

## การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธีสถิตศาสตร์ และจากผลการทดสอบแบบพลศาสตร์สำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ Comparison of Pile Capacity Predicted from Static Method and Dynamic Load Test for Prachuabkirikhan Subsoils

สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรษ์<sup>1,\*</sup> เรืองวิทย์ โชติวิทยานันท์<sup>2</sup> และ นิพนธ์ แสงศรี<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

<sup>2</sup> บริษัท เทสโก้ จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร

<sup>3</sup> บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: Sitthiphat@eng.buu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธีสถิตศาสตร์และจากผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของเสาเข็มจำนวน 13 ต้น จากโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ หัวหิน - ประจวบคีรีขันธ์ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการทำนาคำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มได้จากสมการแปลค่า SPT-N สัมสมการได้แก่ Terzaghi (1967) NAVFAC (1986) Stroud (1974) และ Pitupakorn (1982) ผลการศึกษาพบว่า สมการแปลผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินของ NAVFAC (1986) มีความถูกต้องมากและแม่นยำมากที่สุดในการทำนาคำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มตอกสำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีความเอนเอียงเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.19

คำสำคัญ: น้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม, การทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์

### Abstract

This study compares the pile capacity predicted from static method and dynamic load test of 13 driven piles from Hua Hin to Prachuabkirikhan track doubling construction project. Undrained shear strength obtained from four SPT-N interpretation equations including Terzaghi (1967), NAVFAC (1986), Stroud (1974), and Pitupakorn (1982) are use in the pile capacity estimation and later compare with dynamic pile load test results.

The study found that equation proposed by NAVFAC (1986) is the most accurate and precise with average bias of 1.05 and the coefficient of variation of 0.19

Keywords: Pile capacity, Dynamic Pile Load Test

### 1. บทนำ

เสาเข็ม (Pile) ทำหน้าที่ในการถ่ายแรงจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดิน กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับน้ำหนักของดินรอบเสาเข็ม (Skin friction) และความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ปลายเสาเข็ม (End bearing) การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มนั้นสามารถพิจารณาได้จาก (i) วิธีสถิตศาสตร์ (Static Method) โดยประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินในสนาม (Soil Investigation) (ii) วิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method) เป็นการประมาณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในขณะที่ทำการตอกเสาเข็มโดยใช้ข้อมูลจากการตอกเสาเข็มได้แก่ น้ำหนักของตุ้ม ความสูงที่ยก และระยะที่เสาเข็มจมลงเมื่อตอก วัสดุรองหัวเสาเข็ม และ (iii) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มในสนาม ประกอบไปด้วยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบสถิตย์ (Static pile load test) และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test)

โดยทั่วไปขั้นตอนในการออกแบบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มนั้น ผู้ออกแบบจะทำการพิจารณาข้อมูลชั้นดินเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม จากนั้นจะทำการระบุขนาดและความยาวของเสาเข็มที่ปลอดภัยและเพียงพอต่อความต้องการ ในกรณีของเสาเข็มตอก (Driven pile) หลังจากทราบขนาดและความยาวของเสาเข็มแล้ว ระหว่างที่ทำการตอกเสาเข็มจะมีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ จากการใช้สมการตอกเสาเข็ม (Pile driving formulae) เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพว่าเสาเข็มที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย ในกรณีของเสาเข็มเจาะ (Bored pile) ขั้นตอนนี้ไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากความแตกต่างของขั้นตอนการก่อสร้างระหว่างเข็มตอกและเข็มเจาะ ภายหลังจากติดตั้งเสาเข็มสำหรับโครงการที่มีงบประมาณเพียงพอ จะมีการทดสอบเสาเข็มในสนามเพื่อเป็นการยืนยันกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกอีกครั้ง จะเห็นได้ว่าในกรณีของเสาเข็มตอก กำลังรับ

น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต้นเดียวกันนั้นมีความกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสามค่า กล่าวคือ พิจารณาจากวิธีสถิตศาสตร์ พิจารณาจากสมการตอกเสาเข็ม และพิจารณาจากการทดสอบเสาเข็มในสนาม ส่วนกรณีของเสาเข็มเจาะจะมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสองค่าคือ จากวิธีสถิตศาสตร์และจากการทดสอบเสาเข็มในสนาม

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าช่วงหัวหิน – ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีสถิตศาสตร์และจากผลการทดสอบเสาเข็มในสนามแบบพลศาสตร์

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเจาะสำรวจและทดสอบดินในสนาม

ในประเทศไทยการเจาะสำรวจชั้นดินในสนามส่วนมากเป็นการเจาะดินแบบเจาะล้าง (Wash Boring) โดยใช้เครื่องเจาะแบบสามขา (Tripod) หรือเครื่องเจาะแบบโรตารี (Rotary drilling) ระหว่างการเจาะสำรวจจะมีการทดสอบดินในสนาม Standard Penetration Test (SPT)[1] ทุกๆ 1.5 เมตร จนถึงสิ้นสุดการเจาะสำรวจ การทดสอบด้วยวิธีนี้ได้พัฒนาขึ้นมาราวปี ค.ศ. 1927 ซึ่งในปัจจุบันเป็นวิธีทดสอบที่นิยมใช้กันมากที่สุดและเป็นการทดสอบที่ประหยัดที่สุดที่จะได้ข้อมูลชั้นดินมาใช้ในการออกแบบฐานราก

