



บทที่ 2

บททวนงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 ประวัติของการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน (Standard penetration test)

การทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน (SPT) จัดอยู่ในประเภท dynamic penetration test เริ่มใช้ในสหรัฐอเมริกาในปี 1920 จุดประสงค์ของการใช้งานในยุคเริ่มแรก เพื่อใช้เก็บตัวอย่างดินที่มีสภาพถูกรบกวนในชั้นดินทรายและดินเหนียวแข็ง ในเมื่อทำการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกบาง (Shelby tube) ไม่ได้หรือทำได้ยากมาก ตัวอย่างดินที่เก็บได้นี้เอามาทดสอบคุณสมบัติของดิน เช่น Atterberg limit และความถ่วงจำเพาะของดิน เป็นต้น

ต่อมาได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายจนพัฒนาถึงขั้นใช้จำแนกประเภท (ความแข็ง) และประมาณค่ากำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength) ของดินเหนียว โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Terzaghi และ Peck (1948) และ Sowers (1961) เป็นต้น นอกจากนั้นค่า N ยังใช้ในการประมาณค่า relative density และประมาณค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย (ϕ) โดยใช้วิธีของ Meyerhof (1956) Gibbs และ Holtz (1957) Peck Hanson และ Thornburn (1974) เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินดังกล่าวเหล่านี้ เอาไปใช้ในการออกแบบฐานรากและงานดินอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังมีผู้ใช้ค่า $N(SPT)$ หาแรงต้านทานของดินสำหรับออกแบบฐานรากดินในรูปแบบ empirical เช่น approach โดย Terzaghi และ Peck (1948) Peck Hanson และ Thornburn (1974) หรือใช้ค่า $N(SPT)$ ประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากดินในรูปของสูตร empirical โดย Meyerhof (1965) Parry (1971) เหล่านี้เป็นต้น

ในปัจจุบันนี้ก็ยังมีนิยมทดสอบ SPT ในงานเจาะสำรวจดินอยู่ อาจจะเป็นเพราะว่าใช้ประมาณค่ากำลังของดินได้ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเจาะสำรวจดิน และการทดสอบก็ไม่ต้องการความชำนาญทางด้านเทคนิคมากนัก

เครื่องมือและวิธีการทดสอบ SPT ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM:D1586-64T และ 67 ซึ่งอุปกรณ์เฉพาะ SPT ประกอบด้วย กระบอกลม (Split spoon sampler) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 3/8 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว ความยาวของกระบอกลม 27 นิ้ว ส่วนหัวกระบอกลมเก็บดินยาว 21 นิ้ว และชุดเครื่องตอกมีค้อนน้ำหนัก 140 ปอนด์ ท่อน้ำตอกและแป้นเหล็กรองรับค้อนน้ำหนัก (รายละเอียดมาตรฐาน ASTM:D1586-64T อยู่ในภาคผนวก ก.)

การทดสอบ SPT คือการวัดจำนวนครั้งของการตอกค้อนน้ำหนัก 140 ปอนด์ ระยะยกค้อนสูง 30 นิ้ว ตอกกระบอกลมเก็บตัวอย่างจมลงไปในดินจนหลุมเจาะได้ความลึก 1 1/2 ฟุต โดยจำนวนครั้งที่ตอกลงไปใน 1 ฟุต สุดท้ายถือว่าเป็นค่า N จากการทดสอบ SPT

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับพารามิเตอร์ของดิน

2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับพารามิเตอร์ของดินเหนียว

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน N กับค่ากำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength q_u) จะอยู่ในรูป $N(SPT) = k q_u$ (ค่า k คือค่าคงที่)

De Mello (1967) ได้เสนอการประมาณค่าแรงต้านต่อการจมของ SPT ในเทอมของค่าวิสัยความสามารถรับแรงทาน (Bearing capacity) และพลังงานที่ใช้ในการตอกกระบอกลมตัวอย่างดินเหนียวดังนี้

พลังงานที่ใช้ในการตอก = แรงต้านต่อการจมของดินที่มีต่อกระบอกลมเก็บตัวอย่างดิน

$$e^{(WH)N(1+\lambda)^2} \left[\frac{W \cdot W_{pr}}{(W+W_{pr})^2} \right]^{-loss} = C \left[N \frac{1}{C^4} (D_o^2 - D_i^2) \ell + \frac{1}{4} \frac{N}{2L} D_i^2 \ell^2 + \frac{1}{2} D_o m_o \ell^2 \right]^{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ e = ประสิทธิภาพของ เครื่องตอก

W = น้ำหนักลูกค้อน

W_{pr} = น้ำหนักของท่อน้ำตอก + น้ำหนักของกระบอกลมเก็บตัวอย่าง

H = ระยะยกลูกค้อน

- λ = สัมประสิทธิ์ของการคืนตัว (Coefficient of restitution)
- C = หน่วยแรงยึดเกาะของดิน (Cohesion)
- N_C = ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน (Bearing Capacity factor)
- m_o = ค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดิน (adhesion factor)
- D_o = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของกระบอกเก็บตัวอย่างดิน
- D_i = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกเก็บตัวอย่างดิน
- L = ความยาวของตัวอย่างดินที่เก็บได้ในกระบอกเก็บตัวอย่าง
- ℓ = ระยะจมของกระบอกเก็บตัวอย่างดิน

De Mello (1971) สรุปหลักการและแฟคเตอร์ที่จะต้องคำนึงถึงในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับแรงเฉือนแบบอันเดรอน (S_u) ของดินเหนียว ดังต่อไปนี้

- ในดินเหนียวประเภท Saturated insensitive clay สามารถประมาณค่า S_u ได้โดยตรงจากการทำ SPT โดยใช้หลักการของพลังงานหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u ในลักษณะเดียวกันกับสูตรไดนามิกของเสาเข็มตอก (Pile driving formula)

- เมื่อพิจารณาจาก Impact energy ซึ่งประกอบด้วยหลายแฟคเตอร์ด้วยกัน เช่น น้ำหนักของตุ้ม ระยะยกตุ้ม ประสิทธิภาพของเครื่องตอก (e) สัมประสิทธิ์ของการคืนตัว (λ) ความยาวและน้ำหนักของท่อนำตอกรวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นท่อนำตอกในการส่งผ่านพลังงานให้กับกระบอกเก็บตัวอย่างดิน เป็นต้น ซึ่งแฟคเตอร์เหล่านี้เกิดขึ้นจากกรรมวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความลึกของจุดทดสอบ SPT ด้วย

- เมื่อพิจารณาแรงต้านของดินต่อการจมของกระบอกเก็บตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลาย จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระบอกและพลังงานที่ใช้ในการตอก ในกรณีที่ใช้ขนาดของกระบอกเก็บตัวอย่างดินและพลังงานต่างไปจากที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน จะต้องปรับแก้ค่า N ที่วัดได้ เมื่อจะเอาค่า N ที่วัดได้ไปใช้ในงานออกแบบฐานราก

- Sensitivity และ consistency ของดินเหนียว จะมีผลต่อการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ในเทอมของ $N(SPT) = f^{\frac{n}{n}} (q_u)$ จึงควรแยกประเภทของดินเหนียวตามความแข็ง (เช่น ดินอ่อน แข็งปานกลาง แข็ง แข็งมากและแข็งที่สุด) แล้วหาความสัมพันธ์ของค่า N กับ q_u จากข้อมูลเจาะดินในกลุ่มของดินที่มี consistency เดียวกัน ซึ่งสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u จะเป็นสมการเส้นตรง แต่ไม่จำเป็นว่าจะต้องมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์ (Origin) เสมอไป และผลกระทบเนื่องจากความลึกของจุดทดสอบ SPT ก็ลดลงไปด้วย ถ้าข้อมูลอยู่ที่ความลึกที่ใกล้เคียงกัน

โอกาสที่จะมีความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ q_u มีอยู่มากในดินแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ เพราะดินแข็งเกิดขึ้นที่ range ของความลึกเดียวกัน และการวิจัยโดย สนิท พิพิธสมมิตี (1980) แสดงว่าสูตรไดนามิกของเสาเข็มคอกใช้กับ correction factor ใช้ได้ในกรุงเทพฯ ในกรณีที่ปลายเสา เข็มอยู่ในชั้นดินแข็ง

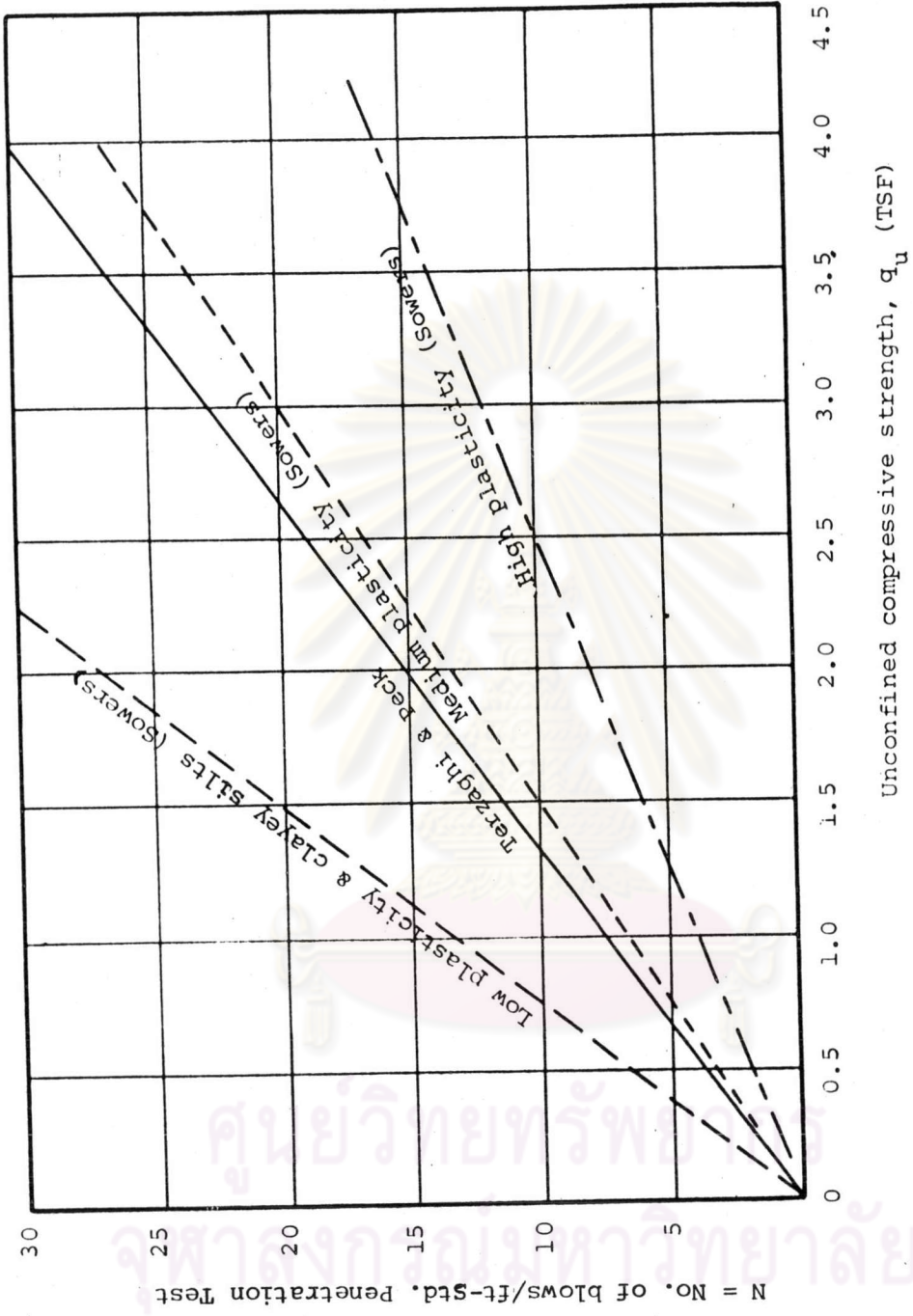
Terzaghi และ Peck (1948) เสนอการจำแนกประเภทของดินเหนียวเป็นดินอ่อนมาก ดินอ่อน ดินแข็งปานกลาง ดินแข็ง ดินแข็งมากและแข็งที่สุด โดยสามารถแยกประเภทของดินตามความแข็งได้จากค่า N และเสนอค่า q_u โดยประมาณจากค่า N แบบ empirical ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

Sowers (1961) เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N(SPT)$ กับ q_u ในรูปแบบ empirical โดยแยกความสัมพันธ์ตาม plasticity ของดิน เช่น Low medium และ high plasticity ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N(SPT)$ กับ consistency และกำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (q_u)

ดินประเภท	อ่อนมาก	อ่อน	แข็งปานกลาง	แข็ง	แข็งมาก	แข็งที่สุด
Consistency	Very soft	Soft	Medium	Stiff	very stiff	Hard
q_u (ksf)	0	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
N (No. of blows per ft.)	0	2	4	8	16	32
γ_{sat} (Pcf)	100-120	110-130	120-140			
(kN/m^3)	(16-19)	(17-20)	(19-22)			

จาก Bowles (1977), Foundation Analysis and Design



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N(SPT) ของดินเหนียว เสนอโดย Sowers (1961)

NAVDocks DM-7

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT กับพารามิเตอร์ของดิน Cohesionless Soil

ได้มีผู้ทำการวิจัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับพารามิเตอร์ของดิน Cohesionless Soil หลายท่านด้วยกัน เนื่องจากการทดสอบ SPT เริ่มพัฒนาขึ้นมาใช้กับดินทราย ซึ่งจะสรุปงานวิจัยที่ผ่านมามีดังต่อไปนี้

Gibbs และ Holtz (1957) ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N(SPT) กับพารามิเตอร์ ϕ สำหรับกำลังเฉือนของดินทรายละเอียดแห้ง โดยใช้ทฤษฎีแรงต้านทานของฐานรากของ Prandtl (1921) Caquot (1934) และ Buisman (1935) และสมมติให้ค่า N(SPT) สัมพันธ์กับสมการทั่วไปของกำลังเฉือนของดิน ($S = C + \sigma \tan \phi$) ดังสูตรในสมการที่ 2.2

$$N(SPT) = f \left[\sigma \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} + \frac{C}{\tan \phi} \left\{ \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} - 1 \right\} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ C = apparent cohesion ของดินทรายละเอียดแห้ง

σ = ความเค้นของดินในแนวตั้ง

ϕ = มุมเสียดทานภายในของดิน

N (SPT) = ค่าการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน

Vesic (1967) ได้วิเคราะห์แรงต้านต่อการจมของดินในการทดสอบ SPT^{๑๖} ในดินทรายแห้ง ได้ข้อสรุปว่า ในการทดสอบ SPT ค่าแรงต้านของดินที่อยู่บริเวณปลายกระบอกลึกเกินตัวอย่างจะเกิดการพิบัติ โดยจะมีค่าแรงต้านทานคงที่หลังจากที่ตอกกระบอกลงไปในดินได้ระยะหนึ่ง และเสนอวิธีการวิเคราะห์แรงต้านทานของดินต่อการจมในเทอมของความกดดันที่ถูกจำกัดในแนวตั้ง (vertical confining pressure q_f) ซึ่งเหมือนกับปัญหาของการออกแบบฐานรากดังนี้

แรงเสียดทานที่ผิวของกระบอกลึกตัวอย่างดิน (ทั้งด้านในและด้านนอกของกระบอกลึกตัวอย่าง) จะมีค่า

$$F_s = \frac{\alpha q_o}{m(\phi)} \left[\pi (D_o + D_i) \right] l \quad (2.3)$$

- เมื่อ $F_s =$ แรงเสียดทานที่ผิว ($f_s = \alpha f_o$ และ $f_o = \frac{q_o}{m(\phi)}$)
 $q_o =$ แรงต้านทานที่ปลายกระบอกเก็บตัวอย่างดิน
 $m(\phi) =$ อัตราส่วนของแรงต้านทานที่ปลายกระบอกต่อแรงเสียดทานที่ผิว
 ทั้งด้านในและด้านนอก
 D_o และ $D_i =$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและภายในของกระบอกเก็บ
 ตัวอย่างดินตามลำดับ

แรงต้านทานที่ปลาย (Q_{ps}) เมื่อกระบอกจมลึกลงไปในดินเท่ากับระยะ l

$$Q_{ps} = q_o \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \frac{l}{45} \quad (2.4)$$

(ตามปกติการทดสอบ SPT จะคิดจากจำนวนครั้งของการตอกที่ระยะจมน้อยระหว่าง 15 ถึง 45 เซนติเมตร หรือ 2 ชุดสุดท้ายของระยะจมน้อยชุด 6 นิ้ว)

อินทิเกรตสมการที่ 2.3 และ 2.4 โดยใช้ค่า l จาก 15 ถึง 45 เซนติเมตร
 จะได้แรงต้านทานต่อการจม $\beta(SPT) = qN_q F \left[\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \frac{l^2}{2 \times 45} + \frac{\alpha \pi}{2m(\phi)} (D_o + D_i) l^2 \right]^{15}$
 15

(2.5)

เมื่อ $q_o = qN_q F$

$F =$ Shape factor ของ Split Spoon

$N_q =$ ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน

$\beta =$ พลังงานที่ใช้ในการตอก 1 ครั้ง กับค่า energy factor

SPT = จำนวนครั้งที่ตอก โดยเริ่มนับที่ระยะจมน้อย 15 เซนติเมตร

และค่า N_q กับ $m(\phi)$ จะมีค่าแปรตามค่ามุม ϕ

Meyerhof (1956) เสนอความสัมพันธ์ของค่า $N(SPT)$ กับ relative density และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของ cohesionless soil ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N(SPT) กับ relative density และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของดิน Cohesionless

Soil เสนอโดย Meyerhof (1956)

Description	Relative Density	Standard Penetration Resistance N blows per ft.	Angle of internal Friction ϕ degree
Very loose	< 0.2	< 4	< 30
Loose	0.2-0.4	4-10	30-35
Medium	0.4-0.6	10-30	35-40
Dense	0.6-0.8	30-50	40-45
Very dense	> 0.80	>50	>45

Meyerhof (1956) : Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils

หมายเหตุ : สำหรับ dense silty fine sand ค่า N ในตาราง เป็นค่าที่แก้ไขแล้ว

ค่าค่าของมุม ϕ ในตารางใช้กับ uniform sand และให้ลดค่ามุม ϕ ลง 5 องศาเมื่อใช้กับทรายปนซิลท์ (silty sand) ส่วนค่ามุม ϕ ควรสูงกว่าถ้าใช้กับ well grade sand และให้เพิ่มขึ้นอีก 5 องศาเมื่อใช้กับทรายปนกรวด การทดสอบ SPT ในทรายละเอียดหรือทรายปนซิลท์ จะต้องปรับแก้ค่า N เมื่อวัดได้มากกว่า 15 blows per foot ด้วยสูตร

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

ก่อนหาค่ามุมจากตารางที่ 2.2 (ค่า N' เป็นค่าที่วัดได้ในสนาม) เพราะว่าค่า N (SPT) จะมีค่าสูงเกินไปใน fine dense silty sand เนื่องจากว่ามี negative excess pore pressure เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมี correction และการหา correction นี้ไม่ได้เกี่ยวข้องกับ correct สำหรับ overburden pressure เพื่อปรับค่า N เข้ามาที่ standard overburden pressure เท่ากับ 1 ดันต่อตารางฟุตเพื่อเอามาใช้ในการหาค่า ϕ เพียงอย่างเดียว

Kishida (1967) เสนอสูตร empirical ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับมุม $\bar{\phi}$ ของทราย เพื่อใช้กับการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นทราย สูตรแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N (SPT) กับมุม $\bar{\phi}$ คือ

