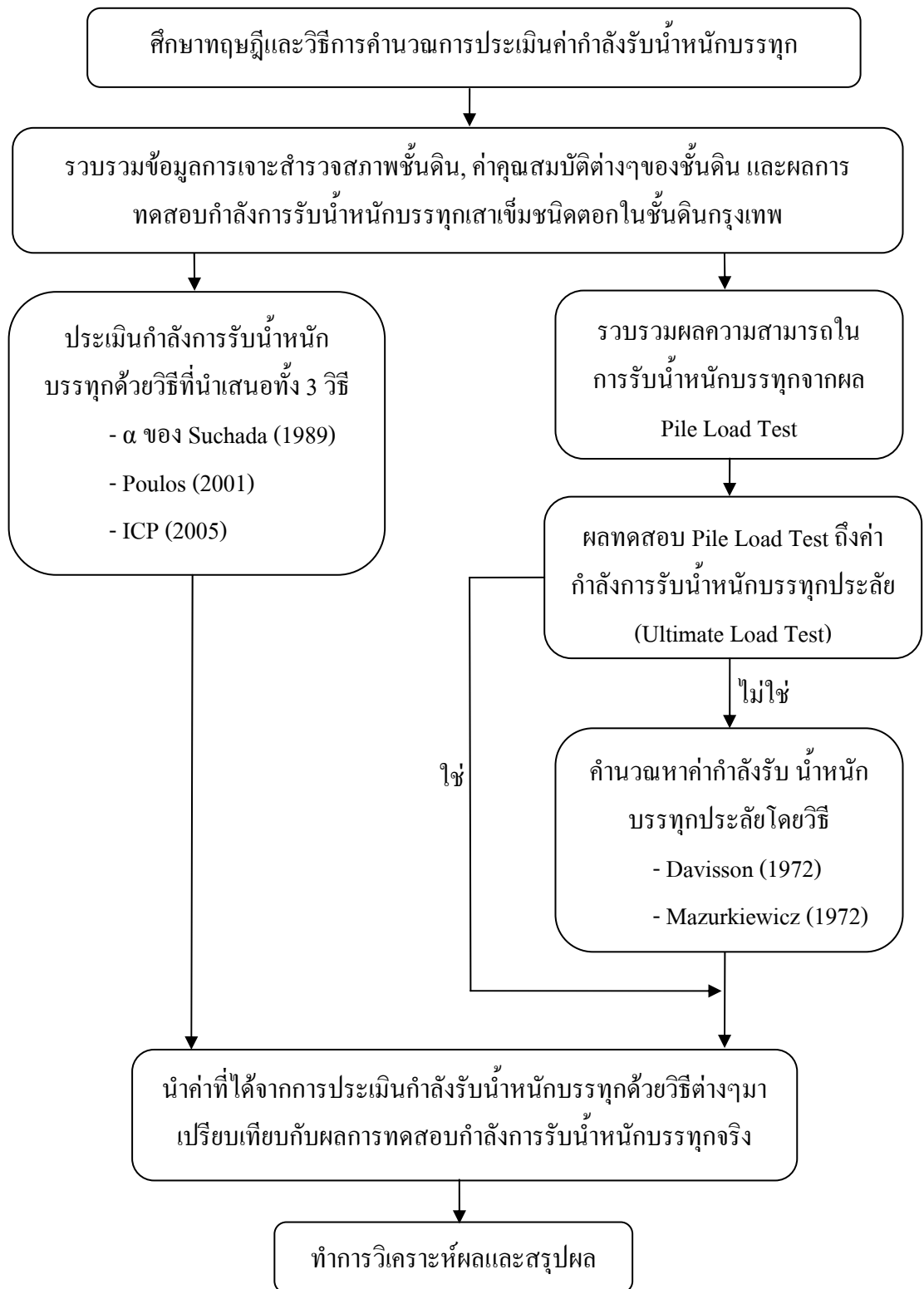


บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิธีการประเมินน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มชนิดตอกด้วยวิธีต่างๆจากข้อมูลดินในกรุงเทพ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มจริงที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยวิธี Static Load Test โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูลชั้นดินและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินกรุงเทพรวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของชั้นดิน
2. รวบรวมผลการทดสอบ Pile Load Test เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวชนิดตอก
3. กรณีผลการทดสอบ Pile Load Test ไม่ถึงค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ต้องทำการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากกราฟ โดยวิธี Davisson (1972) และวิธี Mazurkiewicz (1972)
4. คำนวณหาค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มตอกจากวิธีความเค้นรวมโดย α ของ Suchada (1989), Poulos (2001) และ ICP
5. นำเสนอค่าประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก

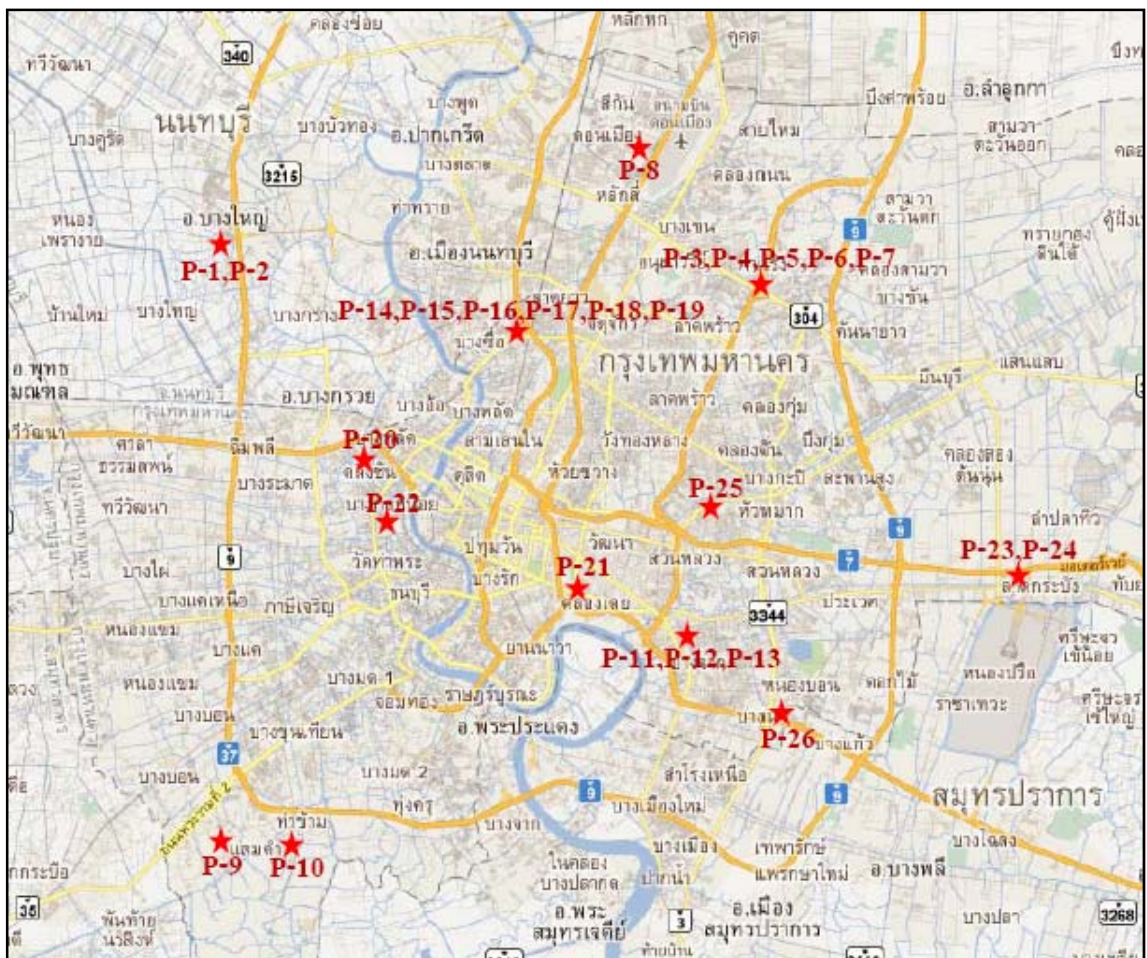


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

3.2 รวบรวมข้อมูลและเอกสารการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

3.2.1 รวบรวมข้อมูลลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการ

การรวบรวมข้อมูลชั้นดินสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้ในการประเมินค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของชั้นดินได้ทำการรวบรวมข้อมูลโดยการขอข้อมูลจากบริษัทที่ทำการทดสอบ Pile Load Test ซึ่งได้มีการเจาะสำรวจชั้นดินก่อนการดำเนินการทดสอบดังกล่าว ดังได้แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินไว้ในภาคผนวก ค. ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 26 หลุมเจาะ ตามสถานที่ที่ได้ทำการทดสอบ Pile Load Test กระจายอยู่ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงตำแหน่งข้อมูลการเจาะสำรวจและการทดสอบ Pile Load Test ของโครงการที่
ทำการศึกษา

3.2.2 รวบรวมข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่ทำการทดสอบในกรุงเทพ จากบริษัทที่ทำการทดสอบ โดยเฉพาะ มีรายละเอียดเบื้องต้นของเสาเข็ม เช่น ชื่อโครงการ รูปร่าง ชนิด ขนาดและความยาวของ

เสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ น้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบในสนาม ข้อมูลชั้นดินบริเวณสถานที่ทำการทดสอบ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลและผลการทดสอบค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มชนิดตอกด้วยวิธี
สถิตยศาสตร์

ลำดับ ที่	โครงการ	ความ ยาว (ม.)	ขนาด เข็ม (ม.)	ชนิด เข็ม	น้ำหนัก ทดลอง (ตัน)	น้ำหนัก ออกแบบ (ตัน)
P-1	อาคารจอดรถไฟฟ้าสายสีม่วง บางใหญ่	30.00	0.60	Spun	300.00	120.00
P-2	อาคารจอดรถไฟฟ้าสายสีม่วง บางใหญ่	27.00	0.60	Spun	300.00	120.00
P-3	ทางพิเศษสายรามอินทรา – วง แหวนรอบนอก ถ.รามอินทรา	22.74	0.60	Spun	375.00	125.00
P-4	ทางพิเศษสายรามอินทรา – วง แหวนรอบนอก ถ.รามอินทรา	22.22	0.60	Spun	375.00	125.00
P-5	ทางพิเศษสายรามอินทรา – วง แหวนรอบนอก ถ.รามอินทรา	32.20	0.60	Spun	375.00	125.00
P-6	ทางพิเศษสายรามอินทรา – วง แหวนรอบนอก ถ.รามอินทรา	33.53	0.80	Spun	750.00	250.00
P-7	ทางพิเศษสายรามอินทรา – วง แหวนรอบนอก ถ.รามอินทรา	33.23	0.60	Spun	375.00	125.00
P-8	อาคารฝึกและทดสอบสมรรถภาพ ทางทหาร คอนกรีต	19.00	0.26	I	60.00	30.00
P-9	บ้านเอื้ออาทร แสมดำ 17	20.50	0.30	I	105.00	42.00
P-10	บ้านเอื้ออาทร บางขุนเทียน 3 ซอยเทียนทะเล 28	22.10	0.35	I	125.00	50.00
P-11	Tree Condo สุขุมวิท 52	23.00	0.40	I	125.00	50.00
P-12	Tree Condo สุขุมวิท 52	23.00	0.40	I	125.00	50.00
P-13	Tree Condo สุขุมวิท 52	23.00	0.40	□	125.00	50.00
P-14	Expansion of Bangkhen Water Treatment	25.00	0.35	□	150.00	60.00

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลและผลการทดสอบค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มชนิดตอกด้วยวิธี
สถิตยศาสตร์ (ต่อ)

ลำดับ ที่	โครงการ	ความ ยาว (ม.)	ขนาด เข็ม (ม.)	ชนิด เข็ม	น้ำหนัก ทดลอง (ตัน)	น้ำหนัก บรรทุกแบบ (ตัน)
P-15	Expansion of Bangkhen Water Treatment	21.00	0.35	□	150.00	60.00
P-16	Expansion of Bangkhen Water Treatment	18.87	0.35	□	150.00	60.00
P-17	Expansion of Bangkhen Water Treatment	19.75	0.35	□	175.00	70.00
P-18	Expansion of Bangkhen Water Treatment	16.20	0.40	□	175.00	70.00
P-19	Expansion of Bangkhen Water Treatment	19.80	0.40	□	175.00	70.00
P-20	อาคารสำนักงานอัยการตลิ่งชัน	18.81	0.35	Spun	80.00	40.00
P-21	อาคารสำนักงาน 9 ชั้น กรม ศุลกากร คลองเตย	25.30	0.60	Spun	180.00	90.00
P-22	อาคารบัญชาการกองทัพอากาศและ อาคารจอดรถ ถ.อิสรภาพ บางกอกน้อย	27.00	0.60	Spun	250.00	100.00
P-23	อาคารปฏิบัติการกลางด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สจล. ลาดกระบัง	29.50	0.60	Spun	240.00	120.00
P-24	อาคารเรียนรวมและห้อง เอนกประสงค์ สำนักงาน อธิการบดี สจล. ลาดกระบัง	26.20	0.60	Spun	250.00	100.00
P-25	อาคารเรียน 12 ชั้น คณะรัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก	38.00	0.60	Spun	375.00	150.00
P-26	Index Living Mall บางนา	29.00	0.60	Spun	300.00	120.00

3.3 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยทั่วไปนั้นกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม (Q_s) และ แรงดันที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) ดังได้แสดงในสมการ 3.1

$$Q_u = Q_s + Q_b \quad (3.1)$$

เมื่อ

Q_u = กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Capacity)

Q_s = แรงต้านทานผิวเสาเข็ม (Skin Friction)

Q_b = แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)

การคำนวณแรงต้านทานผิวเสาเข็ม (Q_s) สามารถทำการคำนวณได้หลายวิธีซึ่งลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันก็มีค่าคุณสมบัติต่างๆแตกต่างกันออกไป ส่วนการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มสามารถคำนวณได้โดยแบ่งออกเป็น

$$Q_b = N_c \cdot Su \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียว}) \quad (3.2)$$

$$Q_b = N_q \cdot \sigma'_{vo} \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทราย}) \quad (3.3)$$

เมื่อ

N_c and N_q = สัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก (Bearing Capacity Factor)

Su = ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

σ'_{vo} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Effective Overburden Pressure)

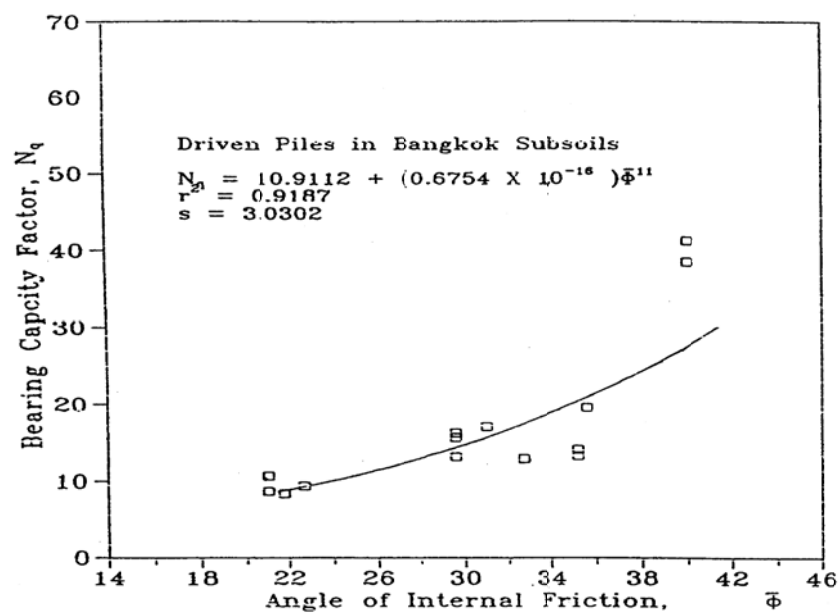
A_b = พื้นที่หน้าตัดบริเวณปลายเสาเข็ม

จากสมการข้างต้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆในที่นี้สามารถหาได้จากรูปแบบที่นำเสนอ 2 รูปแบบ ดังตารางที่ 3.1

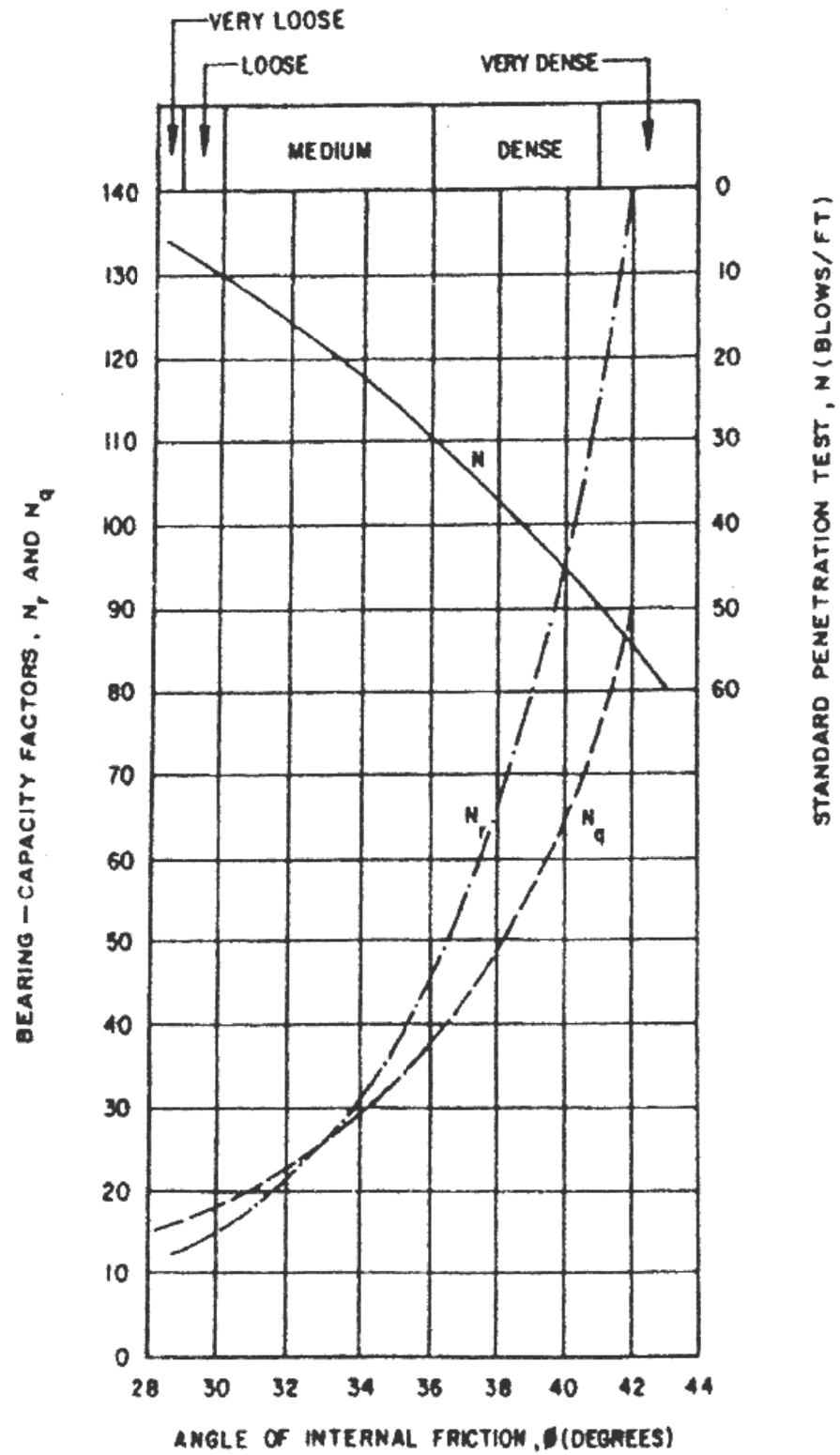
ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของชั้นดิน

พารามิเตอร์	การคำนวณ
$N_{\text{correct(clay)}}$	-
$N_{\text{correct(sand)}}$	$15 + 0.5(N-15)$
$S_u \text{ (t/m}^2\text{)}$	$q_u = 1.37N_{\text{correct}}$
N_c	9 (Meyerhof, 1976)
N_q	$N_q = 10.9 + (0.6754 \times 10^{-16}) \bar{\phi}^{11}$ (Suchada, 1989) (รูปที่ 3.3)
ϕ	(Peck, et.al, 1948) (รูปที่ 3.4)

เมื่อ N = ค่า Standard Penetration จากการเก็บข้อมูลในสนาม
 N_{correct} = ค่าปรับแก้ Standard Penetration
 ϕ = มุมเสียดทาน (Friction Angle)



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน ϕ กับสัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก, N_q สำหรับเสาเข็มตอก (ข้อมูลจาก : Suchada, 1989)



รูปที่ 3.4 กราฟประเมินค่า ϕ โดย Peck, et al. (Peck, 1948)

3.3.1 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีความเค้นรวมโดย α ของ Suchada (1989)

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดินที่ถูกนำไปใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะได้มาจากข้อมูลการเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring Log) ซึ่งประกอบไปด้วย หน่วยน้ำหนักดิน (γ) ได้จากการเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของชั้นดินจากผลการเจาะสำรวจ (Boring Log), ค่า Standard Penetration (N) ได้มาจากการทดสอบในสนาม, ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ได้จากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) หรือหาได้จากการประมาณค่า Standard Penetration ดังสมการที่ 3.4

$$q_u = N_{\text{correct}} \times 13.7 \quad (\text{กิโลนิวตัน/ตร.ม.}) \quad (3.4)$$

ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จากสมการข้างต้นโดย Stroud (Stroud, 1974) ส่วนค่า N คือ ค่า Standard Penetration ที่ได้จากการทดสอบในสนามแล้วนำมาปรับแก้ด้วยสมการที่ 3.5

$$N_{\text{correct}} = 15 + 0.5(N-15) \quad (3.5)$$

Peck, et al. ได้นำเสนอการประมาณค่าของ ϕ (Peck, et al, 1948) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4

2. คำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction)

สำหรับชั้นดินเหนียว จากสมการ

$$Q_s = \alpha \cdot S_u \cdot A_p \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$A_p = \text{พื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม}$$

$$\alpha = \text{สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor)}$$

$$S_u = \text{ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)}$$

สัมประสิทธิ์การยึดเกาะในที่นี้พิจารณาโดยใช้สมการของ Suchada $\alpha = 0.9375e^{-0.0535S_u}$

สำหรับชั้นทราย จากสมการ

$$Q_s = \sigma'_{vo} \cdot K_s \tan \delta \cdot A_s \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$\sigma'_{vo} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Effective Overburden Pressure)}$$

$$K_s = (1 - \sin \phi)$$

$$\tan \delta = \tan(0.75\phi)$$

$$A_s = \text{พื้นที่รอบรูปของเสาเข็ม}$$

3. รวมผลการคำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ของแต่ละชั้นดินตลอดความยาวของเสาเข็มเป็นค่าแรงต้านทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม (Q_s)

4. คำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) จากสมการ

$$Q_b = N_c \cdot Su \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียว}) \quad (3.8)$$

$$Q_b = N_q \cdot \sigma'_{vo} \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทราย}) \quad (3.9)$$

5. คำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Capacity) ของชั้นดินจากสมการ

$$Q_u = Q_s + Q_b - W \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Q_u &= \text{กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Capacity)} \\ Q_s &= \text{แรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction)} \\ Q_b &= \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)} \\ W &= \text{น้ำหนักของเสาเข็ม} \end{aligned}$$

ใช้ Q_p ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มจากชั้นดินแทน Q_u

3.3.2 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดย Poulos (2001)

