การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทดสอบกับสูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทราย

COMPARISON OF DRIVEN PILE CAPACITIES BETWEEN PILE LOAD TESTING RESULTS AND DYNAMIC FORMULA METHOD FOR DRIVEN PILE IN SAND LAYER.

วัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์[1,*] ปิญชาน์ ต่อกิตติกุล[1] และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์[1]
[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จ.ลำปาง
*Corresponding author address: mr.watthana@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นทรายด้วยวิธีพลศาสตร์ วิธีสถิตยศาสตร์ และวิธีการคำนวณโดยใช้สูตรการตอกเสาเข็มโดยใช้โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัลเชียงใหม่เป็นกรณีศึกษา เสาเข็มทุกต้นวางอยู่ในชั้นทรายหรือกรวดสภาพแน่นถึงแน่นมาก จากผลการศึกษาพบว่าการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 2.92 ผลการทดสอบด้วยวิธีสถิตยศาสตร์มีค่าเท่ากับ 2.88 ถึง 3.17 ส่วนสูตรการตอกเสาเข็มของ Gates, Canadian National Building Code, Hiley และ Pacific Coast Uniform Building Code (PCUBC) มีค่าเท่ากับ 1.80, 2.41, 2.73 และ 2.90 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าผลการทดสอบเสาเข็มและน้อยกว่าอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำ สำหรับสูตร Janbu และ Danish มีค่าเท่ากับ 3.79 และ 5.30 ซึ่งมากกว่าผลการทดสอบแต่อยู่ในช่วงอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำ สูตรของ Modified ENR, Eytelwein และ Navy-McKay มีค่าเท่ากับ 9.55, 12.85 และ 21.17 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าผลการทดสอบและเกินค่าอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำ การเลือกใช้อัตราส่วนปลอดภัยของสูตรการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมจะทำให้สามารถนำสูตรดังกล่าวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: *สูตรตอกเสาเข็ม, สูตรพลศาสตร์, เสาเข็มตอก, เสาเข็มดาล, ทรายแน่น*

Abstract

This paper presents the results of driven pile capacity comparison with dynamic pile load test, static pile load test, and driven pile formula by using The Central Festival Chiangmai project as a case study. All piles were installed in dense to very dense sand or gravel layer. It was found that average safety factor from dynamic pile load test was 2.92 and the safety factor from static pile load test was 2.88 to 3.17. The average safety factors of Gates, Canadian National Building Code, Hiley and Pacific Coast Uniform Building Code (PCUBC) formulas were 1.80, 2.41, 2.73 and 2.90 respectively, which lower than that of the tests and lower than recommended using. The average safety factors of Janbu and Danish formulas were 3.79 and 5.30 respectively, which higher than that of the tests but lower than the recommended using. The average safety factors from Modified ENR, Eytelwein and Navy-McKay formulas were 9.55, 12.85 and 21.17 respectively which higher than that of the tests and the recommended using. Therefore, a proper safety factor for dynamic formula calculation should be considered to ensure the effective of using.

Keywords: *blow count, dynamic formula, driven pile, end bearing pile, dense sand*

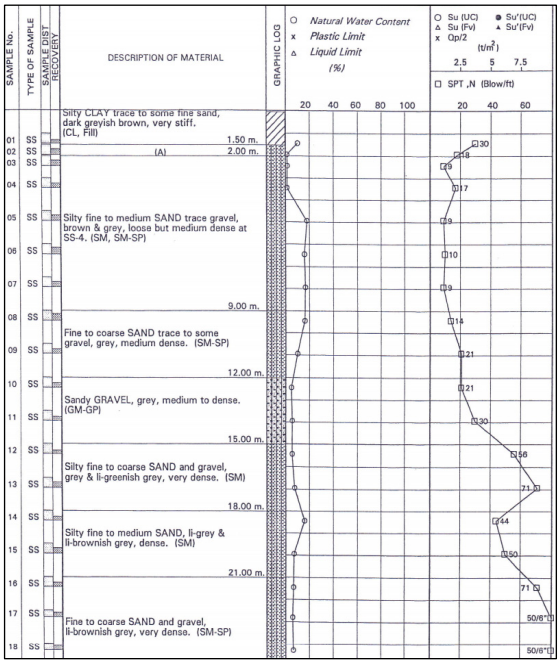
1. บทนำ

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกมีหลายวิธีคือ การใช้สูตรพลศาสตร์หรือสูตรการตอกเสาเข็ม การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ และการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีการใช้สูตรการตอกเสาเข็มมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อเป็นการควบคุมการตอกเสาเข็มที่หน้างานให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักเป็นไปตามที่กำหนดไว้ อนึ่งสูตรการตอกเสาเข็มมีความแปรปรวนมากจึงอาจมีความผิดพลาดจากการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายได้ สูตรการตอกเสาเข็มมีมากมาย เช่น Gates, Canadian National Building Code, Hiley, Pacific Coast Uniform Building Code (PCUBC), Janbu, Danish, Modified ENR, Eytelwein และ Navy-McKay เป็นต้น[10][11] ทั้งนี้ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยนิยมใช้สูตรการตอกเสาเข็มของ Hiley โดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 ถึง 3.0 อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยอยากทราบผลการเปรียบเทียบดังกล่าวเมื่อใช้สูตรการตอกเสาเข็มอื่นๆ ด้วย ดังนั้นจึงเลือกใช้โครงการก่อสร้างเซ็นทรัลเฟสติวัลเชียงใหม่เป็นกรณีศึกษาเนื่องจากเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีเสาเข็มตอกทั้งสิ้นถึงประมาณ 5,000 ต้น โดยมีการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์จำนวนถึง 24 ต้น ซึ่งทุกต้นมีผลการทดสอบการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายบันทึกไว้ ผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้คือผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้สูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มดาลในชั้นทรายโดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือต่อไปอย่างเหมาะสม

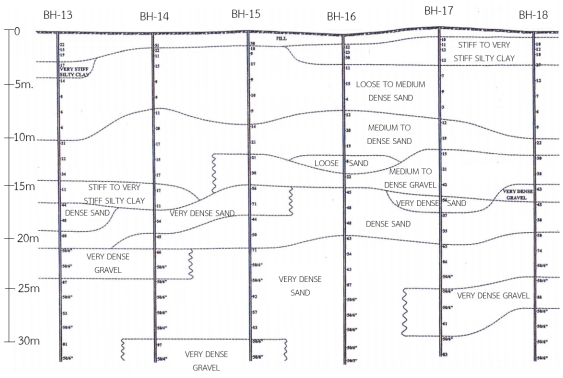
2. ลักษณะของชั้นดิน เสาเข็ม และการตอกเสาเข็มของโครงการ กรณีศึกษาเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่

โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัลเชียงใหม่ตั้งอยู่บริเวณทิศเหนือของสี่แยกศาลเด็ก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ (จุดตัดระหว่างทางหลวงหมายเลข 11 กับทางหลวงหมายเลข 118) ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือติดกับลำน้ำแม่คาวซึ่งเป็นลำนำสาขาของแม่น้ำปิง ทำการเจาะสำรวจจำนวน 30 หลุมเจาะ [7] ลักษณะของชั้นดินสรุปเป็นดังนี้คือ ชั้นบนสุดเป็นดินถมหนาประมาณ 1 ถึง 2 เมตร จากนั้นเป็นชั้นทรายปนกรวดสภาพหลวมถึงแน่นปานกลางความหนาประมาณ 5 ถึง 8 เมตร จากนั้นเป็นทรายแน่นความหนาประมาณ 3 ถึง 5 เมตร จากนั้นเป็นกรวดแน่นความหนาประมาณ 3 ถึง 5 เมตร ลึกลงไปจากนั้นจะเป็นทรายหรือกรวดสภาพแน่นมาก ตัวอย่างหลุมเจาะ BH-15 แสดงดังรูปที่ 1 และลักษณะ Soil Profile ของชั้นดิน BH-13 ถึง BH-18 แสดงดังรูปที่ 2

เสาเข็มที่ใช้ตอกในโครงการเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.35x0.35 เมตร และ 0.40x0.40 เมตร มีค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ใช้ออกแบบเท่ากับ 75 และ 90 ตัน ตามลำดับ เสาเข็มมีความยาว 14.0 ถึง 19.0 เมตร ซึ่งปลายของเสาเข็มวางอยู่ในชั้นทรายหรือกรวดสภาพแน่นถึงแน่นมาก ดังนั้นเสาเข็มทั้งหมดจึงเป็นเสาเข็มดาลที่มีกำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ปลายเสาเข็มเป็นหลัก การตอกเสาเข็มใช้ปั้นจั่น 3 ชนิด คือปั้นจั่นประกอบชนิดค้อนปล่อยกระแทก ปั้นจั่นตีนตะขาบชนิดค้อนปล่อยกระแทก และปั้นจั่นตีนตะขาบชนิดค้อนดีเซล ควบคุมการตอกโดยใช้สมการของ Hiley และใช้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 ลักษณะของเสาเข็มที่ทำการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 หลุมเจาะสำรวจ BH-15 [7]



รูปที่ 2 ลักษณะ Soil Profile ของ BH-13 ถึง BH-18 [7]

ตารางที่ 1 ลักษณะของเสาเข็มทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบ [1][3][5]

หมายเลขเสาเข็ม	ขนาดหน้าตัด (ม.xม.)	ความยาว (ม.)	น้ำหนักเสาเข็ม (ตัน)	กำลังรับน้ำหนักปลอดภัย (ตัน)
<u>ปั้นจั่นไทย</u>				
F15-P14(D-28)	0.35x0.35	19.0	5.59	75
F12-P21(D.1-27)	0.35x0.35	19.0	5.59	75
F360-P94(R-1')	0.40x0.40	15.0	5.76	90
F148c-P99(R-21)	0.40x0.40	15.0	5.76	90
<u>พิบูลย์คอนกรีต</u>				
F24-P209(J-14)	0.40x0.40	17.5	6.72	90
F116-P2851(J-25)	0.40x0.40	17.5	6.72	90
F15-P501(H.1-23)	0.35x0.35	17.5	5.15	75
F15-P3930(R-30)	0.35x0.35	15.0	4.41	75
F16-P1995(C-32)	0.35x0.35	17.5	5.15	75
<u>พี เอ คอนกรีต</u>				
F1-P1(8/A-B)	0.35x0.35	14.0	4.12	75
F14-P13(4/N)	0.35x0.35	16.0	4.70	75
F11-P3(1'-M)	0.35x0.35	15.0	4.41	75
F17a-P2(20-D.1)	0.40x0.40	14.0	5.38	90
F40-P40(6-R)	0.40x0.40	16.0	6.14	90
F17-P4(1-K)	0.35x0.35	14.0	4.12	75
F48a-P1(9-Q)	0.40x0.40	15.0	5.76	90
F16-P2(21-F.1)	0.35x0.35	16.0	4.70	75
F15-P11(17-F.1)	0.35x0.35	17.5	5.15	75
<u>Pilot Test</u>				
Pile No.14	0.35x0.35	19.0	5.59	75
Pile No.21	0.35x0.35	19.0	5.59	75
Pile No.94	0.40x0.40	15.0	5.76	90
Pile No.99	0.40x0.40	15.0	5.76	90

3. การทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายของเสาเข็มทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบ

การทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายทำเพื่อตรวจสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มให้ได้ตามที่ออกแบบไว้โดยการใช้สูตรการตอกเสาเข็มในการคำนวณ เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์หรือแบบสถิตยศาสตร์ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าไม่สามารถทำได้ทุกต้นเพราะมีราคาแพงโดยจะใช้วิธีการเลือกสุ่มทดสอบแทน ผลการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายแสดงดังตารางที่ 2 ปั้นจั่นชนิดค้อนดีเซลเลือกใช้ประสิทธิภาพ (e_h) เท่ากับ 0.85 ในขณะที่ปั้นจั่นชนิดค้อนปล่อยกระแทกเลือกใช้ประสิทธิภาพเท่ากับ 0.75 ผลที่ได้เป็นระยะทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อตอก 10 ครั้งสุดท้าย (10s) และใช้สูตรการตอกเสาเข็มคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม สำหรับโครงการกรณีศึกษานี้เลือกใช้สูตรของ Hiley และใช้อัตราส่วนภัยเท่ากับ 2.5 ในการคำนวณเพื่อควบคุมการตอกเสาเข็ม แต่สำหรับการวิเคราะห์ในนี้ใช้ผลจากระยะทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายไปคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดด้วยสูตรการตอกเสาเข็มทั้ง 9 สูตรดังที่กล่าวมาแล้วเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดดังกล่าวกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และวิธีสถิตยศาสตร์

ตารางที่ 2 ข้อมูลการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายของเสาเข็มทดสอบ [1][3][5]

หมายเลขเสาเข็ม	ชนิดของปั้นจั่น*	น้ำหนักตุ้ม (ตัน)	ระยะยกตุ้ม (ซม.)	ระยะ 10s (ซม.)
<u>ปั้นจั่นไทย</u>				
F15-P14(D-28)	ดซ.	6.11	80	2.7
F12-P21(D.1-27)	ดซ.	6.11	80	1.5
F360-P94(R-1')	ดซ.	7.94	80	1.0
F148c-P99(R-21)	ดซ.	6.39	80	2.5
<u>พิบูลย์คอนกรีต</u>				
F24-P209(J-14)	ปก.	6.36	120	3.4
F116-P2851(J-25)	ปก.	6.65	120	1.1
F15-P501(H.1-23)	ปก.	6.65	100	2.9
F15-P3930(R-30)	ปก.	5.01	140	4.6
F16-P1995(C-32)	ปก.	6.36	110	4.0
<u>พี เอ คอนกรีต</u>				
F1-P1(8/A-B)	ปก.	6.39	100	1.1
F14-P13(4/N)	ปก.	7.94	80	2.6
F11-P3(1'-M)	ปก.	4.50	180	5.3
F17a-P2(20-D.1)	ปก.	6.39	120	5.1
F40-P40(6-R)	ปก.	5.80	150	2.6
F17-P4(1-K)	ปก.	4.50	180	6.3
F48a-P1(9-Q)	ปก.	5.16	180	5.8
F16-P2(21-F.1)	ปก.	6.11	120	4.6
F15-P11(17-F.1)	ปก.	6.11	120	6.7
<u>Pilot Test</u>				
Pile No.14	ปก.	6.11	80	2.7
Pile No.21	ปก.	6.11	80	1.5
Pile No.94	ปก.	7.94	80	1.0
Pile No.99	ปก.	6.39	80	2.5

หมายเหตุ: *ดซ. คือ ปั้นจั่นชนิดค้อนดีเซล, ปก. คือ ปั้นจั่นชนิดค้อนปล่อยกระแทก

ผลการคำนวณด้วยสูตรตอกเสาเข็มแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 สำหรับเสาเข็มขนาด 0.35x0.35 และ 0.40x0.40 เมตร ตามลำดับ พบว่าทุกสูตรให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ชนิดใกล้เคียงกันยกเว้นสูตร Navy-McKay ซึ่งให้ค่าต่างกันค่อนข้างมาก สูตรของ Gates ให้ค่าต่ำสุดประมาณ 1.74 ถึง 1.84 สูตร Canadian, Hiley, PCUBC มีค่าประมาณ 2.4 ถึง 3.0 สูตร Janbu และ Danish มีค่าประมาณ 3.70 ถึง 5.28 สำหรับสูตร Modified ENR, Eytelwein และ Navy-McKay มีค่าค่อนข้างมากคือประมาณ 9.32 ถึง 24.79

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยของเสาเข็มขนาด 0.35x0.35 เมตร ด้วยสูตรการตอกเสาเข็มจากการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้าย

สูตรการตอกเสาเข็ม	ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ย (ตัน)	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ย*
Gates	138.1	1.84
Canadian	178.1	2.37
Hiley	205.0	2.73
PCUBC	214.6	2.86
Janbu	277.2	3.70
Danish	396.3	5.28
Modified ENR	698.7	9.32
Eytelwein	939.1	12.52
Navy-McKay	1,400.0	18.67

หมายเหตุ: *เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ใช้ออกแบบของเสาเข็มซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 ตัน

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ยของเสาเข็มขนาด 0.40x0.40 เมตร ด้วยสูตรการตอกเสาเข็มจากการทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้าย

สูตรการตอกเสาเข็ม	กำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ย (ตัน)	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ย*
Gate	156.4	1.74
Canadian	221.1	2.46
Hiley	246.0	2.73
PCUBC	266.4	2.96
Janbu	352.2	3.91
Danish	474.3	5.27
Modified ENR	889.9	9.89
Eytelwein	1,198.1	13.31
Navy-McKay	2,231.1	24.79

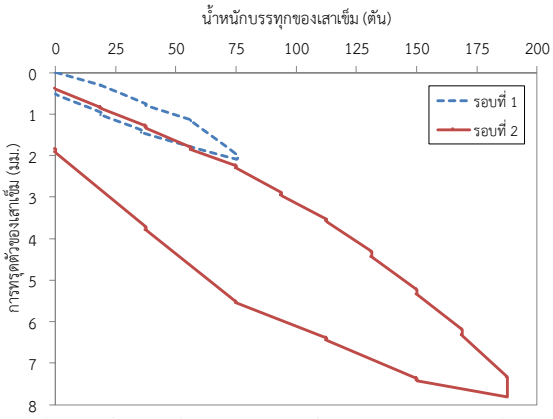
หมายเหตุ: *เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ใช้ออกแบบของเสาเข็มซึ่งมีค่าเท่ากับ 90 ตัน

สูตรของ Modified ENR และ Eytelwein มีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากค่า C ที่นำมาใช้ในสูตร [10][11] มีค่าค่อนข้างน้อยคือเท่ากับ 0.1 นิ้ว หรือ 2.54 มม. หากปรับค่า C ให้เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดลดลงและส่งผลให้อัตราส่วนปลอดภัยลดลงเช่นกัน ส่วนสูตรของ Navy-McKay ที่ใช้เฟคเตอร์ตัวคูณในสูตรเท่ากับ 0.3 [10][11] หากใช้ค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณลดลงเช่นกัน

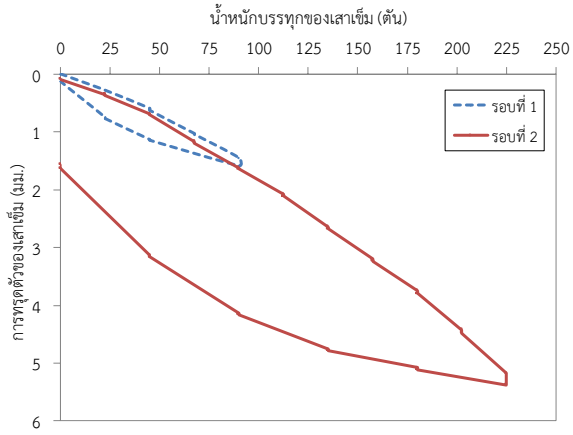
4. ผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์

สำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์มีจำนวน 22 ต้น และวิธีสถิตยศาสตร์จำนวน 2 ต้น ซึ่งเป็นต้นเดียวกันกับเสาเข็มที่ได้ทดสอบการตอกสิบครั้งสุดท้ายและได้คำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยสูตรต่างๆ ไปแล้วในหัวข้อที่ 3 การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์นี้ใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Methods) ด้วยวิธีของเคส (Case Method) โดยใช้เครื่อง Pile Driving Analyzer (PDA) และนำผลนี้ไปวิเคราะห์ต่อด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ด้วยโปรแกรม Case Pile Wave Analysis Program – Continuous Mode (CAPWAP-C) สำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ทดสอบจนถึง 2.5 เท่าของกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ออกแบบไว้

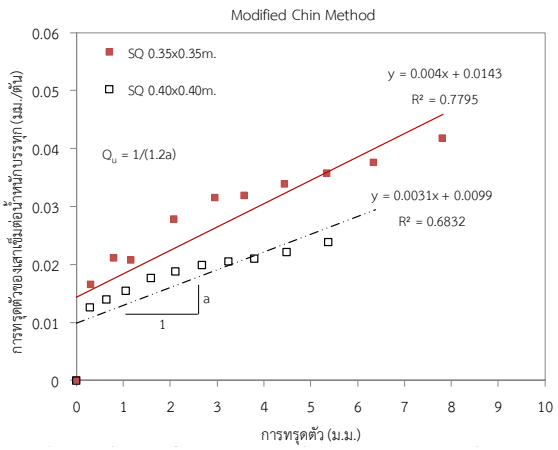
จากผลการทดสอบพบว่าการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 2.92 แสดงดังตารางที่ 5 ส่วนผลจากการทดสอบด้วยวิธีสถิตยศาสตร์มีการทรุดตัวน้อยมาก แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Modified Chin และ Modified Mazurkiewicz [9] ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 โดยได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.88 และ 3.17 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5 ผลจากการทดสอบเสาเข็มทั้งวิธีพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน



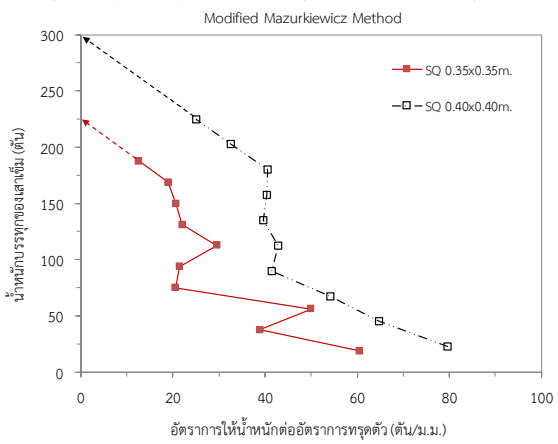
รูปที่ 3 ผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ของเสาเข็มขนาด 0.35x0.35x17.0 เมตร [8]



รูปที่ 4 ผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ของเสาเข็มขนาด 0.40x0.40x17.0 เมตร [8]



รูปที่ 5 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดด้วยวิธี Modified Chin (1970)



รูปที่ 6 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดด้วยวิธี Modified Mazurkiewicz (1972)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และวิธีสถิตยศาสตร์ [2][4][6][9]

การทดสอบ	ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ย (ตัน)	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ย*
SQ 0.35x0.35 m.		
Dynamic Pile Load Test	227.1	3.03
Static Pile Load Test		
- Modified Chin	208.3	2.77
- Modified Mazurkiewicz	225.0	3.00
SQ 0.40x0.40 m.		
Dynamic Pile Load Test	248.0	2.76
Static Pile Load Test		
- Modified Chin	268.8	2.99
- Modified Mazurkiewicz	300.0	3.33
Average Safety Factor		
Dynamic Pile Load Test	-	2.92
Static Pile Load Test		
- Modified Chin	-	2.88
- Modified Mazurkiewicz	-	3.17

หมายเหตุ: * เปรียบเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ใช้ออกแบบ

5. ผลการเปรียบเทียบสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าสูตรการตอกเสาเข็มของ Gates, Canadian National Building Code, Hiley และ Pacific Coast Uniform Building Code (PCUBC) มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 1.80, 2.41, 2.73 และ 2.90 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 2 วิธี และน้อยกว่าอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำตามทฤษฎี [10][11] สำหรับสูตร Janbu และ Danish มีค่าเท่ากับ 3.79 และ 5.30 มากกว่าผลการทดสอบเสาเข็มแต่อยู่ในช่วงอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำตามทฤษฎี สูตรของ Modified ENR, Eytelwein และ Navy-McKay มีค่าเท่ากับ 9.55, 12.85 และ 21.17 ตามลำดับ มากกว่าผลการทดสอบเสาเข็มและเกินค่าอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำตามทฤษฎี ดังนั้นสูตรของ Gates, Canadian, Hiley, PCUBC, Janbu และ Danish สามารถนำมาใช้ได้หากใช้อัตราส่วนปลอดภัยแนะนำตามทฤษฎี [10][11] ผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี Modified Mazurkiewicz ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 3.0 เล็กน้อยและสูงกว่าวิธี Modified Chin เล็กน้อยเช่นกัน ผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับวิธีสถิตยศาสตร์เหมือนกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา [10][12][13][14][15] อย่างไรก็ตามสูตรทุกสูตรสามารถนำมาใช้ได้หากปรับค่าอัตราส่วนปลอดภัยให้ไม่ต่ำกว่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ยดังที่แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้วยสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบเสาเข็ม

สูตรการตอกเสาเข็ม	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเฉลี่ย	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยแนะนำตามทฤษฎี [10][11]
Gates	1.80	3.0
Canadian	2.41	3.0
Hiley	2.73	3.0
PCUBC	2.90	4.0
Janbu	3.79	3.0 – 6.0
Danish	5.30	3.0 – 6.0
Modified ENR	9.55	6.0
Eytelwein	12.85	6.0
Navy-McKay	21.17	6.0
Dynamic Pile Load Test	2.92	2.5 – 3.0
Static Pile Load Test*		
- Modified Chin	2.88	2.5 – 3.0
- Modified Mazurkiewicz	3.17	2.5 – 3.0

หมายเหตุ: *ทดสอบไปจนถึง 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ใช้ออกแบบ

6. สรุป

สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทรายบริเวณพื้นที่ภาคเหนือ สูตรตอกเสาเข็มทุกสูตรสามารถนำมาใช้ได้ แต่บางสูตรต้องปรับอัตราส่วนปลอดภัยให้เหมาะสมจึงจะสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เซ็นทรัลพัฒนา จำกัด บริษัท พี พี เอส นอร์ท จำกัด บริษัท เอ็น เอ็ม ซี พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และข้อมูลในการทำวิจัย และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. การอ้างอิง

[1] บริษัท ปั้นจั่นไทย จำกัด. (2555). บันทึกการตอกเสาเข็ม โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. เชียงใหม่.

[2] บริษัท ปั้นจั่นไทย จำกัด. (2555). รายงานผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. เชียงใหม่.

[3] บริษัท พิบูลย์คอนกรีต จำกัด. (2555). บันทึกการตอกเสาเข็ม โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. เชียงใหม่.

[4] บริษัท พิบูลย์คอนกรีต จำกัด. (2555). รายงานผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. เชียงใหม่.

[5] บริษัท พี เอ คอนกรีต จำกัด. (2555). บันทึกการตอกเสาเข็ม โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. เชียงใหม่.

[6] บริษัท พี เอ คอนกรีต จำกัด. (2555). รายงานผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. ลำปาง.

[7] บริษัท เอส ที เอส อินสตรูเม้นท์ จำกัด (2554). รายงานผลการเจาะสำรวจชั้นดิน โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. กรุงเทพ.

[8] บริษัท เอส ที เอส อินสตรูเม้นท์ จำกัด (2555). รายงานผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ โครงการเซ็นทรัลเฟสติวัล เชียงใหม่. กรุงเทพ.

[9] วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา (2559). การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากสูตรการตอกเสาเข็ม. วรสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต. Vol. 19 (No.2). หน้า 21-31.

[10] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง (2555). โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง: รายงานฉบับสุดท้าย (Final Report). [Internet]. 2012 [cited 2012 Dec 25]. Available from: http://km.doh.go.th/doh/uploads/Knowledge/17157/3i38ie1vd40ld9o55gcouegr94_โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง.pdf

[11] Bowles JE. (1997). *Foundation Engineering and Design*. 5th edition, McGraw – Hill Book Company, Singapore.

[12] Goble GG., Rausche F., Likins G. (1980). The analysis of pile driving – A state-of-the-art. *Proceedings of the 1st International Conference on the Application of Stresswave Theory on Piles*. Bredenburg editor, Balkema, Stockholm Sweden.

[13] Likins G., Rausche F., Goble GG. (2000). High Strain Dynamic Pile Testing, Equipment and Practice. *Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Stress-wave Theory on Piles*, Niyama and Beim editors, Balkema, Sao Paulo, Brazil.

[14] Likins G., Rausche F., Thendean G. (1996). CAPWAP Correlation Studies. *Proceedings of the 5 th International Conference on the Application of Stress-wave Theory on Piles*, Townsend, Hussein, and McVay editors

[15] Uddin MK. and Tungsanga K. (2001). Dynamic Pile Testing and Its Correlation with Static Load Test. *Journal of Civil Engineering. Vol CE.29 (No.1)*, The Institution of Engineers, Bangladesh.