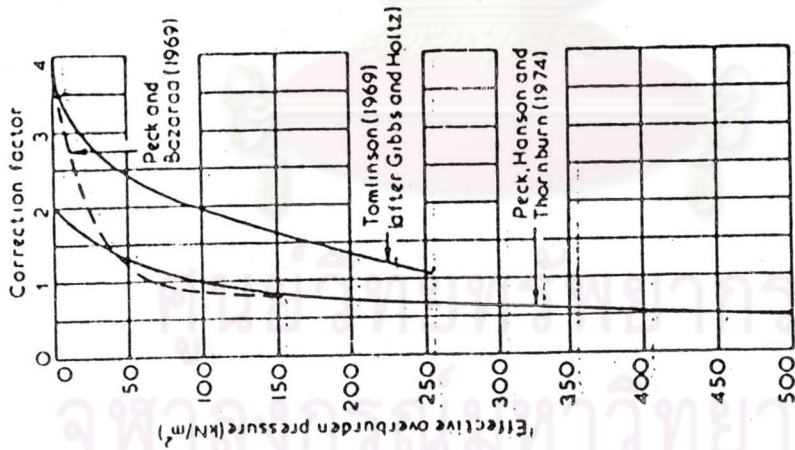
$$\bar{\phi} = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad (2.6)$$

เมื่อ N = ค่าจากการทดสอบ SPT โดยไม่ต้องแก้ไข

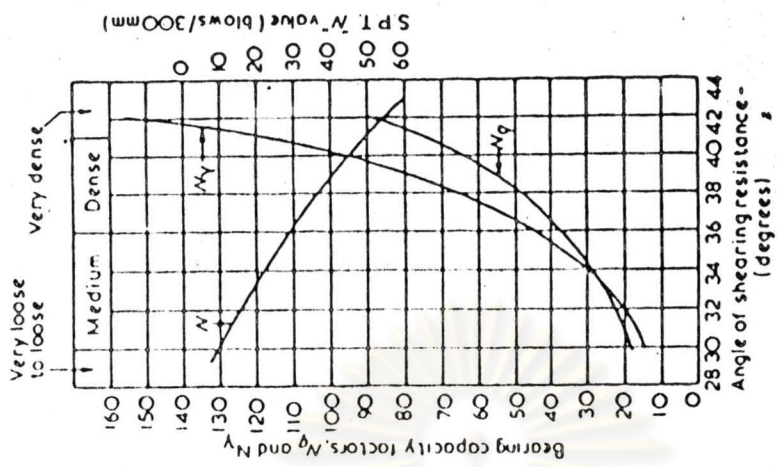
Peck Hanson และ Thornburn (1974) ได้เสนอเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับมุม $\bar{\phi}$ ของดินทราย ดังแสดงในรูป 2.2 (ข) ซึ่งค่า N ที่เอามาใช้หาค่ามุม $\bar{\phi}$ นี้ จะต้องปรับแก้ค่า N ที่วัดได้ในสนาม เนื่องจากอิทธิพลของความดันประสิทธิผลจากน้ำหนักดินชั้นบนจากในรูปที่ 2.2 (ก) ก่อน โดยเทียบกับค่า N มาตรฐาน เมื่อวัดที่ความกดดินประสิทธิผลมีค่า 1 ดันต่อตารางฟุต (หรือประมาณ 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) เพื่อนำไปหาค่า $\bar{\phi}$

2.3 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็มจากคุณสมบัติของดิน

พฤติกรรมของเสา เข็มขณะรับน้ำหนักบรรทุก จะประกอบด้วยแรงต้านทานที่ผิวของเสา เข็ม (Shaft resistance) และแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Point resistance) ฉะนั้นใน



รูปที่ 2.2ก แฟคเตอร์ที่ใช้ปรับแก้ค่า N ในดิน Cohesionless Soil เนื่องจากอิทธิพลของความกดดันประสิทธิผล จากน้ำหนักดินชั้นบน ที่เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn (1974)



รูปที่ 2.2ข ความสัมพันธ์ระหว่าง N (SPT) กับมุม ϕ N_q และ N_y ที่เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn (1974)

การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็มจากค่าพารามิเตอร์ของดิน โดยคำนวณจากสูตร static pile formula จึงตั้งสมมติฐานโดยแยกการคำนวณเป็นแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ดังสูตรในสมการที่ 2.7

$$Q_{ult} = Q_s + Q_p - W_p \quad (2.7)$$

และ $Q_s = f_s A_s$

$$Q_p = q_p A_p$$

$$Q_{ult} = \text{กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ เสา เข็ม}$$

$$Q_s = \text{แรง เสียดทานที่ผิวของ เสา เข็ม}$$

$$Q_p = \text{แรงต้านที่ปลาย เเข็ม}$$

$$f_s = \text{หน่วยแรง เสียดทาน เฉลี่ยที่ผิว เสา เข็ม}$$

$$q_p = \text{หน่วยแรงต้านที่ปลาย เเข็ม}$$

$$A_s = \text{พื้นที่ผิวประสิทธิภาพของ เสา เข็ม ในส่วนที่จมอยู่ในดิน}$$

$$A_p = \text{พื้นที่หน้าตัดที่ปลาย เสา เข็ม}$$

$$W_p = \text{น้ำหนักของ เสา เข็ม}$$

สมการ 2.7 นี้ ตั้งสมมติฐานว่า หน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เเข็มมีค่าสูงสุดที่ displacement ของ เข็ม เดียวกัน ซึ่งไม่เป็นความจริง เพราะหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เเข็มจะถึงค่าสูงสุดต้องใช้ displacement สูงกว่า ดังนั้น สมการ 2.7 จึง เป็น เพียงสมการแบบ Semi empirical

2.3.1 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็ม ในชั้นดินเหนียว

จากการทดสอบพฤติกรรมของ เสา เข็มในชั้นดินเหนียว จะพบว่าแรงเสียดทานที่ผิวของ เสา เข็มจะ เกิดแรงต้านทาน เต็มที่เมื่อค่าการทรุดตัวของ เสา เข็มเกิดขึ้น เพียง เล็กน้อย ส่วนแรงต้านทานที่ปลาย เเข็มจะ เกิดแรงต้านมากขึ้น เมื่อ เสา เข็มทรุดตัวมากขึ้น และแรง เสียดทานของ เสา เข็มตอกในดิน เหนียวจะมีค่าประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย (Broms 1966)

การใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็ม ในดินเหนียว จะต้องคำนึงถึงผลจากการตอกเสา เข็ม ซึ่งทำให้ดินรอบ ๆ ผิวและที่ปลาย เสา เข็ม เปลี่ยนไปจากสภาพ เดิม (disturbed) บริเวณมวลดินที่เปลี่ยนไปจะอยู่ห่างจากตัว เสา เข็ม ประมาณหนึ่ง เท่าของความกว้างหรือขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง เสา เข็ม การใช้ค่ากำลัง เหนือของดินแบบอัน เดรน (S_u) คาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ไม่ได้คำนึง ถึงผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของ เม็ดดิน (remolding) consolidation และ Thixotropy ฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ของดินและ S_u ที่ใช้คำนวณจะต้องพยายาม เลือกให้ใกล้เคียงกับความ เป็น จริงที่สุด ในการวิเคราะห์แบบ Total stress ที่ใช้กันอยู่ขณะนี้ ใช้หลักการ $\phi = 0$ ซึ่ง หมายความว่า Cohesion C จะมีค่าเท่ากับกำลัง เหนือของดินแบบอัน เดรน (S_u) ซึ่งได้มา จากการทดสอบ Unconfined compression

2.3.1.1 แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Shaft resistance)

ค่าหน่วยแรง เสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว คำนวณได้ จากสูตร

$$f_s = \alpha S_u \tag{2.8}$$

- เมื่อ s = แฟคเตอร์ของรูปร่าง เข็ม (Shape factor) ซึ่งมีค่า = 1.0 สำหรับ plain shaft และมีค่า = 1.2 สำหรับ Tapered pile
- α = ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (adhesion factor)
- S_u = ค่าเฉลี่ยของกำลัง เหนือของดินแบบอัน เดรนตลอดความยาว เข็ม

ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) จะขึ้นอยู่กับกำลัง เหนือของดิน รูปร่างของ เสา เข็ม วิธีการก่อสร้างเสาเข็ม ระยะเวลาหลังการตอกเสาเข็มแล้วเสร็จ และ แฟคเตอร์อื่น ๆ ซึ่งค่า α จะแปรตามกำลัง เหนือของดิน เมื่อ S_u เพิ่มขึ้น ค่า α มักจะ ลดลง (Tomlinson 1974)

Flaate (1968) ได้ทำการศึกษาจากผลการทดสอบเสาเข็ม สรุปว่า ค่า α ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ S_u เพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับ Plasticity Index ของดิน เหนียวด้วย (ดูรูปที่ 2.3)

Tomlinson (1957) เสนอค่า α ของดินเหนียวสัมพันธ์กับค่า S_u สำหรับใช้คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.4 โดย S_u ได้มาจากการทดสอบ UU และ UC

Holmberg (1970) สรุปค่า α ของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ มีค่าจาก 1.0 ถึง 0.4 (ดูรูปที่ 2.4) โดยค่า S_u มาจากการทดสอบโดยใช้ Geonor Field Vane

