



สำนักหอสมุด

- 2 ก.ค. 2545 1

4540124

ป
TA
780
6 3815
2544

บทที่ 3

เสาเข็ม

3.1 ฐานรากเสาเข็ม

ฐานรากลึกเสาเข็มเป็นฐานรากลึก เพื่อถ่ายน้ำหนักบรรทุกโดยโครงสร้างส่วนบนลงสู่ ส่วนฐานในชั้นดินหรือชั้นหิน ที่ระดับความลึกที่ต่ำกว่าโครงสร้างนั้น โดยรูปร่างของฐานรากที่ใช้ ออกแบบให้รับแรงดันของชั้นดินหรือหิน ในสภาวะถ่ายแรงดังกล่าวฐานรากเสาเข็มกลุ่มเป็นการ รวมกันของฐานรากหลายๆ ชนิดเข้าด้วยกัน

เสาเข็มนั้นจะใช้ในการติดตั้งเพื่อรองรับถ่ายแรงกดตามแนวแกน , การต้านทานการยกตัว (Uplift) ,หรือแรงดันด้านข้างจากโครงสร้าง (Lateral force) โดยการออกแบบนั้นจะเน้นรูปร่าง ของฐานรากที่แข็งแรงและเพื่อลดการทรุดตัวของฐานราก

การทำเสาเข็มนั้นสามารถทำได้โดยการ driven, jacked, jetted, screwed, bored และ excavated โดยวัสดุที่ใช้ทำนั้นอาจจะเป็นพวก ไม้, คอนกรีต, เหล็ก หรือนำวัสดุต่างๆ มารวมกัน

การจำแนกชนิดของเสาเข็ม

ตารางที่ 3.1 การจำแนกชนิดของเสาเข็มนั้นอาจจะจำแนกจาก โดยข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

ข้อกำหนด	ลักษณะของเสาเข็ม
Installation	Driven; bored; cast-in-situ; jetted; excavated; augered;
Displacement	Displacement; low-displacement; non-displacement;
Material	Concrete; steel; wood;
Function	Shaft bearing; toe bearing;
Capacity	High; moderate; low;
Shape	Square; round; hexagonal; octagonal; h-section;
Environment	Land; marine; off-shore;
Inclination	Vertical; battered;
Length	Long; short;
Structure	Bridges; building; platforms; towers; machinery; etc.

จาก อุดมฤกษ์ ป่านพลอย , 2542

ข้อบัญญัติการออกแบบ (Design Criteria)

ข้อบัญญัติการแบกทาน (Bearing Capacity criteria)

ค่าของ factor of safety ที่มีผลต่อการทรุดตัวของฐานรากและการพังทลายของฐานราก
นั้นมีการกำหนดดังต่อไปนี้

ฐานรากเสาเข็ม (Foundation)

Shallow foundation	F.S. > 3	เมื่อเราไม่ทราบสภาพชั้นดินชัดเจน
Deep foundation	F.S. > 2.5	สำหรับการออกแบบทั่วไป

งานโครงสร้างกำแพงกันดิน (Earth retaining structures)

	Retaining systems	Earth structures
Permanent structures	F.S. = 1.75 to 2.0	F.S. > 1.5
Temporary structures	F.S. = 1.5	F.S. > 1.2

ข้อบัญญัติการ (Deformation criteria)

การเลือกค่าการทรุดตัวทางด้านข้างและทางแนวราบหรือ
โครงสร้างเกิดการวิบัติมีค่าดังต่อไปนี้

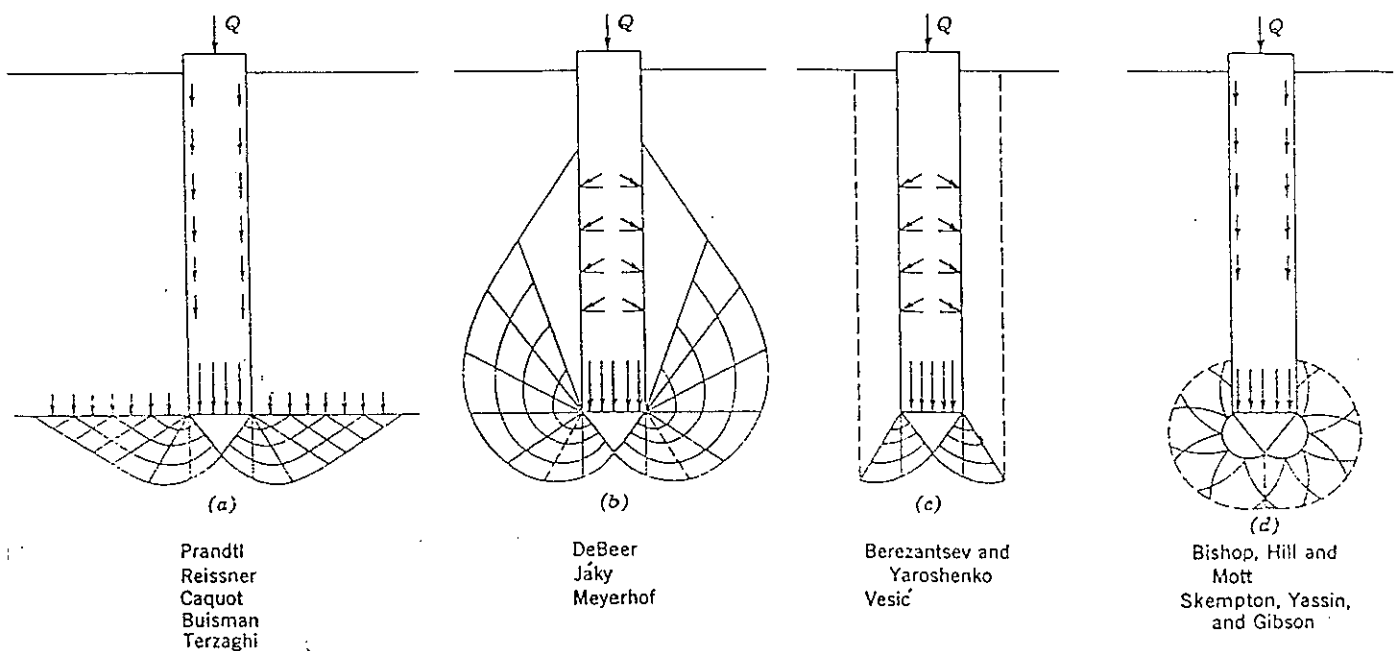
ข้อบัญญัติ (Criteria)	ฐานรากเดี่ยว (Isolated foundation)	ฐานรากแผ่ (Mat foundation)
1) angular distortion	1 / 300	1 / 300 (tilting)
2) greatest differential settlement (Δp_{max})		
clay	4.5 cm.	4.5 cm.
sand	3.25 cm.	3.25 cm.
3) maximum settlement (p_{max})		
clay	7.5 cm.	10 cm.
sand	5.0 cm.	6.25 cm.

4) Other recommendation

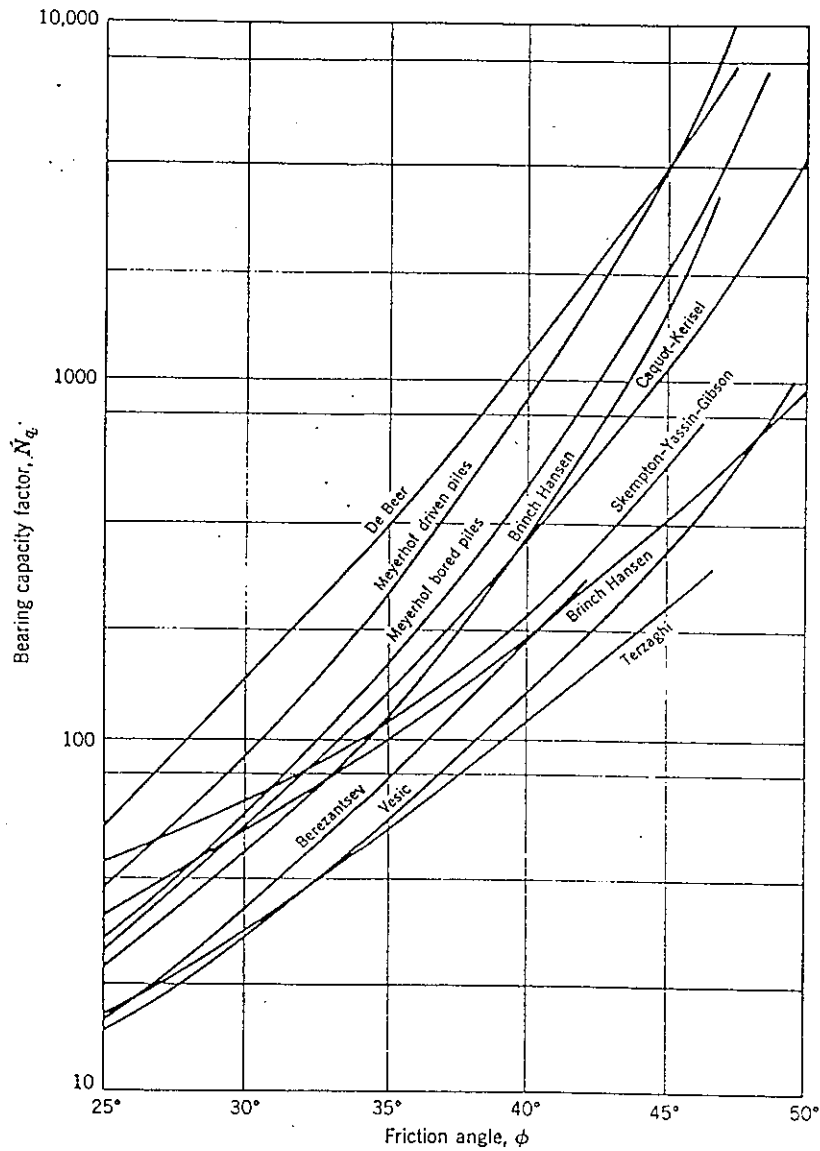
Peck, Hanson & Thornburn (1974)	2.5 cm.	5.0 cm
Empirical rule on (Δp_{max})		
clay	0.3 to 0.5 p_{max}	0.5 p_{max}
sand	0.75 p_{max}	0.75 p_{max}

3.2 ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Capacity)

ฐานรากเสาเข็มกลุ่มถึงเข็มเดี่ยวนั้น มีโอกาสที่จะวิเคราะห์ได้ถูกต้องทำได้ยากเนื่องมาจาก คิกริความไม่แน่นอนสูง (high degree of indeterminate) ในทางด้านของ soil mechanics ดังนั้นความรู้ ประสบการณ์ และผลลัพธ์ที่ได้ในการทดสอบเสาเข็มนั้น จำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษา เพื่อคำนวณหาค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม และในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และเน้นไปที่ soil mechanics ของเสาเข็มเป็นหลัก ความสัมพันธ์ของ Ultimate Bearing Capacity



รูปที่ 3.1 รูปแบบต่าง ๆ ของกลศาสตร์การรับแรงแบกทานของเสาเข็ม (Vesic , 1967)



รูปที่ 3.2 ค่าแฟคเตอร์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสำหรับฐานรากลึก

ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มตอกในทราย

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

จาก Horn , 1966

3.2.1 เสาเข็มในชั้นทราย (Pile In Cohesionless Soils)

ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม (ultimate bearing capacity) นั้นเกิดขึ้นจากกำลังเสียดทานผิว (skin friction, Q_s) และกำลังแบกทานปลายเสาเข็ม (end bearing , Q_b) ซึ่งค่าของกำลังแบกทานปลายเสาเข็ม มักเป็นส่วนสำคัญในการรับแรงของปลายเสาเข็มประเภทนี้

ค่ากำลังเสียดทานผิว (skin friction)

$$Q_s = \sum q_s A_s \quad (3.1)$$

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

f_{limit} = limiting friction = 100 kN/m² ได้จากการสะสมทางสถิติ

σ'_{vo} = effective overburden pressure at the middle of soil layer

ค่า K_s และค่า δ สำหรับเสาเข็มตอก

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

ค่ากำลังแบกทาน (End – bearing)

$$Q_b = \sum q_b A_b \quad (3.2)$$

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

f_{limit} = limiting value of end - bearing = 11000 kN/m² ได้จากการสะสมทางสถิติ

σ'_{vo} = effective overburden pressure at the pile tip

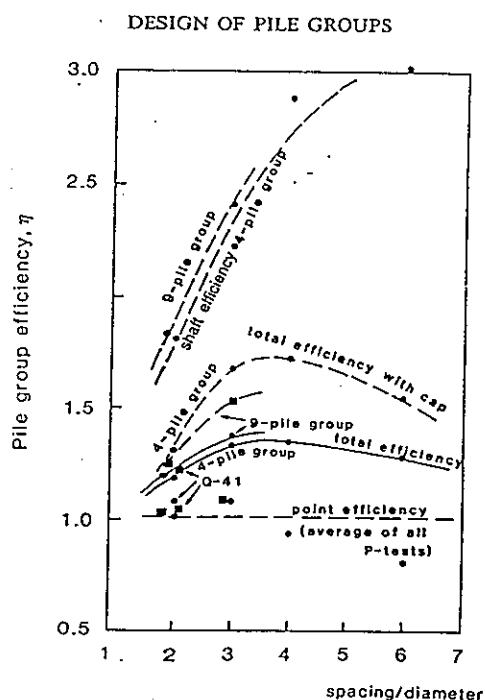
N_q = bearing capacity factor

ค่า N_q ที่ใช้นั้นเป็นค่าของ Meyerhof จะมีค่าสูงกว่าปกติกว่าค่าจริง ค่าของ Berzantser จะเหมาะสมกว่า

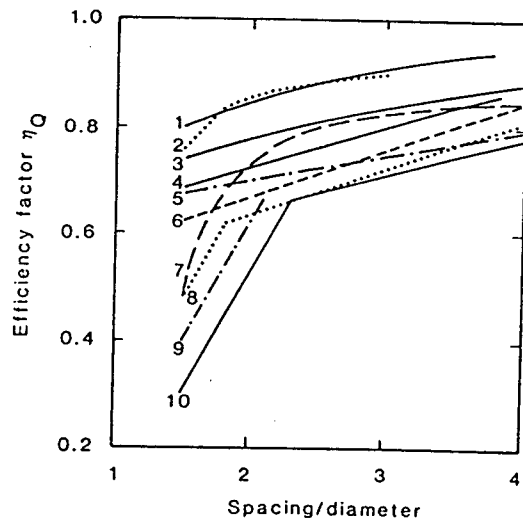
ผลการผ่านแรงเสียดทานผิวของดิน Arching Effects on Friction Resistance

Vesic (1967) and Kerisel (1961) ได้แสดงถึงแรงต้านทานที่ผิวและแรงแบกทานของเสาเข็ม โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มเส้นตรงกับความลึก แต่จะมีค่าที่เกือบจะคงที่เมื่อเลยระยะลึกค่าหนึ่ง ลักษณะเช่นนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยในปี 1971, 1973 และเวลาต่อมา Vesic ซึ่งจากการเปรียบเทียบ อัตราส่วนแรงกดแบกทานกับแรงเสียดทานผิว (f_b / f_s) ของเสาเข็มกับค่ามุมเสียดทานของดิน ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.4 นอกจากนี้ vertical effective stress ที่บริเวณเสาเข็มที่ความลึกระดับหนึ่งไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับ effective overburden pressure เนื่องจากผลของการผ่านแรง (Arching) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทำนองเดียวกับมวลน้ำหนักดินเหนือโครงสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

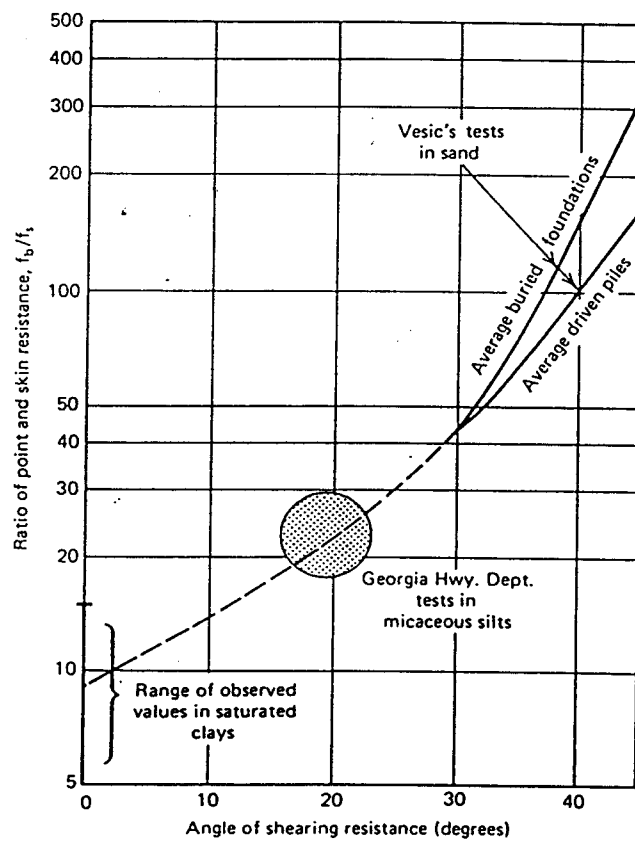
จากการพัฒนาการคำนวณการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ตามปรากฏการณ์การผ่านแรงดังกล่าว ที่ความลึกรอบ ๆ เสาเข็ม (ตามรูปที่ 3.5) จึงมักกำหนดให้ความเค้นประสิทธิผลตามแนวตั้ง (vertical effective stress, σ'_v) มีค่าเท่ากับแรงกดความเค้น (vertical effective stress) ในแนวตั้งจนถึงระดับความลึก Z_c เมื่อความลึกเกินค่า σ'_v จะมีค่าคงที่ เพื่อให้ใช้ง่ายในการอ่านค่าของลักษณะพิเศษของพฤติกรรมที่กล่าวตามทฤษฎีของ Vesic ค่าความลึกวิกฤติจะใช้กับค่าเฉลี่ยของ ultimate skin resistance และ ultimate base resistance ของเสาเข็มในลักษณะงานเดียวกัน



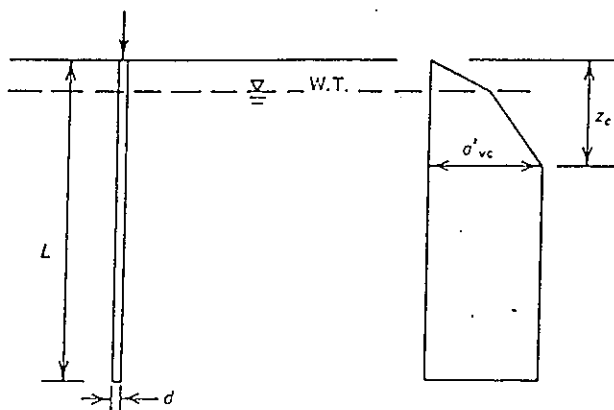
รูปที่ 3.3 ประสิทธิภาพของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในดินทราย (Vesic , 1969)



รูปที่ 3.4 ประสิทธิภาพของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในดินเหนียว

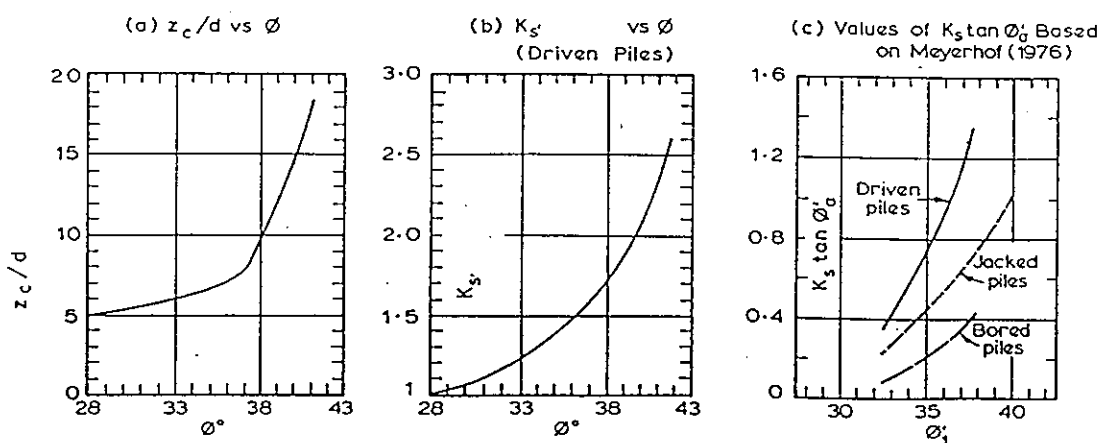


รูปที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง f_b / f_s (Vesic, 1967)



รูปที่ 3.5 ความลึกวิกฤต Z_c กับความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่กระทำต่อเสาเข็มในชั้นดินทราย

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



รูปที่ 3.6 ค่า Z_c/d และ $K_s \tan \phi'_a$ 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 DISPLACEMENT)	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	$3/4 \phi$

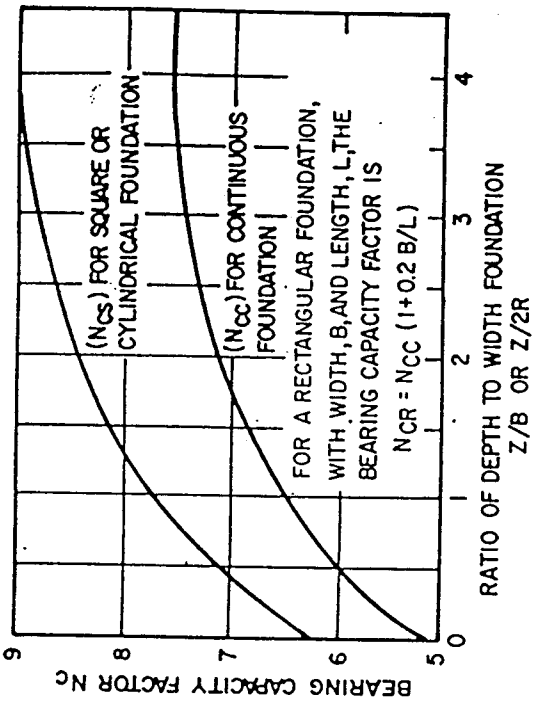
* LIMIT ϕ TO 28° IF JETTING IS USED

** (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.

(CHAPTER 5, DM-7.1).

รูปที่ 3.7 การถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวในดินมวลหยาบ



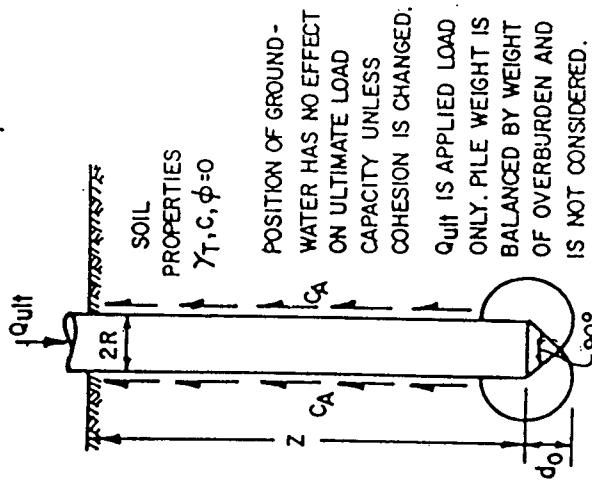
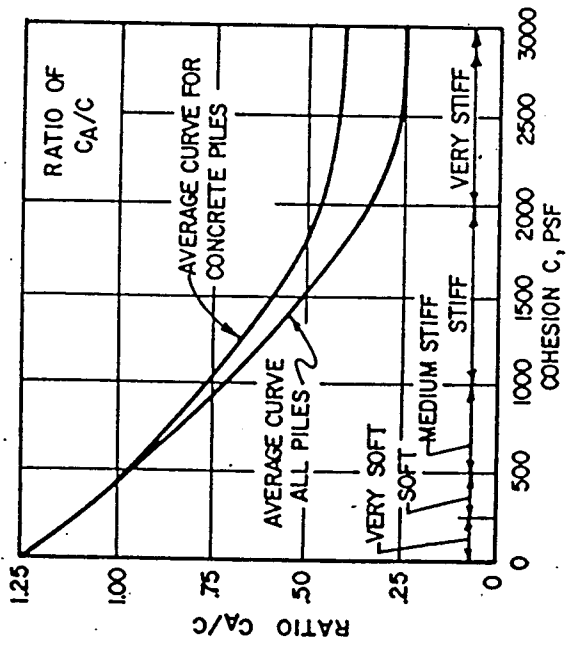
RECOMMENDED VALUES OF ADHESION

PILE TYPE	CONSISTENCY OF SOIL	COHESION, C PSF	ADHESION, CA 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
STEEL	VERY STIFF	2000 - 4000	950 - 1300
	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

$$T_{ult} = C_A 2 \pi R Z$$

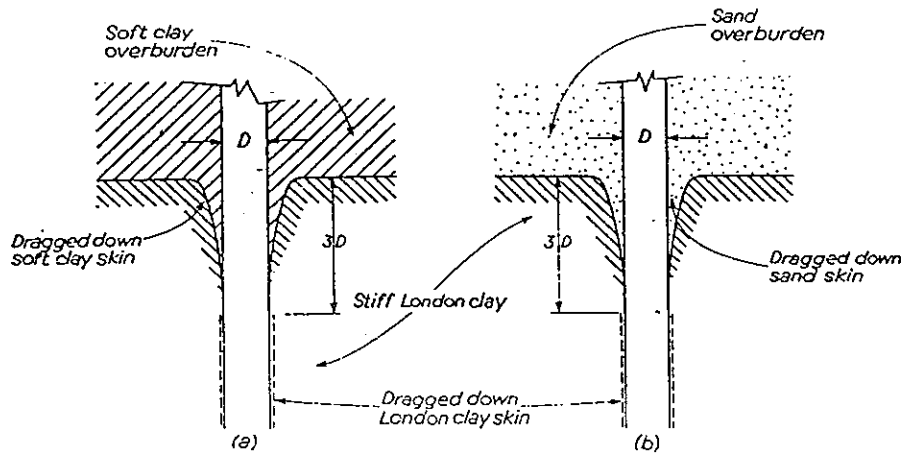
T_{ult} UNDER SUSTAINED LOAD MAY BE LIMITED BY OTHER FACTORS, SEE TEXT.



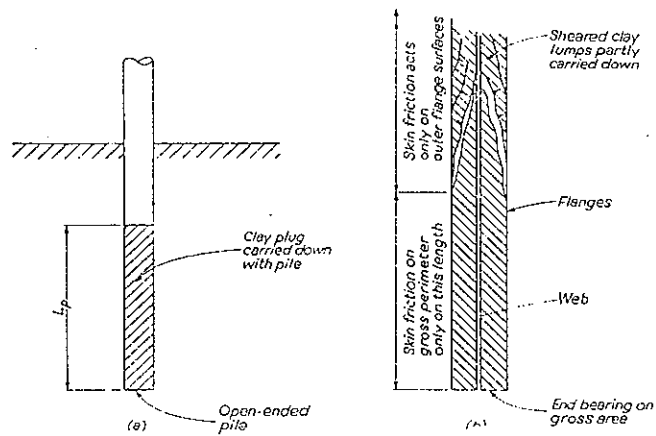
ULTIMATE LOAD CAPACITY IN COMPRESSION

$$Q_{ult} = c (N_{cs}) \pi R^2 + C_A 2 \pi R Z (N_{cc})$$

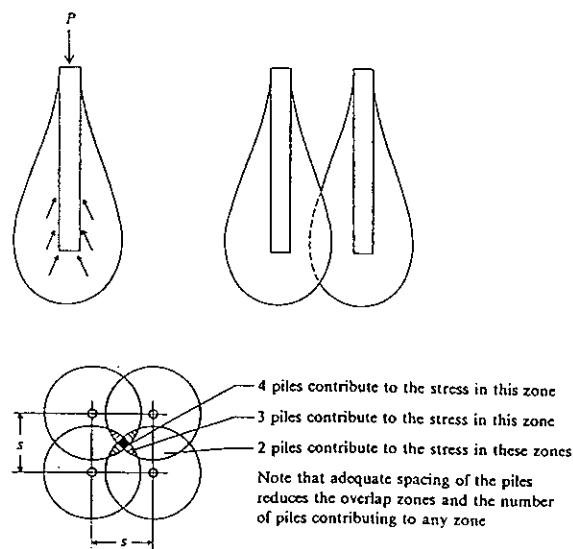
รูปที่ 3.9 กำลังบรรทุกน้ำหนักประลัยของเสาเข็มของเสาเข็มเดือวในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 3.10 การยึดเกาะจากแรงกดความเค้นที่กระทำต่อเสาเข็มในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 3.11 รูปแบบของคอนกรีตที่เกาะปลายเสาเข็ม (a) ปลายเสาเข็มเปิด (b) H-section



รูปที่ 3.12 แรงเสียดทานรอบเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม

3.2.2 เสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Piles in Cohesive Soils)

ค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม (Q_u) เกิดขึ้นจากกำลังเกาะยึดผิว (adhesion, Q_s) และกำลังแบกทาน (bearing, Q_b) ซึ่งค่าของกำลังเสียดทานผิวจะมีค่ามากกว่ากำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม เสมอในกรณีเสาเข็มในชั้นดิน

