



การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินโดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

Study of Coefficient of Subgrade Reaction by In-Situ Pile Loading Test and Numerical Analysis

เท็ดศักดิ์ เดโชสง (Terdsak Lethaisong)* ดร.พงศกร พวงชมพู (Dr.Pongsagorn Pongchompu)^{1**}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน โดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ ASTM D 1143 และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Plaxis 2D) ของโครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟในทางหลวงหมายเลข 226 ตอน กันทรารมย์ – กม.145+000 ที่ กม.142+255 เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ประโยชน์ในออกแบบและการก่อสร้างในโครงการหรือพื้นที่ใกล้เคียง โดยเสาเข็มเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร ยาว 20.00 เมตร แรงอัดที่ออกแบบ 428.28 ตัน การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ใช้ข้อมูลชั้นดินจากผลเจาะสำรวจของหลุมเจาะ BH-2 แบบจำลองวัสดุเป็นแบบอิลาสติกพลาสติก - มอร์คูลอมบ์ สมมาตรรอบแกน และไม่ระบายน้ำ พบว่าการทรุดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันจัดเป็นดินเหนียวแข็งตรงตามผลเจาะสำรวจ นอกจากนี้ภาพการกระจายความเค้นและการกระจัดทำให้ทราบขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากโครงการ

ABSTRACT

This research is the study of the coefficient of subgrade reaction by static pile load test, ASTM D 1143, and the finite element method Plaxis 2D. The railway bridge construction project on highway No. 226 Kanthararom - Km 145 + 000 at Km 142 + 255 to use the results to be used in the design and construction of projects or nearby areas. The bored pile is 1.00 meters in diameter and 20.00 meters long. The compressive strength designed 428.28 tons. The finite element analysis uses soil layer data from the drilling results of the borehole BH-2. The material model is elastic-plastic Mohr-Coulomb, axisymmetry and undrained analysis. It was found that both methods of settlement and coefficient of pressure resistance were close to each other, classified as hard clay, in accordance with the drilling results. In addition, the image of stress distribution and displacement shows the extent of the project affected.

คำสำคัญ : การจำลองเชิงตัวเลข การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิต ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของดิน

Keywords: Numerical simulation, Pile load test, Coefficient of subgrade reaction

¹Corresponding author: ppoungchompu@gmail.com

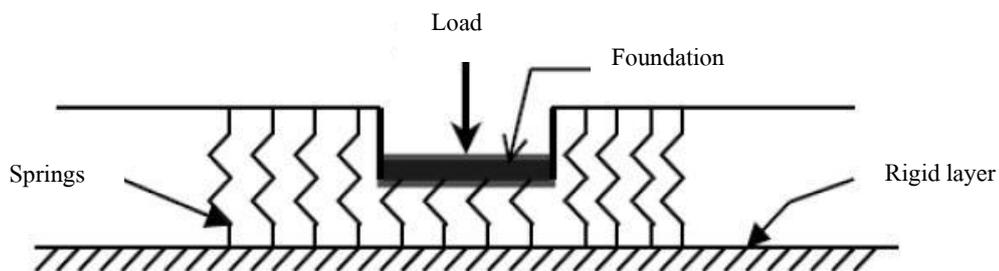
*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

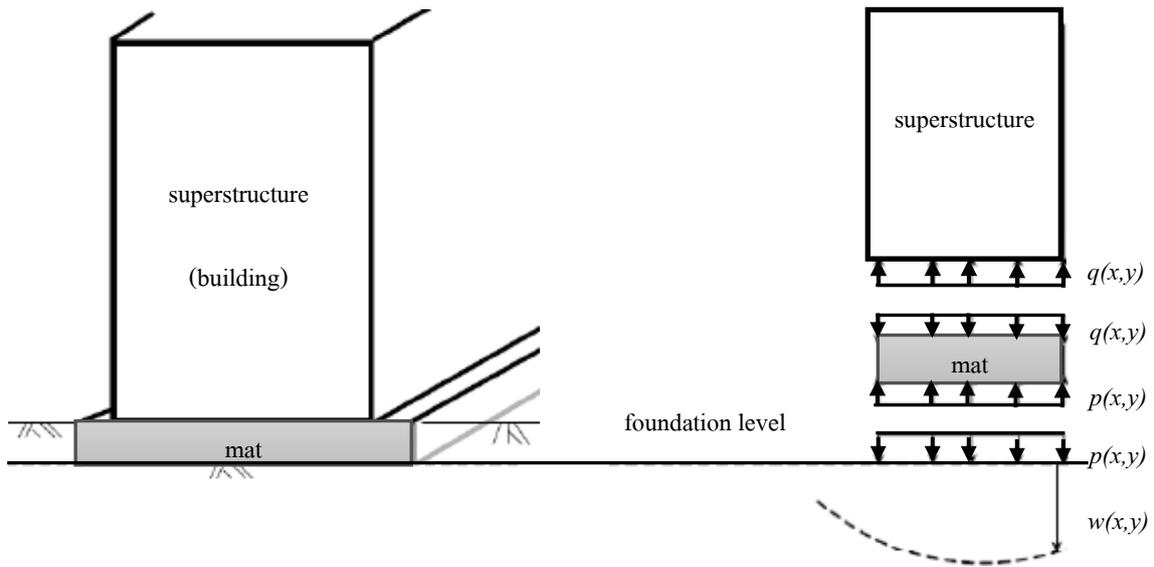
บทนำ

การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน (Coefficient of subgrade reaction) ถูกใช้เป็นครั้งแรกโดย Winkler ในปี ค.ศ.1867 สมมติให้ดินมีพฤติกรรมเป็นเหมือนสปริงหลาย ๆ อันที่ระดับความลึกต่างๆ [1] เพื่อวิเคราะห์การทรุดตัวของมวลดินใต้ฐานรากจากแรงต้านของชั้นดิน [2] การหาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน ในสภาพธรรมชาตินั้นหาได้ยากมาก [3] มีวิธีการหลากหลายในการได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน เช่น การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยแผ่นเหล็ก (Plate bearing test) [4-10] การทดสอบแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซ (California bearing ratio test) [11] วิธีหนึ่งที่ตรงตามพฤติกรรมการรับกำลังโดยการแทนที่เสาเข็มด้วยสปริงในแนวตั้ง (Vertical springs) จากนั้นจึงใส่แรงกระทำต่อฐานรากแล้วหาแรงกระทำที่เกิดขึ้นในฐานรากที่มีสปริงหนุนอยู่ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาเข็มกับการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (Load-Settlement curve) ออกมา [12] ซึ่งค่าที่ได้เป็นผลพลอยได้หลังจากการติดตั้งเสาเข็มแล้ว สามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ออกแบบในการก่อสร้าง ด้วยข้อกำหนดการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ส่วนวิธีการสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical formula) นั้น สร้างขึ้นด้วยประสบการณ์ผู้คิดค้นสูตร เป็นสูตรอย่างง่าย มีการเพิกเฉยทฤษฎีและตัวแปร ดังนั้นการวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินที่ได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) สอบเทียบกับแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วนำแบบจำลองจากการสอบเทียบไปหาค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ประโยชน์ในออกแบบและการก่อสร้างในโครงการหรือพื้นที่ใกล้เคียง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ครอบคลุมข้อกำหนดสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดิน ได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมของดิน ตลอดจนถึงเงื่อนไขขอบเขตที่สะท้อนความเป็นจริงที่สุดของสภาพปัญหาจริงในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค [13] ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Plaxis 2D



ภาพที่ 1 ฐานรากตามแบบจำลอง Winkler (1867) [1]



ภาพที่ 2 การแยกองค์ประกอบเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งระบบของอาคาร Horvath (2002) [2]

โครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟในทางหลวงหมายเลข 226 ตอน กันทรารมย์ – กม.145+000 ที่ กม. 142+255 ก่อสร้างในพื้นที่ราบ เส้นทางสายนี้เป็นเส้นทางหลักที่ใช้เดินทางระหว่างจังหวัดศรีสะเกษกับจังหวัดอุบลราชธานี โดยมีโครงสร้างฐานรากบนเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร ยาว 20.00 เมตร ผลเจาะสำรวจของหลุมเจาะ BH-2 ประกอบด้วยดิน 3 ชั้น ชั้นที่ 1 เป็นดินเหนียวอ่อน (Soft) มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) หนา 1.50 เมตร ชั้นที่ 2 เป็นดินเหนียวอ่อน (Soft) มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) หนา 6.00 เมตร ชั้นที่ 3 เป็นดินเหนียวแข็ง (Hard) มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ระดับน้ำใต้ดิน 1.00 เมตรจากผิวดิน



ภาพที่ 3 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสถานที่ทำวิจัย (15.107905, 104.654180) <https://www.google.co.th/maps>

วิธีการวิจัย

1. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม การวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1143

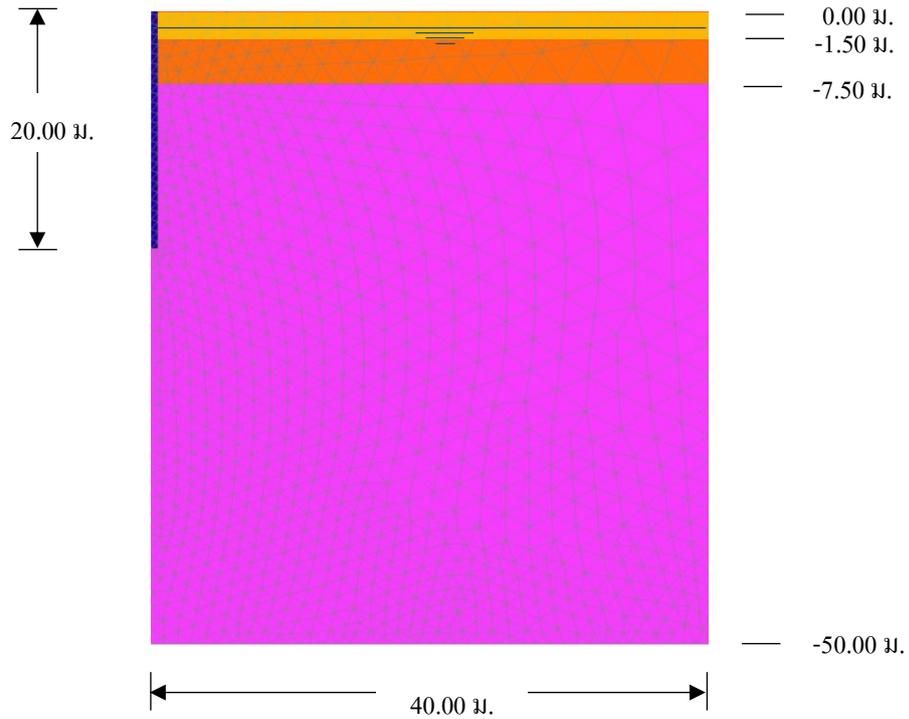
1.1 ให้น้ำหนักบรรทุกแบบวงรอบซ้ำ (Cyclic load test) โดยเพิ่มแรงอัดครั้งละ 25 เปอร์เซ็นต์ของแรงอัดที่ออกแบบจนถึง 250 เปอร์เซ็นต์ของแรงอัดที่ออกแบบและลดแรงอัดครั้งละ 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงอัดที่ออกแบบ (แรงอัดที่ออกแบบ 428.28 ตัน สัดส่วนความปลอดภัย 2.5 แรงอัดทดสอบเท่ากับ 1,070.70 ตัน)

1.2 การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแต่ละขั้นตอน ต้องรักษาน้ำหนักบรรทุกนั้นๆ อย่างน้อยที่สุด 1 ชั่วโมง หากอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.25 มม. ต่อชั่วโมง ให้ขึ้นน้ำหนักถัดไปได้ แต่ถ้าอัตราการทรุดตัวเกิน 0.25 มม. ต่อชั่วโมง ให้ค้ำน้ำหนักบรรทุกนั้นๆ ไว้จนครบ 2 ชั่วโมง แล้วจึงขึ้นน้ำหนักบรรทุกถัดไป

1.3 ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบและน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ให้ค้ำน้ำหนักบรรทุกไว้อย่างน้อย 12 ชั่วโมง เว้นแต่การจมของหัวเสาเข็มเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

1.4 การลดน้ำหนักบรรทุก ลดจนถึงศูนย์อ่านค่าคืนตัวจนกระทั่งการคืนตัวจะหยุดและต้องการคืนตัวเป็นเวลาไม่มากกว่า 1 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการจำลองพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 ม. ยาว 20.00 ม. โดยใช้พารามิเตอร์คุณสมบัติทางวิศวกรรมจากผลเจาะสำรวจของหลุมเจาะ BH-2 จำลองปัญหาเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetry) เมื่อหมุนรอบแกนในแนวดิ่งซึ่งเป็นแกนสมมาตรปัญหาจะเป็นปัญหาความเครียดระนาบซึ่งการยึดหรือหดตัวในทิศทางเชิงมุมจะเท่ากับศูนย์ [14] วัสดุที่ใช้กำหนดเป็นอีลิเมนต์แบบ 15 จุด (Node) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบอึดโนมัตริ มิติในแนวราบเท่ากับสองเท่าความยาวของเสาเข็ม (2L) และสัดส่วนในแนวดิ่งเท่ากับสองจุดห้าเท่าของความยาวเสาเข็ม (2.5L) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นแบบอิลาสติกพลาสติค - มอร์คูลอมบ์ (Elastic-Plastic Mohr-Coulomb) การวิเคราะห์เป็นกรณีไม่ระบายน้ำ (Undrained analysis) และใช้ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) จากการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) [15] ค่าโมดูลัสของดินเท่ากับ $500 S_u$ [16] และพารามิเตอร์อินเตอร์เฟส (R_{inter}) เท่ากับ 1 [17]



ภาพที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 ม. ยาว 20.00 ม.

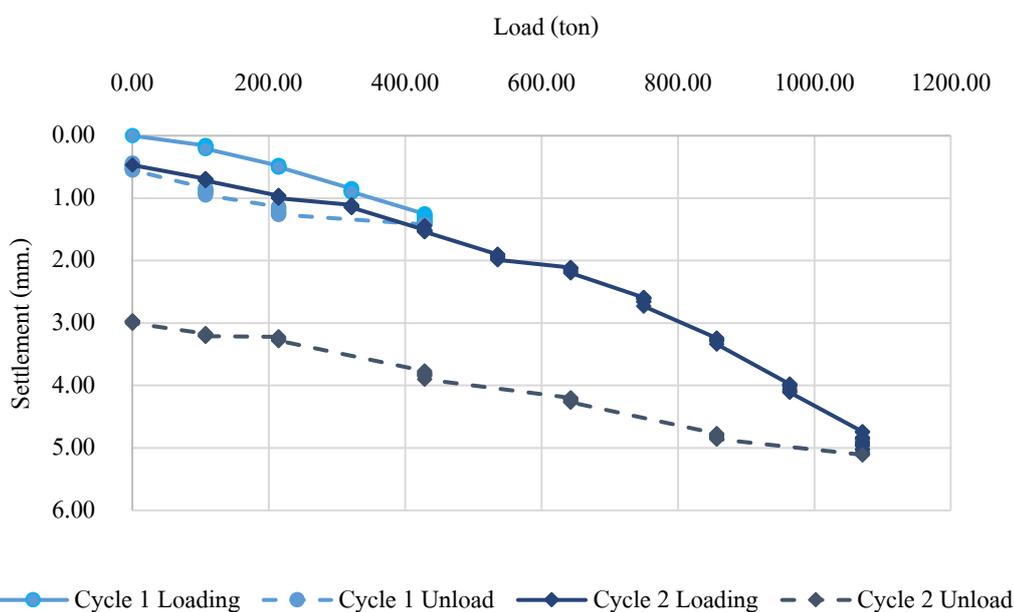
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

| | γ kN/m ³ | E kN/m ² | ν - | S_u kN/m ² | ϕ degree | ψ degree |
|---------------------|-------------------------------|------------------------|------------|----------------------------|------------------|------------------|
| Layer1- Clay(CL) | 20.000 | 6.12x10 ⁴ | 0.35 | 66.70 | 0 | 0 |
| Layer2- Clay(CH) | 20.429 | 1.23x10 ⁵ | 0.35 | 103.00 | 0 | 0 |
| Layer3- Clay(CL) | 22.000 | 6.43x10 ⁵ | 0.35 | 266.67 | 0 | 0 |
| Pile | 23.536 | 2.15x10 ⁷ | 0.15 | 0 | 0 | 0 |

ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) ของเสาเข็มเจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 ม. ความยาว 20.00 เมตร

| น้ำหนักบรรทุกทดสอบ | ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม มม. |
|------------------------------------------|-----------------------------|
| Cycle 1 น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 428.28 ตัน | 1.42 |
| Cycle 2 น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 1,070.70 ตัน | 5.11 |



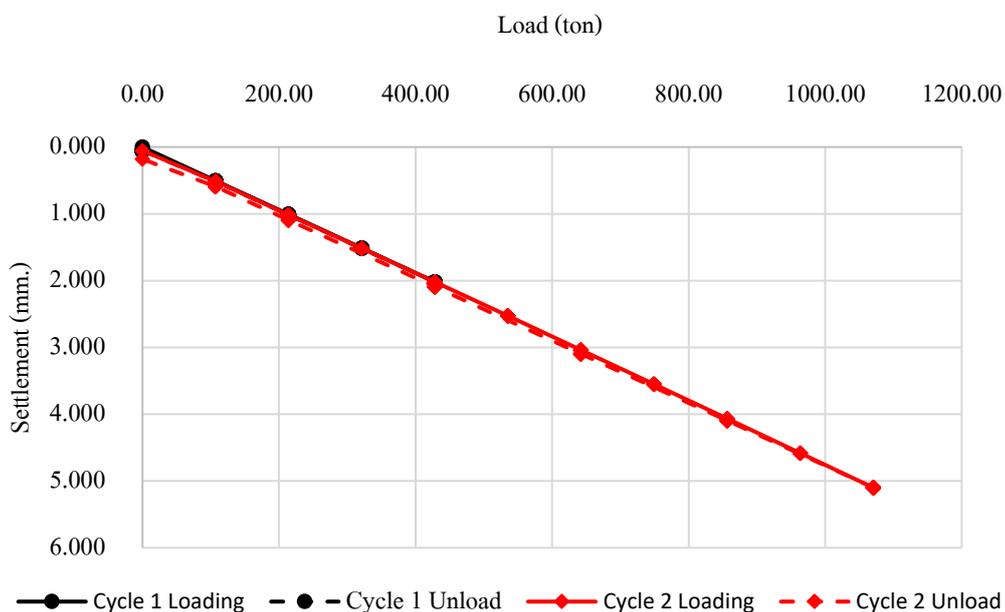
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test)



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก (Static pile load test)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D) ทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 ม. ความยาว 20.00 เมตร

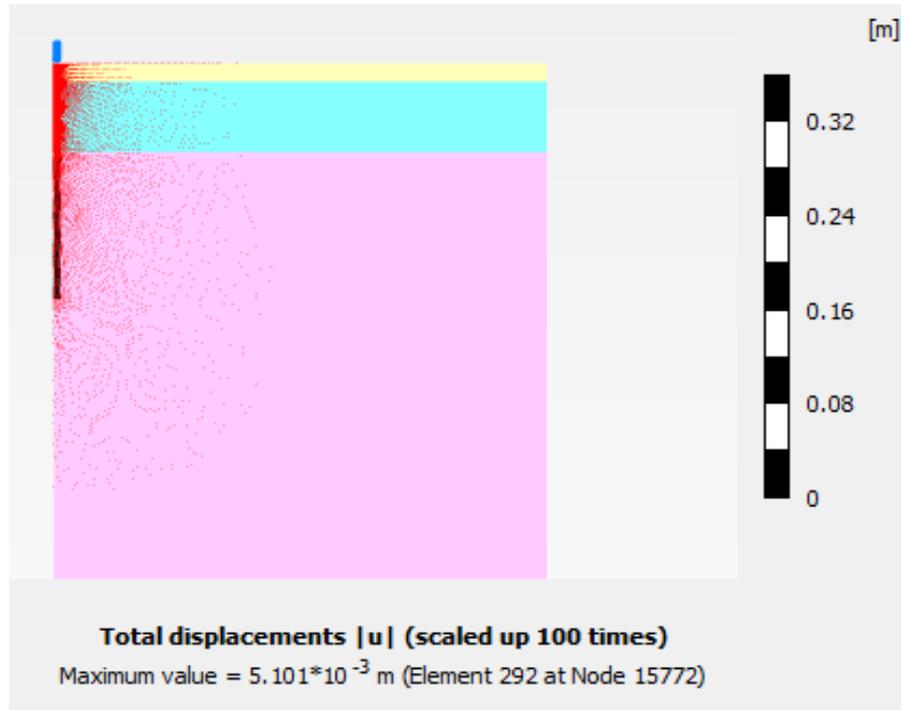
| น้ำหนักบรรทุกทดสอบ | ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม มม. |
|------------------------------------------|-----------------------------|
| Cycle 1 น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 428.28 ตัน | 2.019 |
| Cycle 2 น้ำหนักบรรทุกออกแบบ 1,070.70 ตัน | 5.101 |



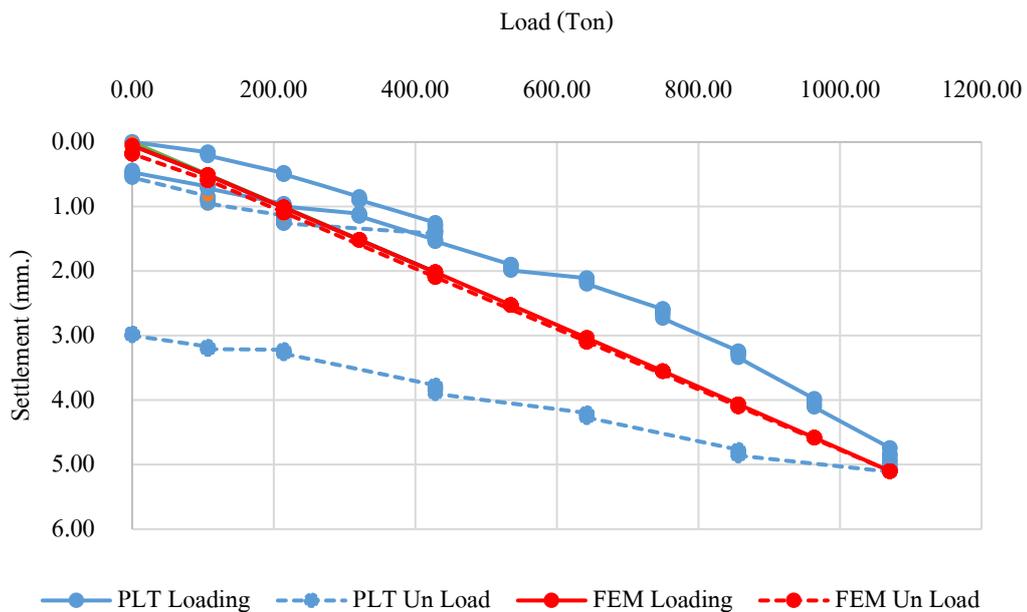
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D)



ภาพที่ 8 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อบนน้ำหนักบรรทุกสูงสุด



ภาพที่ 9 การกระจักรวมมาตราส่วน 100 (Total displacement scale 100)



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Plaxis 2D)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) ภาพที่ 5 น้ำหนักบรรทุกรอบที่ 1 (Cycle load 1) ที่น้ำหนักบรรทุก 428.28 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม 1.42 มิลลิเมตร น้ำหนักบรรทุกรอบที่ 2 (Cycle load 2) ที่น้ำหนักบรรทุก 1,070.70 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม 5.11 มิลลิเมตร และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D) ภาพที่ 7 น้ำหนักบรรทุกรอบที่ 1 (Cycle load 1) ที่น้ำหนักบรรทุก 428.28 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม 2.019 มิลลิเมตร น้ำหนักบรรทุกรอบที่ 2 (Cycle load 2) ที่น้ำหนักบรรทุก 1,070.70 ตัน การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม 5.101 มิลลิเมตร ลากเส้นน้ำหนักบรรทุกตัดกับเส้นกราฟผลทดสอบจะได้จุดตัดบนกราฟแล้วลากเส้นความชันแบบเส้นตัดโมดูลัส (Secant modulus) จากจุดศูนย์ไปที่จุดตัดบนกราฟ ความชันที่ได้จะมีค่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน (Coefficient of subgrade reaction) [18] สำหรับชั้นดินที่มีมากกว่าหนึ่งชั้นดิน ($i=1$ ชั้น, n ชั้น) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของชั้นดินเฉลี่ย [19] ได้ค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดินจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มภาคสนามและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D) เท่ากับ 2,616 เมกะนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรและ 2,620 เมกะนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวแข็ง (Hard) [20] ตรงตามผลเจาะสำรวจดิน จากภาพที่ 8 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จะเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณส่วนบนจุดที่รับน้ำหนักบรรทุกแล้วลดความเค้นชั้นลงตามลำดับไปตามความลึกของเสาเข็มส่วนความเค้นในแนวราบลดลงไปตามแนวรัศมีเช่นเดียวกัน ภาพที่ 9 การกระจายตัวมีความเค้นบริเวณเสาเข็มแล้วกระจายลดลงในแนวราบเท่ากับความยาวของเสาเข็มในแนวตั้งเท่ากับสองเท่าของความยาวเสาเข็มทำให้สามารถทราบขอบเขตที่จะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงจากการก่อสร้าง ภาพที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มกับการทรุดตัวของเสาเข็มผลทดสอบภาคสนามและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วพบว่า การทรุดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ดินแสดงพฤติกรรมอิลาสติกพลาสติกเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกจนถึงศูนย์ สอดคล้องกับแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

อภิปรายและสรุปผลวิจัย

ผลจากการศึกษาการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การต้านแรงกดของดิน (Coefficient of subgrade reaction) โดยการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) ภาคสนามและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D) ของโครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟในทางหลวงหมายเลข 226 ตอน กันทรารมย์ – กม.145+000 ที่ กม.142+255 สรุปได้ดังนี้

1. ค่าการทรุดตัวที่แรงอัดทดสอบสูงสุด 5.11 มิลลิเมตร และ 5.101 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของดินเท่ากับ 2,616 เมกะนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และ 2,620 เมกะนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ
2. ภาพการกระจายตัวของความเค้นและการกระจายตัวของไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้สามารถประมาณขอบเขตพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการก่อสร้างของโครงการ
3. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 2D) สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินที่ซับซ้อน ซึ่งผลวิเคราะห์ที่ได้นำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบและการก่อสร้างในโครงการหรือพื้นที่ใกล้เคียง

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องเคร่งครัดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ เข้าใจข้อมูลภาคสนาม เพื่อผลเฉลยที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟในทางหลวงหมายเลข 226 ตอน กันทรารมย์ – กม. 145+000 ที่ กม.142+255 ที่ให้ข้อมูลความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณคุณโกมลีย์ ชัยรัตนงานเดช ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ที่ให้ข้อมูลองค์ความรู้ในการวิจัยและขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Winkler E. Die lehre von der elastizität und festigkeit. Prague, Czech; 1867.
2. Horvath JS. Soil-Structure interaction research project: Basic SSI concepts and applications overview. Report No. CGT-2002-2. Department of civil engineering. School of engineering. Manhattan college, Bronx, New york, USA; 2002.
3. Intharatchaikit N. Development of finite element program for designing of retaining structure. Tesis, Department of civil engineering. Faculty of engineering. Chulalongkorn university; 2003. p. 5.
4. DIN 18134. Soil testing procedure and testing equipmentplate load test. Publication of government of Germany; 2012.
5. Tompai Z. Conversation between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values. Civil engineering, 52(2); 2008. p. 97–102.
6. Puri P, Singh P, Garg P, Singh M. Effect of sand on strain modulus (Ev2) property of clayey soil. International journal of engineering research & technology IJERT, 6(06); 2017. p. 908-920.
7. Pantelidis L. Determining of the soil strength characteristics through the plate bearing test. Foundations of civil and environmental engineering, 11; 2008. pp. 55-65.
8. Sun X, Jie Zhao M, Wang K. Laboratory test method for second deformation modulus (Ev2), Electronic journal of geotechnical engineering, 21; 2016. p. 6771-6780.
9. Sun X. Foundation model testing of the second deformation modulus Ev2. IOP Conf. Series: Materials science and engineering; 2017. p. 231.
10. Anyang MY, Atarigiya BD, Ofori-Addo R, Allofey NK. Plate load test: Getting it right. Paper presented at the 49th Ghana institution of engineering annaul conference, Ghana; 2018 March.
11. Putri EE, Kameswara RNSV, Mannan MA. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soil using CBR test. Journal of civil Engineering Research, 2(1); 2012. p. 34-40.
12. Wisutmathanakun P. Foundation engineering handbook, Bangkok: Se-education; 2007. p. 318.
13. Likitlersuang S. Finite element method in geotechnical engineering, Chulalongkorn university press; 2007. p. 21.
14. Kumpala A. Prediction of jacked pile capacity for underpinning on the suranaree university of technology campus, Tesis, suranaree university of technology campus; 2005. p. 58.
15. Freitas AC, Pachecom M, Danziger BR, Estimating young moduli in sands from the namalized N60 blow count. Soils and rocks, 35(1); 2012 April. p. 89-98.



16. Plaxis manual; (2016)
17. Brinkgreve RBJ, et.al. Plaxis finite element code for soil and rock analyses version 7.0, A.A Balkema Rotterdam, Netherland, 1st.; 1998. pp.2-1- 2-10.
18. Watthanaphuti B, Chotsangkat A, Siasirikun S, Saowiang K, Prapmak A, Chindawat K. An evaluation of guidelines for bridge approach foundation (Extended research program). National reserch council of Thailand; 2010.
19. Bowles JE. Foundation Analysis and Design. 4th ed., McGraw-Hill Inc., New York, USA; 1988.
20. Terzaghi K. Evaluation of coefficients of subgrade reaction. Geotechnique, Vol. 5, No. 4; 1995. p.41-50.