อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มและปีกวงแหวนต่อกำลังรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มเจาะปลายขยาย – การศึกษาด้วยแบบจำลองกายภาพ

IMPACTS OF PILE AND BULB SPACINGS ON THE UNDER-REAMED PILE GROUP'S CAPACITY – A PHYSICAL MODEL STUDY

ธนรัฐ ขวัญเจริญทรัพย์[1], ธวัชวงศ์ ผัดศักดิ์[1], ธัชนนท์ บุญรุ่งทวีทรัพย์[1] และ วรัช ก้องกิจกุล[1,*]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพ, ประเทศไทย
[*]Corresponding author address: warat.kon@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มเจาะปลายขยาย คือ เสาเข็มคอนกรีตประเภทเจาะและหล่อในที่ชนิดหนึ่ง ที่มีส่วนปีกเพิ่มขึ้นมาหนึ่งหรือสองปีกที่บริเวณส่วนปลายของเสาเข็ม การเพิ่มขึ้นมาของส่วนปีกทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของเสาเข็มเพิ่มขึ้นมากกว่าเสาเข็มทั่วไป งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างปีกวงแหวนกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม ด้วยการทดสอบกับแบบจำลองกายภาพที่ใช้อัตราการย่อขนาดเท่ากับ 1:50 โดยใช้ทรายสะอาดในการจำลองชั้นดินในสนาม และทำการวิเคราะห์พื้นที่วงอิทธิพลจากแผนภูมิของความเครียดสูงสุดจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชั่น จากงานวิจัยนี้พบว่า 1. กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าถึงสามเท่าเมื่อทำให้ปลายเสาเข็มขยายตัว 2. การเพิ่มจำนวนปีกไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็ม 3. การเพิ่มระยะห่างในแนวราบระหว่างเสาเข็มจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น และ 4. การเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักในเสาเข็มสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่วงอิทธิพลที่เกิดขึ้น กล่าวคือ การที่เสาเข็มเดี่ยวมีส่วนปีกเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่วงอิทธิพลมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อกลุ่มเสาเข็มที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นการซ้อนทับของวงอิทธิพลจะลดลง ทำให้พื้นที่รวมของวงอิทธิพลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่ากำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็มสามารถอธิบายได้จากพื้นที่วงอิทธิพล

คำสำคัญ: *กลุ่มเสาเข็ม, การวิเคราะห์ภาพถ่าย, กำลังแบกทาน, แบบจำลองกายภาพ, เสาเข็มเจาะปลายขยาย*

Abstract

Under-reamed piles are cast-in-situ concrete bored piles having one or two bulbs formed by enlarging the zone around the pile tip. By the under-reamed bulbs, the bearing capacity of pile increases significantly comparing to the one of typical pile. This research studied the influences of the vertical spacing of the bulbs and the horizontal spacing of the piles in a pile group on the bearing capacity of single pile and pile group by performing a series of physical model tests with a scaling factor of 1:50. A clean sand was used to model the soil strata in the field. A digital image correlation (DIC) technique was used to determine the contour of maximum shear strain, which was subsequently analyzed for the area of the influence zone. From the results of this study, the followings are found. The capacity of single pile increases more than three times when 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 and pile group. Increasing of horizontal spacing between the piles results in an increase in pile group capacity. The behavior in that the pile and pile group capacities increase is consistent with the increase of the area of the influence zone. That is, the influence zone area becomes significantly bigger when the pile is under-reamed. For pile groups, with increasing the horizontal spacing, the intersected influence zone area becomes less, while the unioned one becomes more. Thus, the capacity of pile and pile group can be explained by the influence zone described in this study.

Keywords: Pile Group, Photogrammetric, Bearing Capacity, Physical Model, Under-Reamed Piles

1. บทนำ

ในงานทางวิศวกรรมโยธา ฐานรากเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายน้ำหนักที่ได้รับจากโครงสร้างลงไปสู่ชั้นดินที่มีความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้น และทำให้โครงสร้าง คงอยู่ได้ ฐานรากที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ ฐานรากตื้นและฐานรากเสาเข็ม ดังเช่น พื้นที่กรุงเทพมหานครที่มีลักษณะเป็นดินอ่อนและมีโครงสร้างอาคารจำนวนมากเป็นตึกสูง

จำเป็นต้องเลือกใช้เสาเข็มเจาะเพื่อถ่ายน้ำหนักไปสู่ดินที่อยู่ระดับที่ต่ำกว่าซึ่งมี กำลังรับน้ำหนักที่มากกว่าด้วยเสาเข็ม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม เมื่อก่อสร้างเป็นเสาเข็มกลุ่มทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มักกำหนด ให้มีระยะห่างระหว่างกันไม่น้อยกว่าสามเท่าของ เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ในวิจัยนี้จึงสนใจเสาเข็มเจาะปลายขยายมีลักษณะเป็นเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่เป็นฐานรากเสาเข็มมีรูปร่างลักษณะส่วนปีกเพิ่มขึ้นมา ทำให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปีก จำนวนของปีก ระยะห่างระหว่างปีก เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะแสดงผลการทดสอบในการรับแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเจาะปลายขยายและศึกษาอิทธิพลของระยะห่างปีกของเสาเข็มเจาะปลายขยายที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะปลายขยายเดี่ยวกับอิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มเจาะปลายขยายที่มีต่อประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็ม เพื่อพัฒนาข้อกำหนดด้านระยะห่างระหว่างปีกและระยะห่างระหว่างเสาเข็มสำหรับการออกแบบเสาเข็มเจาะปลายขยายให้ มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด ที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่ามากได้

ในการศึกษาด้วยแบบจำลองเสาเข็มเจาะปลายขยายมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1. ระยะห่างระหว่างส่วนปีกที่แตกต่างกันของเสาเข็มเจาะปลายขยายต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวดิ่ง 2. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ที่แตกต่างกันของเสาเข็มเจาะปลายขยายต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม 3. ผลกระทบวงอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็มเจาะปลายขยายที่ทับซ้อนกันจากแผนภูมิของความเครียดสูงสุดจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชั่น และหาแนวทางความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็ม 4. เพื่อสร้างความสัมพันธ์หรือสมการประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มเจาะปลายขยายจากระยะห่างระหว่างปีกวงแหวนและระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็มโดยเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบไม่มีปลายขยาย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. กำลังรับแรงของเสาเข็มเจาะปลายขยาย

Vali et al. (2017) [4] ศึกษาการรับแรงของเสาเข็มไม่มีปีกและเสาเข็มเจาะปลายขยายที่มีการเพิ่มจำนวนปีก ในการศึกษาจะวิเคราะห์ด้วยวิธี finite element พบว่า การที่เสาเข็มมีส่วนปีกเพิ่มขึ้นมา ทำให้เสาเข็ม มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น

Christopher et al. (2016) [1] ศึกษาการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวเจาะปลายขยายพบว่าการเพิ่มจำนวนปีกของเสาเข็มทำให้เสาเข็มสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นและ การเพิ่มขึ้นของจำนวนปีกทำให้กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มเจาะปลายขยายเพิ่มขึ้น

2.2. ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม

Thaoni et al. (2015) [3] ศึกษาประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มขณะรับแรงอัดในแนวดิ่ง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพและวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วย DIC พบว่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่น้อยสุดเท่ากับ 3D ทำให้เสาเข็มมีประสิทธิภาพสูงสุด

Gogoi et al. (2014) [2] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม และระยะห่างของเสาเข็มกับอัตราส่วนความยาว ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงของ เสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น

3. วิธีการทดสอบ

3.1. เสาเข็มจำลอง

โดยเสาเข็มจำลองหนึ่งต้นนั้นจะศึกษาเสาเข็มที่ไม่มีปีก มีหนึ่งปีกและมีสองปีกโดยมีระยะห่างระหว่างส่วนปีกกับส่วนปีกคือ $1D_u$ $1.25D_u$ $1.5D_u$ และ $1.75D_u$ แสดงดังรูปที่ 2 และเมื่อทำเป็นกลุ่มเสาเข็มจะมีระยะห่างของเสาเข็มเป็น 3D 4D และ 5D

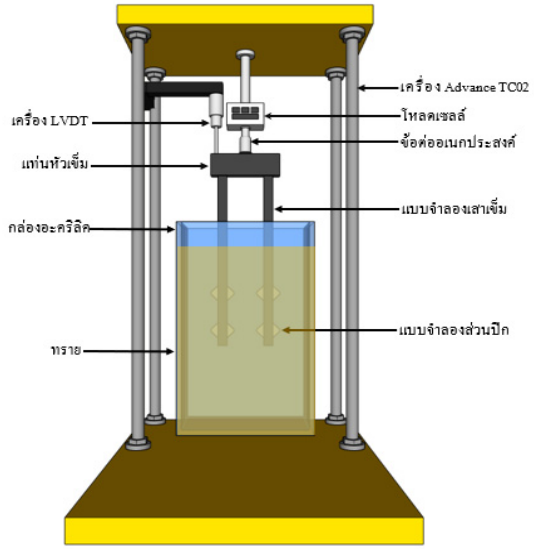
3.2. แบบจำลองกายภาพ

เสาเข็มจำลอง เสาเข็มจำลองประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเสาเข็มและส่วนปีกใช้วัสดุเป็นซูปเปอร์ลีนไนลอน (Superlene Nylon) เสาเข็มมีลักษณะทรงกระบอกผ่าซีก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 40 cm เส้นผ่านศูนย์กลางปีกมีขนาด 5 cm ส่วนทรายจะใช้ขนาดที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 และผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่า D_r เท่ากับ 0.9645 แท่นหัวเสาเข็มที่ออกแบบมีความหนา 40 mm กว้าง 20 mm และยาว 150 mm

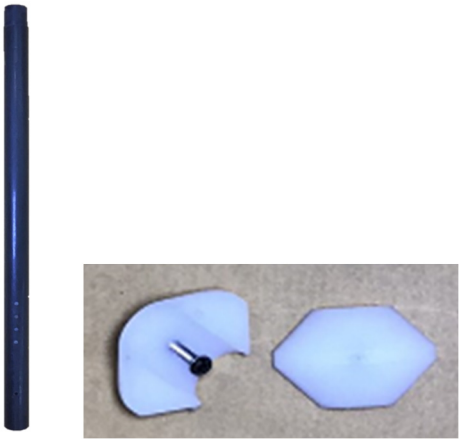
3.3. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย กล่องอะคริลิค Advance PC02 โหลดเซลล์ ข้อต่ออเนกประสงค์ แท่นหัวเข็ม เครื่องโปรยทราย จาระบีซิลิโคนสุญญากาศ iPad รุ่นที่ 7 จากนั้นทำการทดสอบ โดยประกอบไปด้วยเสาเข็มจำลองทั้งสองส่วนต่อเข้าด้วยกัน แล้วนำไปแนบกับกล่องอะคริลิคที่ระหว่างผิวสัมผัสทาด้วยจาระบีซิลิโคนสุญญากาศ จากนั้นทำการโปรยทรายจากเครื่องโปรยทรายลงในกล่องอะคริลิคให้ได้ระดับของทรายที่กำหนด แล้วนำกล่องอะคริลิค เข้าไปติดตั้งในเครื่อง Advance PC02 เชื่อมแท่นหัวเข็มติด กับโหลดเซลล์ด้วยข้อต่ออเนกประสงค์เพื่อทำการทดสอบ ระหว่างการทดสอบจะถ่ายภาพต่อเนื่องโดยใช้กล้อง จาก iPad รุ่นที่ 7 หลังจากการทดสอบ นำภาพถ่ายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Digital Image Correlation

(DIC) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ncorr [5] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด



รูปที่ 1 แบบจำลองการทดสอบ



รูปที่ 2 รูปแบบของเสาเข็มจำลอง
ก. เสาเข็มปกติที่กลึงจากวัสดุ Superlene Nylon
ข. ส่วนปีกที่กลึงจากวัสดุ Superlene Nylon

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 3D 4D และ 5D สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีปีก หนึ่งปีก และสองปีก โดยมีระยะห่างระหว่างปีกคือ $1D_u$ $1.25D_u$ $1.5D_u$ และ $1.75D_u$ ส่งผลให้มี 24 กรณีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กรณีการทดสอบ

ลำดับ	กรณีทดสอบ	ระยะ S_v (cm)	ระยะ S_h (cm)
1	0B-H0D-V0D_u	N/A	1 ต้น
2	0B-H3D-V0D_u	N/A	3D = 6
3	0B-H4D-V0D_u	N/A	4D = 8
4	0B-H5D-V0D_u	N/A	5D = 10
5	1B-H0D-V0D_u	หนึ่งปีก	1 ต้น
6	1B-H3D-V0D_u	หนึ่งปีก	3D = 6
7	1B-H4D-V0D_u	หนึ่งปีก	4D = 8
8	1B-H5D-V0D_u	หนึ่งปีก	5D = 10
9	2B-H0D-V100D_u	1D_u	1 ต้น
10	2B-H3D-V100D_u	1D_u	3D = 6
11	2B-H4D-V100D_u	1D_u	4D = 8
12	2B-H5D-V100D_u	1D_u	5D = 10
13	2B-H0D-V125D_u	1.25D_u	1 ต้น
14	2B-H3D-V125D_u	1.25D_u	3D = 6
15	2B-H4D-V125D_u	1.25D_u	4D = 8
16	2B-H5D-V125D_u	1.25D_u	5D = 10
17	2B-H0D-V150D_u	1.50D_u	1 ต้น
18	2B-H3D-V150D_u	1.50D_u	3D = 6
19	2B-H4D-V150D_u	1.50D_u	4D = 8
20	2B-H5D-V150D_u	1.50D_u	5D = 10
21	2B-H0D-V175D_u	1.75D_u	1 ต้น
22	2B-H3D-V175D_u	1.75D_u	3D = 6
23	2B-H4D-V175D_u	1.75D_u	4D = 8
24	2B-H5D-V175D_u	1.75D_u	5D = 10

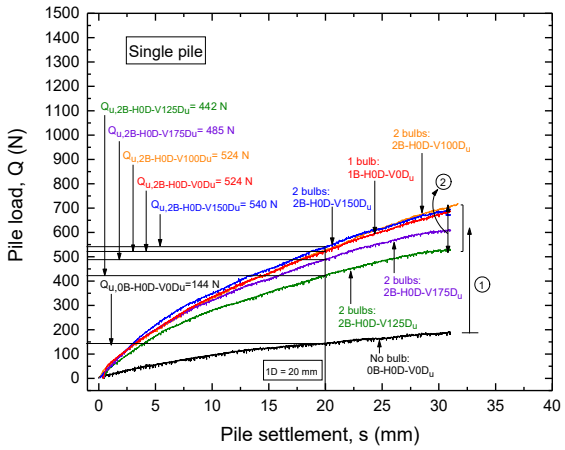
เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
D_u คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนปีก
โดย $D_u = 2.5D$
S_h คือ ระยะห่างในแนวราบระหว่างเสาเข็ม
S_v คือ ระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างส่วนปีก
0B-H0D-V0D_u คือ ชื่อกรณีทดสอบโดยพจน์แรกจะแสดงจำนวนของปีกพจน์ที่สองจะแสดงถึงระยะห่างในแนวราบระหว่างเสาเข็มและพจน์ ที่สามจะแสดงระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างส่วนปีก

4. ผลการทดสอบและการอภิปราย

การวิเคราะห์ผลทดสอบจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งวิเคราะห์การรับน้ำหนักเสาเข็มเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการทรุดตัวของเสาเข็ม และนิยามกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและการจัดเรียงเสาเข็ม ส่วนที่สองวิเคราะห์ภาพถ่ายโดยนำภาพถ่าย มาวิเคราะห์ด้วย Ncorr และนำค่าความเครียดตั้งฉากในแนวราบ(ε_{xx})ความเครียดตั้งฉากในแนวดิ่ง(ε_{yy}) และค่าความเครียดเฉือน(ε_{xy}) มาคำนวณและสร้างแผนภาพ Maximum Shear Strain(γ_{max}) ผ่านโปรแกรม MATLAB ทำให้สามารถหาพื้นที่วงอิทธิพลจากค่าแผนภาพของ Maximum Shear Strain นำพื้นที่วงอิทธิพลที่ไปวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่วงอิทธิพลและการจัดเรียงเสาเข็ม จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักและพื้นที่วงอิทธิพล

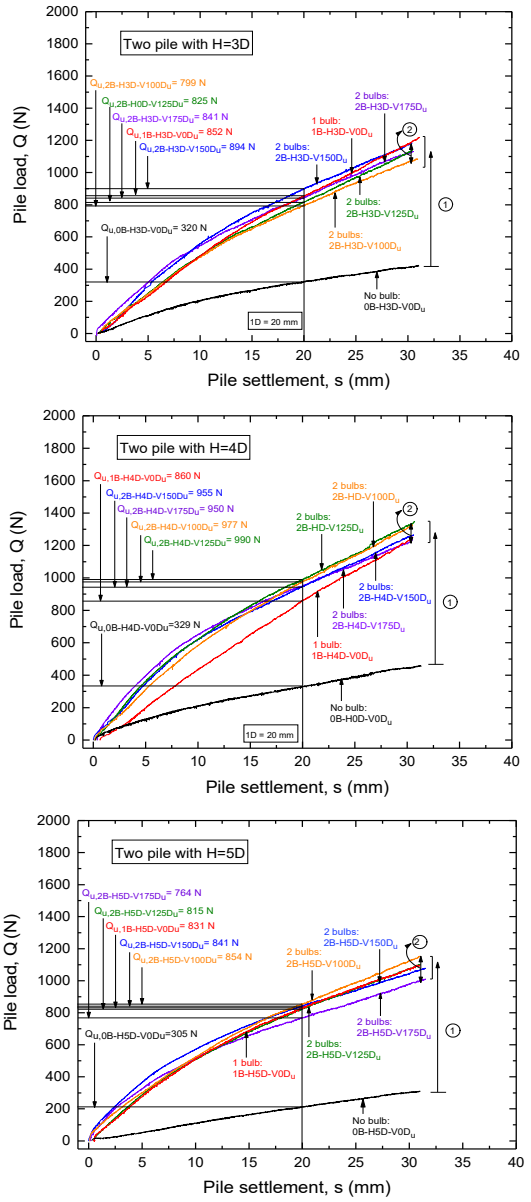
4.1. กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะปลายขยาย

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะพิจารณาจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักเมื่อกดเสาเข็มและกลุ่มเสาเข็ม ลงไปในชั้นทรายและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการทรุดตัวของเสาเข็มและกลุ่มเสาเข็มที่เกิดขึ้น รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่หัวเสาเข็ม (Q) และค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (S) ของเสาเข็มเดี่ยวและมีปีกตำแหน่งตรงปลายและที่มีปีกจำนวน 2 ตำแหน่งที่มีระยะห่างระหว่างปีกไม่เท่ากัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่มีปีกและไม่มีปีกและมีจำนวนปีกและระยะห่างระหว่างปีกแตกต่างกัน

รูปที่ 4 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q-S ของกลุ่มเสาเข็ม 2 ต้นที่จัดเรียงห่างกันตามแนวราบ (H) เท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง(D) (H = 3D) ที่ไม่มีปีก และที่มีปีกตำแหน่งตรงปลายและที่มีปีกจำนวน 2 ตำแหน่งที่มีระยะห่างระหว่างปีกไม่เท่ากัน ในลักษณะที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 4 (ข) และรูปที่ 4 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q-S ของกลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น ที่ H = 4D และ H = 5D ตามลำดับ

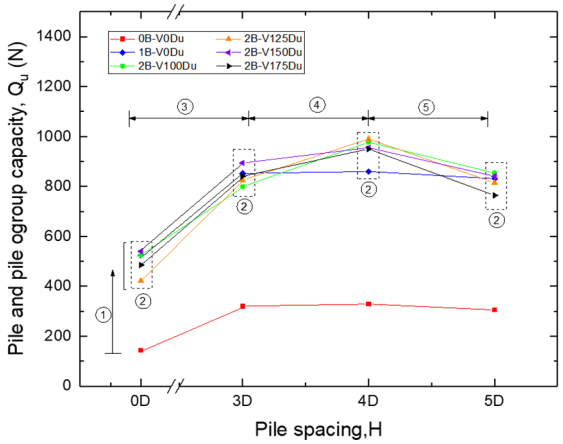


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ ค่าการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มมีปีกและไม่มีปีกและมีจำนวนปีกและระยะห่างระหว่างปีกแตกต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ
(ก) H = 3D
(ข) H = 4D และ
(ค) H = 5D

เมื่อให้น้ำหนักกับเสาเข็มจนถึงระยะการทรุดตัว 30 mm พบว่าการทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น การรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็ม ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 เห็นได้ว่า กำลังรับ

น้ำหนักของเสาเข็มที่มีปีกจะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเสาเข็มไม่มีปีกและความสัมพันธ์ Q-S ที่ได้จากกลุ่มเสาเข็มที่มีจำนวนปีกและระยะห่างระหว่างปีกไม่เท่ากันจะมีลักษณะไม่แตกต่างกันมาก ในการศึกษาจะนิยามกำลังรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มจากความสัมพันธ์ Q-S ที่ระยะการทรุดตัวเท่ากับ 1D (20 mm) และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม กลุ่มเสาเข็มกับค่าการทรุดตัวที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 จากรูปนี้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้การรับแรงของเสาเข็มได้ดังนี้

1. ในเสาเข็มเดี่ยวที่มีส่วนปีกเพิ่มขึ้นมาทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะปลายขยายมีค่าเพิ่มขึ้น
2. การที่เสาเข็มมีส่วนปีกเพิ่มขึ้นจากหนึ่งปีก เป็นสองปีกไม่ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มมีปีกและไม่มีปีก แตกต่างกันมาก
3. เมื่อเพิ่มจำนวนเสาเข็มเดี่ยวเป็นเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น พบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้น
4. เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างเสาเข็มจาก H = 3D เป็น H = 4D พบว่า เสาเข็มมีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น
5. เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างเสาเข็ม จาก H = 4D เป็น H = 5D พบว่า เสาเข็มมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ลดลง แนวโน้มพฤติกรรมนี้อาจเกิดจากความกว้างของแบบจำลองกายภาพไม่เพียงพอ ซึ่งทำให้เกิด Boundary effect ขึ้น และสำหรับความแตกต่างของกำลังรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นในเสาเข็มที่มีปีกเป็นไปได้ว่าอาจได้รับอิทธิพลจาก Boundary effect ทำให้เสาเข็มไม่สามารถแสดงกำลังรับน้ำหนักได้อย่างเต็มที่

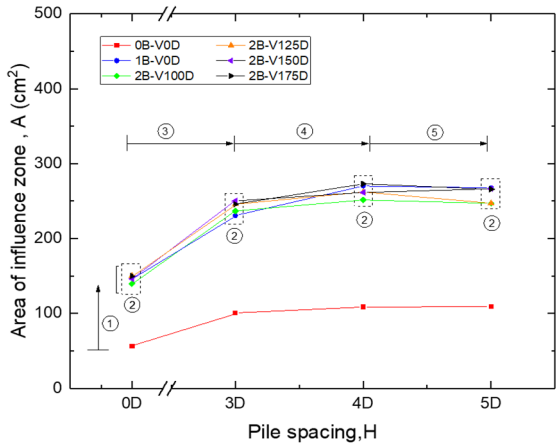


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำของค่าการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มเจาะปลายขยายที่ระยะ 1D (20mm) กับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม

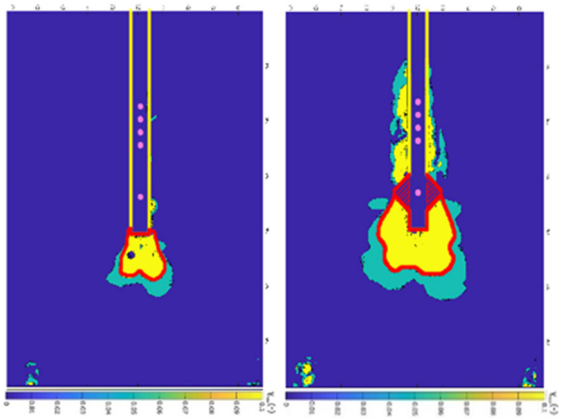
4.2. พื้นที่วงอิทธิพล

การพิจารณาหาพื้นที่วงอิทธิพลจะพิจารณาจาก Maximum Shear Strain ซึ่งสามารถคำนวณ จากค่าความเครียดตั้งฉากในแนวราบ ความเครียดตั้งฉากในแนวดิ่ง และค่าความเครียดเฉือน และสามารถสร้างค่า Contour ของ Maximum Shear Strain ผ่านโปรแกรม Matlab ตัวอย่าง Contour ของMaximum Shear Strain ของเสาเข็มเจาะปลายขยายที่มีปีกหนึ่งปีก เมื่อ Plot โดยใช้ Increment เท่ากับ 5% ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ซึ่งใช้ค่า Maximum Shear Strain เท่ากับ 10% ในการวิเคราะห์ลักษณะการเสียรูปของวงอิทธิพลที่เกิดขึ้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของวงอิทธิพลและระยะห่างของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้การรับแรงของเสาเข็มได้ ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นมาของส่วนปีกทำให้พื้นที่ วงอิทธิพลในเสาเข็มเจาะปลายขยายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเสาเข็มไม่มีปีก ดังแสดงในรูปที่ 6
2. การเพิ่มขึ้นจากหนึ่งปีกเป็นสองปีก ไม่ทำให้พื้นที่ของวงอิทธิพลที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนปีก และบริเวณระหว่างปีกมีค่าไม่แตกต่างกันมาก จึงจะพิจารณาพื้นที่บริเวณใต้ปีกและปลายเสาเข็มเท่านั้น ทำให้พื้นที่ของวงอิทธิพลที่เกิดขึ้นของเสาเข็มมีค่าใกล้เคียงกัน
3. พื้นที่ของวงอิทธิพลในเสาเข็มกลุ่มมีความแตกต่างกับเสาเข็มเดี่ยวอย่างชัดเจน เนื่องจากเสาเข็มกลุ่มมีความสามารถในการรับแรงได้มากกว่าเสาเข็มเดี่ยว แรงที่เสาเข็มส่งถ่ายไปยังชั้นทรายจึงมากกว่าและทำให้พื้นที่ของวงอิทธิพลที่เกิดขึ้นในเสาเข็มกลุ่มมีค่ามากกว่า
4. การที่เสาเข็มมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ที่น้อยเกินไป ทำให้พื้นที่ของวงอิทธิพล เกิดการซ้อนทับและทำให้วงอิทธิพลของเสาเข็มเกิดได้ไม่เต็มที่สอดคล้องกับกำลังรับน้ำหนัก ของเสาเข็มที่ลดลงเมื่อเสาเข็มอยู่ใกล้กัน ดังเช่นในกรณี H = 3D ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และในกรณี H = 4D ที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่วงอิทธิพลเกิดสมบูรณ์มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) ทำให้พื้นที่รวมกันมีค่ามากสอดคล้องกับกำลังรับน้ำหนักที่มากที่สุด
5. ในกรณี H = 5D พื้นที่ของวงอิทธิพลลดลง เมื่อเทียบกับกรณี H = 4D สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ลดลงเป็นผลมาจาก Boundary effect ที่กล่าวไปข้างต้นทำให้วงอิทธิพล เกิดไม่เต็มที่ ทำให้พื้นที่รวมลดลงสอดคล้อง กับกำลังรับน้ำหนักที่ลดลงเช่นกัน

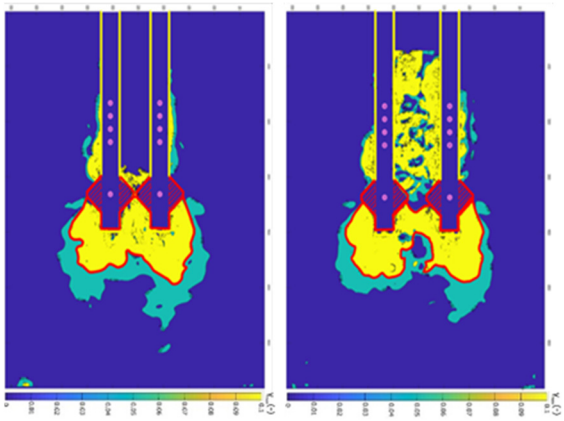


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่วงอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็มเจาะปลายขยายกับมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม



(ก) (ข)

รูปที่ 7 การเปรียบเทียบพื้นที่ของวงอิทธิพล
(ก) เสาเข็มไม่มีปีก
(ข) เสาเข็มมีปีก



(ก) (ข)

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบพื้นที่ของวงอิทธิพลในเสาเข็มกลุ่มที่มี
(ก) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม H = 3D
(ข) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม H = 4D

4.3. ประสิทธิภาพของเสาเข็ม

4.3.1. ประสิทธิภาพการรับน้ำหนัก

การพิจารณาประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มรูปทรงกระบอกผ่าซีกที่มีปีกและไม่มีปีก ภายใต้การรับแรงในแนวดิ่ง (n_1) ที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ต่างกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

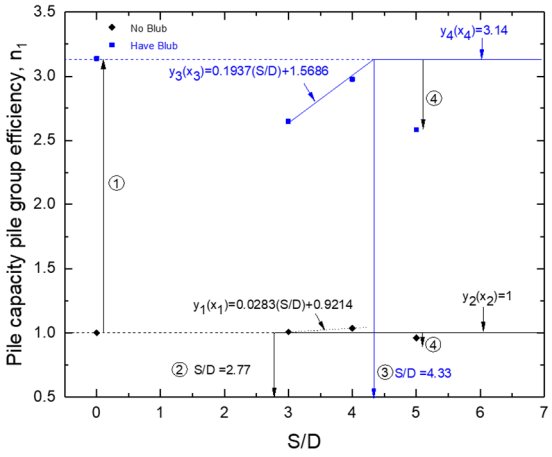
$$n_1 = \frac{Q_u}{n_p\, Q_{0B1P}} \qquad (1)$$

โดย Q_u คือ กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มที่วัดได้จากการทดสอบ (N)

Q_{0B1P} คือ กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มไม่มีปีกต้นเดียว (N)

n_p คือ จำนวนของเสาเข็ม

เนื่องจากเสาเข็มที่มีหนึ่งปีกและสองปีกมีค่าใกล้เคียงกันจะพิจารณาประสิทธิภาพโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังรับน้ำหนัก ของกลุ่มเสาเข็มที่มีปีก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและระยะห่างระหว่างเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการรับน้ำหนักเสาเข็มกลุ่มและระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ต่างกัน

จากรูปที่ 9 พบว่าในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มแบบมีปีกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.14 เท่าของเสาเข็มกลุ่มไม่มีปีก สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีปีกจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม(n_1) ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียง 1.0 ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักที่สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มไม่มีปีกมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่ามากกว่า 2.77D สำหรับเสาเข็มที่มีปีกประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม(n_1) ที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม จนกระทั่ง n_1 =

3.14 ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักสูงสุดและประสิทธิภาพ ในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มแบบมีปีกมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่ามากกว่า 4.50D

4.3.2. ประสิทธิภาพการถ่ายแรงจากพื้นที่

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่วงอิทธิพลจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย(n_2) ที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ต่างกัน สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของพื้นที่วงอิทธิพลได้จากสมการที่ 2

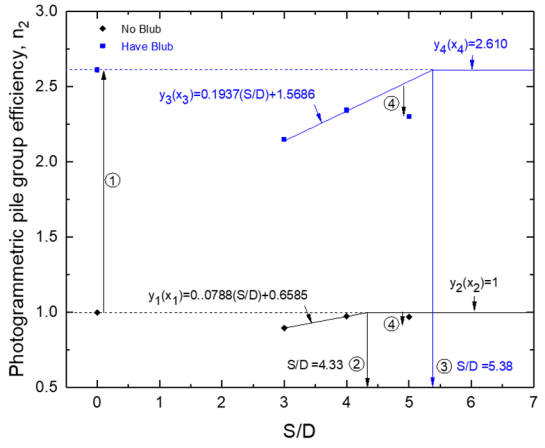
$$n_2 = \frac{A_u}{n_p\, A_{0B1P}} \qquad (2)$$

โดย A_u คือ พื้นที่วงอิทธิพลที่วัดได้ของกลุ่มเสาเข็มต่างๆ (cm^2)

A_{0B1P} คือ พื้นที่วงอิทธิพลที่วัดได้ของเสาเข็มไม่มีปีกต้นเดียว (cm^2)

n_p คือ จำนวนของเสาเข็ม

โดยในการพิจารณาจะใช้หลักการพิจารณาเดียวกันกับประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่วงอิทธิพลและระยะห่างระหว่างเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่ วงอิทธิพลของเสาเข็มกลุ่มแบบมีปีกจะมีเพิ่มขึ้น เป็น 2.61 เท่าของเสาเข็มกลุ่มไม่มีปีก สำหรับเสาเข็ม ไม่มีปีกประสิทธิภาพการถ่ายแรงจากพื้นที่มีค่าสูงสุด เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่ามากกว่า 4.33D สำหรับเสาเข็มแบบมีปีกมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่วงอิทธิพลมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม มีค่ามากกว่า 5.38D

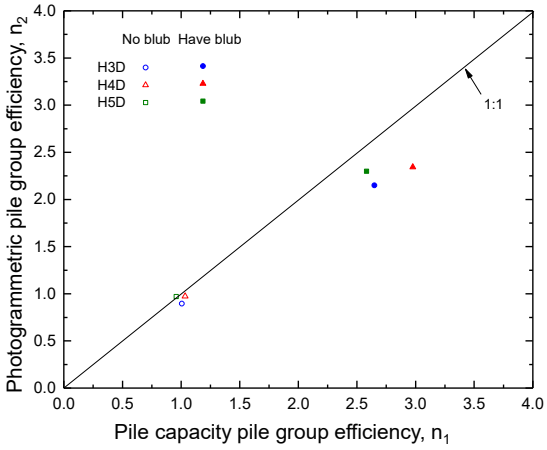


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มจากการวิเคราะห์พื้นที่วงอิทธิพลจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายและระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ต่างกัน

และจะสังเกตุได้ว่าเมื่อเสาเข็มกลุ่มมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ใกล้กันพื้นที่วงอิทธิพลจะเกิดการซ้อนทับกันมากทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่วงอิทธิพลลดลง และเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นมากขึ้นการซ้อนทับจึงเกิดขึ้นน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพของพื้นที่วงอิทธิพลสูงขึ้น จนกระทั่งเสาเข็มแต่ละต้นเกิดพื้นที่วงอิทธิพลได้เต็มที่

4.3.3. การเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่อิทธิพล

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่อิทธิพลเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่เมื่อพิจารณากรณี H5D ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่อิทธิพลลดลง เนื่องจาก Boundary effect และเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่อิทธิพลพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มและประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากพื้นที่อิทธิพลของเสาเข็มไม่มีปีกและมีปีก

5. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างปีกวงแหวนกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มีต่อ กำลังรับน้ำหนักในทรายด้วยแบบจำลองกายภาย และการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธี DIC ผลการทดสอบได้ถูกนำมาวิเคราะห์และสรุปผลได้ ดังนี้

1. กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าถึงสองเท่า เมื่อทำให้ปลายเสาเข็มขยายตัว การเพิ่มจำนวนปีกจากหนึ่งปีก เป็นสองปีกไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ต่อการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว และกลุ่มเสาเข็ม เมื่อเพิ่มระยะห่างในแนวราบระหว่างเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็มพบว่ากำลังรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มเพิ่มขึ้น

2. วงอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวมีลักษณะเป็นกระเปาะทางด้านล่างปลายเสาเข็ม เมื่อทำ การขยายปลายเสาเข็มพบว่า วงอิทธิพล มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดพื้นที่ของวงอิทธิพล มีความสัมพันธ์กับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม เมื่อจำนวนปีกเพิ่มจากหนึ่งปีกไปเป็นสองปีกพบว่า พื้นที่ที่ได้จากวงอิทธิพลจากปีกอันที่สองที่อยู่ด้านบนมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ของวงอิทธิพลหลักตรงปลายเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มกลุ่ม เมื่อเสาเข็มแต่ละต้นกลุ่มอยู่ใกล้กันในแนวราบพบว่า วงอิทธิพลใต้เสาเข็มแต่ละต้นซ้อนทับกัน และเมื่อเสาเข็มอยู่ห่างกันในแนวราบพบว่า วงอิทธิพลใต้เสาเข็มแต่ละต้นไม่ทับซ้อนกัน
3. ค่าประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มเพิ่มขึ้นประมาณถึงสองเท่า เมื่อเจาะปลายขยายเสาเข็ม และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่าง ในแนวราบระหว่างเสาเข็ม (H) เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่ากำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มสามารถอธิบายได้จากพื้นที่วงอิทธิพล

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Christopher, T., and Gopinath, M.B., 2016, Parametric Study of Under-Reamed Piles in Sand., International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1, pp. 557-581.

[2] Gogoi, N., Bordoloi, S., and Sharma, B., 2014, A model study of micropile group efficiency under axial loading condition. International Journal of Civil Engineering Research. ISSN, pp. 2278-3652.

[3] Thaoni, R., Kuisomja, P., Rattanasiriphan, W., and Charoenwongsak, S., 2017, Evaluation of Vertically Loaded Pile Group Efficiency by Physical Model Tests with DIC Technique, Bachelor's Degree of Engineering, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

[4] Vali, R., Mehrinejad Khotbehsara, 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.

[5] Blaber, J. and Antoniou, A. (2017). **Instruction Manual of Ncorr**, Georgia Institute of Technology.