ขั้นตอนการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) มีขั้นตอนคือ ตอกกระบอกแบบผ่าซีกแบบมาตรฐาน (Split Spoon Sampler) ให้ปลายของกระบอกวางอยู่พอดีกับระดับชั้นหลุมเจาะ จากนั้นทำการตอกจะใช้ตุ้มตอกที่มีน้ำหนัก 140 ปอนด์ (63.5 กิโลกรัม) ในการตอกแต่ละครั้งจะยกตุ้มสูง 30 นิ้ว (762 มิลลิเมตร) ตกลงอย่างอิสระ โดยตอกจะตอกให้กระบอกจมลงในดินเป็นระยะ 18 นิ้ว โดยแบ่งระยะของการตอกเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 6 นิ้ว ค่า SPT-N จะเป็นจำนวนครั้งของการตอก 12 นิ้วสุดท้าย หน่วยของค่า SPT-N จะเป็น ครั้งต่อฟุต (blows/ft) ที่ไม่รวมเอาจำนวนครั้งของการตอก 6 นิ้วแรกเนื่องจากดินส่วนนี้จะถูกรบกวนอย่างมากจากกระบวนการเจาะดิน ในกรณีที่ตอกทดสอบแล้วตอกไม่ลงจะหยุดการทดสอบเมื่อ (i) ตอกเกินกว่า 50 ครั้งแล้วกระบอกจมลงเพียง 6 นิ้ว (ii) ตอกเกินกว่า 100 ครั้งเพื่อให้กระบอกจมลง 12 นิ้ว (iii) ตอกต่อเนื่องกัน 10 ครั้งแล้วกระบอกไม่จมลงเลย ในกรณีที่ไม่สามารถตอกทดสอบจนถึงระยะตามมาตรฐาน 12 นิ้ว จะบันทึกผลการทดสอบเป็นจำนวนครั้งของการตอกต่อระยะที่จมลงไป ตัวอย่างเช่น 85/4 นิ้ว หมายถึงตอกทดสอบ 85 ครั้งแล้วกระบอกจมลง 4 นิ้ว เป็นต้น

### 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและ SPT-N

Terzaghi [2] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวและค่า SPT-N ดังสมการที่ (1)

$$C_u = 6.25N \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

Stroud [3] นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวและค่า SPT-N สำหรับดินเหนียวในสหราชอาณาจักร แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_u = f_1 N_{60} \quad (\text{kPa}) \quad (2)$$

$f_1$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสภาพความเป็นของแข็ง (Plasticity index. PI) โดยที่

$$f_1 = 4.2 \text{ สำหรับค่า } PI > 30$$

$$f_1 = 4 - 5 \text{ สำหรับค่า } 20 < PI < 30$$

$$f_1 = 6 - 7 \text{ สำหรับค่า } PI < 20$$

NAVFAC [4] ได้เสนอสมการอย่างง่ายในการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนจากค่า SPT-N ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$S_u = \frac{2}{3} N \quad (\text{t/m}^2) \quad (3)$$

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ Pitupakorn (1983) [5] ได้เสนอสมการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยจำแนกดินออกเป็นสองประเภทคือ Low Plasticity Clay, CL และ high Plasticity Clay, CH แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$S_u = 0.520N \quad (\text{t/m}^2) \text{ สำหรับ CL} \quad (4)$$

$$S_u = 0.685N \quad (\text{t/m}^2) \text{ สำหรับ CH} \quad (5)$$

สิริญญา และปารีส [6] ได้ทำการศึกษาการทบทวนวิธีการออกแบบฐานรากเสาเข็มปัจจุบันในพื้นที่กรุงเทพมหานคร พบว่า สมการในการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนจากค่า SPT-N ซึ่งเป็นที่นิยมในประเทศไทยคือสมการของ NACFAC (1986) [4] รองลงมาคือสมการของ Stroud (1974) [3] และสมการของ Pitupakorn (1983) [5] ตามลำดับ

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้สมการทั้งสามในการแปลผลว่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการคำนวณและผลจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบพลศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบหาสมการการแปลงค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เหมาะสมกับชั้นดินในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

### 2.3 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate pile capacity) ของเสาเข็มที่ความลึกใดๆ คือผลรวมระหว่างแรงเสียดทานประลัย (Ultimate skin friction) และแรงแบกทานประลัย (Ultimate end bearing) ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b \quad (6)$$

โดยที่

$Q_{ult}$  คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม

$Q_f$  คือ แรงเสียดทานประลัย (ตัน)

$Q_b$  คือ แรงแบกทานประลัย (ตัน)

แรงเสียดทานประลัย (Ultimate skin friction) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$Q_f = \sum (f_s \cdot \Delta L \cdot P) \quad (7)$$

