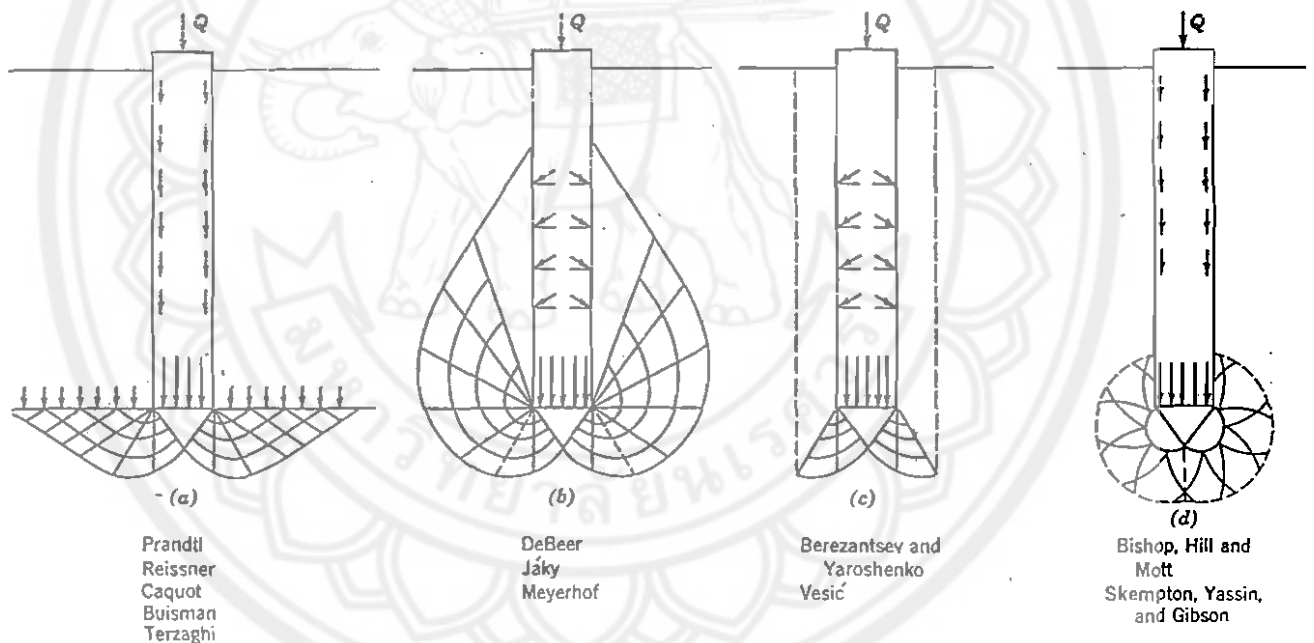


บทที่ 2

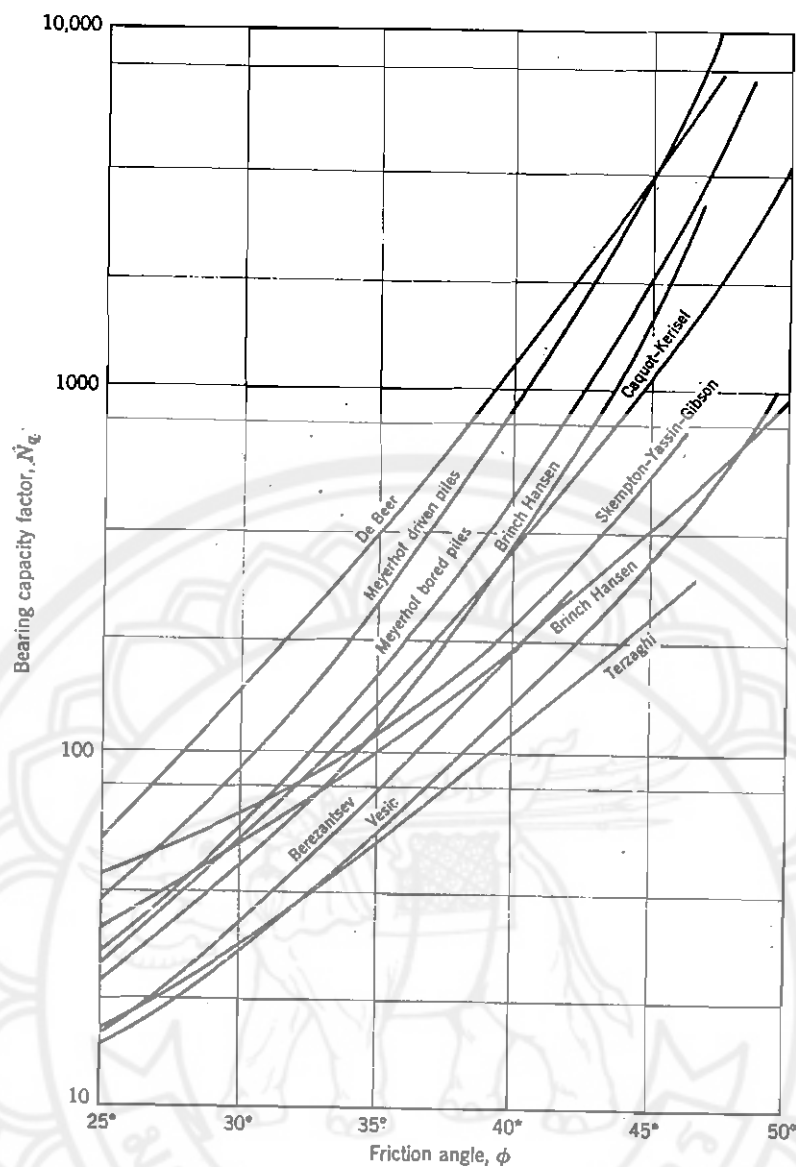
กำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม

2.1 ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม

ฐานรากเสาเข็มกลุ่มถึงเสาเข็มเดียวนั้น โอกาสที่จะวิเคราะห์ได้ถูกต้องทำได้ยากเนื่องจากตีความความไม่แน่นอนชัดเจนเกี่ยวกับพฤติกรรมในทางด้านปฐพีกลศาสตร์ของดิน ดังนั้นความรู้ประสบการณ์และผลลัพธ์ที่ได้ในการทดสอบเสาเข็มนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาเพื่อคำนวณหาค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม ในรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะพื้นฐานของปฐพีวิศวกรรมของเสาเข็ม และค่ากำลังแบกทานที่สัมพันธ์กัน



รูปที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของกลศาสตร์การรับแรงแบกทานของเสาเข็ม (Vesic , 1967)



รูปที่ 2.2 ค่าแฟคเตอร์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสำหรับฐานรากลึก

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มตอกในทราย

เอกสารอ้างอิง	ความสัมพันธ์	พื้นฐานของความสัมพันธ์
Brinch Hansen and Lundgren (1960)	$\bar{\sigma}_h = \cos^2 \phi$; $\bar{\sigma}_v = 0.43 \bar{\sigma}_v$ if $\phi = 30^\circ$	ทฤษฎี
Henry (1956)	$\bar{\sigma}_h = 0.8 \bar{\sigma}_v$	การทดสอบเสาเข็ม
Ireland (1957)	$\bar{\sigma}_h = K_p$; $\bar{\sigma}_v = 3 \bar{\sigma}_v$	ทฤษฎี
Meyerhof (1951)	$\bar{\sigma}_h = K^*$; $\bar{\sigma}_v = (1.75 \text{ to } 3) \bar{\sigma}_v$	Pulling tests
	$\bar{\sigma}_h = 0.5 \bar{\sigma}_v$; loose sand	การวิเคราะห์จากข้อมูลในสนาม
	$\bar{\sigma}_h = 1.0 \bar{\sigma}_v$; dense sand	สนาม
Mansur and Kaufan (1958)	$\bar{\sigma}_h = K^*$; $\bar{\sigma}_v$; $K = 0.3$ (Compression) $K = 0.6$ (Tension)	การวิเคราะห์จากข้อมูลในสนาม

จาก Hom , 1966

2.2 เสาเข็มในชั้นทราย (Pile in Cohesionless Soils)

ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม นั้นเกิดขึ้นจากกำลังเสียดทานผิว (Q_s) และกำลังแบกทานปลายเสาเข็ม (Q_b) ซึ่งค่าของ กำลังแบกทานปลายเสาเข็ม มักเป็นส่วนสำคัญของกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มประเภทนี้

2.2.1 ค่ากำลังเสียดทานผิว

$$Q_s = \sum q_s A_s \quad (2.1)$$

โดยที่

$$q_s = K_s \sigma'_{vo} \tan \delta < f_{limit}$$

$$f_{limit} = \text{limiting friction} = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ ได้จากการสะสมทางสถิติ}$$

$$\sigma'_{vo} = \text{effective overburden pressure at the middle of soil layer}$$

ตาราง 2.2 ค่า K_s และค่า δ สำหรับเสาเข็มตอก

วัสดุเสาเข็ม (Pile Material)	δ	K_s	
		Low R.H. ($\phi < 35^\circ$)	High R.H. ($\phi \geq 35^\circ$)
Steel	20°	0.5	1.0
Concrete	$3/4 \phi$	1.0	2.0
Timber	$2/3 \phi$	1.5	4.0

หมายเหตุ : ค่ามุมเสียดทาน ϕ มาจากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (SPT)

2.2.2 ค่ากำลังแบกทานปลายเสาเข็ม

$$Q_b = \sum q_b A_b \quad (2.2)$$

โดยที่

$$q_b = \sigma'_{vo} N_q < q_{limit}$$

$$q_{limit} = \text{limiting value of end - bearing} = 11000 \text{ kN/m}^2 \text{ ได้จากการสะสมทางสถิติ}$$

