

อิทธิพลของมุมเอียงเสาเข็มเดี่ยวต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้ง บนพื้นฐานการทดสอบแบบจำลองกายภาพ

Influence of Inclined Angles on Single Pile Vertical Capacity Based on Physical Model Test

คเชนทร์ จักรแก้ว¹ สุริยะ ทองมุณี^{1*} พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม¹ และ จักรพันธ์ ธงทอง²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

² โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จ.กำแพงเพชร

*Corresponding author; E-mail address: suriyah.t@cmu.ac.th, khachen_ch@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงเสาเข็มเดี่ยวต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้ง การศึกษาได้เน้นไปที่การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ โดยการประยุกต์ใช้สแตนเลสที่มีผิวเรียบและปลายปิดเป็นแบบจำลองเสาเข็มที่ติดตั้งในแนวเอียงกับแนวตั้งเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 องศา ในส่วนของแบบจำลองดินที่ขึ้นรูปด้วยทรายแห้งที่มีการกระจายขนาดละเอียดอย่างสม่ำเสมอ โดยเตรียมแบบจำลองดินและเสาเข็มเอียงเข้าด้วยกันที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 60%, 70% และ 80% ซึ่งการทดสอบจะสมมติให้เป็นพฤติกรรมภายหลังการติดตั้งเสาเข็มแล้วเสร็จ ในระหว่างการทดสอบได้บันทึกแรงและการทรุดตัวในแนวตั้งที่ด้านบนเสาเข็ม จากผลการทดสอบพบว่าแนวโน้มกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเอียงมีความแตกต่างกันเนื่องจากมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น สำหรับมวลดินหลวม ($D_r=60\%$) มีแนวโน้มกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันมวลดินแน่น ($D_r=80\%$) มีแนวโน้มกำลังรับน้ำหนักลดลง สำหรับมวลดินแน่นปานกลาง ($D_r=70\%$) แนวโน้มกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเอียงยังไม่ชัดเจน ในส่วนอิทธิพลของความหนาแน่นของมวลดินพบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในมวลดินแน่นมีค่าสูงกว่าในมวลดินหลวมในทุกมุมเอียง

คำสำคัญ: กำลังรับน้ำหนัก, การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ, เสาเข็มเอียง

Abstract

This study presents the influence of inclined angles on the vertical capacity of a single pile based on physical model tests laboratory. An own-customized stainless steel rod having smooth surfaces with a close-end characteristic was used as a model pile. It was installed with inclinations of 0, 5, 10, and 15° from the vertical. To model ground conditions, the dry and uniform sand was prepared with varying densifications of its 60%, 70%, and

80% relative densities (D_r). These relative densities were assumed to be the ground conditions after pile installation. Vertical loads were applied at the top of the test pile with measurement of vertical pile settlements. These applied vertical loads directly reflect pile capacity levels. The test results indicated that the tendency of vertical pile capacity values of an inclined pile was dependent on its inclined angles and ground density conditions. For the loose ground condition of 60% D_r , pile capacity values increase with an increase in inclined angles. Adversely, for the dense ground condition of 80% D_r , pile capacity values decrease with an increase in inclined angles. However, for the medium ground condition of 70% D_r , pile capacity values of an inclined pile have no clear trend. Furthermore, test results would indicate a denser ground condition, a better pile capacity for an inclined pile.

Keywords: Pile capacity, Physical model test, Inclined pile

1. คำนำ

การก่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่หรือก่อสร้างในบริเวณที่กำลังรับน้ำหนักกดทับของดินมีค่าน้อย จำเป็นต้องใช้เสาเข็มในการทำเป็นฐานรากลึก เมื่อก่อสร้างถึงน้ำหนักกดทับที่ถูกถ่ายลงมาที่เสาเข็มก็ไม่ได้มีเพียงแรงกระทำในแนวตั้งอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังมีแรงกระทำทางด้านข้างขององค์อาคารหรือโครงสร้างจะมากหรือน้อยเท่านั้น ซึ่งเสาเข็มรับแรงในแนวตั้งสามารถต้านทานต่อแรงกระทำในแนวราบได้เพียง 10% ถึง 20% ของความสามารถรับน้ำหนักในแนวตั้งโดยระยะโก่งตัวไม่มากกว่า 1/2 นิ้ว (12.5 มม.) ในกรณีที่เต็มระยะฝั่ง [1] จึงจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำหนักเสาเข็มแนวตั้งที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นหรือจำนวนเสาเข็มที่มากขึ้นเพื่อรับแรงกระทำทางด้านข้าง ดังนั้นจึงได้นำเสนอเสาเข็มเอียง (Batter Pile หรือ Incline Pile) มาเพื่อรับแรงกระทำด้านข้างแทนเสาเข็มรับแรงในแนวตั้ง

เสาเข็มเอียงถูกแบ่งออกเป็นเสาเข็มเอียงด้านบวกลบและเสาเข็มเอียงด้านลบตามทิศทางของแรงกระทำในแนวราบ หากแรงในแนวราบกระทำในทิศทางเดียวกับมุมเอียงเสาเข็มคือเสาเข็มเอียงด้านลบ และเสาเข็มด้านบวกลบคือแรงแนวราบกระทำในทิศทางตรงข้ามกับมุมเอียงเสาเข็ม

พัฒนศักดิ์ ออบเชย [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวในแนวตั้งและเสาเข็มเอียงในชั้นทรายความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 30% (ทรายหลวม) และ 70% (ทรายแน่น) โดยใช้แบบจำลอง ซึ่งใช้มุมเอียงของเสาเข็มเป็น 0, ±10 และ ±20 องศา กับแนวตั้ง อัตราส่วนความยาวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินหายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/D) เท่ากับ 30 และมีค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0, 4 และ 8 ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับของเสาเข็มจาก +20, +10, 0, -10 และ -20 องศาตามลำดับ โดยเสาเข็มเอียงด้านลบมีความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าสูงกว่าเสาเข็มในแนวตั้ง และเสาเข็มเอียงด้านบวกลบตามลำดับ และเมื่อมีค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มมีค่าลดลง แต่ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงในแนวราบของเสาเข็มเอียงด้านลบมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับเสาเข็มเอียงด้านบวกลบที่มุมเอียงเดียวกันและเสาเข็มในแนวตั้งตามลำดับ [3],[8],[10] รวมไปถึงกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของเสาเข็มเอียงที่มากกว่าเสาเข็มในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว [9] ในทางกลับกัน เสาเข็มเอียงควรหลีกเลี่ยงแรงดุดลงภายนอกเสาเข็มเอียงที่มากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Negative Skin Friction) และการทรุดตัวของดินจากเสาเข็ม

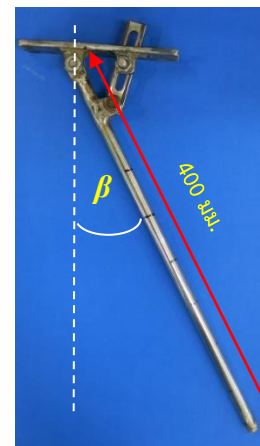
Al-Neami, M. A., F. H. Rahil and K. S. Al-Bayati [4] ได้ศึกษากำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสาเข็มเอียงจำลองเป็นเสาเข็มเดี่ยวที่มีมุมเอียง 0, 10, 20 และ 30 องศาเทียบกับแนวตั้งบนทรายแห้งความหนาแน่นสัมพัทธ์คือ แบบหลวม ($D_r=40\%$), แบบแน่นปานกลาง ($D_r=60\%$) และแบบแน่น ($D_r=80\%$) โดยใช้แท่งเหล็กเป็นตัวเสาเข็มจำลอง ซึ่งค่ากำลังรับน้ำหนักจากการทดสอบจะเป็นในกรณีขณะติดตั้งเสาเข็ม เนื่องจากแบบจำลองเสาเข็มถูกติดตั้งหลังจากเตรียมแบบจำลองดินเสร็จ การศึกษาพบว่ามุมเอียง 20 องศาเป็นมุมที่มีกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งมากที่สุด ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสาเข็มเอียงอย่างมีนัยสำคัญ และผลกระทบของความลึกต่อความกว้างต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสาเข็มเอียงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงเสาเข็มเดี่ยวต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งบนพื้นฐานการทดสอบแบบจำลองกายภาพเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมในการรับแรงกดแนวตั้งของเสาเข็มแนวตั้งกับเสาเข็มแนวเอียงผ่านการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับกำลังรับน้ำหนักที่เกิดขึ้น ซึ่งการทดสอบจะสมมติให้เป็นพฤติกรรมภายหลังการติดตั้งแล้วเสร็จของเสาเข็ม เนื่องจากแบบจำลองเสาเข็มถูกติดตั้งไปพร้อมกับการเตรียมแบบจำลองดิน

2. คุณสมบัติฐานรากและแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองฐานราก

แบบจำลองเสาเข็มที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสาเข็มสแตนเลสที่มีผิวเรียบและปลายปิด มีความยาว 400 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. ความหนา 1.1 มม. น้ำหนัก 0.506 กก. จากการทดสอบค่ามุมเสียดทานระหว่างผิวด้านเสาเข็มกับทราย (Interface friction angle, δ) เป็น 17.0 ($D_r=60\%$), 24.1 ($D_r=70\%$) และ 24.2 ($D_r=80\%$) องศาตามลำดับ โดยใช้ผิวด้านเสาเข็มที่มีคุณสมบัติเดียวกับแบบจำลองเสาเข็มมาทดสอบ Direct Shear ในส่วนของค่า Young's modulus (E_p) เป็น 180 GPa. และ Poisson's ratio (ν) เป็น 0.270 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติทั่วไปของสแตนเลส ทั้งนี้แบบจำลองเสาเข็มสามารถปรับมุมเอียงกับแนวตั้ง (β) ได้ 0 ถึง 30 องศา (แสดงในรูปที่ 1) ซึ่งรายละเอียดคุณสมบัติของแบบจำลองฐานรากเสาเข็มแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองเสาเข็ม

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติของแบบจำลองฐานรากเสาเข็ม

Property	Value		
Outer diameter, D (mm.)	12.7		
Wall thickness, t (mm.)	1.1		
Length from raft base, L (mm.)	400		
Young's modulus, E_p (GPa.)	180		
Poisson's ratio, ν	0.270		
Relative density, D_r (%)	60	70	80
The angle of interface friction, δ (deg.)	17.0	24.1	24.2

2.2 แบบจำลองดิน

แบบจำลองดินขึ้นรูปด้วยทรายแห้งที่มีการกระจายขนาดคล้อย่างสม่ำเสมอโดยแสดงรายละเอียดคุณสมบัติของแบบจำลองดินในตารางที่ 2 พบว่าจำแนกได้เป็นทรายที่มีเม็ดขนาดเดียว (Poorly graded sand, SP) โดยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ตามมาตรฐาน ASTM D2487 [6] ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s)

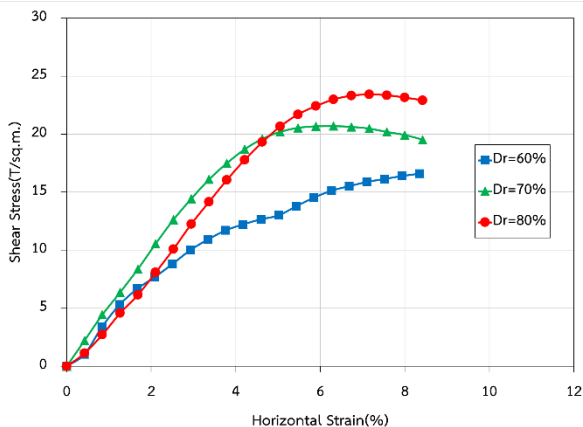
เท่ากับ 2.65 ตามมาตรฐาน ASTM D854-58 [5] แบบจำลองดินที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) เป็น 60%, 70% และ 80% ได้ค่ามุมเสียดทานของทราย (Internal friction angle, ϕ) เป็น 30.2 ($D_r=60\%$), 31.7 ($D_r=70\%$) และ 32.5 ($D_r=80\%$) องศาตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM D3080 / D3080M - 11 [7] ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบ Direct Shear Test ที่ Normal Stress เท่ากับ 28.87 T/m^2 (แสดงในรูปที่ 2) ให้เห็นถึงอิทธิพลของความหนาแน่นของมวลดินต่อแรงเค้นเฉือน กล่าวคือความหนาแน่นของมวลดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเค้นเฉือนสูงสุดเพิ่มขึ้น

