การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากสูตรการตอกเสาเข็มกับการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์

A Comparision of Bearing Capacity of Pile from Pile Driving Formulas and Dynamic Load Test

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์[1*] อนุชาติ ลี้อนันต์ศักดิ์ศิริ[1] และฐิตินันท์ ป้องนาม[2]
Worawit Phojan[1*] Anuchat Leeanansaksiri[1] and Thitinun Pongnam[2]

Received: June 6, 2019; Revised: August 20, 2019; Accepted: August 26, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุก โดยใช้สูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตร ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รวมถึงพิจารณาถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมโดยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งวิเคราะห์ผลโดยกระบวนการ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) ผลการศึกษาพบว่าสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุดได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula ตามลำดับ โดยที่ Hiley's Formula ให้ผลทดสอบใกล้เคียงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.831$) ส่วน Danish Formula และ Janbu's Formula มีโอกาสวิบัติหากนำไปใช้งาน

การใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่แนะนำโดย ว.ส.ท. เพื่อลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้แต่ละสูตรพบว่าทุกสูตรมีความปลอดภัย สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula ให้ค่าที่ต่ำ ทำให้ปลอดภัยมากแต่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะเพิ่มสูงขึ้น และผู้วิจัยได้หาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรซึ่งได้ผลดังนี้ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าเท่ากับ 2.5499 2.2555 3.7095 และ 4.2525 ตามลำดับ

คำสำคัญ : วิธีพลศาสตร์; อัตราส่วนปลอดภัย; เสาเข็ม

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น*
[2] *คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*
[1] *Faculty of Engineering, North Eastern University, Khonkaen*
[2] *Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus*
[*] *Corresponding Author E - mail Address: Worawit.Pho@neu.ac.th*

Abstract

The objective of this research in to evaluate the bearing capacity of pile by using pile driving formulas such as Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula, and Janbu's Formula to compare, relationship between and the optimum factor of safety with Dynamic Load Test results. The ultimate load of a pile was calculated process by Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP). The Results showed that the pile driving formulas that was similar of ultimate bearing capacity by Dynamic Load Test was Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula and Janbu's Formula, respectively. Whereas the Hiley's Formula provides the most reliable and close test results ($R^2 = 0.831$), Danish Formula and Janbu's Formula have a chance to fail if used.

Furthermore, by using the factor of safety recommended by E.I.T. to reduce load carrying capacity from each all of pile driving formulas are safe, Hiley's Formula and Engineering New Formula is lower load, making it very safe but the construction costs will increase. The researcher found the appropriate safety factor of each formulas as follows Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula, and Janbu's Formula are equal to 2.5499, 2.2555, 3.7095, and 4.2525 respectively.

Keywords: Dynamic Load Test; Factor of Safety; Pile

บทนำ

ฐานรากนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งปลูกสร้าง เพื่อใช้รับน้ำหนักขององค์อาคาร ซึ่งในปัจจุบันอาคารมีความสูงและน้ำหนักโครงสร้างที่มากขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ ราคาที่ดิน และความแออัดของชุมชนเมือง กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากตื้นจึงไม่เพียงพอสำหรับการก่อสร้าง ฐานรากลึกหรือฐานรากเสาเข็มจึงจำเป็นสำหรับใช้ในการถ่ายน้ำหนักของตัวอาคารลงสู่ชั้นดินลึก

ในปัจจุบันวิศวกรผู้ควบคุมงานนิยมใช้สมการการตอกเสาเข็มเพื่อควบคุมคุณภาพและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในเบื้องต้น เนื่องจากสะดวกสามารถสังเกตพฤติกรรมของเสาเข็มที่เกิดขึ้นในระหว่างการตอกได้ อย่างไรก็ตามกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสมการการตอกเสาเข็มมีความน่าเชื่อถือต่ำ เพราะมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องในการประเมินกำลังรับน้ำหนัก เช่น พลังงานที่ใช้ในการตอก ชนิดและขนาดของเสาเข็ม คุณสมบัติของวัสดุรองหัวเสาเข็ม จึงต้องมีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักโดยวิธีอื่นเพื่อตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักที่เสาเข็มรับได้จริงประกอบด้วย

โดยทั่วไปการทดสอบเสาเข็มในสนามวิธีที่ให้ผลที่แม่นยำที่สุดในการยืนยันกำลังของเสาเข็มคือการทำ Static Pile Load Test แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและต้องใช้เวลาทดสอบนาน ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้การทดสอบแบบ Dynamic Pile Load Test เป็นทางเลือกที่ประหยัด รวดเร็ว และใช้พื้นที่น้อยกว่า [1] และผลการทดสอบเปรียบเทียบของวิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic

Load Test) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ทดสอบนอกเหนือจากวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Load Test) เนื่องจากใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้สะดวก ทดสอบได้รวดเร็ว ราคาไม่แพง และทดสอบได้ทั้งกับเสาเข็มตอก เสาเข็มเจาะ ซึ่งการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์นี้ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบกับการทดสอบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ พบว่ามีผลใกล้เคียงกันมาก [2] การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ เป็นวิธีประเมินผลการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ดีวิธีหนึ่ง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์กับวิธีทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ในดินกรุงเทพมีความน่าเชื่อถือ [3] และวิธีพลศาสตร์สามารถตรวจสอบหาความสมบูรณ์ของเสาเข็มเบื้องต้น หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม การกระจายหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็ม กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเข็ม ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว ค่าหน่วยแรงเค้นอัดและแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ และทราบถึงประสิทธิภาพของปั้นจั่นตอกเสาเข็ม

งานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาเปรียบเทียบสูตรการตอกเสาเข็มกับวิธีสถิตยศาสตร์ [4] - [7] และเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์กับพลศาสตร์ [2] - [3] ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงนำผลการคำนวณที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มไปใช้เปรียบเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยจะทดสอบแบบ Restrike Drive Test (RDT) เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็มไปแล้ว 7 - 10 วัน เพื่อให้ดินรอบ ๆ เสาเข็มเกิดการอัดตัวคายน้ำทำให้กำลังของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น [8] - [9] สามารถนำไปประเมินความแม่นยำของสมการการตอกเสาเข็มทั้ง 4 สมการ ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula เพื่อประเมินหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อปรับปรุงสมการการตอกเสาเข็มได้ในอนาคต

ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

1. สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas)

สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas) ได้จากนำหลักการพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน หลักงาน (Work) และพลังงาน (Energy) มาประยุกต์ใช้เป็นการประมาณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในขณะที่ทำการตอก โดยใช้ข้อมูลจากการตอกเสาเข็ม ได้แก่ น้ำหนักของตุ้ม ความสูงที่ยก และระยะที่เสาเข็มจมลงเมื่อตอก วัสดุรองหัวเสาเข็ม ในการทำงานจะวัดระยะที่เสาเข็มจมลงเมื่อตอกสิบครั้งแล้วนำค่ามาเฉลี่ยเพื่อหาค่าที่จมตัวต่อการตอกหนึ่งครั้ง การใช้สมการการตอกเสาเข็มจะใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม และใช้ควบคุมการตอกไม่ให้หน่วยแรงในเสาเข็มสูงจนกระทั่งเสาเข็มชำรุด [4]

ตัวแปรทั่วไปของสูตรการตอกเสาเข็ม

Q_u = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Capacity) (ตัน)

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม (ตัน)

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็ม (เซนติเมตร)

P = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน)

e = ประสิทธิภาพการตอก = $(W+Pr^2)/W+P$

S = ระยะที่เสาเข็มจม โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (เซนติเมตร)

L = ความยาวเสาเข็ม (เมตร)
A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตารางเซนติเมตร)
E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม = 282.84 ตันต่อตารางเซนติเมตร

1) Engineering News Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (1)

$$Q_u = \frac{Wh.Y}{s + 2.54C} \tag{1}$$

โดยที่

C = 0.9 สำหรับลูกตุ้มปล่อย (Drop Hammer)
C = 1.0 สำหรับลูกตุ้มแบบอื่น

2) Hiley's Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (2)

$$Q_u = \frac{eWh.Z}{s + \frac{C}{2}} \tag{2}$$

โดยที่ $C = C_1 + C_2 + C_3$

$$C_1 = \frac{1.8Q_uL_2}{A}$$

$$C_2 = \frac{0.72Q_uL}{A}$$

$$C_1 = \frac{3.6Q_u}{A}$$

L_2 = ความหนาของกระสอบรองหัวเสาเข็ม (เมตร)
r = Coefficient of Restitution = 0.25 ในกรณีที่เสาเข็มคอนกรีตถูกตอกด้วยลูกตุ้มปล่อยรองด้วยกระสอบ

3) Janbu's Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (3)

$$Q_u = \frac{Wh.}{K_uS} \tag{3}$$

โดยที่ $\lambda = \frac{Wh.L}{AES^2}$

$$C_d = 0.75 + 0.15\frac{P}{W}$$

$$K_u = C_d\left(1+\sqrt{1+\frac{\lambda}{C_d}}\right)$$

4) Danish Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 3 - 6) ดังสมการที่ (4)

$$Q_u = \frac{eWh.}{S+\sqrt{\frac{eWhL}{2AE}}} \tag{4}$$

โดยที่

e = ประสิทธิภาพของปั่นจั่น = 0.7

2. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

Seubsai, S. [11] กล่าวว่า การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (High-Strain Dynamic Load Test: DLT) เป็นวิธีการทดสอบเสาเข็มอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้กับเสาเข็มคอนกรีต (เสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ) เสาเข็มเหล็ก และเสาเข็มไม้ เป็นการทดสอบเพื่อหากำลังบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Bearing Capacity) ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Displacement) ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบ และทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของปั้นจั่น (Hammer Performance) ที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม รวมทั้งตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Pile Integrity) ที่ทดสอบว่ามีความเสียหายหรือข้อบกพร่องหรือไม่ และใช้ข้อมูลในการกำหนดมาตรฐานสำหรับการตอกเสาเข็ม (Driving Criteria) สำหรับโครงการได้ สำหรับการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์มี 2 ลักษณะ คือ

1) การทดสอบขณะทำการตอกเสาเข็ม Initial Driving Test (IDT) เป็นการทดสอบขณะทำการตอกเสาเข็ม โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อหาความยาวของเสาเข็ม (Minimum Pile Tip Elevation) สำหรับโครงการและตรวจสอบประสิทธิภาพของปั้นจั่นที่ใช้ในการตอก (Hammer Efficiency) รวมทั้งการกำหนดมาตรฐานการตอกเสาเข็ม (Driving Criteria) สำหรับโครงการนั้น ๆ

2) การทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็ม Restrike Drive Test (RDT) เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็มไปแล้วในระยะเวลาหนึ่ง โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม (Pile Bearing Capacity) ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ออกแบบหรือไม่ รวมทั้งสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็ม โดยสามารถทำการทดสอบได้ทั้งเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ

ลักษณะการทดสอบเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ จะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักปล่อยกระแทกที่หัวเสาเข็มเพื่อทำให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัว จากแรงกระแทกของลูกตุ้มบนหัวเสาเข็มนั้นจะทำให้เกิดคลื่นความเค้น (Stress Wave) ลงไปตลอดความยาวของตัวเสาเข็ม และคลื่นความเค้นดังกล่าวจะสะท้อนกลับขึ้นมาทำให้ทราบถึงแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มและด้านข้างของเสาเข็ม คุณสมบัติทางกายภาพของเสาเข็ม รวมทั้งทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติของพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบ ซึ่งคลื่นความเค้นดังกล่าวจะถูกบันทึกโดยใช้ตัวแปรสัญญาณ (Transducers) ซึ่งประกอบด้วยมาตรความเครียด (Strain Gauge) และมาตรความเร่ง (Accelerometers) ที่ติดตั้งบริเวณใกล้กับหัวเสาเข็ม สัญญาณที่ได้ขณะการทดสอบ

จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของหน่วยแรง (Force) และความเร็ว (Velocity) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หากำลังบรรทุกของเสาเข็มขณะทดสอบต่อไป ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะแสดงในเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม (Pile Driving Analyzer: PDA) [11] ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 เครื่องวิเคราะห์และการติดตั้งมาตรความเครียดกับมาตรความเร่ง

การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ และการติดตั้งมาตรความเร่งและมาตรความเครียดที่เสาเข็มทดสอบตามลำดับ ในการทดสอบทุกครั้งที่ปั้นจั่นตอกลงบนหัวเสาเข็ม เครื่องทดสอบเสาเข็มจะเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก (Analog) จากมาตรความเร่งและมาตรความเครียด ไปเป็นแรงและความเร็วในระบบดิจิทัล (Digital) เทียบกับคลื่นเวลา และปรากฏบนจอเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม ขณะที่กำลังตอกเสาเข็มหรือทดสอบเสาเข็ม ทำให้วิศวกรทราบข้อมูลการทดสอบตลอดเวลา สามารถใช้ในการทำนายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ควบคุมประสิทธิภาพของปั้นจั่น (Hammer Performance) ในการส่งถ่ายพลังงาน (Energy Transfer) และสามารถวัดแรงเค้นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม (Driving Stress) และวิเคราะห์ประเมินความเสียหายของเสาเข็ม (Pile Integrity) รวมทั้งเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณสมการทางคลื่นสำหรับการตอกเสาเข็ม [11]

การวิเคราะห์ด้วย CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่รวบรวมเอาข้อมูลทางพลศาสตร์ที่วัดได้ในการทดสอบทำการเปรียบเทียบกับแรงหรือความเร็วที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้สมการทางคลื่นในการทำนายกำลังบรรทุกทางสถิตยศาสตร์ของเสาเข็ม (Pile Static Bearing Capacity) วิธีการของ CAPWAP ทำให้วิศวกรสามารถตรวจสอบหลักการของ Case Method ได้ ซึ่งกำลังบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Pile Bearing Capacity) ที่ได้จาก CAPWAP จะมีความใกล้เคียงกับกำลังบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มทางสถิตยศาสตร์ (Static Failure Load) [11]

การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม และ CAPWAP มีความสะดวกและคล่องตัวทำให้วิศวกรสามารถนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างต่าง ๆ โดยประโยชน์จากการใช้การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ คือ ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้น ช่วยในการออกแบบและควบคุมการตอกเสาเข็ม เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาประกอบกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ทำให้ลดปัญหาในการก่อสร้างและค่าก่อสร้างฐานราก ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น ลดเวลาและประหยัดค่าใช้จ่าย [11]

วิธีดำเนินการศึกษา

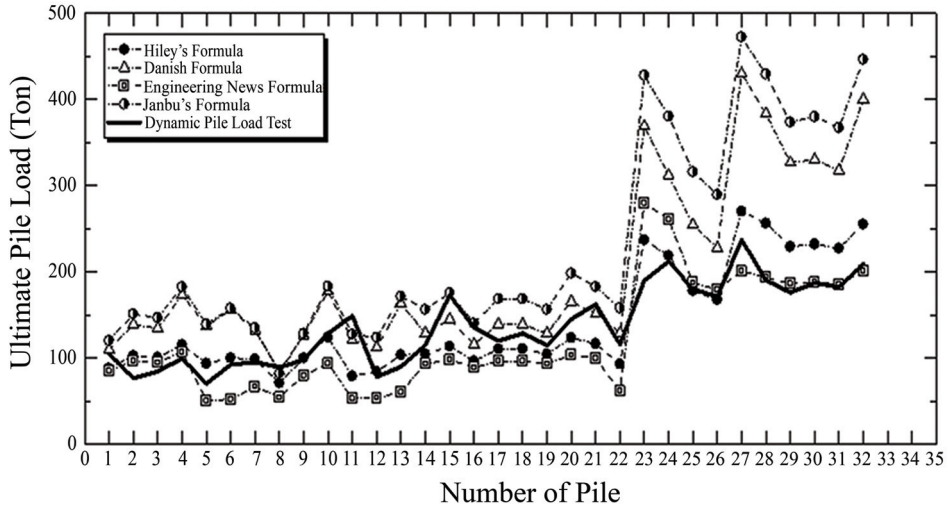
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษา อธิบายเปรียบเทียบ หาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม และสมการความสัมพันธ์จากผลของการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำนายโดยสูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตรคือ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula เปรียบเทียบกับผลทดสอบ Dynamic Load Test ที่ประมวลผลการทดสอบโดยโปรแกรม Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเสาเข็มตอกในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทย เสาเข็มที่ทดสอบขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งแต่ 0.26 0.30 0.35 และ 0.40 m. ความยาวเสาเข็ม 6 - 14 m. จำนวน 32 ต้น การทดสอบ Dynamic Pile Load Test เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็ม Restrike Drive Test (RDT) ที่ระยะเวลา 7 - 10 วัน หลังจากตอกเสาเข็มเสร็จเพื่อให้พฤติกรรมด้านกำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษา

จากข้อมูลเสาเข็ม 32 ต้น ได้นำมาทำการวิเคราะห์ข้อมูล คำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากสูตรการตอกต่าง ๆ โดยใช้ผลของค่าทรุดตัวเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (Last 10 Blows) เปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ที่ประมวลผลโดยโปรแกรม CAPWAP

1. **ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์**

รูปที่ 2 พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่คำนวณได้จาก Hiley's Formula มีค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ส่วนผลการคำนวณโดย Engineering News Formula จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยน้อยกว่าที่ทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์เกือบทั้งหมด ส่วน Janbu's Formula และ Danish Formula จะให้ผลการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าผลที่ได้จากโปรแกรม CAPWAP ซึ่งจากผลการทดสอบค่ากำลังจาก Hiley's Formula และ Engineering News Formula มีค่าความปลอดภัย ส่วนค่าที่ได้จาก Janbu's Formula และ Danish Formula มีโอกาสเกิดการวิบัติมากที่สุด ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มต้นที่ 23 - 32 ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มให้ค่าที่สูงมาก เนื่องจากเป็นเสาเข็มขนาดหน้าตัด 0.40 x 0.40 m. ผู้ออกแบบได้กำหนดค่ากำลังน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยไว้ที่ 60 - 80 ตันต่อต้น ทำให้ผู้ควบคุมงานพยายามควบคุมการตอกเสาเข็มให้ได้ระยะ Last 10 Blows โดยกำหนดระยะยกของตุ้มตอกขนาด 5.0 - 5.5 ตัน ที่ระยะ 100 - 130 cm. เป็นผลให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าสูง



รูปที่ 2 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 3 แสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ เมื่อนำผลการคำนวณมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจากสมการการตอกเสาเข็มแต่ละสมการกับค่าที่ได้จากผลทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ทั้งนี้ได้กำหนดให้เส้นกราฟผ่านจุด (0, 0)

ถ้าให้ $Qu_{Predict}$ คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และ Qu_{DLT} คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คำนวณโดยวิธี CAPWAP จะได้ความสัมพันธ์ของแต่ละสมการดังสมการที่ (5) - (8)

Hiley's Formula :

$$Qu_{\Pr edict} = 1.0377\ Qu_{DLT}; \qquad R^2 = 0.831 \tag{5}$$

Engineering News Formula :

$$Qu_{\Pr edict} = 0.90222\ Qu_{DLT}; \qquad R^2 = 0.751 \tag{6}$$

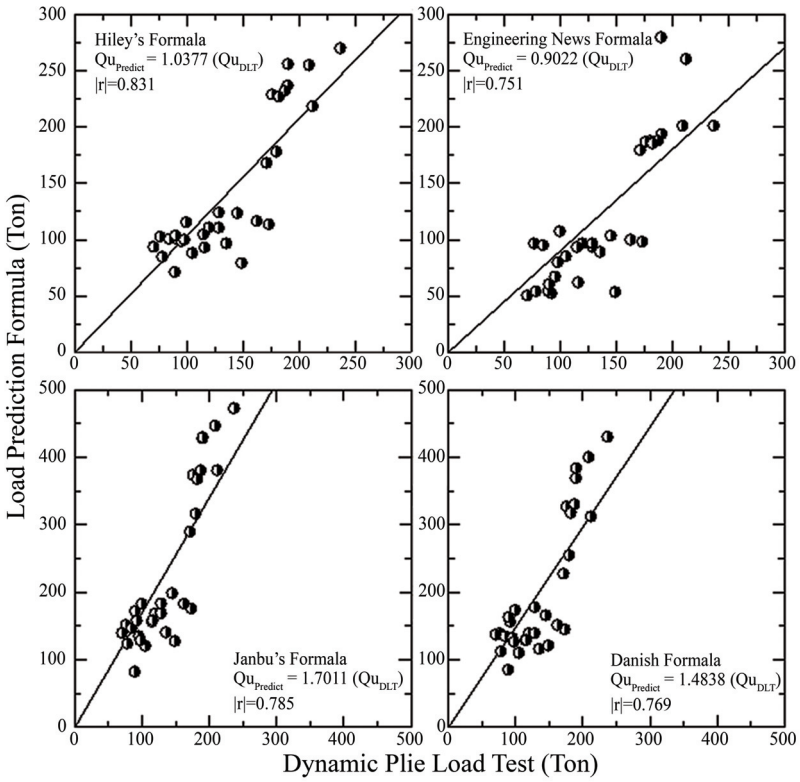
Janbu's Formula :

$$Qu_{\Pr edict} = 1.7011\ Qu_{DLT}; \qquad R^2 = 0.785 \tag{7}$$

Danish Formula :

$$Qu_{\Pr edict} = 1.4838\ Qu_{DLT}; \qquad R^2 = 0.769 \tag{8}$$

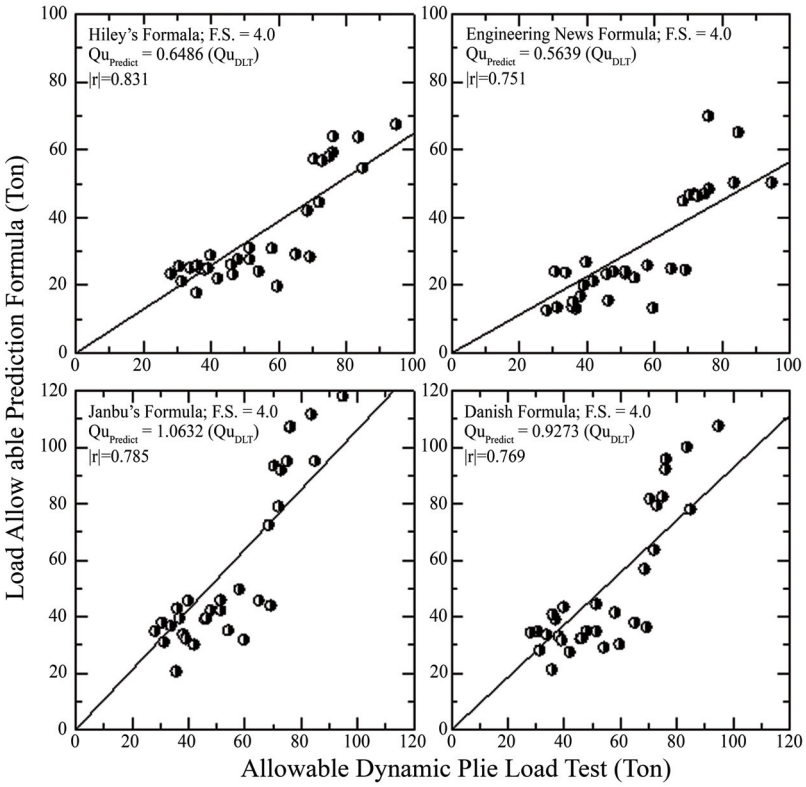
จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้พบว่า Hiley's Formula และ Engineering News Formula ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าประมาณเข้าใกล้หนึ่ง นั่นหมายความว่าค่าที่ได้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้ ส่วน Janbu's Formula กับ Danish Formula ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งเป็นผลให้การคำนวณที่ได้จากสมการดังกล่าวมีโอกาสจะเกิดการวิบัติมากกว่าสมการอื่น และพบว่าสมการที่ให้ค่าความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีพลศาสตร์มากที่สุด และให้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ดีที่สุด คือ Hiley's Formula (R^2 = 0.831) อย่างไรก็ดีทุกสมการถือว่าให้ค่าความสัมพันธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (R^2 = 0.751 - 0.831)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักประลัยที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มและการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

2. ผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 4 เมื่อนำอัตราส่วนปลอดภัยที่ ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้มาทำการคำนวณมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยได้กำหนดให้เส้นกราฟผ่านจุด (0, 0) ถ้าให้ $Qa_{Predict}$ คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และ Qa_{DLT} คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่คำนวณโดยโปรแกรม CAPWAP ที่กำหนดอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 จะได้ความสัมพันธ์ของแต่ละสมการ ดังสมการที่ (9) - (12)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มและการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

Hiley′s Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{\Pr edict} = 0.6486\ Qa_{DLT}; \qquad R^2 = 0.831 \tag{9}$$

Engineering News Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{\Pr edict} = 0.5639\ Qa_{DLT}; \qquad R^2 = 0.751 \tag{10}$$

Janbu′s Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{\Pr edict} = 1.0632\ Qa_{DLT}; \qquad R^2 = 0.785 \tag{11}$$

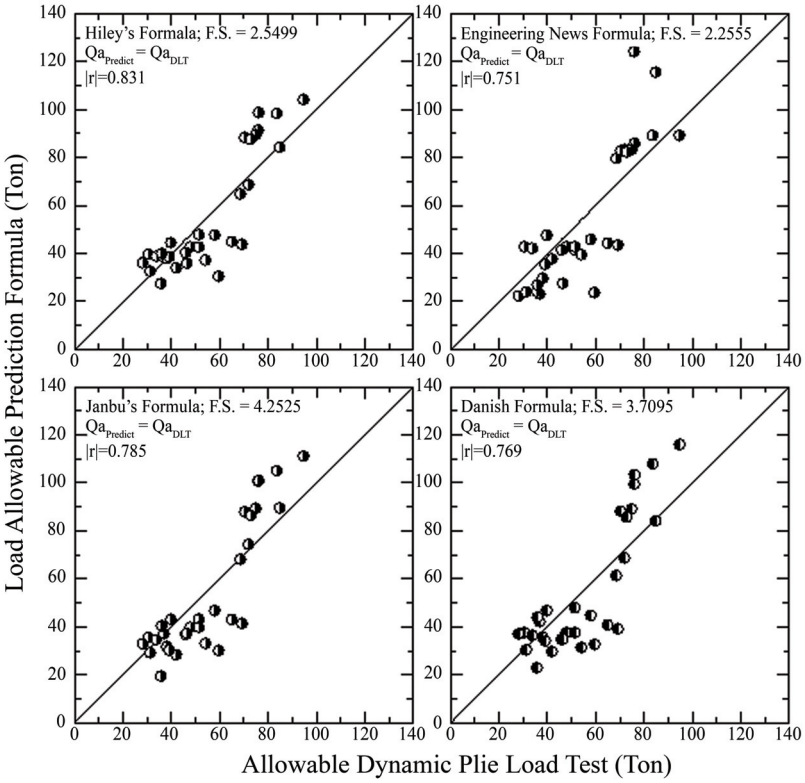
Danish Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 3 - 6 เลือกใช้ที่ 4)

$$Qa_{\Pr edict} = 0.9273\ Qa_{DLT}; \qquad R^2 = 0.769 \tag{12}$$

จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้ พบว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่แต่ละสูตรถูกแนะนำให้ใช้นั้นพบว่า Janbu's Formula และ Danish Formula มีค่าใกล้เคียงกับผลการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด แสดงว่าค่าที่ได้จากการทำนายโดย 2 สมการนี้แม่นยำที่สุดสำหรับการคำนวณโดยใช้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย

ส่วน Hiley's Formula กับ Engineering News Formula ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ซึ่งเป็นผลให้การคำนวณที่ได้จากสมการดังกล่าวมีความปลอดภัยมากกว่าสมการอื่น แต่จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น

3. อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมจากสูตรการตอกเสาเข็มแต่ละสูตรกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 5 เมื่อนำผลการทดสอบมาทำการคำนวณมาปรับค่าหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม โดยให้ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น โดยให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และที่คำนวณโดยโปรแกรม CAPWAP มีค่าเท่ากัน ($Qa_{Predict} = Qa_{DLT}$) จะได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรดังนี้

Hiley's Formula

F.S. = 2.5499 ; $R^2 = 0.831$

Engineering News Formula

F.S. = 2.2555 ; $R^2 = 0.751$

Janbu's Formula

F.S. = 4.2525 ; $R^2 = 0.785$

Danish Formula

F.S. = 3.7095 ; $R^2 = 0.769$

จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้ พบว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมนั้นมีค่าแตกต่างจากที่ ว.ส.ท. แนะนำโดยที่สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula และ Danish Formula มีค่าต่ำกว่าที่ ว.ส.ท. แนะนำอยู่ที่ 36.3 43.6 และ 7.3 % ตามลำดับ ส่วนของ Janbu's Formula มีค่าแตกต่างอยู่ 6.3 %

สรุปผลการศึกษา

สรุปผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่อัตราส่วนปลอดภัยต่าง ๆ ของแต่ละสูตรการตอกเสาเข็มและการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งวิเคราะห์ผลโดยกระบวนการ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) สูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตร ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รวมถึงพิจารณาถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม พบว่าสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula ตามลำดับ โดยที่ Hiley's Formula ให้ผลทดสอบใกล้เคียงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.831$) ส่วน Danish Formula และ Janbu's Formula มีโอกาสวิบัติหากนำไปใช้งาน

การใช้อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ที่แนะนำโดย ว.ส.ท. เพื่อลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้แต่ละสูตรพบว่าทุกสูตรมีความปลอดภัย สูตรของ Hiley's Formula และ Engineering News Formula ให้ค่าที่ต่ำ ทำให้ปลอดภัยมากแต่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะเพิ่มสูงขึ้น และผู้วิจัยได้หาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรซึ่งได้ผลดังนี้ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าเท่ากับ 2.5499 2.2555 3.7095 และ 4.2525 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากอัตราส่วนปลอดภัยที่ ว.ส.ท. แนะนำ โดยที่สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าต่ำกว่าที่ ว.ส.ท. แนะนำอยู่ที่ 36.3 43.6 และ 7.3 % ตามลำดับ ส่วนของ Janbu's Formula มีค่าแตกต่างอยู่ 6.3 %

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณปรัชญา มาคำ คุณไกรวิทย์ วงศ์บุตร และ คุณวราภรณ์ มีตา บริษัท ขอนแก่น ซอยล์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและรวบรวมผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

References

[1] Kibria, S., Ahmad, J., Masud-, A., and Ali, M. (2017). Dynamic Pile Test and Its Correlation with Static Load Test. In **Proceeding of the 19th International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (ISSMGE)**. Republic of Korea, Seoul 2017.

[2] Thasnanipan, N., Submaneewong, C., and Chanchad, C. (2007). A Comparision Between Static and Dynamic Pile Load Tests for Bored Pile Capacity Prediction. In **12th Nationnal Convention on Civil Engineering**. Phitsanulok. Vol. 3, (GTE). pp. 253-258.

[3] Thaveelert, P. (1996). **Evluation of Dynamic Pile Load Test Performance in Bangkok and Rayong Subsoils**. Master Thesis. Department of Civil Engineering. Chulalongkorn University. Bangkok

[4] Patanasakpinyo, T. (2015 Qualty Control of Pile Driving by Danish Formula in Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage. **VRU Research and Development Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 2, May - August 2018, pp. 43-53 (in Thai)

[5] Yuyongwattana, W. (2016). A Comparision of Pile Driving Formulas. **Rangsit University Journal of Engineering and Technology, RSUJET**. Rangsit University. Bangkok, Vol. 19, No. 2, pp. 21-31

[6] Fragaszy, J. R., Argo, D., and Higgins, J. D. (1988). Comparison of Formula Predictions with Pile Load Tests. **Transportation Research Record 1219**. pp. 1-12

[7] Rajagopal, C., Solanki, C. H., and Tandel, Y. K. (2012). Comparison of Static and Dynamic Load Test of Pile. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)**. Vol. 17, pp. 1905-1914

[8] Kuntiwattanakul, P. (2017). Pile Set-up in Bangkok Subsoil. The **2nd National RMUTR Conference**. Building Innovation 2017 : Sustainable Smart Building. pp. 32-39

[9] Komurka, V. E., Wagner, A. B., and Edil, T. B.(2003). **Estimating Soil/Pile Set-Up**. Final Report Submitted to the Wisconsin Department of Transportation, September, Wisconsin Highway Research Program#0092-00-14, pp. 55

[10] Engineering Institute of Thailand. (1978). **Pile Bearing Capacity**. The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage. Bangkok

[11] Seubsai, S. (2006). **Geographic Information System Application for Database of Pile Dynamic Load Test in Bangkok and its Vicinity Areas**. Master Thesis. Faculty of Engineering. Thammasat University. Bangkok