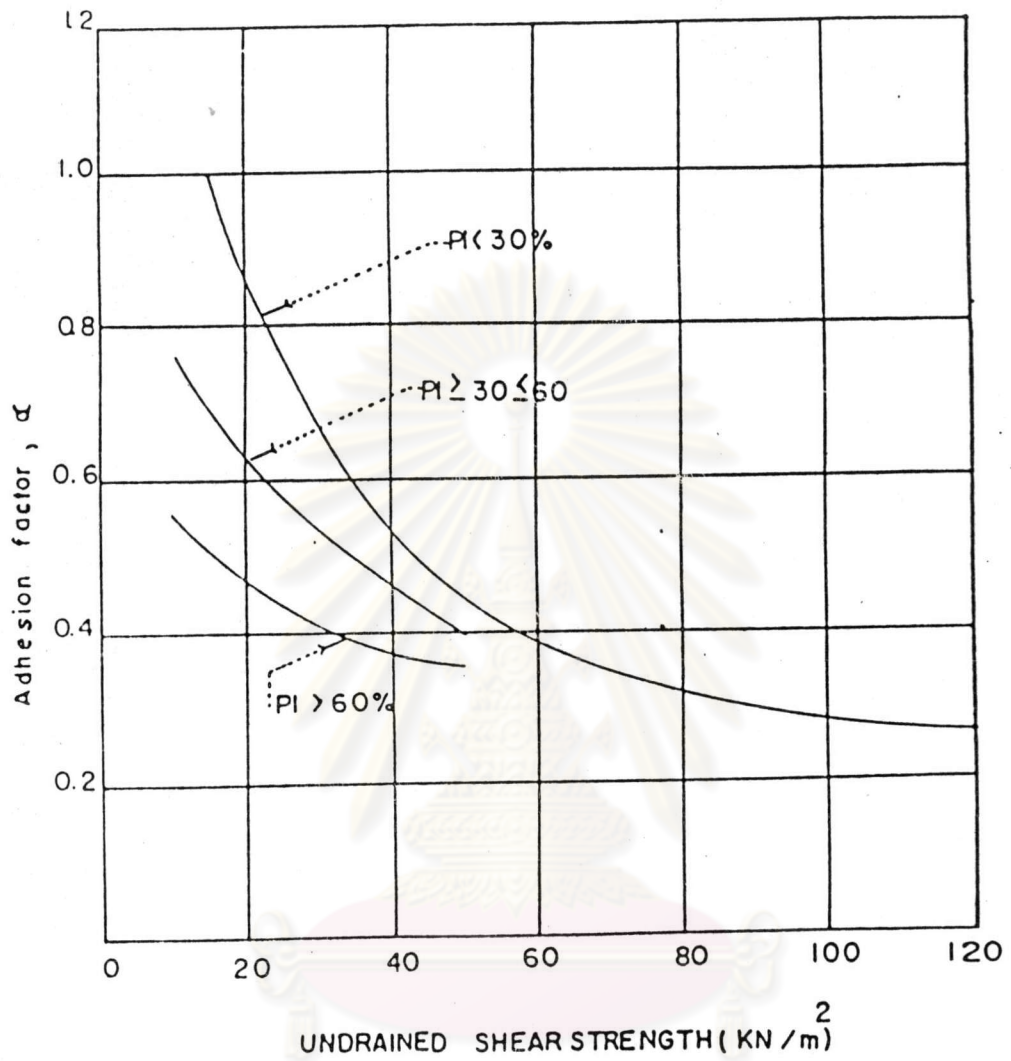
Tomlinson (1970) ได้ทำการศึกษาจากผลการทดสอบเสาเข็มตอกผ่านดินชั้นบนลงไปชั้นดินเหนียวแข็ง และสรุปว่า ลักษณะของดินชั้นบนของดินแข็งจะมีผลต่อค่า α โดยแยกประเภทของดินเป็น 3 กรณี คือ

- กรณีที่ 1 ดินชั้นบนดินแข็งเป็นดินทรายและกรวด ค่า α ดูในรูปที่ 2.5 (ก)
- กรณีที่ 2 ดินชั้นบนดินแข็งเป็นดินเหนียวอ่อนหรือซิลต์ ค่า α ดูจากตารางที่ 2.3
- กรณีที่ 3 เสาเข็มตอกลงไปชั้นดินเหนียวแข็งโดยตรง ค่า α ดูในรูปที่ 2.5 (ข)

ค่าอัตราส่วนของระยะจม (Penetration ratio) ในตารางที่ 2.3 และในรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) คืออัตราส่วนของความยาวของเสาเข็มที่จมอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งต่อความกว้างหรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม ($\frac{L}{B}$)

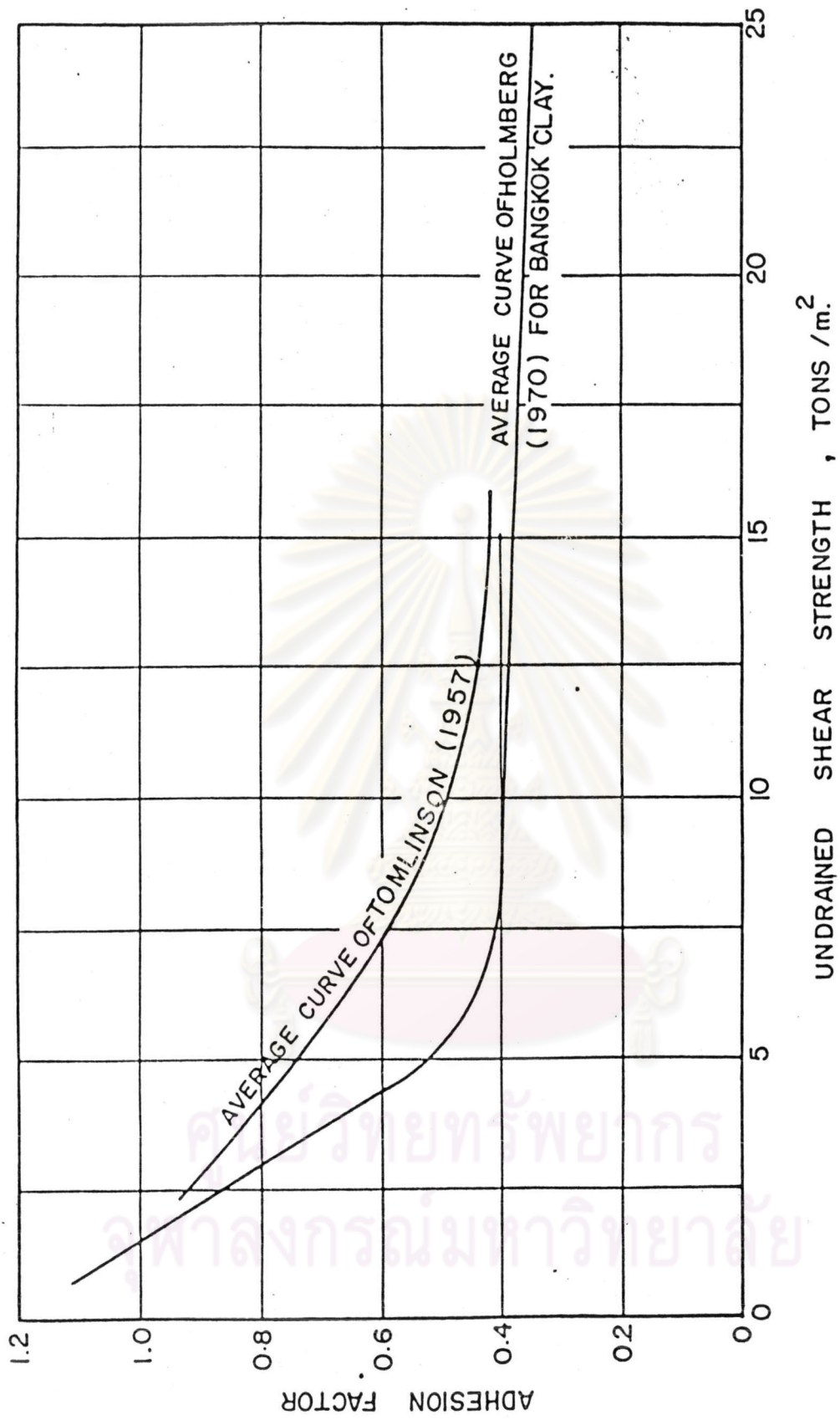
ค่า $\frac{L}{B}$ มีค่าน้อยกว่า 20 ในกรณีที่ 1 (ดินชั้นบนเป็นทรายและกรวด) ค่า α ของ Stiff clay จะเท่ากับ 1.25 และเมื่อ $\frac{L}{B}$ มากกว่า 20 ค่า α ของ Stiff clay จะน้อยลงโดยมีค่าแปรตามกำลังเงื่อนของ Stiff clay (ดูรูปที่ 2.5 (ก))

ค่า $\frac{L}{B}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 20 ค่า α ของ Stiff clay ในกรณีที่ 2 (ดินอ่อนนุ่มบนชั้น Stiff clay) จะมีค่าเท่ากับ 0.40 และเมื่อ $\frac{L}{B}$ มากกว่า 20 ค่า α ของ Stiff clay จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.70 ส่วนค่า $\frac{L}{B}$ น้อยกว่า 8 Tomlinson ไม่ได้พูดถึงว่า ค่า α ของ Stiff clay จะมีค่าเท่าใด

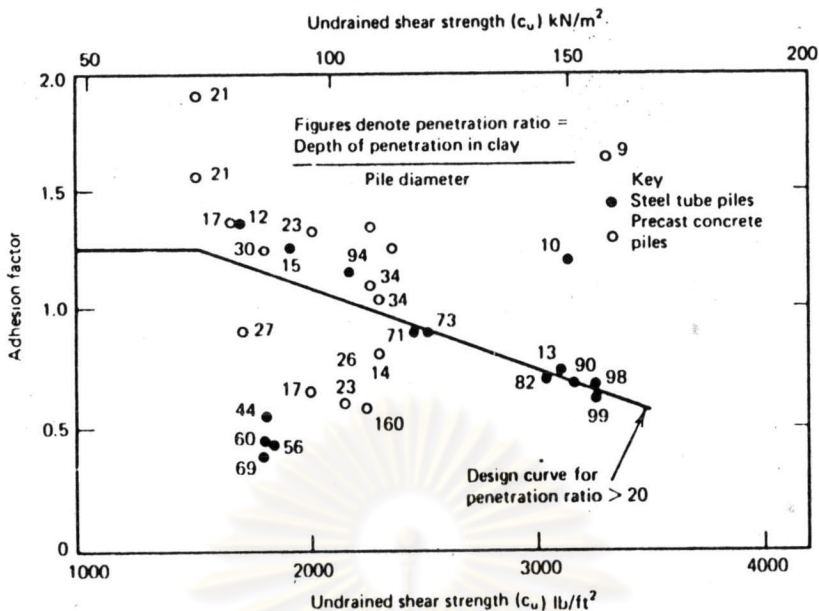


รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียว ที่เสนอโดย Flaate (1968)

