การศึกษาทางทฤษฎีและวิธีการเชิงตัวเลขถึงอิทธิพลของน้ำหนักกดทับต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น

A Theoretical and Numerical Study on Effects of Overburden Stress on the Capacity of Under-Reamed Pile

บุษยา สุวรรณจินดา[1] วิวรรธน์ วชิรภูมิภักดิ์[1] ศุภกฤษ เฟื่องฟู[1] และ วรัช ก้องกิจกุล[1,*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพ

**Corresponding author; E-mail address: warat.kon@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

เสาเข็มเจาะขยายลำต้น คือ เสาเข็มคอนกรีตประเภทเจาะและหล่อในที่ชนิดหนึ่ง ที่มีส่วนปีกเพิ่มขึ้นมาหนึ่งหรือสองปีกที่บริเวณส่วนปลายของเสาเข็ม การเพิ่มขึ้นมาของส่วนปีกทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของเสาเข็มเพิ่มขึ้นมากกว่าเสาเข็มทั่วไป ซึ่งแรงแบกทานของเสาเข็มมาจาก 2 ส่วนคือ กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม และแรงเสียดทานระหว่างผิวของเสาเข็มกับผิวดินบริเวณรอบ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักกดทับต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น และวิเคราะห์วงอิทธิพลจากเส้นชั้นของความเครียดสูงสุด โดยผลที่นำมาวิเคราะห์มีดังนี้ 1. ผลการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มย่อส่วนในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยในอดีต 2. ผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มด้วยการคำนวณทางทฤษฎี 3. ผลการจำลองการทดสอบเสาเข็มย่อส่วนด้วย FEM และ 4. ผลการเปรียบเทียบเส้นชั้นความเครียดสูงสุดระหว่างการทดลองกับ FEM จากการศึกษาพบว่า เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่สนใจเทียบกับกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีกที่ไม่มีน้ำหนักกดทับบนผิวดิน (Pile capacity ratio, PCR) พบว่า 1. ในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักกดทับบนผิวดิน เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้นทั้งแบบหนึ่งปีกและสองปีกมีค่า PCR เท่ากับ 3 และการเพิ่มระยะห่างระหว่างปีกของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นสองปีกไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ 2. เมื่อมีน้ำหนักกดทับมากระทำบนผิวดิน การขยายปลายเสาเข็มจากไม่มีปีกเป็นหนึ่งปีก ทำให้ PCR มีค่าเท่ากับ 2 ถึง 9 และการเพิ่มจำนวนปีกเป็นสองปีกทำให้ PCR มีค่าเท่ากับ 3 ถึง 13 สำหรับน้ำหนักกดทับ 0 ถึง 100 kPa ตามลำดับ เมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับ ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มขยายลำต้นหนึ่งปีกและสองปีกในแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับจะทำให้ค่า PCR ของเสาเข็มขยายลำต้นสองปีกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นน้ำหนักกดทับมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของชั้นทราย ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น และ 3.เมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำบนชั้นทรายมากขึ้น ขนาดวงอิทธิพลของค่าความเครียดสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่วงอิทธิพลครอบคลุมส่วนขยายลำต้นของเสาเข็มซึ่งเป็นสาเหตุให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นสูงขึ้น

คำสำคัญ: กำลังรับแรงแบกทาน, น้ำหนักกดทับบนผิวดิน, แบบจำลอง, เสาเข็มเจาะขยายลำต้น, วิธีการเชิงตัวเลข

Abstract

Under-reamed piles are the cast-in-situ concrete bored piles having one or two bulbs formed by enlarging the pile tip of the stem. By providing the under reamed bulbs, the bearing capacity of piles increases significantly when comparing to the one of typical piles. End bearing capacity and friction capacity are all components of bearing capacity. This research studied the influences of the overburden stress of on the bearing capacity of single pile by analyzing the influence zones to determine the maximum shear strain. Results of physical model test from the past study, ultimate bearing capacity theoretically analyzed, and results from FEM analysis were used and the contours of maximum shear strain obtained by the experiment and FEM, which defines the influence zone, were compared. The followings are found. Pile capacity ratio (PCR) of single pile increases to around 2 to 3 if the pile is under-reamed because of the increase of the bearing area. Increasing of number of bulbs does not significantly increase the capacity of single pile. When the surcharge load is increased from 0 to 100 kPa on the ground surface, the PCR of single under-reamed pile becomes 2 to 9 and the PCR of multi-layered under-reamed pile is 3 to 13. If there is no surcharge, the ultimate pile capacities of multi-layered under-reamed pile determined from the experiment and FEM are close to the ones of single-layered under-reamed pile. On the other hand, increasing surcharge significantly increases the PCR of

multi-layered under-reamed pile. Thus, the overburden stress significantly influences to the soil strength. The increase of the pile capacity can be explained by the increase of the area of influence zone. That is, it becomes significantly larger when the pile is under-reamed.

Keywords: Bearing capacity, Overburden stress, Physical model, Under-reamed pile, Numerical method

1. บทนำ

ในงานทางวิศวกรรมโยธา ฐานรากเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงจากโครงสร้างลงไปสู่ชั้นดินลึก ที่มีความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกทำให้โครงสร้างคงอยู่ได้ โดยฐานรากที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ ฐานรากตื้นและฐานรากลึก ซึ่งการเลือกใช้ฐานรากจะขึ้นอยู่กับสภาพดินในพื้นที่ก่อสร้าง ขนาดของน้ำหนักที่ต้องรองรับ และคุณสมบัติของชั้นดิน การเจริญเติบโตของเมืองในในที่ต่าง ๆ ทั่วโลกทำให้มีโครงสร้างขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากมายซึ่งโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่เป็นตึกสูง เสาเข็มที่ใช้ก่อสร้างเป็นเสาเข็มกลุ่ม ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มักกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างกันไม่น้อยกว่าสามเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งอาจทำให้ในกรณีที่มีพื้นที่ก่อสร้างมีอย่างจำกัดทำได้ยากหรือไม่สามารถก่อสร้างได้

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจ เสาเข็มเจาะขยายลำต้น (Under-Reamed Pile) ที่มีลักษณะเป็นเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ เป็นฐานรากเสาเข็มที่มีรูปร่างลักษณะส่วนปีกเพิ่มขึ้นมา ทำให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น ได้แก่ 1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นเสาเข็มเจาะขยายลำต้น 2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปีก 3. ความยาวจากปลายล่างของเสาเข็มถึงปีกส่วนแรก 4. จำนวนของปีก และ 5. ระยะห่างระหว่างปีก เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของน้ำหนักกดทับบริเวณผิวดินซึ่งจะส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น โดยจะแสดงการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเจาะขยายลำต้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนปีกและระยะห่างระหว่างปีก รวมไปถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับบนผิวดินกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนปีกว่ามีผลต่อกำลังรับน้ำหนักมากน้อยเพียงใด ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการใช้งานในกรณีที่มีข้อจำกัดในขนาดของพื้นที่ก่อสร้างและฐานรากที่ต้องการเสาเข็มที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่ามากขึ้นได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1. ศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักกดทับที่ผิวดินที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นที่มีจำนวนปีกและระยะห่างระหว่างปีกที่ไม่เท่ากันด้วยวิธีทางทฤษฎีและวิธี Finite Element 2. ศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักกดทับที่ผิวดินต่อวงอิทธิพลของปีกเสาเข็มเจาะขยายลำต้นด้วยวิธีทางทฤษฎีและวิธี Finite Element โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากงานวิจัยในอดีต 3. พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นกับน้ำหนักกดทับที่ผิวดิน สำหรับเสาเข็มเจาะขยายลำต้นที่มีจำนวนปีก และระยะห่างระหว่างปีกไม่เท่ากัน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กำลังรับแรงของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น

Christopher and Gopinath [1] ศึกษาการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นพบว่า การเพิ่มจำนวนปีกของเสาเข็มทำให้เสาเข็มสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของจำนวนปีกทำให้กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นเพิ่มขึ้น

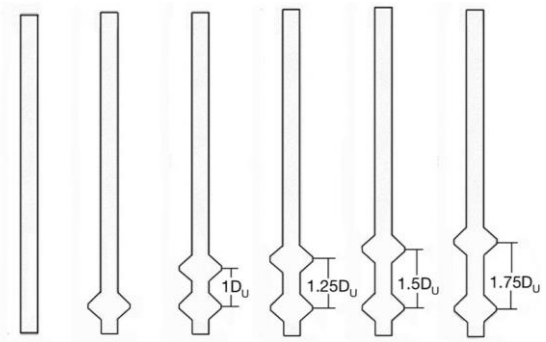
Vali et al. [2] ศึกษาการรับแรงของเสาเข็มไม่มีปีกและเสาเข็มเจาะขยายลำต้นที่มีการเพิ่มจำนวนปีกด้วยวิธี Finite Element พบว่า การที่เสาเข็มมีส่วนปีกเพิ่มขึ้นมาทำให้เสาเข็มมีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น

ขวัญเจริญทรัพย์ และคณะ [3] ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างปีกวงแหวนของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นด้วยแบบจำลองย่อส่วนทางกายภาพ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนปีกจากไม่มีปีกเป็นหนึ่งปีก ทำให้เสาเข็มรับแรงแบกทานได้มากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของปีกที่สองและระยะห่างระหว่างปีกของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นสองปีกไม่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงแบกทานเสาเข็ม

3. วิธีการทดสอบ

3.1 แบบจำลอง

เสาเข็มจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มเดี่ยวที่ไม่มีปีก มีหนึ่งปีกและมีสองปีกโดยมีระยะห่างระหว่างปีกบนกับปีกล่างเท่ากับ $1D_u$ $1.25D_u$ $1.50D_u$ $1.75D_u$ ดังรูปที่ 1 วัสดุที่ใช้จำลองคือ ซูปเปอร์ลีนไนลอน (Superlene Nylon) เสาเข็มมีลักษณะทรงกระบอกผ่าซีก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 40 cm เส้นผ่านศูนย์กลางปีกมีขนาด 5 cm ส่วนทรายจะใช้ขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 มีค่า D_r เท่ากับ 96.45% โดยจำลองชั้นทรายกว้าง 1.5 m ลึก 1.5 m และมีน้ำหนักกดทับกระทำบนชั้นทรายเท่ากับ 0, 20, 40, 60, 80, และ 100 kPa ส่งผลให้มี 36 กรณีที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบของเสาเข็มจำลอง

ตารางที่ 1 กรณีการทดสอบ

ลำดับ	กรณีทดสอบ	ระยะ, S_v (cm)	น้ำหนักกดทับ, q (kPa)
1	0B-V0D$_u$-q0	N/A	0
2	0B-V0D$_u$-q20	N/A	20
3	0B-V0D$_u$-q40	N/A	40
4	0B-V0D$_u$-q60	N/A	60
5	0B-V0D$_u$-q80	N	

3.3 การคำนวณ Maximum Shear Strain

รูปที่ 3 Mohr's circle of strain

Maximum Shear Strain สามารถหาได้ด้วยการใช้ Mohr's circle of strain โดยคำนวณได้จากสมการที่ 1, 2, และ 3

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{\frac{1}{4}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\frac{\gamma_{xy}}{2})^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \sqrt{\frac{1}{4}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\frac{\gamma_{xy}}{2})^2} \quad (2)$$

$$\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (3)$$

3.4 การคำนวณทางทฤษฎี

3.4.1 กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มทั่วไป

กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มทั่วไปในกรณีที่มีน้ำหนักกดทับมากระทำคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$Q_u = \left\{A_b\left[(N_q\sigma_v') + S\right]\right\} + \left\{A_s K \tan\delta\left[\frac{(\sigma_{v,top} + \sigma_{v,bottom})}{2} + S\right]\right\} \quad (4)$$

3.4.2 กำลังรับแรงแบกทานของเมื่อมีเสาเข็มเจาะขยายลำต้น

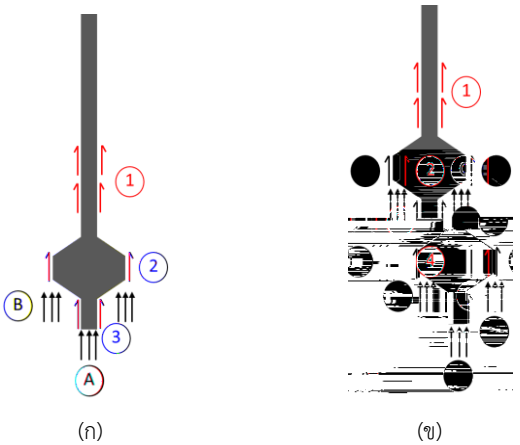
กำลังรับแรงแบกทานของเมื่อมีเสาเข็มเจเ x หงใบร ท ม กกดทับมา

ในสมการที่ 6 สามารถอธิบายตำแหน่งของกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มสำหรับดินทรายของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น 1 ปีกและประเภทของกำลังที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4 (ก) โดยที่ $A_p\left(\frac{1}{2}D\lambda N_\lambda+\left(\left(\lambda d_f N_q\right)+S\right)\right)$ คือ กำลังรับแรงแบกทานตำแหน่ง A, $A_u\left(\frac{1}{2}D_u\lambda N_\lambda+\left(\left(\lambda N_q d_r\right)+S\right)\right)$ คือ กำลังรับแรงแบกทานตำแหน่ง B, $A'_{s1}K\tan\delta(p_{d1}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 1, $A'_{s2}K\tan\delta(p_{d2}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 2, $A'_{s3}K\tan\delta(p_{d3}+S)$ คือ กำลังจากแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 3

ในสมการที่ 7 สามารถอธิบายตำแหน่งของกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มสำหรับดินทรายของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น 2 ปีกและประเภทของกำลังที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4(ข) โดยที่ $A_p(\frac{1}{2}D\lambda N_\lambda+\lambda d_f N_q)$ คือกำลังรับแรงแบกทากตำแหน่ง A, $A_u(\frac{1}{2}D_u n\lambda N_\lambda+\lambda N_q n\sum_{r=1}^{r=n}d_r)$ คือกำลังรับแรงแบกทานตำแหน่ง B, $A'_{s1}K\tan\delta(p_{d1}+S)$ คือกำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 1, $A'_{s2}K\tan\delta(p_{d2}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 2, $A'_{s3}K\tan\delta(p_{d3}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 3, $A'_{s4}K\tan\delta(p_{d4}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 4, $A'_{s5}K\tan\delta(p_{d5}+S)$ คือ กำลังแรงเสียดทานที่ผิวบริเวณหมายเลข 5

4. กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มเจาะขยายลำต้น

การวิเคราะห์ผลทดสอบจะแบ่งเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 วิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับกระทำต่อชั้นทราย โดยนิยามกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกระทำที่หัวเสาเข็ม (Q) กับระยะการทรุดตัวของเสาเข็ม (S) โดยกำหนดให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มแต่ละชนิด (Q_{ult}) มีค่าเท่ากับแรงกดกระทำที่หัวเสาเข็มจนมีระยะการทรุดตัวเท่ากับ 1D หรือที่การทรุดตัวเท่ากับ 20 mm



(ก) (ข)

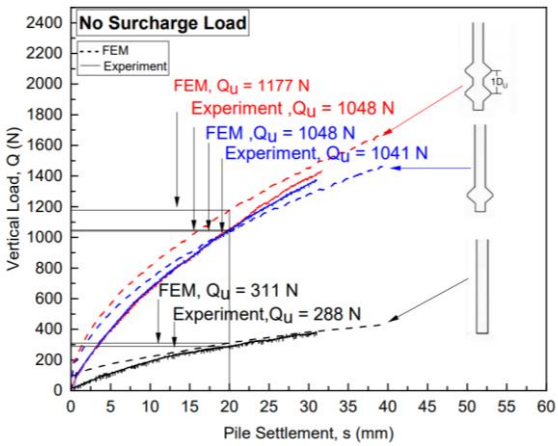
รูปที่ 4 ตำแหน่งของแรงแบกทานที่เกิดขึ้นบนเสาเข็มเจาะขยายลำต้นจากสมการหากำลังรับแรงแบกทานสำหรับดินทราย

ส่วนที่ 2 วิเคราะห์อิทธิพลของน้ำหนักกดทับต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ส่วนที่ 3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวเมื่อมีน้ำหนักกดทับที่มีขนาดต่างกัน และส่วนที่ 4 วิเคราะห์เส้นชั้น (Contour) โดยนำค่าความเครียดตั้งฉากในแนวราบ (ε_{xx}) ความเครียดตั้งฉากในแนวดิ่ง (ε_{yy}) และค่าความเครียดเฉือนบนระนาบที่ตั้งฉากกัน (ε_{xy}) มาคำนวณและสร้างแผนภาพ Maximum Shear Strain (γ_{max}) ผ่านโปรแกรม MATLAB ทำให้สามารถหาพื้นที่วงอิทธิพลจากค่าแผนภาพของ Maximum Shear Strain นำพื้นที่วงอิทธิพลที่ไปความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักและพื้นที่วงอิทธิพล

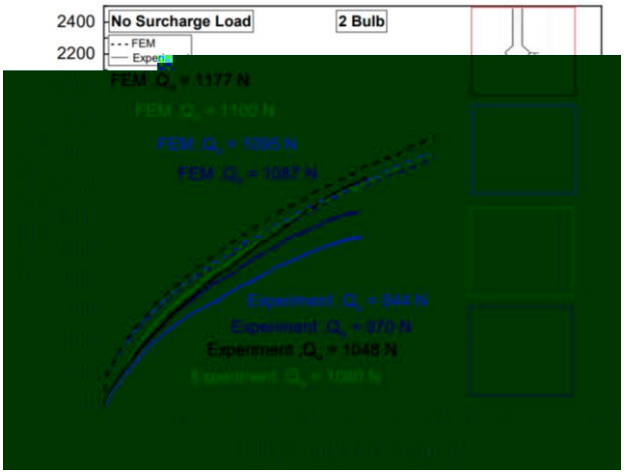
4.1 กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขยายลำต้นเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับ

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกที่ระยะห่างระหว่างปีกต่างกัน ที่ไม่มีน้ำหนักกดทับมากระทำกับชั้นทรายจากวิธี FEM เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงด้วยแบบจำลองสามารถสังเกตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Q) และค่าการทรุดตัว (S) ของเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีกและมีจำนวนปีกที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 5 และในส่วนของเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกที่มีระยะห่างระหว่างปีกแตกต่างกันเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับมากระทำกับชั้นทรายจากวิธี FEM และการทดสอบจริงด้วยแบบจำลองโดยสามารถพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ได้จากรูปที่ 6

การหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับมากระทำกับชั้นทรายจากวิธี FEM กับการทดสอบจริงด้วยแบบจำลองจะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มใกล้เคียงกัน และพบว่าการเพิ่มขึ้นของปีกจาก 1 ปีกเป็น 2 ปีก ไม่ทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจึงไม่สอดคล้องการศึกษาของ Chistopher and Gopinath [1] และ Vali et al. [2] อาจเป็นเพราะมาจากตำแหน่งส่วนปีกบนสุดมีระดับความลึกจากระดับผิวดินน้อยเกินไป ตามข้อกำหนด IS 2911 [4] ที่ระบุไว้ว่าปีกบนสุดควรอยู่ที่ความลึกอย่างน้อย 1.75 เมตร จากผิวดิน ส่งผลให้ดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลไม่เพียงพอที่จะแสดงผลการเพิ่มจำนวนปีกของเสาเข็มและระยะห่างระหว่างปีกไม่แสดงผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับน้ำหนักสูงสุด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่มีปีกและไม่มีปีกและมีจำนวนปีกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่มีปีก 2 ปีกที่มีระยะห่างระหว่างปีกแตกต่างกัน

4.2 อิทธิพลของน้ำหนักกดทับที่ผิวดินต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

กำลังรับน้ำหนักสูงสุดเมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำบนผิวดินของเสาเข็มไม่มีปีก เสาเข็มขยายลำต้น 1 ปีกและเสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีกที่ระยะห่างระหว่างปีกต่างกันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำบนชั้นทรายจะส่งผลให้เสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกที่ระยะห่างระหว่างปีกต่างกัน มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Q_{ult}) ของเสาเข็มจากวิธี FEM และการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และสำหรับเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกที่ระยะห่างระหว่างปีกต่างกัน มีกำลังรับน้ำหนักของจากวิธี FEM เพิ่มขึ้นจากเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 1 ปีกอย่างชัดเจนเมื่อมีน้ำหนักกดทับมากระทำตั้งแต่ 20 kPa ขึ้นไป ซึ่งทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักกดทับมากระทำจากวิธี FEM และการคำนวณด้วยทฤษฎี นั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Chistopher and Gopinath [1] และ Vali et al. [2] เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างปีกที่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Q_{ult}) เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกเมื่อมีน้ำหนักกดทับมากระทำจากวิธี FEM ไม่ส่งผลเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยทฤษฎีอาจเนื่องมาจากขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเล็กเกินไปจึงไม่แสดงให้เห็นถึงผลที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนอย่างในวิธี FEM เช่นเดียวกับการทดสอบจริงด้วยแบบจำลองเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทับมากระทำ

4.3 ประสิทธิภาพของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักกดทับ

การหาประสิทธิภาพของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักกดทับที่ผิวดิน ได้ทำการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของค่า Pile Capacity Ratio (PCR) กับน้ำหนักกดทับที่ผิวดิน (Surcharge Load, q) ของเสาเข็มเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้นหนึ่งปีก และเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้นสองปีก สรุปได้ว่า น้ำหนักกดทับมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีกของแบบจำลอง โดยกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะมีค่าสูงขึ้นตามน้ำหนักกดทับที่กระทำบนชั้นดินดังรูปที่ 7 ซึ่งให้เห็นว่า น้ำหนักกดทับจะมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อเสาเข็มมีจำนวนปีกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำบนผิวดิน

กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม							
Surcharge	(kPa)	0	20	40	60	80	100
No bulb (N)	FEM	311	943	1472	1932	2362	2737
	Theory	249	916	1584	2251	2919	3586
1 bulb(N)	FEM	1041	2269	3190	4051	4837	5528
	Pakrashi, S. (2017)	1634	2293	2952	3611	4270	4929
	IS2911(1980)	1673	2572	3471	4369	5268	6167
2 bulb 1 D_u (N)	FEM	1177	2678	3920	4988	5939	6802
	Pakrashi, S. (2017)	1634	2293	2952	3611	4270	4929
	IS2911(1980)	1673	2572	3471	4369	5268	6167
2 bulb 1.25 D_u (N)	FEM	1095	2552	3769	4781	5746	6659
	Pakrashi, S. (2017)	1610	2269	2928	3587	4246	4905
	IS2911(1980)	1654	2553	3452	4350	5249	6148
2 bulb 1.5 D_u (N)	FEM	1100	2576	3756	4799	5749	6739
	Pakrashi, S. (2017)	1586	2245	2904	3563	4222	4881
	IS2911(1980)	1635	2533	2432	4331	5229	6128
2 bulb 1.75 D_u (N)	FEM	1087	2559	3916	4942	5935	6851
	Pakrashi, S. (2017)	1565	2245	2924	3604	4284	4963
	IS2911(1980)	1635	2533	2432	4331	5229	6128

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง PCR กับน้ำหนักกดทับที่ผิวดินของเสาเข็มเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก เสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้นหนึ่งปีก และเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้นสองปีก

เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักกดทับจนมีค่า Overburden stress ในดินเพียงพอจะส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 2 ปีก ทุกระยะห่างระหว่างปีกที่ต่างกัน มีสัดส่วนของกำลังเพิ่มขึ้นจากเสาเข็มเดี่ยวขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มเดี่ยวไม่มีปีก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chistopher and Gopinath [1] และ Vali et al. [2]

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบกันของแผนภูมิ γ_{max} ระหว่างเสาเข็มที่ไม่มีปีก เสาเข็มขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีก

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบกันของแผนภูมิ γ_{max} ระหว่างเสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีกที่มีระยะห่างระหว่างปีกแตกต่างกัน

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกันของแผนภูมิ γ_{max} ระหว่างเสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีกที่มีระยะห่างระหว่างปีกเท่ากัน แต่มีน้ำหนักกดทับที่ผิวดินแตกต่างกัน

4.4 วงอิทธิพลของค่า Maximum Shear Strain

2. เมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำบนผิวดิน จากวิธี FEM สรุปได้ว่า น้ำหนักกดทับมีอิทธิพลให้เสาเข็มไม่มีปีก เสาเข็มขยายลำต้น 1 ปีก และเสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีก มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกดทับที่เพิ่มขึ้น และน้ำหนักกดทับจะมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มมากขึ้นเมื่อเสาเข็มมีจำนวนปีกเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังแบกทานจะเพิ่มขึ้นจากจำนวนปีกและเมื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับจนดินมีค่า Overburden stress เพียงพอให้ปีกที่ 2 ของเสาเข็มแสดงพฤติกรรมรับแรงแบกทานที่ปีกส่งผลให้เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับที่ผิวดินทำให้เสาเข็มขยายลำต้น 2 ปีก มีค่า PCR เพิ่มขึ้นจากค่า PCR ของเสาเข็มขยายลำต้น 1 ปีกอย่างชัดเจน
3. วงอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวมีลักษณะเป็นกระเปาะทางด้านล่างเสาเข็ม เมื่อทำการขยายลำต้นเสาเข็มพบว่า วงอิทธิพลมีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดพื้นที่ของวงอิทธิพล มีความสัมพันธ์กับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยขนาดวงอิทธิพลได้รับผลมาจากหน่วยแรงประสิทธิผลในดิน เมื่อมีน้ำหนักกดทับกระทำมากขึ้น ส่งผลให้ดินมี Shear strength เพิ่มสูงขึ้น ทำให้วงอิทธิพลบริเวณลำต้นที่ขยายขยายใหญ่ครอบคลุมถึงส่วนปลายและปีกเสาเข็ม ซึ่งเป็นเหตุสนับสนุนว่าทำไมกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มถึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำหนักกดทับมากระทำที่ผิวดินเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Christopher, T. and Gopinath, M.B. (2016). Parametric study of under-reamed piles in sand. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1, pp. 557-581.

[2] Vali, R., Mehrinejad, K. E., Saberian, M., Li, J., Mehrinejad, M., and Jahandari, S. (2019). A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(3), pp. 236-248.

[3] ธนรัฐ ขวัญเจริญทรัพย์, ธวัชวงศ์ ผัดศักดิ์ และธัชนนท์ บุญรุ่งทวีทรัพย์ (2562). อิทธิพลของระยะห่างระหว่างปีกวงแหวนกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มีต่อกำลังรับน้ำหนัก-การศึกษาด้วยแบบจำลองกายภาพ. *ปริญญานิพนธ์*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[4] IS: 2911 (Part III). (1980). Indian Standard Code of Practice for Design and Construction of Pile Foundations. Underreamed Piles, First revision.

[5] Pakrashi, S. (2017). A comparative study on safe pile capacity as shown in Table 1 of IS 2911 (Part III): 1980. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, *98*(1), 185-199.