$$\sigma'_{vo} = \text{effective overburden pressure at the pile tip}$$

$$N_q = \text{bearing capacity factor}$$

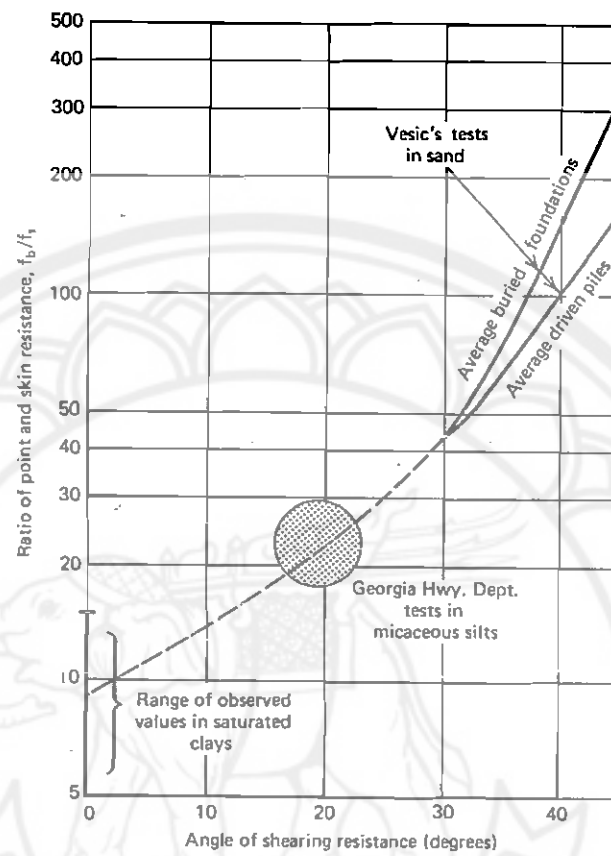
ค่า N_q ที่ใช้นั้นเป็นค่าของ Meyerhof จะมีค่าสูงกว่าค่าในสนามมาก ค่าของ Berezantsev ดังในรูปที่ 2.2 จะเหมาะสมกว่า

2.2.3 ผลการผ่านแรงเสียดทานผิวของดิน

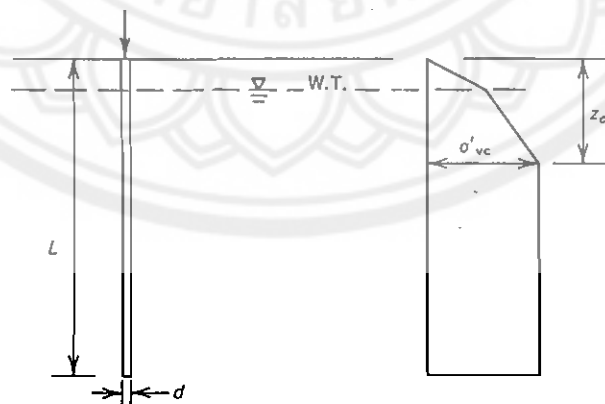
(Arching Effects on Friction Resistance)

Vesic (1967) และ Kerisel (1961) พบว่าแรงต้านทานที่ผิวและแรงแบกทาน ของเสาเข็ม ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเป็นเส้นตรงกับความลึก แต่จะมีค่าที่เกือบจะคงที่เมื่อเลยระยะระยะลึกค่าหนึ่ง ลักษณะเช่นนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยในเวลาต่อมา Vesic ได้ทำการเปรียบเทียบ อัตราส่วน แรงกดแบกทานกับแรงเสียดทานผิว (f_b / f_s) ของเสาเข็มกับค่ามุมเสียดทานของดิน แสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ ความเค้นสัมผัสที่ผลต่อแรงเสียดทานผิวเสาเข็มที่ความลึกระดับหนึ่งไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับ แรงกดความเค้นสถิตยในสนาม เนื่องจากผลของการผ่านแรง (Arching) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทำนองเดียวกับมวลน้ำหนักดินเหนือโครงสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

จากการพัฒนาการคำนวณการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ตามปรากฏการณ์การผ่านแรงดังกล่าว ที่ความลึกรอบ ๆ เสาเข็ม ตามรูปที่ 2.4 จึงมักกำหนดให้ความเค้นประสิทธิผลตามแนวตั้ง (σ'_v) มีค่าเท่ากับแรงกดความเค้นสถิตย ในแนวตั้งจนถึงระดับความลึก Z_c เมื่อความลึกเกินกว่า Z_c ให้ค่า σ'_v จะมีค่าคงที่ เพื่อให้ง่ายในการอ่านค่าของลักษณะพิเศษของพฤติกรรมที่กล่าวตามทฤษฎีของ Vesic ค่าความลึกวิกฤติจะใช้กับค่าเฉลี่ยของ ultimate skin resistance และ ultimate base resistance ของเสาเข็มในลักษณะงานเดียวกัน

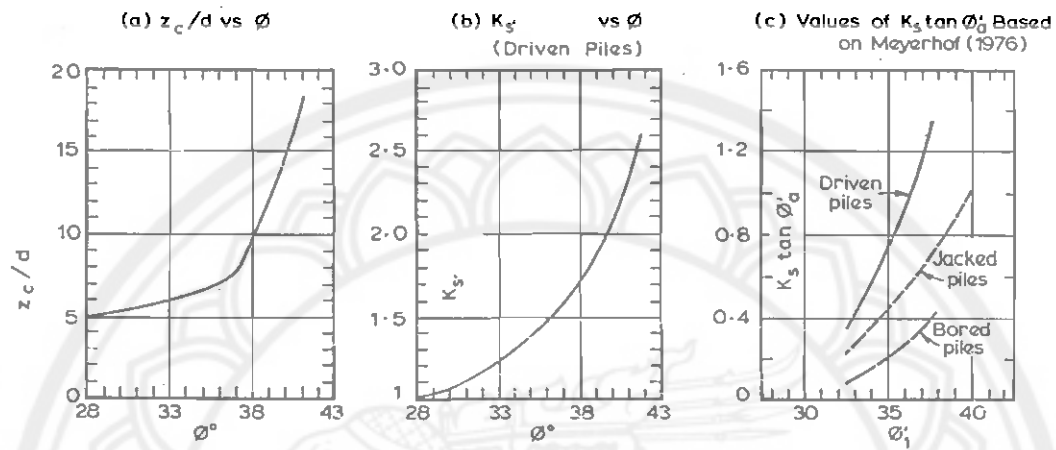


รูปที่ 2.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง f_b/f_s (Vesic, 1967)