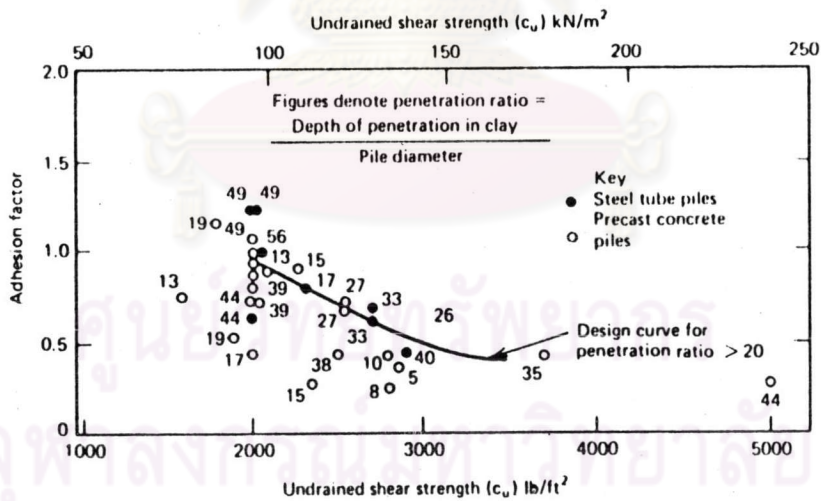
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มคอกที่เสนอโดย Tomlinson (1957) และ Holmberg (1970)



รูปที่ 2.5ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง ดินชั้นบนเป็นทรายและกรวด (กรณีที่ 1) เสนอโดย Tomlinson (1970)



รูปที่ 2.5ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็ง เสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งโดยตรง (กรณีที่ 3) เสนอโดย Tomlinson (1970)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) เพื่อใช้ในการออกแบบเสาเข็ม
ในดินเหนียว เสนอโดย Tomlinson (1970)

Case	Soil Conditions	Penetration Ratio ^b	c_a/c_u
I	Sands or sandy soils overlying stiff cohesive soils	<20	1.25
		>20	See Fig. 3.2
II	Soft clays or silts overlying stiff cohesive soils	<20 (>8)	0.40
		>20	0.70
III	Stiff cohesive soils without overlying strata	<20 (>8)	0.40
		>20	See Fig. 3.3

After Tomlinson (1970).

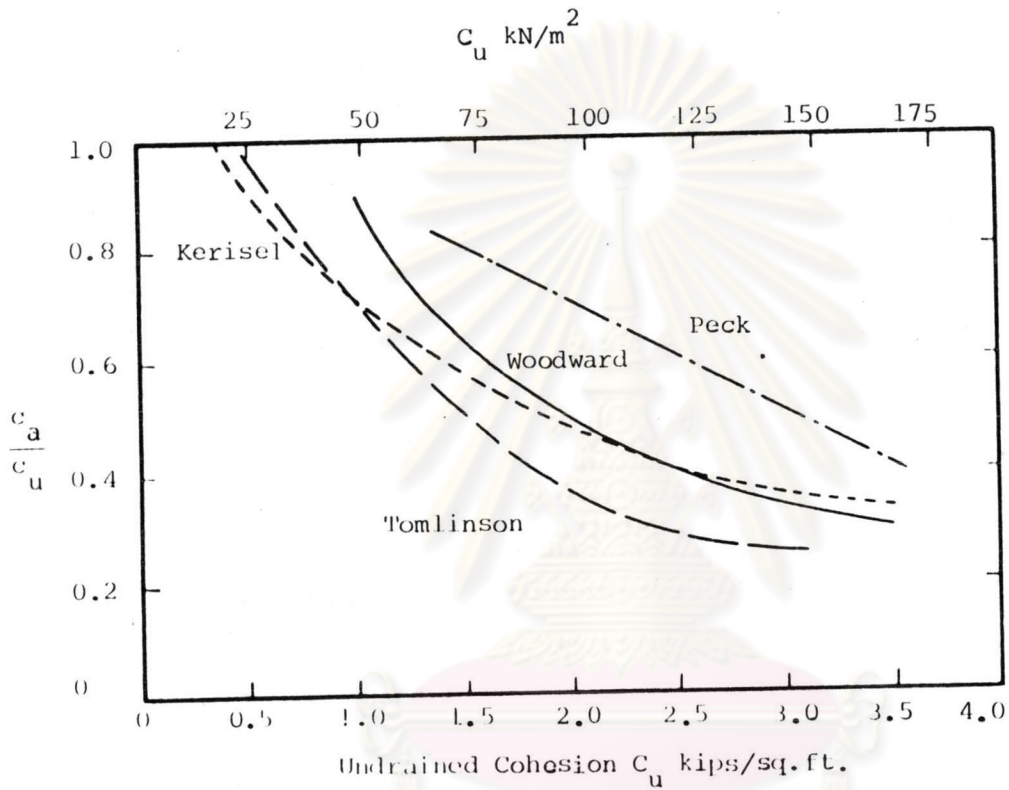
^b Penetration ratio = $\frac{\text{Depth of penetration in stiff clay}}{\text{Pile diameter}}$

NOTE 1: Adhesion factors not applicable to H-section piles.

NOTE 2: Shaft adhesion in overburden soil for cases I and II must be calculated separately.

หมายเหตุ Fig. 3.2 ในตารางรูปที่ 2.5 ก และ Fig. 3.3 ในตาราง
รูปที่ 2.5 ข.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) กับหน่วยแรงเฉือนของดินเหนียวให้กับเสาเข็มตอกในดินเหนียว เสนอโดย McClelland (1974)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีที่ 3 เมื่อค่า $\frac{L}{B}$ อยู่ระหว่าง 8 ถึง 20 ค่า α ของ Stiff clay จะมีค่าเท่ากับ 0.40 และเมื่อค่า $\frac{L}{B}$ มากกว่า 20 ค่า α ของ Stiff clay จะมีค่าน้อยลง เมื่อกำลังเฉือนของดินมากขึ้น (สูตรที่ 2.5 (ข)) ส่วนค่า $\frac{L}{B}$ น้อยกว่า 8 Tomlinson ไม่ได้พูดถึงว่าค่า α ของ Stiff clay มีค่าเท่าใดเช่นกัน

McClelland (1974) ได้รวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอกของ Tomlinson (1957) Peck (1958) Woodward et al. (1961) และ Kerisel (n.d) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

2.3.1.2 แรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในดินเหนียว (Point resistance)

การคำนวณหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม โดยทั่วไปจะคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$q_p = S_u N_c + \gamma D_f \quad (2.9)$$

- เมื่อ
- S_u = หน่วยแรงเฉือนของดินเหนียวแบบอันเดรน
 - N_c = ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทานของดินเหนียว
 - γ = หน่วยน้ำหนักของดิน
 - D_f = ความยาวของเสาเข็มที่จมอยู่ในดิน

ในการคำนวณส่วนใหญ่จะไม่คิดค่า γD_f โดยสมมติว่ามีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักตัวเสาเข็ม กล่าวคือหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวมีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักของเสาเข็มไม้และคอนกรีต

Skempton (1951 และ 1959) สรุปว่าค่า N_c ที่ใช้ในการคำนวณเสาเข็มในดินเหนียวมีค่าเท่ากับ 9 (เมื่อความยาวของเสาเข็มที่จมในดินมากกว่า 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม) และ Meyerhof (1951) เสนอให้ใช้ค่า $N_c = 9.3$ และ 9.8 ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายเสาเข็ม ในดินกรุงเทพฯ Holmberg (1970) เสนอค่า $N_c = 10$ (ได้จากการทดสอบเสาเข็มแปดเหลี่ยมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร)

2.3.2 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็ม เดี่ยว ในชั้นทราย

การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ เสา เข็ม ด้วยวิธี conventional method ในชั้นดินทราย (Homogenous Sand) คัดคำนวณหน่วยแรงต้านที่ปลาย เข็ม และค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของปลาย เข็ม แต่จากผลการทดลองโดย Kerisel (1961) Vesic (1967) Tavenas (1971) และ Meyerhof (1976) พบว่า หน่วยแรงต้านที่ผิวและหน่วยแรงต้านที่ปลาย เข็มจะเพิ่มขึ้นตามความลึกเมื่อปลาย เข็มอยู่ในส่วนชั้นดินอยู่เหนือความลึกวิกฤต (critical depth Z_c) ส่วนใต้ความลึกวิกฤตลงไป ค่าหน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของ Compressibility Crushing Arching และแพคเตอร์อื่น ๆ ซึ่งการกระจาย (distribution) ของความเค้นประลัยผลของดินได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 และ diagram สำหรับการหาค่าความลึกวิกฤตโดยประมาณได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8

2.3.2.1 แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นทราย (Shaft resistance)

แรงเสียดทานที่ผิวของเสา เข็ม ต่อกจมนอยู่ในชั้นทราย (Homogenous sand) คำนวณได้จากสูตรในสมการที่ 2.10

$$Q_s = f_s A_s \quad (2.10)$$

$$f_s = K_s \bar{\sigma}_v \tan \delta$$

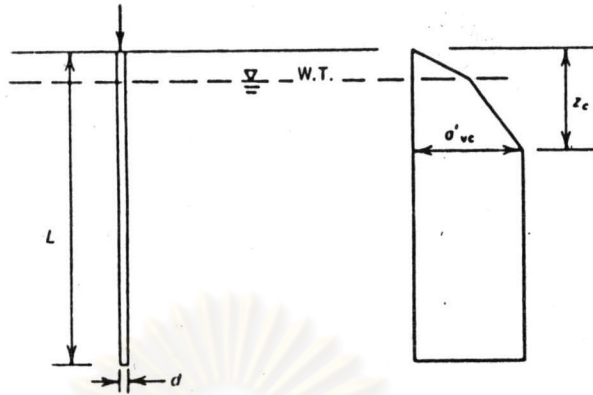
และ $f_s = K_s \bar{\sigma}_v \tan \delta < f_u$ (Meyerhof 1976)

