



# การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียวและทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์

## Mathematical Model of Single Piles Embedded in Clay and Sand Layers Compared with the Dynamic Load Test

ทรงฤทธิ์ พุทธลา<sup>1</sup> สิทธิรักษ์ แจ่มใส<sup>1</sup> จตุรงค์ ศรีทอง<sup>1</sup> กัญญาภัค จอดนอก<sup>1</sup> ปรีชาศาสตร์ มีเกาะ<sup>1</sup> ดำเกิง จันทร์ส่อง<sup>1</sup> และสหलग Homwuttiwong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เลขที่ 680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หมู่ที่ 7 245 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

Songrit Puttala<sup>1</sup>, Sittirik Jamsei<sup>1</sup>, Jaturong Srithong<sup>1</sup>, Kanyapak Jodnok<sup>1</sup>, Preechasart Meekoh<sup>1</sup>, Dumkerng Jansong<sup>1</sup> and Sahalaph Homwuttiwong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil and Architecture, Faculty of Industrial Technology Sakon Nakhon Rajabhat University 680 Nittayo Road, That Choeng Chum Sub-District, Mueang District, Sakon Nakhon Province, 47000, Thailand

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Mahasarakham University 245 Moo 7, Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150 Thailand

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: sahalaph.h@msu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-1661-3955

Received: 26 March 2022, Revised: 18 October 2022, Accepted: 19 October 2022

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่ตอกลงในบริเวณที่มีชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อนและลึกลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ส่วนปลายของเสาเข็มไปหยั่งอยู่บนชั้นทรายแน่น ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ทำการจำลองและวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.35x0.35x12.00 เมตร รับน้ำหนักบรรทุก 490 กิโลนิวตันและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 2.5 เท่า ทำการจำลองเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาเข็มจนถึง 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ จากนั้นก็ทำการลดน้ำหนักบรรทุกลงจนหมด จากการจำลองจะได้น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวและค่าการทรุดตัว นำผลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Pile Load Test (DLT) จำนวน 8 ต้น จากผลการวิเคราะห์พบว่า การทดสอบเสาเข็มแบบ DLT ส่วนใหญ่มีการทรุดตัว Residual Displacement (RMD) ต่ำกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลอง PLAXIS 2D ทุกช่วงของน้ำหนักบรรทุก แต่ก็พบว่า มีเสาเข็มจำนวน 1 ต้น ที่มีค่าการทรุดตัวสูงกว่าเสาเข็มต้นอื่น ๆ และสูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลองถึงร้อยละ 47 ซึ่งทำให้ผลทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์มีความแปรปรวน ผลการวิเคราะห์ก็ยังพบอีกว่า น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ไม่ได้แปรผันตรงกับค่าการทรุดตัวที่ลดลงและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าสูงระหว่าง 3.0 ถึง 3.7 เท่า และการทดสอบ DLT ควรทดสอบอย่างน้อย 3 ต้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อให้การประเมินน้ำหนักบรรทุกมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ** น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม การทดสอบแบบพลศาสตร์ การทรุดตัวของเสาเข็ม การจำลองทางคณิตศาสตร์



**Abstract**

This research presents mathematical modeling of prestressed concrete piles embedded into the area where the top layer was a soft clay and the stiff clay was a second layer. The end of the pile sat on a dense layer of sand. The PLAXIS 2D was used to model a solid square single pile in the size of 0.35x0.35x12.00 m. The loading capacity was 490 kN with a safety factor of 2.5. The simulation procedure was done by increasing the load up to 2.5 times the designed load, then the load was gradually reduced to zero. From the simulation, the load capacity of the single pile and the settlement were obtained. These results were compared with the results obtained from the Dynamic Pile Load Test (DLT) of 8 piles. The analysis revealed that most of the DLT tests had lower settlement Residual Displacement (RMD) values than the PLAXIS 2D model for all ranges of loading. However, it was found that one single pile had a higher settlement value than the other piles and also higher than the simulation value of about 47%. This resulted in variability in the DLT testing. The analysis also found that the loading capacity of the piles obtained from the DLT testing was not directly proportional to the reduction of settlement and the safety ratio was up to 3.0-3.7 times. And DLT testing should be more than 3 piles for averaged and analyzed in conjunction with PLAXIS 2D for a more reliable load capacity.

**Keywords:** Axial Bearing Capacity, Dynamic Load Test, Settlement of Pile, Mathematical Modeling.

**1. บทนำ**

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการพัฒนาไปค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งการก่อสร้างอาคารในประเทศส่วนใหญ่นั้นยังคงนิยมก่อสร้างด้วยฐานรากแบบมีเสาเข็ม เนื่องจากเป็นระบบฐานรากที่มีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างในสภาพของดินซึ่งมีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ค่อนข้างน้อย ซึ่งหากเลือกก่อสร้างด้วยฐานรากแบบแผ่ ในบริเวณสภาพของดินที่รับน้ำหนักบรรทุกได้ค่อนข้างน้อยนั้น จำเป็นที่จะต้องขยายพื้นที่ของฐานรากเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกของอาคารได้ ดังนั้นจะส่งผลทำให้ขนาดของฐานรากแบบแผ่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับฐานรากแบบระบบเสาเข็ม และในกรณีที่ดินก่อสร้างที่มีจำกัดฐานรากแผ่จึงไม่เหมาะสม ดังนั้นส่วนมากจึงนิยมก่อสร้างฐานรากอาคารเป็นแบบระบบเสาเข็มหรือฐานรากแบบลึก ด้วยเหตุผลที่คำนึงถึงด้านความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ และสภาพของดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง [1]

สำหรับฐานรากระบบเสาเข็มมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อความยาว ขนาด และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เช่น ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน กล่าวคือ ข้อมูลของดินที่ทำการเจาะสำรวจนั้นอาจมีความ

คลาดเคลื่อนทำให้การคำนวณแปรผลคลาดเคลื่อนได้ หรือไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของบริเวณก่อสร้าง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เช่น งบประมาณ การลดระยะเวลาในการก่อสร้าง รวมไปถึงความแปรปรวนของชั้นดิน เป็นต้น เมื่อการเจาะสำรวจชั้นดินเสร็จ จะได้ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างดินในบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง ซึ่งเมื่อนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้มาทำการคำนวณ กำลังน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ขนาด และความยาวของเสาเข็ม ข้อมูลที่ได้นำมาประกอบเพื่อคำนวณออกแบบฐานรากระบบเสาเข็ม ค่ารวมค่าการตอกเสาเข็ม จากการตอกเสาเข็มในสถานที่ก่อสร้าง จะมีการเก็บข้อมูลผลการตอกเสาเข็ม เช่น ความยาวของเสาเข็มที่ตอกได้ ระยะเยื้องในแนวตั้ง ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม 10 ครั้งสุดท้าย (Last Ten Blow) ที่ต้องเป็นไปตามรายการคำนวณ เนื่องจากการตอกเสาเข็มและการควบคุมการตอกนั้นมีความสำคัญต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากระบบเสาเข็ม กระบวนการตอกเสาเข็มจึงมีความสำคัญ ต้องมีการควบคุมการทำงานอย่างมีระบบ โดยวิศวกรหรือผู้ควบคุมงาน ในบางกรณี พบว่าดินบริเวณโครงการก่อสร้างนั้นเมื่อมีสภาพความชื้นสูง จะทำให้สมบัติของดินในบริเวณก่อสร้างเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้



ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง [2] เกิดความแตกต่างเมื่อเทียบกับผลการคำนวณที่ได้ก่อนหน้า และผลที่เสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักได้ตามรายการคำนวณในขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม ทำให้ต้องเพิ่มความยาวของเสาเข็ม หรือต้องตอกเสาเข็มลึกกว่าเดิม เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่วิศวกรผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Pile Load Test, SLT) [3-5] นั้นให้ผลของการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีความแม่นยำมากที่สุด แต่วิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงและใช้เวลานาน ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test, DLT) ตามมาตรฐาน ASTM D4545-12 จึงได้ถูกนำมาประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ทราบผลอย่างรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ อย่างไรก็ตามการทดสอบวิธี DLT ตามมาตรฐานนั้นไม่ได้รับขอบเขตความแม่นยำไว้ เนื่องจากอาจมีผลของความแปรปรวนมาจากหลายปัจจัย เช่น สภาพของดินรอบเสาเข็ม เครื่องจักรที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม สภาพของเสาเข็ม และอื่น ๆ ซึ่งผลกระทบจากปัจจัยที่กล่าวมาทำให้ไม่สามารถกำหนดความแม่นยำในวิธีการทดสอบนี้ได้ [6]

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น หากมีการศึกษาเปรียบเทียบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยนำมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธี DLT เพื่อศึกษาประเมินความแม่นยำของผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี DLT ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ตอกในดิน 3 ชั้น โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D จำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็ม เพื่อหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มตอกผลที่ได้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DLT ที่หน้างานจริง

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

ทำการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4945-12 เป็นการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในแนวแกน และหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มสำหรับฐานรากลึก โดยใช้เครื่องมือ Pile Dynamic Analyzer (PDA) เก็บข้อมูลจากการทดสอบในสนามแล้วนำมาประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนามด้วย Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) [7] โดยใช้การวิเคราะห์แบบแยกน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กำลังที่เกิดขึ้นจากแรงต้านของดินรอบผิวเสาเข็มตลอดความยาว (Skin Friction) และกำลังต้านทานที่ปลายของเสาเข็ม (End Bearing) ซึ่งวิเคราะห์ส่วนของเสาเข็มเป็นแบบยืดหยุ่น (Linear-Elastic) และชุดข้อมูลของดินเป็นแบบ Elasto-Plastic โดยทั่วไปแรงที่กระทำที่หัวเสาเข็ม และการวัดความเร็วที่ได้จากความเครียดสูงสุดจากแรงกระแทกของค้อนน้ำหนักตอกเสาเข็ม ซึ่งสามารถจะทำการวิเคราะห์โดยการใช้องค์ประกอบของสัญญาณด้วยแรงที่ยอมให้ ตลอดจนระยะเวลาการทดสอบตามความยาวของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ จะมีการสร้างแผนภูมิแรงสถิตเทียบเท่าจากแรงที่กระทำบนหัวเสาเข็มกับการทรุดตัว เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ DLT กับเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรง กำลังอัดของคอนกรีตอัดแรงเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.35x0.35 เมตร ยาว 12 เมตร จำนวน 8 ต้น มีการติดตั้งตัวรับสัญญาณการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องมือบันทึกผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 1 (ข) ส่วนฝั่งแสดงตำแหน่งการเจาะทดสอบชั้นดินและตำแหน่งการทดสอบ DLT ของเสาเข็มแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเสาเข็มที่ทดสอบ DLT ทั้ง 8 ต้น นั้นฝังอยู่ในดินลึก 12 เมตรจากระดับผิวดินเดิมที่ทำการตอกเสาเข็ม โดยในการสร้างแบบจำลอง PLAXIS 2D ได้ใช้ข้อมูลดินที่มีความสอดคล้องกับสมมุติฐานการวิเคราะห์กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเดี่ยวด้วยโปรแกรม CAPWAP ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดสอบแบบ DLT

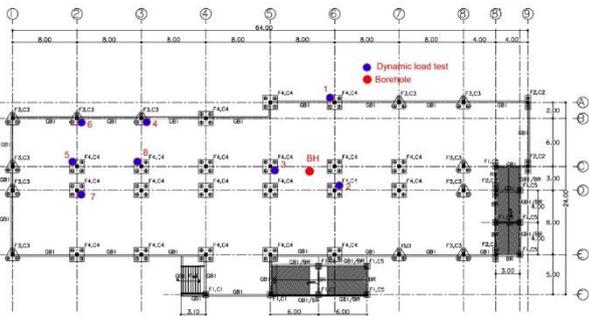


(ก) การติดตั้งตัวรับสัญญาณการทดสอบ



(ข) เครื่อง

รูปที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบ DLT



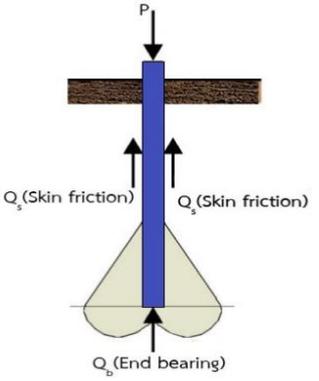
รูปที่ 2 ตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดิน และตำแหน่งการทดสอบ DLT เสาเข็ม ทั้ง 8 ต้น บริเวณก่อสร้าง ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร

### 2.2 การจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

PLAXIS 2D เป็นการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และวิธีการคำนวณเชิงเลข ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ขั้นตอนการหาค่าตอบ และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ จำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และดินทราย ที่มีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเสาเข็มจะรับแรงเสียดทานที่ผิว (Skin Friction) ตลอดความยาวเสาเข็ม และรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ซึ่งสามารถคำนวณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม ได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$Q_a = Q_s + Q_b / F.S. \quad (1)$$

- เมื่อ  $Q_a$  = กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม
- $Q_s$  = กำลังเสียดทานของเสาเข็ม
- $Q_b$  = กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม
- F.S. = Factor Safety 2.5 ถึง 3.0

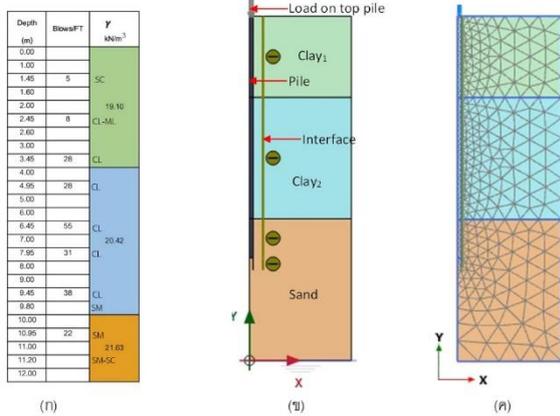


รูปที่ 3 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และชั้นดินทราย

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน บริเวณที่จะทำการก่อสร้างอาคาร โดยแสดงในรูปที่ 4 (ก) ทำการจำลองเสาเข็มตอกที่ฝังลงไปดิน 3 ชั้น โดย ชั้นที่ 1 มีความลึกจากผิวดินเดิมถึงระยะ 4 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อน ชั้นที่ 2 เป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งปานจากความลึก 4 ถึง 10 เมตร และชั้นสุดท้ายที่ความลึก 10 ถึง 17 เมตร เป็นดินทรายที่มีความแน่นมาก มีระดับน้ำใต้ดินที่ความลึก 8 เมตร จากผิวดิน ตารางที่ 1 เป็นการสรุปสมบัติทางกายภาพของดินและเสาเข็มตอก ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

การจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D จะสร้างตาข่ายรูปร่างสามเหลี่ยมแบบ 15 จุด ซึ่งจะมีการประมาณค่าช่วงในการแสดงผล 4 อันดับสำหรับค่าการทรุดตัว และการรวมกันเชิงตัวเลขแบบเกาส์ 12 จุด ในรูปที่ 4 (ข) จะแสดงการจำลองชั้นดิน และเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน ซึ่งในการจำลองพฤติกรรมของดินแบ่งดินออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ Clay<sub>1</sub> Clay<sub>2</sub> และ Sand พฤติกรรมของดินจำลองด้วย Mohr-Coulomb และชั้นดิน Sand กำหนดเป็นแบบ Hardening Soil [8] ขนาดของขอบเขตแบบจำลองมีความกว้าง 5 เมตร ลึก 17 เมตร ซึ่ง Mesh ถูกแบ่งเป็น Medium ในรูปแบบ 3 เหลี่ยม มีจำนวน Element โดยประมาณ 575 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) จำลองให้มีเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงตอกฝังในชั้นดินที่มี

ความลึก 12 เมตร ผ่านชั้นดินทั้ง 3 ชั้น โดยปลายเสาเข็มวางอยู่บนชั้นทรายที่มีความแน่นมาก



รูปที่ 4 (ก) ข้อมูลชั้นดินจากหลุมเจาะ (ข) แบบจำลองชั้นดินเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน (ค) แบบจำลองการสร้าง Mesh

การหลุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยวิเคราะห์การหลุดตัวของเสาเข็มในแนวตั้งที่รับน้ำหนักบรรทุก 490 กิโลนิวตัน และมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 เท่า ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกลงบนเสาเข็ม 0 123 245 368 490 613 736 858 981 1 103 และ 1 226 กิโลนิวตัน แล้วเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ DLT ของแต่ละต้น ดังแสดงในตารางที่ 2 มากำหนดเป็นน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่ทำการจำลองทั้ง 8 ต้น จากนั้นทำการลดน้ำหนักบรรทุกลงตามลำดับจนหมด จะได้ค่าการหลุดตัวของ Mesh ในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนหัวเสาเข็มในแบบจำลอง จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับ การทดสอบ DLT ที่ได้จากสนาม เพื่อประเมินความแม่นยำของการทดสอบ DLT

ตารางที่ 1 สมบัติของดิน และเสาเข็ม

Parameters Linear Elastic /Unit	Pile Concrete	Soil		
		Clay <sub>1</sub>	Clay <sub>2</sub>	Sand
Type	Non-Porous	Undrained	Undrained	Drained
$\gamma_u$ (kN/m <sup>3</sup> )	25.00	19.10	20.42	21.63
$E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	35×10 <sup>6</sup>	38,863	409,526	11×10 <sup>4</sup>
$\nu'$ -	0.20	0.30	0.30	0.30
$c'$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	89.34	235.36	-
$\phi'$ -	-	-	-	39
Depth (m)	12	0-4	4-10	10-17

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

#### 3.1 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธี Dynamic Pile Load Test

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเสาเข็มทั้ง 8 ต้น มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่ามีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ในช่วง 1,490 กิโลนิวตัน ถึง 1,829 กิโลนิวตัน และมีการหลุดตัวของเสาเข็มอยู่ในช่วง 8.11 ถึง 23.36 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบมีค่าการหลุดตัวอยู่ในช่วงแนะนำสำหรับค่าการหลุดตัวที่ยอมให้ได้ไม่เกิน 25 มิลลิเมตร [9] และหากพิจารณาในรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ลดลงนั้นไม่ได้แปรผันตามการหลุดตัวของเสาเข็มที่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแปรปรวนของชั้นดินในบริเวณที่เสาเข็มฝังลงไป จึงอาจส่งผลกระทบต่อค่าการหลุดตัวที่สูงแต่กลับให้ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกที่น้อยกว่า ทั้งนี้การทดสอบ DLT ยังแสดงให้เห็นอีกว่ามีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.7 เท่า เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบที่ 490 กิโลนิวตัน ต่อต้น

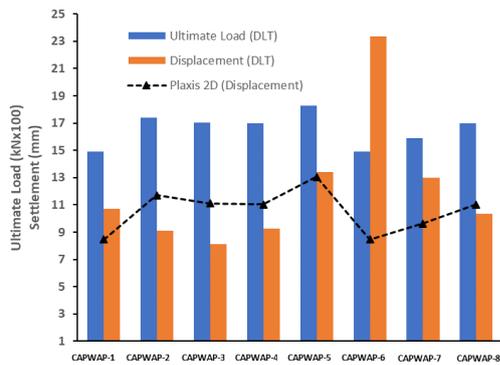
ผลที่ได้จากการทดสอบ DLT เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าการหลุดตัวเทียบกับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็มเดี่ยวโดยอาศัยหลักการวิธี SLT ซึ่งวิเคราะห์ด้วย CAPWAP จะได้ค่าการหลุดตัวจากการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับการหลุดตัวของเสาเข็ม จากนั้นเมื่อปลดน้ำหนักบรรทุกออกจนหมดก็จะได้ค่าการหลุดตัวเนื่องจากการคืนตัว (Rebound) ของเสาเข็ม หลังจากการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าการหลุดจากการคืนตัวหลังจากลดน้ำหนักบรรทุกนั้น เสาเข็มส่วนใหญ่เหลือค่าการหลุดตัวอยู่ในช่วง 1.16 ถึง 3.19 มิลลิเมตร ยกเว้นเสาเข็มต้นที่ 6 (CAPWAP-6) พบว่าค่าการคืนตัวน้อยกว่าเสาเข็มต้นอื่น โดยเมื่อหลังจากลดน้ำหนักออกจนหมดแล้วยังเหลือค่าการหลุดตัวเท่ากับ 8.22 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการหลุดตัวของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าชั้นดินในพื้นที่การตอกเสาเข็มในการทดสอบนี้มีความแปรปรวน เมื่อพิจารณาพร้อมกับตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดินและตำแหน่งการทดสอบ DLT ที่แสดงในรูปที่ 2



ตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ได้จาก PLAXIS 2D และจากการทดสอบ Dynamic Pile Load Test

Pile No.	UTL (kN)	MDM (mm)	RDM (mm)	FS
Plaxis 2D	1,226	6.43	3.25	2.5
CAPWAP-1	1,490	10.73	3.16	3.0
CAPWAP-2	1,740	9.12	3.04	3.6
CAPWAP-3	1,702	8.11	3.10	3.5
CAPWAP-4	1,696	9.24	1.16	3.5
CAPWAP-5	1,829	13.39	2.17	3.7
CAPWAP-6	1,493	23.36	8.22	3.0
CAPWAP-7	1,589	13.00	3.19	3.2
CAPWAP-8	1,697	10.35	2.02	3.5

UTL = Ultimate Load, MDM = Maximum Displacement, RDM = Residual Displacement, FS = Factors Safety



รูปที่ 5 น้ำหนักบรรทุกสูงสุด และการทรุดตัวของเสาเข็มจาก DLT และ PLAXIS 2D

### 3.2 ผลการจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มตอก ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

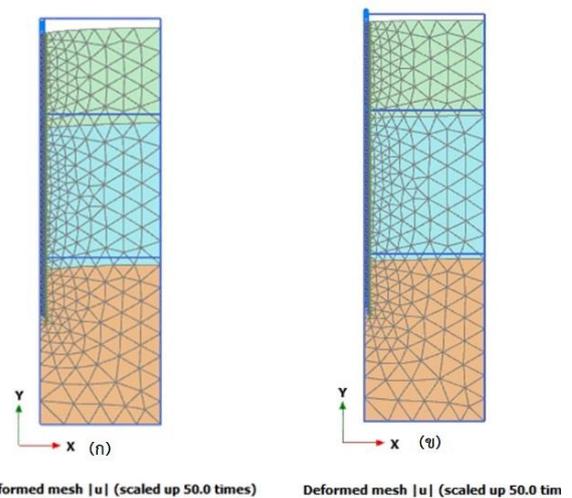
ผลการจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D แสดงถึงค่าการทรุดตัวของ Mesh เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่ 2.5 เท่า ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการออกแบบ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการทรุดตัวของเสาเข็มแบบ SLT ตามมาตรฐาน ASTM D1143-07 [10] โดยผลการวิเคราะห์แสดงการเสียรูปของ Mesh ซึ่งจะวัดจากตำแหน่งการทรุดตัวบริเวณหัวเสาเข็มตอก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) ค่าการทรุดตัวของ Mesh เท่ากับ 6.43 มิลลิเมตร และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกลงจนหมด พบว่ามีการ Rebound ทำให้ค่าการทรุดตัวลดลงเหลือ 3.25 มิลลิเมตร ที่แสดงในรูปที่ 6 (ข) จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการทรุดตัวจะสูงขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าการทรุดตัวมีแนวโน้มลดลงในช่วงที่

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นระหว่าง 1100 ถึง 1220 กิโลนิวตัน เมื่อเทียบกับการเพิ่มน้ำหนักช่วงต้นที่ 123 ถึง 1100 กิโลนิวตัน ทั้งนี้เนื่องจากปลายเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นทรายที่แน่นมากจึงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้สูง [11] ส่วนรูปที่ 7 แสดงถึงการทรุดตัวบริเวณรอบเสาเข็มเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่า สังเกตได้ว่าจะมีความเข้มของสีรอบเสาเข็มในแบบจำลองของชั้นดินด้านบนที่เป็นดินเหนียวอ่อนจากนั้นสีจะลดความเข้มลงในชั้นทรายบริเวณปลายของเสาเข็มอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งเป็นพฤติกรรมการยุบตัวของชั้นดินที่เกิดจาก Stress Distribution โดยอาศัยหลักการทางด้านวิศวกรรมปฐพี

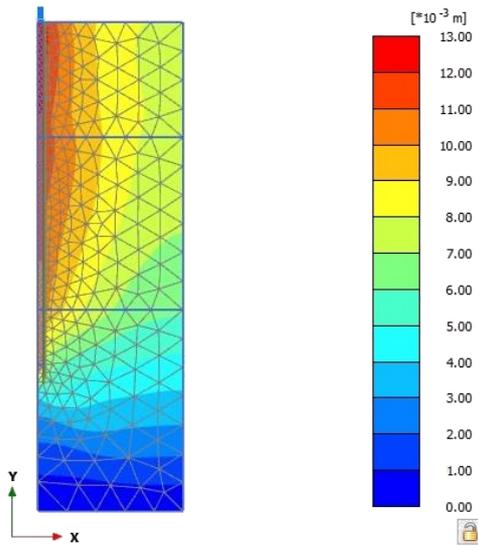
### 3.3 ผลเปรียบเทียบการน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวจากการทดสอบ DLT กับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

ผลการจำลองโปรแกรม PLAXIS 2D เทียบกับผลการทดสอบการทรุดตัวจาก DLT ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ได้จากสนาม จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าการทรุดตัวจากการทดสอบ DLT มีค่าการทรุดตัวคงเหลือน้อยกว่าการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ในขณะที่ปลดน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดและจะสังเกตได้ว่าผลการทรุดตัวของ DLT มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับผลในจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปลายเข็มยังอยู่บนชั้นทราย ผลของการทรุดตัวคง

Load on pile	Displacement (mm)
(a) Max-Load 1226 kN	6.4
(b) Un-Load 0 kN	3.3



รูปที่ 6 การเสียรูปของ Mesh เมื่อรับน้ำหนักสูงสุด และ การเสียรูปของ Mesh เมื่อปลดน้ำหนักออก

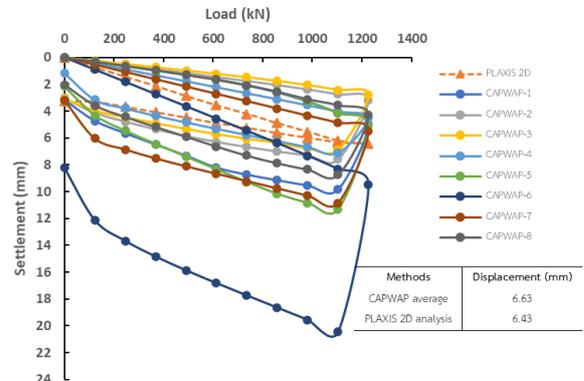


Total displacements [u] (scaled up 50.0 times)

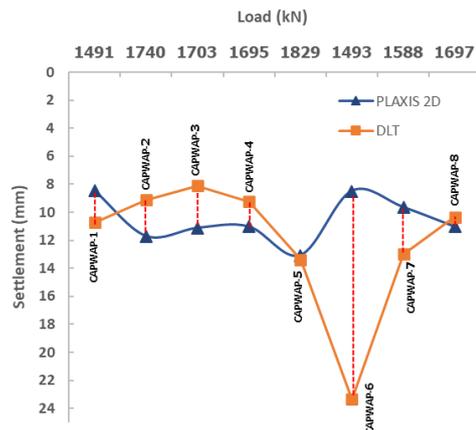
รูปที่ 7 การทรุดตัวรวมของเสาเข็มเดี่ยวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่า

ค้ำของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT เกือบทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า PLAXIS 2D อยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 56 ยกเว้นเสาเข็มตัวอย่าง CAPWAP-6 ที่มีค่าการทรุดตัวสูงกว่า PLAXIS 2D ถึงร้อยละ 47 เป็นที่สังเกตได้ว่าการทดสอบ DLT แบบ Restrike (เป็นการทดสอบหลังทำการตอกเสาเข็มเสร็จแล้ว โดยจะต้องทิ้งระยะเวลาพอสมควรเพื่อให้ดินรอบเสาเข็มนั้นคืนสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ ทิ้งไปแล้วต้องไม่น้อยกว่า 7 วัน หลังการตอกเสาเข็ม) นั้นค่าการทรุดตัวมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากผลของการตอกเสาเข็ม ปั่นจั่นที่ใช้ในการปล่อยตุ้มเหล็กกระแทกลงบนหัวเสาเข็มขณะทดสอบ ความแปรปรวนของชั้นดิน และดินรอบบริเวณที่เสาเข็มหลังจากการตอกเสาเข็ม รูปที่ 8 แสดงกราฟระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่อการทรุดตัวซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ DLT เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D พบว่าค่าการค้ำตัวของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT นั้นมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และค่าการทรุดตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ 2.5 เท่า ของน้ำหนักที่ออกแบบ โดยค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวที่ทดสอบด้วย DLT และ PLAXIS 2D มีค่าเท่ากับ 6.63 และ 6.43 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีนั้นมีค่าการทรุดตัวไม่เกิน 25 มิลลิเมตร [12] ในการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นถือว่า

เสาเข็มต้นที่ทำการทดสอบสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ผู้ออกแบบกำหนด



รูปที่ 8 น้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่าของน้ำหนักที่ออกแบบ



รูปที่ 9 การทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ DLT เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS

ในกรณีที่น่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ DLT ทั้ง 8 ต้น มาทำการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D พบว่าเสาเข็ม CAPWAP-2 ถึง 4 และ CAPWAP-8 มีค่าการทรุดตัวมากกว่า DLT ส่วน CAPWAP-5 และ CAPWAP-8 มีค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับ DLT ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนตำแหน่งการทดสอบ DLT กับตำแหน่งการเจาะทดสอบชั้นดินที่แสดงในรูปที่ 2 นั้น ไม่มีนัยสำคัญกับผลของมีค่าการทรุดตัวที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน ในผลการทดสอบ DLT และพารามิเตอร์ในแบบจำลอง PLAXIS 2D ด้วยดินแบบ Mohr-Coulomb กับการแบ่ง Mesh แบบ Medium ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการวิจัยในครั้งนี้มีความเหมาะสมโดยผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13]



#### 4. บทสรุป

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธี DLT เป็นวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ใช้เป็นทางเลือกในการประเมินผลการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม แต่การทดสอบด้วยวิธีนี้ก็ยังคงมีปัจจัยหลายอย่างที่มีความแปรปรวนในการประเมินและวิเคราะห์ผลการทดสอบ จากผลการทดสอบข้างต้นในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการทดสอบด้วยวิธี DLT นั้นยังคงมีความแปรปรวนในการทดสอบของเสาเข็มบางต้นอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ค่าการทรุดตัวนั้นยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับค่าการทรุดตัวของฐานรากอาคารสำนักงานซึ่งมีค่าการทรุดตัวที่ยอมรับให้เท่ากับ 25 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบแบบ DLT นี้ยังให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.7 เท่าของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ และค่าการทรุดตัวที่เปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D นั้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี DLT ถึงร้อยละ 29.25

ผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ยังสามารถสรุปได้ว่าการจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb เมื่อใช้ร่วมกันกับการแบ่ง Mesh แบบ Medium นั้นมีความเหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง ส่วนการทดสอบ DLT นั้นถึงแม้ว่าจะให้ค่าการทดสอบที่เป็นที่น่าพอใจ แต่ควรมีการทดสอบอื่น ๆ หรือควรสร้างแบบจำลอง PLAXIS 2D เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผล DLT ให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

#### 5. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาการทดสอบกับเสาเข็มที่มีขนาดที่แตกต่างกัน หรือเสาเข็มเจาะ แล้วสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับกรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อเสนอเป็นข้อมูลสำหรับประกอบในกรณีการเลือกใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว แบบ DLT ซึ่งได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน และควรให้ดินรอบเสาเข็มตอกคืนสภาพไม่น้อยกว่า 6 ถึง 28 วัน เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าที่เหมาะสมยิ่งขึ้น [14]

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ ตลอดจนข้อมูลการทดสอบเสาเข็มของโครงการก่อสร้างภายใน มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร และ

ขอขอบคุณความร่วมมือจาก สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ร่วมทำวิจัยในครั้งนี้

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phojan W, Leeanansaksir A, Pongnam TH. A comparision of bearing capacity of pile from pile driving formulas and dynamic load test. RMUTI JOURNAL Science and Technology. 2019;12(3):125-37.
- [2] Ricken Marques V, Belincanta A, Beroya-Eitner MA, Almada Augusto JL, Guelssi E, Zachert H, editors. Effect of soil moisture content on the bearing capacity of small bored piles in the unsaturated soil of Maringá, Paraná, Brazil. MATEC Web of Conferences; 2021: EDP Sciences.
- [3] Rajagopal C, Solanki C, Tandel Y. Comparison of static and dynamic load test of pile. Electron J Geotech Eng. 2012;17:1905-14.
- [4] Osman MA, Ahmed EMA, Ahmed OBEM. Comparison between dynamic and static pile load testing. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2013;18:3615-24.
- [5] Mhaiskar S, Khare M, Vaidya R, editors. High strain dynamic pile testing and static load test—a correlation study. Proc Indian Geotechnical Conference; 2010.
- [6] ASTM D4945. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. 2017.
- [7] CHAN C, CHONG W, Mukhtar RA. Pile Dynamic Analyzer (PDA) Test: An overview of the pile integrity evaluation technique. Progress in Engineering Application and Technology. 2020;1(1):48-54.
- [8] Naveen B, Parthasarathy C, Sitharam T. Numerical modeling of pile load test. Proc, 4th China Int Piling and Deep Foundations Summit. 2014:156-61.



- [9] Bowles JE. Foundation Analysis and Design. 1988.
- [10] ASTM D1143. Standard Test Methods for Deep Foundations under Static Axial Tensile Load. 2007.
- [11] Kishanrao W, Prasad A. Numerical modeling of single pile in a two-layered soil. Int J Mech Prod Eng. 2016.
- [12] Coduto DP, Kitch WA, Yeung M-cR. Foundation Design: Principles and Practices: Prentice Hall USA; 2001.
- [13] Tjie-Liong G. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems. International Journal of Applied Engineering Research. 2014;9(21):8291-311.
- [14] Moayedi H, Mosallanezhad M, Nazir R. Evaluation of maintained load test (MLT) and pile driving analyzer (PDA) in measuring bearing capacity of driven reinforced concrete piles. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017; 54(3):150-4.