รูปที่ 2.4 ความลึกวิกฤต Z_c กับความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่กระทำต่อเสาเข็มในชั้นดินทราย

For driven piles $\phi = \frac{3}{4} \phi'_1 + 10$ (Fig. 3, Fig. b)
 For bored piles, $\phi = \phi'_1 - 3$ (Fig. a); $\phi = \phi'_1$ (Fig. c)
 where ϕ'_1 = angle of internal friction prior to
 installation of pile



รูปที่ 2.5 ค่า Z_c/d และ $K_s \tan \phi'_0$ สำหรับเสาเข็มในชั้นดินทราย

BEARING CAPACITY FACTORS - N_q

ϕ^* (DEGREES)	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
N_q (DRIVEN PILE DISPLACE- MENT)	10	15	21	24	29	35	42	50	62	77	86	120	145
N_q^{**} (DRILLED PIERS)	5	8	10	12	14	17	21	25	30	38	43	60	72

EARTH PRESSURE COEFFICIENTS K_{HC} AND K_{HT}

PILE TYPE	K_{HC}	K_{HT}
DRIVEN SINGLE H-PILE	0.5 - 1.0	0.3 - 0.5
DRIVEN SINGLE DISPLACEMENT PILE	1.0 - 1.5	0.6 - 1.0
DRIVEN SINGLE DISPLACEMENT TAPERED PILE	1.5 - 2.0	1.0 - 1.3
DRIVEN JETTED PILE	0.4 - 0.9	0.3 - 0.6
DRILLED PILE (LESS THAN 24" DIAMETER)	0.7	0.4

FRICTION ANGLE - δ

PILE TYPE	δ
STEEL	20°
CONCRETE	$3/4 \phi$
TIMBER	$3/4 \phi$

* LIMIT ϕ TO 28° IF JETTING IS USED

** (A) IN CASE A BAILER OR GRAB BUCKET IS USED BELOW GROUNDWATER TABLE, CALCULATE END BEARING BASED ON ϕ NOT EXCEEDING 28° .

(B) FOR PIERS GREATER THAN 24-INCH DIAMETER, SETTLEMENT RATHER THAN BEARING CAPACITY USUALLY CONTROLS THE DESIGN. FOR ESTIMATING SETTLEMENT, TAKE 50% OF THE SETTLEMENT FOR AN EQUIVALENT FOOTING RESTING ON THE SURFACE OF COMPARABLE GRANULAR SOILS.

รูปที่ 2.6 การถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวในดินมวลหยาบ

2.3 เสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Piles in Cohesive Soils)

ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม เกิดขึ้นจากกำลังเกาะยึดผิว (Q_s) และกำลังแบกทานปลายเสาเข็ม (Q_b) ซึ่งค่าของกำลังเสียดทานผิวจะมีค่ามากกว่ากำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม เสมอในกรณีเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

2.3.1 ค่ากำลังเกาะยึดผิว (Adhesion)

$$Q_s = \sum f_s A_s \quad (2.3)$$

โดยที่

$$f_s = \alpha S_u$$

α = adhesion / reduction factor

สำหรับเสาเข็มตอกใช้รูปที่ 2.7 และใช้ค่า α สำหรับชั้นดินลักษณะต่าง ๆ กรณีเสาเข็มเจาะ :

Typical soil types	α - values
Over – consolidated clay	0.3 – 0.6
Normally consolidated clay	0.8 – 1.0
Adverse ground conditions	0.3

2.3.2 ค่ากำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End – bearing)

$$Q_b = \sum q_E A_b \quad (2.4)$$

โดยที่

$$q_E = 9 S_u$$

The value if S_u are the undisturbed undrained shear strength preferred from the unconfined compression tests. Many researchers have proposed the correlation if the SPT " N " and the correlated undrained strength , C_u for the guideline.

$$C_u = 20 \text{ N} \quad \text{kN/m}^2 \text{ (Meyerhof)} \quad (2.5)$$

$$C_u = 13 \text{ N} \quad \text{kN/m}^2 \text{ (Terzaghi \& Peck)} \quad (2.6)$$

$$C_u = 7 \text{ N} \quad \text{kN/m}^2 \text{ (Reese , Touma and O' nell)} \quad (2.7)$$

$$C_u = 4 \text{ to } 6 \text{ N} \quad \text{kN/m}^2 \text{ (Stroud and Butler)} \quad (2.8)$$

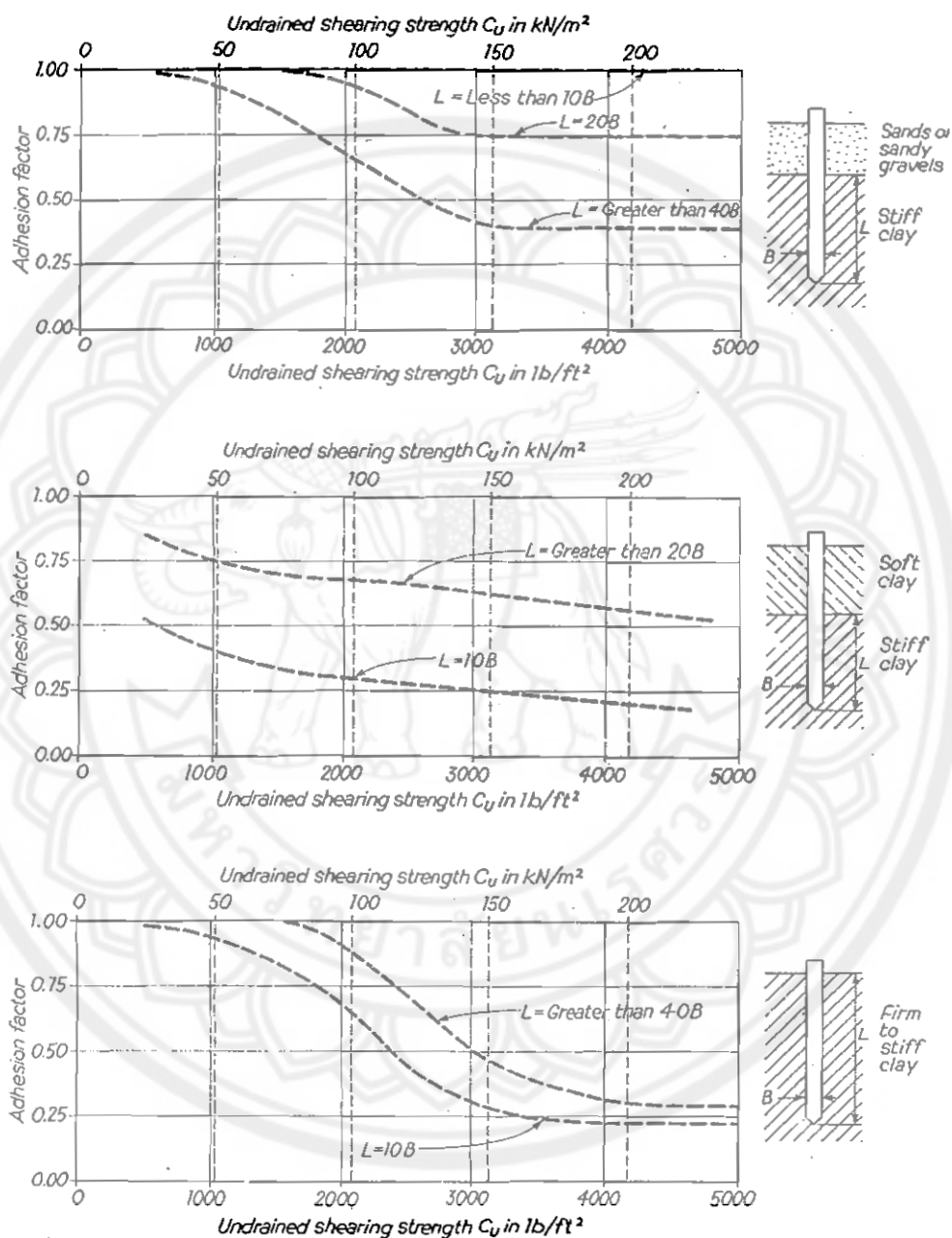
2.3.3 ผลการเกาะยึดดินที่ปลายเสาเข็ม (Dragdown Effects and Soil Plug)

จากการสังเกตของการตอกเสาเข็มบนชั้นดินแข็งในยุโรป สมาคมวิศวกรพบว่า ผลการตอกเสาเข็มหลักกลวงบนชั้นดินเหนียวอ่อนและทรายที่ข้างบนเป็นชั้นดินแข็งในเมืองลอนดอน ในทั้งสองกรณีดินเหนียวอ่อนและดินทรายชั้นบน สามารถเกาะติดผิวเสาเข็มและจมตัวลงไป ในชั้นดินแข็งลอนดอนได้เป็นระยะประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (รูปที่ 2.9) ผลการเกาะยึดดินให้ค่าการยึดเหนี่ยวของดินที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลง สำหรับกรณีดินเหนียวอ่อนและเพิ่มชั้นกรณีดินทราย

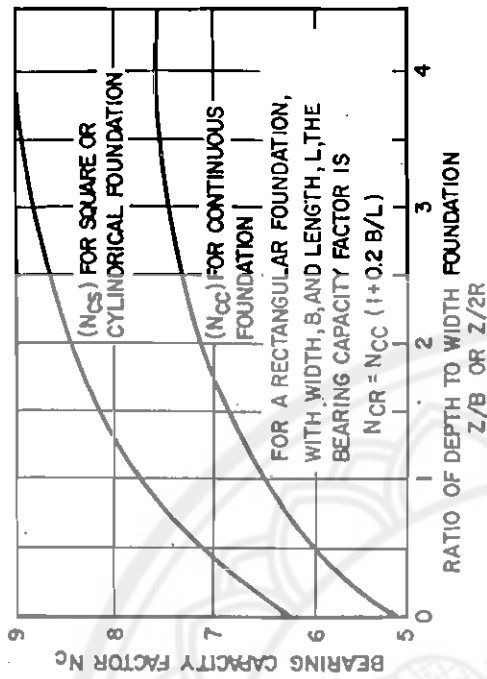
ดินเกาะที่ปลายเสาเข็ม เกิดขึ้นกับการตอกเสาเข็มคอนกรีตและเหล็กที่มีปลายเปิด ในขั้นตอนการตอกเสาเข็ม มวลดินจะไหลเข้าปลายเสาเข็มส่วนเปิด ปลายเสาเข็มกลวงจะมีแรงเสียดทานผิวด้านในต้านทานการไหลเข้าของมวลดิน แรงดันดินส่วนปลายจากการแบกทานของเสาเข็ม ถ้ามีค่ามากกว่าแรงเสียดทานผิวด้านในปลายเสาเข็มกลวง จะทำให้ดินเกาะปลายเสาเข็ม (soil plug) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าระยะดินเกาะปลายเสาเข็มตามทฤษฎีดังรูปที่ 2.10 มีค่าเท่ากับ

$$L_p = 9 C_b A_g / \alpha \overline{Su} D_i \quad (2.9)$$

เมื่อ	L_p	=	ระยะดินเกาะที่ปลายเสาเข็ม
	C_b	=	ค่า Undrain cohesion ของดินเหนียวที่ปลายเสาเข็ม
	A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็มคำนวณจากรัศมีวงในของปลายเปิด
	α	=	ค่าแฟคเตอร์ของการยึดเกาะ (adhesion factor)
	$\overline{Su}$	=	ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำตลอดระยะดินเกาะปลายเสาเข็ม (L_p)
	D_i	=	เป็นเส้นรอบรูปจากรัศมีวงในของปลายเปิดเสาเข็ม



รูปที่ 2.7 ค่าแฟคเตอร์ของการยึดเกาะสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียว (Tomlinson)



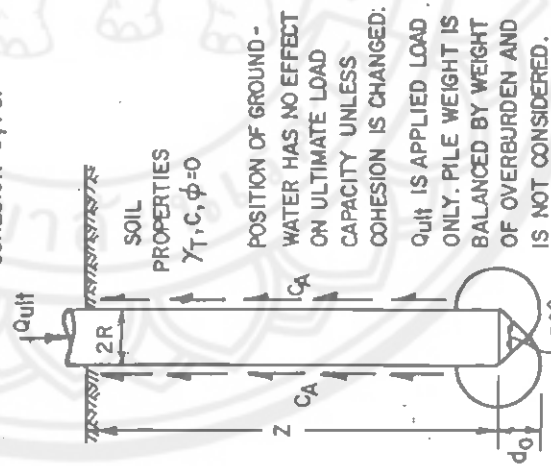
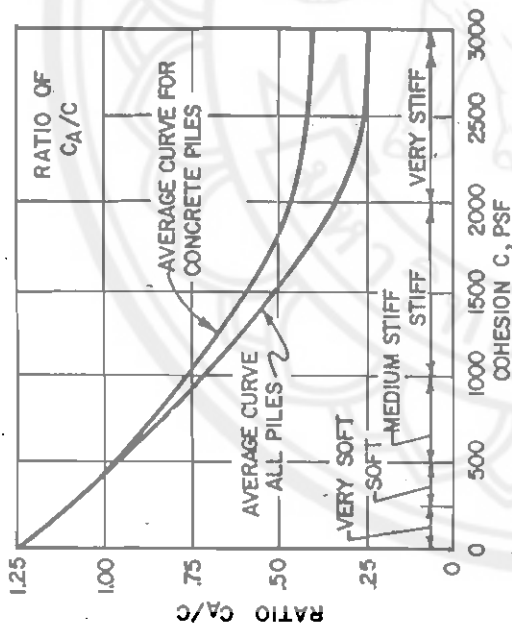
RECOMMENDED VALUES OF ADHESION

PILE TYPE	CONSISTENCY OF SOIL	COHESION, C PSF	ADHESION, C_A PSF
TIMBER AND CONCRETE	VERY SOFT	0 - 250	0 - 250
	SOFT	250 - 500	250 - 480
	MED. STIFF	500 - 1000	480 - 750
	STIFF	1000 - 2000	750 - 950
	VERY STIFF	2000 - 4000	950 - 1300
STEEL	VERY SOFT	0 - 250	0 - 250
	SOFT	250 - 500	250 - 460
	MED. STIFF	500 - 1000	460 - 700
	STIFF	1000 - 2000	700 - 720
	VERY STIFF	2000 - 4000	720 - 750

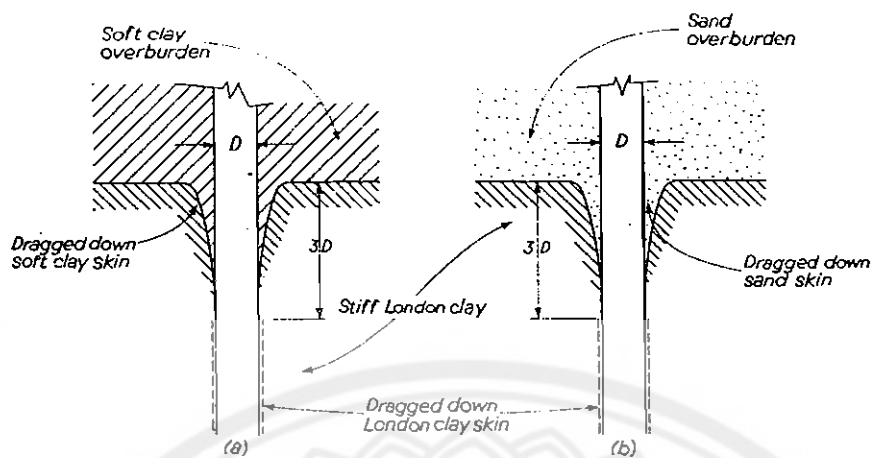
ULTIMATE LOAD CAPACITY IN TENSION

$$T_{ult} = C_A 2\pi RZ$$

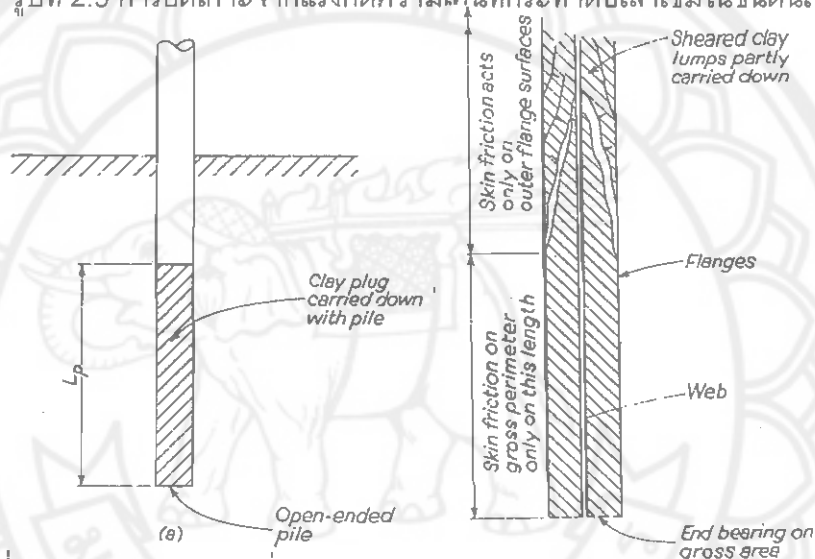
T_{ult} UNDER SUSTAINED LOAD MAY BE LIMITED BY OTHER FACTORS, SEE TEXT.



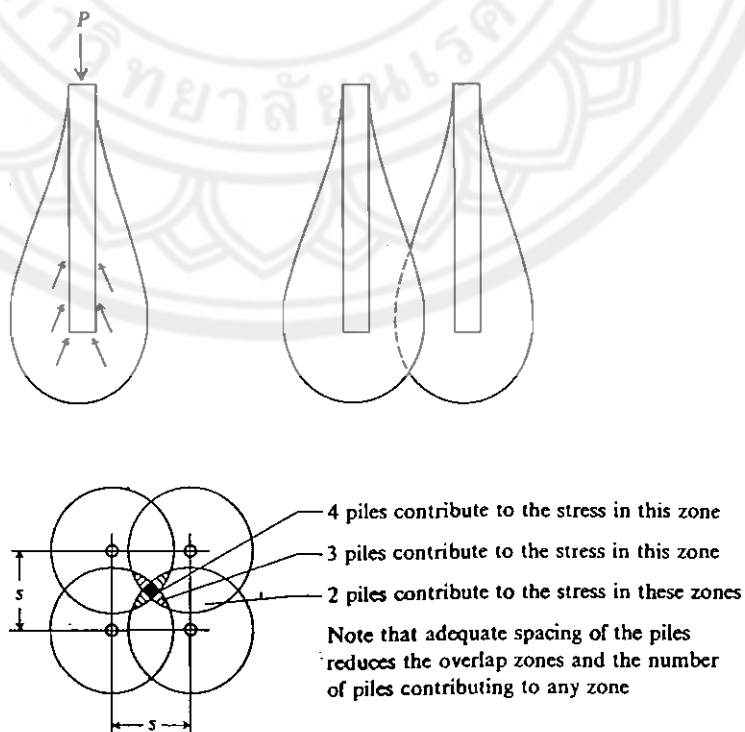
รูปที่ 2.8 กำลังบรรทุกน้ำหนักปลายของเสาเข็มเดี่ยวในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 2.9 การยึดเกาะจากแรงกดความเค้นที่กระทำต่อเสาเข็มในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 2.10 รูปแบบของดินที่เกาะปลายเสาเข็ม (a) ปลายเสาเข็มเปิด (b) H-section



รูปที่ 2.11 แรงเสียดทานรอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม

2.4 การทำนายกำลังเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม

(Prediction by In – Situ Parameters)

2.4.1 จากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (Mayerhof 1976)

$$Q_{ult} = \sum C_s \bar{N}_s A_s + C_b N_b A_b \quad (2.10)$$

โดยที่

$$C_s = 2 \text{ KN/m}^2 \text{ สำหรับเสาเข็มตอก}$$

$$C_s = 1 \text{ KN/m}^2 \text{ สำหรับเสาเข็มเจาะ และ } 1.5 \text{ KN/m}^2 \text{ สำหรับดินทับถมสภาพเดิม}$$

$$C_b = 40 (D_b / B) \text{ สำหรับเสาเข็มตอก}$$

$$C_b = 1 (D_b / B) \text{ สำหรับเสาเข็มเจาะ}$$

ค่าจำกัดของ $C_b N_b < 11000 \text{ KN/m}^2$ เมื่อ

$$N_s, N_b = \text{ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน ตลอดความยาวและปลายของเสาเข็ม ตามลำดับ}$$

$$A_s, A_b = \text{พื้นที่ผิวเสียดทาน และ พื้นที่หน้าตัดปลายเสาเข็ม}$$

2.4.2 จากการทดสอบการกดโคนมาตรฐาน Based on CPT values

$$Q_{ult} = 2 \bar{f}_s A_s + C_{KD} A_b \quad (2.11)$$

โดยที่

$$C_{KD} = \text{ค่าแรงต้านการกดโคน ที่บริเวณปลายเสาเข็ม (KN/m}^2 \text{)}$$

$$\bar{f}_s = \text{ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานผิว ตลอดความยาวของเสาเข็ม (kN/m}^2 \text{)}$$

2.5 กำลังรับน้ำหนักปลอดภัย

กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยสามารถหาได้จากค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดหารด้วยค่าปลอดภัย ซึ่งใช้ค่าน้อยกว่า จากสมการ

$$Q_s = (Q_s + Q_b) / 2.5 \quad (2.12)$$

$$Q_s = (Q_s / 1.5) + (Q_b / 3.0) \quad (2.13)$$

เมื่อ Q_s และ Q_b คือกำลังรับน้ำหนักสูงสุดซึ่งขึ้นกับค่าแรงเสียดทานผิวและค่ากำลังแบกทานตามลำดับ ในทางอุดมคติความแตกต่างในการใช้ค่า F.S. จะขึ้นอยู่กับผลรวมของความต้านทานที่หัวเสาและปลายเสาตามความเป็นจริง จากผลการทดสอบในเสาเข็มขนาดเล็กพบว่าค่ารับกำลังสูงสุดของค่าเสียดทานผิวเมื่อค่าทรุดตัวอยู่ที่ระหว่าง 0.5%D - 1.0%D และค่าการทรุดตัวของหัวเข็มที่เกิดค่าความต้านทานที่ปลายเสาสูงสุดจะอยู่ที่ 10%D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ

ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ยอมรับได้ของเสาเข็มขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของเสาเข็มมากกว่าชั้นดินที่รองรับเช่นเวลาเสาเข็มวางบนชั้นหินหรือชั้นทรายอัดแน่นหรือกรวดตัง้นั้นชนิดของเสาเข็มจึงมีส่วนทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยเปลี่ยนไปตามกำลังของวัสดุดังนี้

ก) เสาเข็มคอนกรีต

$$Q_{am} = 0.25 f'_c A_b \quad (2.14)$$

ข) เสาเข็มเหล็ก

$$Q_{am} = 0.3 f_y A_b \quad \text{สำหรับเสาเข็มตอก} \quad (2.15)$$

$$Q_{am} = 0.5 f_y A_b \quad \text{สำหรับเสาเข็มกด} \quad (2.16)$$

ค) เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

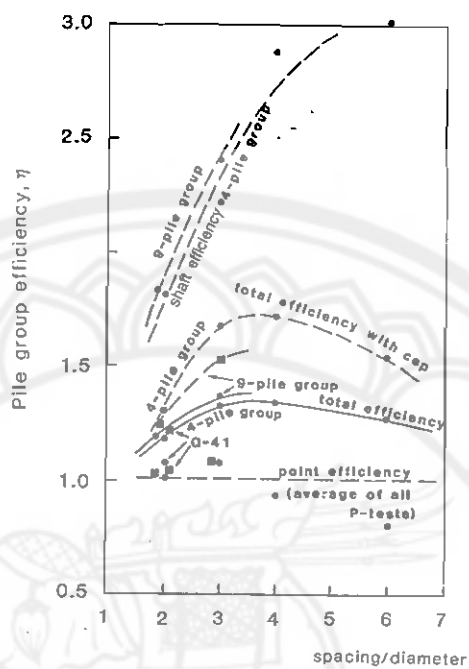
$$Q_s = 0.25 (f'_c - \text{prestress after loss}) A_b \quad (2.17)$$

โดยที่ f'_c = กำลังคอนกรีตลูกบาศก์ที่ 28 วัน

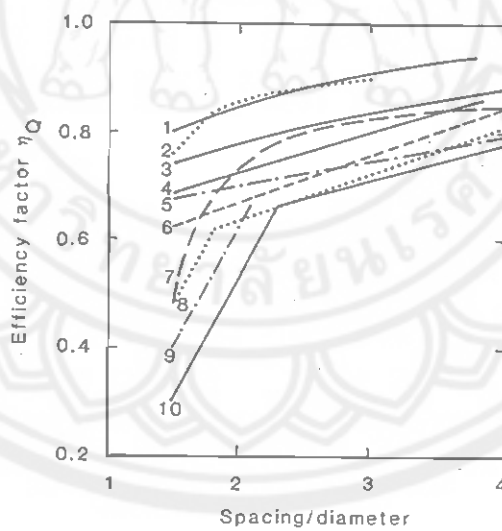
f_y = กำลังจุดครากของเหล็ก

A_b = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

2.6 ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม



ก.) ประสิทธิภาพของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในดินทราย



ข.) ประสิทธิภาพของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในดินเหนียว

รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม (Vesic , 1969)