เมื่อ $Q_s =$ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

$$A_s =$$
 พื้นที่ผิวประลัยผลของเสา เข็ม

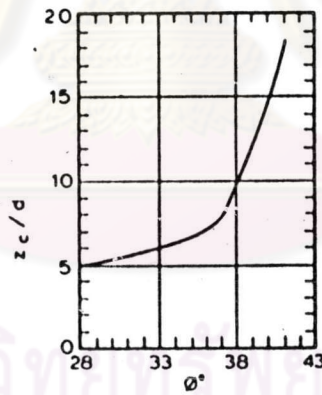
$$f_s =$$
 หน่วยแรงเสียดทาน เฉลี่ยที่ผิว เสา เข็ม (average ultimate skin friction)

$$K_s =$$
 ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความกดดันข้างของ เสา เข็ม
(The average coefficient of earth pressure on pile shaft)



รูปที่ 2.7 แสดงโคแอมความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินทรายรอบเสาเข็ม เสนอโดย Vesic (1967)

(a) z_c/d vs ϕ



รูปที่ 2.8 แสดงค่าอัตราส่วนของความลึกวิกฤติต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มที่สัมพันธ์กับมุมเสียดทานภายในของดินทราย ใช้กับเสาเข็มตอก เสนอโดย Vesic (1967)

$\bar{\sigma}_V$ = ค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินตลอดความยาว เข็ม

δ = มุมเสียดทานระหว่างดินกับ เสา เข็ม

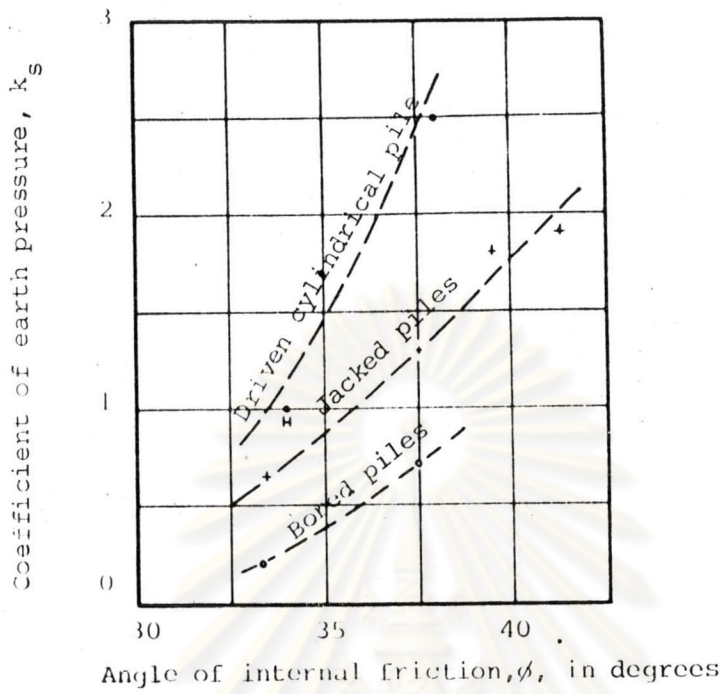
f_{ℓ} = ขีดจำกัดของค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานสำหรับ $D/B \geq D_c/B$
 (เมื่อ D คือความลึกของเสาเข็ม D_c คือความลึกวิกฤติ
 และ B คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม) เสนอโดย
 Meyerhof (1976)

Meyerhof (1976) สรุปผลการวิจัยจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของ เสาเข็ม พบว่า หน่วยแรงเสียดทานพิบัติ (The local ultimate skin friction f_z) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกจนมีค่าสูงสุดในช่วงบนของเสาเข็ม และจะมีค่าลดลงจนกระทั่งน้อยที่สุดที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันค้ำข้าง (K_z) จึงมีค่ามากที่สุดในช่วงบนของเสาเข็มและมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงดันค้ำข้างชนิด passive (passive earth pressure coefficient) และใกล้ปลายเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์แรงดันค้ำข้างชนิด at rest (K_0)

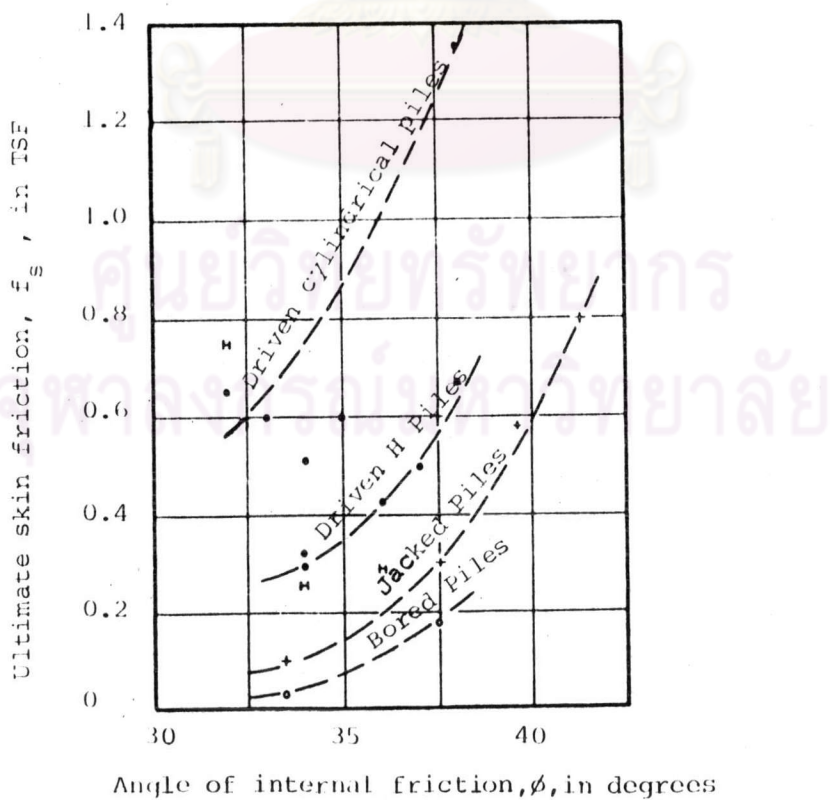
ในรูปที่ 2.9 แสดงค่า K_s ของเสาเข็มที่สัมพันธ์กับค่ามุมเสียดทานภายในของดินทรายและค่า f_{ℓ} มีค่าเท่ากับ f_s ซึ่งสัมพันธ์กับมุม ϕ ดูในรูปที่ 2.10 ซึ่งค่า K_s และ f_s ยังขึ้นอยู่กับ effect ของชนิดวัสดุเสาเข็มและกรรมวิธีในการก่อสร้างเสาเข็มดังรูป

Meyerhof (1951) สรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันค้ำข้าง (K_s) ของทรายจะขึ้นอยู่กับ Compressibility ของดินหลังการตอกเสาเข็ม ซึ่งมีค่าจาก 0.5 สำหรับดินทรายเป็นหลวม (loose sand) จนถึง 1.0 สำหรับดินทรายแน่น (Dense sand) โดยสามารถหาค่า K_s จากค่า $N(SPT)$ ได้ดังนี้

N (blows per foot)	K_s
0-4	0.5
4-10	0.6
10-30	0.7
30-50	0.8
>50	1.0



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม ϕ กับค่า K_s ของดินทรายใน ส่วนที่อยู่บนความลึกวิกฤติ เสนอโดย Meyerhof (1976)



รูปที่ 2.10 ค่าหน่วยแรง เสียดทานประลัษณะ empirical ของเสา ตอกในชั้นทราย เสนอโดย Meyerhof (1976)

Broms (1965) แนะนำการเลือกใช้ค่า K_s สำหรับดินทรายตามชนิดของ
เสาเข็มและความแน่นของดิน ดังต่อไปนี้

ชนิดของ เสา เข็ม	ดินทรายหลวม	ดินทรายแน่น
เหล็ก	0.5	1.0
คอนกรีต	1.0	2.0
ไม้	1.5	3.0

AAS (1966) เสนอค่ามุมเสียดทานระหว่าง เสา เข็มติดกับดินทราย (δ)
ตามชนิดของเสาเข็ม ดังนี้

ชนิดเสาเข็ม	มุม δ (องศา)
เหล็ก	20
คอนกรีต	$\frac{3}{4} \phi$
ไม้	$\frac{2}{3} \phi$

2.3.2.2 แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นทราย (Point resistance)

สูตรการคำนวณหน่วยแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม ได้มาจากสูตร
ในการคำนวณหน่วยแรงต้านของฐานรากตื้น (shallow strip footing) ที่เสนอโดย Terzaghi
(1943) ดังต่อไปนี้

$$q_{ult} = 1.3cN_c + \gamma D_f N_g + \beta \gamma B N_\gamma \quad (2.11)$$

เมื่อ q_{ult} = หน่วยแรงต้านทานประลัย

C = ค่าแรงยึดเกาะของดิน

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน

D_f = ความลึกของฐานรากจากผิวดิน

N_c, N_g, N_γ = ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน

β' = แฟคเตอร์ของรูปร่างฐานราก มีค่าเท่ากับ 0.3 สำหรับฐานรากกลมและเท่ากับ 0.4 สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส

B = ความกว้างของฐานราก

สำหรับการคำนวณแรงดันที่ปลายเสาเข็ม เมื่อปลายเข็มจมอยู่ในชั้นทราย ในสมการที่ 2.11 จะมีค่า $C = 0$ สูตรคำนวณแรงดันด้านทานที่ปลายเข็ม เมื่อไม่คิมน้ำหนักของเสาเข็มจะเป็น

$$Q_p = A_p \bar{\sigma}_v (N_q - 1) \quad (2.12)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}_v$ = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน

A_p = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของเสาเข็ม

ในสมการที่ 2.12 ส่วนมากจะไม่เอาค่า $\beta' \gamma B N_\gamma$ มาคิด เพราะว่าจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ เทอม $\bar{\sigma}_v N_q$ อนึ่ง น้ำหนักของดินที่ถูกแทนที่โดยเสาเข็ม จะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักเสาเข็ม ในทางปฏิบัติจึงนิยมคำนวณแรงดันด้านทานที่ปลายเข็มจากสูตรในสมการที่ 2.13

$$Q_p = A_p \bar{\sigma}_v N_q \quad (2.13)$$

Tomlinson (1969) แนะนำให้ใช้ค่า N_q จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_q กับมุม ϕ ที่เสนอโดย Berezantzev (1961) ใช้กับเสาตอกในชั้นทราย (ดูรูปที่ 2.11) ความลึกของปลายเสาเข็มในชั้นทรายนี้อาจจะไม่น้อยกว่า 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

