

บทที่ 10

ฐานรากเสาเข็ม

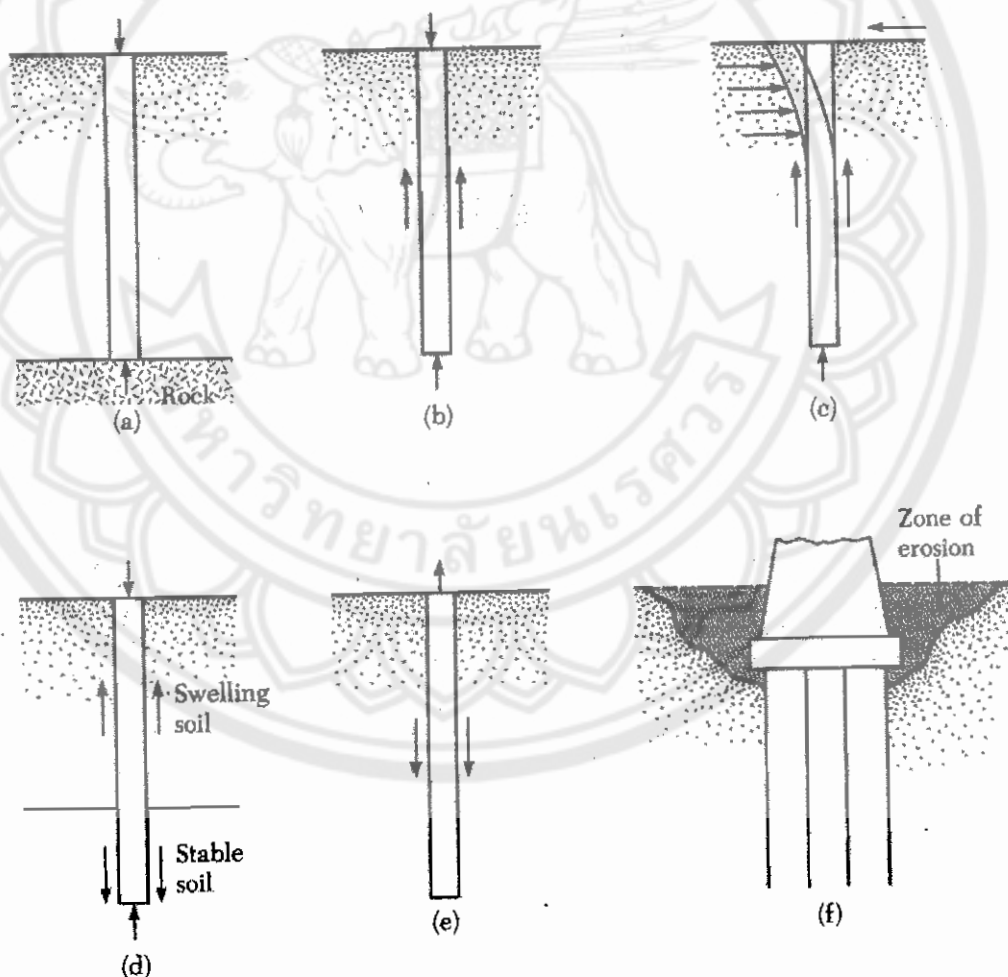
(Pile Foundations)

10.1 เนื้อหาโดยย่อ

ฐานรากเสาเข็มเป็นฐานรากที่มีเสาเข็มเป็นส่วนรับน้ำหนักจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินในระดับลึกที่สามารถรองรับน้ำหนักนั้นได้ โดยไม่เกิดการวิบัติ เสาเข็มเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อาจทำมาจาก เหล็ก, คอนกรีต, หรือ ไม้ เราจะใช้ฐานรากเสาเข็มในงานที่มีความลึกมากกว่าฐานรากแบบตื้น นอกจากนี้ยังมีราคาการก่อสร้างแพงกว่าด้วย แม้ว่าจะมีราคาในการก่อสร้างที่สูงกว่า แต่ฐานรากเสาเข็มจำเป็นต้องใช้ทั้งนี้ก็เพื่อให้เพิ่มความปลอดภัยแก่โครงสร้าง โดยเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือเหตุผลที่จะต้องใช้ฐานรากแบบเสาเข็ม

1. เมื่อดินในระดับตื้นมีกำลังรับน้ำหนักไม่พอที่จะรองรับโครงสร้างได้ และ/หรือดินนั้นมีค่าการยุบอัดตัวมาก (High Compressibility) และดินที่มีความแข็งแรงที่เหมาะสมพอที่จะรองรับโครงสร้างอยู่ในระดับลึก (คือมากกว่า 5 เมตร) จึงต้องใช้ฐานรากเสาเข็ม ซึ่งเสาเข็มจะเป็นตัวที่รับน้ำหนักจากโครงสร้างผ่านชั้นดินที่ไม่เหมาะสมในระดับตื้นแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินที่มีระดับความลึกที่เหมาะสม ดังแสดงใน รูปที่ 10.1.1a เป็นชนิดของฐานรากเสาเข็มที่มีปลายของเสาเข็มหยั่งลงบนชั้นดินแข็ง เรียกว่า End Bearing Pile และ รูปที่ 10.1.1b เป็นชนิดของฐานรากเสาเข็ม ที่รองรับน้ำหนักของโครงสร้างในรูปของแรงมีดรอบพื้นที่ผิวของเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า Floating หรือ Friction Pile
2. เมื่อฐานรากต้องรับแรงในแนวราบ (Horizontal Forces) ควรเลือกฐานรากเสาเข็มเพื่อต้านทานโมเมนต์ที่จะเกิดขึ้นในฐานราก ดังแสดงใน รูปที่ 10.1.1c ตัวอย่างเช่น การออกแบบ Earth Retaining Wall, โครงสร้างสูงที่รับแรงลม หรือ โครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น
3. เมื่อพบชั้นดินบางช่วงที่เป็นประเภท Expansive Soil ซึ่งเป็นดิน ควรเลือกฐานรากที่มีคุณสมบัติบวมตัว (Swelling) ถ้ามีความชื้นมากและจะหดตัว (Shrinkage) ถ้ามีการสูญเสียความชื้น ดังนั้นควรเลือกฐานรากเสาเข็มเพื่อหลีกเลี่ยงการถ่ายน้ำหนักโครงสร้าง

4. ลงสู่ดินประเภทนี้ ในทำนองเดียวกัน เมื่อดินประเภท Collapsible Soil ซึ่งเป็นดินประเภทที่โครงสร้างถูกทำลายไปถ้าได้รับความชื้นมากขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการหดตัวในดินได้มากกว่านี้ ดังแสดงใน รูปที่ 10.1.1d
5. เมื่อฐานรากต้องรับแรงดึงขึ้น (Tension or Uplift Force) หรือต้องต้านทานการพลิกคว่ำของอาคาร (Overturning) ควรเลือกเป็นฐานรากเสาเข็มเพื่อต้านฐานแรงดังกล่าว ดังแสดงใน รูปที่ 10.1.1e
6. เมื่อโครงสร้างเป็นงานก่อสร้างสะพาน จำเป็นต้องวางตอม่อไว้บนฐานรากเสาเข็ม เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานราก อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของดิน ดังแสดงใน รูปที่ 10.1.1f



รูปที่ 10.1.1 Conditions that require the use of pile foundations

10.1.1 Types of Piles and Their Structural Characteristics

ข้อแตกต่างของชนิดของเสาเข็มที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักบรรทุกที่เสาเข็มจะต้องรับ, เงื่อนไขของชั้นดินที่รองรับเสาเข็ม และตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน เสาเข็มสามารถแบ่งตามประเภทได้ดังนี้ (1) เสาเข็มเหล็ก (steel piles), (2) เสาเข็มคอนกรีต (concrete piles), (3) เสาเข็มไม้ (wooden or timber piles), และ (4) เสาเข็มประกอบ (composite piles)

เสาเข็มเหล็ก (Steel Piles)

โดยทั่วไปแล้วเสาเข็มเหล็ก (steel piles) จะมีลักษณะเป็น *pipe piles* หรือ *rolled steel H-section piles* ซึ่ง Pipe piles สามารถตอกลงไปในชั้นดินโดยเปิดหรือปิดปลาย นอกจากนี้เรายังสามารถนำคานเหล็กแบบปีกกว้าง (Wide-flange steel beams) และคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ (I-section steel beams) มาใช้เป็นเสาเข็มได้ อย่างไรก็ตามเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวเอช (H-section piles) จะนิยมนำมาใช้มากกว่า ทั้งนี้ก็เนื่องจากเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวเอช (H-section piles) มีความหนาที่ส่วนเอว (web) และส่วนปีก (flange) เท่ากัน ในขณะที่คานเหล็กแบบปีกกว้าง (Wide-flange steel beams) และคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ (I-section steel beams) มีความหนาของส่วนเอว น้อยกว่าความหนาของส่วนปีก ตารางที่ 10.1.1 จะบอกขนาดและมาตรฐานสำหรับเสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอช (H-section steel piles) ส่วน ตารางที่ 10.1.3 แสดงค่าต่างๆที่สามารถเลือกใช้ pipe sections สำหรับความต้องการนำเสาเข็มไปใช้ โดยทั่วไปแล้ว Pipe piles จะทำการเทคอนกรีตลงไปหลังจากทำการตอกเสร็จแล้ว

ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักจากโครงสร้างที่ยอมให้ของเสาเข็ม คือ

$$Q_{all} = A_s f_s$$

เมื่อ A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก (cross-sectional area of the steel)

f_s = ค่าความเค้นที่ยอมให้ของเหล็ก (allowable stress of steel), มีค่าประมาณ 0.33 – 0.5 f_y , การออกแบบน้ำหนักบรรทุกสำหรับเสาเข็มได้ถูกกำหนดไว้แล้ว โดยพื้นฐานของการพิจารณาทางด้านธรณีเทคนิค ซึ่งค่า $Q_{(design)}$ จะอยู่ในช่วงที่ยอมให้ไว้ในสมการ $Q_{all} = A_s f_s$

เมื่อจำเป็นต้องมีการต่อประกับเสาเข็มเหล็กโดยมากแล้วจะทำการต่อประกับด้วยการเชื่อม (welding) หรือโดยการใช้หมุดย้ำ (riveting) รูปที่ 10.1.2a แสดงตัวอย่างการต่อประกับ

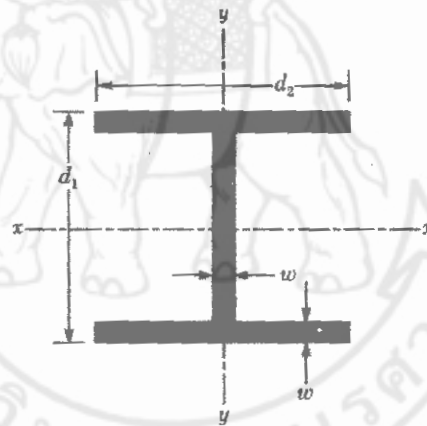
เสาเข็มโดยการเชื่อมสำหรับ H-pile ส่วนของการต่อประกบโดยการเชื่อมสำหรับ pipe pile จะแสดงใน รูปที่ 10.1.2b ส่วน รูปที่ 10.1.2c คือแผนภาพของการต่อประกบของ H-pile โดยการใช้ หมุดยึด (rivets) หรือสลักเกลียว (bolt)

เมื่อมีการคาดหมายเกี่ยวกับเงื่อนไขในสภาวะที่ยากแก่การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม เช่น การตอกเสาเข็มลงไปในกรวดแน่น (dense gravel) , หินดินดาน (shale) หรือในชั้นหินที่ไม่แข็งมาก (soft rock) เสาเข็มเหล็กสามารถทำให้พอดีได้โดยการใช้ driving points หรือ โลหะหุ้ม (shoes) รูปที่ 10.1.2d และ รูปที่ 10.1.2e คือ แผนภาพของการหุ้มเสาเข็ม 2 ประเภท สำหรับ pipe piles

ในบางครั้งเสาเข็มเหล็กอาจเกิดการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น เมื่อเสาเข็มเหล็กตั้งอยู่ในสภาพที่เป็นน้ำขัง (swamps), สภาพที่มีซากพืชที่ทับถมกัน (peats) และสภาพของดินที่เจือปนไปด้วยอินทรีย์สาร (organic soils) ซึ่งสิ่งทีกล่าวมานี้ล้วนเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเสาเข็ม ในกรณีนี้จึงมีการแนะนำให้เพิ่มความหนาของเหล็ก (เพิ่มจากพื้นที่หน้าตัดที่ออกแบบจริง) สำหรับในโรงงานผลิตแล้วจะทำการเคลือบเหล็กด้วย epoxy ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการต้านทานการสึกกร่อนได้ โดยการเคลือบนี้จะไม่ได้รับความเสียหายเมื่อทำการตอกเสาเข็ม การหุ้มด้วยคอนกรีตของเสาเข็มเหล็กในพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรงก็สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 10.1.1 Common H-Pile Sections Used in the United States (SI Units)

Designation, size (mm) × weight (kg/m)	Depth d_1 (mm)	Section area ($m^2 \times 10^{-3}$)	Flange and web thickness w (mm)	Flange width d_2 (mm)	Moment of inertia ($m^4 \times 10^{-6}$)	
					I_{xx}	I_{yy}
HP 200 × 53	204	6.84	11.3	207	49.4	16.8
HP 250 × 85	254	10.8	14.4	260	123	42
× 62	246	8.0	10.6	256	87.5	24
HP 310 × 125	312	15.9	17.5	312	271	89
× 110	308	14.1	15.49	310	237	77.5
× 93	303	11.9	13.1	308	197	63.7
× 79	299	10.0	11.05	306	164	62.9
HP 330 × 149	334	19.0	19.45	335	370	123
× 129	329	16.5	16.9	333	314	104
× 109	324	13.9	14.5	330	263	86
× 89	319	11.3	11.7	328	210	69
HP 360 × 174	361	22.2	20.45	378	508	184
× 152	356	19.4	17.91	376	437	158
× 132	351	16.8	15.62	373	374	136
× 108	346	13.8	12.82	371	303	109



ตารางที่ 10.1.2 Common H-Pile Sections Used in the United States (English Units)

Designation size (in.) × weight (lb/ft)	Depth d_1 (in.)	Section area (in^2)	Flange and web thickness w (in.)	Flange width d_2 (in.)	Moment of inertia (in^4)	
					I_{xx}	I_{yy}
HP 8 × 36	8.02	10.6	0.445	8.155	119	40.3
HP 10 × 57	9.99	16.8	0.565	10.225	294	101
× 42	9.70	12.4	0.420	10.075	210	71.7
HP 12 × 84	12.28	24.6	0.685	12.295	650	213
× 74	12.13	21.8	0.610	12.215	570	186
× 63	11.94	18.4	0.515	12.125	472	153
× 53	11.78	15.5	0.435	12.045	394	127
HP 13 × 100	13.15	29.4	0.766	13.21	886	294
× 87	12.95	25.5	0.665	13.11	755	250
× 73	12.74	21.6	0.565	13.01	630	207
× 60	12.54	17.5	0.460	12.90	503	165
HP 14 × 117	14.21	34.4	0.805	14.89	1220	443
× 102	14.01	30.0	0.705	14.78	1050	380
× 89	13.84	26.1	0.615	14.70	904	326
× 73	13.61	21.4	0.505	14.59	729	262

ตารางที่ 10.1.3 Selected Pipe Pile

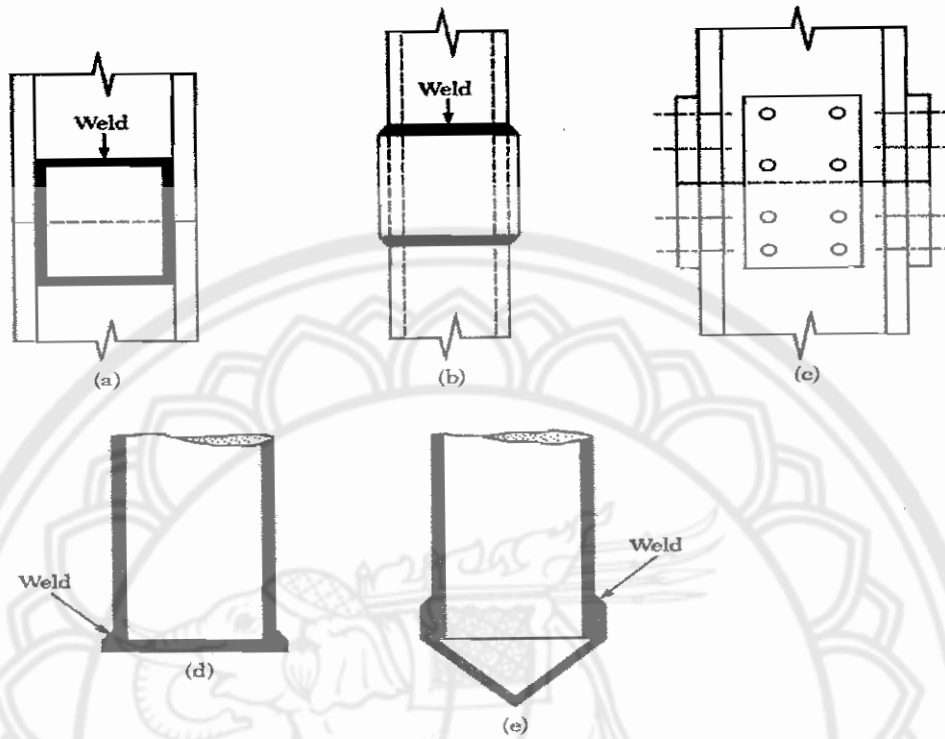
Sections (SI Units)

Outside diameter (mm)	Wall thickness (mm)	Area of steel (cm ²)
219	3.17	21.5
	4.78	32.1
	5.56	37.3
	7.92	52.7
254	4.78	37.5
	5.56	43.6
	6.35	49.4
305	4.78	44.9
	5.56	52.3
	6.35	59.7
406	4.78	60.3
	5.56	70.1
	6.35	79.8
457	5.56	80
	6.35	90
	7.92	112
508	5.56	88
	6.35	100
	7.92	125
610	6.35	121
	7.92	150
	9.53	179
	12.70	238

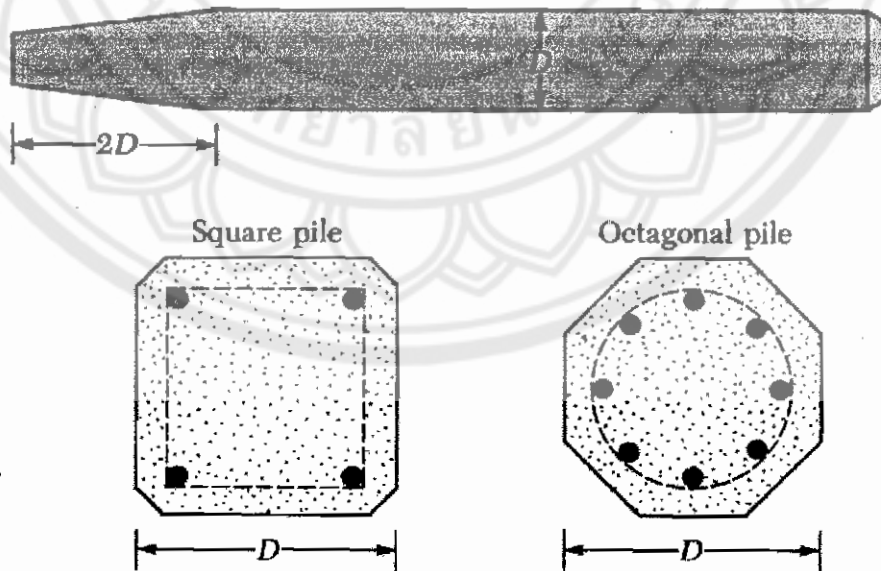
ตารางที่ 10.1.4 Selected Pipe Pile

Sections (English Units)

Outside diameter (in.)	Wall thickness (in.)	Area of steel (in ²)
8 ⁵ / ₈	0.125	3.34
	0.188	4.98
	0.219	5.78
	0.312	8.17
10	0.188	5.81
	0.219	6.75
	0.250	7.66
12	0.188	6.96
	0.219	8.11
	0.250	9.25
16	0.188	9.34
	0.219	10.86
	0.250	12.37
18	0.219	12.23
	0.250	13.94
	0.312	17.34
20	0.219	13.62
	0.250	15.51
	0.312	19.30
24	0.250	18.7
	0.312	23.2
	0.375	27.8
	0.500	36.9



รูปที่ 10.1.2 Steel pile



รูปที่ 10.1.3 Precast piles with ordinary reinforcement

ข้อมูลบางประการโดยทั่วไปเกี่ยวกับเสาเข็มเหล็ก (steel pile)

- ความยาวปกติ (Usual length): 15 – 60 m (50-200 ft)
- น้ำหนักบรรทุกปกติ (Usual load): 300 – 1200 kN (67-265 kips)

ข้อดี (Advantages)

- a. ง่ายแก่การปฏิบัติและควบคุมในการตัดและต่อ (cutoff and extension) สำหรับความยาวที่ต้องการ
- b. สามารถตั้งอยู่ได้เมื่อทำการตอกด้วยความเค้นสูงๆ (can stand high driving stresses)
- c. สามารถตอกเข้าไปในชั้นดินแข็ง เช่น dense gravel และ soft rock
- d. มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง

ข้อเสีย (Disadvantages)

- a. ค่อนข้างมีราคาแพง
- b. ขณะทำการตอกเสาเข็มจะมีระดับเสียงค่อนข้างสูง
- c. สามารถเกิดการสึกกร่อนได้
- d. H-piles อาจจะทำให้เกิดความเสียหายหรือเบี่ยงเบนทิศทางไปจากแนวเดิมขณะทำการตอกผ่านชั้นดินแข็งหรือสิ่งกีดขวางหลัก (major obstructions)

เสาเข็มคอนกรีต (Concrete Piles)

เสาเข็มคอนกรีต (concrete piles) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทพื้นฐานคือ : 1) เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป (precast piles) และ 2) เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-situ piles) เสาเข็มหล่อสำเร็จรูป (precast piles) สามารถเตรียมการโดยใช้เหล็กเสริมแบบปกติ โดยเสาเข็มจะมีพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square) และพื้นที่หน้าตัดแบบแปดเหลี่ยม (octagonal) ดูใน รูปที่ 10.1.3 เหล็กเสริมจะถูกเตรียมไว้เพื่อให้เสาเข็มสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการยกและขนส่งเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งและโมเมนต์ดัดมีสาเหตุมาจากน้ำหนักบรรทุกในแนวราบ เสาเข็มจะทำการหล่อเพื่อให้ได้ความยาวที่ต้องการและได้รับการดูแลรักษาก่อนทำการขนส่งไปสู่สถานที่ก่อสร้าง (work sites)

ตารางที่ 10.1.5 Typical Prestressed Concrete Pile in Use (SI Units)

Pile shape ^a	D (mm)	Area of cross section (cm ²)	Perimeter (mm)	Number of strands		Minimum effective prestress force (kN)	Section modulus (m ³ × 10 ⁻³)	Design bearing capacity (kN)	
				12.7-mm diameter	11.1-mm diameter			Strength of concrete (MN/m ²)	
								34.5	41.4
S	254	645	1016	4	4	312	2.737	556	778
O	254	536	838	4	4	258	1.786	462	555
S	305	929	1219	5	6	449	4.719	801	962
O	305	768	1016	4	5	369	3.097	662	795
S	356	1265	1422	6	8	610	7.489	1091	1310
O	356	1045	1168	5	7	503	4.916	901	1082
S	406	1652	1626	8	11	796	11.192	1425	1710
O	406	1368	1346	7	9	658	7.341	1180	1416
S	457	2090	1829	10	13	1010	15.928	1803	2163
O	457	1729	1524	8	11	836	10.455	1491	1790
S	508	2581	2032	12	16	1245	21.844	2226	2672
O	508	2136	1677	10	14	1032	14.355	1842	2239
S	559	3123	2235	15	20	1508	29.087	2694	3232
O	559	2587	1854	12	16	1250	19.107	2231	2678
S	610	3658	2438	18	23	1793	37.756	3155	3786
O	610	3078	2032	15	19	1486	34.794	2655	3186

^aS = square section; O = octagonal section



ตารางที่ 10.1.6 Typical Prestressed Concrete Pile in Use (English Units)

Pile shape ^a	D (in.)	Area of cross section (in ²)	Perimeter (in.)	Number of strands		Minimum effective prestress force (kip)	Section modulus (in ³)	Design bearing capacity (kip)	
				1/2-in diameter	7/16-in diameter			Strength of Concrete	
								5000 psi	6000 psi
S	10	100	40	4	4	70	167	125	175
O	10	83	33	4	4	58	109	104	125
S	12	144	48	5	6	101	288	180	216
O	12	119	40	4	5	83	189	149	178
S	14	196	56	6	8	137	457	245	295
O	14	162	46	5	7	113	300	203	243
S	16	256	64	8	11	179	683	320	385
O	16	212	53	7	9	148	448	265	318
S	18	324	72	10	13	227	972	405	486
O	18	268	60	8	11	188	638	336	402
S	20	400	80	12	16	280	1333	500	600
O	20	331	66	10	14	234	876	414	503
S	22	484	88	15	20	339	1775	605	727
O	22	401	73	12	16	281	1166	502	602
S	24	576	96	18	23	403	2304	710	851
O	24	477	80	15	19	334	2123	596	716

^aS = square section; O = octagonal section

ข้อมูลโดยทั่วไปของเสาเข็มคอนกรีต (concrete piles)

- ความยาวปกติ (Usual length): 10-15 m (30 - 50 ft)
- น้ำหนักบรรทุกปกติ (Usual load): 300-3000 kN (67 – 675 kips)

ข้อดี (Advantages)

- a. สามารถรองรับการตอกที่ใช้กำลังสูงได้
- b. ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี
- c. สามารถเชื่อมต่อกับโครงสร้างคอนกรีตได้ง่าย

ข้อเสีย (Disadvantages)

- a. ยากแก่การตัดให้เหมาะสม
- b. ยากแก่การขนส่ง

เสาเข็มหล่อสำเร็จรูป (Precast piles) สามารถทำการอัดแรงโดยใช้เคเบิลอัดแรงกำลังสูง (high-strength steel prestressing cables) โดยกำลังประลัย (ultimate strength) ของเคเบิลจะมีค่าประมาณ 1800 MN/m^2 ($\approx 260 \text{ ksi}$) ในระหว่างการหล่อเสานั้นเคเบิลจะได้รับการอัดแรงก่อนประมาณ $900\text{-}1300 \text{ MN/m}^2$ ($\approx 130\text{-}190 \text{ ksi}$) จากนั้นจึงทำการเทคอนกรีตรอบๆเคเบิล หลังจากทำการบ่มคอนกรีตจึงทำการตัดเคเบิลซึ่งจะทำให้เกิดแรงอัด (compressive force) บนหน้าตัดของเสาเข็ม ตารางที่ 10.1.5 จะให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (prestress concrete piles) ซึ่งมีทั้งหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดแบบแปดเหลี่ยม

ข้อมูลโดยทั่วไปเกี่ยวกับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (prestress concrete piles)

- ความยาวปกติ (Usual length): 10-45 m (30-50 ft)
- ความยาวสูงสุด (Maximum length): 60 m(200 ft)
- น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Maximum load): 7500-8500 kN(1700-1900 kip)

สำหรับข้อดีและข้อเสียของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจะเหมือนกับเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-situ piles)

เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-situ piles or cast-in-place piles) เป็นเสาเข็มที่ทำโดยการเจาะหลุมก่อนจากนั้นจึงทำการเทคอนกรีตตามลงไป เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่หลายๆ

ประเภทได้นำมาใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่แล้วเสาเข็มหล่อในที่จะมีรูปแบบตามที่ผู้ผลิตได้ออกแบบมา เสาเข็มหล่อในที่จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ 1) แบบใช้ปลอก (cased) และ 2) แบบไม่ใช้ปลอก (uncased) ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีแท่นตรงส่วนล่างของเสาเข็ม

เสาเข็มแบบใช้ปลอก (cased piles) จะทำได้โดยการตอกปลอกเหล็ก (steel casing) ลงในดิน ซึ่งจะมี mandrel placed เป็นตัวช่วยภายในปลอกเหล็ก เมื่อเสาเข็มทะลุไปยังความลึกที่พอเหมาะแล้ว จะทำการยก mandrel ขึ้นและทำการเทคอนกรีตลงไปในปลอก รูปที่ 10.1.3a, รูปที่ 10.1.3b, รูปที่ 10.1.3c และ รูปที่ 10.1.3d แสดง cased piles ที่ไม่มีแท่นฐาน (pedestal) รูปที่ 10.1.3e แสดง cased piles ที่มีแท่นฐาน

สำหรับแท่นฐานนั้นก็คือการขยายตัวของคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นกระเปาะ ซึ่งจะก่อรูปได้โดยทำการกระทุ้งเครื่องตอกลงไปนคอนกรีตสด

ข้อมูลโดยทั่วไปเกี่ยวกับเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-situ piles)

- ความยาวปกติ (Usual length): 5-15 m (15 – 50 ft)
- ความยาวสูงสุด (Maximum length): 30-40 m (100-130 ft)
- น้ำหนักบรรทุกปกติ (Usual load): 200-500 kN (45-115 kip)
- น้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยประมาณ (Approximate maximum load): 800 kN (180 kip)

ข้อดี (Advantages)

- a. ค่อนข้างมีราคาถูก
- b. สามารถทำการตรวจสอบอย่างละเอียดก่อนที่จะทำการตอกได้
- c. ง่ายแก่การขยายความยาว

ข้อเสีย (Disadvantages)

- a. ยากแก่การต่อประภภายหลังจากการเทคอนกรีตแล้ว
- b. ปลอกที่มีขนาดบางอาจจะได้รับความเสียหายขณะที่ทำการตอกได้

น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ (Allowable load): $Q_{all} = A_s f_s + A_c f_c$

เมื่อ A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

f_s = ความเค้นที่ยอมให้ของเหล็ก

f_c = ความเค้นที่ยอมให้ของคอนกรีต

รูปที่ 10.1.3f และ รูปที่ 10.1.3g คือ uncased pile มี 2 ประเภท คือประเภทที่มี pedestal และอีกประเภทหนึ่งคือประเภทที่ไม่มี pedestal uncased pile จะทำในชั้นแรกคือทำการตอกปลอกเหล็กให้ได้ระยะความลึกที่ต้องการหลังจากนั้นจึงทำการเทคอนกรีตสดลงไปและเมื่อเทคอนกรีตเสร็จแล้วจึงค่อยๆยกปลอกเหล็กขึ้น

ข้อมูลโดยทั่วไปของ uncased cast-in-place piles

- ความยาวปกติ (Usual length): 5-15 m (15-50 ft)
- ความยาวสูงสุด (Maximum length): 30-40 m (100-130 ft)
- น้ำหนักบรรทุกปกติ (Usual load): 300-500 kN (67 -115 kip)
- น้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยประมาณ (Approximate maximum load): 700 kN (160 kip)

ข้อดี (Advantages)

- ค่อนข้างประหยัด
- สามารถเสร็จการทำงานได้ที่ทุกระดับ

ข้อเสีย (Disadvantages)

- อาจเกิดช่องว่าง(Voids)ในคอนกรีตได้หากมีการเทคอนกรีตอย่างรวดเร็ว
- ยากแก่การต่อประกบภายหลังจากที่ได้ทำการเทคอนกรีตแล้ว
- ในดินอ่อน ด้านข้างของหลุมอาจจะจมลงไปหรือเข้าไปแทรกในเนื้อคอนกรีตได้

น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้(Allowable load): $Q_{all} = A_c f_c$

เมื่อ A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

f_c = ความเค้นที่ยอมให้ของคอนกรีต

เสาเข็มไม้ (Timber Piles)

เสาเข็มไม้ (Timber Piles) คือ ส่วนที่เป็นลำต้นของต้นไม้ที่ได้ทำการตัดกิ่งและลอกเปลือกไม้ ออกแล้วอย่างประณีต โดยมากแล้วเสาเข็มไม้จะมีความยาวสูงสุดประมาณ 10-20 m (30-65

ft) เพื่อให้ได้เสาเข็มที่มีคุณภาพ ไม่นั้นจะต้องตรงเมื่อเคาะดูแล้วจะต้องมีเสียงแน่นและไม่เกิดการโก่งงอ The American Society of Civil Engineers' Manual of Practice, No.17(1959) ได้ทำการแบ่งเสาเข็มไม้ออกเป็น 3 ชั้น (three classes) ดังนี้

1. Class A piles ใช้น้ำหนักบรรทุกมาก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด (minimum diameter) เท่ากับ 356 mm (14 in)
2. Class B piles ใช้น้ำหนักบรรทุกปานกลาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดเท่ากับ 305-330 mm (12-13 in)
3. Class C piles ใช้ในงานก่อสร้างชั่วคราว เสาเข็มใน class นี้สามารถใช้งานได้ อย่างถาวรสำหรับงานโครงสร้างก็ต่อเมื่อเสาเข็มทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 150 mm (6 in)

ในบางกรณี ส่วนปลายของเสาเข็ม (pile tip) ไม่ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 150 mm (6 in)

เสาเข็มไม้ไม่สามารถต้านทานการตอกที่มีความเค้นสูงๆ (hard driving stress) ได้ ดังนั้น ความสามารถของเสาเข็มไม้จึงมีจำกัด เปลือกเหล็ก (steel shoes) อาจจะนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยง ความเสียหายอันจะเกิดที่บริเวณส่วนปลายของเสาเข็ม ในขณะที่ส่วนยอดของเสาเข็มไม้ก็อาจเกิด ความเสียหายในระหว่างการตอกได้เช่นกัน การเสียรูปของเส้นใยไม้มีสาเหตุจากผลกระทบของ ค้อนตอกที่เรียกว่า *brooming* เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับส่วนยอดของเสาเข็ม (the top of the pile) จะมีการนำสายรัดเหล็กหรือหมวกเหล็ก (metal band or cap) มาใช้

การต่อเสาเข็มไม้เป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคาดว่าเสาเข็มนั้นจะรับ แรงดึง (tensile load) หรือแรงด้านข้าง (lateral load) อย่างไรก็ตามถ้าจำเป็นต้องทำการต่อ ประภสามารถใช้ pipe sleeves (ดู รูปที่ 10.1.4a) หรือใช้ metal straps and bolts (ดู รูปที่ 10.1.4b) sleeves นั้นควรมีความยาวอย่างน้อย 5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม สำหรับในส่วน of butting ends นั้นควรจะตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อรักษาพื้นผิวสัมผัสอย่าง เต็มที่และส่วนที่ทำการต่อประภควรจะทำการตัดอย่างระมัดระวังเพื่อให้สวมเข้าพอดีกับ pipe sleeve ในกรณีของ metal straps และ bolts ส่วนของbutting ends ควรจะตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม จตุรัส ด้านข้างของส่วนที่ทำการต่อประภควรจะตัดเป็นแนวราบสำหรับวาง straps บนส่วน ดังกล่าว

เสาเข็มไม้จะสามารถอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายถ้าบริเวณรอบๆเสาเข็มเป็นชั้นดิน อิ่มตัว (saturated soil) อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมที่เป็นทะเลเสาเข็มไม้จะได้รับความ

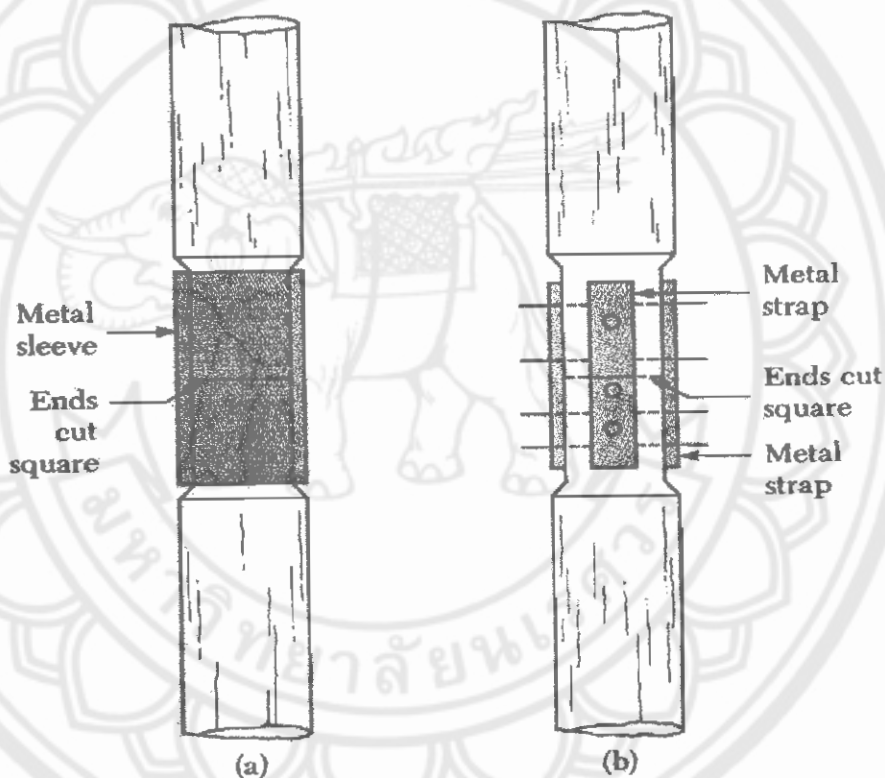
เสียหายจากสิ่งมีชีวิตต่างๆและสามารถทำให้ความเสียหายนี้ขยายตัวไปภายในระยะเวลาไม่กี่เดือน เมื่อเสาเข็มไม้วางอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน เสาเข็มไม้จะถูกรบกวนจากเหล่าแมลงต่างๆซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องเพิ่มการบำรุงรักษาโดยการใช้น้ำยารักษาเนื้อไม้ เช่น creosote

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มไม้ คือ

$$Q_{all} = A_p f_w$$

เมื่อ A_p = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย

f_w = ความเค้นที่ยอมให้ของไม้



รูปที่ 10.1.4 Splicing of timber piles

ค่าความเค้นที่ยอมให้สำหรับ pressure-treated รอบๆเสาเข็มไม้ ได้มาจาก Pacific Coast Douglas fir และ Southern pine ซึ่งใช้ในโครงสร้างชลศาสตร์ (hydraulic structures) (ASCE, 1993):

Pacific Coast Douglas Fir

- ค่าแรงอัดขนานเสี้ยน (Compression parallel to grain): 6.04 MN/m^2 (875 lb/in^2)
- หน่วยแรงดัด (Bending): 11.7 MN/m^2 (1700 lb/in^2)
- แรงเฉือนในแนวราบ (Horizontal shear): 0.66 MN/m^2 (95 lb/in^2)
- ค่าแรงอัดตั้งฉากกับเสี้ยน (Compression perpendicular to grain): 1.31 MN/m^2 (190 lb/in^2)

Southern pine

- ค่าแรงอัดขนานเสี้ยน (Compression parallel to grain): 5.7 MN/m^2 (825 lb/in^2)
- หน่วยแรงดัด (Bending): 11.4 MN/m^2 (1650 lb/in^2)
- แรงเฉือนในแนวราบ (Horizontal shear): 0.62 MN/m^2 (90 lb/in^2)
- ค่าแรงอัดตั้งฉากกับเสี้ยน (Compression perpendicular to grain): 1.41 MN/m^2 (205 lb/in^2)

ความยาวปกติของเสาเข็มมีค่า 5 ถึง 15 m (15 ถึง 50 ft) ความยาวสูงสุดประมาณ 30 ถึง 40 m (100 ถึง 130 ft) น้ำหนักบรรทุกปกติของเสาเข็มไม้เท่ากับ 300 ถึง 500 kN (67 ถึง 115 kip)

เสาเข็มประกอบ (Composite Piles)

ส่วนบนและส่วนล่างของเสาเข็มประกอบจะทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ตัวอย่าง เช่น เสาเข็มประกอบอาจทำมาจากเหล็กกับคอนกรีตหรือไม้กับคอนกรีต เสาเข็มเหล็กและคอนกรีต (Steel-and-concrete piles) ประกอบด้วย ส่วนล่างที่เป็นเหล็กและส่วนบนเป็นคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-place concrete) เสาเข็มประเภทนี้จะใช้ก็ต่อเมื่อต้องการความยาวของเสาเข็มที่รับแรงแรงแบกทานอย่างเพียงพอซึ่งจะดีกว่าความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่แบบธรรมดา (simple of cast-in-place concrete piles) เสาเข็มไม้และคอนกรีตโดยปกติแล้วจะประกอบไปด้วยส่วนล่างที่เป็นไม้ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินที่คงที่ตลอดเวลาและส่วนบนจะเป็นคอนกรีต ในบางกรณีการต่อจุดต่อระหว่างวัสดุ 2 ชนิดที่แตกต่างกันจะทำให้ยาก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้เสาเข็มประกอบไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนัก

10.1.2 Estimating Pile Length

การเลือกประเภทของเสาเข็มเพื่อนำไปใช้และประมาณค่าความยาวที่จำเป็นต้องใช้เป็นงานที่ค่อนข้างยากซึ่งจำเป็นต้องมีการตัดสินใจที่ดีและพิจารณาอย่างรอบคอบ การเพิ่มสถานะที่ใกล้วิบัติลงไปในการจัดหมวดหมู่ที่มาใน section ก่อนหน้านี้ เสาเข็มสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ขึ้นอยู่กับความยาวและกลไกการเคลื่อนย้ายน้ำหนักบรรทุกไปสู่ชั้นดิน ดังนี้ : 1) เสาเข็มที่มีการรับแรงแบกทานส่วนปลาย(point bearing piles), 2) เสาเข็มที่อาศัยความฝืดในการรับแรงแบกทาน(friction piles) และ 3) เสาเข็มที่ทำให้แน่น (compaction piles)

Point Bearing Piles

ถ้าข้อมูลการบันทึกเกี่ยวกับการเจาะดินปรากฏว่ามีชั้นหินใต้ดินหรือวัสดุเสมือนหิน (bedrock or rocklike material) ณ ที่ตั้งที่เหมาะสม เสาเข็มสามารถทำการต่อไปจนถึงพื้นผิวของชั้นหินได้ (ดู รูปที่ 10.1.5a) ในกรณีนี้ความสามารถในการรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงแบกทานอย่างเต็มที่ของวัสดุที่รองรับเสาเข็ม ดังนั้นเสาเข็มประเภทนี้จึงเรียกว่า *Point Bearing Piles* ส่วนใหญ่แล้วความยาวของเสาเข็มที่จำเป็นต้องใช้สามารถสร้างขึ้นอย่างเหมาะสม

ถ้าแทนที่จะเป็นชั้นหินใต้ดิน การบดอัดอย่างเหมาะสมและชั้นดินแข็งถูกพบ ณ ความลึกที่เหมาะสม เสาเข็มสามารถทำการต่อไปอีกเล็กน้อยเพื่อเข้าสู่ชั้นดินแข็ง (ดู รูปที่ 10.1.5b) เสาเข็มที่มีแท่นฐาน (pedestal) สามารถก่อสร้างบนชั้นฐานของดินแข็งและน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

เมื่อ Q_p = น้ำหนักบรรทุกที่ pile point

Q_s = น้ำหนักบรรทุกที่รับโดยแรงเสียดทานที่ผิวปรากฏด้านข้างของเสาเข็ม

ถ้า Q_s มีค่าน้อยมาก

$$Q_u \approx Q_p$$

ในกรณีนี้ ความยาวที่ต้องการอาจจะประมาณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ถ้าสามารถมีการบันทึกค่าการสำรวจดินอย่างเหมาะสม

Friction Piles

เมื่อไม่ปรากฏชั้นหินแข็ง (rock) หรือวัสดุเสมือนหิน (rocklike material) ณ ความลึกที่เหมาะสม point bearing piles จะมีความยาวมากและไม่เป็นการประหยัด ดังนั้นสำหรับในชั้นดินประเภทนี้จะทำการตอกเสาเข็มลงไปในวัสดุดินอ่อนจนถึงระยะความลึกที่ระบุไว้ (ดู รูปที่ 10.1.5c) น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจะอธิบายไว้ในสมการ $Q_u = Q_p + Q_s$ อย่างไรก็ตามถ้าค่าของ Q_p มีน้อยมาก ดังนั้น

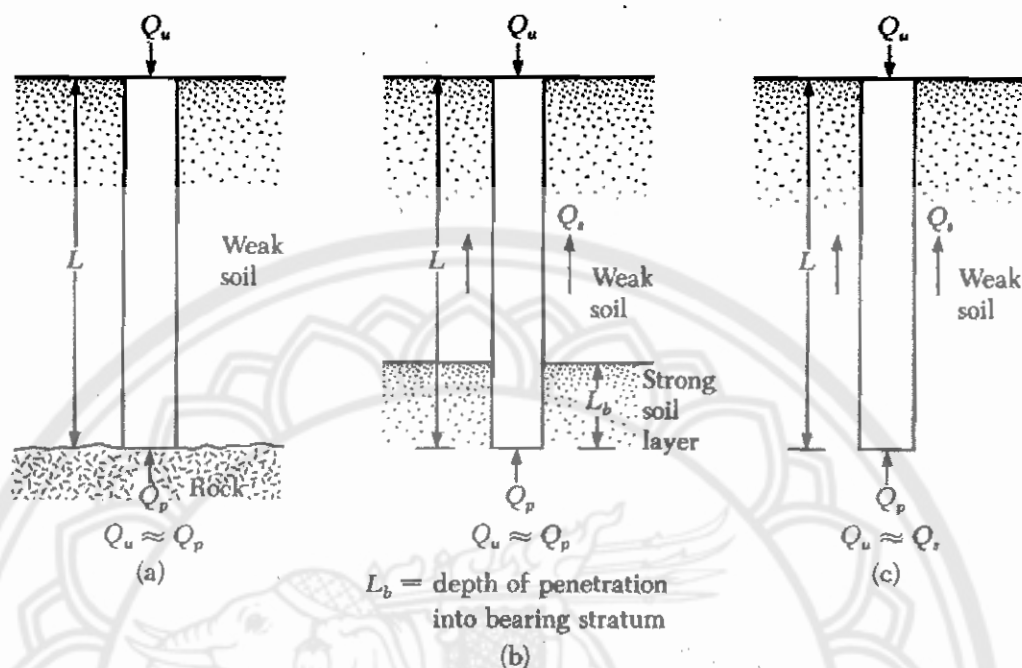
$$Q_u \approx Q_s$$

ซึ่งจะเรียกเสาเข็มนี้ว่า friction piles เนื่องจากแรงต้านทานส่วนใหญ่จะมาจากแรงเสียดทานที่ผิว (skin friction) อย่างไรก็ตามในส่วนของคำว่า friction pile แม้ว่าจะเป็นที่นิยมเรียกเฉพาะแต่ก็ถือว่าเป็นการเรียกที่ไม่ถูกต้องทั้งหมดทั้งนี้ก็เพราะว่าในดินเหนียว (clayey soils) แรงต้านทานน้ำหนักบรรทุกนั้นเกิดจากแรง adhesion

ความยาวของ friction piles ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของดิน, น้ำหนักบรรทุก (applied load) และขนาดของเสาเข็ม (pile size) ในการหาความยาวที่เหมาะสมของเสาเข็มนั้น วิศวกรจำเป็นต้องมีความเข้าใจอันดีในเรื่องของแรงปฏิริยาที่กระทำระหว่างดินกับเสาเข็ม (soil-pile interaction) รวมไปถึงการพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบและอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมา

Compaction Piles

ภายใต้สภาวะที่แน่นอน เสาเข็มที่ตอกลงใน granular soils จนได้การอัดตัวแน่นของดินที่เหมาะสมจนใกล้เคียงกับผิวหน้าของดิน เรียกเสาเข็มนี้ว่า *Compaction Piles* ความยาวของ *Compaction Piles* ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ เช่น 1) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินก่อนการอัดตัว 2) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ต้องการของดินภายหลังการอัดตัวของดิน และ 3) ความลึกของการอัดตัวที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วเสาเข็มประเภทนี้จะมีขนาดค่อนข้างสั้น ในบางครั้งการทดสอบในสนาม (Field test) ก็มีความจำเป็นเพื่อหาความยาวที่เหมาะสม

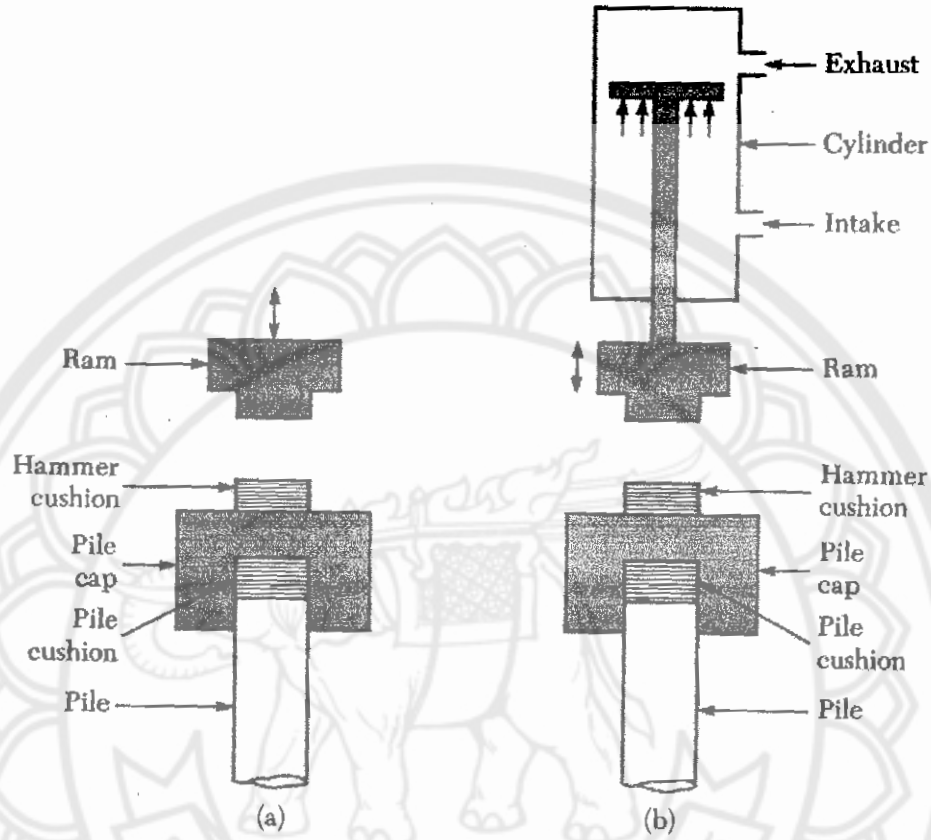


รูปที่ 10.1.5 (a) and (b) Point bearing piles; (c) friction piles

10.1.3 Installation of Piles

เสาเข็มส่วนใหญ่จะถูกตอกลงไปในดินโดยวิธีการใช้เครื่องตอกแบบลูกตุ้มหรือเครื่องตอกแบบสั่นสะเทือน ในสภาวะนอกเหนือสภาวะปกติเสาเข็มอาจจะมีการแทรก jetting หรือ partial augering เข้าไป

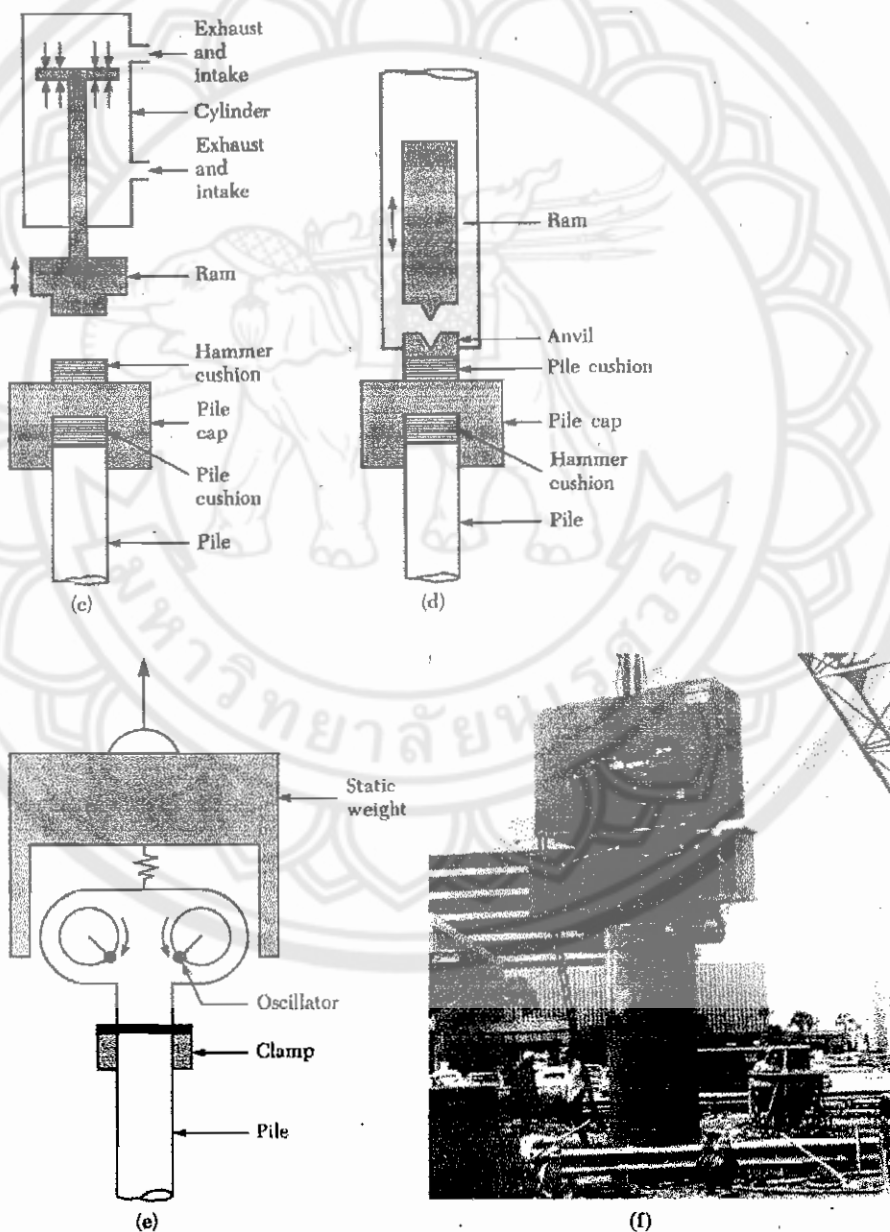
ประเภทของลูกตุ้มที่ใช้สำหรับการตอกเสาเข็มนั้นรวมไปด้วย 1) drop hammer 2) single-acting air or steam hammer 3) double-acting and differential air or steam hammer และ 4) diesel hammer ในกระบวนการตอกนั้นจะมีการสวม cap ตรงส่วนบนสุดของเสาเข็มและมีการวางสิ่งกันกระเทือนระหว่างเสาเข็มกับ cap ด้วย สิ่งกันกระเทือน (cushion) จะมีผลคือช่วยลดแรงกระทบและการขยายตัวของเสาเข็มถ้ามีการตอกเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามการใช้ cap ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กัน ที่กันกระเทือนของลูกตุ้ม (hammer cushion) จะวางอยู่บนหมวกของเสาเข็ม (pile cap) ซึ่งลูกตุ้มจะตกลงบนที่กันกระเทือนนั้น



รูปที่ 10.1.6 Pile-driving equipment

รูปที่ 10.1.6 แสดง hammers แบบต่างๆ โดย drop hammer (ดู รูปที่ 10.1.6a) จะถูกยกขึ้นโดยเครื่องชักรถก(winch) และจะปล่อยให้ตกลงมาโดยทราบระยะที่แน่นอน(certain height, H) วิธีนี้นับว่าเป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุดในการใช้ hammer เพื่อตอกเสาเข็ม ซึ่งข้อเสียประการสำคัญของ drop hammer คือมีอัตราการตอกที่ช้า หลักการของ single-acting air or steam hammer จะแสดงใน รูปที่ 10.1.6b ส่วนที่เด่นๆของ hammer ประเภทนี้คือการที่มี ram ซึ่งจะทำการยกขึ้นโดยแรงดันไอน้ำและจะตกลงมาโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก รูปที่ 10.1.6c แสดงถึงวิธีการของ double-acting and differential air or steam hammer อากาศหรือไอน้ำจะถูกใช้ทั้งการยก ram ขึ้นและใช้ดัน ram ลง ด้วยวิธีนี้เองจึงเป็นการเพิ่มความเร็วตกกระทบของค้อนตอก diesel hammer (ดูรูปที่ 10.1.6d) ประกอบด้วยส่วนสำคัญของค้อนตอก (ทั่งตีเหล็ก, anvil block) และระบบการฉีดเชื้อเพลิง (fuel-injection system) ชั้นแรกค้อนตอกจะถูกยกขึ้นและเชื้อเพลิงจะได้รับการอัดฉีดเข้าไปใกล้กับทั่งตีเหล็ก (anvil) หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ค้อนตอกให้ตกลงมา เมื่อค้อนตอก

ตกลงมาแล้ว ค้อนตอกจะเป็นตัวอัดให้เกิดการผสมตัวของอากาศและเชื้อเพลิง (air-fuel mixture) และจะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งกระบวนการนี้จะมีผลคือมีการดันเสาเข็มให้จมลงไปและทำการยกค้อนตอกขึ้น Diesel hammers จะทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการแรงตอกสูงๆ สำหรับในดินอ่อน การเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของเสาเข็มค่อนข้างจะมีมากและการยกตัวขึ้นข้างบนของค้อนตอกจะมีน้อย ซึ่งความแตกต่างนี้จะมีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ของระบบอากาศและเชื้อเพลิง ดังนั้นการยกค้อนตอกในกรณีนี้จึงต้องอาศัยคู่มือในการปฏิบัติงาน

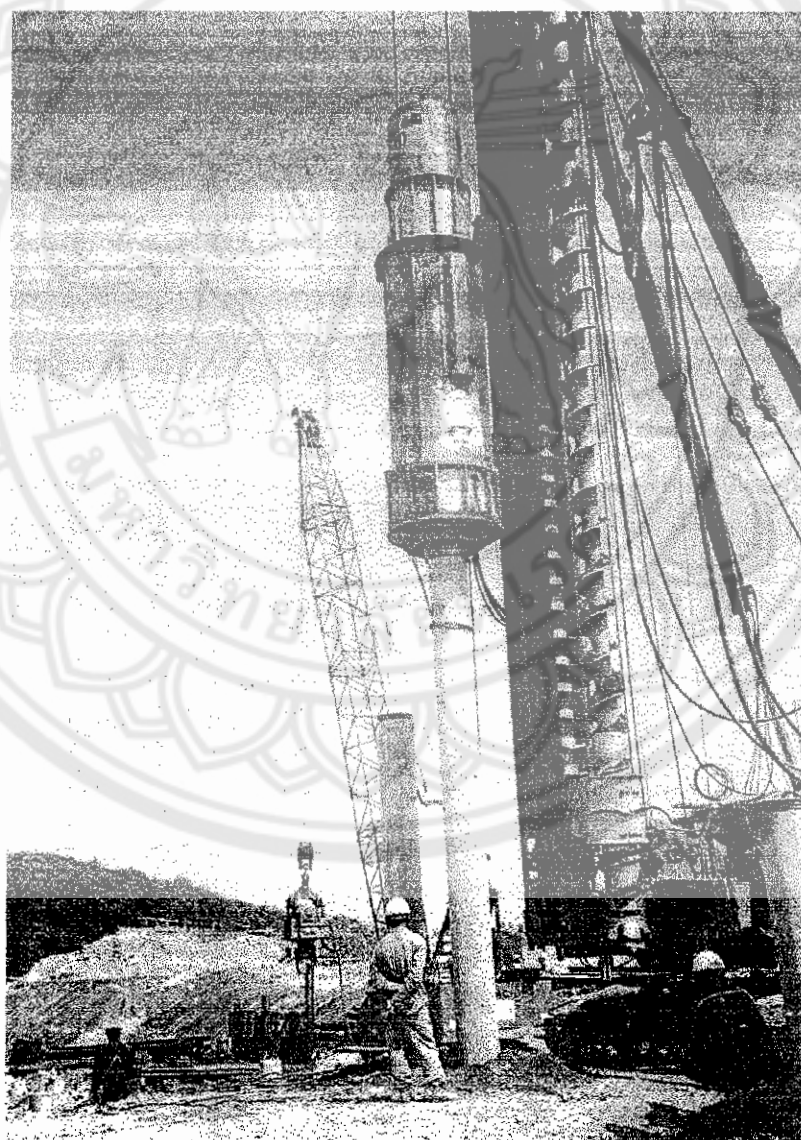


รูปที่ 10.1.6 (Continued)

หลักการของการปฏิบัติงานของเครื่องตอกเสาเข็มแบบสันสะเทือนจะแสดง รูปที่ 10.1.6e เครื่องตอกนี้ประกอบด้วยตัวถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 ตัว ซึ่งหมุนทำมุมในทิศทางตรงข้ามกัน องค์ประกอบในแนวราบของแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางก่อให้เกิดผลของการหมุนตัวเป็นกลุ่ม ดังที่ผลได้แสดงมา แรงในแนวตั้งที่มีลักษณะเป็นโพร่งและไม่คงที่ (sinusoidal dynamic vertical force) จะทำให้เกิดบนเสาเข็มและช่วยในการตอกเสาเข็มให้จมลงไป

รูปที่ 10.1.6 f คือรูปภาพของเครื่องตอกเสาเข็มแบบใช้แรงสันสะเทือน

รูปที่ 10.1.7 แสดงวิธีการปฏิบัติงานการตอกเสาเข็มในสนาม



รูปที่ 10.1.7 A pile-driving operation in the field

Jetting คือเทคนิคที่จะนำมาใช้ในการตอกเสาเข็มเมื่อเสาเข็มจำเป็นต้องทำการตอกทะลุลงไปในพื้นที่ที่ไม่หนามากนัก (เช่น ทรายและกรวด) ซึ่งวางอยู่บนชั้นดินที่อ่อนกว่า โดยเทคนิคนี้ทำได้โดยการปล่อยน้ำที่ pile point โดยใช้แนวท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-75 mm (2-3in) เพื่อชะล้างและคลายความหนาแน่นของทรายและกรวด

การตอกเสาเข็มที่ทำมุมในแนวตั้ง โดยทำมุม 14° กับ 20° ซึ่งจะต้องใช้ batter piles โดย batter piles นี้จะใช้ในเสาเข็มกลุ่ม (group piles) เมื่อต้องการความสามารถในการรับแรงแบกทานด้านข้างให้สูงขึ้น (higher lateral load-bearing capacity) เสาเข็มอาจจะใช้วิธีการที่สูงขึ้นไปอีกโดยการใช้ partial augering ซึ่งจะมี power augers ในการขุดเจาะหลุม จากนั้นจึงนำเสาเข็มใส่ลงในหลุมและทำการตอกลงไปจนได้ระยะที่ต้องการ

นอกจากนี้เสาเข็มยังสามารถจัดแบ่งได้อีกโดยใช้หลักพื้นฐานของการแทนที่ซึ่งแบ่งเสาเข็มได้เป็น 2 ประเภท โดยแบ่งเป็น displacement piles และ nondisplacement piles เข็มตอกจัดว่าเป็น displacement piles เนื่องจากมีการเคลื่อนตัวของดินด้านข้าง ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดความหนาแน่นของดินรอบๆเสาเข็ม เสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มท่อแบบปลายปิด (closed-ended pipe piles) จัดว่าเป็น high-displacement piles อย่างไรก็ตามเสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H (steel-H piles) จะมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินในระหว่างการตอกน้อย ดังนั้นเสาเข็มดังกล่าวจึงจัดว่าเป็น low-displacement piles ในทางตรงข้าม เสาเข็มเจาะ (bored piles) จัดว่าเป็น nondisplacement piles ก็เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของดินค่อนข้างน้อยในสภาวะความเค้นในดิน

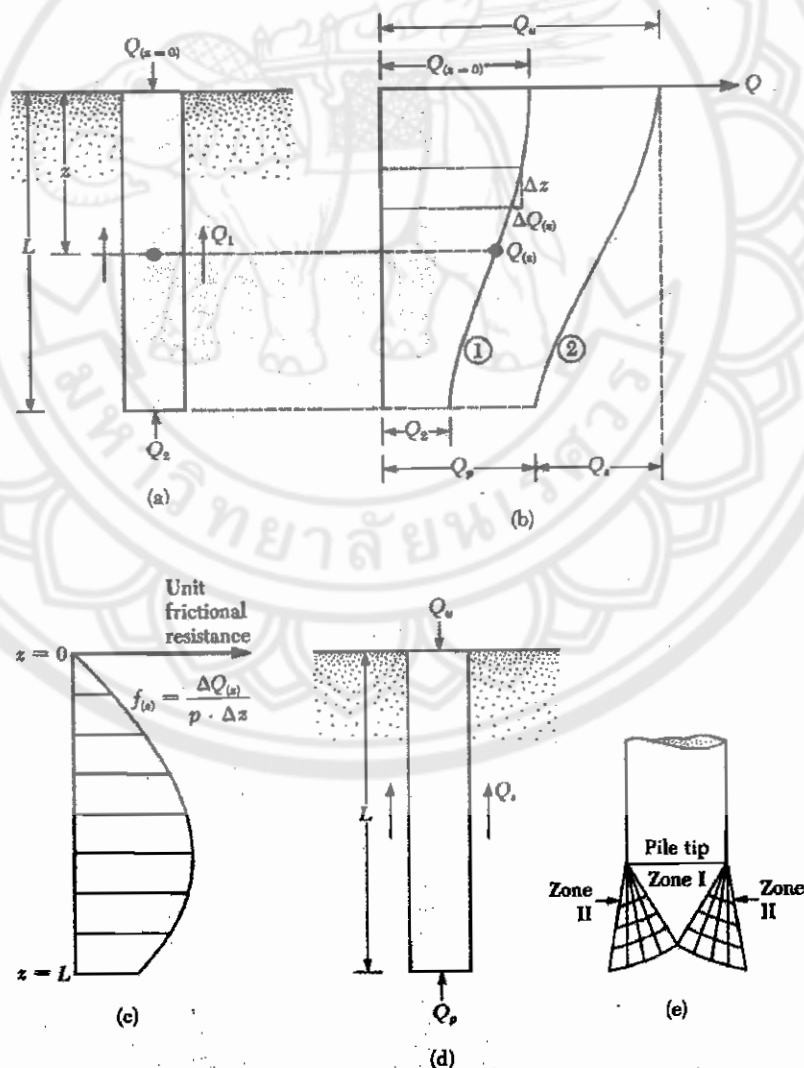
10.1.4 Load Transfer Mechanism

กลไกการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินเป็นเรื่องที่ซับซ้อน ในการทำความเข้าใจเรื่องดังกล่าวให้พิจารณาความยาวของเสาเข็ม, L ซึ่งแสดงใน รูปที่ 10.1.8a น้ำหนักบรรทุกจะค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อยจากศูนย์ไปเป็น $Q_{(z=0)}$ ที่ผิวหน้าของดิน ส่วนหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกนี้จะถูกต้านโดยแรงเสียดทานด้านข้างตลอดลำต้นของเสาเข็ม, Q_1 และบางส่วนถูกต้านโดยดินใต้ส่วนปลายของเสาเข็ม, Q_2 ซึ่งเกิดคำถามว่า Q_1 และ Q_2 สัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกรวมอย่างไร? ถ้าการวัดนั้นได้มาโดยการได้มาซึ่งการรับน้ำหนักบรรทุกโดยลำต้นของเสาเข็ม, $Q_{(z)}$ ที่ความลึกใดๆ z คุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงที่พบจะแสดงได้ดังเส้นโค้งที่ 1 ของ รูปที่ 10.1.8b ค่าความ

ต้านทานแรงเสียดทานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (frictional resistance per unit area) ที่ความลึก z ใดๆ สามารถหาได้โดย

$$f_{(z)} = \frac{\Delta Q_{(z)}}{(p)(\Delta z)}$$

เมื่อ p = ขอบเขตหน้าตัดของเสาเข็ม (perimeter of cross section of the piles)
 รูปที่ 10.1.8c แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ $f_{(z)}$ ตามความลึก



รูปที่ 10.1.8 Load transfer mechanism for piles

ถ้าน้ำหนักบรรทุก Q ที่ผิวหน้าของดิน (ground surface) ค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อย ความต้านทานแรงเสียดทานสูงสุด (maximum frictional resistance) ตลอดความยาวของลำต้นเสาเข็มจะรวมตัวกันอย่างเต็มที่ (fully mobilized) เมื่อความสัมพันธ์ของการเข้าแทนที่ (displacement) ระหว่างดินกับเสาเข็ม (soil and pile) มีค่าประมาณ 5-10 mm (0.2-0.3 in) โดยไม่พิจารณาถึงขนาดและความยาวของเสาเข็ม อย่างไรก็ตามความต้านทานน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุดสูงสุด $Q_2 = Q_p$ จะยังไม่เกิดการ mobilized จนกระทั่งส่วนปลายของเสาเข็มจะเคลื่อนที่ราวๆ 10-25% ของความกว้างเสาเข็ม(หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม) ที่น้ำหนักบรรทุกประลัย (รูปที่ 10.1.8d และ curve 2 ใน รูปที่ 10.1.8b), $Q_{(z=0)} = Q_u$ ดังนั้น

และ

$$Q_1 = Q_s$$

$$Q_2 = Q_p$$

ในส่วนที่ได้รับการอธิบายมาแล้วนั้นบ่งชี้ว่า Q_s หรือแรงเสียดทานผิวหนึ่งหน่วย (unit skin friction, f) ตลอดความยาวของลำต้นเสาเข็ม จะปรากฏเด่นชัดที่การเคลื่อนที่ของเสาเข็มขนาดเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้องการของแรงที่กระทำเป็นจุด, Q_p

ที่น้ำหนักบรรทุกประลัย พื้นผิวการวิบัติในดินที่บริเวณส่วนปลายของเสาเข็ม (การวิบัติจากความสมารถในการรับแรงแบกทาน ซึ่งมีสาเหตุมาจาก Q_p) จะเหมือนกับที่แสดงใน รูปที่ 10.1.8e โดยถือว่าฐานรากเสาเข็มเป็นฐานรากลึก (deep foundation) และการวิบัติส่วนใหญ่จัดอยู่ใน punching mode (ดูได้จากบทของ shallow foundation) ซึ่งจะปรากฏเด่นชัดที่บริเวณส่วนปลายของเสาเข็ม และจะถูกดันให้จมลงไปโดยปราศจากการมองเห็นได้ของพื้นผิวที่เคลื่อนที่ไปในชั้นทรายแน่น(dense sands) และชั้นดินเหนียวแข็ง (stiff clayey) ในบริเวณแรงเฉือนตามแนวรัศมีของวงกลม(radial shear zone), II , อาจเกิดขึ้นบางส่วน ดังนั้น load displacement curves ของเสาเข็มจะคล้ายคลึงกันกับที่แสดงใน รูปที่ 6.1.1c

10.1.5 Equations for Estimating Pile Capacity

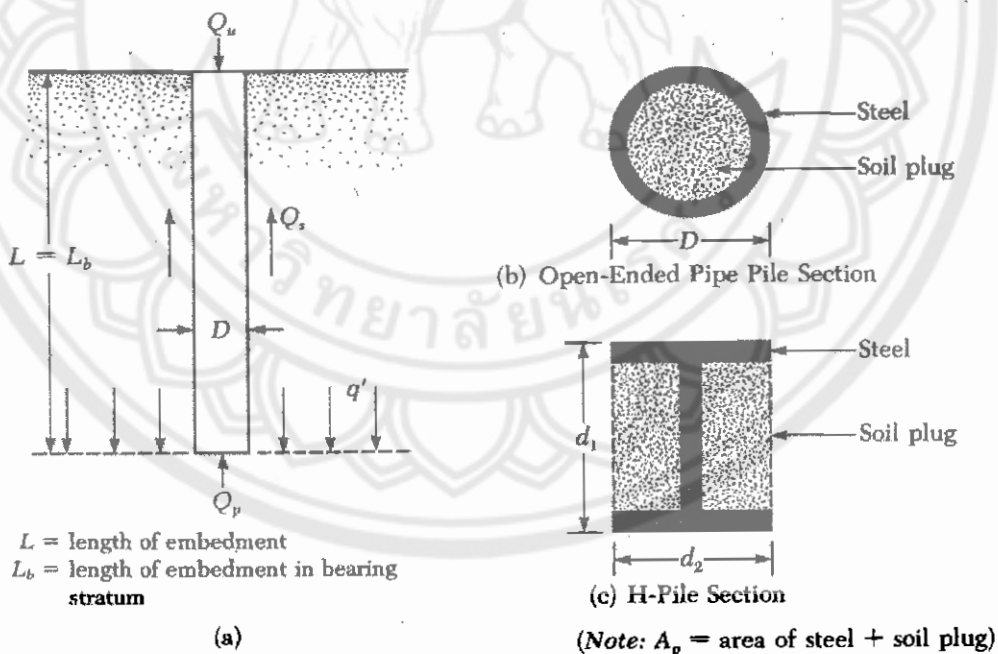
ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย, Q_u , ของเสาเข็มสามารถหาได้จากสมการ

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

เมื่อ Q_p = ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากแรงแบกทานที่ปลายของเสาเข็ม

Q_s = ความต้านทานแรงเสียดทาน (แรงเสียดทานที่ผิว) ซึ่งได้มาจากบริเวณที่เป็นจุดพบของดินและเสาเข็ม (soil-pile interface)

มีสื่อสิ่งพิมพ์เกี่ยวกับการศึกษาเป็นจำนวนมากที่ได้กล่าวถึงวิธีการหาค่า Q_p และ Q_s บทวิจัยที่ขุดเยื่อมของการค้นคว้าเรื่องนี้แบ่งได้เป็น Vesic (1977), Meyerhof (1976) และ Coye and Castello (1981) การศึกษาของพวกเขาสามารถกระทำให้มีความเข้าใจได้อย่างชัดเจนในปัญหาของการหาค่าความสามารถของเสาเข็ม



รูปที่ 10.1.9 Ultimate load-carrying capacity of pile

Point Bearing Capacity, Q_p

ความสามารถในการรับแรงแบกทานประลัยของฐานรากตื้นได้กล่าวมาแล้วใน Chapter 6 ตาม Terzaghi's equations ดังนี้

$$q_u = 1.3 c'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (\text{สำหรับฐานรากตื้นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส})$$

และ

$$q_u = 1.3 c'N_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma \quad (\text{สำหรับฐานรากตื้นแบบวงกลม})$$

ในทำนองเดียวกัน สมการความสามารถในการรับแรงแบกทานโดยทั่วไปของฐานรากตื้น (general bearing capacity equation for shallow foundation) ที่ได้จาก Chapter 6 (สำหรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง) คือ

$$q_u = c'N_c F_{cs} F_{cd} + qN_q F_{qs} F_{qd} + 0.4\gamma BN_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d}$$

ดังนั้น โดยทั่วไป ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสามารถแสดงได้โดย

$$q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^*$$

where N_c^* , N_q^* and N_γ^* are the bearing capacity factors that include the necessary shape and depth factors

แม้ว่าฐานรากเสาเข็มจะมีความลึก อย่างไรก็ตามแรงต้านทานประลัยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ultimate resistance per unit area) จะปรากฏอย่างเด่นชัดที่ส่วนปลายของเสาเข็ม (pile tip), q_p , และสามารถแสดงให้เห็นเด่นชัดได้โดยสมการที่คล้ายคลึงกับสมการ $q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^*$ แม้ว่าค่าของ N_c^* , N_q^* และ N_γ^* จะเปลี่ยนไปก็ตาม เครื่องหมายที่ใช้ในการแสดงสัญลักษณ์สำหรับความกว้างของเสาเข็มคือ D ดังนั้นจึงแทนที่ B ด้วย D ลงไปในสมการ $q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^*$ จะได้

$$q_u = q_p = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma DN_\gamma^*$$

เนื่องจากความกว้าง D ของเสาเข็มมีค่าค่อนข้างน้อยมาก ดังนั้นในเทอมของ γDN_γ^* อาจไม่นำมาพิจารณา ดังนั้น เราได้

$$q_u = q_p = c'N_c^* + qN_q^*$$

โดยในเทอมของ q เราสามารถแทนที่ได้โดยการใส่ q' ในสมการข้างต้น เพื่อป้องกัน effective vertical stress ดังนั้น ความสามารถในการรับแรงแบกทานที่ปลายของเสาเข็ม คือ

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c'N_c^* + qN_q^*)$$

เมื่อ A_p = พื้นที่ส่วนปลายของเสาเข็ม

C' = ค่าความเชื่อมแน่นของดินที่รองรับส่วนปลายของเสาเข็ม

q_p = ค่าหนึ่งหน่วยของแรงต้านทานส่วนปลาย

q' = ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลที่ระดับส่วนปลายเสาเข็ม

N_c^*, N_q^* = the bearing capacity factors

Friction Resistance, Q_s

สำหรับความต้านทานแรงเสียดทานของเสาเข็มสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

เมื่อ p = ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม

ΔL = ความยาวที่เพิ่มขึ้น โดยที่ p และ f มีค่าคงที่

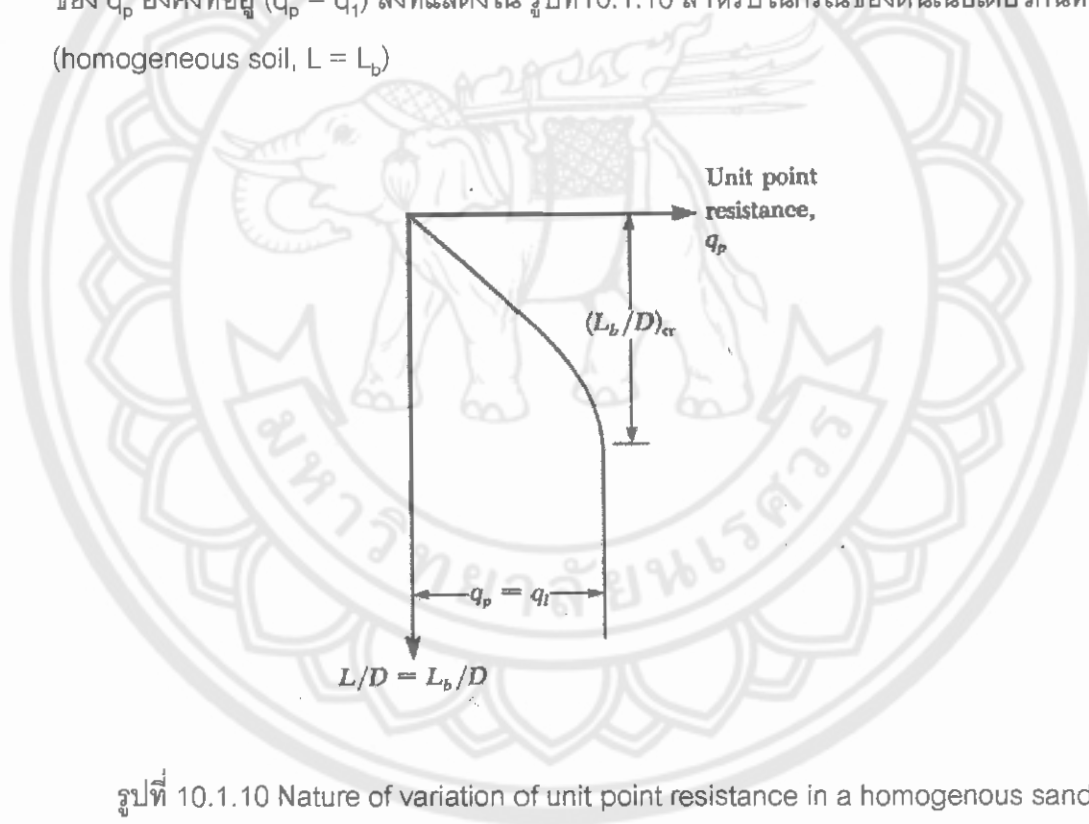
f = ความต้านทานแรงเสียดทานหนึ่งหน่วยที่ความลึก z ใดๆ

มีอยู่หลายวิธีด้วยกันที่ใช้ในการประมาณค่า Q_p และ Q_s ซึ่งจะบรรยายในส่วนต่อไป เราจำเป็นต้องให้ความสำคัญในเรื่องนี้อีกครั้งในการทดสอบในสนาม สำหรับการระดมผลของความต้านทานส่วนปลาย (Q_p) ส่วนปลายของเสาเข็มจะทะลุไปเป็นระยะ 10 ถึง 25% ของความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

10.1.6 Meyerhof's Method for Estimating, Q_p

Sand

ความสามารถในการรับแรงแบกทานที่ปลาย, q_p , ของเสาเข็มใน sand โดยทั่วไปแล้วจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของระยะฝังในชั้นของแรงแบกทานและไปถึงค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะฝัง (embedment ratio ของ $L_b/D = (L_b/D)_{cr}$) หมายถึง ใน homogeneous soil L_b จะเท่ากับความยาวระยะฝังจริงของเสาเข็ม, L (ดู รูปที่ 10.1.9a) อย่างไรก็ตามเมื่อเสาเข็มได้ถูกฝังลงสู่ชั้นดินที่รับแรงแบกทาน, $L_b > L$ (ดู รูปที่ 10.1.5b) นอกจาก the critical embedment ratio, $(L_b/D)_{cr}$ แล้วค่าของ q_p ยังคงที่อยู่ ($q_p = q_1$) สิ่งที่แสดงใน รูปที่ 10.1.10 สำหรับในกรณีของดินเนื้อเดียวกันทั้งหมด (homogeneous soil, $L = L_b$)



รูปที่ 10.1.10 Nature of variation of unit point resistance in a homogenous sand

สำหรับเสาเข็มในทราย, $c' = 0$ และจากสมการ $Q_p = A_p q_p = A_p (c' N_c^* + q' N_q^*)$ จะได้

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^*$$

ค่าความผันแปรของ N_q กับค่าของมุมเสียดทานภายในของดิน ϕ' จะแสดงใน รูปที่ 10.1.11 อย่างไรก็ตาม ค่า Q_p จะต้องมีค่าไม่เกินค่า $A_p q_1$ ดังนี้

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_1$$

ค่าจำกัดความต้านทานแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม คือ

$$q_1 = 0.5p_s N_q^* \tan \phi'$$

เมื่อ p_s = ความดันบรรยากาศ (=100kN/m² หรือ 2000lb/ft²)

ϕ' = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของชั้นดินที่รับแรงแบกทาน

บนพื้นฐานของการสังเกตงานภายในสนาม, Meyerhof (1976) ได้เสนอแนะค่าความต้านทานแรงแบกทานส่วนปลายประลัย (the ultimate point resistance) q_p ใน homogeneous granular soil ($L = L_u$) ที่ได้จาก standard penetration numbers

$$q_1 = 0.4p_s(N_1)_{60}LD \leq 4Pa(N_1)_{60}$$

เมื่อ $(N_1)_{60}$ = the averaged corrected value of the standard penetration number near the pile point (about 10D above and 4D below the pile point)

P_s = atmospheric pressure (=100kN/m² หรือ 2000lb/ft²)

Clay ($\phi = 0$)

สำหรับเสาเข็มใน saturated clays ภายใต้ undrained conditions ($\phi = 0$)

$$Q_p = N_c^* c_u A_p = 9c_u A_p$$

Where c_u = undrained cohesion of the soil below the tip of the pile

10.1.7 Vesic's Method for Estimating Q_p

Vesic (1977) ได้เสนอวิธีการสำหรับประมาณค่าความสามารถในการรับแรงแบกทานส่วนปลายของเสาเข็ม โดยอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของการขยายตัวของโพรง (expansion of cavities) ตามที่ทฤษฎีได้กล่าวไว้บนพื้นฐานของ effective stress parameters เราสามารถเขียนได้ว่า

$$Q_p = A_p q_q = A_p (c' N_c^* + \sigma'_o N_{\sigma^*})$$

เมื่อ σ'_o = ค่าเฉลี่ยของความเค้นประสิทธิผลของดินโดยทั่วไปที่ระดับของpile point
= $(1+2k_o)q'/3$

k_o = สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินในสภาวะคงที่ = $1 - \sin \phi'$

N_c^*, N_{σ^*} = bearing capacity factors

สำหรับสมการ $Q_p = A_p q_q = A_p (c' N_c^* + \sigma'_o N_{\sigma^*})$ คือการปรับเปลี่ยนสมการ $Q_p = A_p q_p = A_p (c' N_c^* + q' N_q^*)$ ด้วย

$$N_{\sigma}^* = 3N_q^*/(1+2k_c)$$

ค่า N_c ในสมการ $Q_p = A_p q_p = A_p (c' N_c^* + \sigma'_o N_{\sigma}^*)$ สามารถเขียนได้

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi'$$

ตามทฤษฎีของ Vesic (Vesic theory)

$$N_{\sigma}^* = f(l_r)$$

Where l_r reduced rigidity index for the soil

$$l_r = l_r / (1 + l_r \Delta)$$

Where l_r = rigidity index = $E_s / 2(1 + \mu_s)(c' + q' \tan \phi')$
 = $G_s / (c' + q' \tan \phi')$

E_s = modulus of elasticity of soil

μ_s = Poisson's ratio of soil

G_s = shear modulus of soil

Δ = average volumatic strain in the plastic zone below the pile point

เมื่อปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง (ตัวอย่าง เช่น สำหรับ dense sand หรือ saturated clay), $\Delta = 0$

ดังนั้น $l_r = l_r$

สำหรับ $\phi = 0$ (an undrained condition)

$$N_c^* = 4/3 (\ln l_r + 1) + \pi/2 + 1$$

The values of l_r สามารถประมาณค่าจากห้องปฏิบัติการ consolidation และ triaxial tests ที่ตรงกันเพื่อหาค่าความเค้นในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสำหรับการนำไปใช้ในชั้นต้น แนะนำให้ใช้ค่าดังนี้

Type of soil	l_r
Sand	70-150
Silt and clays (drained condition)	50-100
Clays (undrained condition)	100-200

บนพื้นฐานของ cone penetration tests ในสนาม Baldi et al. (1981) ได้ให้ค่าความสัมพันธ์สำหรับ l_r ดังต่อไปนี้

$$I_r = 300/F_r(\%) \quad (\text{For mechanical cone penetration})$$

และ

$$I_r = 170/F_r(\%) \quad (\text{For electric cone penetration})$$

$$F_r = \text{frictional resistance/cone resistance} = f_c/q_c$$

10.1.8 Janbu's Method for Estimating Q_p

Janbu (1976) ได้เสนอวิธีการคำนวณสำหรับ Q_p ดังนี้

$$Q_p = A_p(c'N_c^* + q'N_q^*)$$

The bearing capacity factors N_c และ N_q คำนวณได้โดยการสมมติพื้นผิวการวิบัติในดินที่ส่วนปลายของเสาเข็มซึ่งแสดงใน รูปที่ 10.1.11 ความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับแรงแบกทาน คือ

$$N_q^* = (\tan \phi' + (1 + \tan^2 \phi')^{1/2})^2 (e^{2\eta \tan \phi'})$$

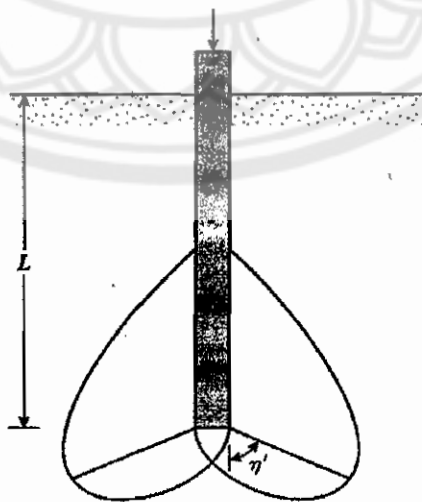
และ

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi'$$

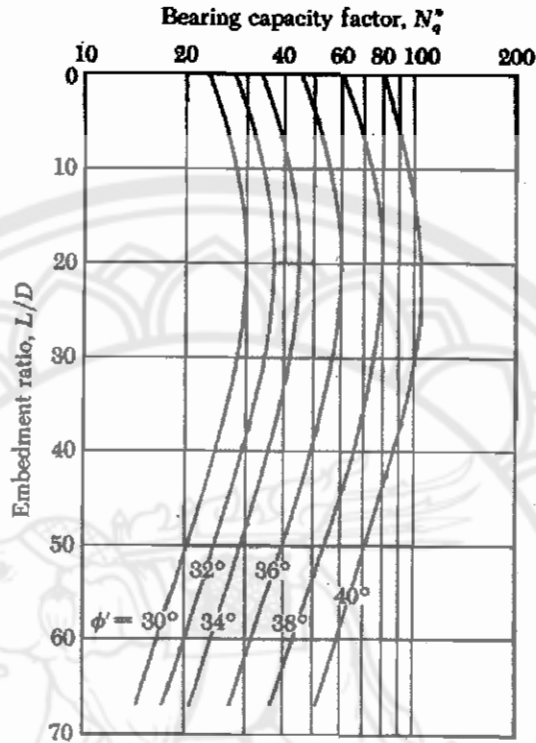
มุม η' จะเปลี่ยนแปลงจาก 60° สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน (soft clays) ถึง 105° สำหรับชั้นทรายแน่น (dense sandy soils) ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำ แต่ในทางปฏิบัตินั้นใช้

$$60^\circ \leq \eta' \leq 90^\circ$$

ตารางที่ 10.1.7 ให้ค่าต่างๆของ N_c^* และ N_q^* สำหรับ $\eta' = 60^\circ, 75^\circ$ และ 90°



รูปที่ 10.1.11 Failure surface at the pile tip



รูปที่ 10.1.12 Variation of N_q^* with L/D

ตารางที่ 10.1.7 Janbu's Bearing Capacity Factors

ϕ°	$\eta' = 60^\circ$		$\eta' = 75^\circ$		$\eta' = 90^\circ$	
	N_c^*	N_q^*	N_c^*	N_q^*	N_c^*	N_q^*
0	5.74	1.0	5.74	1.0	5.74	1.0
10	5.95	2.05	7.11	2.25	8.34	2.47
20	9.26	4.37	11.78	5.29	14.83	6.40
30	19.43	10.05	21.82	13.60	30.14	18.40
40	30.58	26.66	48.11	41.37	75.31	64.20
45	46.32	47.32	78.90	79.90	133.87	134.87

10.1.9 Coyle and Cautello's Method for Estimating Q_p in Sand

Coyle และ Castello (1981) ได้ทำการวิเคราะห์ การทดสอบน้ำหนักบรรทุกขนาดใหญ่ของเสาเข็มตอกในดินทรายจำนวน 24 ตัวอย่าง โดยใช้ผลการทดสอบที่ได้เป็นพื้นฐาน เราได้แนะนำสมการที่ในดินทราย ดังนี้

$$Q_p = q' N_q^* A_p$$

เมื่อ q' = ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็ม
 N_q^* = bearing capacity factors

รูปที่ 10.1.12 แสดงค่าเปลี่ยนแปลงของ N_q^* กับ L/D และค่ามุมเสียดทานในดิน ϕ'

10.1.10 Frictional Resistance (Q_s) in Sand

จากสมการ $Q_{all} = A_p f_w$ ความต้านทานแรงเสียดทาน

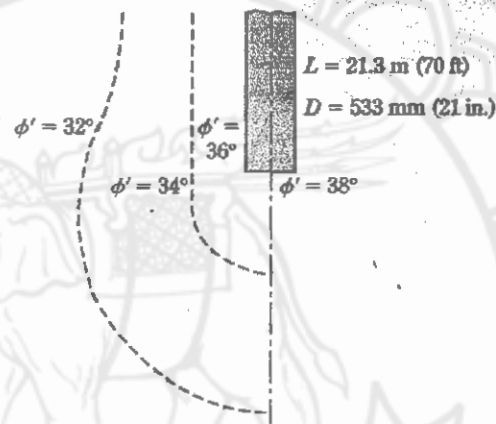
$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

ความต้านทานแรงเสียดทานหนึ่งหน่วย, f , นั้นยากแก่การประมาณค่า เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ต้องนำมาคิด ซึ่งได้แก่

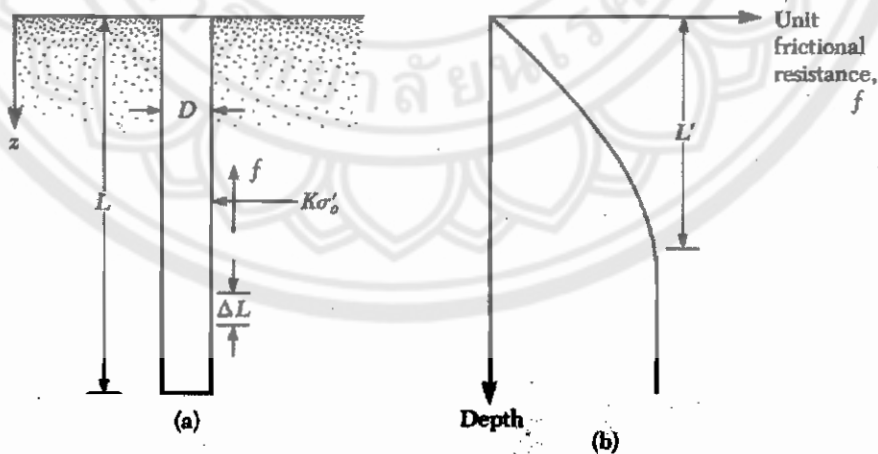
1. คุณสมบัติในการติดตั้ง สำหรับเสาเข็มตอกในทราย การสั่นสะเทือนขณะทำการตอกเสาเข็มจะช่วยให้ดินเกิดความหนาแน่นรอบๆเสาเข็ม รูปที่ 10.1.13 แสดงถึงเส้นชั้นความสูงของมุมเสียดทานของดิน ϕ' รอบๆเสาเข็มตอก (Meyerhof, 1961) ในกรณีนี้มุมเสียดทานของดินประสิทธิผลเริ่มต้น (original effective soil friction angle) ของทรายจะเท่ากับ 2.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ในชั้นดินที่เป็นทรายรอบๆเสาเข็ม
2. จากการที่ได้ทำการสังเกตคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงค่า f ในสนาม จะประมาณได้โดยรูปที่ 10.1.14 แรงเสียดทานผิวหนึ่งหน่วยจะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นหรือมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นที่ความลึก L' และหลังจากนั้นจะคงที่ ขนาดของความลึกวิกฤติ (critical depth) L' มีค่าประมาณ 15 ถึง 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม การประมาณค่าโดยเน้นความปลอดภัย (conservative estimate) จะได้

$$L' \approx 15D$$

3. ที่ความลึกเหมือนกัน แรงเสียดทานที่ผิวหนึ่งหน่วยในทรายหลวม (loose sand) จะมีค่าสูงมากในเสาเข็มแบบ high – displacement เมื่อเทียบกับเสาเข็มแบบ low– displacement
4. ที่ความลึกเหมือนกัน เสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มในทราย จะน้ำฉัดเจาะหลวม (bored or jetted piles) จะมีแรงเสียดทานต่ำกว่าเสาเข็มตอก



รูปที่ 10.1.13 Compaction of sand near driven piles



รูปที่ 10.1.14 Unit frictional resistance for piles in sand

จากที่กล่าวไปแล้วนั้น เราสามารถให้ความสัมพันธ์ในการประมาณค่าสำหรับ f (ดูรูปที่ 10.1.14) สำหรับ $z = 0$ ถึง L'

$$f = k \sigma_o \tan \delta$$

และสำหรับ $z = L'$ ถึง L ,

$$f = f_z = L'$$

ในสมการนี้

K = สัมประสิทธิ์แรงดันดินประสิทธิผล

σ_o = ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลที่ความลึกที่พิจารณา

δ = มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม

ในสภาพความเป็นจริงแล้วขนาดของ k จะแปรผันตรงกับความลึก ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Rankine passive earth pressure coefficient, k_o , ที่ส่วนบนของเสาเข็มและจะมีค่าน้อยกว่า at – rest pressure coefficient, k_o , ที่ระดับความลึกที่มากกว่า ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน ค่าเฉลี่ยของ k ที่ได้รับการแนะนำให้ใช้ในสมการ $f = k \sigma_o \tan \delta$

Pile type	k
Bored or jetted	$\cong k_o = 1 - \sin \phi'$
Low-displacement driven	$\cong k_o = 1 - \sin \phi'$ to $1.4k_o = 1.4(1 - \sin \phi')$
High-displacement driven	$\cong k_o = 1 - \sin \phi'$ to $1.8k_o = 1.8(1 - \sin \phi')$

ค่าของ δ จากการศึกษาที่หลายหลายจะปรากฏอยู่ในช่วงจาก $0.5\phi'$ ถึง $0.8\phi'$ จะต้องทำการพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบในการเลือกใช้ค่า δ สำหรับเสาเข็มตอกแบบ High-displacement

Bhusen (1982) ได้แนะนำค่าดังนี้

$$K \tan \delta = 0.18 + 0.0065D_r$$

และ

$$K = 0.5 + 0.008D_r$$

เมื่อ D_r = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)

Coyle และ Castello (1981) ได้แนะนำสมการในการเชื่อมต่อกันของวัสดุที่ปรากฏใน Section 10.1.9 ดังนี้

$$Q_s = f_{av}pL = (k\sigma'_0 \tan \delta)pL$$

เมื่อ σ'_0 = ความดันจากน้ำหนักดินด้านบนบนประสิทธิภาพเฉลี่ย

δ = มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม = $0.8\phi'$

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง, k , สามารถทำการหาได้จากการสังเกตการณ์ในสนาม ดังนั้นจึงใช้

$$Q_s = k\sigma'_0 \tan(0.8\phi')pL$$

Correlation with Standard Penetration Test Results

Meyerhof (1976) ได้บ่งชี้ค่าความต้านทานแรงเสียดทานหนึ่งหน่วยเฉลี่ย, f_{av} , สำหรับเสาเข็มตอกแบบ high-displacement จะหาได้จากค่าเฉลี่ยของ corrected standard penetration resistance values

$$f_{av} = 0.02p_a(\bar{N}_1)_{60}$$

เมื่อ $(\bar{N}_1)_{60}$ = averaged corrected value of standard penetration resistance

p_a = atmospheric pressure ($\cong 100 \text{ kN/m}^2$ or 2000 lb/ft^2)

เสาเข็มตอกแบบ low-displacement

$$f_{av} = 0.01p_a(N_1)_{60}$$

ดังนั้น

$$Q_s = pLf_{av}$$

Briaud et al. (1985) ได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับแรงเสียดทานที่ผิวหนึ่งหน่วยกับ standard penetration resistance ในรูปแบบ

$$f = 0.224p_a(N_{60})^{0.29}$$

ดังนั้น

$$Q_s = \sum p(\Delta L)f = \sum 0.224pp_0(\Delta L)(N_{60})^{0.29}$$

ในดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน (fairly homogeneous soil) เราสามารถประมาณค่าเฉลี่ยของ N_{60} ในกรณีนี้ คือ

$$Q_s = pLf_{av}$$

เมื่อ $f_{av} = 0.224p_a(N_{60})_{av}^{0.29}$

Correlation with Cone Penetration Test Results

สำหรับการคำนวณความสามารถในการรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม Q_p ที่ใช้ผลการทดสอบ cone penetration ได้ทำการอธิบายไว้แล้ว โดยจะมีวิธีการเชื่อมต่อซึ่ง Nottingham และ Schmertmann (1975) และ Schmertmann (1978) ได้ให้ความสัมพันธ์สำหรับประมาณค่า Q_s โดยใช้ความต้านทานแรงเสียดทาน (f_c) ซึ่งได้มาในระหว่างการทดสอบ cone penetration tests

$$f = \alpha' f_c$$

ค่าความเปลี่ยนแปลงของ α' กับ z/D สำหรับ electric cone และ mechanical cone penetrometers เราได้

$$Q_s = \sum p(\Delta L) f = \sum p(\Delta L) \alpha' f_c$$

10.1.11 Frictional (Skin) Resistance in Clay

การประมาณค่าความต้านทานแรงเสียดทาน (หรือที่ผิว) ของเสาเข็มในดินเหนียว (clay) จะทำได้ค่อนข้างยาก เช่นเดียวกับการประมาณค่าในทราย (sand) (ดู section 10.1.10) เนื่องจากยังมีหลายๆค่าที่ปรากฏไม่สามารถกำหนดปริมาณได้ง่ายนัก ดังนั้นจึงมีวิธีการหลายๆวิธีสำหรับการได้มา ซึ่งค่าความต้านทานแรงเสียดทานหนึ่งหน่วยของเสาเข็ม ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

λ method

วิธีการนี้ได้รับการเสนอโดย Vijayvergiya และ Focht (1972) ซึ่งอาศัยพื้นฐานของสมมติฐานในการเข้าแทนที่ของดินที่เกิดจากผลของการตอกเสาเข็ม ในภาวะ passive lateral pressure ที่ความลึกใดๆ และค่าความต้านทานที่ผิวหนึ่งหน่วย คือ

$$f_{av} = \lambda (\sigma'_0 + 2c_u)$$

เมื่อ σ'_0 = ค่ากึ่งกลางของความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลสำหรับความยาวระยะฝังทั้งหมด

$$C_u = \text{ค่ากึ่งกลางของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่มีการระบาย } (\phi = 0)$$

ค่าของ λ จะเปลี่ยนตามความลึกของระยะจมของเสาเข็ม

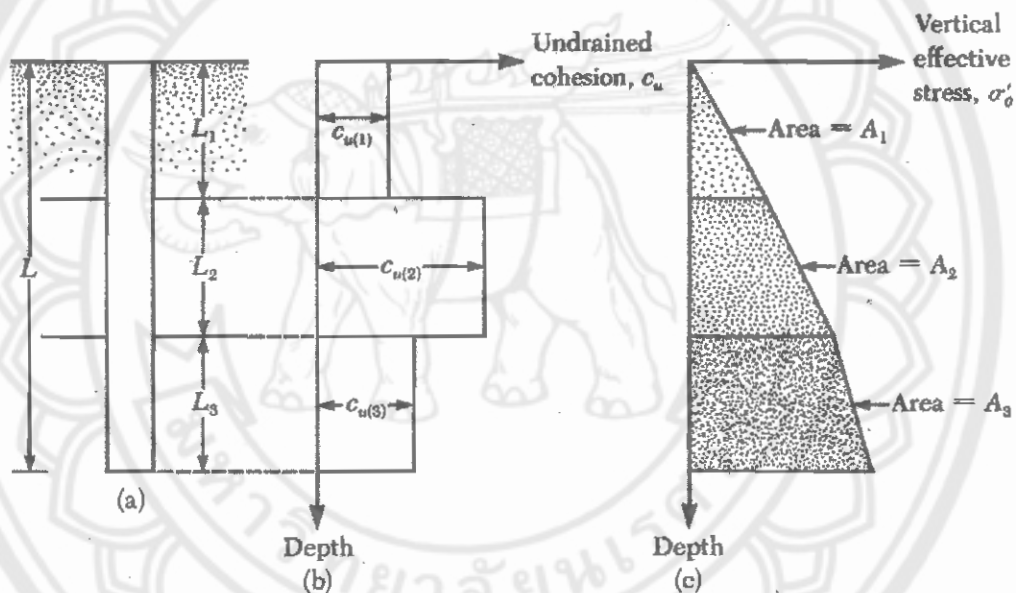
ดังนั้น ค่าความต้านทานแรงเสียดทานรวม สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_s = p L f_{av}$$

ความสนใจที่เอาค่า σ'_0 และ c_u ในชั้นดิน รูปที่ 10.1.15 จะช่วยในการอธิบายเหตุผล รูปที่ 10.1.15a แสดงระยะจุมของเสาเข็มที่ผ่านชั้นดินเหนียว 3 ชั้น ตามที่ รูปที่ 10.1.15b ค่ากึ่งกลางของ c_u คือ $(c_{u(1)}L_1 + c_{u(2)}L_2 + \dots)/L$ ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 10.1.15c แสดงถึงการเขียนเส้นกราฟของค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นประสิทธิผลตามความลึกค่ากึ่งกลางของความเค้นประสิทธิผล คือ

$$\sigma'_0 = (A_1 + A_2 + A_3 + \dots)/L$$

เมื่อ $A_1, A_2, A_3, \dots =$ พื้นที่ของแผนผังของความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง



รูปที่ 10.1.15 Application of λ method in layered soil

α method

ตามวิธี α ความต้านทานที่ผิวหนึ่งหน่วยในชั้นดินเหนียว สามารถแสดงได้โดยสมการ

$$f = \alpha c_u$$

เมื่อ $\alpha =$ empirical adhesion factor

การประมาณค่าความผันแปรของ α เมื่อ σ'_0 คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง ค่าผันแปรของ α ตาม c_u/σ'_0 ได้มาจาก Randolph และ Murphy (1985) เราได้

$$Q_s = \sum f_p \Delta L = \sum \alpha c_u p \Delta L$$

β method

เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปในพื้นที่ดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความดันน้ำในโพรงดินรอบๆ เสาเข็มจะเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำส่วนเกินในโพรงดินใน normally consolidated clays จะมีค่า 4 ถึง 6 เท่า ของ c_u อย่างไรก็ตามภายในระยะเวลา 1 เดือนหรือมากกว่านั้น ค่าแรงดันจะค่อยๆสลายไป ดังนั้น ความต้านทานแรงเสียดทาน 1 หน่วย สำหรับเสาเข็ม สามารถหาได้จากหลักการพื้นฐานของ ปัจจัยกำหนดของความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวในสภาวะสร้างใหม่ (remold state) ($c' = 0$) ดังนั้น ที่ความลึกใดๆ

$$f = \beta \sigma'_0$$

เมื่อ σ'_0 = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง

$$\beta = k \tan \phi'_R$$

ϕ'_R = มุมเสียดทานแบบมีกระบายของดินเหนียวที่สร้างใหม่

$$k = \text{สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง}$$

โดยเน้นแบบแผนต่างๆ ขนาดของ k คือ สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินในสภาวะคงที่ (the earth pressure coefficient at rest)

$$k = 1 - \sin \phi'_R \quad (\text{for normally consolidated clays})$$

และ

$$k = (1 - \sin \phi'_R)(OCR)^{1/2} \quad (\text{for normally consolidated clays})$$

เมื่อ OCR = overconsolidation ratio

ทำการรวมสมการ สำหรับ normally consolidated clay yields

$$f = (1 - \sin \phi'_R) \tan \phi'_R \sigma'_0$$

และสำหรับ overconsolidated clays,

$$f = (1 - \sin \phi'_R) \tan \phi'_R (OCR)^{1/2} \sigma'_0$$

เมื่อทำการหาค่า f แล้ว ค่าความต้านทานแรงเสียดทานรวมสามารถหาได้

$$Q_s = \sum f_p \Delta L$$

Correlation with Cone Penetration Test Results

Nottingham และ Schmertmann (1975) และ Schmertmann (1978) พบว่า ความสัมพันธ์ สำหรับ แรงเสียดทานที่ผิวหนึ่งหน่วยในดินเหนียว (ซึ่ง $\phi = 0$) จะได้

$$f = \alpha' f_c$$

ค่าความแปรผันของ α' กับความต้านทานแรงเสียดทาน f_c ดังนั้น

$$Q_s = \sum f_p \Delta L = \sum \alpha' f_c p \Delta L$$

10.1.12 General Comments and Allowable Pile Capacity

แม้ว่าการคำนวณสำหรับประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานประลัย (the ultimate load-bearing capacity) ของเสาเข็มสามารถทำได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ที่แสดงใน sections 10.1.5 จนถึง 10.1.11 แต่วิศวกรจำเป็นต้องปฏิบัติตามข้อพึงระวังดังนี้ 1. ในการคำนวณพื้นที่หน้าตัด, A_p , และตัวแปร, p , ของเสาเข็มที่ปรากฏในรูปตัดตามยาวเช่นในเสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H (H-piles) และเสาเข็มท่อปลายเปิด (open-ended pipe piles) จะต้องทำการพิจารณาผลกระทบของการรูดตันของดินในเสาเข็มด้วยตามที่แสดงใน รูปที่ 10.1.9b และ รูปที่ 10.1.9c สำหรับเสาเข็มท่อ

$$A_p = (\pi/4)D^2$$

และ

$$P = \pi D$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับ H-piles

$$A_p = d_1 d_2$$

และ

$$P = 2(d_1 + d_2)$$

หมายเหตุ สำหรับ H-piles เนื่องจาก $d_2 > d_1$, $D = d_1$

1. ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็มประลัย (The ultimate point load relations) เป็นความสัมพันธ์สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็มประลัยทั้งหมด (gross ultimate point load) เช่นนี้แล้วจึงคิดรวมกับน้ำหนักของเสาเข็มไปด้วย ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็มประลัยสุทธิ (the net ultimate point load) สามารถทำการประมาณได้

$$Q_{p(\text{net})} = Q_{p(\text{gross})} - q'A_p$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วสำหรับดินที่มี $\phi > 0$ จะเกิดสมมติฐานที่ว่า $Q_{p(\text{net})} = Q_{p(\text{gross})}$ ในดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soils) คือ $\phi = 0$, $N_q = 1$

$$Q_{p(\text{gross})} = (c_u N_c^* + q')A_p$$

ดังนั้น

$$Q_{p(\text{net})} = [(c_u N_c + q') - q'] A_p = c_u N_c A_p = 9c_u A_p = Q_p$$

หลังจากที่ได้ทำการหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยรวมของเสาเข็ม โดยผลรวมของความสามารถในการรับแรงแบกทานส่วนปลายและความต้านทานแรงเสียดทาน แล้วค่าความปลอดภัยที่จะนำมาใช้จะให้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้สำหรับเสาเข็ม หรือ

$$\text{เมื่อ } \frac{Q_{\text{all}}}{FS} = \frac{Q_u}{FS}$$

= ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม
= ค่าความปลอดภัย (factor of safety)

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัยจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.5 ถึง 4 ขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนของสภาพแวดล้อมในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัย

10.1.13 Point Bearing Capacity of Piles Resting on Rock

ในบางครั้งการตอกเสาเข็มลงไปในพื้นที่หิน ในกรณีนี้วิศวกรต้องประเมินค่าความสามารถในการรับแรงแบกทานของหินนั้นๆ ค่าความต้านทานแรงแบกทานส่วนปลายหนึ่งหน่วยประลัย (The ultimate unit point resistance) ในพื้นที่หิน (Goodman, 1980) ประมาณค่าได้จาก

$$\text{เมื่อ } q_p = q_u (N_\phi + 1)$$

$N_\phi = \tan^2(45 + \phi'/2)$
 $q_u =$ unconfined compression strength of rock
 $\phi' =$ drained angle of friction

กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินสามารถหาได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างหินได้รวบรวมมาจากการสำรวจในสนาม อย่างไรก็ตามจะต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากในการที่จะใช้ค่า q_u ที่เหมาะสม ทั้งนี้ก็เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในปฏิบัติการโดยมากจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก และเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลง ปรัชญาการณเช่นนี้เรียกว่า scale effect สำหรับตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1 เมตร (3 ฟุต) ค่าของ q_u จะค่อนข้างคงที่ ในกระบวนการนี้จะปรากฏว่าค่าของ q_u จะลดลงไปประมาณ 4-5 เท่า scale effect ในพื้นที่หินมีสาเหตุแรกเริ่มมาจากการสุมกระจายตัวของรอยแตกขนาดใหญ่และเล็กและการแตกร้าวที่เป็นลำดับตลอดแนวการลื่นไถล (slip lines) ดังนั้น จึงมีการแนะนำค่าดังนี้

$$q_u = q_{u(\text{lab})}/5$$

ดังนั้น

$$Q_{p(\text{all})} = [q_{u(\text{design})}(N_\phi + 1)]A_p/FS$$

10.1.14 Pile Load Tests

วิธีทดสอบความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนาม (Pile Load Tests) เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นโดยเฉพาะในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ ต้องการมาตรฐานในงานก่อสร้างที่สูง มีเสาเข็มเป็นจำนวนมาก เช่น ทางด่วน อาคารสูง สะพาน ท่าเรือ รถไฟฟ้า เป็นต้น เพราะมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีสถิตยศาสตร์และวิธีพลศาสตร์ เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะที่มีราคาแพง ดังนั้นวิศวกรควรตัดสินใจใช้วิธีทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม เนื่องจากจุดประสงค์ข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้

1. เพื่อเป็นการพิสูจน์และสามารถรับประกันว่าการวิบัติของเสาเข็มจะไม่เกิดขึ้น
2. เพื่อตรวจสอบแรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็ม เปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยวิธีสถิตยศาสตร์และวิธีพลศาสตร์
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการจมตัวของเสาเข็มเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกจริง ข้อมูลในการศึกษานี้สามารถนำไปประมาณการหลุดตัวของเสาเข็มกลุ่มในอนาคตได้
4. เพื่อตรวจสอบความมั่นคงทางด้านโครงสร้างของตัวเสาเข็มเอง

วิธีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้คือ วิธีคงค้ำน้ำหนักบรรทุก (Maintained Loading Test) โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มขึ้นเป็นขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนค้ำน้ำหนักบรรทุกด้วยระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงเพิ่มปริมาณน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการและต้องรักษาน้ำหนักบรรทุกคงไว้ไม่น้อยกว่า 24 ชม. จากนั้นจึงค่อยๆ ลดน้ำหนักลงเรื่อยๆ ระหว่างการเพิ่มหรือลดน้ำหนักต้องบันทึกค่าการหลุดตัวและค่าการคืนตัว เพื่อนำไปแสดงผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในกราฟความสัมพันธ์ต่อไป ในกรณีที่ไม่ต้องการน้ำหนักบรรทุกจนถึงค่าวิบัติของเสาเข็ม การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากน้ำหนักที่ใช้งานถึง 200% ก็เป็นการเพียงพอแล้ว

ชนิดน้ำหนักรรทุกของเสาเข็ม

น้ำหนักที่ใช้รรทุกตกลงมายังเสาเข็มที่ต้องการทดสอบ แทนน้ำหนักการใช้งานจริงทำขึ้นได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

1. ใช้กระบะน้ำหนักวางทับบนหัวเสาเข็มโดยตรง

กรณีการทดสอบเสาเข็มเล็กๆที่รับน้ำหนักรรทุกไม่มากนัก อาจทำได้โดยน้ำหนักที่ใช้ควรเป็นวัสดุที่จัดหาได้ง่ายและสะดวก เช่น น้ำ ทราย กรวด หิน แท่งคอนกรีต เป็นต้น กระบะน้ำหนักต้องมีไม้หมอนหรือแม่แรงรองรับ เพื่อป้องกันการพลิกตัวของกระบะ น้ำหนักที่จัดมาวางบนกระบะต้องจัดวางให้สม่ำเสมอ กัน ดูรูปที่ 10.1.15a

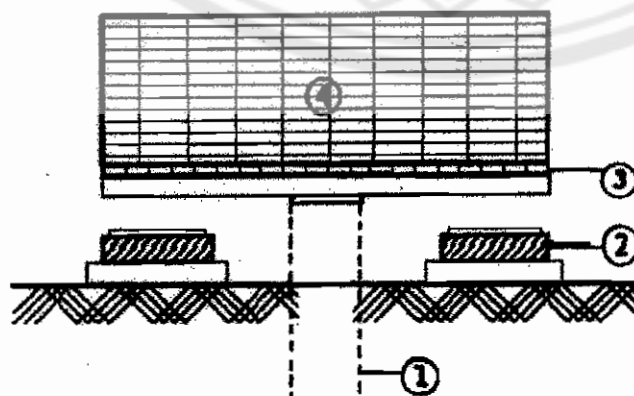
2. ใช้แม่แรงอัดดันกับกระบะน้ำหนัก

วิธีนี้ทำเหมือนกับข้อ 1 เพียงแต่กระบะน้ำหนักตั้งอยู่บนเสาเข็มที่ทดสอบ แล้วจึงใช้แม่แรงอัดดันหัวเสาเข็มกับกระบะน้ำหนักฐานรองรับ น้ำหนักจากกระบะน้ำหนัก ต้องวางห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มที่ทดสอบไม่น้อยกว่าความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดของเสาเข็ม และต้องไม่น้อยกว่า 150 ซม. ดูรูปที่ 10.1.15b

3. ใช้แม่แรงอัดดันกับเสาเข็ม

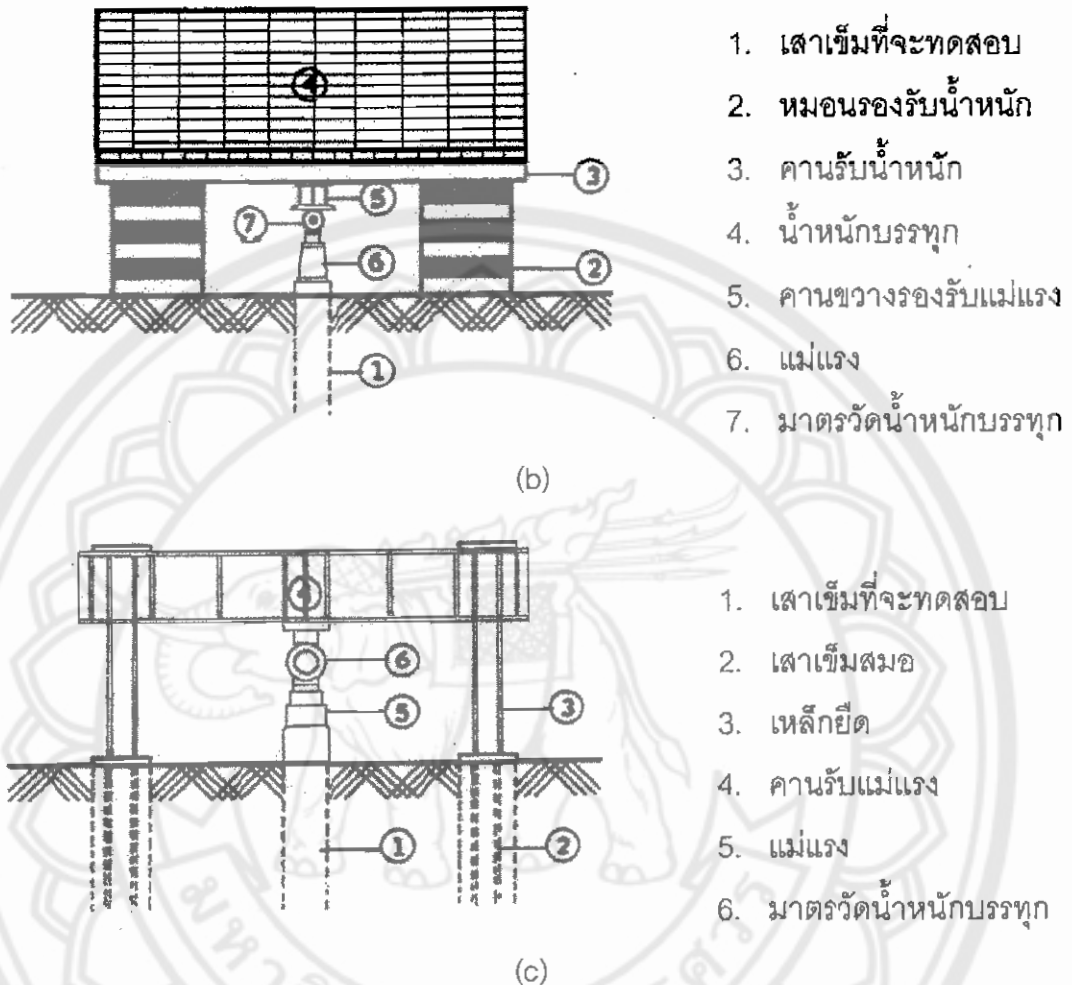
วิธีนี้เป็นที่นิยมโดยเฉพาะกับโครงการขนาดใหญ่ โดยเสาเข็มตอกขนาดเท่ากันกับเสาเข็มที่ต้องการทดสอบจำนวน 2 ต้น ในแนวเดียวกับเสาเข็มที่จะทดสอบ (นิยมตอกเสาเข็ม 4 ต้น รอบเสาเข็มที่ทำการทดสอบ) เสาเข็มนี้จะต้องฝังเหล็กเสม (Dowel Bar) เพื่อให้เชื่อมยึดติดกับคานเหล็ก ใช้คานเหล็กที่มีความแข็งแรงยึดให้แน่นกับเสาเข็มทดสอบนี้เป็นระยะไม่น้อยกว่าความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดของเสาเข็มและต้องไม่น้อยกว่า 150 ซม. ดูรูปที่ 10.1.15c

แม่แรงที่ใช้ตามข้อที่ 2 และ 3 ต้องมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของน้ำหนักทดสอบและต้องมีการตรวจสอบทุกระยะ 6 เดือน



1. เสาเข็มที่จะทดสอบ
2. หมอนรองรับน้ำหนัก
3. แท่นรับน้ำหนัก
4. น้ำหนักรรทุก

(a)



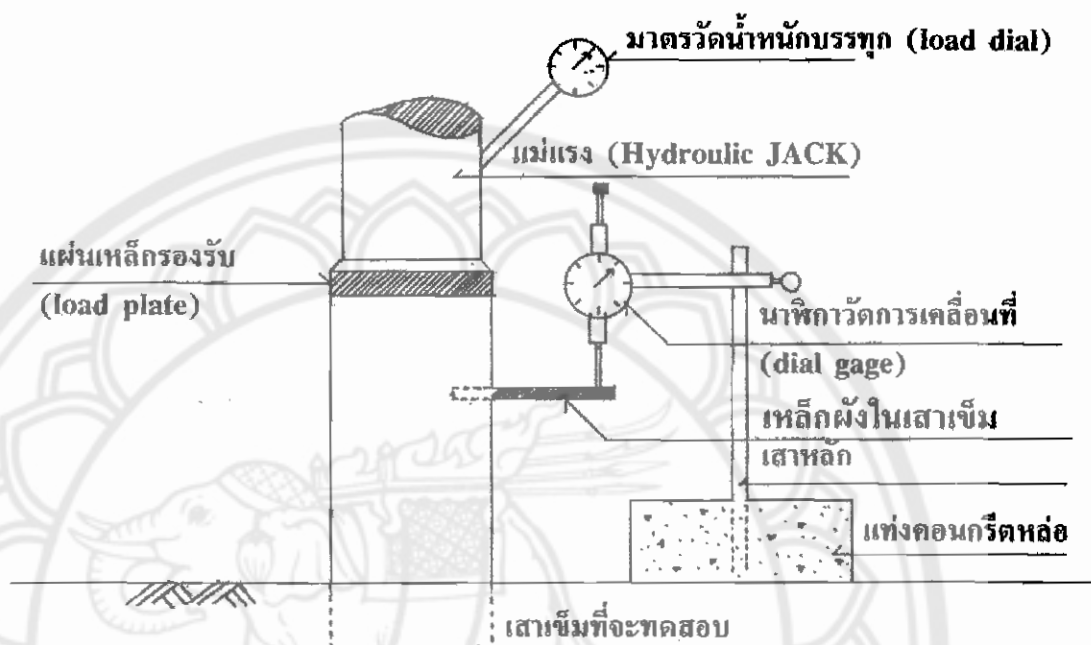
รูปที่ 10.16 ชนิดของน้ำหนักรรทุกที่ใช้ในการทดสอบน้ำหนักรรทุกเสาเข็ม

เครื่องมือวัดการจมของเสาเข็ม

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าการจมตัวของเสาเข็ม ภายใต้น้ำหนักบรรทุกมี 2 ชนิด คือ

1. กล้องระดับ ที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 1.0 มม. โดยการอ่านค่าการจมตัวของเสาเข็มด้วยกล้องระดับเทียบกับหมุดระดับหรือหมุดอ้างอิง (Bench Mark) โดยหมุดระดับควรอยู่ห่างจากเสาเข็มไม่น้อยกว่า 5 เมตร
2. ใช้นาฬิกาวัดการเลื่อนตัว (Dial Gage) ที่อ่านได้ละเอียด 0.02 มม. ทำโดยการสร้างเสาหลักชิดกับเสาเข็มที่ทดสอบ เสาหลักนี้ตั้งบนฐานคอนกรีตหนาประมาณ 20 ซม. กว้างประมาณ 50 ซม. หลักของเสาหลักต้องแข็งแรงทนต่อการสั่นสะเทือนได้ดี ยึด

Dial Gage กับเสาหลัก เจาะเสาเข็มที่ทดสอบและเสียบแผ่นโลหะผิวเรียบ เพื่อรองรับ Dial Gage ดังรูป 10.1.17



รูปที่ 10.1.17 การติดตั้งนาฬิกาวัดการเคลื่อนที่ (Dial Gage)

ขั้นตอนการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเสาเข็มในสนาม

เมื่อทำการตอกเสาเข็มที่ทำการทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว ต้องรอให้ดินจับตัวรอบผิวเสาเข็มเสียก่อน วิศวกรรมการก่อสร้างแห่งประเทศไทยแนะนำให้ทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเสาเข็มหลังจากตอกไปแล้ว 3 – 15 วัน (บางโครงการปล่อยทิ้งไว้ 30 – 90 วัน) การทดสอบจะกระทำเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นขั้นๆจนถึง 100% แล้วลดน้ำหนักเป็นขั้นๆจนเหลือศูนย์ และชุดสองให้บรรทุกน้ำหนักใหม่เป็นขั้นๆจนถึง 200% แล้วลดน้ำหนักจนเหลือศูนย์เช่นเดียวกัน การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเสาเข็มมีขั้นตอนดังนี้

1. จุดบันทึกรายละเอียดของเสาเข็มที่ทดลอง เช่น ลักษณะผิวคอนกรีต รอยแตกร้าว
2. บันทึกจำนวนครั้งที่ตอกเสาเข็มของลูกตุ้มน้ำหนัก ต่อความยาวเสาเข็ม
3. ตัดต่อและซ่อมหรือหล่อเสาเข็มให้เรียบร้อย ปล่อยทิ้งไว้จนกระทั่งคอนกรีตมีความแข็งแรงเพียงพอก่อนทำการบรรทุกน้ำหนัก
4. ชุดแรก ให้เพิ่มน้ำหนักทดสอบเป็นจำนวนเท่ากับที่ออกแบบไว้ โดยให้เพิ่มน้ำหนักเป็นขั้นดังนี้ 25%, 50%, 75% และ 100%

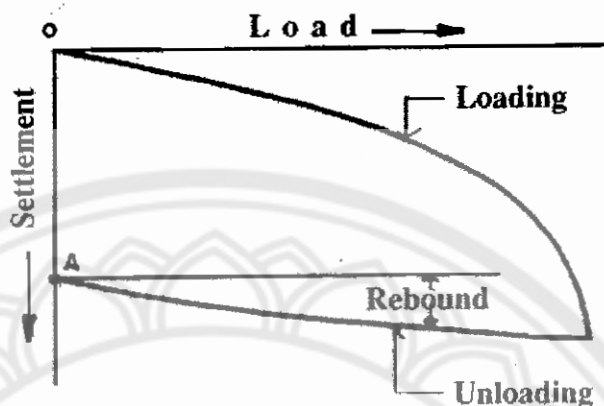
5. ในแต่ละชั้นของน้ำหนักที่เพิ่ม ให้ใช้อัตราการเพิ่มประมาณ 1 ม.ม. ต่อนาที อ่านค่าจมตัวของเสาเข็มที่ 1,2,4,8,15,30,60,90,120,180,240 นาที และทุกๆ 2 ชม.
6. การเพิ่มน้ำหนักแต่ละชั้น กระทำได้ต่อเมื่ออัตราการจมตัวลดลงถึง 0.30 ม.ม. ต่อชั่วโมง แต่ต้องมีเวลาของการบรรทุกน้ำหนักในชั้นนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 60 นาที
7. ที่น้ำหนัก 100% ต้องรักษาน้ำหนักทดสอบไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง
8. ให้น้ำหนักทดสอบทุกๆ ชั่วโมง และเป็นขั้นๆ ดังนี้ 50%, 25% และ 0%
9. บันทึกราคาคืนตัว (Rebound) ของเสาเข็มในข้อ 8 ที่ 1,2,4,8,15,30,45 และ 60 นาที แต่น้ำหนัก 0% ให้นับที่ต่อไปทุกๆ ชั่วโมง จนกระทั่งค่าของการคืนตัวคงที่
10. ชูดสอง ให้เพิ่มน้ำหนักทดสอบให้เป็นจำนวนสองเท่าที่ออกแบบไว้โดยให้เพิ่มน้ำหนักเป็นขั้นๆ ดังนี้ 25%, 50%, 75% , 100%, 125%, 150%, 175% และ 200%
11. อ่านค่าจมตัวของเสาเข็มที่ 1,2,4,8,15,30,60,90,120,180,240 นาที และ 2 ชั่วโมง
12. เพิ่มน้ำหนักแต่ละชั้น กระทำได้ก็ต่อเมื่ออัตราการจมตัวลดลงถึง 0.30 ม.ม. ต่อชั่วโมง แต่ต้องมีเวลาของการบรรทุกน้ำหนักในชั้นนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 60 นาที
13. ที่น้ำหนัก 200% ต้องรักษาน้ำหนักทดสอบไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง
14. ให้น้ำหนักทดสอบทุกๆ ชั่วโมง และเป็นขั้นๆ ดังนี้ 150%, 100%, 50% และ 0%
15. บันทึกราคาคืนตัวของเสาเข็ม ในข้อ 14 ที่ 1,2,4,8,15,30,45 และ 60 นาที แต่น้ำหนัก 0% ให้นับที่ต่อไปทุกๆ ชั่วโมง จนกระทั่งค่าของการคืนตัวคงที่
16. ทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate load) โดยเพิ่มน้ำหนักเท่ากับ 50% ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้ทุกๆ ชั่วโมง จนกระทั่งเสาเข็มจมตัวลง และไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มที่ 1,2,4,7,8,15,30,45 และ 60 นาที ของแต่ละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบที่แสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ

หลังการทดสอบ ให้นำผลการทดสอบมาแสดงให้เข้าใจได้ง่าย โดยแสดงในรูปแบบของกราฟกราฟที่นิยมแสดงได้แก่

1. กราฟความสัมพันธ์ของการทรุดตัว – เวลา
2. กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนัก – เวลา
3. กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนัก – การทรุดตัว
4. กราฟความสัมพันธ์ของการคืนตัว – เวลา

5. กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนัก – การคืบตัว



รูปที่ 10.1.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว
จากกราฟรูปที่ 10.1.18 เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Loading) ขึ้นเป็นขั้นๆ ส่งผลให้เกิดการ
จมตัวลงตามลำดับเช่นกัน เมื่อยุติการเพิ่มน้ำหนักหรือลดน้ำหนัก (Unloading) เสาเข็ม พบว่าเกิด
การคืนตัว (Rebound) ค่าการจมตัวก็ลดลงด้วย โดยหยุดพฤติกรรมดังกล่าวที่จุด A ดังนั้น
หลังจากการลดน้ำหนักลงแล้ว เสาเข็มยังคงจมตัวลง (Settlement) เป็นระยะเท่ากับ OA

ข้อกำหนดกำลังแบกรับความปลอดภัยของเสาเข็ม

หนึ่งตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคารในกรณีที่มีเอกสารการทดสอบคุณสมบัติของดิน
หรือมีการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็มในบริเวณก่อสร้างหรือข้างเคียง ให้ใช้กำลังแบกทาน
ของเสาเข็มไม่เกินอัตราต่อไปนี้

1. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานเสาเข็ม ที่คำนวณจากคุณสมบัติของดินโดยวิธี
สถิตยศาสตร์ (Factor of Safety, FS = 2.5)
2. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานเสาเข็ม ที่คำนวณจากสูตรการตอกเสาเข็มโดย
วิธีพลศาสตร์ (Factor of Safety, FS = 2.5)
3. ไม่เกินร้อยละ 50 ของกำลังแบกทานเสาเข็ม ที่ได้จากการทดสอบกำลังแบกทาน
สูงสุด โดยวิธีทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนาม (Factor of Safety, FS =
2.0)

10.1.15 Elastic Settlement of Piles

การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานในแนวตั้ง (Q_w)

$$s_e = s_{e(1)} + s_{e(2)} + s_{e(3)}$$

เมื่อ $s_{e(1)}$ = elastic settlement of pile

$s_{e(2)}$ = settlement ของเสาเข็ม เนื่องจากน้ำหนักที่ปลายของเสาเข็ม

$s_{e(3)}$ = settlement ของเสาเข็ม เนื่องจากน้ำหนักที่ผ่านไปตาม pile shaft

วิธีการคำนวณค่า $s_{e(1)}$ มีดังนี้

ถ้าสมมติให้วัสดุที่ทำเสาเข็มมีคุณสมบัติเป็น elastic ทำให้สามารถประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของ pile shaft ได้ ซึ่งสอดคล้องกับวิชากลศาสตร์ของวัสดุ ดังนี้

$$s_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \zeta Q_{ws})L}{A_p E_p}$$

เมื่อ Q_{wp} = น้ำหนักกระทำที่ปลายเข็ม เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งาน (Working Load)

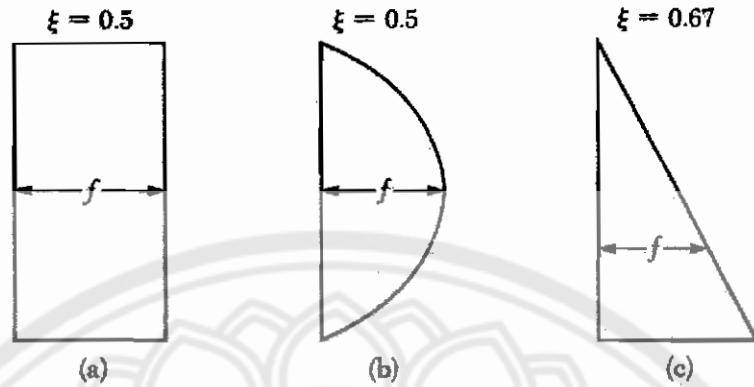
Q_{ws} = น้ำหนักกระทำระหว่างเสาเข็มกับดิน (friction or skin resistance) เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งาน (Working Load)

A_p = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

L = ความยาวของเสาเข็ม

E_p = modulus of elasticity ของวัสดุที่ทำเสาเข็ม

ซึ่งค่า ζ จะแปรเปลี่ยนตามลักษณะของ Unit Skin Frictional Resistance (f) ดังแสดงในรูปที่ 10.1.19 โดยที่ ζ เท่ากับ 0.5 เมื่อลักษณะเป็น Uniform หรือ Parabolic และ ζ เท่ากับ 0.67 เมื่อลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Vesic, 1977)



รูปที่ 10.1.19 Various types of distribution of unit friction (skin) resistance along the pile shaft

วิธีการคำนวณค่า $s_{e(2)}$ มีดังนี้

ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนักที่ปลายของเสาเข็ม สามารถแสดงได้ดังนี้

$$s_{e(2)} = \frac{q_{wp} D (1 - \mu_s^2) l_{wp}}{E_s}$$

เมื่อ D = ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

q_{wp} = น้ำหนักกระทำที่ปลายของเสาเข็มต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม = Q_{wp} / A_p

E_s = modulus of elasticity ของดินที่ปลายเสาเข็มหรือต่ำกว่าปลายของเสาเข็ม

μ_s = Poisson's ratio ของดิน

l_{wp} = influence factor ≈ 0.85

Vesic (1977) ได้เสนอ semi - empirical method เพื่อหาค่าการทรุดตัวของ $s_{e(2)}$ โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$s_{e(2)} = \frac{Q_{wp} C_p}{D q_v}$$

เมื่อ q_v = กำลังต้านทานที่ปลายระดับของเสาเข็ม (ultimate point resistance of the pile)

C_p = an empirical coefficient

ค่า C_p สำหรับดินแต่ละชนิดสามารถดูได้ในตารางที่ 10.1.8

ตารางที่ 10.1.8 Typical Values of C_p

Type of soil	Driven pile	Bored pile
Sand (dense to loose)	0.02-0.04	0.09-0.18
Clay (stiff to soft)	0.02-0.03	0.03-0.06
Silt (dense to loose)	0.03-0.05	0.09-0.12

วิธีการคำนวณค่าของ $s_{e(3)}$ มีดังนี้

ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกตาม pile shaft จะเป็นดังนี้

$$s_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D(1-\mu_s^2)I_{ws}}{E_s}$$

เมื่อ p = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม

L = ระยะความยาวของเสาเข็ม

I_{ws} = influence factor

Q_{ws}/pL คือค่าเฉลี่ยของ f ตลอด pile shaft

ค่า influence factor, I_{ws} , มีสมการ simple empirical (Vesic, 1977) ดังนี้

$$I_{ws} = 2 + 0.35 (LD)^{1/2}$$

(Vesic, 1977) ได้เสนอสมการ simple empirical เพื่อหาค่า $s_{e(3)}$ ดังนี้

$$s_{e(3)} = \frac{Q_{ws} C_s}{Lq_p}$$

ในสมการนี้ $C_s = \text{an empirical constant} = (0.93 + 0.16 (LD)^{1/2}) C_p$

10.1.16 Pile – Driving Formulas

ในการประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวทางพลศาสตร์ได้พิจารณาข้อมูลจากการตอกเสาเข็มที่บริเวณโครงการ โดยใช้สมการทางพลศาสตร์ ซึ่งมีหลายสมการด้วยกันมาวิเคราะห์ ข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย

- ข้อมูลปัจจุบันจากการตอกเสาเข็ม (Pile Driving) ซึ่งมีลักษณะหรือรูปแบบของ Hammer ที่ใช้ว่า อาจจะเป็น Single Acting หรือ Double Acting, น้ำหนักของเสาเข็ม และจำนวนครั้ง (Blow Count) จากการตอกเสาเข็มในช่วงสุดท้าย รวมทั้งระยะการจมของเสาเข็มโดยเฉลี่ยต่อจำนวนครั้ง
- ข้อมูลเก่าที่เคยบันทึกไว้เกี่ยวกับเสาเข็ม
- ข้อมูลและการทดสอบ Load – Test ของเสาเข็ม

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสามารถหรือกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวทางพลศาสตร์มีหลายสมการด้วยกัน ได้แก่

สมการจาก *Engineering News (EN) Record Formula* โดยค่าน้ำหนักบรรทุกปลาย (ultimate load) Q_u จะได้จาก

$$Q_u = \frac{W_R h}{S + C}$$

เมื่อ W_R = น้ำหนักของตุ้มน้ำหนัก (weight of the ram)

h = ระยะความสูงของการปล่อยตุ้มน้ำหนัก (height of fall of the ram)

S = ระยะจมของเสาเข็มโดยเฉลี่ยต่อจำนวนครั้งของการตอกเสาเข็มในช่วงสุดท้าย

C = ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

ค่า C แนะนำให้ใช้ค่าดังนี้

สำหรับการตอกเสาเข็มโดยลูกตุ้ม (For drop hammers)

$$C = \begin{cases} 25.4 \text{ ม.ม.} & \text{ถ้า } S \text{ และ } h \text{ มีหน่วยเป็น ม.ม.} \\ 1 \text{ นิ้ว} & \text{ถ้า } S \text{ และ } h \text{ มีหน่วยเป็น นิ้ว} \end{cases}$$

สำหรับการตอกเสาเข็มโดยลูกตุ้มไอน้ำ (For steam hammers)

$$C = \begin{cases} 2.54 \text{ ม.ม. ถ้า } S \text{ และ } h \text{ มีหน่วยเป็น ม.ม.} \\ 0.1 \text{ นิ้ว ถ้า } S \text{ และ } h \text{ มีหน่วยเป็น ม.ม.} \end{cases}$$

โดยค่าความปลอดภัยที่แนะนำให้ใช้สำหรับการประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็มจะมีค่าเท่ากับ 6 (factor of safety FS = 6) สำหรับ single และ double acting hammers ในเทอมของ $W_R h$ สามารถแทนที่ได้โดยใช้ EH_E ซึ่งค่า E คือ ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม (efficiency of the hammer) และ H_E คืออัตราพลังงานของลูกตุ้ม (rated energy of the hammer) ดังนั้น

$$Q_v = \frac{EH_E}{S + C}$$

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา นั้น EN formula ได้รับการแก้ไขปรับปรุงในหลายๆครั้งด้วยกัน ดังนั้นจึงมี pile – driving formula ที่ได้รับการแนะนำให้ใช้อยู่หลายๆสูตรด้วยกัน ดังที่แสดงในตาราง 10.1.9

ตารางที่ 10.1.9 Pile driving formulas

Name	Formula												
Modified EN formula	$Q_u = \frac{EW_R h}{S + C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$ <p>where E = efficiency of hammer $C = 2.54$ mm if the units of S and h are in mm $C = 0.1$ in. if the units of S and h are in in. W_p = weight of the pile n = coefficient of restitution between the ram and the pile cap</p>												
	<p>Typical values for E</p> <table border="0"> <tr> <td>Single- and double-acting hammers</td> <td>0.7–0.85</td> </tr> <tr> <td>Diesel hammers</td> <td>0.8–0.9</td> </tr> <tr> <td>Drop hammers</td> <td>0.7–0.9</td> </tr> </table> <p>Typical values for n</p> <table border="0"> <tr> <td>Cast-iron hammer and concrete piles (without cap)</td> <td>0.4–0.5</td> </tr> <tr> <td>Wood cushion on steel piles</td> <td>0.3–0.4</td> </tr> <tr> <td>Wooden piles</td> <td>0.25–0.3</td> </tr> </table>	Single- and double-acting hammers	0.7–0.85	Diesel hammers	0.8–0.9	Drop hammers	0.7–0.9	Cast-iron hammer and concrete piles (without cap)	0.4–0.5	Wood cushion on steel piles	0.3–0.4	Wooden piles	0.25–0.3
Single- and double-acting hammers	0.7–0.85												
Diesel hammers	0.8–0.9												
Drop hammers	0.7–0.9												
Cast-iron hammer and concrete piles (without cap)	0.4–0.5												
Wood cushion on steel piles	0.3–0.4												
Wooden piles	0.25–0.3												
Michigan State Highway Commission formula (1965)	$Q_u = \frac{1.25EH_E}{S + C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$ <p>where H_E = manufacturer's maximum rated hammer energy (lb-in.) E = efficiency of hammer $C = 0.1$ in. A factor of safety of 6 is recommended.</p>												
Danish formula (Olson and Flaate, 1967)	$Q_u = \frac{EH_E}{S + \sqrt{\frac{EH_E L}{2A_p E_p}}}$												

ตารางที่ 10.1.9 (Continued)

Name

Formula

where E = efficiency of hammer
 H_E = rated hammer energy
 E_p = modulus of elasticity of the pile material
 L = length of the pile
 A_p = cross-sectional area of the pile

Pacific Coast Uniform Building Code formula (International Conference of Building Officials, 1982)

$$Q_u = \frac{(EH_E) \left(\frac{W_R + nW_p}{W_R + W_p} \right)}{S + \frac{Q_u L}{AE_p}}$$

The value of n should be 0.25 for steel piles and 0.1 for all other piles. A factor of safety of 4 is generally recommended.

Janbu's formula (Janbu, 1953)

$$Q_u = \frac{EH_E}{K'_u S}$$

$$\text{where } K'_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda'}{C_d}} \right)$$

$$C_d = 0.75 + 0.14 \left(\frac{W_p}{W_R} \right)$$

$$\lambda' = \left(\frac{EH_E L}{A_p E_p S^2} \right)$$

Gates's formula (Gates, 1957)

$$Q_u = a \sqrt{EH_E} (b - \log S)$$

If Q_u is in kips, then S is in in., $a = 27$, $b = 1$, and H_E is in kip-ft.

If Q_u is in kN, then S is in mm, $a = 104.5$, $b = 2.4$, and H_E is in kN-m.

$E = 0.75$ for drop hammer; $E = 0.85$ for all other hammers

Use a factor of safety of 3.

Navy-McKay formula

$$Q_u = \frac{EH_E}{S \left(1 + 0.3 \frac{W_p}{W_R} \right)}$$

Use a factor of safety of 6.

10.1.17 Stress on Piles During Driving

ความเค้นสูงสุดจะปรากฏเสาเข็มบนเสาเข็มในระหว่างการตอก ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จาก pile – driving formulas ที่ปรากฏใน ตารางที่ 10.1.9 ในตัวอย่างนี้เราใช้ modified EN formula :

$$Q_u = \frac{EW_R h}{S + C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$$

ในสมการที่จะแสดงต่อไปนี้ ค่า S คือ average penetration per hammer blow

$$S = 1/N$$

Where S is in inches

N = number of hammer blows per inch of penetration

ดังนั้น

$$Q_u = \frac{EW_R h}{(1/N) + 0.1} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$$

อาจจะสมมติค่า N ได้ต่างกันสำหรับ hammer และ pile ส่วน Q_u / A_p สามารถทำการคำนวณได้โดยใช้ค่า N ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ set of numerical values ตัวอย่างเช่น prestressed concrete pile ยาว 80 ฟุต ใช้ลูกตุ้มตอก โดยเสาเข็มมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 10 นิ้ว จากตารางที่ 10.1.6 สำหรับเสาเข็มต้นนี้

$$A_p = 100 \text{ in}^2$$

น้ำหนักของเสาเข็มต้นนี้ คือ

$$A_p L \gamma_c = (100 \text{ in}^2 / 144)(80 \text{ ft})(150 \text{ lb/ft}^3) = 8.33 \text{ kip}$$

และถ้าให้น้ำหนักของ cap เป็น 0.67 kip ดังนั้น

$$W_p = 8.33 + 0.67 = 9 \text{ kip}$$

สำหรับ hammer

$$\text{Rated energy} = 19.2 \text{ kip-ft} = H_E = W_R h$$

$$\text{น้ำหนักของ Ram} = 5 \text{ kip}$$

สมมติค่าประสิทธิภาพของลูกตุ้ม (hammer efficiency) คือ 0.85 และ $n = 0.35$
แทนค่าต่างๆที่ได้ลงในสมการ จะได้

$$Q_u = \left[\frac{(0.85)(19.2 \times 12)}{(1/N) + 0.1} \right] \left[\frac{5 + (0.35)2(9)}{5 + 9} \right] = \frac{85.37}{(1/N) + 0.1} \text{ kip}$$

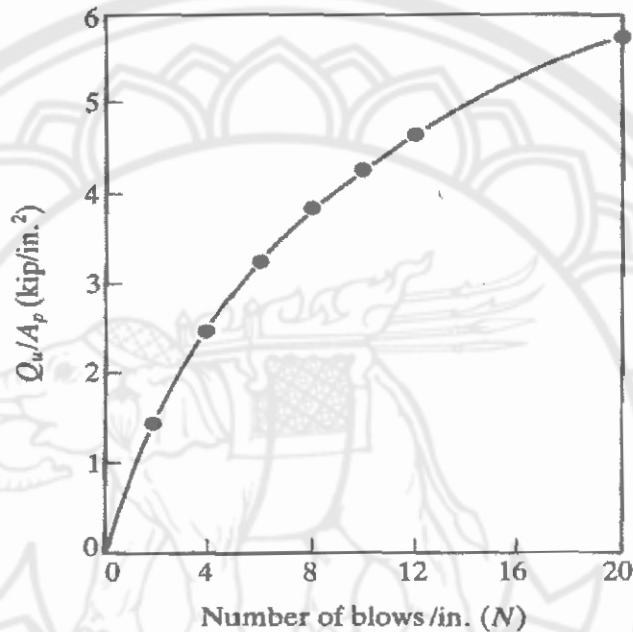
ค่าต่างๆที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

N	Q_u (kip)	A_p (in ²)	Q_u/A_p (kip/in ²)
0	0	100	0
2	142.3	100	1.42
4	243.9	100	2.44
6	320.1	100	3.20
8	379.4	100	3.79
10	426.9	100	4.27
12	465.7	100	4.66
20	569.1	100	5.69

เราสามารถนำค่า number of hammer blows per inch และค่า stress ไป plot ลงในกราฟที่แสดงในตารางที่ 10.1.21 และเมื่อได้เส้นโค้งมาแล้วนั้น ค่า number of hammer blows per inch of pile penetration จะสอดคล้องกับค่า allowable pile-driving stress

Actual driving stresses ใน wooden piles มีค่าไม่เกิน $0.7f_u$ สำหรับ concrete และ steel piles นั้น driving stresses มีค่าไม่เกิน $0.6 f_c$ และ $0.85 f_y$ ตามลำดับ

โดยส่วนใหญ่แล้ว wooden piles จะถูกตอกโดยใช้พลังงานลูกตุ้ม (hammer energy) น้อยกว่า $60 \text{ kN} - \text{m}$ ($\approx 45 \text{ kip} - \text{ft}$) และความต้านทาน (Driving resistance) จำกัดอยู่ที่ 4 – 5 ครั้งต่อนิ้วของ pile penetration สำหรับ concrete และ steel piles ใช้ค่า N เท่ากับ 6 – 8 และ 12 – 14 ตามลำดับ



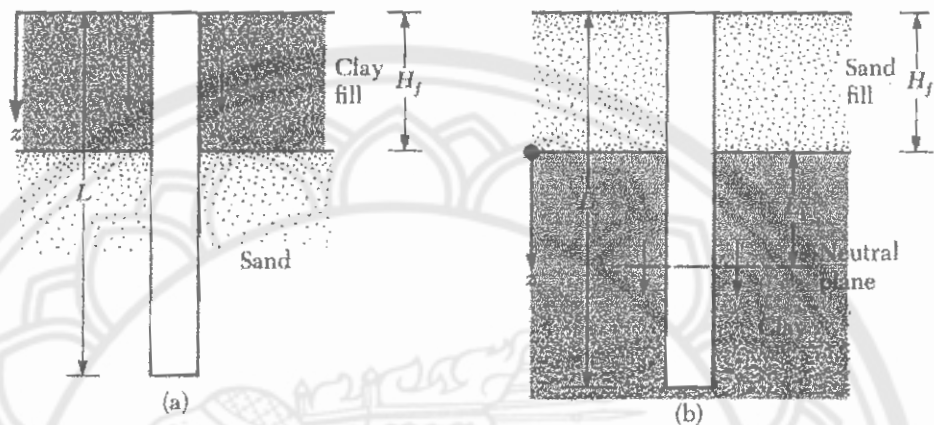
รูปที่ 10.1.20 Plot of stress vs. blows/in.

10.1.18 Negative Skin Friction

Negative skin friction คือแรงที่กระทำต่อ pile และมีทิศทางพุ่งลง ซึ่งแรงดังกล่าวเกิดจากดินที่อยู่รอบๆ pile โดยแรงที่ว่านี้จะสามารถเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. ถ้าดินถมเป็นดินเหนียวที่วางตัวอยู่เหนือชั้นดินทราย (granular soil layer) ณ ตำแหน่งที่ได้ทำการตอก pile ไว้แล้ว ดินถมจะค่อยๆ เกิด consolidate ซึ่งกระบวนการ consolidation จะออกแรงกระทำกับ pile โดยแรงนั้นมีทิศทางพุ่งลงเสมือนว่ากำลังลาก pile ให้จมลงไป (ดูรูปที่ 10.1.21a) ซึ่งปรากฏดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระยะเวลาของกระบวนการ consolidation

2. ถ้าดินถมเป็นดินทรายที่วางตัวอยู่เหนือชั้นดินเหนียว (soft clay) ดังแสดงในรูปที่ 10.1.21b นั้นจะทำให้เกิดกระบวนการ consolidation ในชั้นดินเหนียวและจะเกิดแรงลากกระทำต่อ pile มีทิศทางพุ่งลง



รูปที่ 10.1.21 Negative skin friction

3. การลดลงของระดับน้ำใต้ดินก็เป็นตัวการที่เพิ่มค่า vertical effective stress ในดิน ถัดมาแห่งความลึกใดๆ ซึ่งจะส่งผลต่อ consolidation settlement ในชั้นดินเหนียว และถ้า pile ตั้งอยู่ในชั้นดินเหนียวก็จะถูก downward drag force มากกระทำ

ในบางกรณีจะเกิด downward drag force ที่มากเกินไปและเป็นสาเหตุให้ฐานรากเกิดการวิบัติได้ ซึ่งในส่วนนี้จะสรุปวิธีการคำนวณสำหรับหาค่า Negative skin friction ไว้ 2 วิธี คือ

Clay Fill over Granular Soil (รูปที่ 10.1.21a)

วิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับวิธี β ซึ่งแสดงใน section 10.1.11 โดย Negative (downward) skin friction ที่กระทำบน pile คือ

$$f_n = K' \sigma_o \tan \delta$$

where $K' = \text{earth pressure coefficient} = K_o = 1 - \sin \phi'$

$\sigma_o = \text{vertical effective stress at any depth } z = \gamma_f z$

$\gamma_f = \text{effective unit weight of fill}$

$$\delta = \text{soil - pile friction angle} \approx 0.5 - 0.7 \phi'$$

ดังนั้น total downward บน pile คือ

$$Q_n = \int_0^{H_f} (pK\gamma_r' \tan \delta) z dz = \frac{pK\gamma_r' H_f^2 \tan \delta}{2}$$

where H_f = height of the fill

ถ้าดินถมอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ให้ใช้ moist unit weight แทนที่ effective unit weight , γ_r

Granular Soil Fill over Clay (รูปที่ 10.1.21b)

ในกรณีนี้ ตัวที่บ่งชี้ negative skin stress บน pile จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_1$ โดยอ้างอิงจาก neutral depth (ดู Vesic ,1977 , pp.25 – 26) ซึ่ง neutral depth สามารถแสดงได้ดังนี้ (Bowles,1982)

$$L_1 = \frac{(L - H_f)}{L_1} \left[\frac{L - H_f}{2} + \frac{\gamma_r' H_f}{\gamma'} \right] - \frac{2 \gamma_r H_f}{\gamma'}$$

เมื่อ γ_r' และ γ' = หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดินถมและหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของชั้นดินเหนียวที่อยู่ข้างล่างชั้นดินถมตามลำดับ

สำหรับ end – bearing piles อาจสมมุติค่า neutral depth โดยใช้ตำแหน่ง pile tip ($L_1 = L - H_f$) เมื่อทราบค่า L_1 แล้ว จะได้ค่า downward drag force ตามวิธีการดังต่อไปนี้
ค่า unit negative skin friction ที่ตำแหน่งความลึกใดๆ จาก $z = 0$ ถึง $z = L_1$ คือ

$$f_n = K' \sigma_o \tan \delta$$

where $K' = K_o = 1 - \sin \phi'$

$$\sigma_o = \gamma_r H_f + \gamma z$$

$$\delta = 0.5 - 0.7 \phi'$$

$$\begin{aligned}
 Q_u &= \int_0^{L_1} p f_n dz = \int_0^{L_1} p K' (\gamma_f H_f + \gamma z) \tan \delta dz \\
 &= (p K' \gamma_f H_f \tan \delta) L_1 + \frac{L_1^2}{2} p K \gamma_f' \tan \delta
 \end{aligned}$$

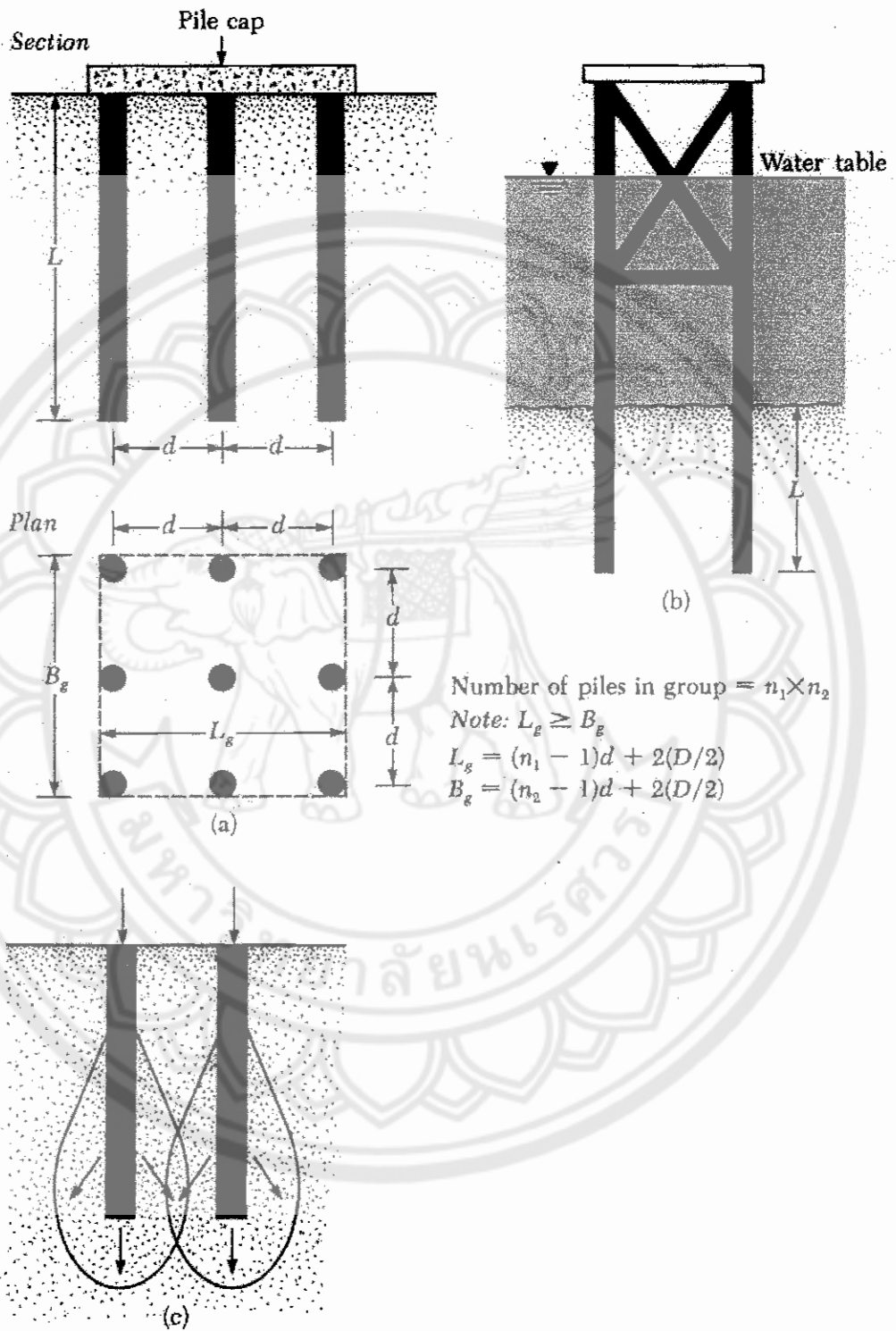
ถ้าชั้นดินเดิมและดินถมอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน effective unit weights จะถูกแทนที่โดย moist unit weights ในบางกรณีเราสามารถเคลือบ piles ด้วย bitumen ในบริเวณที่เป็น downdrag เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้

Group Piles

10.1.19 Group Efficiency

โดยทั่วไปแล้วจะนำ piles ไปใช้ในลักษณะที่เป็น group ดังแสดงในรูปที่ 10.1.22 เพื่อถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดิน ซึ่งจะมีการสร้างแท่นหัวเข็ม (pile cap) ณ ตำแหน่งที่อยู่เหนือกลุ่มเสาเข็ม (group piles) โดยแท่นหัวเข็มนั้นจะสัมผัสกับพื้นดิน ซึ่งจะเป็นกรณีที่ใช้กันโดยมาก (ดู รูปที่ 10.1.22a) หรือจะก่อสร้างแท่นหัวเข็มโดยทำในลักษณะยกสูงขึ้นเหนือพื้นขึ้นมา ซึ่งการก่อสร้างดังกล่าวจะใช้ในกรณีของ offshore platforms (ดูรูปที่ 10.1.22b)

ในการหาค่า load – bearing capacity ของ group piles เป็นเรื่องที่ยากจะยุ่งยาก และไม่มีวิธีการที่แน่นอนในการหาค่าดังกล่าว เมื่อ piles แต่ละต้นวางในตำแหน่งที่ชิดกัน สมมุติฐานที่เหมาะสมในเรื่อง stresses ที่ถ่ายจาก piles สู่ชั้นดินนั้นคือ stresses ที่ว่านั้นจะเกิดการซ้อนทับกันขึ้น (ดู รูปที่ 10.1.22c) ในทาง Idea นั้น piles แต่ละต้นที่อยู่ใน group นั้นจะมีระยะห่างระหว่างกัน ดังนั้น load – bearing capacity ของ group piles จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าผลรวมของ l bearing capacity ของ piles แต่ละต้น ในทางปฏิบัตินั้นระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง (center – to – center) ที่น้อยที่สุด จะใช้เท่ากับ 2.5D แต่โดยทั่วไปที่จะใช้จริงเท่ากับ 3 – 3.5D



รูปที่ 10.1.22 Group piles

ประสิทธิภาพของ load – bearing capacity ของ group piles สามารถนิยามโดย

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

where η = group efficiency

$Q_{g(u)}$ = ultimate load – bearing capacity of the group piles

Q_u = ultimate load – bearing capacity of the each piles without the group effect

วิศวกรโครงสร้างจำนวนมากใช้การวิเคราะห์ห้อย่างง่ายเพื่อให้ได้มาซึ่ง group efficiency สำหรับ Friction piles โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นทราย การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 10.1.22a และจะขึ้นอยู่กับระยะห่างภายใน group ซึ่ง piles จะแสดงได้ในลักษณะหนึ่งลักษณะใดจากสองรูปแบบจากนี้คือ

1.) รูปแบบ *block* ซึ่งมีขนาด $L_g \times B_g \times L$ หรือ 2.) รูปแบบ *Individual piles* ถ้า piles กระทำในลักษณะ *block* จะมี frictional capacity คือ $f_{av} p_g L \approx Q_{g(u)}$ [โดย p_g = perimeter of the cross section of block = $2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D$ และ f_{av} = average unit frictional resistance] ในทำนองเดียวกัน สำหรับ piles แต่ละต้นที่กระทำแบบ *Individually* $Q_u \approx pL f_{av}$ [โดย p = perimeter of the cross section each pile]

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} = \frac{f_{av} [2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D] L}{n_1 n_2 p L f_{av}}$$

$$= \frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{pn_1 n_2}$$

ดังนั้น

$$Q_{g(u)} = \left[\frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{pn_1 n_2} \right] \sum Q_u$$

จากสมการข้างต้น ถ้าระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง d มีความกว้างเพียงพอแล้ว $\eta > 1$ ซึ่งในกรณีนี้ piles จะมีพฤติกรรมแบบ *Individual piles* ดังนั้นในทางปฏิบัติเมื่อ $\eta < 1$ แล้ว

$$Q_{g(u)} = \eta \sum Q_u$$

และถ้า $\eta \geq 1$ จะได้

$$Q_{g(u)} = \sum Q_u$$

นอกจากนี้แล้วยังมีสมการอื่น ๆ อีกที่สามารถคำนวณ group efficiency ของ friction piles ดังแสดงในตารางที่ 10.1.10

ตารางที่ 10.1.10 Equations for Group Efficiency of Friction Piles

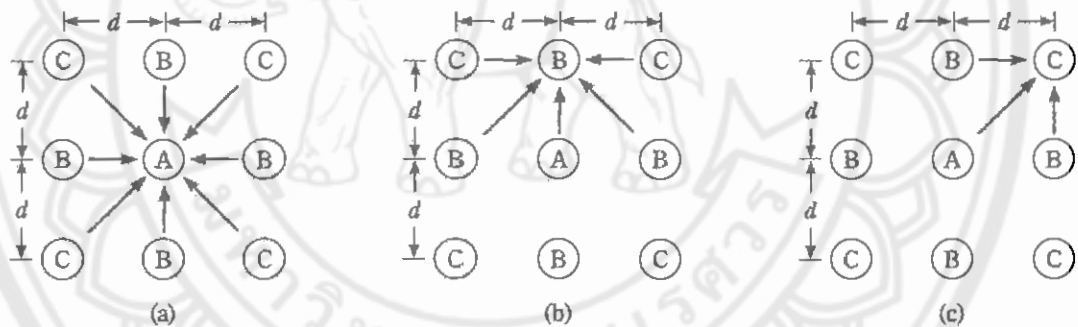
Name	Equation
Converse-Labarre equation	$\eta = 1 - \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta$ <p>where $\theta(\text{deg}) = \tan^{-1}(D/d)$</p>
Los Angeles Group Action equation	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi d n_1 n_2} [n_1(n_2 - 1) + n_2(n_1 - 1)] + \sqrt{2}(n_1 - 1)(n_2 - 1)]$
Seiler-Keeney equation (Seiler and Keeney, 1944)	$\eta = \left\{ 1 - \left[\frac{11d}{7(d^2 - 1)} \right] \left[\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0.3}{n_1 + n_2}$ <p>where d is in ft</p>

Feld(1943) ได้แนะนำวิธีการโดยใช้ load capacity ของ *Individual piles* (เมื่อพิจารณาเฉพาะ friction resistance) ใน group ที่ฝังในชั้นทราย ตามวิธีการนี้ อาศัยหลักการที่ให้ลด ultimate capacity ของ pile ที่อยู่ข้างเคียงทุกต้นด้วย $1/16$ ไม่ว่าจะเป็แนวทแยงหรือแนวตรง วิธีการนี้สามารถอธิบายได้โดยทำการตรวจสอบในรูปที่ 10.1.23 ซึ่งแสดงภาพด้านบนของ group pile สำหรับ pile ประเภท A มีอยู่ 8 ต้น ที่อยู่ติดกัน สำหรับ pile ประเภท B มีอยู่ 5 ต้น และสำหรับ pile ประเภท C มีอยู่ 3 ต้น ดังแสดงในตาราง

Pile type	No. of Piles	No. of adjacent piles/pile	Reduction factor for each pile	Ultimate capacity ^a
A	1	8	$1 - \frac{8}{16}$	$0.5Q_u$
B	4	5	$1 - \frac{5}{16}$	$2.75Q_u$
C	4	3	$1 - \frac{3}{16}$	$3.25Q_u$
				$\Sigma 6.5Q_u = Q_{g(u)}$

ดังนั้น

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\Sigma Q_u} = \frac{6.5 Q_u}{9 Q_u} = 72\%$$



รูปที่ 10.1.23 Feld's method for estimating the group capacity of friction piles

10.1.20 Ultimate Capacity of Group Piles in Saturated Clay

รูปที่ 10.1.24 แสดง group piles ในชั้นดินเหนียวอิ่มตัว ซึ่งสามารถใช้รูปนี้ทำการประมาณค่า ultimate load – bearing capacity ของ group piles ตามวิธีการดังนี้

1. หาค่า $\Sigma Q_u = n_1 n_2 (Q_p + Q_f)$ จากสมการ $Q_p = N_c \cdot c_u \cdot A_p = 9 c_u A_p$

$$Q_p = A_p [9c_{u(p)}]$$

Where $c_{u(p)}$ = undrained cohesion of the clay at the pile tip

จากสมการ

$$Q_s = \sum \alpha p c_u \Delta L$$

ดังนั้น

$$\sum Q_u = n_1 n_2 [9 A_p c_{u(p)} + \sum \alpha p c_u \Delta L]$$

2.หาค่า ultimate capacity โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่า piles ใน group แสดงลักษณะเป็นแบบ block และมีขนาด $L_g \times B_g \times L$ ซึ่งมีแรงต้านทานที่ผิวของ block คือ

$$\sum \alpha p c_u \Delta L = \sum 2 (L_g + B_g) c_g \Delta L$$

คำนวณค่า point bearing capacity :

$$A_p q_p = A_p c_{u(p)} N_c^* = (L_g B_g) c_{u(p)} N_c^*$$

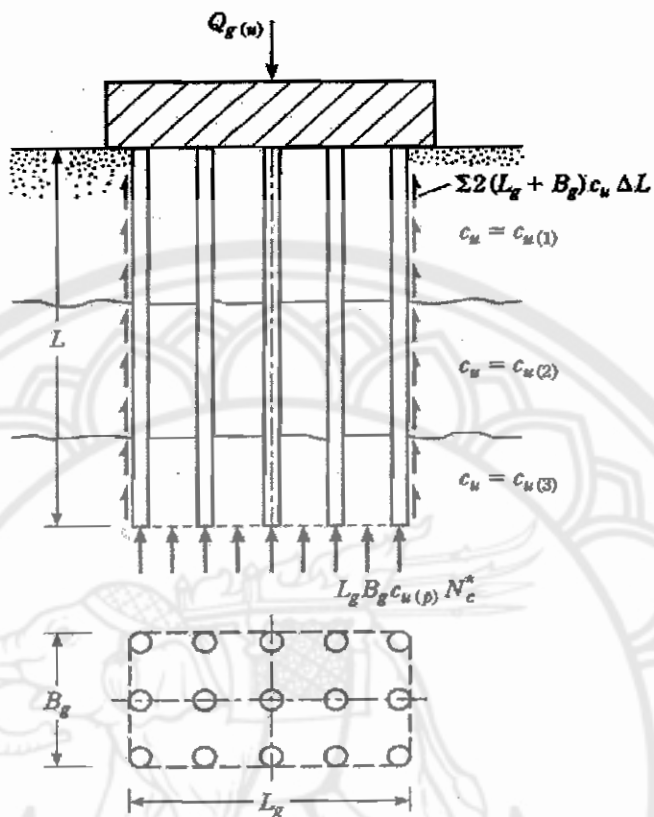
จะได้ค่าของ bearing capacity factor N_c^* ดังนั้น ultimate load คือ

$$\sum Q_u = (L_g B_g) c_{u(p)} N_c^* + \sum 2 (L_g + B_g) c_g \Delta L$$

3.เปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ โดยเลือกใช้ค่าที่น้อยกว่าเป็นค่า $Q_{g(u)}$

10.1.21 Piles in Rock

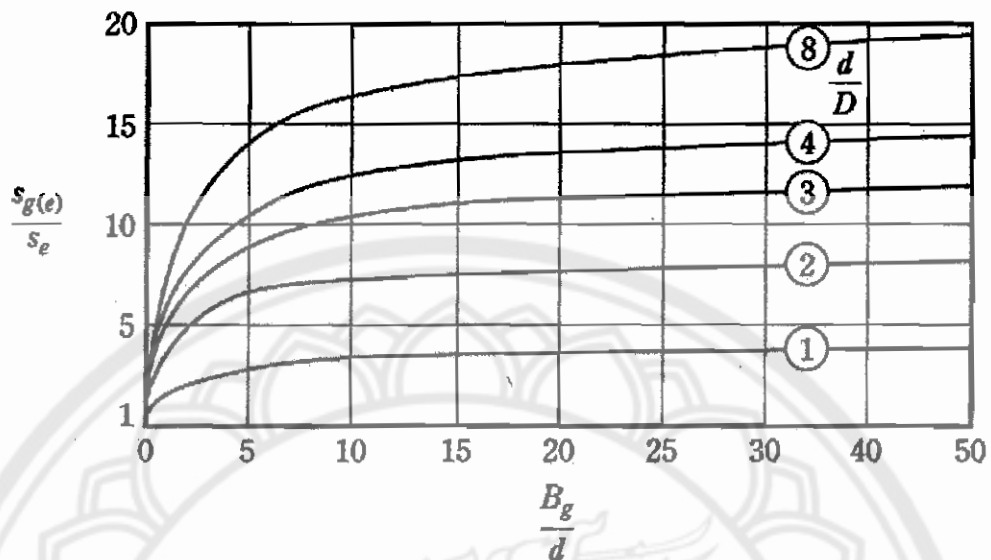
สำหรับ point bearing piles ที่วางอยู่บนชั้นหินนั้น มาตรฐานการก่อสร้างของอาคารส่วนใหญ่ระบุให้ใช้ $Q_{g(u)} = \sum Q_u$ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของ piles เป็น $D + 300$ mm และสำหรับ H – piles และ piles ที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นมีขนาดของ D เท่ากับความยาวเส้นทแยงของหน้าตัดเสาเข็ม



รูปที่ 10.1.24 Ultimate capacity of group piles in clay

10.1.22 Elastic Settlement of Group Piles

โดยทั่วไปแล้ว การทรุดตัวของ group piles ภายใต้ working load per pile จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความกว้างของ group (B_g) และเพิ่มตามระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของ piles (d) ข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 10.1.26 ได้มาจากผลการทดสอบของ Meyerhof(1961) สำหรับ group piles ในชั้นทราย สำหรับในรูปนี้ $s_{g(e)}$ คือ ค่าการทรุดตัวของ group piles และ s_o คือค่าการทรุดตัวของ piles แต่ละต้นภายใต้ working load เดียวกัน



รูปที่ 10.1.25 Settlement of group piles in sand

มีรายงานอยู่เป็นจำนวนมากที่มีความสัมพันธ์และเกี่ยวเนื่องกับการทรุดตัวของ group piles ที่ปรากฏอยู่ตามบทความวิชาการต่างๆ โดยหนึ่งในนั้น Vesic(1969) ได้ให้ความสัมพันธ์อย่างง่ายที่สุดสำหรับการทรุดตัวของ group piles ดังนี้

$$s_{g(e)} = (B_g / D)^{1/2} s_e$$

where $s_{g(e)}$ = elastic settlement of group piles

B_g = width of group piles section

D = width of diameter of each pile in the group

s_e = elastic settlement of each pile at comparable working load

สำหรับ group piles ในชั้นทรายและกรวด Meyerhof(1976) ได้แนะนำให้ใช้ empirical relation ในการหาค่า elastic settlement ดังนี้

$$s_{g(e)(in)} = \frac{2qB_g^{1/2} l}{(N_1)_{60}}$$

where $q = Q_g / (L_g B_g)$ (in U.S. ton / ft²)

L_g and B_g = length and width of the group pile section (ft)

$(N_1)_{60}$ = average corrected standard penetration number

within seat of settlement ($\approx B_g$ deep below the tip of the piles)

I = influence factor = $1 - L/8 B_g \geq 0.5$

L = length of embedment of piles

ในหน่วย SI

$$s_{g(e)}(\text{mm}) = \frac{0.96 q B_g^{1/2} I}{(N_1)_{60}}$$

เมื่อ q มีหน่วยเป็น kN/m² และ B_g กับ L_g มีหน่วยเป็น m

$$I = 1 - \frac{L(\text{m})}{8 B_g(\text{m})}$$

ในการทำงานเดียวกัน การทรุดตัวของ pile จะสัมพันธ์กับ cone penetration resistance จากสูตร

$$s_{g(e)} = \frac{q B_g I}{2q_c}$$

where q_c = average cone penetration resistance within the seat of settlement

10.1.23 Consolidation Settlement of Group Piles

Consolidation settlement ของ group pile ในชั้นดินเหนียวสามารถทำการประมาณค่าได้โดยการใช้ 2:1 stress distribution method ซึ่งขั้นตอนการคำนวณมีดังต่อไปนี้

1. น้ำหนักบรรทุกรวมของ Q_g จะกระทำต่อ pile ภายในระยะฝัง (ระยะ L) และถ้า pile cap อยู่ต่ำกว่าชั้นผิวดินเริ่มแรก (original ground surface) แล้ว Q_g จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกรวมของโครงสร้างด้านบนที่ปราศจาก effective weight ของ soil ที่อยู่เหนือ group pile เนื่องจากถูกเคลื่อนย้ายไปโดยการชุดออก

2. สมมุติว่าน้ำหนักบรรทุก Q_g ได้ถ่ายลงสู่ชั้นดิน โดยเริ่มที่ความลึก $2L/3$ จากส่วนบนสุดของ pile ดังแสดงใน figure ซึ่งน้ำหนักบรรทุก Q_g จะกระจายออกจากระดับความลึกนี้เป็น 2 ทางในแนวตั้งและ 1 ทางในแนวราบ แนว aa' และ bb' คือ two 2:1 lines
3. คำนวณ effective stress ที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละชั้นดินโดยน้ำหนักบรรทุก Q_g ดังสูตร

$$\Delta \sigma_i' = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

where $\Delta \sigma_i'$ = increase in effective stress at the middle of layer i

L_g, B_g = length and width, respectively of the planned group piles

z_i = distance from $z = 0$ to the middle of the clay layer i

ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 10.1.27 สำหรับชั้น 2, $z_i = L_1/2$; สำหรับชั้น 3, $z_i = L_1 + L_2/2$ และสำหรับชั้น 4, $z_i = L_1 + L_2 + L_3/2$ อย่างไรก็ตามค่า stress จะไม่เพิ่มขึ้นในชั้น 1 เนื่องจากชั้นดินดังกล่าวอยู่ในแนว horizontal plane ($z = 0$)

4. คำนวณ Consolidation settlement ที่เกิดจาก increased stress ในแต่ละชั้นดินตามสูตร

$$\Delta s_{c(i)} = \left(\frac{\Delta e_{(i)}}{1 + e_{o(i)}} \right) H_i$$

where $\Delta s_{c(i)}$ = Consolidation settlement of layer i

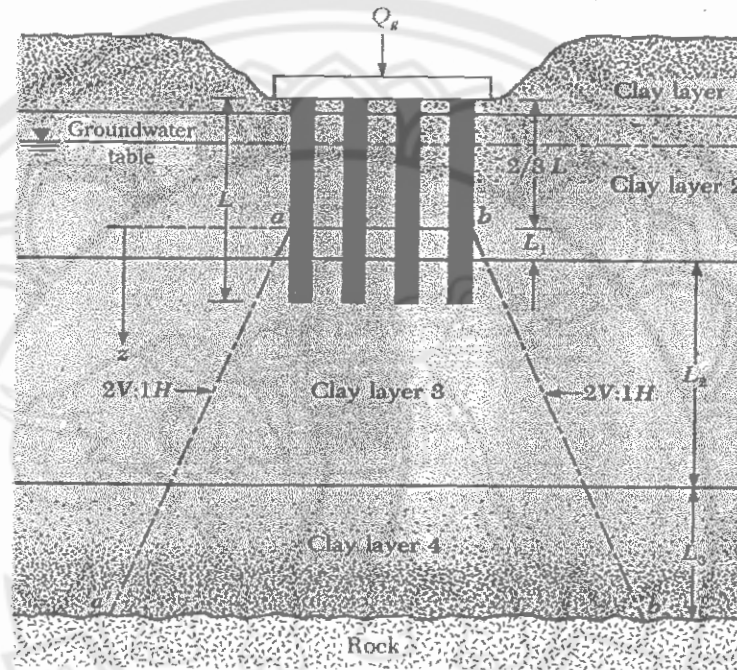
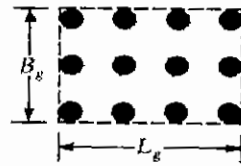
$\Delta e_{(i)}$ = change of void ratio caused by the increase in stress in layer i

e_o = initial void ratio of layer i (before construction)

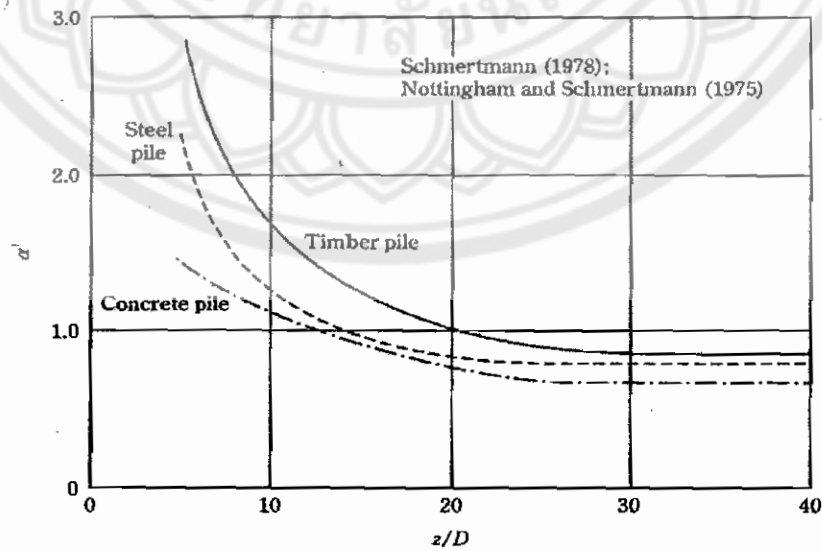
H_i = thickness of layer i

5. total consolidation settlement ของ group piles เป็นดังนี้

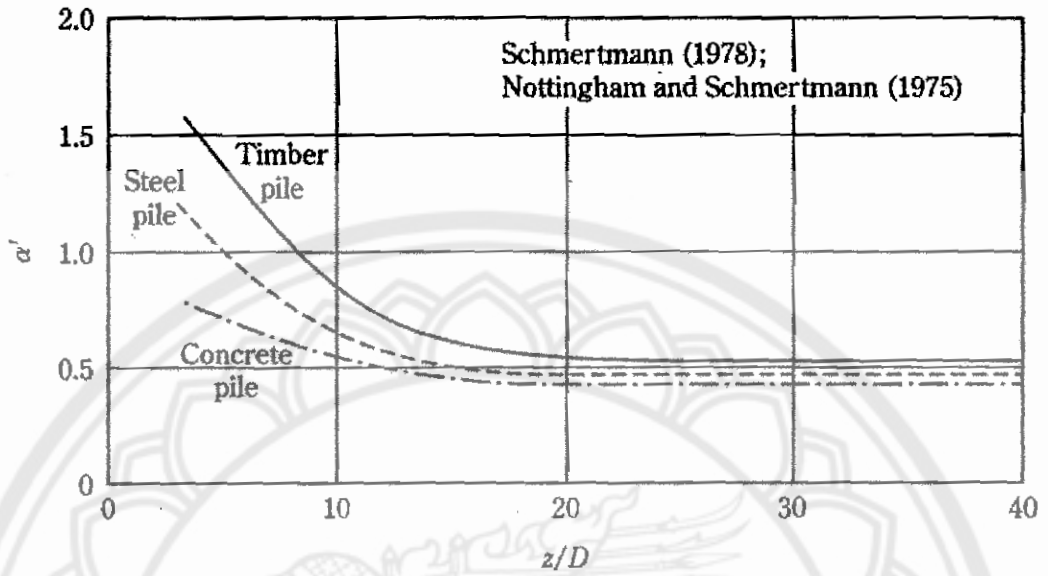
$$\Delta s_{c(g)} = \sum \Delta s_{c(i)}$$



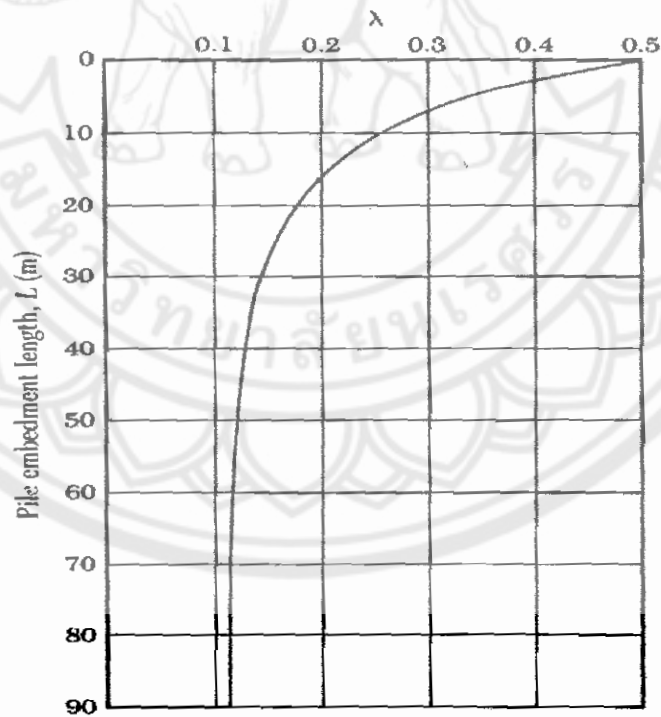
รูปที่ 10.1.26 Consolidation settlement of group piles



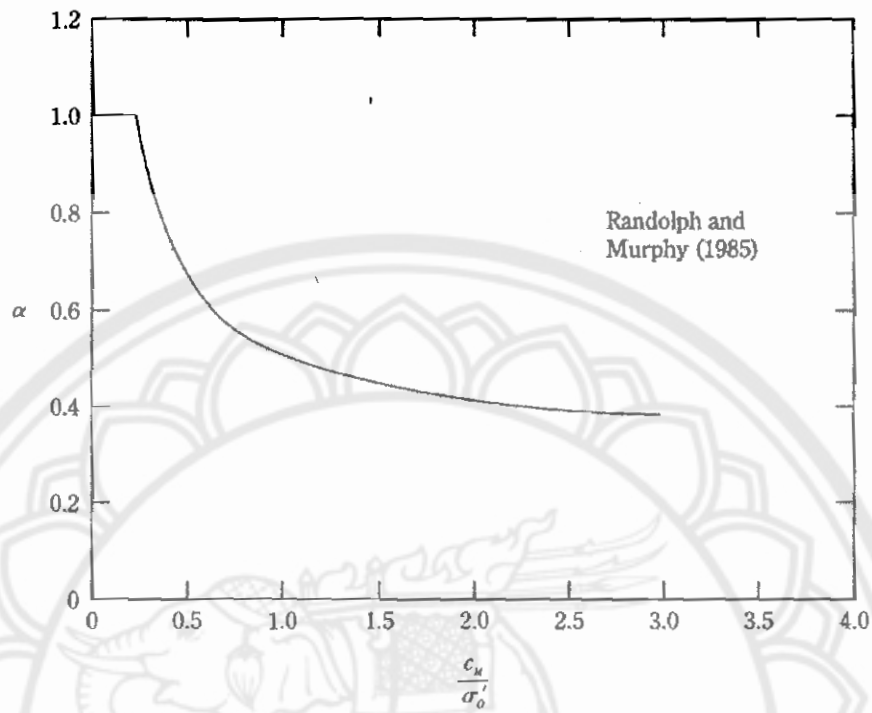
รูปที่ 10.1.27 Variation of α' with embedment ratio for pile in sand : electric cone penetrometer



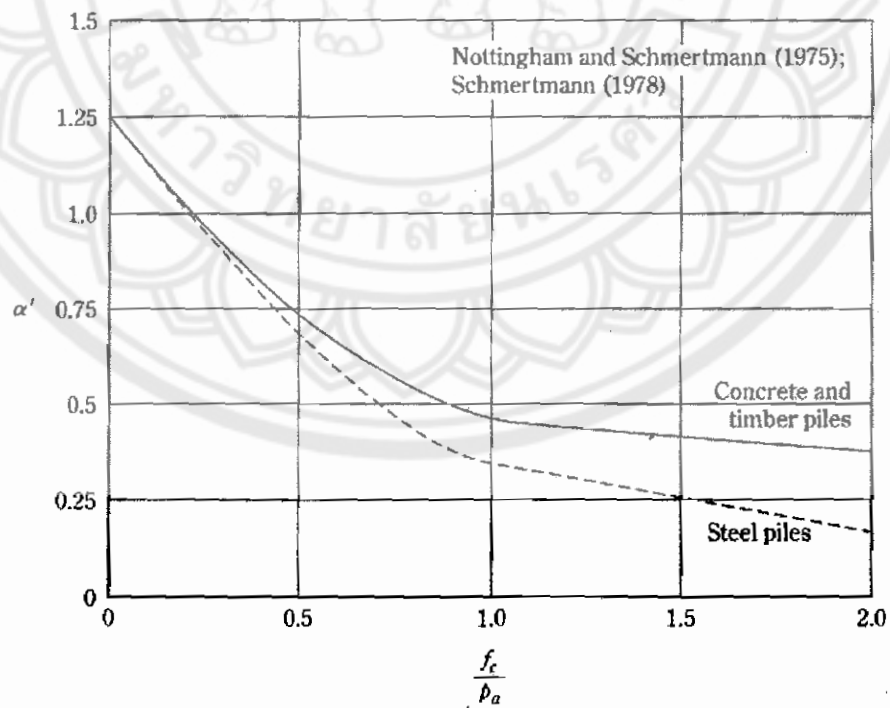
รูปที่ 10.1.28 Variation of α' with embedment ratio for pile in sand : mechanical cone penetrometer



รูปที่ 10.1.29 Variation of λ with pile embedment length



รูปที่ 10.1.30 Variation of α with c_v/σ'_0



รูปที่ 10.1.31 Variation of α' with f_c/p_a for piles in clay

10.2 โจทย์ทบทวนความรู้ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

1. Point Bearing Piles และ Friction Piles มีลักษณะเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร และเหมาะที่จะนำไปใช้งานในกรณีใด

ตอบ แตกต่างกันเนื่องจาก Point Bearing Piles เป็นเสาเข็มที่ตอกลงถึงชั้นทรายหรือชั้นดินที่แข็งแรง ซึ่งเสาเข็มจะไม่สามารถตอกจนทะลุลงไปได้ Point Bearing Piles ที่วางอยู่บนชั้นดินแข็งแรงเพียงพอที่รับน้ำหนักได้อย่างมั่นคง ช่วยลดอัตราการทรุดตัวของอาคาร เหมาะกับงานก่อสร้างที่ฐานรากต้องแบกรับน้ำหนักมาก เช่น อาคารสำนักงาน โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรมห้างสรรพสินค้า ส่วน Friction Piles เป็นเสาเข็มที่ไม่มีชั้นดินแข็งแรงรับด้านล่างปลายเสาเข็ม การรับน้ำหนักของเสาเข็มเกิดจากแรงเสียดระหว่างผิวของเสาเข็มกับดินรอบเสาเข็ม ในดินที่มีความเชื่อมแน่นสูง เช่น ดินเหนียว สามารถรับน้ำหนักได้ดี เหมาะกับงานก่อสร้างอาคารที่มีน้ำหนักไม่มาก และไม่คำนึงถึงการทรุดตัวของอาคาร เช่น การก่อสร้างบ้านขนาดเล็ก ศาลา รั้ว เป็นต้น

2. Negative Skin Friction คืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร และมีผลต่อเสาเข็มอย่างไร

ตอบ Negative Skin Friction เป็นแรงที่เสาเข็มต้องรับมากขึ้นเนื่องมาจากการทรุดตัวของดินรอบเสาเข็ม โดยจะมีผลมากต่อ Point Bearing Piles ของเสาเข็ม โดยจะทำให้ Safety Factor มีค่าลดลง การทรุดตัวของดินนี้ไม่เกิดขึ้นในทันทีทันใดแต่จะแปรผันตามเวลา (consolidation settlement) และเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การถมดิน น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ผิวดิน การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน การตอกเสาเข็มในดินอ่อน เป็นต้น แต่ที่พบกันมากและมีผลต่อเสาเข็มค่อนข้างสูงมากก็คือการถมดิน ขนาดของแรงจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับ

- ชนิดและขนาดของเสาเข็ม วิธีการตอกหรือเจาะ การเคลือบผิวเสาเข็ม
- คุณสมบัติของดิน เช่น ความแข็งแรง ความหนาแน่นชั้นดิน การยุบของดิน
- สาเหตุการทรุดตัวและปริมาณการเคลื่อนที่ของดิน
- ระยะเวลาหลังจากฝังหรือตอกเสาเข็ม

3. ในการออกแบบเสาเข็มกลุ่มควรคำนึงถึงระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นหรือไม่ เพราะเหตุใด

ตอบ การออกแบบเสาเข็มกลุ่มควรคำนึงถึงระยะห่างระหว่างเสาเข็มด้วย เพราะถ้าเสาเข็มตั้งแต่สองต้นอยู่ใกล้กันจะเกิดการซ้อนทับกันของความเค้น (Overlapping Stress) ทำให้กำลังการรับน้ำหนักลดลงได้ ดังนั้นเสาเข็มแต่ละต้นควรมีระยะห่างต่ำสุดเท่ากับ 2.5D แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้จริงเท่ากับ 3 – 3.5D



10.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้

1. เสาเข็มคอนกรีตตันหนึ่งมีความยาว 25 m และมีหน้าตัด 305 mm x 305 mm โดยเสาเข็มต้นนี้ฝังอยู่ในชั้นทราย ซึ่งชั้นทรายมีคุณสมบัติดังนี้ $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$ และ $\phi' = 35^\circ$ จงคำนวณหา

a. ultimate point load, Q_p , โดยใช้ Meyerhof's Method

b. total frictional resistance สำหรับ $K = 1.3$ และ $\delta = 0.8\phi'$

วิธีทำ a. จากสมการ

$$Q_p = A_p q' N_q^* = A_p \gamma L N_q^*$$

สำหรับค่า $\phi' = 35^\circ$ จาก รูปที่ 10.1.2 จะได้ $N_q^* \approx 130$ ดังนั้น

$$Q_p = (0.305 \times 0.305 \text{ m}^2)(25 \times 17.5)(130) = 5286 \text{ kN}$$

และจากสมการ

$$\begin{aligned} q_p &= (0.5 p_u N_q^* \tan \phi') A_p \\ &= [(0.5)(100)(130) \tan 35^\circ](0.305 \times 0.305) = 423 \text{ kN} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$Q_p = 423 \text{ kN} \#$$

b. จากสมการ

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

สมการ

$$L' \approx 15D$$

$$L' \approx 15(0.305) \approx 4.575$$

ที่ $z = 0$, $\sigma'_o = 0$, แล้ว $f = 0$ และ $z = L' = 4.575 \text{ m}$

$$\sigma'_o = \gamma L' = (17.5)(4.575) = 80.0625 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น

$$f = K \sigma'_o \tan \delta = (1.3)(80.0625) [\tan(0.8 \times 35^\circ)] = 55.34 \text{ kN/m}^2$$

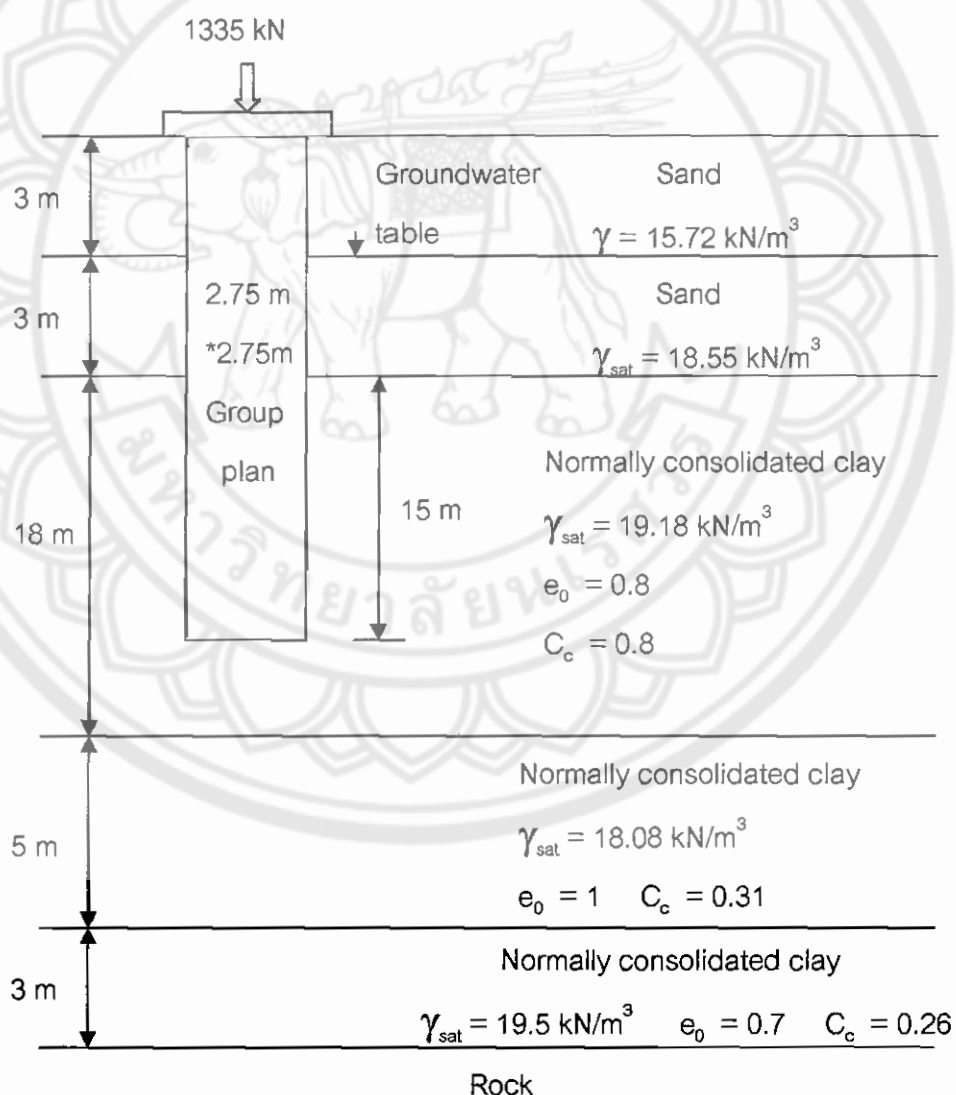
$$Q_s = \left[\frac{f_{z=0} + f_{z=4.575 \text{ m}}}{2} \right] p L' + f_{z=4.575 \text{ m}} p (L - L')$$

$$= \left[\frac{0 + 55.34}{2} \right] (4 \times 0.305)(4.757) + (55.34)(4 \times 0.305)(25 - 4.575)$$

$$= 154 + 1379 = 1533 \text{ kN} \#$$

10.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในการทำงานจริง

1. บริษัท สิงห์ซีเมนต์ จำกัด ได้รับเหมางานตอกเสาเข็มในงานก่อสร้างอาคารหอสมุดกลางแห่งใหม่ ของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ แต่เนื่องจากเสาเข็มที่ตอกนั้นเป็นเสาเข็มกลุ่มที่ตอกลงไปในพื้นที่ดินเหนียวดังแสดงในรูป 10.4.1 โดยทางวิศวกรโครงการต้องการทราบว่า จะเกิด consolidation settlement ของ pile group เป็นระยะเท่าใด ในฐานะที่ท่านเป็นวิศวกรของบริษัท สิงห์ซีเมนต์ จำกัด กรุณาหาค่า consolidation settlement ของ pile group โดยใช้ 2:1 method เพื่อประมาณค่า average effective stress ในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 10.4.1 รูปตัดด้านข้างของเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว

วิธีทำ

เนื่องจากความยาวของเสาเข็มแต่ละต้นเท่ากับ 21 เมตร ดังนั้น stress distribution จะเริ่มต้นที่ความลึก 14 เมตรจาก top of the pile และมีน้ำหนักบรรทุกกระทำเท่ากับ 1335 kN

- คำนวณ settlement ของ Clay Layer 1

สำหรับ normally consolidated clays

$$\Delta S_{c(1)} = \left[\frac{C_{c(1)} H_1}{1 + e_{o(1)}} \right] \log \left(\frac{\sigma'_{o(1)} + \Delta \sigma'_{(1)}}{\sigma'_{o(1)}} \right)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma'_{(1)} &= \frac{Q_g}{(L_g + Z_1)(B_g + Z_1)} \\ &= \frac{1335}{(2.75 + 5)(2.75 + 5)} \\ &= 22.23 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \sigma'_{o(1)} &= 3(15.72) + 3(18.55 - 9.81) + 13(19.18 - 9.81) \\ &= 195.19 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \Delta S_{c(1)} &= \frac{(0.8)(10)}{0.8} \log \left(\frac{195.19 + 22.23}{195.19} \right) \\ &= 0.468 \text{ m} = 468 \text{ mm} \end{aligned}$$

- คำนวณ settlement ของ Clay Layer 2

เช่นเดียวกับ Layer 1

$$\Delta S_{c(2)} = \left[\frac{C_{c(2)} H_2}{1 + e_{o(2)}} \right] \log \left(\frac{\sigma'_{o(2)} + \Delta \sigma'_{(2)}}{\sigma'_{o(2)}} \right)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{o(2)} &= 3(15.72) + 3(18.55 - 9.81) + 18(19.18 - 9.81) + 2.5(18.08 - 9.81) \\ &= 267.715 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned}\Delta \sigma'_{(2)} &= \frac{1335}{(2.75 + 12.5)(2.75 + 12.5)} \\ &= 5.74 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\Delta S_{c(2)} &= \frac{(0.31)(5)}{1} \log \left[\frac{262.715 + 5.74}{262.715} \right] \\ &= 0.015 \text{ m} = 15 \text{ mm}\end{aligned}$$

- คำนวณ settlement ของ Clay Layer 3

$$\begin{aligned}\sigma'_{o(2)} &= 267.715 + 2.5(18.08 - 9.81) + 1.5(19.5 - 9.81) \\ &= 272.925 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma'_{(3)} &= \frac{1335}{(2.75 + 16.5)(2.75 + 16.5)} \\ &= 3.6 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta S_{c(3)} &= \frac{(0.26)(3)}{1} \log \left[\frac{272.925 + 3.6}{272.925} \right] \\ &= 0.0063 \text{ m} = 6.3 \text{ mm}\end{aligned}$$

ดังนั้น

Total settlement มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\Delta S_{c(t)} &= \Delta S_{c(1)} + \Delta S_{c(2)} + \Delta S_{c(3)} \\ &= 468 + 15 + 6.3 \\ &= 489 \text{ mm}\end{aligned}$$