ค่ากำลังเกาะยึดผิว (Adhesion)

$$Q_s = \sum f_s A_s \quad (3.3)$$

$$f_s = \alpha Su \quad (3.4)$$

α = adhesion / reduction factor to take into account the loss in shear strength due to pile installation

สำหรับเสาเข็มตอกใช้รูปที่ 3.8 ในการหาค่า α สำหรับชั้นดินลักษณะต่าง ๆ

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

ค่ากำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End – bearing)

$$Q_s = \sum q_E A_b \quad (3.5)$$

$$q_E = 9 Su \quad (3.6)$$

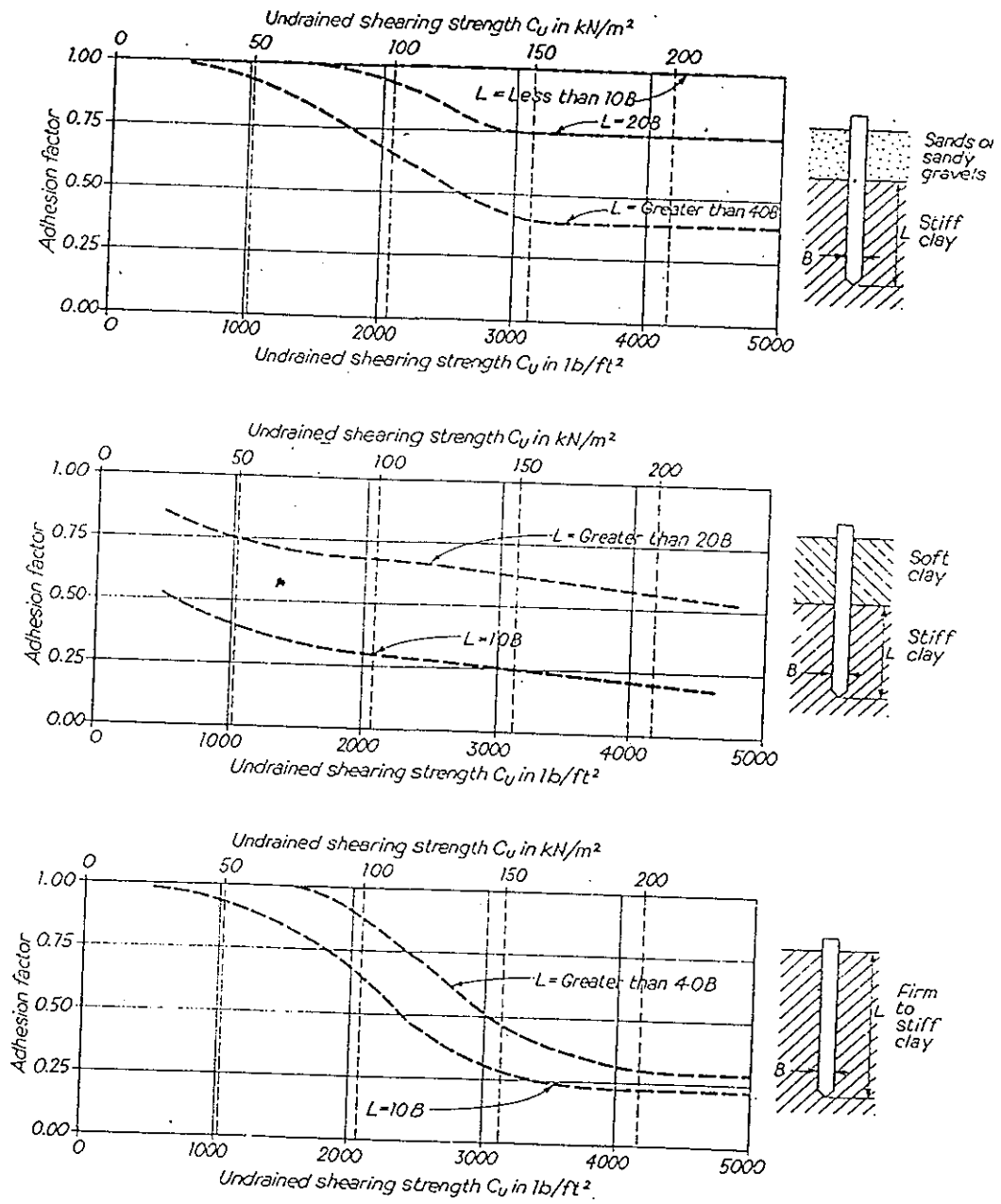
ผลการเกาะยึดดินที่ปลายเสาเข็ม (Dragdown Effects and Soil Plug)

จากการสังเกตของการตอกเสาเข็มบนชั้นดินแข็งในยุโรป สมาคมวิศวกรพบว่า ผลการตอกเสาเข็มเหล็กกลวงบนชั้นดินเหนียวอ่อนและทรายที่ข้างบนเป็นชั้นดินแข็งในเมืองลอนดอน ในทั้งสองกรณีดินเหนียวอ่อนและดินทรายชั้นบน สามารถเกาะติดผิวเสาเข็มและจมตัวลงไปในชั้นดินแข็งลอนดอนได้เป็นระยะประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ผลการเกาะยึดดินให้ค่าการยึดเหนี่ยวของดินที่ผิวเสาเข็มมีค่าลดลง สำหรับกรณีดินเหนียวอ่อนและเพิ่มขึ้นกรณีดินทราย

ดินเกาะที่ปลายเสาเข็ม (Soil plug) เกิดขึ้นกับการตอกเสาเข็มคอนกรีตและเหล็กที่มีปลายเปิด ในขั้นตอนการตอกเสาเข็ม มวลดินจะไหลเข้าปลายเสาเข็มส่วนเปิด ปลายเสาเข็มกลวง จะมีแรงเสียดทานผิวด้านในด้านทานการไหลเข้าของมวลดิน แรงดันดินส่วนปลายจากการแยกทานของเสาเข็มถ้ามีค่ามากกว่าแรงเสียดทานผิวด้านในปลายเสาเข็มกลวง จะทำให้ดินเกาะปลายเสาเข็ม (soil plug) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าระยะดินเกาะปลายเสาเข็มตามทฤษฎีดังรูปที่ 3.11 มีค่าเท่ากับ

$$L_p = 9 C_b A_g / \alpha \bar{S}_u D_i \quad (3.7)$$

เมื่อ	L_p	=	ระยะดินเกาะที่ปลายเสาเข็ม
	C_b	=	ค่า Undrain cohesion ของดินเหนียวที่ปลายเสาเข็ม
	A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็มคำนวณจากรัศมีวงในของปลายเปิด
	α	=	ค่าแฟกเตอร์ของการยึดเกาะ (adhesion factor)
	S_u	=	ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำตลอดระยะดินเกาะปลายเสาเข็ม (L_p)
	D_i	=	เป็นเส้นรอบรูปจากรัศมีวงในของปลายเปิดเสาเข็ม



รูปที่ 3.8 ค่าแฟคเตอร์ของการยึดเกาะสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียว (Tomlinson)

3.2.3 การทำนายกำลังเสาเข็มจากการตรวจสอบในสนาม

(Prediction by In – Situ Parameters)

จากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน Based on N – value (Mayerhof 1976)

$$Q_{ult} = \sum C_s \bar{N}_s A_s + C_b N_b A_b \quad (3.8)$$

$C_s = 2 \text{ KN / m}^2$ for driven piles

$C_s = 1 \text{ KN / m}^2$ for bored piles and C_s can be as high as 1.5 in residual soil

$C_b = 40 (D_b / B)$ for driven piles

$C_b = 1 (D_b / B)$ for bored piles

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

$N_s, N_b =$ the SPT values along pile shaft in average and pile base respectively

$A_s, A_b =$ area of pile shaft and pile base respectively in m^2

จากการทดสอบการกดโคนมาตรฐาน Based on CPT values

$$Q_{ult} = 2 \bar{f}_s A_s + C_{KD} A_b \quad (3.9)$$

$C_{KD} =$ the CPT value at base of pile (KN / m^2)

$\bar{f}_s =$ average shaft friction as reassured on friction jacket (kN/m^2)

3.3 สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile driving formula)

จากสภาพน้ำหนักรรทุกกับการจมตัวของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักกระทำสถิตย์ ได้จำลองผลการตอกเสาเข็มลงดิน ในลักษณะเดียวกัน ดังเช่นเส้นการจมตัวของเสาเข็ม line oeb ในรูปที่ 3.13 สำหรับดินทราย แรงต้านทานเสาเข็มอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ขณะที่เสาเข็มจมตัวจากการตอก

ดั่งรูป 3.13a แต่สำหรับดินเหนียวแข็งแล้ว การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในดิน อาจเลยจุด peak strength ของดินเหนียวก็ได้ ดั่งรูป 3.13b

ดังนั้น ที่มาของสมการเสาเข็มตอก จึงเกิดจากสมมุติฐานที่ว่า แรงต้านทานการจมตัวของเสาเข็มมีค่าคงที่ เป็น Q_d ตลอดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเป็นระยะ $\Delta\rho$ และจากกฎของงาน (total workdone) ด้วยผลการตอกเสาเข็มที่ระยะยก H ด้วยขนาดค้ำ W_H จะได้

$$W_H H = Q_d \Delta\rho + E_1 \quad (3.10)$$

ให้ E_1 เป็นพลังงานที่สูญเสียไป

เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการจมตัวของเสาเข็ม จากแนวคิดสมมุติของสมการเสาเข็มตอก กำหนดให้ส่วนพื้นที่ abd เป็นพลังงานที่สูญเสียไป และส่วนพื้นที่ oadc จึงเป็นพลังงานประสิทธิผลที่ใช้ในการเคลื่อนเสาเข็มจมดิน

$$Q_d = \text{ส่วนพื้นที่ oadc} / \Delta\rho \quad (3.11)$$

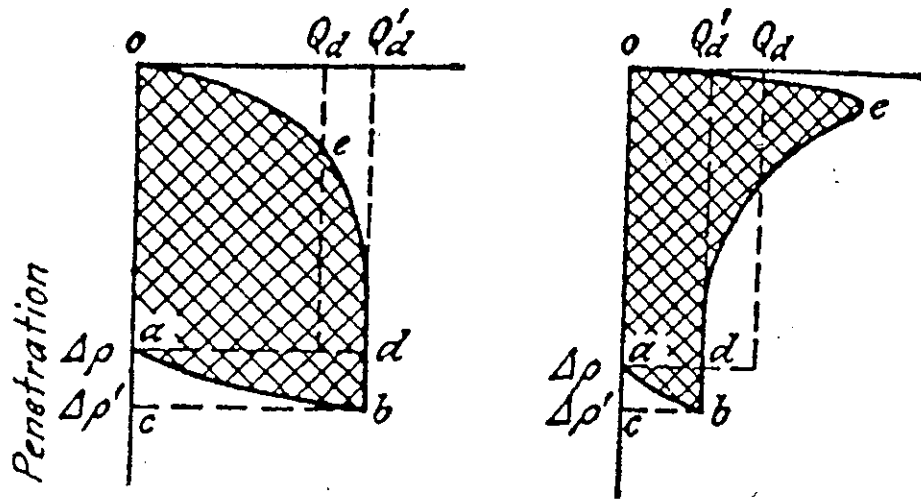
ซึ่งจะเป็นแรงต้านทานเสาเข็มตอกของดิน จากพฤติกรรมของดินภายใต้กฎพลาสติก แรงต้านทานรวม (Q'_d) มีค่าเป็นผลรวมจาก แรงต้านทานสถิตย์ Q_d และส่วนแรงต้านทานพลศาสตร์ ดั่งนั้นจากรูปที่ 3.13 แรงต้านทานสถิตย์อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า Q'_d ก็ได้

จากสมมุติฐานที่มาของพลังงานที่สูญเสียไป E_1 ในสมการ 3.10 แบ่งได้ดังนี้

- ก. ให้พลังงานที่สูญเสียไปมีค่าเท่ากับ พลังงานที่ใช้ในช่วงการค้ำตัว $Q_d (\Delta\rho' - \Delta\rho)$
- ข. E_1 เท่ากับการหดตัวของเสาเข็ม
- ค. E_1 เท่ากับการเสียพลังงานเนื่องจากการคล
- ง. E_1 เป็นผลรวมจากการหดตัวและการเสียพลังงานเนื่องจากการคล

จากสมมุติฐาน ก. จะได้

$$E_1 = Q_d (\Delta\rho' - \Delta\rho) \quad (3.12)$$



(a) ในชั้นดินทราย (b) ในชั้นดินเหนียว
รูปที่ 3-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_d กับระยะจมของเสาเข็มจากการตอก

และสมการที่ (3.10)

$$Q_d = w_H H / \Delta \rho' \tag{3.13}$$

การใช้สมการจำเป็นต้องวัดหาค่า การจมตัวสูงสุด $\Delta \rho'$ ของเสาเข็มขณะถูกตอก ซึ่งทำได้ยากในสนาม

ทฤษฎีของ Weisbach อ้างสมมุติฐาน (ข) จะได้พลังงานที่สูญเสียไปเท่ากับ

$$E_1 = \frac{1}{2} (Q_d^2 L / A_p E_p) \tag{3.14}$$

เมื่อ l = ความยาวของเสาเข็ม A_p = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเสาเข็ม และ E_p = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสาเข็ม ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงต้านทานของดินได้เป็นดังสมการของ Weisbach

$$Q_d = -(\Delta \rho A_p E_p / L) + \sqrt{(2w_H H A_p E_p / 1) + (\Delta \rho A_p E_p / 1)^2} \tag{3.15}$$

จากกฎการคดของนิวตัน ในสมมติฐาน (ค) จะได้

$$E_1 = W_H H (W_p (1 - n_e^2) / W_p + W_H) \quad (3.16)$$

เมื่อ n_e^2 = the coefficient of restitution ของการคดขณะตอกตุ้มกระทบเสาเข็ม กรณีการคดของวัตถุไม่ใช่อีลาสติกแบบสมบูรณ์ สมการ Eytelwin ของเสาเข็มให้ค่า

$$Q_d = W_H H / \Delta \rho (1 + W_p / W_H) \quad (3.17)$$

และให้ $C_p = \Delta \rho W_p / W_H$ เป็นค่าที่ประมาณ สมการ Engineering News จะได้

$$Q_d = W_H H / \Delta \rho + C_p \quad (3.18)$$

สุดท้ายสมมติฐาน (ง) รวมผลการสูญเสียพลังงาน ระหว่างการตอกเสาเข็ม เนื่องจากการหดตัวอีลาสติกสมการ (3.14) การคดในสมการ (3.16) และส่วนพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการหดตัวของดิน และอุปกรณ์ครอบหัวเสาเข็มจะได้

$$W_H H = Q_d \Delta \rho + W_H H (W_p (1 - n_e^2) / W_p + W_H) + (Q_d^2 L / 2A_p E_p) + E_s \quad (3.19)$$

ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของสมการ Hiley (1930)

สมการของ Hiley' Formular เป็นไปดังสมการที่ (3.20) คือ

$$Q_d = [e_n W_H H / (s + 1/2 (c_1 + c_2 + c_3))] [(W_H + n_e^2 W_p) / (W_H + W_p)] \quad (3.20)$$

เมื่อ Q_d = กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม, กก.
 n_e^2 = สัมประสิทธิ์ของการรองรับการตอก coefficient of restitution หรือ
 = 0.25 สำหรับการตอกเสาเข็มคอนกรีตที่รองด้วยหมอนรองไม้
 W_p = น้ำหนักของตุ้ม, กก.
 W_H = น้ำหนักของตุ้ม, กก.
 S = ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม.

- C_1 = ระยะยุบตัวของหมอนรองหัวเสาเข็มหนา t ซม. = $0.018Q_d t / A_p$ ซม.
 = 0.20 – 0.40 ซม. สำหรับเสาเข็มคอนกรีตที่รองด้วยไม้ในหัวครอบเหล็ก
 C_2 = ระยะยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กยาว L เมตร
 = $0.72 Q_d L / A$ ซม.
 C_3 = ระยะยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม = $3.60 Q_d / A$ ซม. ประมาณ
 0.25 ซม.
 e_h = ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม
 = 1.00 สำหรับลูกตุ้มปล่อยด้วยไก หรือ 0.75 เมื่อปล่อยด้วยลวดและ
 เครื่องกว้าน

ตัวอย่างการคำนวณ

$W_H = 3.5$ ตัน , $h = 60$ ซม. , $Q_d = 20$ ตัน (Working load)

$L = 21$ ม. , $W_p = 2.0$ ตัน , $A_p = 650$ ซม.²

$t = 10$ ซม. , $S = ?$

ถ้าใช้ส่วนปลอดภัย (F.S) = 4.0

วิธีการคำนวณ

จาก $Q_d = [e_h W_H H / (s + \frac{1}{2} (c_1 + c_2 + c_3))] [(W_H + n_e^2 W_p) / (W_H + W_p)]$

$Q_d = 20.0 \times 4.0 = 80$ ตัน

$W_H + n_e^2 W_p / (W_H + W_p) = 3.5 + (0.25)^2 (2.0) / (3.5 + 2.0) = 0.659$

$C_1 = 1.8 \times 80 \times 0.10 / 650 = 0.022$ ซม.

$C_2 = 0.72 \times 80 \times 21 / 650 = 1.860$ ซม.

$C_3 = 3.6 \times 80 / 650 = 0.443$ ซม.

$e_h = 0.80$

แทนค่าในสมการ

$80 = 0.80 \times 3.5 \times 60 \times 0.659 / [s + \frac{1}{2} (0.022 + 1.860 + 0.443)]$

$s = 0.2214$ ซม.

ค่าเฉลี่ยจาก 10 ครั้งสุดท้ายได้ไม่มากกว่า 0.2214 ซม. หรือการทรุดตัว 10 ครั้งสุดท้าย
 ต้องไม่มากกว่า 2.2 ซม.