Vesic (1963) และ Kerisel (1964) สรุปจากผลการทดสอบ เสาเข็มตอกในชั้นทรายเมื่อความยาวของเสาเข็มมากกว่า 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มพบว่า ค่าแรงดันที่ปลายเข็มจะไม่เพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนกับความลึกของปลายเข็มที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มจะน้อยลง ซึ่งค่า N_q เกือบจะมีค่าคงที่ ทั้งนี้ค่าความยาวของเสาเข็มต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มมากกว่า 15 ขึ้นไป

Meyerhof (1976) เสนอสูตรและวิธีการคำนวณค่าแรงต้านประลัยที่ปลาย
เข็มตอกในชั้นทราย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สูตรที่ใช้คำนวณแรงต้านที่ปลายเสา เข็ม คือ

$$Q_p = q_p A_p \quad (2.14)$$

และ $q_p = \bar{\sigma}_v N_q \leq q_{\ell}$

เมื่อ $Q_p =$ แรงต้านทานประลัยที่ปลายของเสา เข็ม

$q_p =$ หน่วยแรงต้านที่ปลายเสา เข็ม

$\bar{\sigma}_v =$ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินที่ปลายเสา เข็ม

$N_q =$ ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน

$q_{\ell} =$ ค่าจำกัดของหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็ม เมื่อ $\frac{D}{B} \geq \frac{D_c}{B}$

(D คือความลึกของเสา เข็มที่จมอยู่ในทราย D_c คือค่าความ

ลึกวิกฤตของเสา เข็ม และ B คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสา เข็ม)

- ค่า N_q หาได้จากความสัมพันธ์แบบ Semi-empirical ระหว่าง N_q , $\frac{D_c}{B}$ และมุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) ก่อนตอกเสา เข็ม q ในรูปที่ 2.12 ชนิดของเสา เข็ม เป็นเสา เข็มตอก (เข็มกลมและสี่เหลี่ยม)

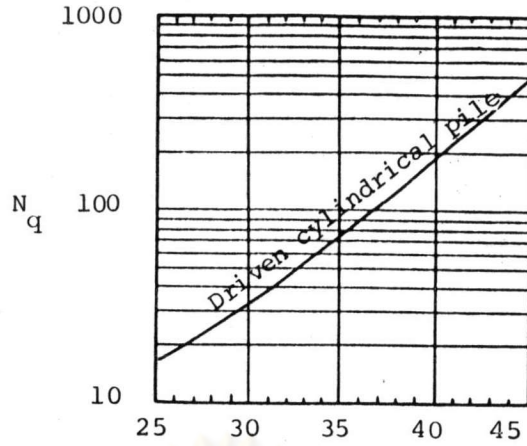
- ค่า q_{ℓ} ในสมการ 2.14 หาได้มาจากการทดสอบเสา เข็มในชั้นดินทราย (Homogenous sand) โดย q_{ℓ} มีความสัมพันธ์กับมุม ϕ ดังสมการที่ 2.15

$$q_{\ell} = 0.5 N_q \tan \phi \quad \text{หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต} \quad (2.15)$$

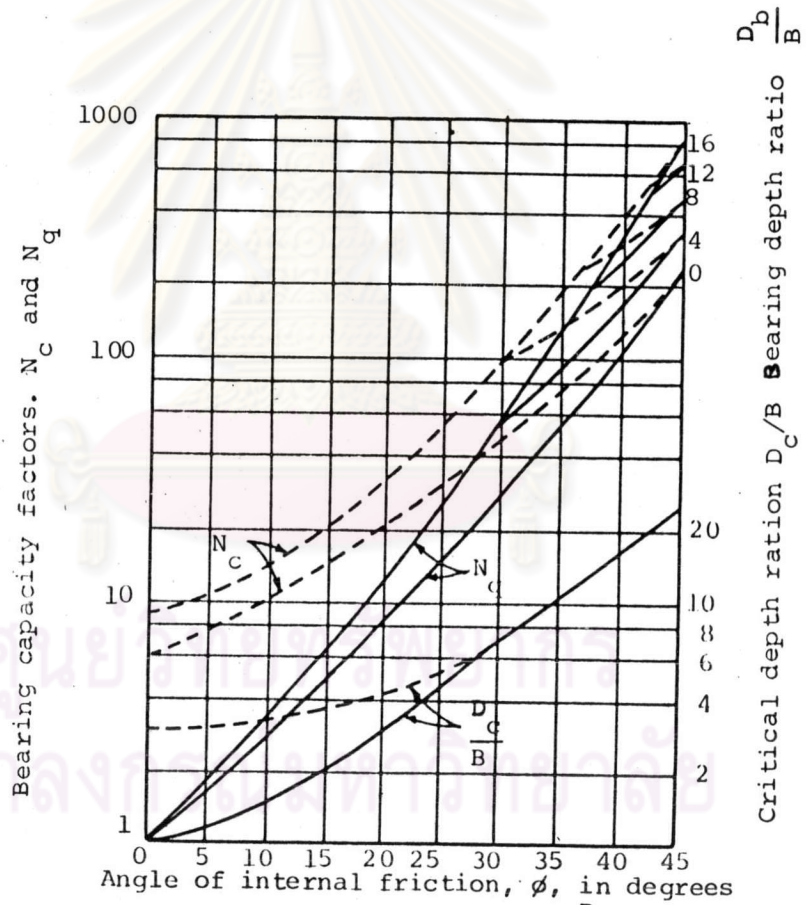
$q_{\ell} =$ ค่าจำกัดของหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็มแบบ empirical

$N_q =$ ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทานของ เข็มสั้น ($D/B < 15$)

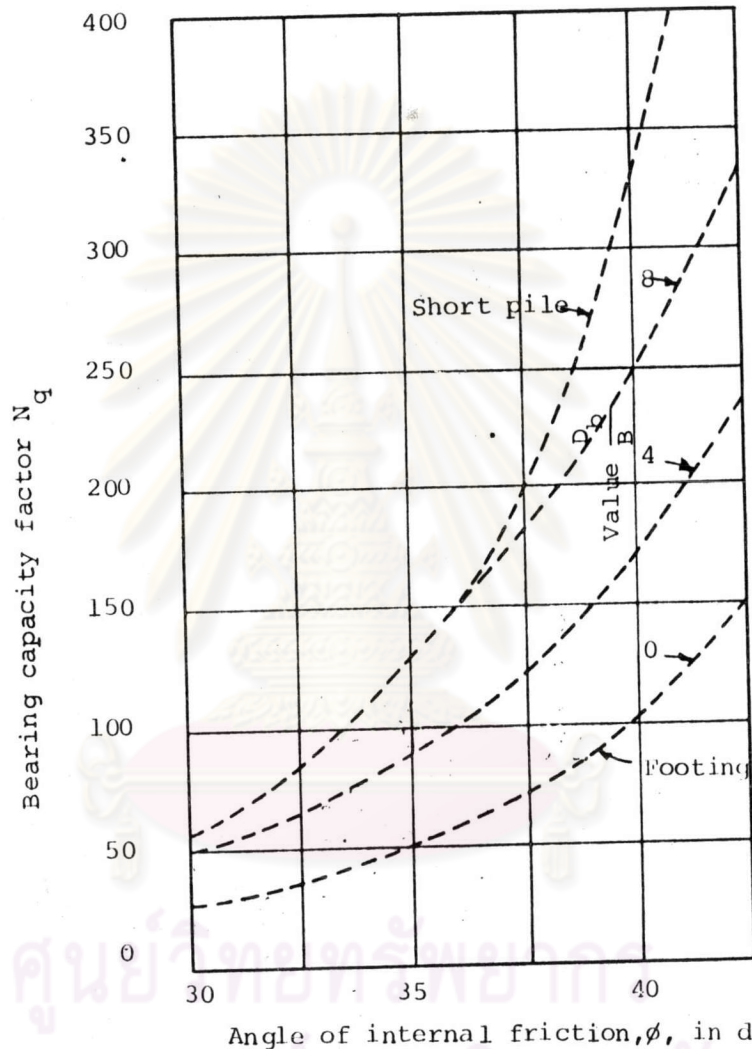
ซึ่งหาได้จากรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q กับมุม ϕ ของเสาเข็มตอกในชั้นทราย
เสนอโดย Berenzantzev (1961)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q มุม ϕ และ $\frac{D_c}{B}$ สำหรับเสา
เข็มตอก เสนอโดย Meyerhof (1976)



รูปที่ 2.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_q กับมุม ϕ ของเสาเข็มสั้น ($\frac{D_b}{B} < 15$)
ใช้กับเสาเข็มตอกในชั้นทราย เสนอโดย Meyerhof (1976)

2.3.3 สูตร empirical ที่ใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจาก
ค่า $N(SPT)$

Meyerhof (1956) เสนอสูตร empirical เพื่อใช้ในการคำนวณกำลัง
รับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มคอกในชั้นทราย (Saturated sand) จากค่า $N(SPT)$ ดังสูตร
ต่อไปนี้ คือ

$$P_u = 4N_p A_p + \frac{\bar{N}_s A_s}{50} \quad (2.16)$$

และ
$$P_u = 4N_p A_p + \frac{\bar{N}_s A_s}{100} \quad (2.17)$$

(สมการที่ 2.16 ใช้กับเสาเข็มคอนกรีตและสมการที่ 2.17 ใช้กับเสาเข็มเหล็ก
รูปตัว H)

เมื่อ P_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม (ไม่รวมน้ำหนักของ
เสาเข็ม) หน่วยเป็นตัน

N_p = ค่า $N(SPT)$ วัดได้ที่ระดับปลายเสาเข็ม หน่วยเป็น blows
per foot

\bar{N}_s = ค่าเฉลี่ย $N(SPT)$ ของดินทรายตลอดความยาวของเสาเข็ม
หน่วยเป็น blows per foot

A_p = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของเสาเข็ม หน่วยเป็นตารางฟุต

