

การศึกษาการจำลองการตอกเสาเข็มและการจำลองการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

แสงอรุณ ไชยหานาม^{1*} พงศกร พวงชมพู²

คณะวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณ กรุงเทพมหานคร^{1* 2}

อีเมล : chaihanamsangaroon@gmail.com^{1*}

วันที่รับบทความ 21 กุมภาพันธ์ 2567

วันแก้ไขบทความ 19 เมษายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 22 เมษายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจำลองการตอกเสาเข็ม และทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D จากการศึกษารูปแบบการตอกเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ พิจารณาให้แรงในแนวตั้งในการตอกเสาเข็มเป็นแบบพลศาสตร์ กำหนดค่าตัวคูณความถี่ของการตอกเสาเข็มและคลื่นสั้นสะท้อน สัญญาณฮาร์มอนิก เท่ากับ 2500 แอมป์ลิจูด เฟส 0° ความถี่เท่ากับ 50 เฮิร์ต และการจำลองการทดสอบเสาเข็มในแนวนอนพิจารณาให้แรงเป็นแบบสถิตศาสตร์ โดย ผลการ จำลองพบว่าที่แรงสูงสุดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เท่ากับ 1.68 ตัน ค่าแรงสูงสุดในภาคสนามเท่ากับ 1.56 ตัน ค่าการเคลื่อนตัวในแนวนอนสูงสุดได้ค่าเท่ากันเท่ากับ 4.00 มิลลิเมตร ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ได้เท่ากับ 2.71 มากกว่าค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการทดสอบภาคสนามซึ่งได้เท่ากับ 2.60

คำสำคัญ : ทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง คำนวณกับรทุกประลัย วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



Simulation of driven pile and lateral pile load test via finite element method

Sangaroon Chaihanam ^{1*}, Pongsagorn Pongchompu ²

Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
Khon Kaen Campus ^{1*,2}

E-mail : chaihanamsangaroon@gmail.com ^{1*}

Received 21 February 2024

Revised 19 April 2024

Accepted 22 April 2024

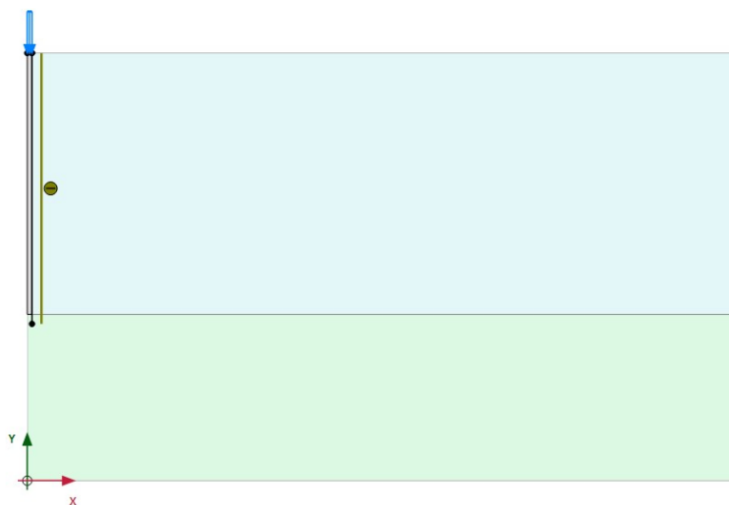
Abstract

This research studied the simulation of foundation pile driving and tested foundation piles by Finite Element Method based on the Plaxis 2D program. From the study of pile driving simulation by Finite Element Method, the vertical force for pile driving was considered to be aerodynamic. The value of pile driving frequency multiplier and vibration waves, harmonic signal was set to be 2500 amplitude, phase 0°, frequency equaling 50 Hertz. Also, the horizontal pile test simulation considered the force to be static. The simulation results were as follows. The maximum force by Finite Element Method was 1.68 tons. The field maximum force was 1.56 tons. The maximum horizontal movement was equal to 4.00 mm. The safety ratio value from the simulation by Finite Element Method was 2.71 higher than the safety ratio from field testing, which was 2.60

Keyword : Lateral Pile Load Test Ultimate Load Test Finite Element method

1. บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหาที่ได้ผลเฉลยใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุดนั้น จะต้องครอบคลุมข้อกำหนดเชิงทฤษฎีทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นเงื่อนไขสมมูล เงื่อนไขคอมแพคติบิลิตี โดยเฉพาะใช้แบบจำลองที่ซับซ้อน เพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของดินได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของดิน ตลอดจนใช้เงื่อนไขขอบเขตที่สะท้อนความเป็นจริงสูงสุดของสภาพปัญหาจริงในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค จะเห็นได้ว่าวิธีที่จะครอบคลุมข้อกำหนดที่ซับซ้อนข้างต้นทั้งหมดนี้ แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยถ้าใช้วิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม โดยปราศจากการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2550) วิธีที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มี 2 วิธีคือ วิธีผลต่างอันตะ (Finite difference method) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาการจำลองการตอกเสาเข็มและทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการจำลองการตอกเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

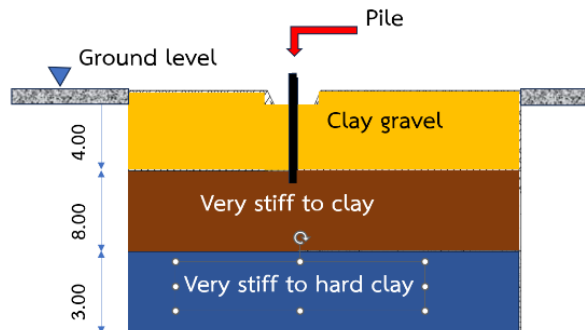
2. วัตถุประสงค์

ศึกษาการจำลองการตอกเสาเข็มและทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3. วิธีการวิจัย

3.1 การตอกเสาเข็ม

3.1.1 การตอกเสาเข็มในภาคสนามโดยข้อมูลชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2 และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากผลเจาะสำรวจดินตามมาตรฐาน ASTM D1586 ในการทดสอบภาคสนาม ประกอบด้วยดิน 3 ชั้น ชั้นที่ 1 เป็นดินเหนียว (Clay) มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) หนา 4 เมตร ชั้นที่ 2 เป็นดินเหนียวแข็ง (Hard) มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) หนา 8.00 เมตร ชั้นที่ 3 เป็นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ระดับน้ำใต้ดินลึก 3.00 เมตร จากผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2



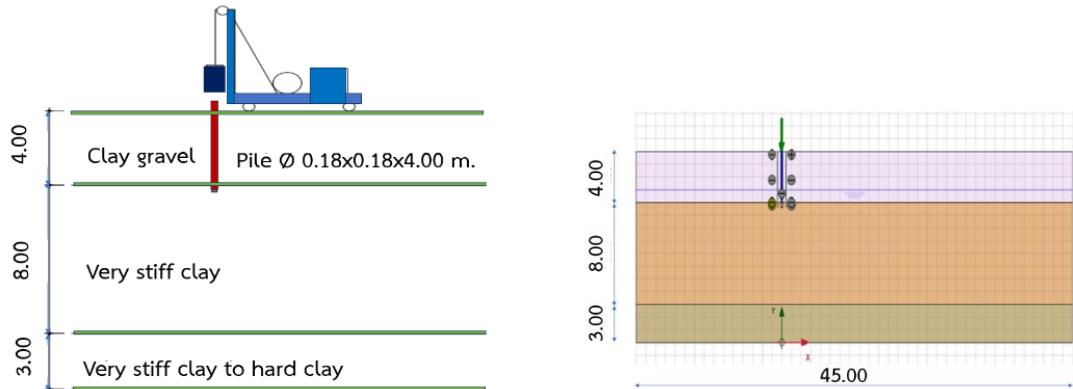
รูปที่ 2 ข้อมูลชั้นดิน

เสาเข็มทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงขนาด 0.18x0.18 เมตร ยาว 4 เมตร โดยใช้ลูกตุ้มทดสอบหนัก 1 ตัน ระยะยกลูกตุ้ม 60 เซนติเมตร การตอกเสาเข็มเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 1143-81 (Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive load. 1994) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เสาเข็มทดสอบ(Test pile)

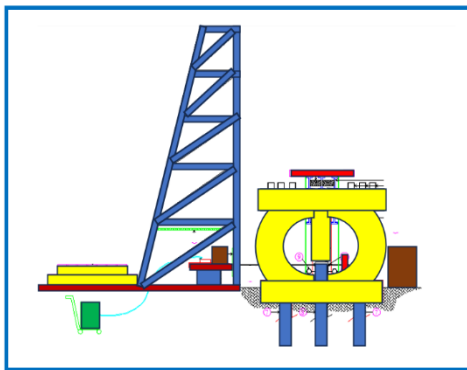
3.1.2 การจำลองการตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม Plaxis 2D โดยจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plain strain) คุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 1 พิจารณาค่าความเค้นในวัสดุที่ใช้กำหนดเป็นอีลิเมนต์ 15 จุด (Node) ขนาดโมเดลกว้าง 45 เมตร ลึก 15 เมตร คำนวณด้วยโครงข่าย (Mesh) แบบปานกลาง (Medium) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบอัตโนมัติ กำหนดแรงในแนวตั้งเป็นแบบพลศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การจำลองการตอกเสาเข็มในภาคสนาม

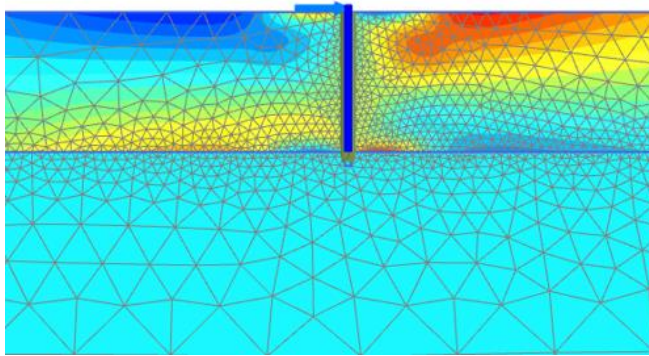
3.2 การทดสอบรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม

3.2.1 การทดสอบรับแรงด้านข้างของเสาเข็มในภาคสนาม การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 3966-90 (Standard Test Method for Piles Under Lateral Loads. 1995) ขั้นตอนการทดสอบ ให้เครื่องมือควบคุมกระจายแรง ครึ่งละ 20% ของ Design Load (0.6 ตัน) โดยใช้แรงสูงสุดถึง 200% (Test Load) ซึ่งเท่ากับ 1.20 ตัน ซึ่งเสาเข็มยังไม่เกิดการประลัย หลังจากนั้นทดสอบใช้แรงสูงสุด 1.56 ตันทำให้เสาเข็มเกิดการประลัย คิดเป็น 260% ของน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มภาคสนาม

3.2.2 การจำลองการรับแรงด้านข้างเสาเข็มด้วยโปรแกรม Plaxis 2D (ชลดา กาญจนกุล. 2565) (สุรภาพ แก้วสวัสดิวงศ์. 2558) โดยจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plain strain) คุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 1 พิจารณา ค่าความเค้นในวัสดุที่ใช้กำหนดเป็นอีลิเมนต์ 15 จุด (Node) ขนาดโมเดลกว้าง 45 เมตร ลึก 15 เมตร คำนวณด้วยโครงข่าย (Mesh) แบบปานกลาง (Medium) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบอัตโนมัติ กำหนดแรงในแนวนอนเป็นแบบสถิตยศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 6



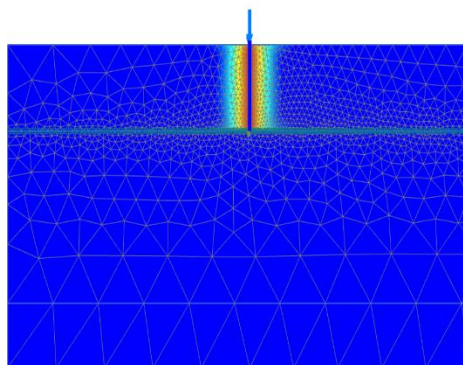
รูปที่ 6 การจำลองการทดสอบรับแรงด้านข้างเสาเข็ม

4. ผลการวิจัย

4.1 การตอกเสาเข็ม

4.1.1 ผลการตอกเสาเข็มในภาคสนาม โดยใช้สมการตอกเสาเข็มของ Hiley โดยให้น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้เท่ากับ 3 ตัน โดยใช้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 4.0 ต้มตอกมีน้ำหนัก 1 ตัน ยกสูง 60 เซนติเมตร เสาเข็มมีความยาว 4.00 เมตร พื้นที่หน้าตัดเสาเข็มเท่ากับ 324 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 18x18 เซนติเมตร) ได้ค่า last ten blow = 1.10 เซนติเมตร (Deendayal. 2016)

4.1.2 การจำลองการตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เป็นการจำลองโดยใช้แรงแบบพลศาสตร์ (Kelvin. 2018) และคุณสมบัติของวัสดุดังแสดงตารางที่ 1 ข้อมูลเพิ่มเติม การนำเข้าข้อมูล การกระจัด ความเร็ว และความเร่ง กำหนดค่าตัวคูณความถี่ของการตอกเสาเข็มและคลื่นสั่นสะเทือน สัญญาณฮาร์โมนิกเท่ากับ 2500 แอมพลิจูด เฟส 0° ความถี่เท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 7



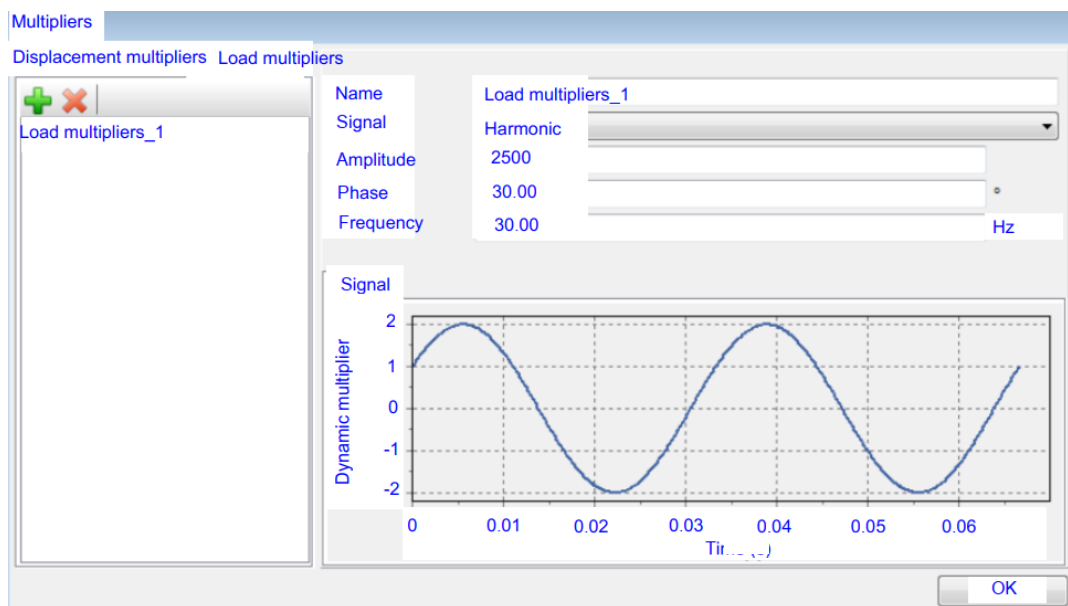
รูปที่ 7 การจำลองการตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

ในการจำลองด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ได้กำหนดพารามิเตอร์ชั้นดิน ดังแสดงในตารางที่ 1

	γ kN/m ³	E kN/m ²	ν	Su.Avg kN/m ²	ϕ degree	ψ degree
Clay (GC)	17.60	3.00×10^3	0.35	60	0	0
Stiff clay (CH)	18.60	7.50×10^3	0.35	150	0	0
Stiff to hard-clay (CL)	21.30	13.50×10^4	0.35	270	0	0
Pile	24.00	30.00×10^6	0.10	0	0	0

การกำหนดค่าพลาศาสตร์เสาเข็ม คลื่น ความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การกำหนดค่าในพลาศาสตร์โมเดลของโปรแกรม Plaxis

4.2 ผลการทดสอบการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม

4.2.1 ผลทดสอบการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มภาคสนาม การให้แรงในแนวนอน ครั้งละ 20% ของน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ (0.6 ตัน) โดยใช้แรงสูงสุดถึง 200% (Test Load) ซึ่งเท่ากับ 1.20 ตัน ส่งผลให้เสาเข็มยังไม่เกิดการประลัย และใช้แรงดึงในแนวนอนเพิ่มขึ้นจนเสาเข็มประลัยที่แรงดึงเท่ากับ 1.56 ตันหรือ 260% เมื่อให้โหลดจนเสาเข็มเกิดการประลัย เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างเสาเข็มเท่ากับ 4 มม. สัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.71 ซึ่งได้ค่าน้อยกว่าการหาด้วยวิธี Mazurkiewich และ Davission เท่ากับ 0.26 และ 0.15 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการให้น้ำหนักทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้าง

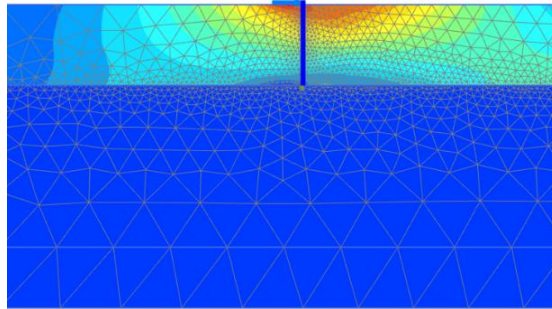
Step	Lateral load	Lateral Movement
	Ton	Inches
1	0.12	0.004
2	0.24	0.008
3	0.36	0.012
4	0.52	0.02
5	0.6	0.024
6	0.72	0.36
7	0.84	0.048
8	1	0.064
9	1.23	0.092
10	1.35	0.104
11	1.48	0.12
12	1.52	0.124
13	1.6	0.136
14	1.7	0.16
15	1.4	0.128

Total displacements U_x (Scale up 1.00×10^3 times) (Times 6477 day)

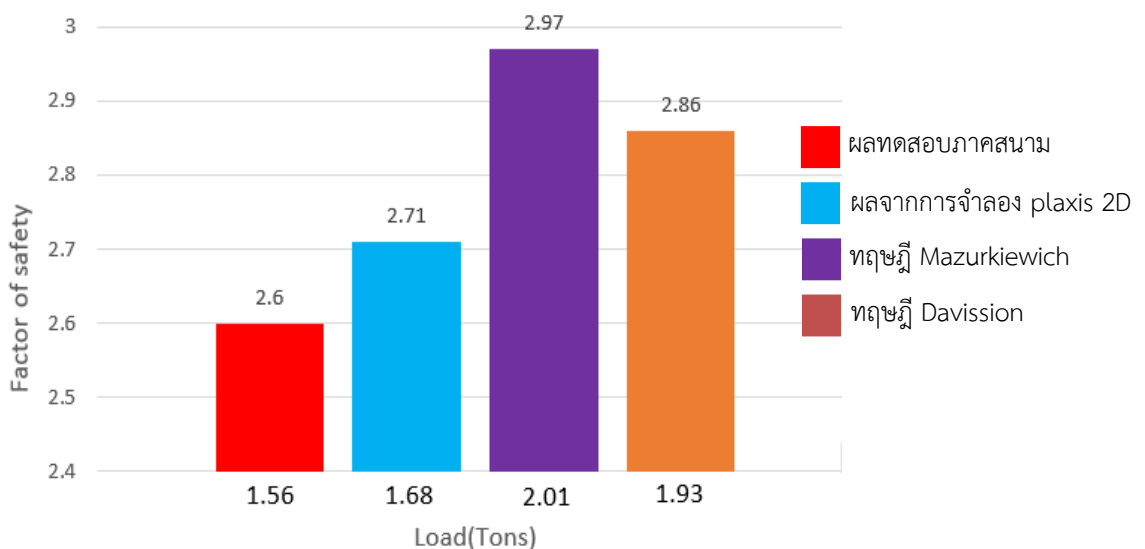
Maximum value 3.944×10^{-3} m. (Element 22 at Node 5554)

Maximum value -0.012×10^{-3} m. (Element 615 at Node 1937)

4.2.2 การจำลองการรับแรงด้านข้างเสาเข็มด้วยโปรแกรม Plaxis 2D (Lin. 2022) ผลการจำลองการให้น้ำหนักเสาเข็มจนเกิดการประลัย ได้ค่าการกระจัดหรือการเคลื่อนตัวในแนวนอนสูงสุดโดยใช้แรงสูงสุดเท่ากับ 1.68 ตัน (ค่าภาคสนามเท่ากับ 1.56 ตัน) ค่าการเคลื่อนตัวในแนวนอนสูงสุดที่หัวเสาเข็มมีความสอดคล้องกับทฤษฎี (Broms.1964 : 39) จากผลภาคสนามและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ค่าเท่ากันเท่ากับ 4.00 มิลลิเมตร ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการจำลองได้เท่ากับ 2.71 ค่าสัดส่วนความปลอดภัยภาคสนามได้เท่ากับ 2.60 (ได้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มากกว่าการทดสอบภาคสนาม 0.11) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการจำลองการทดสอบรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบภาคสนามและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5. อภิปรายผลและสรุปผล

การศึกษาการจำลองการตอกเสาเข็ม และทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D จากการศึกษาค่าความถี่ของการตอกเสาเข็มและคลื่นสั่นสะเทือน สัญญาณฮาร์โมนิกเท่ากับ 2500 แอมพลิจูด เฟส 0° ความถี่เท่ากับ 50 เฮิรตซ์ และการจำลองการทดสอบเสาเข็มในแนวนอนพิจารณาให้แรงเป็นแบบสถิตยศาสตร์ โดยผลการจำลองพบว่าที่แรงสูงสุดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 1.68 ตัน ค่าแรงสูงสุดในภาคสนามเท่ากับ 1.56 ตัน ค่าการเคลื่อนตัวในแนวนอนสูงสุดได้ค่าเท่ากันเท่ากับ 4.00 มิลลิเมตร ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เท่ากับ 2.71 มากกว่าค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากการทดสอบภาคสนามได้เท่ากับ 2.60 ในการออกแบบค่า Safety factor ควรอยู่ระหว่าง 2-2.5 เท่า ฉะนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมากกว่าเล็กน้อย สามารถนำมาออกแบบโดยประมาณได้ แต่ถ้าจะให้เกิดการจำลองการทดสอบที่สมบูรณ์ ควรจะมีการทดสอบทดสอบเสาเข็มจริงจากภาคสนามให้มากกว่า 1 ตัน แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์

อิลิเมนต์ จะได้ค่าการจำลองการทดสอบที่สมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยค่าการจำลองในครั้งนี้ก็สามารถนำไปใช้ได้กับเงื่อนไขที่ต้องการทราบค่าการรับแรงด้านข้างเสาเข็มโดยได้ในเบื้องต้น โดยมีข้อดีคือสามารถประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชลดา กาญจนกุล.(2565). การวิเคราะห์กำลังรับแรงฐานรากเสาเข็มฝังในดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์. (ศูนย์วิจัยด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมโยธา). มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย.
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2550). วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรภาพ แก้วสวัสดิวงศ์. (2558). การวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์สองมิติของเสาเข็มรับแรงด้านข้างในดินเหนียว. (งานวิจัยหลักสูตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ahmad, D., & Mahmoud, G. (2012). "Response of Tapered Piles under Lateral Harmonic Vibrations". *Int J of Geomate*. 2(4); 261-265.
- Bentley. (2020). "Plaxis 2D-Reference Manual". [Online]. Available : [http://communities Bentley .com](http://communities.bentley.com). Retrieved April 15, 2023.
- Broms. (1964a). "Lateral resistance of piles in cohesionless soil". *Journal of soil Mechanics and foundation Division*. 90 : 27-63.
- Deendayal, R., & Muthukkumaran,T.G. (2016). "Dynamic response of single pile located in soft clay underlay by sand". *International Journal of GEOMATE*. 11(26) : 2563-2567.
- Designation D 1143-81. (1994). **Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load**.
- Designation D 3966-90. (1995). **Standard Test Method for Piles Under Lateral Loads**.
- Kelvin, L., & Dominic, O. (2018). "THE RESPONSE OF PILES UNDER TENSION LOADS BASED ON ANALYTICAL METHOD AND FINITE ELEMENT ANALYSIS". *International Journal of GEOMATE*. 15(52) : 129-136.
- Lin, L., & Guowei, S. (2022). "Field test and numerical simulation of A-Frame blade pile system in solar farm,October". *International Journal of GEOMATE*.23(98) : 155 – 163.
- Wanchai, T., (2017). "Deep basement excavation in soft Bangkok clay closed to palaces." *International Journal of GEOMATE*. 12(33) : 85-90.
- Xiaomin, L., & Yonggang, X. (2023). "Research on Dynamic Pile Driving Formulars and driving Feasibility of Extra Long PHC Pipe Piles". *Buildings MDPI* .13(5) : 1-5.