ความแม่นยำของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการคำนวณ

ทินกร ทานา และ สยาม ยิ้มศิริ *

[1] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี*
[2] *หน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี*
**Corresponding author; E-mail address: ysiam@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความแม่นยำและความแปรปรวนของการออกแบบกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธี *Meyerhof (1976)* ด้วยการเทียบสอบกับกำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์และวิธีพลศาสตร์สำหรับเสาเข็มที่มีปลายฝังในชั้นทราย โดยส่วนของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะเทียบสอบกับผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ และส่วนของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะเทียบสอบกับผลการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่ากำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์มีค่าเป็น 63% และ 68% ของกำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ แรงต้านที่ปลายเสาเข็มจากการคำนวณมีค่า 21% และ 52% ของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจริงสำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ และแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการคำนวณมีค่า 42% และ 54% ของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจริงสำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ ส่วนกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณมีค่า 34% และ 59% ของกำลังจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ ความแปรปรวนของผลการคำนวณแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะมากกว่าของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม โดยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มให้ค่า COV เท่ากับ 0.88 และ 0.74 สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ และแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มให้ค่า COV เท่ากับ 0.46 และ 0.32 สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกตามลำดับ ดังนั้นจึงเสนอค่าสัดส่วนปลอดภัยเท่ากับ 5, 1.5, และ 2.5 สำหรับแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม, แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม, และกำลังประลัยของเสาเข็ม ตามลำดับ

คำสำคัญ: กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม, การทดสอบเสาเข็ม, ด้วยวิธีสถิตศาสตร์, ความแม่นยำ, ความแปรปรวน, สัดส่วนปลอดภัย

This research evaluates accuracy and precision of pile capacity calculation by *Meyerhof (1976)* method by calibrating the predictions with results of static and dynamic pile load tests for piles with their tips embedded in sand. The skin friction predictions are calibrated with results of dynamic pile load tests. The end bearing predictions are calibrated with results of static and dynamic pile load tests. The study finds that pile capacities from dynamic pile load tests are 63% and 68% of those from static pile load tests for bored and driven piles, respectively. The calculated end bearings are 21% and 52% of actual end bearings for bored and driven piles, respectively. The calculated skin frictions are 42% and 54% of actual skin frictions for bored and driven piles, respectively. The calculated ultimate pile capacities are 34% and 59% of pile capacities from static pile load tests. It is also found that the calculated skin frictions are more precise than the calculated end bearings. The end bearings have COV of 0.88 and 0.74 for bored and driven piles, respectively. The skin frictions have COV of 0.46 and 0.32 for bored and driven piles, respectively. Finally, the proposed factors of safety are 5, 1.5, and 2.5 for end bearing, skin friction, and ultimate capacities, respectively.

Keywords: pile capacity, pile load test, accuracy, precision, factor of safety

คำนำ

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสามารถหาได้ 3 วิธี คือ (i) การคำนวณทางสถิตศาสตร์ (Static analysis) เป็นวิธีประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิเคราะห์หลักการของทฤษฎีกลศาสตร์ของดินโดยอาศัยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน, (ii) การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) อาศัยหลักการของทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงโดยใช้แรงกระแทกที่หัวเสาเข็มตามแนวแกนแล้วนำผลการตอบสนองไปวิเคราะห์, และ (iii) การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ (Static pile load test) เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดโดยให้น้ำหนักบรรทุกในสนามและหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัว

การศึกษาความแม่นยำของการออกแบบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการคำนวณ (Static Analysis) เทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์ (Static pile load test) *วรรณวรางค์ และ สยาม (2561)* ได้หาความแม่นยำของการประมาณกำลังประลัยเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธี Meyerhof (1976) โดยพบว่าให้ค่า 65% และ 77% ของกำลังประลัยของเสาเข็มจากการทดสอบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Mazurkiewicz สำหรับเสาเข็มเจาะและตอกตามลำดับ

การศึกษาความแม่นยำของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) เทียบกับวิธีสถิตศาสตร์ (Static pile load test) ได้มีผู้ทำการศึกษาโดย *พีชยา (2539)* พบว่ามีค่า 96% และ 119% ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์ (Static pile load test) สำหรับเสาเข็มตอกในกรุงเทพฯและระยองตามลำดับ

เนื่องจากกำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์ไม่สามารถแยกแรงต้านที่ปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มออกจากกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความแม่นยำและความแปรปรวนสำหรับการออกแบบกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธี *Meyerhof (1976)* ด้วยการเทียบสอบกับกำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์และวิธีพลศาสตร์สำหรับเสาเข็มที่มีปลายฝังในชั้นทราย โดยส่วนของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Q_s) จะเทียบสอบกับผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ และส่วนของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) จะเทียบสอบกับผลการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์และพลศาสตร์

วิธีการศึกษา

รูปที่ 1 แสดงแผนผังวิธีดำเนินการศึกษาความแม่นยำของกำลังเสาเข็มจากการคำนวณเทียบสอบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็ม

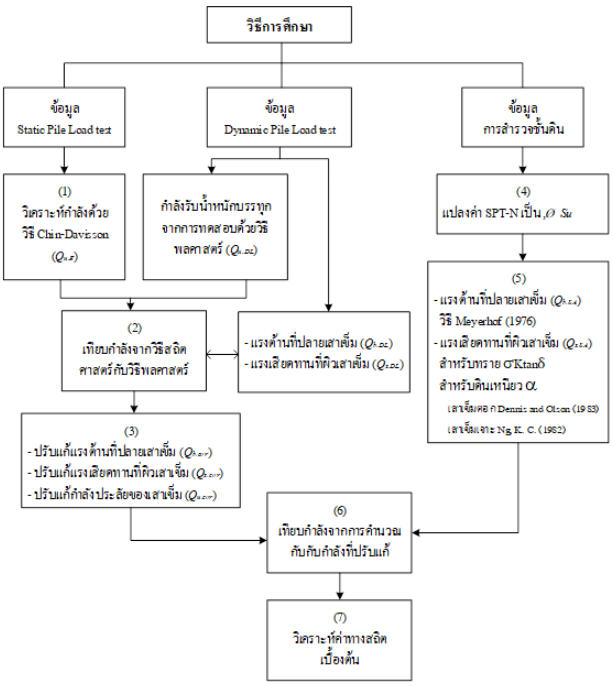
(1) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์ ($Q_{u,F}$) ใช้วิธี Chin-Davisson (*Paikowsky & Tolosko, 1999*) โดยการประมาณความสัมพันธ์แบบ Chin แกน $Y = \Delta/Q$ แกน $X = \Delta$ (การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม) ตามรูปที่ 2 โดยใช้ความสัมพันธ์ที่มีค่า R^2 มากกว่า 0.8 ประมาณกำลังและการทรุดตัวโดยสมการที่ (1)

$$\Delta = \Delta /(C_1 Q + C_2) \qquad (1)$$

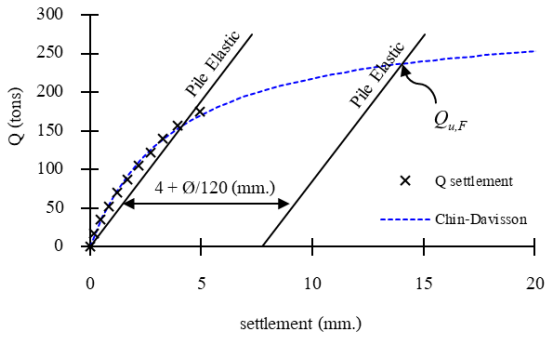
โดยที่ C_1 คือ ความชันของความสัมพันธ์ Δ/Q กับ Δ, C_2 คือ จุดตัดแกน Y

(2) เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ ($Q_{u,DL}$) กับวิธีสถิตศาสตร์ ($Q_{u,F}$)

(3) ปรับแก้กำลังของเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยให้สมมุติฐานว่ากำลังจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์มีค่าเท่ากับกำลังจากการทดสอบสถิตศาสตร์ โดย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาความแม่นยำและแปรปรวนของกำลังเสาเข็ม



รูปที่ 2 การวิเคราะห์กำลังของเสาเข็มโดยวิธี Chin-Davisson

- ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์ ($Q_{u,F}$) เป็นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็ม
- ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ ($Q_{s,DL}$) ให้สมมุติฐานเป็นค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจริง ($Q_{s,cor}$)
- ค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจริง ($Q_{b,cor}$) เท่ากับ แรงต้านที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ ($Q_{b,DL}$) รวมกับผลต่างของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์กับวิธีพลศาสตร์ ($Q_{u,F} - Q_{u,DL}$)

(4) การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยใช้ข้อมูลการสำรวจชั้นดิน โดยปรับแก้ค่า SPT-N ($N'=C_N N$) ตามความลึกสำหรับทราย โดย *Seed et al. (1975)* ตามสมการ (2) แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดย *Bowles (1997)* สำหรับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สมการที่ (3) และ *Peck, Hanson*

and Thornburn (1974) สำหรับมุมเสียดทานในทราย (Ø') สมการที่ (*4*)

$$C_N = 1 - 1.25\log(\sigma_o'/p_a) \quad (2)$$

$$S_u = ½ \times 12 \times N_{70}' \quad (3)$$

$$Ø' = 27.1 + 0.3N_{60} + 0.00054N_{60}^2 \quad (4)$$

(5) กำลังของเสาเข็มจากการคำนวณ (Static analysis)

a) กำลังประลัยของเสาเข็มตามสมการที่ (*5*)

$$Q_{u,SA} = Q_{b,SA} + Q_{s,SA} \quad (5)$$

โดยที่ $Q_{u,SA}$ คือ กำลังประลัยของเสาเข็มจากการคำนวณ, $Q_{b,SA}$ คือ แรงต้านที่ปลายเสาเข็มจากการคำนวณ, $Q_{s,SA}$ คือ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการคำนวณ

b) แรงต้านที่ปลายเสาเข็มสำหรับทราย วิธี Meyerhof (1976)

$$Q_{b,SA} = q_b \times A_b \quad (6)$$

$$q_b = \sigma_o' N_q^* \leq 0.5 N_q^* p_a \tan Ø' \quad (7)$$

โดยที่ q_b คือ หน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม, σ_o' คือ ความเค้นประสิทธิ์ประสิทธิ์ผลของดินที่ปลายเสาเข็ม, N_q^* คือ ค่าพารามิเตอร์ของวิธี *Meyerhof (1976)*, p_a คือ ความดันบรรยากาศ (100 kPa), A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

c) การวิเคราะห์แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

$$Q_{s,SA} = q_s \times A_s \quad (8)$$

โดยที่ q_s คือ หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม, A_s คือ พื้นที่ผิวรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม

- แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มสำหรับทราย

$$q_s = a\overline{\sigma_o'} K \tan \delta \quad (9)$$

โดยที่ $\overline{\sigma_o'}$ คือ ความเค้นประสิทธิ์ประสิทธิ์ผลของดินบริเวณรอบเสาเข็ม, K คือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ($K = 1 - \sin Ø'$), δ มีค่าเท่ากับ ¾$Ø'$ สำหรับเสาเข็มคอนกรีต, a มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเสาเข็มเจาะ และ 2 สำหรับเสาเข็มตอก

- แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มสำหรับดินเหนียว

$$q_s = \alpha S_u \quad (10)$$

โดยที่ S_u คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, α คือ Adhesion factor โดย *Ng, K. C. (1982)* สำหรับเสาเข็มเจาะในดินเหนียวกรุงเทพฯ และ *Dennis and Olson (1983)* สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียวระยอง

(6) เปรียบเทียบกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณเทียบกับกำลังจริงเสาเข็ม โดยเทียบแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม และกำลังประลัยของเสาเข็ม

(7) วิเคราะห์ค่าทางสถิติเบื้องต้นของกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณกับกำลังจริงของเสาเข็ม

ข้อมูลเสาเข็ม

ข้อมูลเสาเข็มที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ข้อมูลเสาเข็มที่มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีสถิตศาสตร์, ข้อมูลการสำรวจชั้นดิน, และข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยแสดงขนาดและความยาวของเสาเข็ม ตารางที่ 1 เสาเข็มเจาะปลายชั้นทรายดินกรุงเทพฯ 6 ต้น ตารางที่ 2 เสาเข็มตอกปลายชั้นทรายดินระยอง 6 ต้น

ตารางที่ 1 ข้อมูลเสาเข็มเจาะปลายชั้นทราย

No.	Case No.	จังหวัด	Dimension (m.)	ความยาว (m.)
1	B1	สมุทรปราการ	Ø 0.80	48
2	B2	กรุงเทพฯ	Ø 0.50	20
3	B3	กรุงเทพฯ	Ø 1.20	60
4	B4	กรุงเทพฯ	Ø 1.20	47
5	B5	กรุงเทพฯ	Ø 1.00	46
6	B6	สมุทรปราการ	Ø 1.00	49

ตารางที่ 2 ข้อมูลเสาเข็มตอกปลายชั้นทราย

No.	Case No.	จังหวัด	Dimension (m.)	ความยาว (m.)
7	D1	ระยอง	□ 0.40 x 0.40	20
8	D2	ระยอง	□ 0.45 x 0.45	30
9	D3	ระยอง	□ 0.40 x 0.40	20
10	D4	ระยอง	□ 0.40 x 0.40	20
11	D5	ระยอง	□ 0.35 x 0.35	21

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์กำลังของเสาเข็ม

No.	Case No.	$Q_{u,F}$ (tons)	Dynamic pile load test (tons)			Static Analysis (tons)			กำลังจริงของเสาเข็ม (tons)		
			$Q_{b,DL}$	$Q_{s,DL}$	$Q_{u,DL}$	$Q_{b,SA}$	$Q_{s,SA}$	$Q_{u,SA}$	$Q_{b,cor}$	$Q_{s,cor}$	$Q_{u,F}$
1	B1	2217	126	716	841	83	345	387	1501	716	2217
2	B2	155	37	114	151	50	73	98	41	114	155
3	B3	2836	228	1522	1750	145	1115	1187	1314	1522	2836
4	B4	3028	361	1544	1905	463	479	710	1484	1544	3028
5	B5	2108	273	1322	1595	454	365	592	786	1322	2108
6	B6	1478	259	1138	1397	254	278	405	340	1138	1478
7	D1	315	72	183	255	129	121	251	132	183	315
8	D2	608	73	249	322	34	172	205	359	249	608
9	D3	462	92	216	308	137	91	227	246	216	462
10	D4	232	77	173	250	137	107	244	59	173	232
11	D5	279	61	175	236	183	45	229	104	175	279
12	D6	237	88	129	217	296	61	357	108	129	237

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของกำลังประลัยของเสาเข็มเสาเข็มจากการคำนวณกับจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตศาสตร์

สัดส่วนปลอดภัย

การวิเคราะห์สัดส่วนปลอดภัยใช้สมมุติฐานทางสถิติโดย สมมุติการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) สัดส่วนระหว่างค่าที่คำนวณได้ต่อค่าจริง โดยให้ค่าของชุดข้อมูลที่ 99.73% ซึ่งมีขอบเขตเท่ากับค่าเฉลี่ย (Mean) $\pm$ 3S.D. เป็นขอบเขตสำหรับสัดส่วนปลอดภัย

ตารางที่ 4 แสดงค่าทางสถิติของสัดส่วนของกำลังของเสาเข็มจากการคำนวณเทียบต่อกำลังจริงของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะปลายชั้นทราย โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0.50, 0.45, และ 0.57 สำหรับแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม, แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม, และกำลังประลัยของเสาเข็มตามลำดับ โดยที่มีค่า COV เท่ากับ 0.88, 0.46, และ 0.28 ตามลำดับ ค่าสัดส่วนปลอดภัย (F.S.) ได้จาก ค่าเฉลี่ย (Mean) + 3S.D. คือ 1.83, 1.06, และ 1.06 จึงแนะนำ 2, 1.5, และ 1.5 ตามลำดับ

ตารางที่ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของเสาเข็มเจาะปลายชั้นทราย

No.	Project	Bore pile in sand		
		$Q_{b,SA}/Q_{b,cor}$	$Q_{sSA}/Q_{s,cor}$	$Q_{u,SA}/Q_{u,F}$
1	B1	0.06	0.48	0.51

6) ในการประมาณกำลังของเสาเข็มด้วยวิธี Meyerhof (1976) แนะนำค่า F.S. เท่ากับ 5, 1.5, และ 2.5 สำหรับแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม, แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม, และกำลังประลัยของเสาเข็มตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ประจำปีงบประมาณ 2560 สัญญาเลขที่ MSD60I0078 และกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการจัดตั้งหน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน ข้อมูลการวิจัยสนับสนุนโดย บริษัท เอส ที เอส อินสตรูเม้นท์ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Bowles, J. E. (1996). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.391-504.

[2] Dennis, N. D., and Olson, R. E. (1983). Axial Capacity of Steel Piles in Sand, ASCE conf. on Geotechnical Practice in Offshore Engineering, Austin, Texas.

[3] Meyerhof, G. G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. GT3, pp. 197–228.

[4] Ng, K. C., (1982). The construction problems and performance of large bored pile in 2nd sand layer. *Asian Institute of Technology*, Thailand, No. GT 82-26

[5] Samuel G. Paikowsky and Terry A. Tolosko. (1999). Extrapolation of Pile Capacity from Non-Failed Load test *U.S. Department of Transportation*: FHWA-RD-99-170

[6] Seed, H. B., Arango, I., and Chan, C. K. (1975). Evaluation of Soil Liquefaction Potential during Earthquakes, Report No. EERC 75-28, *Earthquake Engineering Research Center, University of California*, Berkeley.

[7] พีชยา ทวีเลิศ (2539). การประเมิณการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ในชั้นดดินกรุงเทพฯ และระยอง. *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[8] วรรณวรางค์ รัตนานิคม และ สยาม ยิ้มศิริ (2561). การประเมินความแม่นยำ8ของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยวิธีสถิตยศาสตร์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23*, นครนายก, 18-20 กรกฎาคม 2561