A_s = พื้นที่ผิวของเสาเข็ม หน่วยเป็นตารางฟุต

เมื่อหน่วยของ P_u เป็นตัน และหน่วยของ A_p กับ A_s เป็นตารางเมตร สมการ
ที่ 2.16 และสมการ 2.17 จะเป็น

$$P_u = 40N_p A_p + \frac{1}{5} \bar{N}_s A_s \quad \text{สำหรับ เสาเข็มคอนกรีต}$$

และ
$$P_u = 40N_p A_p + \frac{1}{10} \bar{N}_s A_s \quad \text{สำหรับ เสาเข็มเหล็กรูป H}$$

Bomham และ Styles (1971) สรุปว่าสูตร empirical ที่เสนอโดย Meyerhof (1956) นี้ ใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวแข็ง บางแห่งได้ผลดี

Meyerhof (1976) สรุปว่าใช้ค่า $N(SPT)$ ในการประมาณค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็ม (q_p) และหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (f_s) ของเสาเข็มตอกในชั้นทรายด้วยสูตร empirical ซึ่งสูตรในการหาหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของ เสาเข็ม เหมือนกับ สมการที่ 2.16 และ 2.17 ($f_s = \frac{N}{50}$ สำหรับ เข็มคอนกรีต และ $f_s = \frac{N}{100}$ สำหรับ เข็ม เหล็กรูปตัว H) ส่วนหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็มจะมีค่าอัตราส่วนของความลึกต่อขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางรวมอยู่ด้วยดังนี้

$$q_p = \frac{4ND_b}{B} \leq 40N \quad \text{หน่วย เป็นตันต่อตาราง เมตร} \quad (2.18)$$

- เมื่อ D_b = ความลึกของปลายเสาเข็มในชั้นดินทราย หน่วย เป็น เมตร
 B = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หน่วย เป็น เมตร
 N = ค่าเฉลี่ยของ $N(SPT)$ ที่วัดได้ในบริเวณใกล้เคียงกับปลายเสาเข็ม

[จะสังเกตได้ว่าในสมการที่ 2.18 เมื่อ $\frac{D_b}{B}$ มากกว่า 10 ค่า q_p จะมีค่าเท่ากับสูตร empirical ในสมการที่ 2.17 แต่ถ้า $\frac{D_b}{B}$ น้อยกว่า 10 ค่า q_p ก็จะน้อยกว่าค่า q_p ในสมการที่ 2.17]

2.4 วิธีการทดสอบเสาเข็มและการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีของ Chin (1970)

2.4.1 การทดสอบทาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Load Test

การทดสอบทาน้ำหนักบรรทุกของ เสาเข็ม มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งอาจสรุปการทดสอบที่ใช้กันอยู่ 2 แบบคือ

- Maintain load test จัดอยู่ในประเภท stress control
- Constant rate of penetration เป็นประเภท strain control

รายละเอียดของแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแบบ Maintain load test (ML) สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น Slow maintain load test และ Quick maintain load test ซึ่งจะกล่าวโดยย่อต่อไปนี้

- Slow maintain load test ตามมาตรฐานสหรัฐ ASTM D 1143-74 กำหนดให้ทดสอบโดยบรรทุกน้ำหนัก 200 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ แบ่งการเพิ่มน้ำหนักเป็น 8 ชั้นเท่า ๆ กัน เมื่อเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งถึง 200 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบแล้ว ให้รักษาน้ำหนักนี้ไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ทำการลดน้ำหนักออกเป็น 4 ชั้นเท่า ๆ กัน ในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแต่ละชั้น ให้รักษาน้ำหนักไว้จนกว่าอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยกว่า 0.01 นิ้วต่อชั่วโมง หรือรักษาน้ำหนักไว้ 2 ชั่วโมงแล้วแต่อย่างไหนจะเกิดก่อน

- Quick maintain load test ให้แบ่งขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนักเป็น 20 ชั้นเท่า ๆ กันของการทดสอบน้ำหนัก 300 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักออกแบบ (แต่ละชั้น 15 เปอร์เซ็นต์) และให้รักษาน้ำหนักที่เพิ่มแต่ละชั้นนาน 15 นาที จดบันทึกค่าการทรุดตัวทุก ๆ 3 นาที จะใช้เวลาในการทดลองจนแล้วเสร็จประมาณ 3 ถึง 5 ชั่วโมง

ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D 1143-74 กำหนดให้เพิ่มน้ำหนักแต่ละชั้นประมาณ 5 ถึง 10 ตัน จดบันทึกค่าการทรุดตัวและน้ำหนักที่กระทำบนหัวเสาเข็มก่อนและหลังการเพิ่มน้ำหนักแต่ละชั้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นให้รักษาไว้ 2 $\frac{1}{2}$ นาที ทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งเกิดการพิบัติ (เสาเข็มทรุดตัวลงเรื่อย ๆ และไม่สามารถจะเพิ่มน้ำหนักได้อีก) ให้บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวประมาณ 2 $\frac{1}{2}$ นาทีหรือ 5 นาที หลังจากนั้นให้ลดน้ำหนักลงเป็นชั้น ชั้นละ 2 $\frac{1}{2}$ นาที และบันทึกค่าการทรุดตัวด้วย

Fellini (1975) แนะนำการทดสอบแบบ Quick maintain load test มีวัตถุประสงค์เพื่อการทำ proof test โดยแบ่งการเพิ่มน้ำหนักเป็น 16 ชั้นเท่า ๆ กันของ 250 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกใช้งาน น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นให้รักษาไว้ 15 นาที หลังจากนั้นให้ลดน้ำหนักลงทันทีทันใดและจดบันทึกค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อน้ำหนักอยู่ที่ 200, 150, 100, 50 เปอร์เซ็นต์และศูนย์

2. การทดสอบแบบ Constant rate of penetration (CRP)

Whitaker (1957) สรุปการทดสอบเสาเข็มแบบ CRP นี้ พฤติกรรมของดินรอบเสาเข็มที่ถูกกดดัน (stress) ภายใต้ constant rate of strain จะมีลักษณะคล้ายกับ Quick shear test ของดินในห้องทดลอง ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบเสาเข็มจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate bearing capacity) จะใกล้เคียงกับการทดลอง Quick shear test จากการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าเสาเข็มในชั้นดินเหนียวใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 10 นาที และจะใช้เวลาถึง 1 ชั่วโมงสำหรับเสาเข็มในชั้นทราย เนื่องจาก mobilization ของ deformation ต้องมากกว่า เพราะการ develop end bearing

Whitaker (1970) สรุปว่าค่าอัตราการจม (rate of penetration) ประมาณ 0.75 มิลลิเมตรต่อนาที (0.03 นิ้วต่อนาที) ทดสอบเสาเข็มรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว จะถึงจุดพิบัติเมื่อค่าการทรุดตัวไม่เกิน 25 มิลลิเมตร ส่วนเสาเข็มรับน้ำหนักที่ปลาย (end bearing pile) ในชั้นทรายและกรวด จะมีการทรุดตัวเกิดขึ้นมาก ให้ใช้ค่าอัตราการจมประมาณ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที (0.06 นิ้วต่อนาที) หรือมากกว่านี้

ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D 1143-74 ให้ใช้ค่าอัตราการจมในการทดสอบเสาเข็มในดินเหนียวประมาณ 0.25 ถึง 1.25 มิลลิเมตรต่อนาที และเสาเข็มในชั้นทรายหรือกรวด ให้ใช้ค่าอัตราการจมประมาณ 0.75 ถึง 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที

Whitaker (1970) กล่าวเพิ่มเติมว่า การทดสอบเสาเข็มแบบ CRP test บอกแต่เพียงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate bearing capacity) ของเสาเข็มเท่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว ไม่ได้แสดงถึงความสมดุลระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว (equilibrium relation of load and settlement) ฉะนั้นค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Working load) จะประมาณจากการทดสอบแบบ CRP ไม่ได้ ค่าการทรุดตัวแบบ CRP นี้จะน้อยกว่าการทดสอบแบบ Maintain load เนื่องจากไม่ได้ทิ้งช่วงเวลาสำหรับการทรุดตัวแบบ Plastic settlement ของแต่ละชั้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเป็นข้อเสียของการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี CRP test แต่อย่างไรก็ตามทำให้เราสามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate bearing capacity) ของเสาเข็มได้ในเวลาอันรวดเร็ว

2.4.2 การคาดคะเนค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสา เข็มจาก load-settlement Curve เสนอโดย Chin (1970)

การทดสอบเสาเข็มส่วนมากนิยมการทดสอบแบบ Proof test กล่าวคือ น้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบประมาณสอง เท่าของน้ำหนักออกแบบใช้งาน (Design load) จึงไม่ทราบ ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสา เข็มที่แท้จริง Chin (1970) ได้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุก ประลัยของเสา เข็มในกรณีที่ทำกรทดสอบเสาเข็มไม่ถึงจุดพิบัติ ซึ่งได้สรุปจากการศึกษา Shear deformation characteristic จาก shear Box, Triaxial compression test และ โมเดลการทดสอบเสาเข็มทั้งในห้องทดสอบและในสนาม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับค่าการทรุดตัวมีความสัมพันธ์แบบ Hyperbolic โดยตั้งสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\Delta}{p} = m\Delta + C \quad (2.19)$$

เมื่อ Δ = ค่าการทรุดตัววัดที่หัวเสา เข็มขณะบรรทุกน้ำหนัก เท่ากับ P

m และ C = ค่าคงที่

เมื่อพล็อตกราฟโดยใช้ค่า $\frac{\Delta}{p}$ และ Δ ให้ค่า Δ อยู่ในแกนนอน (แกน x) และค่า $\frac{\Delta}{p}$ ในแกนตั้ง (แกน y) ก็จะได้กราฟเส้นตรง จุดตัดของเส้นกราฟที่ตัดกับแกนตั้ง (Δ/p) คือค่าคงที่ C ส่วน m เป็นค่าความชันของเส้นกราฟ และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็มจะหาได้จากค่าส่วนกลับของความชัน (Inverse slope, $1/m$) ของเส้นกราฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย