

การเปรียบเทียบวิธีประมาณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มตอกจากผลทดสอบที่ไม่ถึงจุดวิบัติ COMPARISON OF ESTIMATION METHODS FOR ULTIMATE BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES BASED ON NON-FAILED LOAD TESTS

พัทธดนย์ ทองด้วง^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานุกร²

Phattadon Thongduang^{1*}, Panu Promputthangkoon²

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Graduate Student, Master of Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Lecturer, Master of Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: phattadonpoom88@gmail.com

วันที่รับบทความ: 28 มิถุนายน 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มมักใช้เสาเข็มทดสอบ เพื่อประเมินพฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้สภาพชั้นดินจริง และในทางปฏิบัติมักทำการทดสอบถึงระดับน้ำหนักที่กำหนดซึ่งยังไม่แสดงจุดวิบัติของเสาเข็มอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการตีความผลการทดสอบเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา โดยใช้ข้อมูลเสาเข็มทดสอบจำนวน 5 ต้น ประกอบด้วยข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลการตอกเสาเข็ม และผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตในสนาม การวิเคราะห์ดำเนินการด้วย 1) วิธีสถิตยศาสตร์ 2) วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตหลายวิธีซึ่งนำไปสู่ 3) วิธีแบบผสม และ 4) วิธีพลศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์และข้อมูลตั้งต้นของแต่ละวิธี โดยวิธีสถิตยศาสตร์ให้ค่าประมาณค่อนข้างต่ำและมีลักษณะค่อนข้างอนุรักษ์นิยมซึ่งให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน ขณะที่วิธีแบบผสมให้ค่าประมาณในช่วง 132.46–177.84 ตัน จึงสามารถใช้เป็นทางเลือกในการประเมินร่วมกับวิธีอื่น ส่วนวิธีพลศาสตร์ให้ค่าสูงที่สุด ซึ่งสะท้อนอิทธิพลของสมมติฐานด้านพลังงานและสภาพการตอกเสาเข็ม โดย Hiley formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering news formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน ดังนั้น การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกไม่ควรพิจารณาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว แต่ควรใช้หลายวิธีร่วมกันเพื่อประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลภาคสนาม

คำสำคัญ: เสาเข็มตอก, การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต, วิธีสถิตยศาสตร์, กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

Abstract: Pile load testing is commonly conducted using test piles to evaluate pile behavior under actual soil conditions. In practice, these tests are often performed only up to a specified proof load level at which the ultimate failure point is not clearly observed, thereby requiring interpretation methods to estimate the ultimate bearing capacity. This study aims to assess and compare methods for estimating the ultimate bearing capacity of driven piles and to propose an approach for joint interpretation of the results. Field data from five test piles in the Highway No. 4–Sadao Border Checkpoint 2 Interchange Project (Section 1), Songkhla Province, were analyzed. The dataset comprised soil investigation results, pile driving records, and field static pile load test results. The evaluation comprised four approaches: (1) static method, (2) interpretation of static load test results using various methods, (3) a proposed combined method based on selected interpretation methods, and (4) dynamic method. The results indicated that the estimated ultimate bearing capacities varied according to the analytical principles and input data of each approach. The static analytical method generally produced relatively low and conservative estimates, ranging from 122.75 to 142.95 tons. The proposed combined method produced intermediate estimates ranging from 132.46 to 177.84 tons serving as a complementary approach when used with other methods. Dynamic methods yielded higher estimates, reflecting the influence of energy assumptions and pile driving conditions. the Hiley formula produced values ranging from 206.54 to 273.67 tons, whereas the Engineering news formula yielded values ranging from 181.82 to 210.53 tons. These findings indicate that the ultimate bearing capacity of driven piles should not be evaluated using a single method alone. Instead, multiple methods should be considered together to support engineering judgment under the limitations of field data.

Keywords: Driven Piles, Static Pile Load Test, Static Method, Ultimate Bearing Capacity

1. บทนำ

ฐานรากเสาเข็มเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงพอ ดังนั้นการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจึงมีความสำคัญต่อความมั่นคงและความปลอดภัยของโครงสร้าง การพิจารณากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจึงควรอาศัยทั้งข้อมูลการสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบในสนามประกอบกันเพื่อความปลอดภัย การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสถิตยศาสตร์ วิธีพลศาสตร์ และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการและข้อสมมติแตกต่างกัน

วิธีสถิตยศาสตร์อาศัยข้อมูลชั้นดินและพารามิเตอร์ทางปฐพีวิศวกรรม วิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตสะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มภายใต้สภาพชั้นดินจริงได้โดยตรง แต่ในทางปฏิบัติ การทดสอบมักดำเนินการถึงระดับน้ำหนักที่กำหนดตามข้อกำหนดของโครงการ ซึ่งไม่ได้ถึงจุดวิกฤติของเสาเข็มอย่างชัดเจน ส่งผลให้ต้องใช้วิธีการตีความกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ขณะที่วิธีพลศาสตร์อาศัยข้อมูลการตอกเสาเข็มและแนวคิดด้านพลังงานในการประเมิน

อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากแต่ละวิธีมักแตกต่างกันตามหลักการและสมมติฐานที่ใช้ จึงควรมีการเปรียบเทียบผลจาก

หลายวิธีเพื่อให้ได้ค่าประเมินที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพภาคสนาม จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิต (Static Pile Load Test) พบว่า วิธีตีความที่แตกต่างกันสามารถให้ค่าประมาณแตกต่างกันอย่างชัดเจน แม้ใช้ข้อมูลการทดสอบชุดเดียวกัน [1] ในทำนองเดียวกันการตีความกราฟ Load-settlement ด้วยวิธีต่างกันสามารถให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยบางวิธีมีแนวโน้มให้ค่าค่อนข้างสูง บางวิธีให้ค่าค่อนข้างต่ำ และบางวิธีเหมาะสำหรับใช้เป็นค่าประกอบการเปรียบเทียบมากกว่าการใช้เป็นค่าหลักเพียงวิธีเดียว [2], [3], [4], [5], [6]

สำหรับกรณีผลการทดสอบที่ยังไม่ถึงจุดวิบัติหรือ (Non-failed load test) พบว่า ความแม่นยำของวิธีการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟ Load-settlement จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ และระดับน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบเมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักจริง [7], [8] พบว่า วิธี Extrapolation แต่ละวิธีมีความแม่นยำแตกต่างกัน และเมื่อใช้ข้อมูลช่วงท้ายของกราฟมากขึ้น ผลการประมาณค่ามีแนวโน้มแม่นยำขึ้นและมีการกระจายตัวลดลง ขณะที่ [9], [10] ชี้ให้เห็นว่า หากใช้ข้อมูลเพียงบางส่วนของกราฟ หรือข้อมูลที่ยังอยู่ห่างจากจุดวิบัติค่าที่ได้จากการประมาณอาจมีความแปรปรวนสูงขึ้น และบางวิธีอาจไม่เหมาะสมหากข้อมูลยังไม่ผ่านช่วงเปลี่ยนพฤติกรรมของกราฟอย่างชัดเจน ในส่วนของการเปรียบเทียบผลจากวิธีวิเคราะห์หลายแนวทาง [11], [12], [13], [14], [15], [16] สะท้อนให้เห็นว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีพลศาสตร์ และผลการทดสอบในสนามอาจแตกต่างกันตามชนิดของเสาเข็ม สภาพชั้นดิน วิธีทดสอบ ข้อมูลการตอกเสาเข็ม และสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ โดยหลายงานเสนอว่าการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มควรพิจารณาข้อมูลหลายแหล่งร่วมกันไม่ควรอาศัยผลจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว นอกจากนี้ในชั้นดินเหนียวกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกอาจมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการตอกอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์การฟื้นคืนกำลังของเสาเข็ม (Pile Setup) [15], [16], [17] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการศึกษาในโครงการนี้ไม่มีข้อมูลการทดสอบซ้ำตามช่วงเวลา (Restrike/Retest) ปัจจุบัน Pile Setup จึงถูกนำมาพิจารณาในลักษณะการวิเคราะห์ความไวเชิงสมมติฐาน (Sensitivity Analysis) เพื่อเป็นประเด็นอภิปรายประกอบพฤติกรรมของเสาเข็มในดินเหนียวเท่านั้น มิได้มุ่งเน้นการประเมินเชิงปริมาณโดยตรงจากสภาพสนาม [18], [19]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินและเปรียบเทียบวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา โดยใช้ข้อมูลจากเสาเข็มทดสอบ 5 ต้น เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตหลายวิธีซึ่งนำไปสู่การประเมินแบบผสม และวิธีพลศาสตร์

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก

2.2 ประเมินวิธีต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลการทดสอบจริง

2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธี และเสนอแนะแนวทางในการเลือกใช้วิธีวิเคราะห์

2.4 พิจารณานวทางการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีเพื่อใช้ประกอบการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากข้อมูลภาคสนาม

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก โดยวิเคราะห์ ข้อมูลจากโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา จำนวน 5 ต้น

ประกอบไปด้วยข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) [20] ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม (Static Pile Load Test) [21] และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

3.2 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วิธีการหลัก 3 วิธี ได้แก่ วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) วิธีทดสอบในสนาม Pile Load Test และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method) และนำเสนอวิธีแบบผสม (Combined method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

3.3 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เสาเข็มจากวิธีต่าง ๆ ภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา มิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน ทัวไปสำหรับเสาเข็มตอกในทุกสภาพชั้นดินหรือทุกโครงการ

จากขอบเขตดังกล่าว ผู้วิจัยนำข้อมูลภาคสนามมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากหลายวิธี เพื่อพิจารณาแนวโน้ม ความแตกต่าง และความเหมาะสมของแต่ละวิธีสำหรับใช้ประกอบการประเมินเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา เพื่อประเมินและเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ ได้แก่ วิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต วิธีแบบผสม และวิธีพลศาสตร์โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม

4.1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลเสาเข็มทดสอบจำนวน 5 ต้น ได้แก่ TP-1 ถึง TP-5 โดยข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ ประกอบด้วย 1) ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อใช้พิจารณา ลักษณะชั้นดินและค่าพารามิเตอร์ทางปฐพีวิศวกรรม 2) ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ได้แก่ น้ำหนักลูกตุ้ม ระยะยก และระยะจมของเสาเข็มจากการตอกช่วงท้าย และ 3) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตในสนาม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเสาเข็มทดสอบ 5 ต้น

เสาเข็มทดสอบ	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน)	6	6	6	6	6
ระยะยก (เมตร)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ระยะจมในดิน (เมตร)	7.30	4.53	6.55	6.70	9.00
ระยะจม 10 ครั้ง					
สุดท้าย เซนติเมตร	8	4	4	3.5	5

ที่มา: บริษัท เจ เอ พี วิศวกรรม จำกัด, 2564

ตารางที่ 2 สรุปรพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิธีสถิตยศาสตร์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย
ความลึกของชั้นดิน	Depth	m
จำนวนครั้งการตอกเพื่อใช้	SPT-N	blows/ft
เป็นดัชนีความแน่นของดิน		
หน่วยน้ำหนักของดิน	γ	ton/m ³
กำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	S_u	ton/m ²
ค่าสัมประสิทธิ์ยึดเกาะ	α	-

ที่มา: ผู้วิจัยเรียบเรียงจากรายงานผลการเจาะสำรวจดินของโครงการ

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการทดสอบของเสาเข็ม

รายละเอียด	การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (มิลลิเมตร)				
	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
ค่าการทรุดตัวที่					
60 ต้น	0.76	1.65	1.47	2.24	1.93
ค่าการทรุดตัวที่					
120 ต้น	3.76	6.62	6.61	7.76	14.19
ค่าการคืบตัว	1.39	3.65	3.80	2.85	7.87
ค่าการทรุดตัว					
ถาวร	2.37	2.97	2.81	4.91	6.32

ที่มา: ผู้วิจัยเรียบเรียงจากรายงานการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม ของโครงการ

4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินและค่าพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมของดินตามตารางที่ 2 โดยแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มคำนวณด้วยวิธีแอลฟา (α -method) ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนไม่ระบายน้ำของดินกับแรงยึดเกาะระหว่างดินและผิวเสาเข็ม สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มคำนวณจากผลรวมของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม แล้วหักด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม ดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W_p \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_f = \sum \alpha S_u A_s \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_e = N_c S_u A_p \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่

Q_{ult} แทน กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

Q_f แทน แรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม

Q_e แทน แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

W_p แทน น้ำหนักของเสาเข็ม

α แทน ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor)

S_u แทน ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

A_s แทน พื้นที่ผิวเสาเข็มในชั้นดิน

N_c แทน สัมประสิทธิ์กำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม

A_p แทน พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม

นอกจากนี้ งานวิจัยได้พิจารณาอิทธิพลของ Pile setup ประกอบการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ เนื่องจากเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวอาจมีกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการตอก โดยเฉพาะในส่วนของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มีข้อมูลการทดสอบซ้ำหลายช่วงเวลาหลังการตอก จึงพิจารณาการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็มในลักษณะเชิงเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม แล้วนำมาใช้ปรับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์โดย $\lambda_{setup} = 1.00$ กรณีอ้างอิง (Base Case), 1.25 กรณีเพิ่มเล็กน้อย (Conservative) และ 1.50 กรณีเพิ่มในระดับปานกลาง (Moderate) ดังสมการที่ 4

$$Q_{ult,setup} = \lambda_{setup} Q_{skin} + Q_{end} - W_p \dots\dots\dots(4)$$

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต (Static Pile Load Test) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตของเสาเข็มแต่ละต้นถูกนำมาจัดทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุด จากนั้นตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 9 วิธี ได้แก่ Davisson Offset Limit, Brinch Hansen, Mazurkiewicz, Chin-Kondner, De Beer, Decourt, Van der Veen, Fuller and Hoy และ Butler and Hoy [22-31] การใช้หลายวิธีมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าที่ได้จากหลักการตีความที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกรณีที่เกิดการทดสอบยังไม่แสดงจุดวิบัติของเสาเข็มอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 วิธีตีความผลการทดสอบแบบสถิต

ชื่อวิธีตีความ	กลุ่มวิธีในการตีความ
Davisson Offset Limit	เกณฑ์การทรุดตัว/เส้นอ้างอิง
Brinch Hansen 80% Criterion	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Chin-Kondner	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า

ชื่อวิธีตีความ	กลุ่มวิธีในการตีความ
Decourt	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Van der Veen	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Mazurkiewicz	เชิงกราฟิก
De Beer	เชิงกราฟิกจากกราฟ log-log
Fuller and Hoy	เชิงกราฟิก/เส้นสัมผัส
Butler and Hoy	เชิงกราฟิก/เส้นสัมผัสและจุดตัด

4.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสม (Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสมเป็นการนำผลการตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีที่มีความเหมาะสมมาพิจารณาร่วมกัน เพื่อลดการพึ่งพาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว โดยพิจารณาคัดเลือกวิธีจากความเหมาะสมของผลลัพธ์ ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวและความสามารถในการใช้ตีความข้อมูลการทดสอบของโครงการศึกษา

4.4.1 เกณฑ์การคัดเลือกวิธีและการให้คะแนน การคัดเลือกวิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบผสมพิจารณาจากเกณฑ์ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ความเหมาะสมกับกรณีที่ผลทดสอบยังไม่ถึงจุดวิบัติ 2) ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวจากกราฟ Load-settlement 3) ความเสถียรของผลลัพธ์ และ 4) ความชัดเจนของกราฟหรือความเหมาะสมของการแปลงรูปข้อมูล แต่ละเกณฑ์กำหนดคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยคะแนนสูงแสดงถึงความเหมาะสมมากกว่า จากนั้นนำคะแนนรวมของแต่ละวิธีไปคำนวณเป็นน้ำหนักสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แบบผสม

ผลที่ได้ใช้เป็นค่าประมาณเชิงเปรียบเทียบสำหรับประกอบการพิจารณาความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์ภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา โดยใช้สมการที่ 5

$$Q_{u,CM} = \sum_{i=1}^n w_i Q_i \dots \dots \dots (5)$$

โดยที่

$Q_{u,CM}$ แทน ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มตามวิธีแบบผสม

Q_i แทน ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีที่ i

w_i แทน ค่าน้ำหนักของวิธีที่ i

n แทน จำนวนวิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผล

ทั้งนี้ ค่าน้ำหนักของแต่ละวิธีกำหนดภายใต้เงื่อนไข

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.00 \dots \dots \dots (6)$$

เพื่อให้การกำหนดค่าน้ำหนักมีเหตุผลรองรับจึงนำคะแนนรวมของแต่ละวิธีมาแปลงเป็นค่าน้ำหนักตามสัดส่วนของคะแนนรวมทั้งหมด ดังสมการที่ 7

$$w_i = \frac{Score_i}{\sum_{i=1}^n Score_i} \dots \dots \dots (7)$$

โดยที่

$Score_i$ แทน คะแนนรวมของวิธีที่ i

$\sum Score_i$ แทน ผลรวมคะแนนของทุกวิธีที่นำมาวิเคราะห์

4.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลการตอกเสาเข็มของเสาเข็มทดสอบแต่ละต้น ได้แก่ น้ำหนักลูกตุ้ม ระยะยก และระยะจมของเสาเข็มจากการตอกช่วงท้าย เพื่อนำมาประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มด้วยสูตรพลศาสตร์ในการศึกษานี้ใช้ Hiley Formula เป็นสูตรที่พิจารณาประสิทธิภาพของระบบตอก การสูญเสียพลังงาน และการยุบตัวเชิงยืดหยุ่นของระบบตอกเสาเข็มและ Engineering news formula พิจารณาจากพลังงานของลูกตุ้มและระยะจมของเสาเข็มต่อการตอกหนึ่งครั้ง

Hiley formula

$$Q_u = \left[\frac{e_p WH}{\left(s + \frac{C_c + C_p + C_q}{2} \right)} \right] \left[\frac{W + n^2 P}{W + P} \right] \dots \dots \dots (8)$$

โดยที่

Q_u แทน กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม

e_h แทน ประสิทธิภาพของค้อนตอก

n	แทน Coefficient of Restitution
C_c	แทน Elastic Compression of Cap Block and Pile Cap
C_p	แทน Elastic Compression of Pile
C_q	แทน Elastic Compression of Soil
s	แทน ระยะที่หัวเสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้งโดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย
W	แทน น้ำหนักของลูกตุ้ม
H	แทน ระยะยก
P	แทน น้ำหนักเสาเข็ม
A	แทน พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
L	แทน ความยาวเสาเข็ม

Engineering news formula

$$Q_u = \frac{W \cdot h}{(s+25)} \dots \dots \dots (9)$$

โดยที่

Q_u	แทน กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม
W	แทน น้ำหนักของลูกตุ้ม
h	แทน ระยะยกของลูกตุ้ม
s	แทน ระยะที่หัวเสาเข็มยุบตัวต่อการตอกหนึ่งครั้งโดยคิดเฉลี่ยการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

สมการนี้มักจะเป็นที่นิยมใช้ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อตอกถึงระดับที่ต้องการแล้วค่าที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณ

ค่าที่ได้จากสูตรพลศาสตร์อาจได้รับอิทธิพลจากสมมติฐานด้านพลังงาน ประสิทธิภาพของระบบตอก ระยะจมของเสาเข็ม และสภาพการตอกในสนาม จึงต้องนำไปเปรียบเทียบกับอีกหลายวิธี

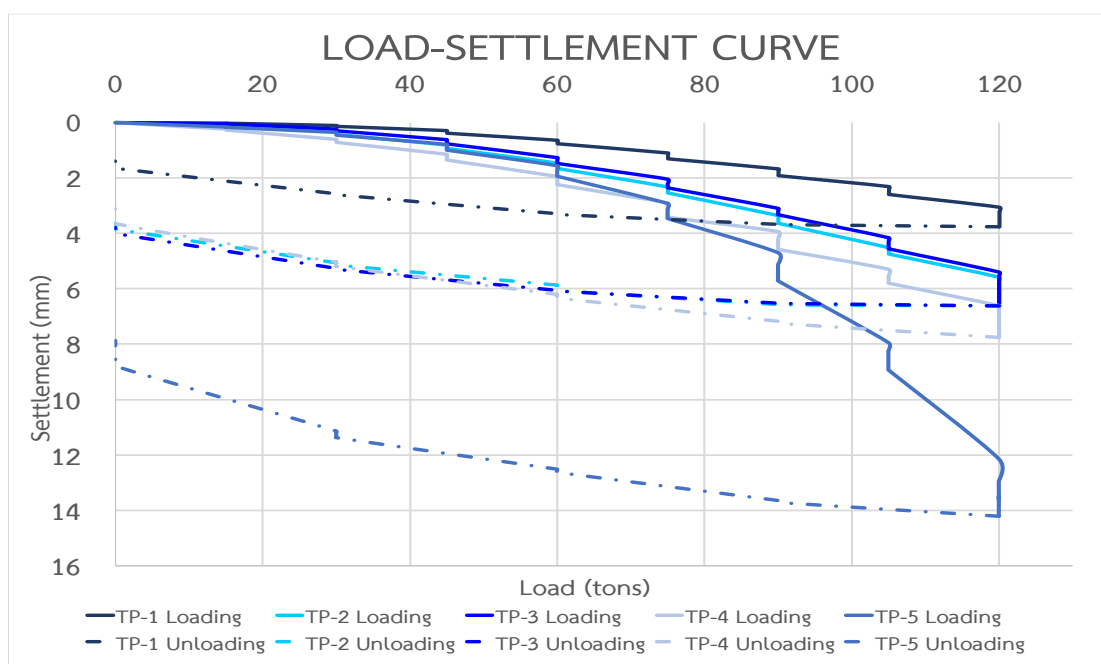
4.6 การเปรียบเทียบและสรุปผลการวิเคราะห์ จากการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับ

น้ำหนักแบบสถิต วิธีแบบผสม และวิธีพลศาสตร์แล้ว ผู้วิจัยนำผลที่ได้จากแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบระหว่างเสาเข็มทดสอบแต่ละต้น เพื่อพิจารณาช่วงค่าประมาณแนวโน้มความแตกต่าง และความสอดคล้องของผลลัพธ์จากแต่ละวิธี จากนั้นจึงนำผลการเปรียบเทียบมาใช้ประกอบการพิจารณานำเสนอวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกภายใต้ข้อมูลภาคสนามของโครงการศึกษา

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต (Static Pile Load Test) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตดำเนินการตามขั้นตอนที่ระบุในรายงานการทดสอบของโครงการ ซึ่งรายงานระบุว่าอ้างอิง ASTM 1143-83 และใช้วิธี Standard load test โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นลำดับขั้นจนถึงร้อยละ 200 ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ หรือ 120 ตัน ทั้งนี้มาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องในปัจจุบันคือ ASTM D1143/D1143M-26 [32]

ผลการทดสอบถูกนำมาจัดทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวในภาพที่ 2 และสรุปตารางที่ 3 เพื่อใช้พิจารณาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตีความ



ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว (Load-Settlement Curve) ของเสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 แยกตามช่วงเพิ่มน้ำหนัก (เส้นทึบ) และช่วงถอนน้ำหนัก (เส้นประ)

จากภาพที่ 2 แสดงพฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 ทั้งในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading Phase) และช่วงถอนน้ำหนักบรรทุก (Unloading Phase) โดยที่ระดับน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน เสาเข็ม TP-1 มีค่าการทรุดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 3.76 มิลลิเมตร TP-2, TP-3 และ TP-4 มีค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 6.61–7.76 มิลลิเมตร ขณะที่ TP-5 มีค่าการทรุดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 14.19 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มแต่ละต้นมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงบรรทุกแตกต่างกันตามสภาพชั้นดินและระดับความลึกที่ฝัง อย่างไรก็ตาม กราฟ Load-settlement ในช่วง Loading ยังไม่ปรากฏจุดเลี้ยวเบนที่แสดงถึงการวิบัติอย่างเด่นชัด ทั้งนี้ ในการนำข้อมูลไปประเมินและตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีต่าง ๆ ในการศึกษาจะใช้เฉพาะข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading phase) เป็นหลัก ตามระเบียบวิธีวิเคราะห์

5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) และการพิจารณา Pile Setup ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มทดสอบอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน โดย TP-3 ให้ค่าสูงที่สุด เท่ากับ 142.95 ตัน ขณะที่ TP-4 ให้ค่าค่อนข้างต่ำเท่ากับ 122.75 ตัน แสดงให้เห็นว่าสภาพชั้นดินและความลึกฝังของเสาเข็มแต่ละตำแหน่งมีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักที่คำนวณได้

ตารางที่ 5 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์

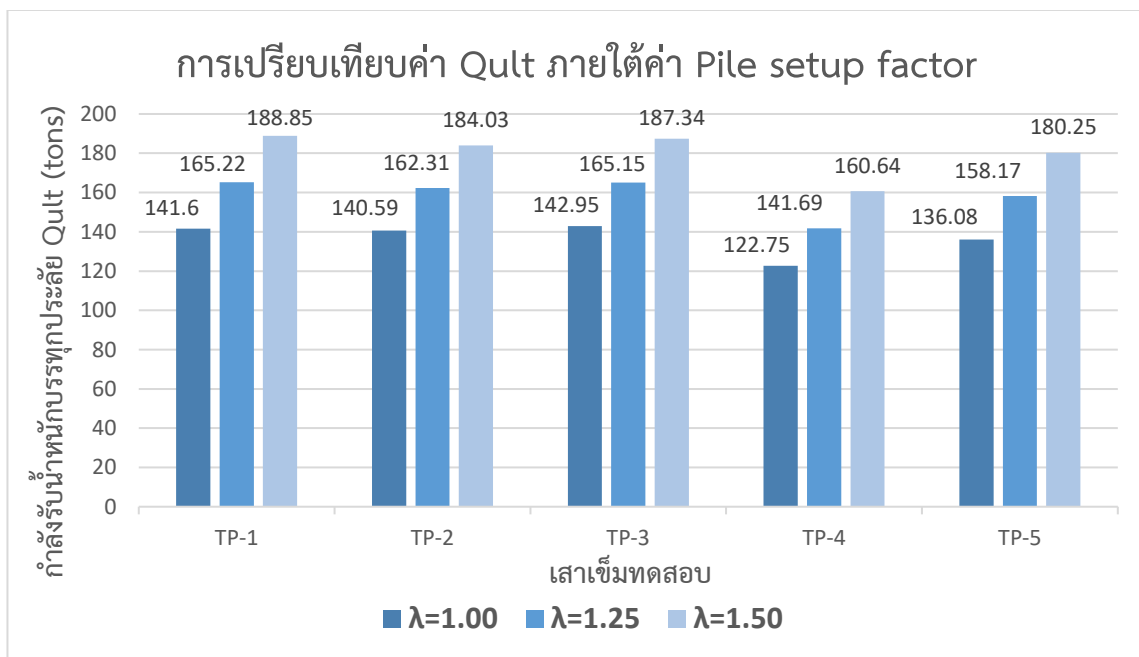
เสาเข็ม	Q_f (ตัน)	Q_e (ตัน)	W_p (ตัน)	Q_{ult} (ตัน)
TP-1	94.49	49.92	2.80	141.60
TP-2	86.88	55.45	1.74	140.59
TP-3	88.78	56.69	2.52	142.95
TP-4	75.77	49.55	2.57	122.75
TP-5	88.34	51.19	3.46	136.08

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ Pile setup ในเชิงเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่า $\lambda_{setup} = 1.00$ 1.25 และ 1.50 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มทุกต้นเพิ่มขึ้น

ตามค่า λ เนื่องจากมีผลต่อแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เชิงสมมติฐานเพื่อพิจารณาแนวโน้มของการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็ม เท่านั้น ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็มโดยตรง

ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์และการพิจารณา Pile Setup

เสาเข็ม	$\lambda=1.00$	$\lambda=1.25$	$\lambda=1.50$
ทดสอบ	(ตัน)	(ตัน)	(ตัน)
TP-1	141.60	165.22	188.85
TP-2	140.59	162.31	184.03
TP-3	142.95	165.15	187.34
TP-4	122.75	141.69	160.64
TP-5	136.08	158.17	180.25



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์ภายใต้ค่า Pile Setup Factor

5.3 ผลการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static Pile Load Test 9 วิธี จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและกราฟ Load – settlement curve กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มนำมาประมาณค่าด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 9 วิธี พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้มีความแตกต่างกันตามหลักการตีความของแต่ละวิธี แม้ใช้ข้อมูลการทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความผล Static Pile Load Test 9 วิธี

วิธีตีความ	TP-1 (ตัน)	TP-2 (ตัน)	TP-3 (ตัน)	TP-4 (ตัน)	TP-5 (ตัน)
Davisson	266.67	150.97	160.23	141.38	105.83
Offset Limit					
Brinch Hansen	130.14	N/A	155.35	N/A	146.49
Mazurkiewicz	143.00	144.00	142.00	148.00	130.00
Chin-Kondner	130.55	143.77	134.32	166.56	132.18
De Beer	66.03	74.50	60.87	28.83	59.36
Decourt	165.65	186.52	174.63	214.90	138.38
Van der Veen	153.50	164.50	156.00	181.00	129.50
Fuller and Hoy	119.83	122.83	120.75	128.93	118.60

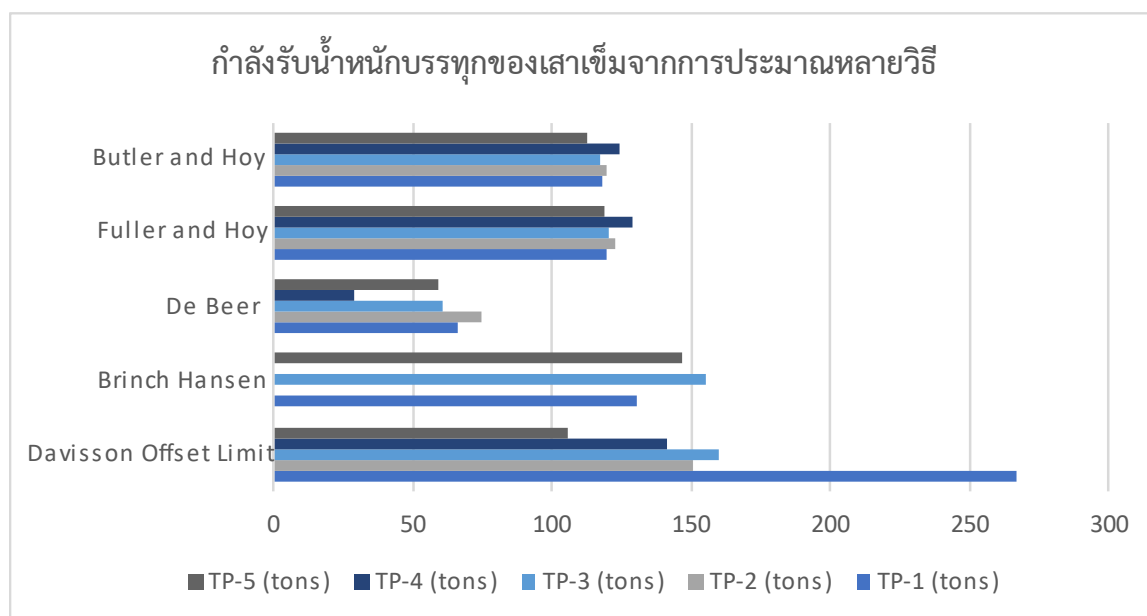
วิธีตีความ	TP-1 (ตัน)	TP-2 (ตัน)	TP-3 (ตัน)	TP-4 (ตัน)	TP-5 (ตัน)
Butler and Hoy	117.91	119.49	117.52	124.56	112.29

จากตารางที่ 7 พบว่าวิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตแต่ละวิธีให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี วิธี Davisson ให้ค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากกราฟ Load-settlement ของเสาเข็มทดสอบส่วนใหญ่ยังมีการทรุดตัวไม่ถึงเกณฑ์ตามวิธี Davisson ทำให้ค่าที่ได้ต้องอาศัยการต่อเส้นอ้างอิงไปตัดกับกราฟการทรุดตัว ซึ่งอาจให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงกว่าพฤติกรรมจริงของเสาเข็ม โดยเฉพาะในกรณีที่กราฟยังไม่แสดงพฤติกรรมวิบัติชัดเจน อย่างไรก็ตาม สำหรับ TP-5 ซึ่งมีค่าการทรุดตัวค่อนข้างสูงกลับให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำกว่าต้นอื่น เนื่องจากการทรุดตัวเกิดขึ้นรวดเร็วเกินเกณฑ์การพิจารณา

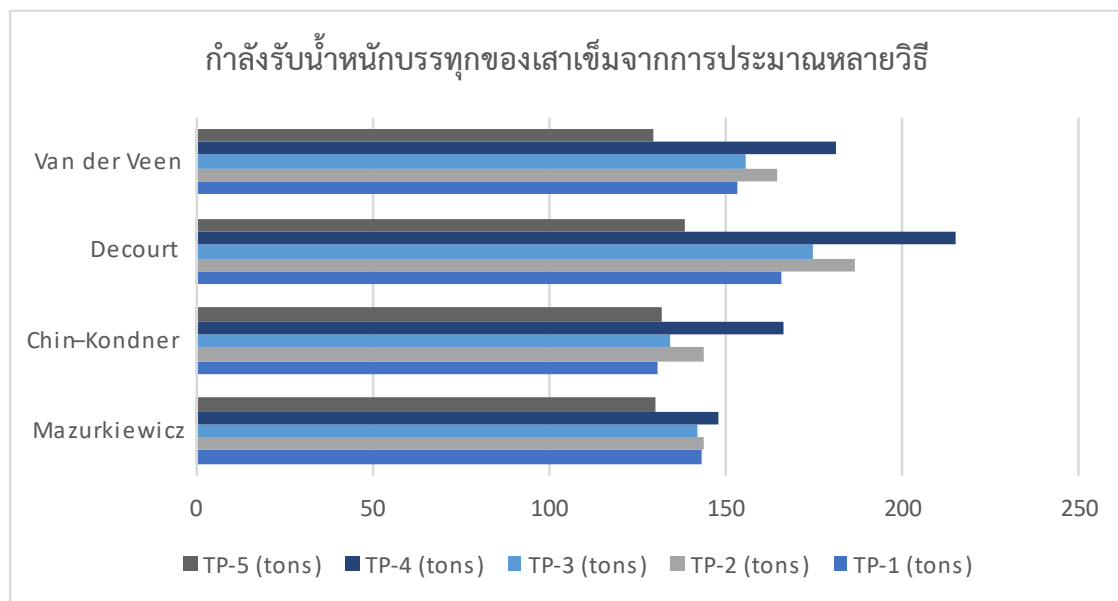
สำหรับวิธี Brinch Hansen ให้ค่าค่อนข้างเกาะกลุ่มกับหลายวิธี แต่ไม่สามารถหาค่าได้ใน TP-2 และ TP-4 เนื่องจากแปลงรูปกราฟแล้วมีแนวโน้มความชันเป็นลบ

ทำให้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของวิธี จึงไม่สามารถตีความผลได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนวิธี De Beer ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำกว่าวิธีอื่นเนื่องจากวิธีดังกล่าวอาศัยการกำหนดจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นสองช่วงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวผลการทดสอบเสาเข็มในงานวิจัยนี้ยังไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างเด่นชัด โดยการเปลี่ยนแปลงความชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้จุดตัดที่ได้จากการกำหนดแนวโน้มช่วงต้นและช่วงปลายเกิดขึ้นที่ระดับน้ำหนักบรรทุกทุกค่อนข้างต่ำ ในขณะที่วิธี Fuller and Hoy และ Butler and Hoy ค่าที่ตีความได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับระดับน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน ภายใต้ลักษณะกราฟ Load-settlement ที่ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน

ส่วนวิธี Mazurkiewicz, Chin-Kondner, Decourt และ Van der Veen ให้ค่าที่เกาะกลุ่มกันในช่วงใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสอดคล้องของแนวโน้มผลลัพธ์จากวิธีที่อาศัยการตีความจากรูปกราฟและการแปลงข้อมูลเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยตามตาราง



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static pile load test 9 วิธี (กลุ่มที่ 1 ค่าประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยผันผวนจากข้อมูลโครงการ)



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static pile load test 9 วิธี (กลุ่มที่ 2 ค่าประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสามารถนำไปประเมินวิธีแบบผสม)

5.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสม (Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีร่วมกัน ภายใต้แนวคิด วิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มแบบผสม หรือ Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าประมาณที่สะท้อนแนวโน้มของข้อมูลภาคสนามและลดข้อจำกัดจากการพิจารณาผลด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง สำหรับการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยพิจารณาเลือกวิธีที่สามารถให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ครบถ้วน มีความสอดคล้องกับข้อมูล Load-settlement และได้รับเลือกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ วิธี Mazurkiewicz, วิธี Chin-Kondner, วิธี Decourt และวิธี Van der Veen ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามวิธีแบบผสมคำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของวิธีที่คัดเลือก โดยพิจารณาค่าน้ำหนักจากความเหมาะสมของแต่ละวิธีภายใต้เงื่อนไขของข้อมูลในงานวิจัยนี้ จากสูตรที่ 5 ถึง 7 และมีเกณฑ์คะแนนและค่าน้ำหนักดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เกณฑ์คะแนนและค่าน้ำหนักของวิธีที่ใช้ในวิธีแบบผสม

วิธีวิเคราะห์	1	2	3	4	คะแนนรวม	ค่าน้ำหนัก
Mazurkiewicz	4	4	4	3	15	0.2239
Chin-Kondner	5	4	4	5	18	0.2687
Decourt	4	4	3	5	16	0.2388
Van der Veen	5	4	4	5	18	0.2687
รวม					67	1.00

หมายเหตุ: พิจารณาจากเกณฑ์ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ความเหมาะสมกับกรณีที่ผลทดสอบยังไม่ถึงจุดวิกฤติ 2) ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวจากกราฟ Load-settlement 3) ความเสถียรของผลลัพธ์ และ 4) ความชัดเจนของกราฟหรือความเหมาะสมของการแปลงรูปข้อมูล ทั้งนี้ค่าที่แสดงในตารางอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการปัดเศษทศนิยม

เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากแต่ละวิธี พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามวิธีแบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก
ประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีแบบผสม

เสาเข็ม	1 (ตัน)	2 (ตัน)	3 (ตัน)	4 (ตัน)	$Q_{u,CM}$ (ตัน)
TP-1	32.01	35.07	39.55	41.24	147.89
TP-2	32.24	38.63	44.54	44.20	159.61
TP-3	31.79	36.09	41.70	41.92	151.50
TP-4	33.13	44.75	51.31	48.63	177.84
TP-5	29.10	35.51	33.04	34.79	132.46

หมายเหตุ: 1) Mazurkiewicz, 2) Chin-Kondner, 3) Decourt, 4) Van der Veen ค่าที่แสดงในตารางอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการปัดเศษทศนิยม 2 ตำแหน่ง

จากตารางที่ 9 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มตามวิธีแบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน โดย TP-4 ให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 177.84 ตัน ส่วน TP-5 ให้ค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 132.46 ตัน ผลดังกล่าวสะท้อนแนวโน้มโดยรวมของวิธีที่คัดเลือกมาใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยไม่เอนเอียงไปตามค่าสูงหรือต่ำผิดปกติจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว

วิธีแบบผสมที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากข้อมูล Static pile load test ที่ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน โดยค่าที่ได้ควรตีความเป็นค่าประมาณเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปปรับใช้ภายใต้เงื่อนไขของข้อมูลโครงการศึกษา มิใช่ค่ามาตรฐานทั่วไปที่สามารถนำไปใช้แทนการทดสอบภาคสนามหรือการวิเคราะห์เฉพาะโครงการอื่นได้โดยตรง

5.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์จาก Hiley Formula และ Engineering News Formula แสดงในตารางที่ 11 พบว่า Hiley Formula ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน ส่วน Engineering News Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–

210.53 ตัน โดยค่าที่ได้จาก Hiley Formula สูงกว่า Engineering News Formula ในเสาเข็มทุกต้น

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสมการ Hiley formula

ตัวแปร	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
W	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN
H	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m
s	0.0080 m	0.0040 m	0.0040 m	0.0035 m	0.0050 m
e_h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
n	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
P	27.50 kN	16.95 kN	24.49 kN	25.24 kN	33.90 kN
C_p	0.0033 m	0.0044 m	0.0037 m	0.0039 m	0.0033 m
C_q	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m
C_c	0.0114 m	0.0125 m	0.0125 m	0.0125 m	0.0125 m

ตารางที่ 11 ผลการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

เสาเข็ม	Hiley formula (ตัน)	Engineering news formula (ตัน)
TP-1	206.54	181.82
TP-2	273.67	206.90
TP-3	262.46	206.90
TP-4	269.82	210.53
TP-5	230.90	200.00

จากตารางที่ 11 พบว่า Hiley Formula ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงกว่า Engineering News Formula ในเสาเข็มทุกต้น เนื่องจาก Hiley Formula พิจารณาปัจจัยประกอบหลายด้านขณะที่ Engineering News formula เป็นสูตรอย่างง่าย ดังนั้นผลจากวิธีพลศาสตร์ควรใช้เป็นข้อมูลประกอบการเปรียบเทียบ ไม่ควรใช้เป็นค่าตัดสินเพียงวิธีเดียว

5.6 การเปรียบเทียบและสรุปผลการวิเคราะห์ ผู้วิจัยนำผลลัพธ์จากแต่ละแนวทางมาเปรียบเทียบร่วมกันเพื่อพิจารณาความแตกต่างของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธี และเพื่อประเมินแนวโน้มความ

เหมาะสมของผลลัพธ์ภายใต้ข้อมูลภาคสนามของโครงการศึกษา

หลังจากการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีต่าง ๆ การเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสำคัญ เนื่องจากแต่ละวิธีอาศัยหลักการและข้อมูลตั้งต้นแตกต่างกัน วิธีสถิติศาสตร์ประเมินจากพารามิเตอร์ของชั้นดิน วิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิติ สะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการหลุดตัวจากการทดสอบในสนาม วิธีพลศาสตร์อาศัยข้อมูลการตอกเสาเข็มและสมมติฐานด้านพลังงาน ส่วนวิธีแบบผสมเป็นการพิจารณาผลตีความจาก

กราฟ Load-settlement หลายวิธีร่วมกันโดยใช้ค่าน้ำหนักตามเกณฑ์ความเหมาะสมที่กำหนด

จากผลวิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิติยืนยันว่าเสาเข็มทดสอบทุกต้นสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 120 ตัน โดยไม่เกิดการวิบัติอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวเป็นเพียงน้ำหนักสูงสุดของการทดสอบ ไม่ใช่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยตรง ดังนั้น การเปรียบเทียบผลจากหลายวิธีจึงช่วยให้เห็นช่วงค่าประมาณ แนวโน้มของผลลัพธ์ และข้อจำกัดของแต่ละวิธีได้ชัดเจนยิ่งขึ้นแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีต่าง ๆ

เสาเข็ม	วิธีสถิติศาสตร์ (ตัน)	วิธีแบบผสม (ตัน)	Hiley formula (ตัน)	Engineering news formula(ตัน)
TP-1	141.60	147.89	206.54	181.82
TP-2	140.59	159.61	273.67	206.90
TP-3	142.95	151.49	262.46	206.90
TP-4	122.75	177.84	269.82	210.53
TP-5	136.08	132.46	230.90	200.00

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามหลักการวิเคราะห์และข้อมูลตั้งต้นของแต่ละวิธี โดยวิธีสถิติศาสตร์ให้ค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน สะท้อนลักษณะการประเมินที่ค่อนข้างอนุรักษ์นิยม ส่วนวิธีแบบผสมให้ค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ซึ่งอยู่ในระดับกึ่งกลางเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากการนำผลจากวิธีตีความที่คัดเลือกแล้วมาพิจารณาร่วมกัน ขณะที่วิธีพลศาสตร์ให้ค่าสูงกว่าวิธีอื่น โดย Hiley Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering news formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน

เมื่อพิจารณาหลักการของแต่ละวิธี พบว่า วิธีสถิติศาสตร์เป็นการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากหลักการพื้นฐานทางปฐพีวิศวกรรม เพื่อนำมาคำนวณแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มหักลบด้วยน้ำหนักเสาเข็ม ผลที่ได้จึงเป็น

ค่าประมาณเชิงทฤษฎีที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดินและสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

ส่วนวิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิติศาสตร์ เป็นการใช้ข้อมูลจากพฤติกรรมจริงของเสาเข็มในสนาม โดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการหลุดตัว ผลที่ได้จึงสะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักจากการทดสอบจริงมากกว่าวิธีสถิติศาสตร์ แต่ค่าที่ประเมินได้ยังขึ้นอยู่กับความชัดเจนของกราฟ Load-settlement และระดับน้ำหนักสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับวิธีพลศาสตร์เป็นการประมาณกำลังรับน้ำหนักจากพลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มผลจากวิธีพลศาสตร์จึงได้รับอิทธิพลจากสมมติฐานด้านพลังงานและสภาพการตอกในสนามเป็นสำคัญ

ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกไม่ควรพิจารณาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว

เนื่องจากแต่ละวิธีมีสมมติฐาน ข้อจำกัด และความไวต่อข้อมูลภาคสนามแตกต่างกัน ควรใช้หลายวิธีประกอบกัน ผู้วิจัยจึงนำเสนอการพิจารณาร่วมกับวิธีแบบผสม การประเมินมีความรอบด้านและใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมมากขึ้น

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 เสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 ดำเนินการถึงน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน โดยเสาเข็มทุกต้นยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีตีความเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

6.1.2 พฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มแต่ละต้นมีความแตกต่างกัน แม้ทำการทดสอบเดียวกัน ความแตกต่างดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดทดสอบและความแปรผันของสภาพชั้นดินในพื้นที่

6.1.3 วิธีสถิติศาสตร์ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน โดยมีแนวโน้มให้ค่าค่อนข้างต่ำและอนุรักษ์นิยม เนื่องจากการคำนวณจากพารามิเตอร์ชั้นดินและสมมติฐานทางปฐพีวิศวกรรมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าวิธีสถิติศาสตร์มักให้ค่าประเมินต่ำกว่าผลทดสอบจริงในสนาม [12], [13]

6.1.4 การพิจารณา Pile setup ในเชิงเปรียบเทียบพบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เชิงสมมติฐาน ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบ Pile setup โดยตรง

6.1.5 การตีความผล Static pile load test ด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าแต่ละวิธีให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์ โดยบางวิธีให้ค่าสูง บางวิธีให้ค่าต่ำ และบางวิธีไม่สามารถประเมินค่าได้ โดยเฉพาะกรณีกราฟ Load-settlement ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน

6.1.6 วิธี Mazurkiewicz, Chin-Kondner, Decourt และ Van der Veen เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในวิธีแบบผสม มีความสอดคล้องกับแนวโน้มของกราฟ Load-settlement ในโครงการศึกษา

6.1.7 วิธีแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ซึ่งเป็นค่าประมาณในระดับกึ่งกลางเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ช่วยลดผลกระทบจากค่าสูงหรือต่ำผิดปกติของวิธีใดวิธีหนึ่งจากวิธีตีความเป็นแนวทางประกอบการประเมินเชิงวิศวกรรม

6.1.8 วิธีพลศาสตร์ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงกว่าวิธีอื่น โดย Hiley formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering News Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน จึงควรใช้เป็นข้อมูลประกอบการเปรียบเทียบและพิจารณาค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) ร่วมด้วยก่อนนำไปใช้ในการออกแบบสอดคล้องกับข้อสรุปของ [11], [14]

6.2 อภิปรายผลและสรุป การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มไม่ควรพิจารณาจากค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดเพียงอย่างเดียว แต่ต้องพิจารณาอัตราการทรุดตัวร่วมด้วย

สำหรับแนวทางการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีร่วมกันงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางแบบผสม โดยนำผลจากวิธีตีความที่เหมาะสมมาพิจารณาร่วมกันด้วยค่าน้ำหนัก เพื่อช่วยลดอิทธิพลของวิธีใดวิธีหนึ่ง และเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลภาคสนาม การพิจารณาวิธีแบบผสมร่วมกับวิธีอื่นจึงเป็นแนวทางเบื้องต้นที่ช่วยให้การประเมินมีความรอบด้านขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเสาเข็มในการศึกษานี้ไม่ได้ทดสอบจนถึงสภาวะวิบัติจริง จึงไม่มีค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยในสนามมาสอบเทียบความแม่นยำโดยตรง การเลือกใช้วิธีตีความจึงเป็นการคัดเลือกตามความสอดคล้องกับแนวโน้มของกราฟทดสอบในพื้นที่ศึกษาเท่านั้น

6.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย

6.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกจำนวน 5 ต้น จากโครงการก่อสร้างในพื้นที่แห่งเดียว ซึ่งสภาพชั้นดินอาจมีลักษณะเฉพาะทางปฐพีกลศาสตร์เฉพาะพื้นที่

6.3.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ Pile Setup ในงานวิจัยนี้เป็นการประเมินและวิเคราะห์ความไวเชิงทฤษฎีจากค่าพารามิเตอร์สมมติเบื้องต้น มิใช่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงอย่างต่อเนื่องในโครงการ

6.3.3 ข้อมูลผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ สถิติศาสตร์ดำเนินการถึงระดับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามการออกแบบ 120 ตัน ซึ่งยังไม่ถึงสภาวะวิบัติจริงในสนาม ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยที่ได้จากแต่ละวิธีตีความจึงเป็นการประมาณค่าโดยการต่อขยายแนวโน้มของกราฟ (Extrapolation)

6.3.4 เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีการทดสอบพลศาสตร์ขั้นสูงในสนาม เช่น การทดสอบวิเคราะห์คลื่นความเค้น (PDA) หรือการวิเคราะห์สัญญาณตอบสนอง (CAPWAP) รวมถึงไม่มีข้อมูลการทดสอบซ้ำตามระยะเวลาหลังการตอก (Restrike/Retest) ข้อมูลด้านพลศาสตร์จึงจำกัดอยู่กับการคำนวณจากสูตรการตอกเสาเข็มและบันทึกการตอกเสาเข็มเท่านั้น

6.3.5 อย่างไรก็ตาม วิธีแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเชิงแนวคิดเพื่อลดความเอนเอียง (Bias) จากการเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเพียงลำพัง โดยยังไม่ได้ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) ร่วมกับฐานข้อมูลการทดสอบขนาดใหญ่หรือข้อมูลการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ไม่ควรใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากสูตรการตอกทางพลศาสตร์ Engineering news formula หรือ Hiley formula เพียงลำพังในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้จำเป็นต้องมีการสอบเทียบร่วมกับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต (Static Load Test)

การทดสอบการวิเคราะห์คลื่นความเค้น (PDA) หรือการวิเคราะห์สมการคลื่น (Wave Equation Analysis) เสมอ

7.1.2 ควรเพิ่มจำนวนข้อมูลเสาเข็มทดสอบให้ครอบคลุมหลายพื้นที่ หลายโครงการ และหลากหลายสภาพชั้นดิน เพื่อให้สามารถประเมินความเหมาะสมและความแม่นยำของแต่ละวิธีได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

7.1.3 ควรมีข้อมูลการทดสอบ Static Pile Load test ที่ดำเนินการจนถึงสภาวะวิบัติอย่างชัดเจน เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบและตรวจสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากวิธีประมาณค่าต่าง ๆ

7.1.4 ควรศึกษาผลของ Pile Setup โดยดำเนินการทดสอบเสาเข็มในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน หลังการตอก เช่น 1 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มอย่างเป็นระบบ

7.1.5 ควรนำแนวทางการวิเคราะห์แบบผสมไปทดสอบกับข้อมูลจากโครงการอื่นเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงเกณฑ์การให้น้ำหนักและประเมินความเหมาะสมของวิธีดังกล่าวในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะขอบเขตการใช้งานของวิธีแบบผสม

7.2.1 ประเภทและขนาดเสาเข็มในโครงการคือ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จรูปประเภทเสาเข็มตอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40x0.40 m ระยะฝังจมในดิน 4.50 – 9.00 m พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มร่วมกับกำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ปลายเสาเข็ม

7.2.2 สภาพชั้นดิน สอดคล้องกับสภาพชั้นดินตอนบนที่เป็นชั้นดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายและดินลูกรัง ค่า SPT-N อยู่ในช่วง 6 -39 blows/ft วางตัวทับบนชั้นดินลูกรังปนกรวดแน่นถึงแน่นมาก ค่า SPT-N อยู่ในช่วง 30 - 66 blows/ft เป็นชั้นที่ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่

7.2.3 คุณภาพข้อมูลของการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามมาตรฐาน ASTM D1143 ต้องมีความต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และไม่มีความคลาดเคลื่อนเชิงกลจากการวัด

7.2.4 ประยุกต์ใช้กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ที่ยังไม่ถึงจุดวิบัติโดยการตีความหลายวิธีร่วมกับกราฟ Load-settlement ในลักษณะข้อมูลเส้นกราฟในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading Phase) ต้องเริ่มแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนความชันอย่างชัดเจน เพื่อให้ฟังก์ชันการคำนวณของแต่ละวิธีสามารถแปลงสมการและต่อขยายแนวโน้ม (Extrapolation) ได้อย่างเสถียร

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ที.พี.ซี คอนกรีตโปรดักส์ จำกัด บริษัท เจเอพี วิศวกรรม จำกัด และบริษัท โอเอ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และข้อมูลประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์และจัดทำบทความวิจัยฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fellenius, B. H. 1980. "The analysis of results from routine pile load tests," *Ground Engineering*, 13(6): pp. 19–31.
- [2] de França, D. C. and Viana, A. H. 2011. "Failure load analysis methods based on instrumented large diameter bored pile load tests," In *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Toronto, Canada: Canadian Geotechnical Society, pp. 1–8.
- [3] Abd Elsamee, W. N. 2012. "Evaluation of the ultimate capacity of friction piles," *Engineering*, 4(11): pp. 778–789. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/eng.2012.411100>
- [4] Olgun, M., Yenginar, Y. and Hanati, A. 2017. "Interpreting load-settlement curves of pile foundations by graphical methods," *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(2): pp. 1–10.
- [5] Birid, K. C. 2018. "Evaluation of ultimate pile compression capacity from static pile load test results," In *Advances in Analysis and Design of Deep Foundations*, Cham, Switzerland: Springer, pp. 1–14. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61642-1_1
- [6] Adel, R. and Shakir, R. R. 2022. "Evaluation of static pile load test results of ultimate bearing capacity by interpreting methods," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961: p. 012013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012013>
- [7] Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M. and Tabarsa, A. 2007. "Ultimate bearing capacity of piles from full scale load test interpretations," In *Proceedings of the Sri Lankan Geotechnical Society International Conference on Soil and Rock Engineering*, Colombo, Sri Lanka: Sri Lankan Geotechnical Society, pp. 211–218.
- [8] Król, M. and Rybak, J. 2013. "Accuracy of extrapolation methods for non-failed static load tests," In *Proceedings of the 11th Slovak Geotechnical Conference*, Bratislava, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, pp. 285–294.
- [9] Alselami, N. A. 2020. "New methods for interpret the ultimate axial load capacity of driven square concrete piles," Ph.D. dissertation, Department of Civil and

- Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO, USA.
- [10] Yimsiri, S. and Ratananikom, W. 2025. "Evaluation of ultimate pile capacity based on non-failed load tests: A case study of piles in Bangkok subsoil," *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(7): p. 100153. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100153>
- [11] Tucker, L. M. and Briaud, J.-L. 1988. *Analysis of the Pile Load Test Program at the Lock and Dam 26 Replacement Project*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- [12] Budi, G. S., Kosasi, M. and Wijaya, D. H. 2015. "Bearing capacity of pile foundations embedded in clays and sands layer predicted using PDA test and static load test," *Procedia Engineering*, 125: pp. 406–410. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.101>
- [13] Ratananikom, W. 2018. "Evaluation of bearing capacity of piles by static method," Research report. Chonburi, Thailand: Burapha University. (in Thai)
- [14] Makrrojrit, W. and et al. 2021. "Comparison of pile load capacity from pile load tests and driving formula in sandy soil," In *Proceedings of the 26th National Convention on Civil Engineering (NCCE 26)*, Bangkok, Thailand: Engineering Institute of Thailand. (in Thai)
- [15] Randolph, M. F., Carter, J. P. and Wroth, C. P. 1979. "Driven piles in clay—the effects of installation and subsequent consolidation," *Géotechnique*, 29(4): pp. 361–393. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.361>
- [16] Chen, C. S., Liew, S. S. and Tan, Y. C. 1999. "Time effects on the bearing capacity of driven piles," In *Proceedings of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea: Korean Geotechnical Society, pp. 175–178.
- [17] Komurka, V. E., Wagner, A. B. and Edil, T. B. 2003. *Estimating Soil/Pile Set-Up*. Madison, WI: Wisconsin Highway Research Program.
- [18] Hosseini, M. A. and Rayhani, M. 2017. "Evolution of pile shaft capacity over time in marine soils," *International Journal of Geo-Engineering*, 8: p. 12. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0049-8>
- [19] Pholkainuwatra, P., Eua-apiwatch, S. and Yimsiri, S. 2022. "Experimental study of pile set-up of driven piles in Bangkok clay," *Engineering and Applied Science Research*, 49(1): pp. 96–102. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/easr.2022.11>
- [20] OA Co., Ltd. 2018. "Soil investigation report for highway project," Project report. (in Thai)
- [21] JAP Engineering Co., Ltd. 2021. "Pile load test report for 5 piles, highway project," Project report. (in Thai)
- [22] Davisson, M. T. 1972. "High capacity piles," In *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, Chicago, IL, USA: ASCE Illinois Section, pp. 81–112.
- [23] Hansen, J. B. 1963. "Discussion on hyperbolic stress-strain response, cohesive soils,"

- Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(SM4): pp. 241–242.
- [24] Mazurkiewicz, B. K. 1972. "Test loading of piles according to Polish regulations," Research report No. 35. Stockholm, Sweden: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences.
- [25] Kondner, R. L. 1963. "Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(SM1): pp. 115–143.
- [26] Chin, F. K. 1970. "Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure," In *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, pp. 81–90.
- [27] De Beer, E. E. 1968. "Experimental contribution to the study of bearing capacity of sand," *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 69(1): pp. 44–88.
- [28] Décourt, L. 1999. "Behavior of foundations under working load conditions," In *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz do Iguaçu, Brazil, 4: pp. 453–488.
- [29] Van der Veen, C. 1953. "The bearing capacity of a pile," In *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Switzerland, 2: pp. 84–90.
- [30] Fuller, F. M. and Hoy, H. E. 1970. "Pile load tests including quick-load test method," *Highway Research Record*, 333: pp. 74–86.
- [31] Butler, H. D. and Hoy, H. E. 1976. *Users Manual for the Texas Quick-Load Method for Foundation Load Testing*, Report No. FHWA-IP-77-8. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- [32] ASTM International. 2026. *ASTM D1143/D1143M-26 Standard Test Methods for Deep Foundation Elements under Static Axial Compressive Load*. West Conshohocken, PA: ASTM International. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/D1143_D1143M-26