3. การเตรียมการทดสอบและวิธีการทดสอบ

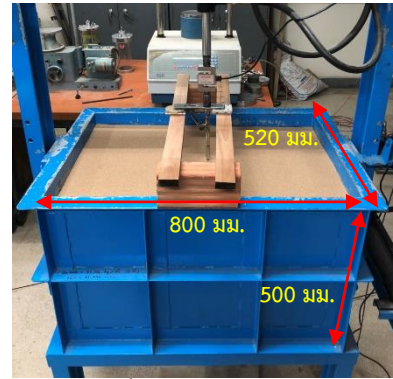
3.1 วิธีการเตรียมแบบจำลองดิน

การเตรียมแบบจำลองดินจะบรรจุในกล่องเหล็กขนาดความยาว 800 มม., ความกว้าง 520 มม., ความลึก 500 มม. (แสดงในรูปที่ 3) โดยขั้นตอนการจัดเตรียมแบบจำลองดินดังต่อไปนี้

- แบ่งชั้นเป็น 9 ชั้น ความสูงชั้นละ 50 มม. (ความลึกรวมเป็น 450 มม.) บดอัดชั้นต่อชั้นให้ได้ความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็น 60%, 70% และ 80%
- หลังจากเตรียมแบบจำลองดินได้ 4 ชั้น (200 มม.) ทำการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวของแบบจำลองฐานรากเสาเข็มตามตำแหน่งแนวแรงที่ผ่านจุดที่เสาเข็มไม่จากแบบจำลองดินพอดี โดยติดตั้งแบบจำลองเสาเข็มที่มุมเอียง (β) เป็น 0, 5, 10 และ 15 องศา ระยะห่าง 250 มม.
- บดอัดแบบจำลองดินต่อให้ครบทั้งหมด 9 ชั้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับค่าร้อยละ Strain ในแนวราบของแบบจำลองดิน ที่ Normal Stress เท่ากับ 28.87 T/m^2



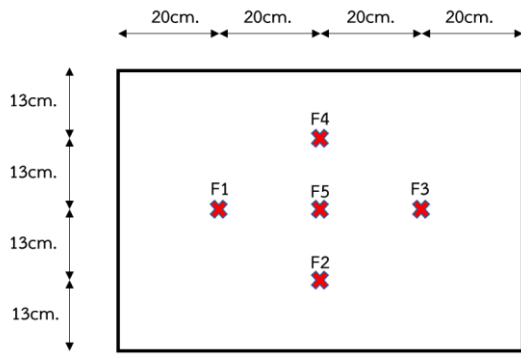
รูปที่ 3 ขนาดของกล่องเหล็ก

ตารางที่ 2 รายละเอียดคุณสมบัติของแบบจำลองดิน

Property	Value		
Classification (USCS)	SP		
D_{50}	0.56		
Coefficient of uniformity, C_u	1.45		
Coefficient of curvature, C_c	1.17		
Specific gravity, G_s	2.65		
Maximum dry density, ρ_{dmax} (kg/m^3)	1679		
Minimum dry density, ρ_{dmin} (kg/m^3)	1344		
Maximum void ratio, e_{max}	0.971		
Minimum void ratio, e_{min}	0.578		
Relative density, D_r (%)	60	70	80
Internal friction angle, ϕ (deg.)	30.2	31.7	32.5
Dry density, ρ (kg/m^3)	1526	1562	1599
Void ratio, e	0.735	0.696	0.657

3.2 วิธีการตรวจสอบความสม่ำเสมอของแบบจำลองดิน

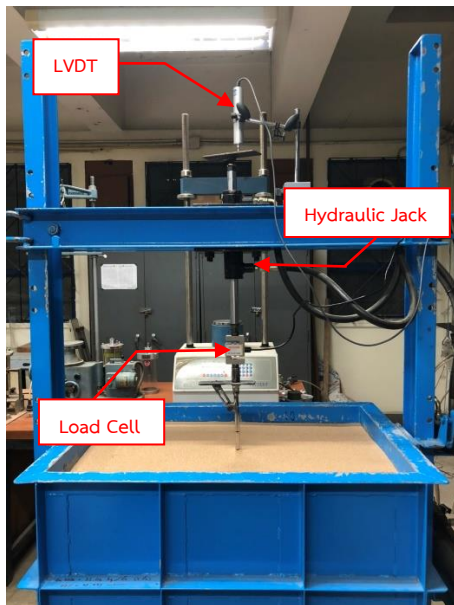
การตรวจสอบความสม่ำเสมอของแบบจำลองดินด้วยวิธี Cone Penetration Test เพื่อควบคุมวิธีการเตรียมตัวอย่างของแบบจำลองดิน โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แท่งเหล็กต้นปลายรูปทรงกรวยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. และมุมเอียงทรงกรวย 60 องศาต่อกับ Load Cell เพื่อบันทึกค่าแรงต้านทานการกดที่ความลึกของแบบจำลองดินในแต่ละชั้น (50 มม.) ซึ่งได้กำหนดความหนาแน่นสัมพัทธ์ของแบบจำลองดินเป็น 60%, 70% และ 80% การตรวจสอบจะบันทึกค่าแรงต้านทานกับระยะจมลงทุกๆ 50 มม. ภายในเวลา 2 วินาที ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งของการทดสอบ Cone Penetration Test บนพื้นที่หน้าตัดกล่องเหล็กที่บรรจุแบบจำลองดิน (แสดงในรูปที่ 4) [11] โดยที่ F1,F2,F3,F4 และ F5 เป็นชื่อของแต่ละตำแหน่งทดสอบ ทั้งนี้การตรวจสอบความสม่ำเสมอเป็นการทดสอบที่แยกต่างหาก โดยยังไม่ได้ติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม



รูปที่ 4 ตำแหน่งของการทดสอบ Cone Penetration Test

3.3 วิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของแบบจำลองเสาเข็ม

การทดสอบแรงในแนวตั้ง (แสดงในรูปที่ 5) ใช้ไฮดรอลิกแจ๊คเป็นเครื่องให้แรงกดในแนวตั้งโดยให้อัตราการเคลื่อนตัวคงที่เป็น 0.2 มม./วินาที ซึ่งค่าแรงกดในแนวตั้งวัดได้จาก Load Cell ตรงด้านบนของแบบจำลองเสาเข็ม ในส่วนของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งวัดได้จาก linear variable differential transformer (LVDT) ที่แผ่นเหล็กด้านบนของไฮดรอลิกแจ๊ค ในส่วนของการทดสอบจะทำการบันทึกค่าแรงกดกับระยะทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มทุก 1 วินาที

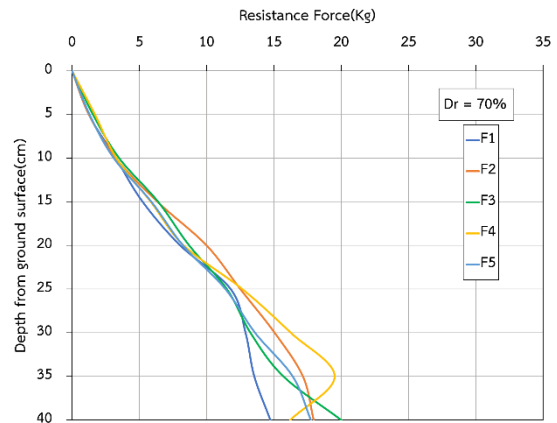


รูปที่ 5 การติดตั้งตรวจวัดของการทดสอบแรงกดในแนวตั้ง

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์วิจารณ์

4.1 ผลการตรวจสอบความสม่ำเสมอของแบบจำลองดิน

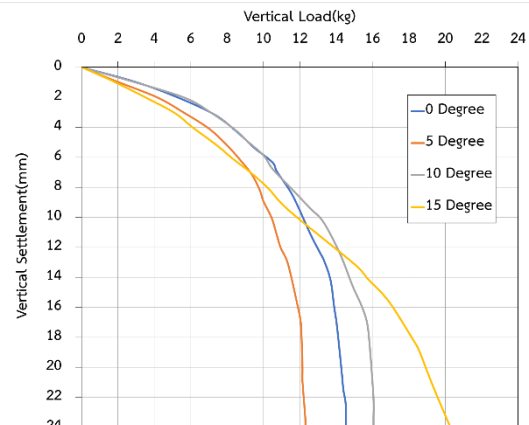
จากผล Cone Penetration Test พบว่าในช่วงความลึก 0 – 30 ซม. แสดงค่าแรงต้านทานการกดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งระยะฝังของแบบจำลองเสาเข็มเป็น 25 ซม. อยู่ภายในช่วงความลึกนี้พอดี รวมถึงแต่ละความลึกของการทดสอบมีความต่างกันของค่าต่ำสุดกับสูงสุดของความต้านทานแรงกดในแต่ละตำแหน่งไม่เกิน 2.5 กก. ในทุกความหนาแน่น (แสดงในรูปที่ 6)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการกดกับความลึกของแท่งเหล็กในมวลดินจำลองที่ $D_r=70\%$

4.2 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้ง

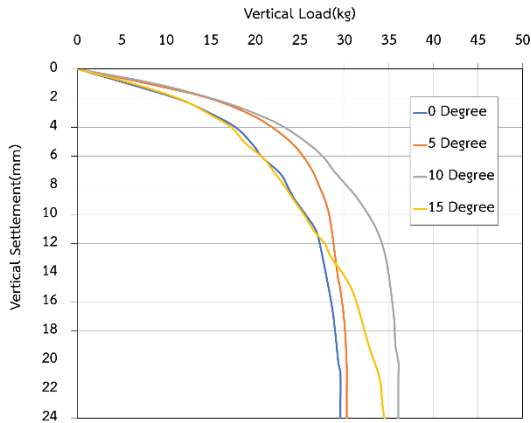
กรณีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 60% (แสดงในรูปที่ 7) แสดงถึงมุมเอียงเสาเข็มเทียบกับแนวตั้งไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักในช่วงของการทรุดตัว 0-8 มม. แต่หลังจากการทรุดตัวที่มากขึ้น มุมเอียงเสาเข็มจะมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักอย่างชัดเจนจากการทรุดตัวที่ 24 มม. กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก 5, 0, 10 และ 15 องศา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 60%

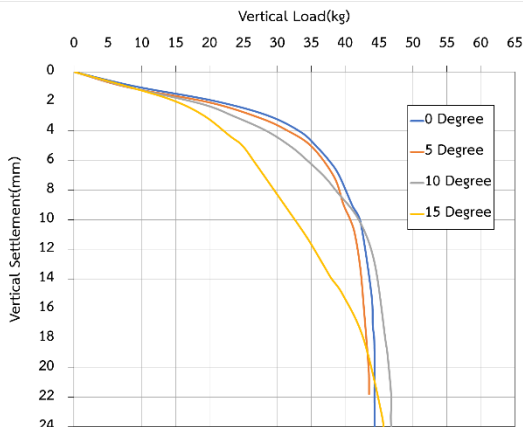
กรณีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 70% (แสดงในรูปที่ 8) แสดงถึงมุมเอียงเสาเข็มเทียบกับแนวตั้งมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้ง ในช่วงการทรุดตัว 0-12 มม. เมื่อมุมเอียงเสาเข็มเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มให้เพิ่มขึ้นและสูงสุดที่มุมเอียง 10 องศา หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจะลดลง ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มมุมเอียงจนถึง 15 องศา มีกำลังรับน้ำหนักไม่ต่างจากมุมเอียง 0 องศา ในส่วนของการทรุดตัวที่มากขึ้นจาก 12 มม. กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่มุมเอียง 15 องศา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเกือบเท่ามุมเอียง 10 องศา ในทางกลับกันกำลัง

รับน้ำหนักเสาเข็มที่มุมเอียง 0, 5, และ 10 องศา เริ่มคงที่เมื่อการทรุดตัวที่มากขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 70%

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 80% (แสดงในรูปที่ 9) แสดงถึงมุมเอียงเสาเข็มเทียบกับแนวตั้งมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งเมื่อเพิ่มมุมเอียงไปจนถึง 15 องศา กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงของการทรุดตัว 0-18 มม. ซึ่งกำลังรับน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุด 26.8% ของกำลังรับน้ำหนักที่มุมเอียง 0 องศา ที่การทรุดตัวที่ 8 มม. แต่หลังจากการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้น มุมเอียงของเสาเข็มจะไม่มียิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนัก



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับการทรุดตัวในแนวตั้งของเสาเข็มที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 80%

4.3 อิทธิพลของมุมเอียงต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้ง

โดยทั่วไปความสามารถในการรับกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม (Ultimate Load, Q_u) มักถูกกำหนดไว้ที่การทรุดตัวเท่ากับ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แต่สำหรับแบบจำลองหรือเสาเข็มขนาดเล็กเนื่องจากค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ได้จะไม่สอดคล้องกับการทรุดตัวเสาเข็ม ซึ่งการกำหนดกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มขนาดเล็กหรือแบบจำลองเสาเข็ม

ถูกกำหนดไว้หลายวิธี ในส่วนการศึกษานี้จะกำหนดกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มสูงสุดไว้ที่กำลังรับน้ำหนักเริ่มคงที่เป็นการทรุดตัวเท่ากับ 16 มม.

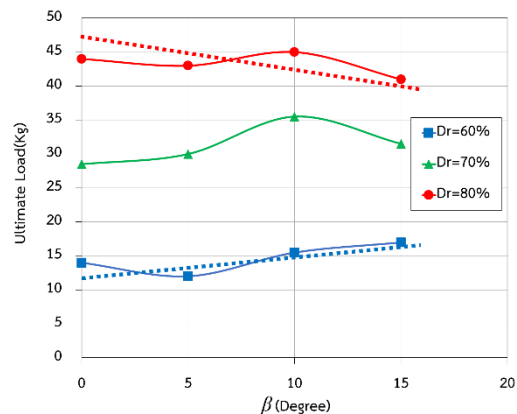
ตารางที่ 3 และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักสูงสุดกับมุมเอียงเสาเข็ม โดยถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. กำลังรับน้ำหนักในชั้นดินหวม ($D_r=60\%$) พบว่ากำลังรับน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงเสาเข็มเพิ่มขึ้น
2. กำลังรับน้ำหนักในชั้นดินแน่นปานกลาง ($D_r=70\%$) การเพิ่มมุมเอียงเสาเข็มส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่มุมเอียง 10 องศากับแนวตั้ง หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจะลดลงแต่ก็ยังคงมีค่ามากกว่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในแนวตั้ง
3. กำลังรับน้ำหนักในส่วนของชั้นดินแน่น ($D_r=80\%$) เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนักเล็กน้อยเมื่อมุมเอียงเสาเข็มเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มทำให้กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มลดลง

สำหรับกรณีชั้นดินความหนาแน่นแบบหวมถึงปานกลางอาจเกิดการพัฒนาของกำลังรับน้ำหนักจากการเอียงของเสาเข็มเนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงเพิ่มขึ้น ในส่วนกรณีชั้นดินความหนาแน่นแบบแน่นอาจเกิดการสูญเสียกำลังรับน้ำหนักจากการเอียงของเสาเข็ม ทั้งนี้พื้นที่ที่กระเปาะความเค้นในการรับแรงอาจเกิดการพัฒนากำลังในช่วงความหนาแน่นแบบหวมถึงปานกลาง ซึ่งเป็นช่วงความหนาแน่นของชั้นดินธรรมชาติ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการพัฒนากำลังของมวลดินรอบเสาเข็มและสามารถอธิบายแนวโน้มของกำลังรับน้ำหนักมากขึ้น รวมถึงการเคลื่อนตัวมวลดินและพื้นที่ที่กระเปาะความเค้นในการรับแรงรอบเสาเข็ม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผลรวม

ตารางที่ 3 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มในแนวตั้ง

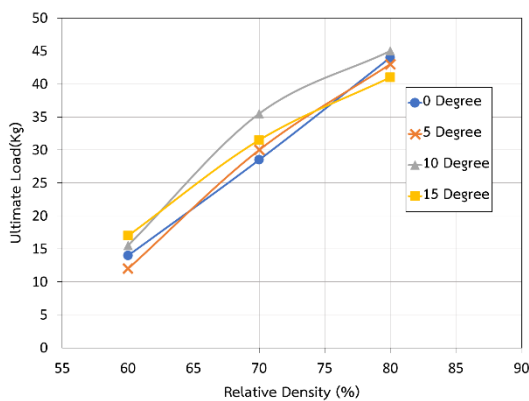
β (Degree)	Q_u (kg) at $D_r=60\%$	Q_u (kg) at $D_r=70\%$	Q_u (kg) at $D_r=80\%$
0	14.0	28.5	44.0
5	12.0	30.0	43.0
10	15.5	35.5	45.0
15	17.0	31.5	41.0



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักสูงสุดกับมุมเอียงของเสาเข็ม

4.4 อิทธิพลของความหนาแน่นสัมพัทธ์มวลดินต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้ง

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มสูงสุด พบว่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อความหนาแน่นของชั้นดินเพิ่มขึ้น 1.17 เท่า ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสูงสุดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.1 เท่า ในทุกมุมเอียงของเสาเข็ม เนื่องจากชั้นทรายแน่นทำให้แรงเสียดทานระหว่างเม็ดทรายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ Direct Shear Test



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับกำลังรับน้ำหนักสูงสุด

5. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของแบบจำลองเสาเข็มเดี่ยวที่ทำมุมเอียง 0, 5, 10 และ 15 องศาในแนวตั้ง ซึ่งถูกฝังในชั้นทรายที่ใช้เป็นแบบจำลองดินที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 60%, 70% และ 80% โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษามีดังนี้

- สำหรับกรณีกำลังรับน้ำหนักในชั้นดินหลวม ($D_r=60\%$) พบว่ากำลังรับน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงเสาเข็มเพิ่มขึ้น กรณีกำลังรับน้ำหนักในชั้นดินแน่นปานกลาง ($D_r=70\%$) การเพิ่มมุมเอียงเสาเข็มส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่มุมเอียง 10 องศาในแนวตั้ง หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจะลดลงแต่ก็ยังคงมีค่ามากกว่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในแนวตั้ง กรณีกำลังรับน้ำหนักในชั้นดินแน่น ($D_r=80\%$) เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนักเล็กน้อยเมื่อมุมเอียงเสาเข็มเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มทำให้กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มลดลง
- การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมวลดินส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม กล่าวคือความหนาแน่นของมวลดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในแนวตั้งเพิ่มขึ้น
แนวโน้มกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเอียงที่แตกต่างกันเนื่องจากมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นระหว่างมวลดินหลวม ($D_r=60\%$) กับมวลดินแน่น ($D_r=80\%$) ซึ่งอาจจะมีการพัฒนากำลังและพฤติกรรมของมวลดินรอบเสาเข็มที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการพัฒนากำลังของมวลดินรอบเสาเข็มและสามารถอธิบายแนวโน้มของกำลังรับน้ำหนักมากขึ้น รวมถึงการเคลื่อนตัวของมวลดิน

และพื้นที่ที่กระเปาะความเค้นในการรับแรงรอบเสาเข็ม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผลร่วม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัย และให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2547). เสาเข็มและการคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็ม. กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา สำนักควบคุมก่อสร้าง กรมโยธา
- [2] พัฒนศักดิ์ ออบเชย. (2546). พฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [3] ออบเชย ท้วมประดิษฐ์ (2545). พฤติกรรมของแบบจำลองเสาเข็มเอียงในดินเหนียวประดิษฐ์กรุงเทพฯ รองรับแรงกระทำด้านข้าง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8.
- [4] Al-Neami, M. A., F. H. Rahil and K. S. Al-Bayati (2016). "Bearing capacity of batter piles embedded in sandy soil." International Journal of Geotechnical Engineering 10(5): 529-532.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM D854 Standard test methods for Specific Gravity of Solids by Water Pycnometer. Annual Book of ASTM Standards.
- [6] American Society for Testing and Materials. ASTM D2487 Standard test methods for Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM D3080 / D3080M – 11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards.
- [8] Fan-ren, L., Y. Ji-ming and J. Yao-hua (2011). "Study on proportion relationship of lateral bearing capacity of batter pile by model experiments." Procedia Engineering 16: 8-13.
- [9] Gerolymos, N., A. Giannakou, I. Anastasopoulos and G. Gazetas (2008). "Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses." Bulletin of Earthquake Engineering 6(4): 705-722.
- [10] Kitiyodom, P. and T. Matsumoto (2002). "A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations

with batter piles." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 26(13): 1349-1369.

- [11] Vu, A.-T., T. Matsumoto, S.-i. Kobayashi and S. Shimono (2017). "Experimental Study on Pile Foundations having Batter Piles Subjected to Combination of Vertical and Horizontal Loading at 1-g Field." Geotechnical Eng. J. of the SEAGS & AGSSEA 48(3): 12-24.