

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก : กรณีศึกษาที่อำเภอพลและหนองวัวซอ

The Estimation of Driven Pile Bearing Capacity : Case Study of Pol and Nongwuaso Districts

วัชรินทร์ กาสลัก และ ชินะวัฒน์ มุกตพันธ์

Watcharin Gasaluck and Chinawat Muktabhant

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

0-4320-2086-7 ต่อ 111 แฟกซ์ ต่อ 102 E-mail watgas@kku.ac.th

บทคัดย่อ

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นมีวิธีต่างๆ อยู่มากมายซึ่งให้ผลที่แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีประมาณกำลัง รวมไปถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประสบการณ์ หรือกล่าวได้อีกอย่างว่า อาศัยข้อมูลจากโครงการที่เคยปฏิบัติมา บทความนี้เป็นการนำเอาข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน ของอำเภอพล จังหวัดขอนแก่น และ อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี มาประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีของ Decourt และของ Ezeldin การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากสมการการตอกเสาเข็มของ Engineering News Formula และ Hiley Formula มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ พบว่าสามารถใช้วิธีของ Decourt และ Ezeldin ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้โดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยเป็น 3.0 และ 3.5 ตามลำดับ สำหรับ Engineering News Formula และ Hiley Formula นั้น ควรใช้อัตราส่วนปลอดภัยเป็น 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ

Abstract

The estimation of pile capacity could be done by several methods. The selection of suitable method and safety factor is done by means of experience, in the other words, by the data taken from the accomplished projects. In this paper pile capacities were estimated from soil boring data taken from Pol and Nongwuaso districts by Decourt method and Ezeldin method, and then compared with dynamic pile load test results. The safety factors of 3.0 and 3.5 are recommended for Decourt and Ezeldin methods respectively. The pile capacity estimated by Engineering News Formula and Hiley Formula were compared with dynamic pile load test results as well. The safety factors of 4.0 and 5.0 are recommended for Engineering News Formula and Hiley Formula respectively.

1. คำนำ

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้น มีวิธีออกแบบหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมักให้ค่ากำลังของเสาเข็มแตกต่างกัน ทำ

ให้ผู้ออกแบบเกิดความไม่มั่นใจว่าวิธีใดน่าเชื่อถือกว่ากัน นอกจากนี้วิธีการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีการแนะนำไว้ในหนังสือหรือบทความต่างๆ นั้น ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดิน ความแม่นยำในการประมาณกำลังขึ้นอยู่กับการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกด้วย ความไม่มั่นใจในวิธีการและการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์อาจนำไปสู่การออกแบบผิดพลาด หรือใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยสูงจนกลายเป็นความไม่ประหยัด

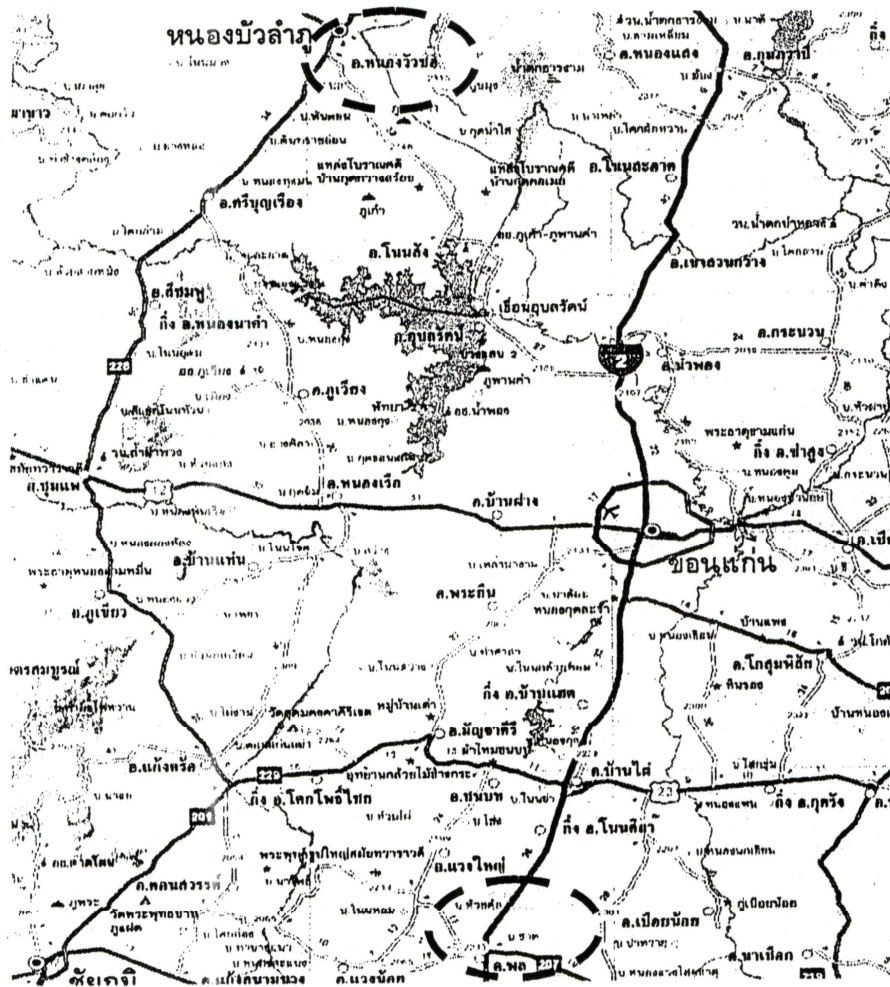
การออกแบบฐานรากเสาเข็มที่แม่นยำนั้น ต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบ นั่นคือหลังจากการออกแบบและตอกเสาเข็มแล้ว ต้องมีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่แท้จริงเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วมักไม่สามารถกระทำเช่นนั้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้น มักไม่เน้นให้ทดสอบจนถึงจุดวิบัติ แต่จะทดสอบที่ 2 ถึง 3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะไม่วิตินอกจากนี้ ในการทดสอบเสาเข็มโดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในต่างจังหวัดนั้น จะเน้นการทดสอบเพื่อทราบว่าผ่านหรือไม่ผ่านเท่านั้น ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือเพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็ม ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าที่ออกแบบไว้นั้นใกล้เคียงความจริงเพียงใด

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีดินหลายชนิด การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในดินบางชนิด โดยเฉพาะดินลมหอบนั้นมีการศึกษาไว้บ้าง [1-2] แต่ดินชนิดอื่นนั้นยังไม่มีการศึกษาและเผยแพร่

งานวิจัยที่เสนอในบทความนี้ เป็นการศึกษาเปรียบเทียบ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ประมาณจากผลการเจาะสำรวจในพื้นที่โครงการก่อสร้าง 2 แห่งๆ ละ 2 จุด โดยวิธีต่างๆ กับผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ผลการศึกษานี้ น่าจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรที่ทำงานด้านฐานรากต่อไป

2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่โครงการที่ทำการศึกษาคืออำเภอพล จังหวัดขอนแก่น และอำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี ดังแสดงในรูปที่ 1 พื้นที่ 2 แห่งนี้อยู่ห่างกันประมาณ 150 กิโลเมตร แต่มีลักษณะชั้นดินคล้ายกันดังสรุปไว้ในตารางที่ 1 ถึง 4



รูปที่ 1 ที่ตั้งของโครงการที่ศึกษา

ตารางที่ 1 ลักษณะชั้นดินของจุดสำรวจที่ 1 ของอำเภอลพ จังหวัดขอนแก่น

ความลึก, ม.	ลักษณะดิน	SPT-N	N ₆₀	Natural Water Content, %	γ_{dry} กรัม/ลบ.ซม.	Unconfined Comp. Test		Pocket Penetrometer, กก./ตร.ซม.
						q _u , กก./ตร.ซม.	E, %	
0.0								
1.0	ดินถม	20	13	17.2				
2.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาล, CL	4	2	19.0	1.80	2.18	16.06	0.75
3.0		14	9	26.3	1.68	2.64	29.41	1.75
4.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลอ่อน, CL	6	4	20.7	1.70	1.36	18.06	1.00
5.0		17	12	18.7	1.74	2.49	16.50	1.50
6.0		58	41	13.9				
7.5		21	17	16.7	1.67	4.67	7.10	4.00
9.0	ดินเหนียวสีน้ำตาล, CL	37	29	15.4	1.69	6.85	5.94	>4.5
10.5		37	31	16.1	1.70	7.53	3.17	>4.5
12.0		36	30	13.6	1.74	6.10	3.85	>4.5
13.5		50	42	17.3				
15.0		35	29	16.5	1.74	3.99	7.17	3.75

ตารางที่ 2 ลักษณะชั้นดินของจุดสำรวจที่ 2 ของอำเภอพล จังหวัดขอนแก่น

ความลึก, ม.	ลักษณะดิน	SPT-N	N_{60}	Natural Water Content, %	γ_{dry} , กรัม/ลบ.ซม.	Unconfined Comp. Test		Pocket Penetrometer, กก./ตร.ซม.
						q_u , กก./ตร.ซม.	ϵ , %	
0.0								
1.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลอ่อน, CL	17	10	14.4				
2.0		4	2	20.1				1.50
3.0		13	8	19.6	1.67	1.96	19.15	1.50
4.0		5	3	21.4	1.70	1.69	23.10	1.00
5.0		11	8	20.2	1.80	2.26	21.37	2.50
6.0		8	6	22.1				
7.5		62	49	11.5				
9.0	ดินเหนียวสีน้ำตาล, CL	44	35	14.8	1.82			
10.5		สูงมาก		12.5				
12.0		สูงมาก		10.4				

ตารางที่ 3 ลักษณะชั้นดินของจุดสำรวจที่ 1 ของอำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี

ความลึก, ม.	ลักษณะดิน	SPT-N	N_{60}	Natural Water Content, %	γ_{dry} , กรัม/ลบ.ซม.	Unconfined Comp. Test		Pocket Penetrometer, กก./ตร.ซม.
						q_u , กก./ตร.ซม.	ϵ , %	
0.0								
1.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลอ่อน, CL	2	1	14.0				
2.0		4	2	16.8	1.81	0.53	17.87	0.25
3.0		5	3	18.2	1.81			0.25
4.5		8	6	19.0	1.84			1.50
6.0	ทรายละเอียดปนดินเหนียว สีน้ำตาล, SC	สูงมาก	50	14.3	1.91	5.42	3.27	
7.5		23	18	17.5	1.71	2.94	18.05	>4.5
9.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาล, CL	33	26	17.8	1.79	2.63	23.08	3.75
10.5		สูงมาก		14.5	1.90	4.14	5.47	
11.5		สูงมาก		11.5				

ทั้ง 4 จุดพบระดับน้ำที่ความลึกประมาณ 3 เมตรจากผิวดิน แต่ไม่น่าจะเป็นระดับน้ำใต้ดิน เพราะพบว่าดินที่อยู่ลึกลงไปมีปริมาณความชื้นต่ำ

ในการทดสอบทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) นั้น หากตัวอย่างที่ได้อยู่ในลักษณะเป็นแท่ง ได้ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความหนาแน่น ทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยอุปกรณ์ทดสอบทะลวงแบบพกพา (Pocket Penetrometer) ซึ่งค่าที่ได้เป็น

ความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) และทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่จำกัดขอบเขตในสนาม (Field Unconfined Compression Test) ซึ่งค่าที่ได้ควรจะเป็น 2 เท่าของค่าจากการทดสอบโดยอุปกรณ์ทดสอบทะลวงแบบพกพา ค่าที่ได้เหล่านี้เป็นค่าโดยประมาณ เนื่องจากได้จากตัวอย่างที่ถูกบดจน แตกถึงอย่างไรก็เป็นค่าที่ได้จากตัวอย่างจริงในสนาม ดังนั้น จะมีประโยชน์ในการใช้ตรวจสอบกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 4 ลักษณะชั้นดินของจุดสำรวจที่ 2 ของอำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี

ความลึก, ม.	ลักษณะดิน	SPT-N	N_{60}	Natural Water Content, %	γ_{dry} , กรัม/ลบ.ซม.	Unconfined Comp. Test		Pocket Penetrometer, กก./ตร.ซม.
						q_u , กก./ตร.ซม.	ϵ , %	
0.0								
1.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลอ่อน, CL	2	1	14.3				
2.0		4	2	18.2	1.78	0.65	23.44	0.25
3.0		5	3	17.6	1.81			0.75
4.5		8	6	15.7	1.82			0.75
6.0	ทรายละเอียดปนดินเหนียว สีน้ำตาล, SC	27	19	15.5	1.86	5.35	14.53	4.50
7.5		39	31	17.1	1.86	7.83	10.50	>4.5
9.0	ดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาล, CL	49	39	16.9	1.85	6.78	10.34	
10.5		สูงมาก		10.5	1.99	6.10	3.78	

3. การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

3.1 การประมาณโดยใช้ค่า SPT

Decourt [3] ได้แนะนำการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากค่า SPT โดยตรงจากสมการที่ 1 ถึง 5 ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5

$$Q_u = Q_s + Q_p \quad (1)$$

$$Q_s = PLq_s \quad (2)$$

$$q_s = \frac{\bar{N}}{3} + 1 \quad (3)$$

$$Q_p = A_p q_p \quad (4)$$

$$q_p = NK \quad (5)$$

โดย Q_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยทั้งหมดของเสาเข็ม (ตัน)

Q_s = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิว (ตัน)

Q_p = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเนื่องจากแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (ตัน)

P = เส้นรอบรูปเสาเข็ม (ม)

L = ความยาวเสาเข็ม (ม)

q_u = หน่วยแรงขีดเหนี่ยวระหว่างผิวเสาเข็มกับดิน หน่วยเป็นตัน/ตร.ม.

$\bar{N}$ = ค่าเฉลี่ยของ SPT ตลอดความยาวของเสาเข็ม โดยค่าที่เกิน 50 ให้ใช้ 50 และค่าที่ต่ำกว่า 3 ให้ใช้ 3

q_p = หน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม หน่วยเป็นตัน/ตร.ม.

N = ค่าเฉลี่ย SPT ในช่วงประมาณ 1 เมตรเหนือถึงใต้ตำแหน่งของปลายเสาเข็ม

K = ค่าคงที่ เลือกใช้ 12 ตัน/ตร.ม. สำหรับดินเหนียว

A_p = พื้นที่ปลายเสาเข็ม (ม²)

ตารางที่ 5 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มขนาด 0.3x0.3x7.5 ม. ประมาณโดยวิธีของ Decourt

พื้นที่	จุดที่	q_s , ตัน/ตร.ม.	q_p , ตัน/ตร.ม.	Q_s , ตัน	Q_p , ตัน	Q_u , ตัน
พล	1	7.3	432	65.6	38.9	104.5
	2	6.1	408	55.3	36.7	92.0
หนองวัวซอ	1	6.2	424	55.5	38.2	93.7
	2	5.8	460	41.6	41.4	83.0

3.2 การประมาณโดยใช้ค่าความแข็งแรงของดิน

Ezeldin [4] ได้ศึกษารวบรวมวิธีการออกแบบเสาเข็มในดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) ไว้ พารามิเตอร์ที่ต้องใช้คือความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u) ค่า s_u ที่มีหน่วยเป็นตัน/ตร.ม. สามารถประมาณได้จากค่า SPT ที่ปรับแก้เป็นค่า N_{60} แล้วดังนี้ [5]

$$s_u = 3N_{60}^{0.72} \quad (6)$$

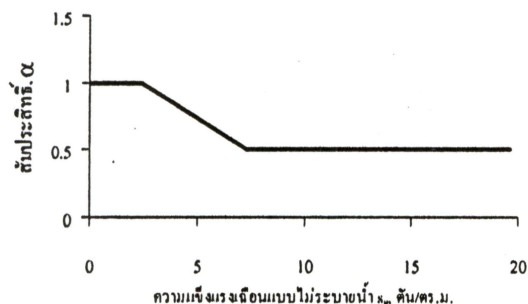
โดย N_{60} เป็นค่า SPT ที่ทำการปรับแก้ให้เทียบเท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อพลังงานจากการตอกด้วยลูกตุ้ม ถ่ายทอดไปถึงกระบอกเก็บตัวอย่างแบบผ้าซีกร้อยละ 60 ในที่นี้จะไม่มีอธิบายรายละเอียดการปรับ เพราะสามารถรายละเอียดได้จากหนังสือด้านวิศวกรรมฐานรากทั่วไป เช่น ของ Das [5] ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 1 ถึง 4 ในการคำนวณนั้น จะใช้ค่าเฉลี่ยของ SPT ในช่วงประมาณ 1 เมตรเหนือถึงได้ตำแหน่งปลายเสาเข็ม

จากนั้นใช้สมการที่ 7 และ 8 ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม [4] ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

$$q_p = \alpha s_{u(avp)} \quad (7)$$

$$q_p = 9s_u \quad (8)$$

โดย $s_{u(avp)}$ = ความแข็งแรงเฉลี่ยแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย สำหรับค่า α นั้น สามารถหาได้จาก ค่า s_u โดยใช้รูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ α ที่ใช้ในสมการที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการตอกเสาเข็ม

พื้นที่	ตอกหลังจากการ เจาะสำรวจ, เดือน	ตื้นที่	ความยาว เสาเข็ม, ม.	น้ำหนักลูกตุ้ม, ตัน	ระยะยก, ม.	ความยาวเสาเข็ม ที่จมลงในดิน, ม.	ระยะจมของการตอก 10 ครั้งสุดท้าย, ซม.
พล	4	1	7.5	4.0	0.7	6.5	3.5
		2	7.5	4.0	0.7	6.9	3.5
หนองวัวซอ	1	1	8.0	4.5	0.7	7.8	4.5
		2	8.0	4.5	0.7	7.2	3.2

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

พื้นที่	ระยะเวลาที่ดินกินตัว, วัน	ตื้นที่	น้ำหนักลูกตุ้ม, ตัน	ระยะยก, ม.	Q_u , ตัน	Q_p , ตัน	Q_{up} , ตัน
พล	14	1	4.0	0.5-0.8	52.1	26.8	79.0
	14	2	4.0	0.5-0.8	52.8	22.9	75.7
หนองวัวซอ	7	1	4.5	0.3-0.8	48.1	28.0	76.1
	7	2	4.5	0.3-0.8	51.4	31.9	83.3

ตารางที่ 6 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มขนาด 0.3x0.3x7.5 ม.

ประมาณโดยวิธีของ Elzedin

พื้นที่	จุดที่	q_u , ตัน/ตร.ม.	q_p , ตัน/ตร.ม.	Q_u , ตัน	Q_p , ตัน	Q_{up} , ตัน
พล	1	10.0	305	90.3	27.4	117.7
	2	9.1	313	82.2	28.1	110.3
หนอง	1	10.3	322	92.6	29.0	121.6
	2	8.1	310	72.5	27.9	100.4

4. ผลการตอกและทดสอบเสาเข็ม

มีการตอกเสาเข็มขนาด 0.3x0.3 เมตรในพื้นที่ศึกษาแห่งละ 2 ตัน ผลการตอกเสาเข็มแสดงในตารางที่ 7 สำหรับการทดสอบเสาเข็ม ใช้วิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ซึ่งรายละเอียดการทดสอบและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAPWAPC แสดงในตารางที่ 8

5. การเปรียบเทียบผลการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มกับผลการทดสอบ

ในการออกแบบก่อนจะตอกเสาเข็มจริงนั้น ได้มีการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยกำหนดให้เสาเข็มยาว 7.5 ม. แต่ในการตอกจริง ความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในดินจะแตกต่างกันไปบ้าง ซึ่งเป็นเรื่องปกติ เพราะสภาพดินตามธรรมชาติไม่สม่ำเสมอ และจุดที่เจาะสำรวจก็ไม่ใช่จุดที่ตอกเสาเข็ม อีกทั้งการตอกเสาเข็มก็ไม่ได้กระทำในวันเดียวกับการเจาะสำรวจสภาพดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณความชื้นในดินซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของดินก็มีการเปลี่ยนแปลง

การเปรียบเทียบผลการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มกับผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 9 ส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่นำมาเปรียบเทียบบนนั้น เป็นค่าเฉลี่ยของค่า SPT ที่แสดงในตารางที่ 5, 6 และ 8

6. การประมาณกำลังจากสมการการตอกเสาเข็ม

สมการการตอกเสาเข็มนั้น มักนำมาใช้เพื่อการควบคุมการตอกเสาเข็ม ดังนั้น เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการใช้สมการ จึงนำค่าจากการตอกเสาเข็มมาประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากการทดสอบ สมการการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากการตอกโดย Engineering News Formula และ Hiley's Formula แสดงในสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ [6-7] ผลการประมาณแสดงในตารางที่ 10 ระยะจมของเสาเข็มจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายที่นำมาใช้นั้น เป็นค่าเฉลี่ยจากการตอกเสาเข็ม 2 ดันในแต่ละพื้นที่

$$Q_u = \frac{Wh}{S+2.54K} \quad (9)$$

$$Q_u = \frac{eWhz}{S + \frac{C}{2}} \quad (10)$$

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม เป็นต้น

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็มเป็น ซม.

S = ระยะที่เสาเข็มจมเป็น ซม. โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

K = 0.9 สำหรับลูกตุ้มปล่อย (Drop Hammer)

e = Efficiency Factor = $\frac{W+Pr^2}{W+P}$

P = น้ำหนักของเสาเข็ม เป็นต้น

r = Coefficient of Restitution = 0.25 ในกรณีที่เสาเข็มคอมกรีตถูกตอกด้วยลูกตุ้มปล่อยรองด้วยกระสอบ

z = Equipment Loss Factor = 0.80 สำหรับการใช้อุปกรณ์

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกหน่วยเป็นตันของเสาเข็มจากการออกแบบกับการทดสอบ

พื้นที่	ทดสอบ			วิธีของ Decourt			Decourt กับทดสอบ, %			วิธีของ Ezeldin			Ezeldin กับทดสอบ, %		
	Q _s	Q _p	Q _u	Q _s	Q _p	Q _u	Q _s	Q _p	Q _u	Q _s	Q _p	Q _u	Q _s	Q _p	Q _u
พล	52.5	24.9	77.4	60.4	37.8	98.2	15.2	52.1	27.0	86.2	27.8	114.0	64.4	11.8	47.4
หนองวัวซอ	49.8	30.0	79.8	48.6	39.8	88.4	-2.41	32.8	10.8	82.6	28.5	111.1	66.0	-4.97	39.3

หมายเหตุ ค่าร้อยละเปรียบเทียบหมายถึง (ค่าจากการคำนวณ - ค่าจากการทดสอบ)/ค่าจากการทดสอบ

C = Temporary Compression = C₁ + C₂ + C₃

C₁ = การยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L₂ (ม.) = $\frac{1.8Q_u L_2}{A}$ ซม. ในที่นี้กระสอบหนา 0.1 ม.

C₂ = การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยาว L (ม.) = $0.72 \frac{Q_u L}{A}$ ซม.

C₃ = $3.6 \frac{Q_u}{A}$

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กเป็น ตร. ซม.

7. วิจารณ์

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า วิธีของ Decourt ให้ค่ากำลังของเสาเข็มเนื่องจากแรงเสียดทานใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบ แต่กำลังเนื่องจากแรงดันที่ปลายเสาเข็มแตกต่างกันมาก ขณะที่วิธีของ Ezeldin ให้ผลกลับกัน คือค่ากำลังของเสาเข็มเนื่องจากแรงดันที่ปลายเสาเข็มใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบ แต่กำลังเนื่องจากแรงเสียดทานแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตาม กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประมาณโดยวิธีทั้ง 2 นั้น ถึงแม้จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากการทดสอบก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาการประมาณจากผลการเจาะสำรวจทั้ง 4 จุด และการทดสอบเสาเข็มทั้ง 4 ดัน จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนนั้นเป็นไปในลักษณะเดียวกัน (Consistency) ดังนั้น จึงน่าจะปรับความคลาดเคลื่อนนั้นได้ด้วยอัตราส่วนปลอดภัย

หากให้อัตราส่วนปลอดภัยเป็น 2.5 สำหรับการนำผลการทดสอบแบบพลศาสตร์มาใช้ จะได้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานเป็นประมาณ 30 ตัน นั่นคือ ควรให้อัตราส่วนปลอดภัยเป็น 3.0 และ 3.5 สำหรับการคำนวณโดยวิธีของ Decourt และวิธีของ Ezeldin ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น สาเหตุหนึ่งมาจากสภาพของดินขณะที่เจาะสำรวจและขณะที่ทดสอบเสาเข็มแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาในรายละเอียดแล้วจะเห็นว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มซึ่งประมาณโดยทั้ง 2 วิธีสำหรับที่อำเภอพลนั้น แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าที่อำเภอหนองวัวซอ น่าจะเป็นเพราะการทดสอบเสาเข็มที่อำเภอพลกระทำห่างจากการเจาะสำรวจถึง 4 เดือน แต่ที่อำเภอหนองวัวซอกระทำห่างกันเพียง 1 เดือน ระยะเวลาที่ห่างกันมากน่าจะเป็นสาเหตุหนึ่งของความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกหน่วยเป็นต้นของเสาเข็มจากสมการการดกเสาเข็มกับการทดสอบ

พื้นที่	ทดสอบ	ระยะจมน้ำต่อการดก 1 ครั้ง, ซม.	EN	EN กับทดสอบ, %	Hiley	Hiley กับทดสอบ, %
พล	77.4	0.350	106.2	37.3	148.0	91.3
หนองวัวซอ	79.8	0.385	117.9	47.9	154.7	94.1

สำหรับการประมาณกำลังของเสาเข็มจากสมการการดกเสาเข็มนั้น ได้ค่าสูงกว่าค่าจากการทดสอบมาก หากคิดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็มเป็น 30 ตันควรใช้อัตราส่วนปลอดภัยเป็น 4.0 และ 5.0 สำหรับการประมาณโดย Engineering News Formula และ Hiley's Formula ตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตว่า Hiley's Formula ให้ค่าสูงกว่า Engineering News Formula ทั้งๆ ที่วิศวกรมักจะคุ้นเคยกับการที่ Hiley's Formula ให้ค่ากำลังของเสาเข็มต่ำกว่า หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าหากคำนวณหาระยะจมน้ำของเสาเข็มจากการดก 10 ครั้งสุดท้าย สำหรับกำลังของเสาเข็มเท่ากันแล้ว Hiley's Formula จะให้ระยะจมน้ำที่ต่ำกว่า สาเหตุที่ได้ผลดังตารางที่ 10 นั้นเนื่องจาก Engineering News Formula ไม่คำนึงถึงความยาวและน้ำหนักของเสาเข็ม ไม่ว่าเสาเข็มจะยาวเท่าใด หากระยะจมน้ำจากการดกเท่ากันแล้ว จะคำนวณได้กำลังของเสาเข็มเท่าเดิม แต่ Hiley's Formula ใช้ความยาวและน้ำหนักของเสาเข็มในการคำนวณด้วย ในการหาค่า C_u และ e ถ้าเสาเข็มยาวและหนักมากขึ้น จะได้กำลังของเสาเข็มลดลงสำหรับระยะจมน้ำเท่ากัน

8. สรุป

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกหน่วยของเสาเข็มคอกในดินเหนียวปนทรายละเอียด (CL) ของทั้งสองบริเวณ สามารถกระทำได้โดยวิธีของ Decourt และ วิธีของ Ezeldin ถึงแม้ค่าที่ประมาณได้จะแตกต่างจากผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ แต่ค่าความแตกต่างไม่แปรปรวนนัก สาเหตุของความแตกต่างนั้นนอกจากความคลาดเคลื่อนที่อาจจะอยู่ในสมการที่ใช้แล้ว น่าจะเป็นเพราะชั้นดินไม่ใช่วัสดุที่มีความสม่ำเสมอทั้งพื้นที่โครงการ จุดที่จะเจาะสำรวจกับจุดที่ดกเสาเข็มเป็นคนละจุดกัน อีกทั้งการเจาะสำรวจและดกเสาเข็มก็กระทำ ณ เวลาที่ต่างกัน สภาพดินจึงไม่เหมือนกัน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยควรเป็น 3.0 และ 3.5 สำหรับวิธีของ Decourt และ Ezeldin ตามลำดับ

สำหรับการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกหน่วยของเสาเข็มโดย Engineering News Formula และ Hiley's Formula นั้น ควรใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเป็น 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ

เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกหน่วยของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static load test) เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าต่าง ๆ ได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจและนำไปใช้งานได้กว้างขวางขึ้น จึงควรมีการทดสอบเพิ่มเติม ทั้งใน

บริเวณที่มีชั้นดินเป็นลักษณะเดียวกันในที่อื่น ๆ และวิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มวิธีอื่น เพื่อให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

ข้อมูลชั้นดิน การดกเสาเข็ม และการทดสอบเสาเข็มที่แสดงในบทความนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ เช่นการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีอื่น เป็นต้น

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนในการเก็บข้อมูลจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Gasaluck, Nov., "Pile and Plate Bearing Capacity Prediction by Means of CPT and SPT in Khon Kaen Silt", Proc. of 13th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, Taiwan, 1998.
- [2] W. Gasaluck, P. Luthisungnoen, P. Angsuwotai, C. Muktabhant and S. Mobkhuntod, "On the Design of Foundation in Collapsible Khon Kaen Loess", Proc. of An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia, November, 2000.
- [3] L. Decourt, "Prediction of the Bearing Capacity of Piles Based exclusively on N values of the SPT", Proc. of 2nd EU Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, The Netherlands, May, 1982.
- [4] A. S. Ezeldin, "Pile foundation", Practical Foundation Engineering Handbook, R. W. Brown editor in Chief, McGraw-Hill, USA, 1996.
- [5] B. M. Das, "Principles of Foundation Engineering 5th", Thomson Learning, USA, 2004.
- [6] วิชาญ ภูพัฒน์, ศรีสุข จันทรงสุ, วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจางง, เรื่องวิทยะโชติวิทยานิพนธ์, ธิดิ ปวีณนา และสุกิจ รุ่งรัตนนากร, "น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม", รายงานวิจัยฉบับที่ วว.30, กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง, เมษายน 2521.
- [7] สุเทพย์ ชลนันทน์, บัญชา พุฒระภูถ, นพพล วิญญานันต์, ณัฐสม สงวนวงศ์ และกิตติ ขันการนาวิ, "การวิจัยเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มชนิดคอกในสนามจาก Hiley's Formula", รายงานวิจัยฉบับที่ วว.218, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, มกราคม 2548.