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดินที่ถูกนำไปใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะได้มาจากการเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring Log) ซึ่งประกอบไปด้วย หน่วยน้ำหนักดิน (γ) ได้จากการเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของชั้นดินจากผลการเจาะสำรวจ (Boring Log), ค่า Standard Penetration (N) ได้มาจากการทดสอบในสนาม, ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ได้จากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) หรือหาได้จากการประมาณค่า Standard Penetration ดังสมการที่ 3.11

$$q_u = N_{\text{correct}} \times 13.7 \quad (\text{กิโลนิวตัน/ตร.ม.}) \quad (3.11)$$

ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จากสมการข้างต้นโดย Stroud (Stroud, 1974) ส่วนค่า N คือ ค่า Standard Penetration ที่ได้จากการทดสอบในสนามแล้วนำมาปรับแก้ด้วยสมการที่ 3.12

$$N_{\text{correct}} = 15 + 0.5(N-15) \quad (3.12)$$

Peck, et al. ได้นำเสนอการประมาณค่าของ ϕ (Peck, et al, 1948) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4

2. คำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ในชั้นดินเหนียว จากสมการ

$$Q_s = \alpha \cdot Su \cdot F1 \cdot A_p \quad (3.13)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A_p &= \text{พื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม} \\ Su &= \text{ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F1 &= \text{สัมประสิทธิ์การปรับลดเนื่องจากความชะลูดของเสาเข็ม} \\
 &\quad (\text{Reduction Factor for Pile Slenderness}) \\
 &= 1 \quad \text{เมื่อ } L/d < 50 \\
 &= 0.7 \quad \text{เมื่อ } L/d > 120 \\
 \alpha &= \text{สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion factor) ของ Poulos} \\
 &= 0.5/(Su/\sigma'_v)^{1/2} \quad \text{เมื่อ } Su/\sigma'_v < 1 \\
 &= 0.5/(Su/\sigma'_v)^{1/4} \quad \text{เมื่อ } Su/\sigma'_v > 1
 \end{aligned}$$

คำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ในชั้นทราย จากสมการ

$$Q_s = \sigma'_{vo} \cdot K_s \tan \delta A_p \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \sigma'_{vo} &= \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure)} \\
 K_s &= (1 - \sin \phi) \\
 \tan \delta &= \tan(0.75\phi) \\
 A_p &= \text{พื้นที่รอบรูปของเสาเข็ม}
 \end{aligned}$$

3. รวมผลการคำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ของแต่ละชั้นดินตลอดความยาวของเสาเข็มเป็นค่าแรงต้านทานประลัษที่ผิวเสาเข็ม (Q_s)

4. คำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) จากสมการ

$$Q_b = N_c \cdot Su \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียว}) \quad (3.15)$$

$$Q_b = N_q \sigma'_{vo} A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทราย}) \quad (3.16)$$

5. คำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็ม (Ultimate Capacity) ของชั้นดินจากสมการ

$$Q_u = Q_s + Q_b - W \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 Q_u &= \text{กำลังรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็ม (Ultimate Capacity)} \\
 Q_s &= \text{แรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction)} \\
 Q_b &= \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)} \\
 W &= \text{น้ำหนักของเสาเข็ม}
 \end{aligned}$$

ใช้ Q_p ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็มจากชั้นดินแทน Q_u

3.3.3 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธี ICP

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดินที่ถูกนำไปใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะได้มาจากข้อมูลการเจาะสำรวจของชั้นดิน (Boring Log) ซึ่งประกอบไปด้วย หน่วยน้ำหนักดิน (γ) ได้จากการเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของชั้นดินจากผลการเจาะสำรวจ (Boring Log), ค่า Standard Penetration (N) ได้มาจากการทดสอบในสนาม, ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ได้จากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) หรือหาได้จากการประมาณค่า Standard Penetration ดังสมการที่ 3.18

$$q_u = N_{\text{correct}} \times 13.7 \quad (\text{กิโลนิวตัน/ตร.ม.}) \quad (3.18)$$

ค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จากสมการข้างต้นโดย Stroud (Stroud, 1974) ส่วนค่า N คือ ค่า Standard Penetration ที่ได้จากการทดสอบในสนามแล้วนำมาปรับแก้ด้วยสมการที่ 3.19

$$N_{\text{correct}} = 15 + 0.5(N-15) \quad (3.19)$$

Peck, et al. ได้นำเสนอการประมาณค่าของ ϕ (Peck, et al, 1948) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4

2. วิธี ICP ต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ ค่าความไว (Sensitivity, S_t), มุมเสียดทาน (Friction angle, ϕ) และอัตราส่วนความเค้นจุดคลาก (Yield stress ratio, YSR)

โดย

S_t มีค่าอยู่ในช่วง 1 - 4.62 (Kiatphongsa, 2005)

ϕ มีค่าอยู่ในช่วง 23° ถึง 28° สำหรับดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็ง (Uchaipichat, 1988), (Navaneethan, 1999), (Noulmanee, 2001)

YSR ถูกสมมุติให้เป็นค่าคงที่ที่อยู่ในช่วง 2.75 – 5.5 สำหรับดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็ง (Uchaipichat, 1988), (Navaneethan, 1999), (Noulmanee, 2001)

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นสำหรับดินเหนียวกรุงเทพดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

3. คำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) จากสมการ $Q_s = \tau_{\text{zf}} A_p$ โดย A_p คือพื้นที่ผิวของเสาเข็ม และ τ_{zf} คำนวณได้จากสมการ

$$\tau_{\text{zf}} = \sigma'_{\text{rf}} \tan \delta_f \quad (3.20)$$

$$\sigma'_{\text{rf}} = 0.8 \sigma'_{\text{rc}} \quad (3.21)$$

$$\sigma'_{\text{rc}} = K_c \cdot \sigma'_{\text{vo}} \quad (3.22)$$

$$K_c = (2.2 + 0.016 \text{YSR} - 0.87 \Delta I_{\text{vy}}) \text{YSR}^{0.42} (h/R^*)^{-0.20} \quad (3.23)$$

$$\Delta I_{\text{vy}} = \log S_t \quad (3.24)$$

$$R^* = b/\sqrt{\pi} \quad (3.25)$$

เมื่อ

h	=	ความลึกของเสาเข็ม
b	=	ด้านกว้างของเสาเข็ม
S_t	=	การตอบสนองความไว
YSR	=	อัตราส่วนความเค้นจุดกลาง

4. รวมผลการคำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ของแต่ละชั้นดินตลอดความยาวของเสาเข็มเป็นค่าแรงต้านทานประลัยที่ผิวเสาเข็ม (Q_s)

5. คำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) จากสมการ

$$Q_b = N_c \cdot S_u \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มห้อยในชั้นดินเหนียว}) \quad (3.26)$$

$$Q_b = N_q \cdot \sigma'_{vo} \cdot A_b \quad (\text{ปลายเสาเข็มห้อยในชั้นทราย}) \quad (3.27)$$

6. คำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Capacity) ของชั้นดินจากสมการ

$$Q_u = Q_s + Q_b - W \quad (3.28)$$

เมื่อ

Q_u	=	กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Capacity)
Q_s	=	แรงต้านทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction)
Q_b	=	แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)
W	=	น้ำหนักของเสาเข็ม

ใช้ Q_p ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มจากชั้นดินแทน Q_u

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ ϕ , YSR (Uchaipichat, 1988), (Navaneethan, 1999), (Noulmanee, 2001)

และ S_t (Kiatphongsa, 2005) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

ความชื้นเหลว	SPT	Su (ตัน/ตร.ม.)	S_t	YSR	ϕ
อ่อนมาก	0-2	<1.25	4.62	2.75	23
อ่อน	2-4	1.25-2.5	5	3	23
ปานกลาง	4-8	2.5-5	8	4	26
เหนียว	8-15	5-10	10	4.5	26
เหนียวมาก	15-30	10-20	12	5	28
แข็ง	>30	>20	16	5.5	28
ทราย	all	-	1.00	5.5	(รูปที่ 3.4)

3.4 การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่จุดพิบัติจากผลการทดสอบ

น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าดิน คือ น้ำหนักกระทำซึ่งทำให้เสาเข็มจมลงในดินหรือเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วเมื่อแรงกระทำคงที่ อย่างไรก็ตาม การทำให้เสาเข็มจมลงไปในดินเป็นการเคลื่อนตัวอย่างมากและอาจต้องใช้น้ำหนักกระทำที่มากกว่าค่าที่ยอมรับได้ของเสาเข็มและดิน คำนิยามอื่นๆของการวิบัติ คือ การพิจารณาค่าการทรุดตัวที่ค่าใดค่าหนึ่ง เช่น จะถือว่าเสาเข็มวิบัติเมื่อหัวเสาเข็มเคลื่อนตัวลงไปเท่ากับ 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม หรือน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เสาเข็มวิบัติที่จุดตัดระหว่างเส้นสัมผัสกราฟการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงแรกกับเส้นสัมผัสหรือส่วนขยายกราฟในช่วงหลัง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเอาวิธีการแปลผลการทดสอบ Pile Load Test ด้วยวิธี Davisson (1972) และ Mazurkiewicz (1972) โดยจะคำนึงถึงความเหมาะสมจากข้อมูลผลการทดลองในการนำวิธีใดมาใช้หาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย

3.4.1 การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธี Davisson (1972)

วิธี Davisson (1972) ได้เสนอวิธีการเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load) ของเสาเข็ม โดยพิจารณาให้เสาเข็มนั้นเป็นชนิดรับแรงด้านที่ปลายเข็ม และกำหนดให้ปลายเสาอิสระ (Free-Standard Column) คำนวณหา Elastic Shortening ของเสาเข็มลากเส้นผ่านที่คำนวณได้โดยเริ่มจากจุดกำเนิด (Origin) แล้วลากเส้น Offset ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ 3.81 มิลลิเมตร (0.15 นิ้ว) บวกด้วย 0.008 เท่าของความกว้างที่ปลายเสาเข็ม (เป็นค่า Quake Factor ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดปลายเสาเข็ม สำหรับปลายเสาเข็มขนาดปกติค่านี้อาจประมาณ 1% ของความกว้างปลายเสาเข็ม) เส้น Offset นี้จะขนานกับเส้น Elastic Shortening ไปตัดกับเส้นโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวและน้ำหนักที่ทดสอบ น้ำหนักที่จุดตัดเป็นน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load) ของเสาเข็ม วิธีการนี้ควรใช้กับการทดลองนี้ระยะการเพิ่มน้ำหนักกระทำแต่ละครั้งไม่เกิน 1 ชั่วโมง และมาตราส่วนของกราฟควรเลือกให้ทำมุมระหว่างเส้น Elastic Shortening กับแกนของน้ำหนักเท่ากับ 20 องศา

การหาค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติของวิธี Davisson สามารถแสดงเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

1. เขียนกราฟการทรุดตัวของหัวเสาเข็มกับน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 3.5
2. คำนวณหาค่าการยุบตัว Elastic ของเสาเข็มจากสมการ

$$\Delta = PL/AE \quad (3.29)$$

เมื่อ

P = น้ำหนักบรรทุก

L = ความยาวของเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

E = Modulus of Elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

3. ลากเส้น OA จากสมการที่ 6.28 ลงบนกราฟ จากนั้นลากเส้น BC ขนานเส้น OA เป็นระยะ x โดยให้

$$x = 3.81 + 0.008D \quad (\text{มิลลิเมตร}) \quad (3.30)$$

หรือ

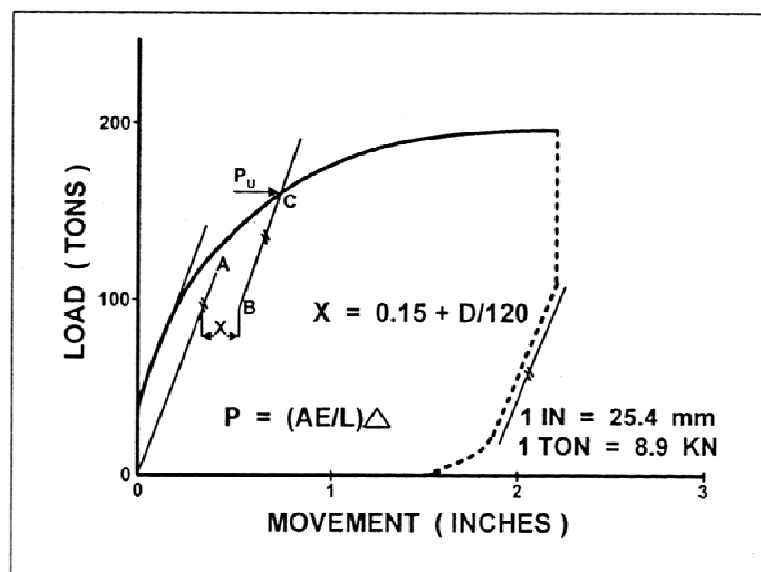
$$x = 0.15 + D/120 \quad (\text{นิ้ว}) \quad (3.31)$$

เมื่อ

D = เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

4. นำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือ จุดตัดกันของเส้น BC กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว หรือจุด C

วิธี Davisson พัฒนามาด้วยกันกับการวิเคราะห์สมการคลื่นของเสาเข็มตอกและได้มีการใช้วิธีวิเคราะห์นี้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น จุดมุ่งหมายหลักเพื่อใช้ในการแปลผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มตอกตามวิธี Quick Method ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือ เส้น BC สามารถลากได้ก่อนการทดสอบเสาเข็ม ดังนั้นจึงสามารถกำหนดเกณฑ์การทดสอบเสาเข็มสำหรับการทดสอบ Proof Test ได้



รูปที่ 3.5 แสดงการหาน้ำหนักสูงสุดโดยวิธี Davisson (1972)

(ข้อมูลจาก: Journal of The Southeast Asian Geotechnical Society, 2003)

3.4.2 การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธี Mazurkiewicz (1972)

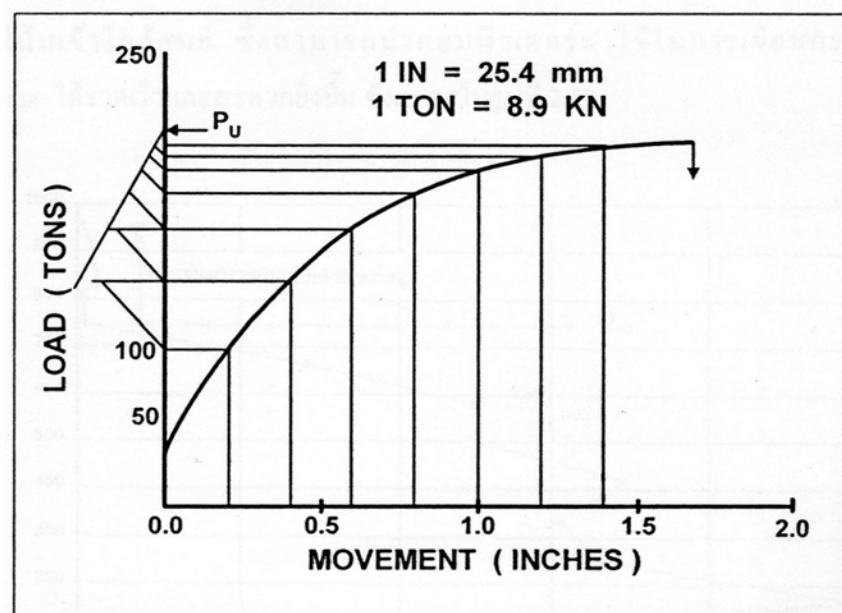
วิธี Mazurkiewicz (1972) ได้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load) โดยตั้งสมมุติฐานให้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบและค่าการทรุดตัวเป็นรูปพาราโบลา (Parabola) เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Load) วิธีการคือให้เลือกลำค่าการทรุดตัวขึ้นมาหลายๆค่า โดยให้ค่าเหล่านี้อยู่ในอนุกรมเลขคณิตจากค่าต่างๆเหล่านี้ลากเส้นตรงไปตัดที่เส้นกราฟเส้นโค้งของน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวจะได้จุดที่เป็นจุดตัดระหว่างเส้นทั้งสองนี้จาก

จุดตัดนี้ลากเส้นขนานกับแกนของค่าการทรุดตัวไปตัดแกนน้ำหนักรที่ทดสอบ โดยให้เลยออกไปจากแกนที่ทดสอบระยะหนึ่ง ณ จุดตัดระหว่างแกนของน้ำหนักรที่ทดสอบกับเส้นตรงที่ลากขนานกับแกนของค่าการทรุดตัว ลากเส้นตรงให้ทำมุม 45° กับแกนของน้ำหนักรที่ทดสอบไปตัดกับเส้นตรงที่ลากเลยแกนของน้ำหนักรที่ทดสอบเส้นที่อยู่ถัดขึ้นไปกระทำเช่นนี้ทุกจุดตัดดังกล่าว แนวของจุดตัดที่เกิดจากเส้นที่ทำมุม 45° กับเส้นที่ลากเลยแกนของน้ำหนักรที่ทดสอบนี้จะเป็เส้นตรงโดยประมาณ ลากเส้นตรงตามแนวนี้ เมื่อเส้นนี้ไปตัดแกนของน้ำหนักรบรรทุก ณ จุดใด จุดนั้นคือน้ำหนักรบรรทุกประลัย (Ultimate Load) ของเสาเข็มต้นนั้น ดังรูปที่ 3.6

การหาค่าน้ำหนักรบรรทุกที่จุดพิบัติของ วิธี Mazurkiewicz สามารถแสดงเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

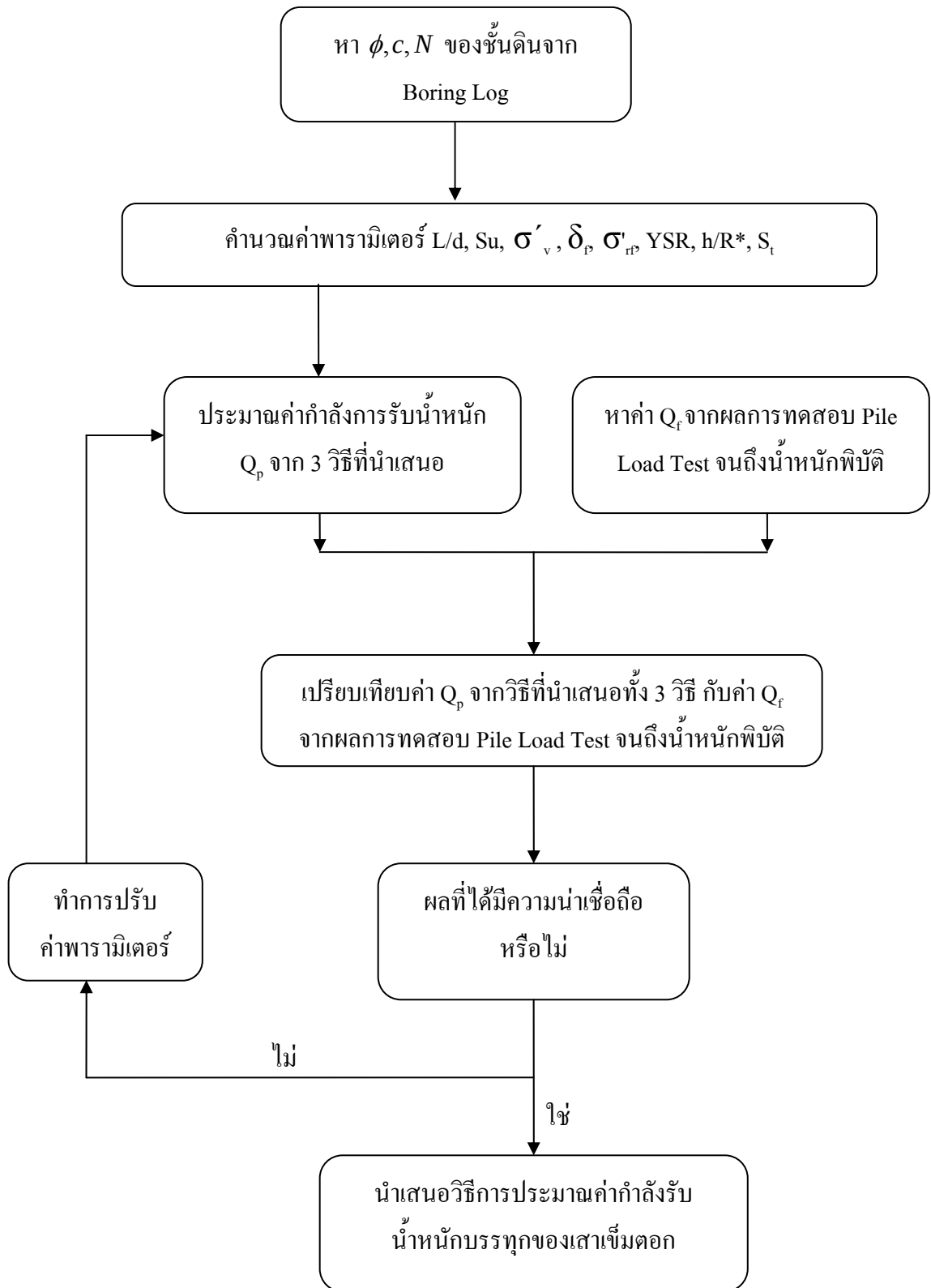
1. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 3.6
2. ทำการแบ่งช่วงการทรุดตัวเท่าๆกันบนแกน X และลากเส้นตรงในแนวตั้งขึ้นไปตัดบนส่วนโค้งของกราฟ จากนั้นลากเส้นตรงแนวนอนจากจุดตัดเหล่านี้ไปตัดแกนน้ำหนักรบรรทุก (Y)
3. จากจุดตัดบนแกน Y ของแต่ละค่าน้ำหนักรบรรทุกลากเส้นตรง 45° ไปตัดกับเส้นน้ำหนักรบรรทุกเส้นถัดไป
4. จุดตัดแกนน้ำหนักร (Y) ที่ได้จัดเรียงตัวก่อนข้างเป็นเส้นตรงซึ่งจุดตัดแกน Y นี้คือ น้ำหนักรบรรทุกที่จุดพิบัติ

วิธีนี้จะเหมาะสมกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นพาราโบลา วิธีของ Mazurkiewicz มีข้อสังเกตว่า จะต้องพยายามบังคับให้จุดตัดที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเป็นเส้นตรง



รูปที่ 3.6 แสดงการหาน้ำหนักรสูงสุดโดยวิธี Mazurkiewicz (1972)

(ข้อมูลจาก: Journal of The Southeast Asian Geotechnical Society, 2003)



รูปที่ 3.7 วิธีการดำเนินการเปรียบเทียบการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก

3.5 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R-Square: R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R Square หรือ R^2 หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร y ได้ หรือเป็นตัวที่แสดงประสิทธิภาพของสมการ R-square เป็นตัวชี้ว่าตัวแบบของเรามีความเหมาะสม (Fit) กับค่ามุลมากน้อยเพียงใด ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และไม่มีหน่วย ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการที่ได้มีประสิทธิภาพสูง ถ้าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า มีประสิทธิภาพต่ำ

$$\text{สูตร} \quad R^2 = \frac{b * S_{xy}}{S_{yy}}$$

$$\text{เมื่อ} \quad b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$S_{xx} = \sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}$$

$$S_{xy} = \sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}$$

$$S_{yy} = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$$

$$X_i = \text{น้ำหนักบรรทุกที่คำนวณได้}$$

$$Y_i = \text{น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ}$$

R^2 เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จะชี้ถึงสัดส่วนที่กลุ่มตัวแปรอิสระสัมพันธ์กับตัวแปรตาม กล่าวคือ เป็นสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้โดยกลุ่มของตัวแปรอิสระกลุ่มนั้น โดยทั่วไปจะเสนอในรูปร้อยละโดยเอา 100 คูณ R^2 ค่า R จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง +1.00 ไม่มีค่าที่เป็นลบ

เกณฑ์การบอกความมากน้อยของความสัมพันธ์ ซึ่งอาจกำหนดได้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	ความหมาย
0.85 – 1.00	มีความสัมพันธ์มากที่สุด
0.71 – 0.84	มีความสัมพันธ์มาก
0.51 – 0.70	มีความสัมพันธ์น้อย
0.00 – 0.50	มีความสัมพันธ์น้อยที่สุด