โดยที่

$Q_f$  คือ แรงเสียดทานประลัย (ตัน)

$f_s$  คือ หน่วยแรงเสียดทานประลัย (ตันต่อตารางเมตร)

$\Delta L$  คือ ความลึกของชั้นดินที่พิจารณา (เมตร)

$P$  คือ เส้นรอบรูปของเสาเข็ม (เมตร)

หน่วยแรงเสียดทานประลัย (Unit skin friction) ของเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$f_s = \alpha S_u \quad (8)$$

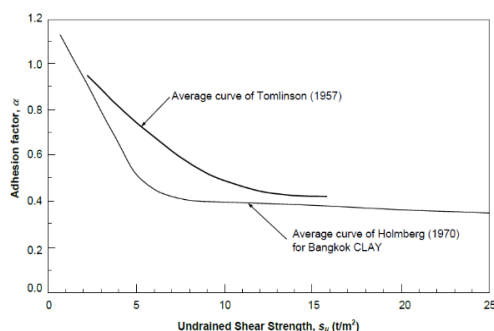
โดยที่

$f_s$  คือ หน่วยแรงเสียดทานที่ผิว (Unit skin friction)

$\alpha$  คือ แฟกเตอร์ยึดเกาะ (Adhesion factor)

$S_u$  คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ค่าแฟกเตอร์ยึดเกาะได้จากกราฟความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ระหว่าง Adhesion factor และ Undrained Shear Strength สำหรับเสาเข็มตอกแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion factor และ Undrained Shear Strength (Holmberg, 1970) [7]

หน่วยแรงเสียดทานผิว (Unit skin friction) ของเสาเข็มตอกในชั้นดินทรายคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$f_s = \sigma'_v K_s \tan \delta \quad (9)$$

โดยที่

$f_s$  คือ หน่วยแรงเสียดทานผิว (Unit skin friction)

$\sigma'_v$  คือ ความเค้นกดทับประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักของมวลดิน (Effective overburden pressure) โดยพิจารณาที่จุดกึ่งกลางชั้น

$K_s$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

$\delta$  คือ มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน

ตารางที่ 1 ค่าของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้าง (Tomlinson, 1995)[8]

| วิธีการก่อสร้าง                | $K_s / K_0$ |
|--------------------------------|-------------|
| เสาเข็มตอก ดินถูกแทนที่มาก     | 1.00 - 2.00 |
| เสาเข็มตอก ดินถูกแทนที่น้อย    | 0.75 - 1.75 |
| เสาเข็มเจาะและหล่อคอนกรีตในที่ | 0.70 - 1.00 |

แรงแบกทานประลัยสามารถคำนวณจากสมการที่ (10)

$$Q_b = q_b \cdot A_b \quad (10)$$

โดย

$Q_b$  คือ แรงแบกทานประลัย (ตัน)

$q_b$  คือ หน่วยแรงต้านประลัยที่ปลายเสาเข็ม

$A_b$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตารางเมตร)

ตารางที่ 1 ค่าของมุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน  $\delta$  ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิว (Kulhawy, 1990)[9]

| Pile/soil interface condition            | $\phi$                |
|------------------------------------------|-----------------------|
| ผิวเรียบ - ผิวเหล็กเรียบกับทราย          | $0.5\phi' - 0.7\phi'$ |
| ผิวขรุขระ - ผิวเหล็กลอนลูกฟูกกับทราย     | $0.7\phi' - 0.9\phi'$ |
| ผิวเสาเข็ม คสล. สำเร็จรูปกับทราย         | $0.8\phi' - 1.0\phi'$ |
| ผิวเสาเข็มเจาะและหล่อคอนกรีตในที่กับทราย | $1.0\phi'$            |
| ผิวเสาเข็มไม้กับทราย                     | $0.8\phi' - 0.9\phi'$ |

หน่วยแรงต้านประลัยที่ปลายเสาเข็มตอกสำหรับชั้นดินเหนียวคำนวณได้จากสมการที่ (11) โดยค่า หาได้จากกราฟแสดงในรูปที่ 2

$$q_b = N_c S_u \quad (11)$$

โดยที่

$q_b$  คือ หน่วยแรงต้านประลัยที่ปลายเสาเข็ม

$N_c$  คือ ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน

$S_u$  คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

เมื่อเสาเข็มมีความลึกมากกว่า 3 เท่าของหน้ากว้างเสาเข็ม ค่าตัวแปรกำลังรับแรงแบกทานจะไม่เพิ่มขึ้นตามความลึกอีก ซึ่งในทางปฏิบัติเท่ากับ 9 ดังนั้นในกรณีของหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มประลัยสำหรับชั้นดินเหนียวคือ

$$q_b = 9S_u \quad (12)$$

สำหรับกรณีปลายเสาเข็มตอกที่วางอยู่บนชั้นดินทราย หน่วยแรงต้านปลายเข็มประลัยคำนวณได้จากสมการของ Terzaghi (1943)[10]

$$q_b = N_q \cdot \sigma'_v \quad (13)$$

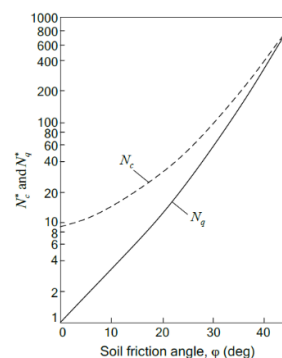
โดยที่

$q_b$  คือ หน่วยแรงต้านประลัยที่ปลายเสาเข็ม

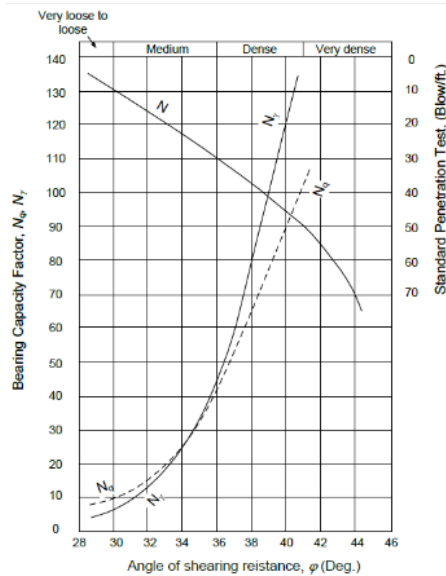
$N_q$  คือ ค่า Bearing capacity factor

$\sigma'_v$  คือ ความเค้นกดทับประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักของมวลดิน (Effective overburden pressure) โดยพิจารณาที่ปลายเสาเข็ม

ค่า  $N_q$  นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N กับ Angle of shearing resistance และ Bearing capacity factor กับ Angle of shearing resistance เสนอโดย Peck และคณะ (1974) โดยอ้างอิงค่า  $N_q$  มาจากสมการของ Terzaghi แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing capacity factor กับ friction angle (Meyerhof, 1974)[11]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N กับ Angle of shearing resistance และ Bearing capacity factor (Peck, Hanson and Thornburn, 1974)[12]

#### 2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test) เป็นการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยใช้ตุ้มน้ำหนักปล่อยกระแทกที่หัวเสาเข็ม เมื่อหัวเสาเข็มถูกตอกด้วยอุปกรณ์ทดสอบจะเกิดคลื่นหน่วยแรงขึ้นภายในเสาเข็ม คลื่นหน่วยแรงนี้จะเดินทางจากหัวเสาเข็มไปสู่ปลายเสาเข็มและเกิดการสะท้อนจากปลายเสาเข็มกลับสู่หัวเสาเข็มนอกจากการสะท้อนที่ปลายเสาเข็มแล้วในระหว่างที่คลื่นหน่วยแรงเดินทางไปตามความยาวของเสาเข็มอาจเกิดการสะท้อนกลับได้ด้วย สัญญาณคลื่นสะท้อนที่วัดได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างคลื่นสะท้อนที่ได้จากเสาเข็มที่มีแรงต้านทานจากชั้นดินต่ำกับเสาเข็มที่มีแรงต้านทานจากชั้นดินสูงจะพบว่ามีความแตกต่างกัน โดยคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นดินที่มีแรงต้านทานสูงมีแนวโน้มที่จะสูญเสียพลังงานมากกว่า ดังนั้นความแรงของคลื่นสะท้อนที่วัดได้จึงเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงแรงต้านทานของชั้นดินหรือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มได้

วิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงใช้ค่าความเครียดและความเร็วของอนุภาคเสาเข็มที่วัดได้จากเหตุการณ์ตกเป็นข้อมูลหลักเพื่อประเมินพฤติกรรมสภาพ หรือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม โดยพิจารณาความแรงของสัญญาณและเวลาที่คลื่นหน่วยแรงสะท้อนกลับจากตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวเสาเข็มเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [13]

### 3. ขั้นตอนการศึกษา

#### 3.1 ลักษณะชั้นดิน

ลักษณะชั้นดินโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าช่วงหัวหิน - ประจวบคีรีขันธ์ ช่วง กม.233+387 ถึง กม.270.629 ในพื้นที่ อ.ปราณบุรี อ.สามร้อยยอด และ อ.กุยบุรี โดยในช่วง 5 เมตรแรกเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Low plasticity Clay, CL) มีส่วนประกอบของน้ำในมวลดินใกล้เคียงกับค่าสภาพ

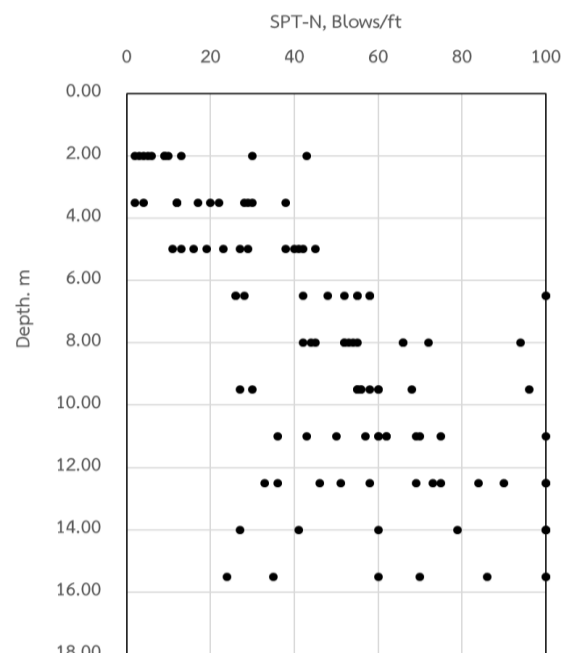
ความเป็นของแข็ง (Plastic Limit) ของดินเหนียว จากนั้นในช่วง 5 – 10 เมตร จะมีกะเปาะชั้นทรายแน่นมากแทรกอยู่ในชั้นดินเหนียว และในช่วง 10 – 15 เมตร จะเป็นชั้นทราย ผ่กว้างอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินแสดงดังตารางที่ 3 ค่า SPT-N ของหลุมเจาะจำนวน 13 หลุมเจาะแสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

| Depth (m)   | Soil description          | Natural water content (%) | Unit Weight (T/m <sup>3</sup> ) | PI (%)       | SPT-N (Blows/Ft) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------|------------------|
| 0 - 5.0     | Medium to stiff CLAY (CL) | 12.53 - 46.20             | 1.87 - 2.17                     | 8.84 - 16.93 | 2 - 45           |
| 5.0 - 10.0  | Hard CLAY (CL)            | 8.87 - 32.65              | 1.90 - 2.29                     | 9.00 - 16.82 | 24 - 50/6"       |
| 10.0 - 15.0 | Very dense SAND (SC)      | 8.19 - 27.96              | 1.92 - 2.21                     | 8.20 - 14.84 | 24 - 50/6"       |



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์



รูปที่ 5 ค่า SPT-N ที่ระดับความลึกต่างๆ ของทั้ง 13 หลุมเจาะ

### 3.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบ

โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ช่วงหัวหิน – ประจวบคีรีขันธ์ วิศวกร  
โครงสร้างได้ออกแบบ ขนาดและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของ  
เสาเข็มไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4 การศึกษาครั้งนี้นำข้อมูลการทดสอบ  
เสาเข็มตอกขนาด 52.5x52.5 ซม. ที่ออกแบบไว้เพื่อรองรับสะพานคอนกรีต  
จำนวน 13 ต้น โดยเสาเข็มทุกต้นอยู่ในชั้นดินเหนียว

ตารางที่ 4 เสาเข็มของโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ช่วงหัวหิน –  
ประจวบคีรีขันธ์

| ขนาดเสาเข็ม<br>(ซม.) | การใช้งานของเสาเข็มตอกคอนกรีต | น้ำหนักบรรทุก<br>ปลอดภัย (ตัน) | ความยาวเสาเข็ม<br>(เมตร) |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 35x35                | สะพานเหล็กหรือถนนยกระดับ      | 50                             | 8 - 15                   |
| 40x40                | ทางลาดของสะพานหรือถนนยกระดับ  | 60                             | 7 - 17                   |
| 52.5x52.5            | สะพานคอนกรีต                  | 100                            | 8 - 19                   |

### 3.3 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

จากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินในบริเวณที่ทำการติดตั้งเสาเข็ม  
จำนวน 13 หลุม พบว่าไม่ได้ทำการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวน  
(Undisturbed) เนื่องจากดินในบริเวณดังกล่าวเป็นดินเหนียวแข็ง ค่ากำลัง  
รับแรงเฉือนของดินเหนียวจึงต้องอาศัยการแปลผลจากความสัมพันธ์  
ระหว่างค่า SPT-N และกำลังรับแรงเฉือนของดิน ด้วยสมการของ Terzaghi  
(1967) NAVFAC (1986) Stroud (1974) และ Pitupakorn (1983) จากนั้น  
นำค่ากำลังรับแรงเฉือนมาวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย  
ของเสาเข็ม ส่วนผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มภาย  
หลังจากการติดตั้งเสาเข็ม (Restrike) ประมาณ 30 วัน พบว่าค่ากำลังรับ  
น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มทุกต้นผ่านเกณฑ์ตามที่วิศวกรได้  
ออกแบบไว้ ค่าแรงเสียดทานผิวประลัย ค่าแรงต้านทานปลายเข็มประลัย  
และกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือน  
ของดินที่ได้จากสมการของ Terzaghi (1967) NAVFAC (1986) Stroud  
(1974) และ Pitupakorn (1983) มาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงเสียดทาน  
ผิวประลัยของเสาเข็มตอกตามสมการที่ 8 และค่ากำลังแรงต้านทานปลาย  
เข็มประลัยของเสาเข็มตอกตามสมการที่ 12 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 5  
ถึงตารางที่ 7

ตารางที่ 5 แรงเสียดทานผิวประลัยของเสาเข็มตอก

| BH    | Pile Tip<br>(m) | Skin friction (t) |        |        |            |       |
|-------|-----------------|-------------------|--------|--------|------------|-------|
|       |                 | Terzaghi          | NAVFAL | Stroud | Putipakorn | DLT   |
| BH-12 | 10              | 110.0             | 212.0  | 122.0  | 170.0      | 102.5 |
| BH-25 | 12              | 137.0             | 252.0  | 147.0  | 199.0      | 161.3 |
| BH-28 | 12              | 145.0             | 290.0  | 172.0  | 232.0      | 154.1 |
| BH-35 | 8               | 87.0              | 158.0  | 94.0   | 127.0      | 63.4  |
| BH-36 | 8               | 102.0             | 197.0  | 111.0  | 154.0      | 101.7 |
| BH-40 | 8               | 86.0              | 161.0  | 93.0   | 128.0      | 92.6  |
| BH-41 | 10              | 169.0             | 332.0  | 187.0  | 261.0      | 92.9  |
| BH-42 | 9               | 93.0              | 156.0  | 101.0  | 131.0      | 71.7  |
| BH-45 | 11              | 160.0             | 318.0  | 176.0  | 249.0      | 176.6 |
| BH-46 | 12              | 143.0             | 287.0  | 158.0  | 225.0      | 108.7 |
| BH-48 | 14              | 133.0             | 239.0  | 142.0  | 189.0      | 183.4 |
| BH-51 | 12              | 143.0             | 261.0  | 155.0  | 210.0      | 116.9 |
| BH-57 | 11              | 125.0             | 236.0  | 139.0  | 190.0      | 121.4 |

ตารางที่ 6 แรงต้านทานปลายเข็มประลัยของเสาเข็มตอก

| BH    | Pile Tip<br>(m) | End Bearing (t) |        |        |            |       |
|-------|-----------------|-----------------|--------|--------|------------|-------|
|       |                 | Terzaghi        | NAVFAL | Stroud | Putipakorn | DLT   |
| BH-12 | 10              | 54.0            | 113.0  | 61.0   | 88.0       | 233.5 |
| BH-25 | 12              | 35.0            | 74.0   | 40.0   | 58.0       | 156.7 |
| BH-28 | 12              | 36.0            | 78.0   | 55.0   | 67.0       | 117.0 |
| BH-35 | 8               | 42.0            | 88.0   | 47.0   | 68.0       | 195.6 |
| BH-36 | 8               | 52.0            | 109.0  | 59.0   | 85.0       | 236.3 |
| BH-40 | 8               | 41.0            | 86.0   | 46.0   | 67.0       | 209.6 |
| BH-41 | 10              | 70.0            | 147.0  | 79.0   | 115.0      | 220.1 |
| BH-42 | 9               | 48.0            | 100.0  | 53.0   | 78.0       | 196.3 |
| BH-45 | 11              | 79.0            | 165.0  | 89.0   | 129.0      | 218.6 |
| BH-46 | 12              | 55.0            | 115.0  | 61.0   | 89.0       | 231.5 |
| BH-48 | 14              | 47.0            | 99.0   | 53.0   | 77.0       | 246.9 |
| BH-51 | 12              | 40.0            | 84.0   | 45.0   | 65.0       | 203.1 |
| BH-57 | 11              | 55.0            | 116.0  | 62.0   | 90.0       | 285.4 |

ตารางที่ 7 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มตอก

| BH    | Pile Tip<br>(m) | Ultimate Pile Capacity (t) |        |        |            |       |
|-------|-----------------|----------------------------|--------|--------|------------|-------|
|       |                 | Terzaghi                   | NAVFAL | Stroud | Putipakorn | DLT   |
| BH-12 | 10              | 164.0                      | 325.0  | 183.0  | 258.0      | 336.0 |
| BH-25 | 12              | 172.0                      | 326.0  | 187.0  | 257.0      | 318.0 |
| BH-28 | 12              | 181.0                      | 368.0  | 227.0  | 299.0      | 271.1 |
| BH-35 | 8               | 129.0                      | 246.0  | 141.0  | 195.0      | 259.0 |
| BH-36 | 8               | 154.0                      | 306.0  | 170.0  | 239.0      | 338.0 |
| BH-40 | 8               | 127.0                      | 247.0  | 139.0  | 195.0      | 302.2 |
| BH-41 | 10              | 239.0                      | 479.0  | 266.0  | 376.0      | 313.0 |
| BH-42 | 9               | 141.0                      | 256.0  | 154.0  | 209.0      | 268.0 |
| BH-45 | 11              | 239.0                      | 483.0  | 265.0  | 378.0      | 395.2 |
| BH-46 | 12              | 198.0                      | 402.0  | 219.0  | 314.0      | 340.2 |
| BH-48 | 14              | 180.0                      | 338.0  | 195.0  | 266.0      | 430.3 |
| BH-51 | 12              | 183.0                      | 345.0  | 200.0  | 275.0      | 320.0 |
| BH-57 | 11              | 180.0                      | 352.0  | 201.0  | 280.0      | 406.8 |

### 3.4 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ตัวแปรทางสถิติที่ใช้ในการระบุความถูกต้อง (Accuracy) และแม่นยำ  
(Precision) ในการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดย  
วิธีสถิติศาสตร์และจากผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ ได้แก่ ค่าความเอน  
เอียง (Bias) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (14)

$$\lambda = \frac{Q_p}{Q_m} \quad (14)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i}{N} \quad (15)$$

โดยที่

$\lambda$  คือ ความเอนเอียง

$Q_m$  คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบแบบพลศาสตร์

$Q_p$  คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากวิธีสถิติศาสตร์

จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) ค่า  
ความเอนเอียง และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Sample Standard  
Deviation) ของความเอนเอียงจากสมการที่ (16) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า  
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation, COV) จากสมการที่  
(17)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{N-1}} \quad (16)$$

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{\lambda}} \quad (17)$$

โดยที่

$COV$  คือ สัมประสิทธิ์ความแปรผัน

$\bar{\lambda}$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความเอนเอียง

$\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเอนเอียง

ในการระบุความถูกต้องของการทำนายจะพิจารณาจากค่าความเอนเอียง (Bias) ซึ่งการทำนายจะถูกต้องเมื่อมีค่าเข้าใกล้ 1 และความแม่นยำในการทำนายจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COV) โดยหากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันมีค่าน้อยๆ แสดงถึงการทำนายนั้นมีความแม่นยำสูง

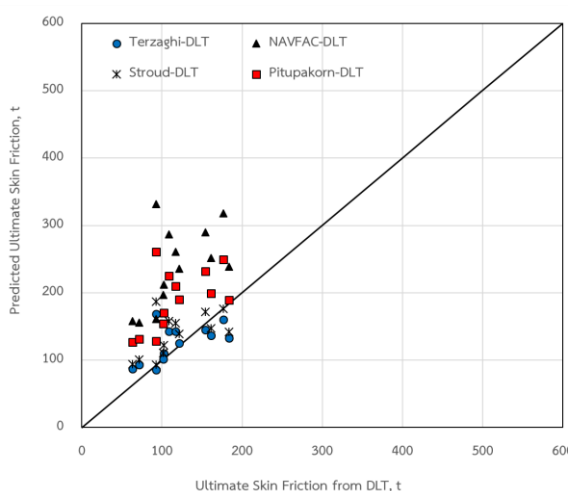
## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 ผลการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวประลัยของเสาเข็ม

จากการแปลผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยสมการที่แตกต่างกัน 4 สมการ พบว่าทั้ง 4 สมการให้ค่าการทำนายกำลังรับแรงเสียดทานประลัยสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม โดยสมการของ Terzaghi (1967) ให้ค่ากำลังรับแรงเสียดทานประลัยที่ใกล้เคียงกับการทดสอบในสนามมากที่สุด ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 8 และรูปที่ 6

ตารางที่ 8 ผลการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวประลัยของเสาเข็ม

| SPT-N Interpretation | Average Bias | Standard Deviation | COV  |
|----------------------|--------------|--------------------|------|
| Terzaghi             | 1.11         | 0.29               | 0.26 |
| NAVFAC               | 2.10         | 0.57               | 0.27 |
| Stroud               | 1.22         | 0.32               | 0.26 |
| Pitupakorn           | 1.68         | 0.45               | 0.27 |



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวประลัยของเสาเข็ม

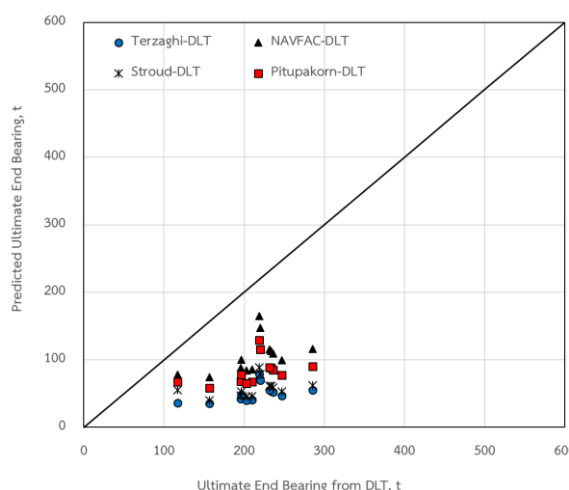
### 4.2 ผลการเปรียบเทียบแรงต้านทานปลายเข็มประลัย

กำลังรับแรงต้านทานปลายเข็มประลัยที่ได้จากการทำนายจากวิธีสถิตศาสตร์ โดยสมการแปลผลค่า SPT-N ทั้งสี่สมการให้ค่ากำลังรับแรง

ต้านทานปลายเข็มประลัยต่ำกว่าการทดสอบในสนาม โดยหากใช้สมการของ NAVFAC (1986) ในการแปลผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในการทำนายค่ากำลังรับแรงต้านทานปลายเสาเข็มจะให้ค่ากำลังต้านทานปลายเสาเข็มเพียงครึ่งหนึ่งของผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ในสนาม ผลการเปรียบเทียบของกำลังต้านทานปลายเสาเข็มจากวิธีสถิตศาสตร์และการทดสอบในสนามโดยวิธีพลศาสตร์ แสดงดังตารางที่ 9 แสดงดังรูปที่ 7

ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบแรงต้านทานปลายเข็มประลัย

| SPT-N Interpretation | Average Bias | Standard Deviation | COV  |
|----------------------|--------------|--------------------|------|
| Terzaghi             | 0.24         | 0.05               | 0.23 |
| NAVFAC               | 0.51         | 0.12               | 0.23 |
| Stroud               | 0.28         | 0.08               | 0.29 |
| Pitupakorn           | 0.40         | 0.10               | 0.25 |



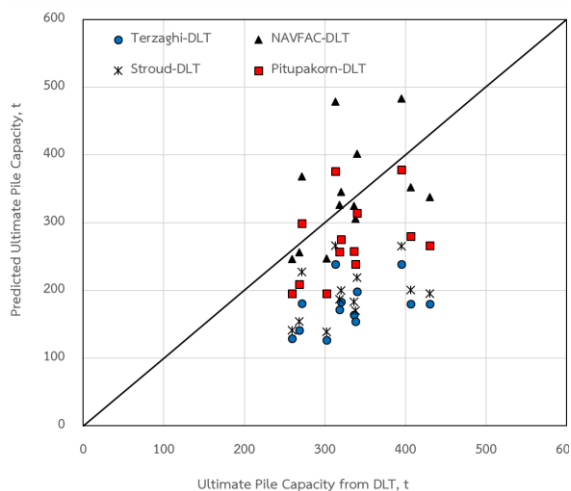
รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบแรงต้านทานปลายเข็มประลัย

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

ในภาพรวมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม สมการแปลผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของ NAVFAC (1986) มีความถูกต้อง (Accuracy) ในการทำนายค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบในสนามมากที่สุด ส่วนสมการแปลผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินของ Terzaghi (1967) สามารถทำนายค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ได้เพียงครึ่งหนึ่งของค่าที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ในสนาม ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 10 และรูปที่ 8

ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

| SPT-N Interpretation | Average Bias | Standard Deviation | COV  |
|----------------------|--------------|--------------------|------|
| Terzaghi             | 0.54         | 0.10               | 0.19 |
| NAVFAC               | 1.05         | 0.22               | 0.21 |
| Stroud               | 0.60         | 0.13               | 0.21 |
| Pitupakorn           | 0.83         | 0.17               | 0.21 |



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

## 5. บทสรุป

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากการคำนวณด้วยวิธีสถิติศาสตร์และจากผลการทดสอบแบบพลศาสตร์สำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมการแปลงผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินของ Terzaghi (1967) มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดในการทำนายค่ากำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มตอกสำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีความเอนเอียงเฉลี่ยเท่ากับ 1.11 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.26
2. สมการแปลงผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินของ NAVFAC (1986) มีความถูกต้องมากและแม่นยำมากที่สุดในการทำนายค่ากำลังรับแรงต้านทานปลายเสาเข็มตอกสำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีความเอนเอียงเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.23
3. สมการแปลงผลค่า SPT-N เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินของ NAVFAC (1986) มีความถูกต้องมากและแม่นยำมากที่สุดในการทำนายค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกสำหรับชั้นดินจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีความเอนเอียงเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.19

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณข้อมูลทดสอบชั้นดินและข้อมูลการทดสอบเสาเข็มจากบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) บริษัท อันเดอร์กราว์อินเวสติเกชั่น จำกัด และบริษัท เมกะไฟ จำกัด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM D1586. *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.*
- [2] Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in*

*Engineering Practice*, Second Edition, John Wiley, New York, 729p

- [3] Stroud, M. A. (1974). *The standard penetration test in insensitive clays and soft rock*, Proceedings of the 1<sup>st</sup> European Symposium on Penetration Testing, Sweden: Stockholm, vol. 2, No. 2, pp. 367-375.
- [4] NAVFAC (1986) *Soil Mechanics: Design Manual 7.01*, Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Virginia.
- [5] Pitupakorn, W. (1983). *Prediction of pile carrying capacity from standard penetration test in Bangkok metropolis subsoil*, Master thesis, Chulalongkorn University, Bangkok.
- [6] สิริธญา ทองชาติ และปวิศ รื่นนุสาร (2019). *การทบทวนวิธีการออกแบบฐานรากเสาเข็มปัจจุบันในพื้นที่กรุงเทพมหานคร*. Naresuan University Engineering Journal, Vol.14 1(2019), หน้า 11-28.
- [7] Holmberg, S. (1970). *Load testing of driven piles in Bangkok clay*. Journal of South East Asian Society of Soil Engineering, Vol. 1, No.2, pp. 61-78.
- [8] Tomlinson, M. J. (1995). *Foundation Design and Construction*: 6th edition, Longman.
- [9] Kulhawy, F.H., and Mayne, P.W. (1990). *Manual of Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA.
- [10] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York.
- [11] Meyerhof, G.G. (1974) *Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay*. Canadian Geotechnical Journal, 11, 223-229.
- [12] Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1953). *Foundation Engineering*, New York: John Wiley & Sons.
- [13] มยผ. 1252-51 และ มยผ. 1551-51 (2551). *มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test*. กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย