่น จาก Danish Code
for Foundation Design

$$Q_s = \alpha \cdot S_u \cdot m \cdot s \cdot A_s$$

$$S = \text{Shape Factor}$$

ซึ่งค่า Shape Factor นี้มีค่าตามรูปร่างของเสาเข็ม

BROMS & HANSBO (1977)

แสดงให้เห็นว่า เสาเข็มปลายเรียว (Taper) จะมีแรงดันของดินด้านข้างเสาเข็มสูง
ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวมีค่าสูงกว่า

TOMLINSON (1970)

ก็ได้เขียนเน้นไว้ว่า เสาเข็มปลายเรียวจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวสูงกว่าเสาเข็ม
ที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

อัตราส่วนความชุกของเสาเข็มก็มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวด้วย เช่น จากกราฟ
รูปที่ 2.2 ของ TOMLINSON (1977) แสดงให้เห็นถึงผลของอัตราส่วนความชุกของเสาเข็มต่อ
ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว

วิธีการตอกเสาเข็ม

TOMLINSON (1957) กล่าวไว้ว่า การสูญเสียกำลังการยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม
ขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างผิวของดินกับเสาเข็มอันเกิดเนื่องจากการตอกเสาเข็ม

จากการศึกษาของ TOMLINSON พบว่า

ในเสาเข็มเจาะ มีค่า $\alpha = 0.28-0.32$ (เสาเข็มคอนกรีต)

เสาเข็มตอกด้วยลูกค้อน $\alpha = 0.60-0.85$

เสาเข็มกดด้วยแม่แรง $\alpha = 0.50-0.65$

ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของดินกรุงเทพฯ ที่ผ่านมา

RAHIM (1970) ในดินเหนียวอ่อน ค่า α เท่ากับ 1.02 และในดินเหนียวแข็ง เท่ากับ 0.73

(Unconfined Tests) สำหรับเสาเข็มคอนกรีต

WATANAWAHA (1971) ได้ค่า $\alpha = 0.63$ เมื่อ $S_u = 2.24$ ดัน/ม² (Field Vane Shear Tests)
สำหรับเสาเข็มไม้

PRAPAITRAKUL (1974) เสาเข็มคอนกรีตยาว 6.0 ม. ได้ค่า $\alpha = 0.53$ (Field Vane Shear Tests)

JUTTUNIRATSAI (1976) เสาเข็มคอนกรีตยาว 6.0 ม. ได้ค่า $\alpha = 0.4$ (Field Vane Shear Tests) ใช้ค่า N_c สูงกว่าของ PRAPAITRAKUL ทำให้ค่า α ต่ำกว่า

SRIMAHACHOTA (1977) เสาเข็มคอนกรีตยาว 6.0 ม. ได้ค่า $\alpha = 0.46-0.58$

CHIRUPPAPA (1981) $\alpha = 0.45-0.80$ ในชั้นดินเหนียวอ่อน (Unconfined Test) และ

$\alpha = 0.35-0.80$ ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Unconfined Test) จากเสาเข็มไมโคร
(ท่อเหล็ก)

2. การกระจายน้ำหนักของเสาเข็ม

เมื่อมีน้ำหนักกดที่หัวเสาเข็ม เสาเข็มจะเคลื่อนตัวลงสู่ดิน ในขณะที่เสาเข็มพยายามเคลื่อนตัวลงนี้จะเกิดแรงต้านทั้งที่ด้านข้างเสาและปลายเสาเข็ม เนื่องจากดินรอบและปลายเสาเข็ม จากความพยายามของดินที่จะต้านการจมของเสาเข็มนี้เอง จะเกิดการถ่ายแรงจากเสาเข็มสู่มวลดินโดยรอบ

VESIC (1977) กล่าวว่า ค่าการทรุดตัวของเสา เข็มที่ทำให้เกิดค่าแรงดันที่ปลายเสา เข็มสูงสุด มีค่ามากกว่า ค่าการทรุดตัวของเสา เข็มที่ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุดและค่าการทรุดตัวของเสา เข็มที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันที่ปลายเสา เข็มสูงสุดนี้มีค่าขึ้นอยู่กับค่าขนาดความกว้างของหน้าตัดที่ปลายเสา เข็ม และค่าการทรุดตัวนี้มีค่าประมาณ 8 % ของความกว้างของหน้าตัดที่ปลายเสา เข็มสำหรับเสา เข็มตอก ส่วนค่าการทรุดตัวที่ทำให้เกิดค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุดนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับชนิดของเสา เข็ม ดินและขนาดของเสา เข็ม และมีค่าประมาณ 10 มม.

TOMLINSON (1957) เขียนไว้ว่า ค่าความทรุดตัวที่ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุดมีค่าประมาณ 3-8 มม. และค่าการทรุดตัวที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันที่ปลายเสา เข็มสูงสุดมีค่ามากกว่าการทรุดตัวที่ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุด

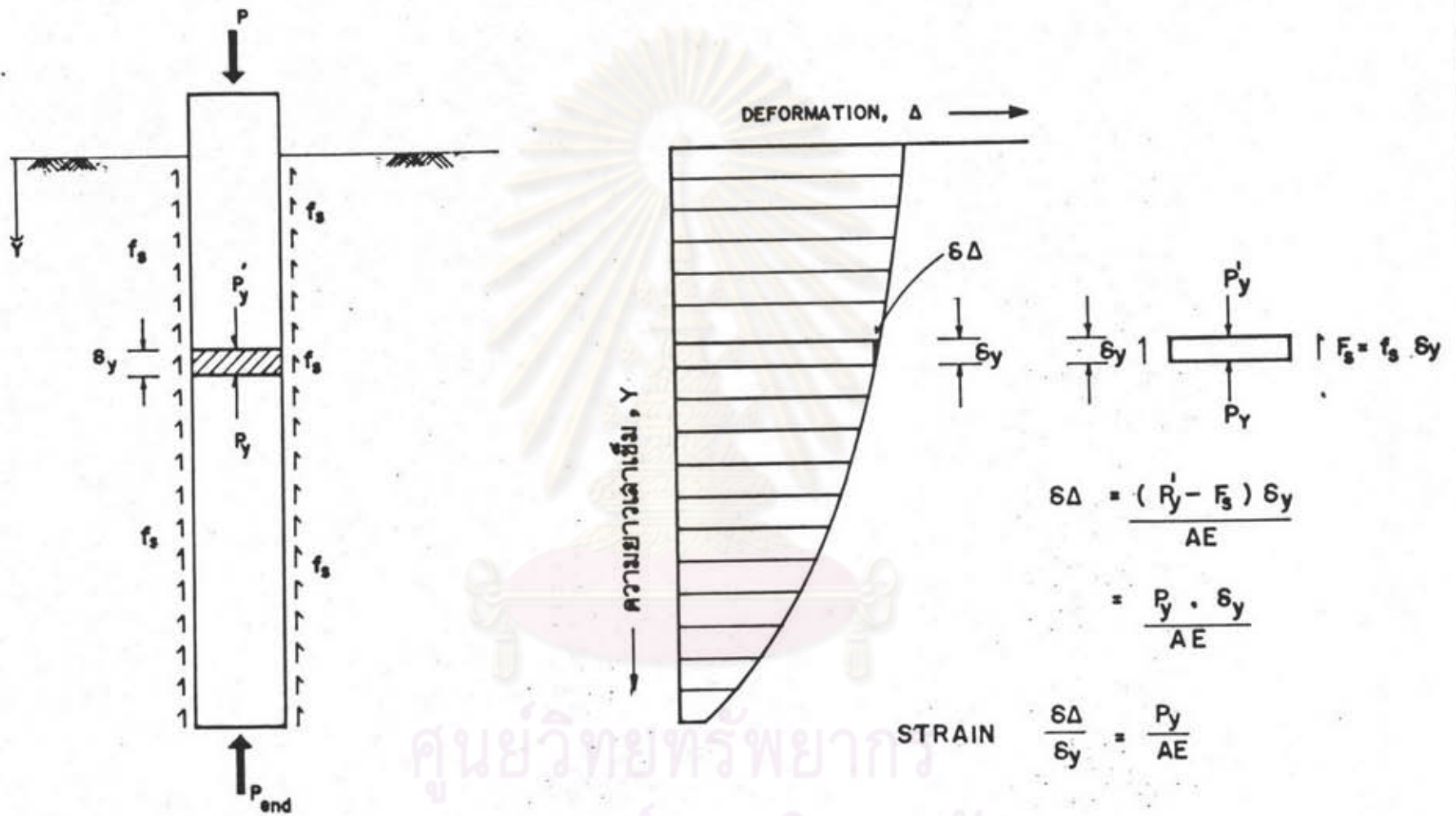
BROM (1970) "ค่าการทรุดตัว 2-5 มม. มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็ม เกิดขึ้นสูงสุดในชั้นดินเหนียว"

HOLMBERG (1970) "ค่าการทรุดตัว 5 มม. มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุด และขณะที่เกิดการพิบัติค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็มลดลงในขณะที่ค่าแรงดันที่ปลายเสา เข็มมีค่ามากขึ้นในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ"

TUNGBOONTERM (1977) จากผลการทดลองเสา เข็มคอนกรีตยาว 6.0 ม. เสา เข็มพิบัติที่ค่าการทรุดตัว 2-5 มม. ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

SIMON & MENZIES (1975) ได้ค่าการทรุดตัว 2-7 มม. ที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุด

ค่าแรงดันด้านข้างเสา เข็มสูงสุดจะเกิดก่อนที่เสา เข็มพิบัติและมีค่าลดลงเล็กน้อย (VESIC, 1977 และ HOLMBERG, 1970) ขณะที่เสา เข็มพิบัติแรงดันที่ปลายเข็มจะเกิดขึ้นเต็มที่ สำหรับในดินเหนียวนี้ จากการทดลองของ Reese et al (1969) ได้ผลว่าค่าแรงดันที่ปลายเสา เข็มมีค่าประมาณ 10-25 % ของแรงดันทั้งหมด



รูปที่ 2.5 แรงกระทำที่หน้าตัดในเดาเข็ม

จากรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาเสาเข็มเดี่ยวรับแรงตามแนวแกน มีแรงกระทำตามแนวแกน พิจารณาแรงกระทำที่ความยาวช่วงหนึ่งของเสาเข็ม โดยให้ค่าแรงด้านของดินด้านข้างเสาเข็มมีค่าคงที่หรือใช้ค่าเฉลี่ยเมื่อพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มคงที่ ผลต่างของแรงกระทำ Δ ภาคตัดใน (แนวระนาบ) ของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ $P'_Y - P_Y$ ค่าแรงนี้จะมีค่าเท่ากับค่าแรงด้านข้างเสาเข็มหรือมีค่าเท่ากับค่าแรงที่ถ่ายจากเสาเข็มสู่ดินรอบเสาเข็ม Δ ช่วงความยาวนั้น ๆ เมื่อพิจารณาที่จุด δy

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad E &= \frac{P/A}{\epsilon} \\ &= \frac{P'_Y - P_Y}{E \cdot A} \\ \frac{\delta \Delta}{\delta Y} &= \frac{(P'_Y - P_Y)}{AE} \\ \frac{\delta \Delta}{\delta Y} &= \frac{P_Y}{AE} \end{aligned}$$

จากสมการสามารถหาค่า P_Y ได้ เมื่อทราบค่าความเครียดของเสาเข็ม ซึ่งค่าความเครียดนี้สามารถหาค่าได้จากสะพานเกอชชนิดไฟฟ้าซึ่งติดตั้งไว้ที่เสาเข็ม

๑. หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในเสาเข็ม

ในการกดหรือตอกเสาเข็มลงสู่ดิน เมื่อมีแรงกดกระทำต่อเสาเข็มจะเกิดหน่วยแรงขึ้นในพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม Δ ภาคตัดต่าง ๆ ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมา ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของสถาบันต่าง ๆ ที่กำหนดไว้มีดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในเสาเข็ม (คัดลอกจากหนังสือ เสาเข็ม)

CODES	หน่วยแรงที่ยอมให้, ksc	ชนิดของเสาเข็ม
National bldg. Code, 1967	633	เสาเข็ม เหล็กรูปตัว เอ็ช และท่อ เหล็ก
Chicago Bldg. Code, 1967	844	เสาเข็ม เหล็กรูปตัว เอ็ช และท่อ เหล็ก
American Std. Blag. Code, 1952	633	เสาเข็ม เหล็กรูปตัว เอ็ช และท่อ เหล็ก ถ้าท่อ เหล็กบางกว่า 0.10"

CODE	หน่วยแรงที่ยอมให้, ksc	ชนิดของ เสာ เข็ม
AASHO Specifications, 1965	633	เสา เข็ม เหล็กรูปตัว เอ็ช และท่อ เหล็ก
Uniform Bldg. Code, 1964	844	เสา เข็ม เหล็กรูปตัว เอ็ช และท่อ เหล็ก

ในกรณีที่เสา เข็มมีความลึกมาก และฝังอยู่ในชั้นดินอ่อนมาก เมื่อมีแรงกดต่อเสา เข็มทำให้เกิดหน่วยแรงในเสา เข็มสูง ก็อาจทำให้เกิดการโก่งงอได้

จากการศึกษาที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาหลายครั้ง ยกตัวอย่างพอสังเขปได้ดังนี้ (คัดลอกจาก CHAIWINO, 1983)

1. TIMOSHENKO (1936) มีสมมุติฐานว่าไม่มีแรงต้านด้านข้างเสา เข็มและปลายเสา เข็มทั้งสองด้าน เป็นจุดหมุน

$$P_{cr} = P_E (n^2 + \beta^2/n^2)$$

เมื่อ $P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} =$ กำลังรับน้ำหนักของเสา เข็ม เมื่ออยู่ในอากาศ

$n =$ จำนวนลอนของการโก่งงอ

$$\beta^2 = \frac{KL^4}{\pi^4 EI}$$

$K =$ สัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของดิน

$L =$ ความยาวของเสา

$E =$ โมดูลัสความยืดหยุ่นของเสา เข็ม

$I =$ โมเมนต์ความเฉื่อยของภาคตัดของเสา เข็ม

2. CUMMING (1938) พิจารณาว่าค่าความต้านทานของดินด้านข้างตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าคงที่

$$P_{cr} = P_E (2m^2 + 2m + 1)$$

$$m^2(m+1)^2 = \frac{dK_h L^4}{4EI}$$

เมื่อ m = จำนวนลอนของการโค้งงอ

K_h = โมดูลัส ซับเกรด-รีแอคชั่น (Modulus of Subgrade Reaction)

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

d = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม

3. HETENYI (1946)

$$E_p I_p \left(\frac{d^4 \rho}{dz^4} \right) + \frac{P d^2 \rho}{dz^2} + K_h \rho = 0$$

เมื่อ ρ = ระยะโค้งด้านข้างของเสาเข็ม

p = น้ำหนักกดที่หัวเสาเข็ม

4. FRANCIS et.al. (1965)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{le^2}$$

เมื่อ le = เป็นความสัมพันธ์ของ l' แสดงไว้ในรูปที่ 2.6

$$l' = \pi R$$

$$R = \sqrt[4]{E_p I_p / k_h d}$$

5. BJERRUM (1957) ได้ใช้สมการของ TIMOSHENKO คำนวณน้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งงอของเสาเข็ม แสดงไว้ว่าการโก่งงอจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \left(m^2 + \frac{\beta l^4}{m^2 \pi^4 EI} \right) \quad (2.3)$$

- เมื่อ l = ความยาวของเสาเข็ม
 P = แรงกระทำตามแนวแกนเสาเข็ม
 m = จำนวนลอนของการโก่งงอ
 β = แรงต้านด้านข้างของดิน, แรง/ความยาว²

เมื่อค่าแรงต้านด้านข้างของดินน้อยมาก ค่า P ที่น้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $m = 1$ แต่เมื่อเพิ่มค่าแรงต้านด้านข้างของดินมากขึ้น ค่า P เมื่อ $m = 2$ จะน้อยกว่าค่าแรง P เมื่อ $m = 1$ ในขณะที่ค่า β เพิ่มขึ้นและค่า m เปลี่ยนจาก 1 เป็น 2 นี้ จะให้ค่าแรง P เท่ากัน จะได้ว่า

$$1 + \frac{\beta l^4}{\pi^4 EI} = 4 + \frac{\beta l^4}{4\pi^4 EI} \quad (2.3.1)$$

จะได้ว่า
$$\frac{\beta l^4}{\pi^4 EI} = 4 \quad (2.3.2)$$

เมื่อเพิ่มค่า β จะทำให้ค่า m มีค่ามากขึ้นจาก 1, 2, 3, 4, ... เมื่อค่า β เพิ่มขึ้น ค่า m เปลี่ยนเป็น $m+1$ จากสมการ 2.3 จะได้ว่า

$$m^2 + \frac{\beta l^4}{\pi^4 EI} = (m+1)^2 + \frac{\beta l^4}{(m+1)^2 \pi^4 EI} \quad (2.3.4)$$

จะได้ว่า
$$\frac{\beta l^4}{\pi^4 EI} = m^2 (m+1)^2 \quad (2.3.5)$$

เมื่อ β มากขึ้น ค่า 1 มีค่าน้อยไม่น่ามาคิดจะได้

$$\frac{\beta l^4}{\pi^4 EI} = m^4 \quad (2.3.6)$$

แทนค่า β ลงในสมการ 2.3 จะได้

$$P_{cr} = 2\sqrt{EI\beta} \quad (2.3.7)$$

แต่ $P_{cr} = \sigma_{max} \cdot A$

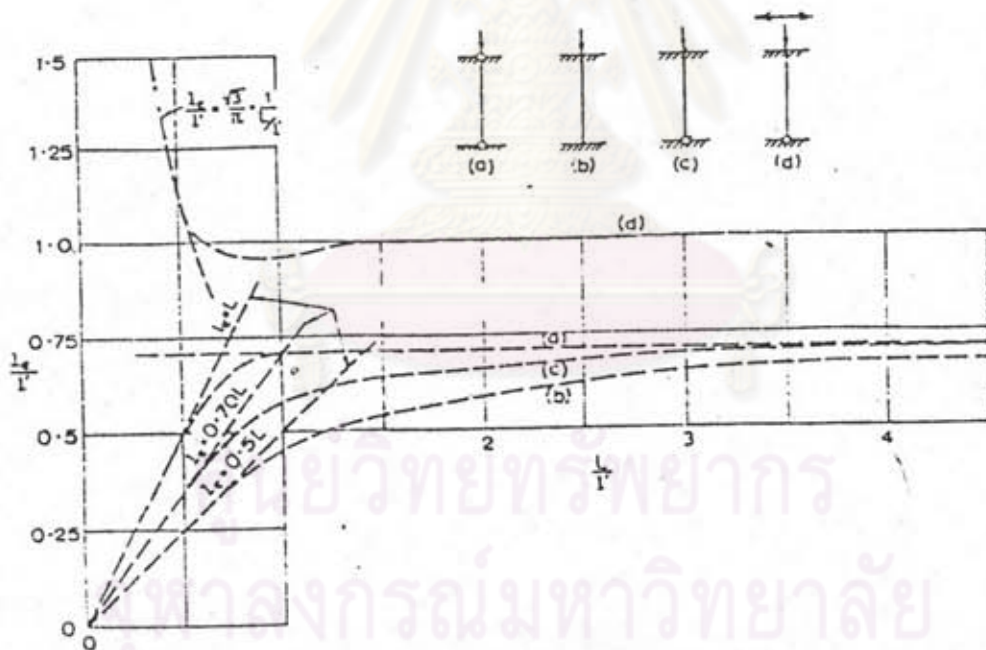
จากสมการ 2.3.7 จะได้

$$\sigma_{max.} = \frac{2\sqrt{EI\beta}}{A} \quad (2.3.8)$$

$\sigma_{max.}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุที่ใช้ทำเสา เข็ม เนื่องจากการโก่งงอ

A = พื้นที่หน้าตัดของเสา เข็ม

จากสูตรของ BJERRUM (1957) เมื่อนำมาคำนวณการทดสอบเสา เข็มครั้งนี้แล้ว เสา เข็มมีความแข็งแรงพอที่จะไม่เกิดการโก่งงอเนื่องจากน้ำหนักสูงสุดของการทดลอง เสา เข็มครั้งนี้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ l_e/l' กับ P/P_{cr}

(Francis et al, 1965)

4. การทดสอบเสาเข็ม



การทดสอบเสาเข็มโดยทั่วไปมีจุดประสงค์¹ คือ

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการทรุดตัว (Load-Settlement Relation) โดยเฉพาะในช่วงน้ำหนักใช้งานที่คาดไว้ ความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะช่วยในการประมาณค่าการทรุดตัว สำหรับการออกแบบฐานราก
2. เพื่อพิจารณาหากำลังรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Bearing Capacity) จริงของเสาเข็มในดิน บริเวณที่ทำการก่อสร้าง ซึ่งเป็นประโยชน์ในการคิดอัตราส่วนปลอดภัย (Safety Factor)
3. เพื่อการ เปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสูตรทางทฤษฎี

วิธีที่ใช้ทดสอบเสาเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. การทดสอบด้วยน้ำหนักคงตัว (Maintained Load Test)

การทดสอบวิธีนี้กระทำโดยการ เพิ่มน้ำหนักเป็นขั้น ๆ น้ำหนักในแต่ละขั้นจะถูกรักษาให้คงที่อยู่จนกระทั่งการทรุดตัวของเสาเข็มที่เกิดขึ้น มีท่าที่จะหยุดลง แล้วจึงเพิ่มน้ำหนักต่อไปจนถึงแรงพิบัติ เสาเข็ม หรือน้ำหนักที่ต้องการ การทดสอบแบบนี้ยังแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

4.1 การทดสอบด้วยน้ำหนักคงตัวช้า (Slow Maintained Load Test) จาก ASTM Designation D 1143-74 ให้แบ่งการเพิ่มน้ำหนักทดสอบ เป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กันโดยทดสอบจนกระทั่งถึงน้ำหนักเท่ากับ 200 % ของน้ำหนักที่ใช้ออกแบบหรือน้ำหนักที่จะใช้งานของเสาเข็ม การเพิ่มน้ำหนักทดสอบแต่ละครั้งให้คงไว้จนอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าน้อยกว่า 0.01 นิ้ว/ชั่วโมง หรือกอน้ำหนักกระทำไว้ 2 ชั่วโมง แล้วแต่อย่างใดจะเกิดขึ้นก่อน

1 หักลอกจากหนังสือ เสาเข็ม ดร. นระ คมนานุล (1981)

เมื่อน้ำหนักทดสอบเท่ากับ 200 % ของน้ำหนักที่ใช้ออกแบบแล้ว ยังไม่เกิดการพิบัติให้คองน้ำหนักกระทำไว้ อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

การลดน้ำหนักทดสอบให้ลดครั้งละ $\frac{1}{4}$ ของน้ำหนักทดสอบทั้งหมด

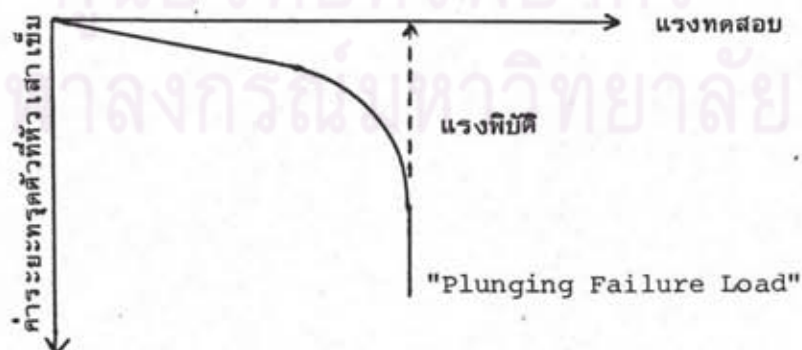
4.2 การทดสอบด้วยน้ำหนักคงตัวไว (Quick Maintained Load Test)

จาก ASTM Designation D 1143-74 แนะนำให้เพิ่มน้ำหนักครั้งละ 5-10 คัน และคองน้ำหนักทดสอบในการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งประมาณ $2 \frac{1}{2}$ นาที เพิ่มน้ำหนักขึ้นจนเสาเข็มพิบัติแล้วทิ้งไว้ 5 นาที จึงนำน้ำหนักทดสอบออก

จาก ASTM Designation D 1143-81 แนะนำให้เพิ่มน้ำหนักทดสอบครั้งละ 10 ถึง 15 % ของน้ำหนักที่ใช้ออกแบบเสาเข็ม โดยคองน้ำหนักทดสอบไว้ในการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งประมาณ $2 \frac{1}{2}$ นาที หรือจะกำหนดเป็นอย่างอื่น เมื่อถึงน้ำหนักทดสอบสูงสุดแล้วหลังจากนั้น 5 นาที ให้นำน้ำหนักทดสอบออก

การทดสอบด้วยน้ำหนักคงตัวไวนี้ The Texas Highway Department ได้เริ่มศึกษาในปี 1963 โดยเปรียบเทียบกับผลของ CRP Test และนำมาใช้เป็นมาตรฐานในปี 1965 และได้รับการปรับปรุงเรื่อยมาจนถึง ASTM D 1143-74 (75)

การทดสอบเสาเข็มจนพิบัติ โดยในขณะที่เสาเข็มพิบัตินี้ น้ำหนักทดสอบของเสาเข็มจะคงที่ แต่การทรุดตัวของเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ น้ำหนักทดสอบนี้เรียกว่า "Plunging Failure Load" (FULLER & HOY, 1970)



รูปที่ 2.7 การพิบัติของเสาเข็มแบบ Plunging Failure (Fuller & Hoy, 1970)

เนื่องจากการทดสอบด้วยน้ำหนักคงตัวไว้ ประหยัดทั้งเวลา ค่าใช้จ่ายและยังเป็นวิธีการที่ได้มาตรฐาน ในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้วิธีการทดสอบเสา เข็มด้วยวิธีทดสอบด้วยน้ำหนักถ่วงไว้

4.3 การทดสอบด้วยอัตราการทรุดตัวคงที่ (Constant Rate of Penetration Test, CRP)

วิธีนี้เสา เข็มจะถูกกดให้จมลงไปในดินด้วยอัตราความเร็วคงตัว การทดสอบวิธีนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักหับติของเสา เข็มซึ่งรับโดยดินรอบเสา เข็ม

จาก ASTM Designation D 1143-74 อัตราการทรุดตัวของเสา เข็มควรจะเท่ากับ 0.01 ถึง 0.05 นิ้วต่อนาที สำหรับดินเหนียว และควรจะเท่ากับ 0.03 ถึง 0.10 นิ้วต่อนาที สำหรับดินเม็ดทราย (Granular Soils) หรือกำหนดเป็นอย่างอื่น

การทดสอบเสา เข็มจะกระทำจนน้ำหนักทดสอบมีค่ามากที่สุด หรือมีค่าการทรุดตัวอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 15 % ของความกว้างหรือ เส้นทะแยงมุมของเสา เข็ม

4.4 การทดสอบด้วยวิธีสภาวะสมดุลย์ (Method of Equilibrium)

ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ MOHAN (1967) ได้เสนอวิธีทดสอบไว้โดยเพิ่มน้ำหนักทดสอบครั้งละ 10 % ของน้ำหนักที่ใช้ออกแบบใช้เวลาในการเพิ่มน้ำหนัก 3 ถึง 5 นาที และปล่อยให้ไว้ประมาณ 5 นาที น้ำหนักทดสอบจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการทรุดตัวของเสา เข็มจากนั้นจึงเพิ่มน้ำหนักทดสอบต่อไป ในขณะที่น้ำหนักทดสอบสูงให้คงน้ำหนักไว้ประมาณ 10-15 นาที ก่อนที่จะปล่อยให้น้ำหนักทดสอบลดลง เนื่องจากการทรุดตัวของหัวเสา เข็ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย