การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็มเมื่อได้รับแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

Analysis of behaviours of single pile and pile groups subjected to lateral loading by 3D finite element

ธวัชวงศ์ ผัดศักดิ์[1,*] และ วรัช ก้องกิจกุล[1]

[1]

*Corresponding author; E-mail address: thawatwong.est715@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งขององค์อาคาร ซึ่งมีหน้าที่รับน้ำหนักโครงสร้างส่วนต่าง ๆ และถ่ายเทลงสู่ดิน โดยปกติน้ำหนักที่ถ่ายลงมาจากโครงสร้างส่วนใหญ่มักเป็นแรงในแนวดิ่ง (Vertical load) แต่ในความเป็นจริงแล้วเสาเข็มยังต้องรับแรงกระทำด้านข้าง (Lateral load) ด้วย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาออกแบบเสาเข็มเช่นกัน ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็มโดยมีจำนวนเสาเข็มและรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มที่แตกต่างกันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ (3D FEM) เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากงานวิจัยในอดีตและทำการพิจารณาผลกระทบของโซนอิทธิผลต่อพฤติกรรมของกลุ่มเสาเข็ม ผลการศึกษาพบว่า 1.ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเสียรูปของเสาเข็มทางด้านข้างที่ได้จากระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลทดสอบแบบจำลองทางกายภาพมีความใกล้เคียงกัน 2. อิทธิพลบดบังและผลกระทบจากขอบจะส่งผลกระทบต่อการรับแรงด้านข้างเสาเข็มเมื่อมีการจัดเรียงเข็มแบบล้อมกรอบมากกว่าการจัดเรียงแบบหน้ากระดาน และ 3. เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น ผลกระทบจากพื้นที่โซนอิทธิพลจะลดลงตาม ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการรับแรงด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มสามารถอธิบายได้จากพื้นที่โซนอิทธิพลที่สามารถมองเห็นภาพและทำให้เข้าใจได้จากการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

คำสำคัญ: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, เสาเข็มกลุ่ม, เสาเข็มเดี่ยว, แรงด้านข้าง, โซนอิทธิพล

Abstract

Pile is one of the key elements of a building, which is responsible for supporting the weight of the structure and transferring it into the ground. Usually, the pile not only transfers the weight, which is the vertical force but also the lateral force. Therefore, the behaviour of single pile and pile groups subjected to lateral loading should be investigated. In this study, the behaviour of one-directional lateral loading of a single pile and pile groups was analysed by a 3D finite element method (FEM), and their results were compared with the experimental ones of physical model tests of the previous studies. In addition, the effects of influence zone on the behaviour of pile group were also investigated. The followings are found. Firstly, the relationship between the lateral pile load and pile deflection analysed by the 3D FEM are close to the ones observed from the physical model test. Secondly, the pile arrangements in the box pattern are more susceptible to the shadow and edge effects than the ones in the side-by-side pattern. With increasing the pile spacing in a pile group, the effect of influence zone decreases and thus the pile group efficiency increases. The pile group efficiency can be explained by the influence zone, which can be visualized and illustrated by 3D FEM performed in this study.

Keywords: Finite element method, Pile group, Single pile, Lateral loading, Influence zone

1. คำนำ

ในปัจจุบันการขยายตัวของเมืองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งส่งผลให้มีการพัฒนาระบบขนส่ง การสร้างสะพาน ทางด่วน หรือการขยายอาคารสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เพิ่มขึ้นในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะพื้นที่ในหัวเมืองใหญ่ต่าง ๆ ที่มีการแข่งขันสูง ซึ่งอาคารสูงได้รับอิทธิพลด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการก่อสร้างอาคารสูง ฐานรากส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นฐานรากลึก หรือเรียกว่าฐานรากเสาเข็ม ซึ่งมักจะใช้กลุ่มเสาเข็มมากกว่าเสาเข็มเดี่ยว เพื่อทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักจากโครงสร้างส่งผ่านไปยังชั้นดิน ในความเป็นจริงแล้วเสาเข็มไม่ได้รับน้ำหนักในแนวดิ่งเพียงเท่านั้น แต่เสาเข็มจะต้องสามารถรับแรงกระทำด้านข้างด้วย ถึงแม้ในบางกรณีแรงกระทำด้านข้างอาจมีน้ำหนักเบา

ถึงปานกลาง ซึ่งไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบเสาเข็ม แต่ในกรณีที่อิทธิพลของแรงลม แรงแผ่นดินไหวหรือ แรงดันของดิน [1] มีความสำคัญการออกแบบฐานรากมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาแรงด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็ม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเมื่อได้รับแรงกระทำด้านข้างให้ดี เพื่อที่จะสามารถออกแบบฐานรากให้สามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้อย่างปลอดภัย

จากการศึกษาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตามความยาวของเสาเข็มเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างพบว่า พฤติกรรมโมเมนต์ดัดของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มจะแตกต่างจากพฤติกรรมโมเมนต์ดัดของเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มกับดินที่อยู่ล้อมรอบ พฤติกรรมโมเมนต์ดัดนี้มีลักษณะสอดคล้องกับประสิทธิภาพการรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็ม นอกจากนี้ ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับชั้นดินและสมบัติของเสาเข็ม [2]

อย่างไรก็ตาม สำหรับกลุ่มเสาเข็มที่มีการจัดเรียงเสาเข็มสมาชิกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรับแรงกระทำด้านข้างด้วยที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาตำแหน่งของเสาเข็มเดี่ยวในกลุ่มเสาเข็มเมื่ออยู่แถวหลังจะมีความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างได้น้อยกว่าตำแหน่งที่อยู่แถวหน้าสุด [3] และเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มสมาชิกแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มสมาชิกมีมากพอ จะทำให้กลุ่มเสาเข็มมีประสิทธิภาพการรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มได้สูงสุด โดยการจัดเรียงแบบอยู่ในแถวเดียวกัน (In-line arrangement) จะต้องใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่มากกว่าการจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (Side-by-side arrangement) เพื่อให้กลุ่มเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มได้สูงสุด [4] ซึ่งพฤติกรรมนี้เกิดจากอิทธิพลบดบัง (Shadowing effect) และอิทธิพลขอบ (Edge effect) ตามลำดับ

ผลกระทบจากอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถศึกษาได้จากประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มที่ลดลง หรือ แรงภายในของเสาเข็มสมาชิกที่ตำแหน่งที่แตกต่างกันในกลุ่มเสาเข็ม เช่น ค่า p-multiplier ของเสาเข็มสมาชิกในแถวหลังจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มสมาชิกในแถวแรก ซึ่งพฤติกรรมนี้เกิดจาก อิทธิพลบดบัง [5] อย่างไรก็ตามการอธิบายอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบส่วนใหญ่แล้ว มักใช้เพียงแนวคิดทางจินตภาพมาอธิบายเท่านั้น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงต้องการนิยามโซนอิทธิพล (Influence zone) จากการเสียรูปของดินบริเวณโดยรอบเสาเข็มเมื่อรับแรงด้านข้างโดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ (3D FEM) มาอธิบาย ซึ่งโซนอิทธิพลนี้ไม่สามารถที่จะระบุได้จากการทดสอบทางกายภาพ ดังนั้นในการศึกษานี้ จะศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็มเมื่อต้องให้แรงกระทำด้านข้างในทิศทางเดียวด้วยวิธี 3D FEM และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับผลการทดสอบจากแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยในอดีต[6]พร้อมทั้งศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มกับดินที่ล้อมรอบ และผลกระทบของการจัดเรียงเสาเข็มสมาชิกในกลุ่มเสาเข็มที่มีต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว โดยอาศัยโซนอิทธิพลที่สร้างขึ้นโดยวิธี 3D FEM มาประกอบการอธิบาย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็มที่ได้รับแรงกระทำด้านข้างจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D FEM) ด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D การจำลองจะทำให้สอดคล้องกับการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากการศึกษาก่อนหน้านี้โดย Weerakul (2016) [6] และส่วนที่สองคือการศึกษาวิธีการกำหนดโซนอิทธิพลเพื่อใช้อธิบายอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบที่เกิดขึ้น

2.1

Weerakul (2016) [6] ได้ทดสอบแบบจำลองทางกายภายด้วยแทงค์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 1 เมตร บรรจุด้วยทราย KMUTT โดยมีเสาเข็มฝังอยู่ในทราย (รูปที่ 1) เสาเข็มจำลองที่ใช้ทำมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.02 เมตร ยาว 0.9 เมตร บริเวณผิวของเสาเข็มติดตั้งสเตรนเกจเพื่อใช้วัดความเครียดที่ผิวซึ่งสามารถนำค่ามาวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของเสาเข็มต่อไปได้ แรงกระทำด้านข้างจะมาชุดมอเตอร์และเกียร์ทดสอบที่ถูกติดตั้งบนโครงสร้างเหล็ก ซึ่งสามารถให้แรงได้สูงสุด 20 กิโลนิวตัน เซลล์วัดแรง (Load cell) ถูกนำมาใช้ในการวัดแรงกระทำด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มจำลอง นอกจากนี้ยังได้มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดระยะ (Displacement transducer) สำหรับการวัดการเสียรูปด้านข้างที่บริเวณหัวเสาเข็ม

2.2 FEM

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองใน FEM เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินโดยรอบที่เกิดจากแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มเสาเข็ม โดยจำลองลักษณะทางกายภาพให้สอดคล้องกับแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการทดสอบจริงให้มากที่สุด ขอบเขตของแบบจำลองใน FEM ในทิศทาง x จะเริ่มต้นด้วย x = 0 ที่จุดกึ่งกลาง และขยายไปถึง x = 0.5 และ -0.5 เมตร ในทิศทาง y มีลักษณะเดียวกันกับในทิศทาง x ส่วนในทิศทาง z จะเริ่มต้นด้วย z = 0 ที่บริเวณพื้นผิวดินและสิ้นสุดขอบเขตด้านล่างที่ z = -0.9 m แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและโครงข่ายไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

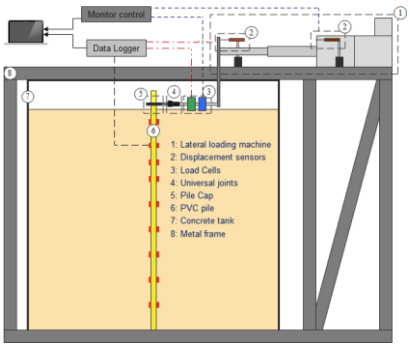
2.3 FEM

แบบจำลอง FEM เสาเข็มที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้มีอยู่สองส่วน กล่าวคือ 1. เสาเข็มแข็ง (Solid pile) และ 2. คานดัมมี่ (Dummy beam) โดยเสาเข็มแข็งจะจำลองด้วย solid elements และคานดัมมี่จะจำลองด้วย beam elements ทั้งนี้ เสาเข็มที่ใช้ในแบบจำลองทางกายภาพเป็นท่อ PVC มีลักษณะหน้าตัดเป็นวงแหวน ซึ่งทำให้ยากต่อการจำลองด้วย FEM ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์จึงทำการปรับหน้าตัดวงแหวนให้เป็น

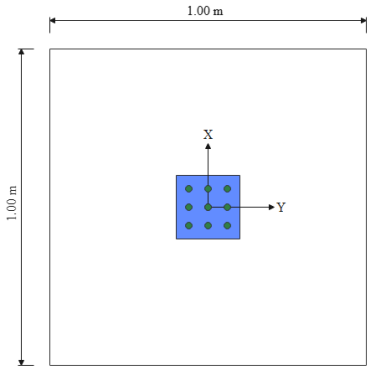
หน้าตัดเต็มและปรับด้วยพารามิเตอร์ให้เทียบเท่าเสาเข็มที่มีหน้าตัดวงแหวน โดยจำลองส่วนที่เป็นเสาเข็มแข็งให้มีสมบัติแบบอิลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic) พารามิเตอร์สมบัติของเสาเข็มแข็งแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของเสาเข็มแข็งจำลองใน PLAXIS 3D

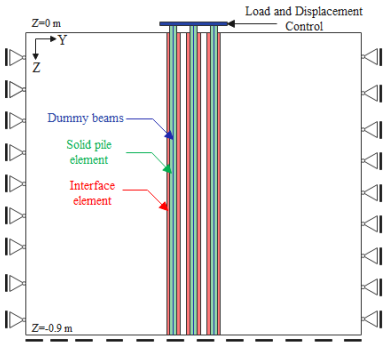
Parameter	Symbol	Value	Unit
Material model	-	Linear elastic	-
Drainage type	-	Non-porous	-
Unit weight	γ	13.50	(kN/m^3)
Young modulus	E	3.20x10^6	(kN/m^2)



รูปที่ 1 การติดตั้งแบบจำลองทางกายภาพ



(ก)



(ข)

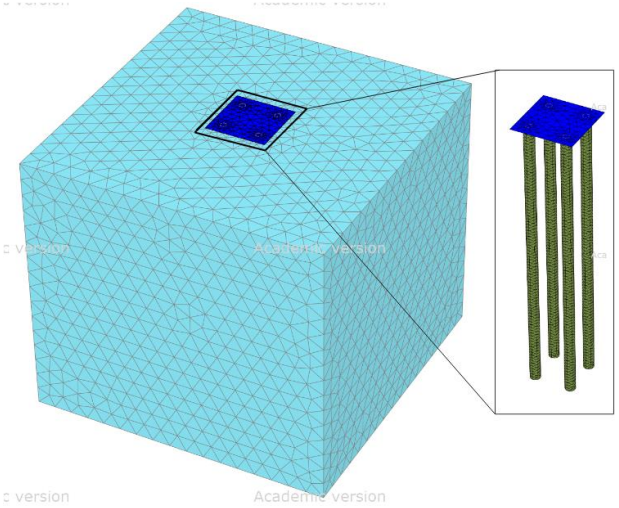
รูปที่ 2 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข: (ก) มุมมองด้านบน และ(ข) ภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลาง

เนื่องจากการจำลองเสาเข็มด้วยเสาเข็มแข็งจะทำให้มีความซับซ้อนเมื่อต้องการคำนวณแรงภายในเสาเข็มเมื่อให้แรงกระทำด้านข้าง เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณแรงภายในของเสาเข็มแข็ง คานดัมมี่จึงถูกแทรกเข้าไปตรงแกนกลางของเสาเข็มแข็งเพื่อให้ทราบแรงภายในที่เกิดขึ้นในคานดัมมี่แล้วนำไปคำนวณแรงภายในเสาเข็มแข็งต่อไป เพื่อการนี้จะต้องลดค่าความแข็งของคานดัมมี่ลงด้วยค่า 10^{-6} เท่าเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของเสาเข็มแข็ง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อพฤติกรรมเสาเข็มแข็งที่เกิดขึ้น เนื่องจากความแข็งมีค่าน้อยมาก คานดัมมี่จึงถูกบังคับให้เสียรูปไปพร้อมกับเสาเข็มแข็ง ดังนั้นแรงภายในเสาเข็มแข็งจึงสามารถคำนวณได้จากแรงภายในของคานดัมมี่ โดยจะต้องคูณค่ากลับคืนด้วยค่า 10^6 เพื่อให้ได้เป็นค่าแรงภายในเสาเข็มแข็ง พารามิเตอร์ของคานดัมมี่แสดงในตารางที่ 2

สมบัติของอินเทอร์เฟซ (Interface) ระหว่างเสาเข็มกับดินล้อมรอบจะอ้างอิงกับสมบัติของดินล้อมรอบ กล่าวคือ สมบัติของอินเทอร์เฟซคำนวณได้จากการปรับลดความแข็งแรง (R_{inter}) สมบัติของดินล้อมรอบ ในการศึกษานี้ R_{inter} ที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 2/3 ซึ่งสอดคล้องกับ Marjanović et al. (2016) [7] และ Brinkgreve et al., (2016) [8]

2.4 KMUTT

การจำลองทราย KMUTT ใน FEM จะใช้แบบจำลองดินแบบฮาร์ดเดนนิง (Hardening soil model, HS) โดยมีพารามิเตอร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความแข็ง (Stiffness parameter) และพารามิเตอร์ความแข็งแรง (Strength parameter) พารามิเตอร์ความแข็งประกอบไปด้วย Secant stiffness modulus (E_{50}^{ref}), Unloading/reloading stiffness modulus (E_{oed}^{ref}), Tangent stiffness modulus (E_{ur}^{ref}) และ Power for stress level dependency of stiffness (m) ส่วนพารามิเตอร์ความแข็งแรงประกอบไปด้วย Effective friction angle (ϕ'), Effective dilatancy angle (ψ') และ Effective cohesion (c')



รูปที่ 3 โครงข่ายไฟไนท์เอลิเมนต์สังเคราะห์ด้วยซอฟแวร์ PLAXIS 3D สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองกลุ่มเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง

งานวิจัยนี้จำลองการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำธรรมดา (Conventional drained triaxial compression, CDTC) ด้วย FEM เพื่อสอบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับผลการทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยของ Srithranon (2014) [9] รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเบี่ยงเบน (q) กับความเครียดแนวแกน (ε_a) ระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลองด้วย FEM ซึ่งจะพบว่าผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง ดังนั้นพารามิเตอร์แบบจำลองดินแบบฮาร์ดเดนนิงสำหรับทราย KMUTT ที่ได้จากการสอบเทียบนี้จะนำไปใช้อ้างอิงในการจำลองทราย KMUTT ในแบบจำลอง FEM สำหรับเสาเข็มต่อไป นอกจากนี้ ค่าสติฟเนสของดินจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามปริมาณความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในมวลดิน ซึ่งตามปกติในการจำลองด้วย FEM จะเลือกใช้ค่าสติฟเนสจากความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเริ่มต้นและจุดบนความสัมพันธ์ q-ε_a ที่ค่า q เท่ากับครึ่งนึงของค่า q สูงสุด แต่ในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อทราย KMUTT ต้องรับแรงที่ถ่ายมาจากเสาเข็มจำลองเมื่อรับแรงด้านข้างจะมีการเสียรูปมากหรือเกิดความเครียดเฉือน (Shear strain) ในทรายมาก นอกจากนี้ เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มจะมีค่าสูงที่สุด (P_{ult}) แล้ว ทรายบริเวณล้อมรอบเสาเข็มจะเกิดการเสียรูปที่แตกต่างกันมากจากระดับผิวดินลงไปสู่ระดับความลึกด้านล่าง โดยที่ทรายบริเวณใกล้ผิวดินเสียรูปมากจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงหลังความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (Post-peak regime) ไปแล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ค่าสติฟเนสจากความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเริ่มต้นและจุดบนความสัมพันธ์ q- ε_a ที่ค่า q สูงที่สุดเป็นค่าสติฟเนสตัวแทนของทราย ซึ่งจะกำหนดค่าสติฟเนสนี้ให้เป็นพารามิเตอร์สำหรับ Secant stiffness modulus (E_{50}^{ref}) และในส่วนของ Oedometric stiffness modulus (E_{oed}^{ref}) และ Unloading/reloading stiffness modulus (E_{ur}^{ref}) สามารถประมาณค่าได้ดังแสดงในสมการ 1 และ 2 ตามลำดับ

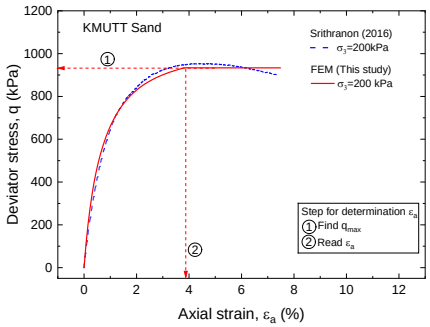
$$E_{oed}^{ref} = 0.8E_{50}^{ref} \quad (1)$$

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \quad (2)$$

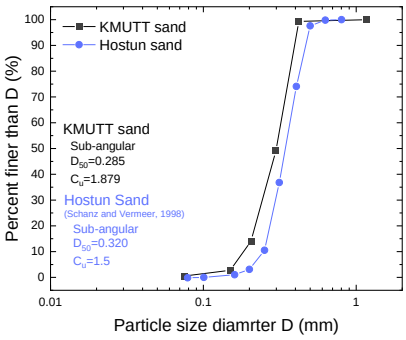
นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของทราย KMUTT มีความคล้ายคลึงกับทราย Hostun จากการศึกษาของ Schanz และ Vermeer (1998) [10] ดังลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคที่แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่ง Schanz และ Vermeer (1998) [10] ได้นำเสนอพารามิเตอร์ของทราย Hostun สำหรับแบบจำลอง HS ดังนั้นสำหรับค่า Effective friction angle (ϕ'), Effective dilatancy angle (ψ') และ Effective cohesion (c') ที่ใช้ในการศึกษานี้จะอ้างอิงจาก Schanz และ Vermeer (1998) [10] โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของทราย KMUTT แสดงดังตารางที่ 3

2.5 Test program

การวิเคราะห์ด้วย 3D FEM ใช้การควบคุมระยะกระจัด (Displacement control) โดยจำลองให้หัวเสาเข็มหรือ Pile cap เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างจนกระทั่งเกิดการเสียรูปสูงสุด (Ultimate displacement) เท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (2D) จากนั้นจึงพัฒนาความสัมพันธ์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (q) กับความเครียดแนวแกน (ε_a)



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคระหว่างทราย KMUTT และ ทราย Hostun

ตารางที่ 2 สมบัติของคานดัมมี่จำลองใน PLAXIS 3D

Parameter	Symbol	Value	Unit
Cross-section area	A	3.14×10^{-4}	m^2
Unit weight	γ	13.50	kN/m^3
Young's modulus	E	3.20	kN/m^2
Moment of inertia	I	7.86×10^{-9}	m^4

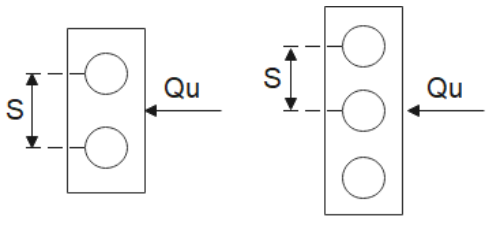
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของทราย KMUTT

Parameter	Symbol	Value	Unit
Material model	-	HS	-
Unit weight	γ	15.23	kN/m^3
Secant stiffness modulus	E_{50}^{ref}	24,000	kPa
Tangent stiffness modulus	E_{oed}^{ref}	19,200	kPa
Unloading/reloading stiffness modulus	E_{ur}^{ref}	72,000	kPa
Power for stress level dependency of stiffness	m	0.5	-
Confining pressure reference	σ_3^{ref}	200	kPa
Poisson's ratio	ν	0.2	-
Effective cohesion	c'	0.01	kPa
Effective friction angle,	ϕ'	34	deg
Effective Dilatancy angle	ψ'	0	deg
Material behaviour	-	Drained	-

ระหว่างแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มกับระยะกระจัดเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบต่อไป การศึกษานี้จะศึกษาเสาเข็มเดี่ยว (Single pile) และเสาเข็มกลุ่ม (Pile group) ที่มีการจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (Side-by-side arrangement) และการจัดเรียงแบบล้อมกรอบ (Box arrangement) ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Spacing, S) และจำนวนเสาเข็ม (Number of piles, Np) ที่แตกต่างกันที่ S = 2D, 3D, 4D, 5D และ 6D เพิ่มเติมจากการทดสอบที่ได้ดำเนินการที่ S = 3D และ 6D เท่านั้น กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ด้วย FEM แสดงตารางที่ 4

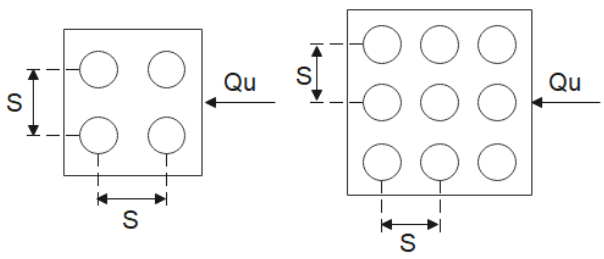
ตารางที่ 4 กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ด้วย FEM

Test Name	Pile Pattern	Pile Spacing, S
PG11S0D-AN0	1x1	0D
PG21S2D-AN0	2x1	2D
PG21S3D-AN0		3D
PG21S4D-AN0		4D
PG21S6D-AN0		6D
PG22S2D-AN0	2x2	2D
PG22S3D-AN0		3D
PG22S4D-AN0		4D
PG22S6D-AN0		6D
PG31S2D-AN0	3x1	2D
PG31S3D-AN0		3D
PG31S4D-AN0		4D
PG31S6D-AN0		6D
PG33S2D-AN0	3x3	2D
PG33S3D-AN0		3D
PG33S4D-AN0		4D
PG33S6D-AN0		6D



(ก) (ข)

รูปที่ 6 การจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (side-by-side arrangement): (ก) 2x1 (ข) 3x1

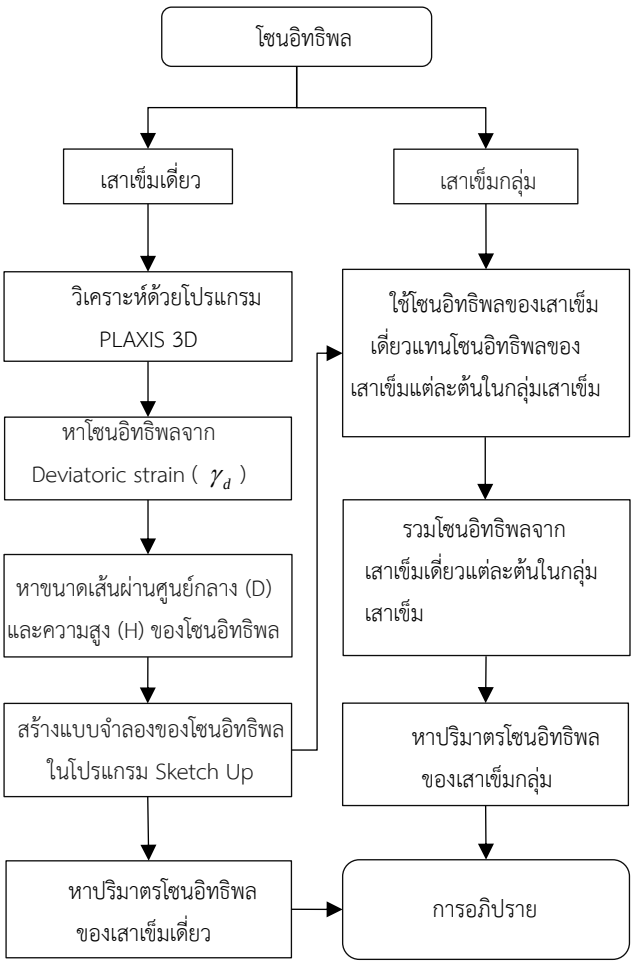


(ก) (ข)

รูปที่ 7 การจัดเรียงแบบล้อมกรอบ(box arrangement): (ก) 2x2 (ข) 3x3

2.6

Khatibi, S.K. (2021) [11] ได้ศึกษาการเสียรูปบริเวณผิวดินและภาพตัดขวางของดินที่ล้อมรอบเสาเข็มเดี่ยวเมื่อรับแรงด้านข้างด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่าย และได้พัฒนาโซนอิทธิพลขึ้นโดยนิยามจากความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain, γ_d) ซึ่งพบว่า โซนอิทธิพลมีลักษณะรูปร่างเหมือนวงกลมเมื่อมองจากด้านบน และมีรูปทรงกรวยเมื่อแสดงในรูปแบบสามมิติ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะใช้แผนภูมิความเครียดเบี่ยงเบนที่ได้จากการวิเคราะห์ 3D FEM มาช่วยในการกำหนดขอบเขตของโซนอิทธิพลโดยจะนำมากำหนดเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และความสูง (H) ของโซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว จากนั้น โซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวจะถูกจำลองในโปรแกรม SketchUp ซึ่งจะกำหนดให้โซนอิทธิพลของเสาเข็มสมาชิกในกลุ่มเสาเข็มมีลักษณะเหมือนกันกับโซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว หลังจากนั้นโซนอิทธิพลของเสาเข็มสมาชิกจะถูกรวมเข้าด้วยกัน (Union) เพื่อหาโซนอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็ม พร้อมทั้งวัดหาปริมาตรของโซนอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็มเพื่อนำไปวิเคราะห์หาผลกระทบของโซนอิทธิพลต่อไป ขั้นตอนในการกำหนดโซนอิทธิพลแสดงในรูปที่ 8



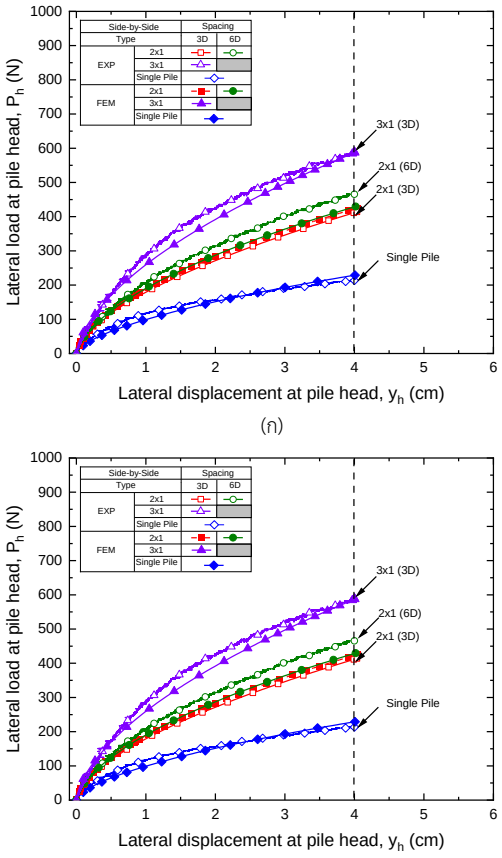
รูปที่ 8 ขั้นตอนในการกำหนดโซนอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็มและเสาเข็มเดียว

3. ผลทดลองและอภิปรายผล

3.1

รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (P_h) และระยะการเสียรูปด้านข้าง (y_h) ที่หัวเสาเข็มระหว่างผลการจำลองด้วย 3D FEM กับผลการทดสอบด้วยแบบจำลองกายภาพ (EXP) จากรูปนี้จะพบว่าเมื่อ N_p และ S มีค่ามากขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลจาก 3D FEM มีความคล้ายคลึงกับผล EXP ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้อีกด้วย

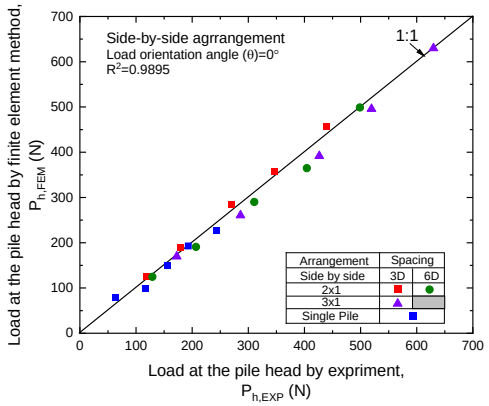
อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เห็นผลการเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน จึงเลือกทำการเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มระหว่าง FEM กับ EXP ที่ y_h แตกต่างกันเท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, และ 4 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10 ค่า R-square เมื่อวิเคราะห์ถดถอยด้วยสมการ y=x ของกลุ่มเสาเข็มที่มีการจัดเรียงแบบแบบหน้ากระดานและแบบล้อมกรอบมีค่าเท่ากับ 0.9895 และ 0.9441 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าผลจาก 3D FEM มีความใกล้เคียงกับผล EXP มาก อย่างไรก็ตาม ค่าแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็มกรณีการจัดเรียงแบบล้อมกรอบแบบ 2x2 และ S = 6D จากผล 3D FEM ค่อนข้างแตกต่างจากผล EXP เนื่องจาก 3D FEM ได้รับผลกระทบจาก Boundary effect มากกว่า EXP ซึ่งส่งผลให้ค่า R-square ลดลง



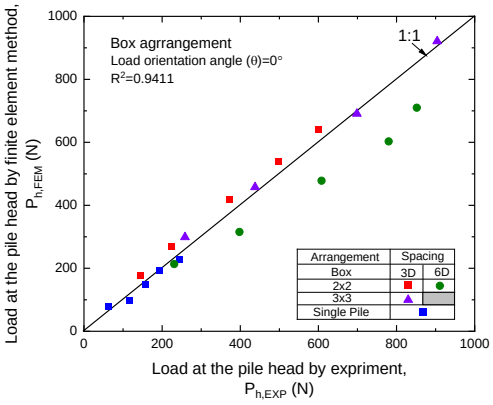
(ก)

(ข)

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (P_h) กับระยะการเสียรูปด้านข้าง (y_h) ที่หัวเสาเข็ม: (ก) การจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (ข) การจัดเรียงแบบล้อมกรอบ



(ก)



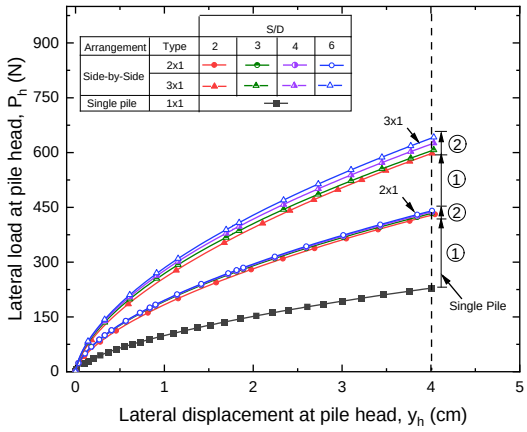
(ข)

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างที่หัวเสาเข็ม(P_h) ระหว่าง FEM กับ EXP ที่ y_h แตกต่างกัน: (ก) การจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (ข) การจัดเรียงแบบล้อมกรอบ

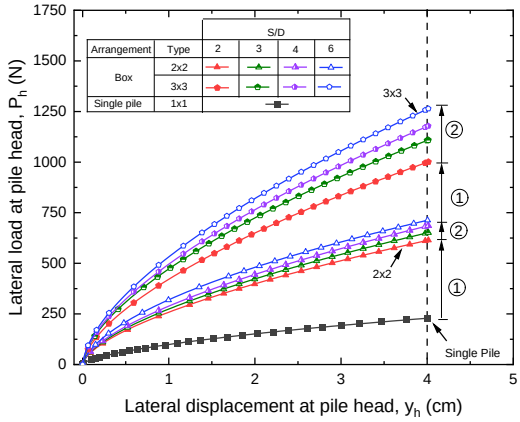
จากที่กล่าวมาด้านบน ข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลการวิเคราะห์ด้วย 3D FEM นั้นคล้ายคลึงกับผล EXP นอกจากนี้พฤติกรรมและพารามิเตอร์ของทราย KMUTT ในแบบจำลอง HS สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของดินล้อมรอบเสาเข็มได้เสมือนจริง ซึ่งการเสียรูปของดินล้อมรอบเสาเข็มนี้ไม่สามารถเห็นภาพได้จากการทดสอบในแบบจำลองทางกายภาพเสาเข็มกลุ่ม

การวิเคราะห์กลุ่มเสาเข็มด้วย FEM จะทำการศึกษาที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2D และ 3D เพิ่มเติม เนื่องจากแบบจำลองทางกายภาพทำการทดสอบเพียงระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 3D และ 6D เท่านั้น แรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มที่วิเคราะห์ด้วย FEM โดยการควบคุมการกระจัดจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (Lateral load at pile head, P_h) และการเสียรูปของเสาเข็มทางด้านข้าง (Lateral displacement at pile head, y_h) ที่หัวเสาเข็ม สำหรับการจัดเรียงแบบหน้ากระดานและแบบล้อมกรอบดังแสดงดังรูปที่ 11

แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (P_{ult}) สำหรับการจัดเรียงเสาเข็มแบบ 2x1 (S = 3D), 3x1 (S = 3D), 2x2 (S = 3D) และ 3x3 (S = 3D) มีค่าเท่ากับ 433, 607, 651 และ 1130 N ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (P_h) กับระยะการเสียรูปด้านข้าง (y_h) ที่หัวเสาเข็ม: (ก) การจัดเรียงแบบหน้ากระดาน และ (ข) การจัดเรียงแบบล้อมกรอบ

จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่าเท่ากัน ค่า P_{ult} จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนเสาเข็ม (N_p) เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตุได้จากหมายเลข ① โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า ผลกระทบของจำนวนเสาเข็ม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่การจัดเรียงที่เหมือนกัน ค่า P_{ult} จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น การจัดเรียงแบบล้อมกรอบจะได้รับอิทธิพลจากกลุ่มเสาเข็มมากกว่าการจัดเรียงแบบเรียงหน้ากระดาน พฤติกรรมนี้เรียกว่า ผลกระทบของระยะห่างระหว่างเสาเข็มซึ่งสังเกตได้จากหมายเลข ② จะเห็นได้ว่า ลักษณะการจัดเรียง จำนวนเสาเข็ม และระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็ม ซึ่งสอดคล้องกับ Brown et al. (1988) [3] และ Cox et al. (1984) [4] อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้าง จึงจะอธิบายพฤติกรรมนี้ด้วยประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็ม

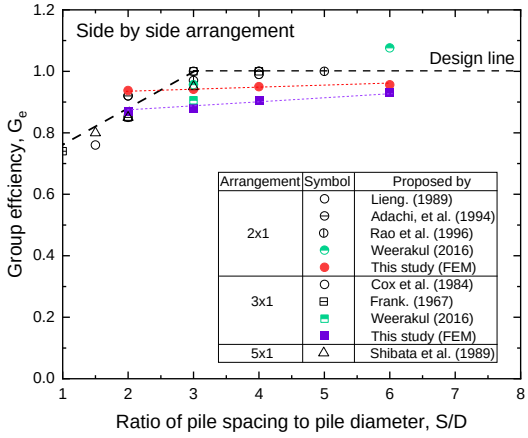
3.2

ประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็ม (G_e) เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้สำหรับการหาปริมาณผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มสมาชิกในกลุ่มเสาเข็มที่มีต่อค่า P_{ult} โดยกำหนดค่า G_e ให้เป็นความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างเฉลี่ยของเสาเข็มสมาชิกแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มหารด้วยความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวดังแสดงในสมการ 3 [12]

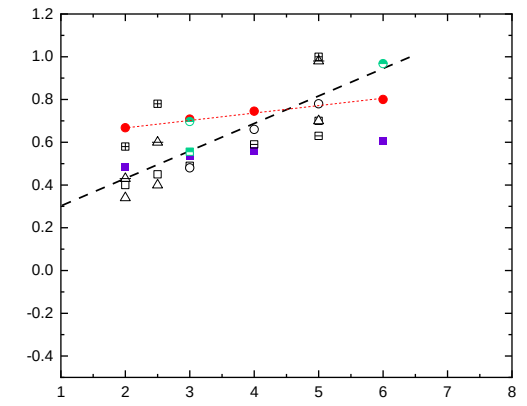
$$G_e = \frac{(G_{ug} / n)}{G_{us}} \tag{3}$$

เมื่อ G_{ug} คือ แรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มสูงสุด (N)
G_{us} คือ แรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวสูงสุด (N)
n คือ จำนวนเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็ม

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_e กับอัตราส่วน S/D สำหรับการจัดเรียงแบบหน้ากระดานและแบบล้อมกรอบ ตามลำดับ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในอดีต จากรูปเหล่านี้จะเห็นได้ว่า ผลจากการวิเคราะห์ด้วย 3D FEM จากงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับ Design line ที่ได้จากผลการศึกษาในอดีต



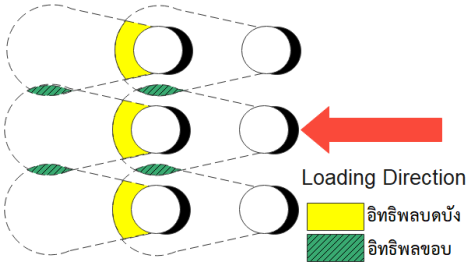
(ก)



(ข)

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง G_e และ S/D: (ก) การจัดเรียงแบบหน้ากระดาน (ข) การจัดเรียงแบบล้อมกรอบ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง G_e กับ S/D ทั้งหมดจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแนวโน้มที่สำคัญที่สุดคือ ค่า G_e จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สำหรับกลุ่มเสาเข็มที่มี S เท่ากัน ค่า G_e จะลดลงตามจำนวนเสาเข็มที่ลดลง เนื่องจากการกระจายแรงไปที่เสาเข็มสมาชิกต้นต่าง ๆ ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งพฤติกรรมนี้เกิดจากอิทธิพลบดบัง (Shadowing effect) และอิทธิพลขอบ (Edge effect) ซึ่งใช้อธิบายการทับซ้อนกันของโซนอิทธิพลที่ส่งผลให้ความต้านทานของดินล้อมรอบเสาเข็มสมาชิกลดลง โดยอิทธิพลบดบัง (Shadowing effect) เป็นการทับซ้อนกันของโซนอิทธิพลที่เกิดขึ้นจากสมาชิกเสาเข็มที่อยู่แถวเดียวกัน ส่วนอิทธิพลขอบ (Edge effect) การทับซ้อนกันของโซนอิทธิพลที่เกิดขึ้นจากสมาชิกเสาเข็มที่อยู่ชิดกันในแนวเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 13 ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้กำหนดโซนอิทธิพล เพื่อนำไปใช้อธิบายประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มได้โดยง่าย



รูปที่ 13 ลักษณะอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบที่เกิดขึ้นในกลุ่มเสาเข็มเมื่อได้รับแรงกระทำด้านข้าง

3.3

ประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มได้รับผลกระทบจากอิทธิพลบดบัง (Shadowing effect) และอิทธิพลขอบ (Edge effect) จากผลการวิเคราะห์ 3D FEM ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ค่าความเครียดเบี่ยงเบนในการกำหนดขอบเขตของโซนอิทธิพลโดยเลือกใช้ค่าความเครียดเบี่ยงเบนที่สอดคล้องกับขณะที่แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มมีค่าสูงสุด ($P = P_{ult}$) แล้วนำมาสร้างแผนภูมิ (Contour) โดยใช้ Increment เท่ากับ 5% การจัดเรียงที่แตกต่างกันระหว่างแบบหน้ากระดานและแบบล้อมกรอบ จะส่งผลให้ค่า G_e มีค่าที่แตกต่างเช่นกัน การจัดเรียงแบบหน้ากระดานได้รับอิทธิพลขอบเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 15 พฤติกรรมนี้แตกต่างจากการจัดเรียงแบบล้อมกรอบ ที่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบดังแสดงในรูปที่ 16 ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบจะลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับโซนอิทธิพลที่ทับซ้อนกันลดลง และส่งผลทำให้ Ge เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ในรูปที่ 15 และ 16 ว่า โซนอิทธิพลของการจัดเรียงแบบกล่อง 2x2 (S = 6D) นั้นใหญ่กว่าการจัดเรียงกล่อง 2x2 (S = 3D) อย่างเห็นได้ชัด

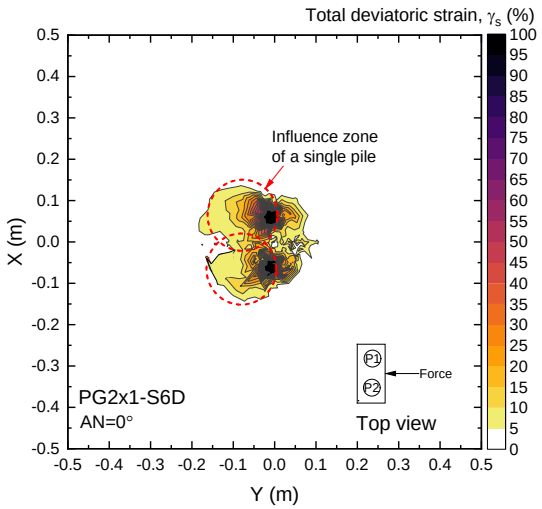
อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโซนอิทธิพลที่เกิดขึ้นกับประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มได้โดยง่ายจึงได้กำหนดโซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มด้วยโซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวที่จำลองในโปรแกรม SketchUp ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6 แล้ว ปัจจัยผลกระทบที่ไม่ทับซ้อนกัน (Un-overlapping effect factor, UOF) จึงถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของโซนอิทธิพล ซึ่งจะถูกเสนอและกำหนดด้วยสมการที่ 4 จากสมการนี้จะพบว่า หากโซนอิทธิพลของเสาเข็มสมาชิกแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มไม่ทับซ้อนกัน ค่า UOF จะเท่ากับ1 และ UOF ลดลงเมื่อมีการทับซ้อนกันเกิดขึ้น

$$UOF = \frac{V_{union}}{N_p V_{single}} \tag{4}$$

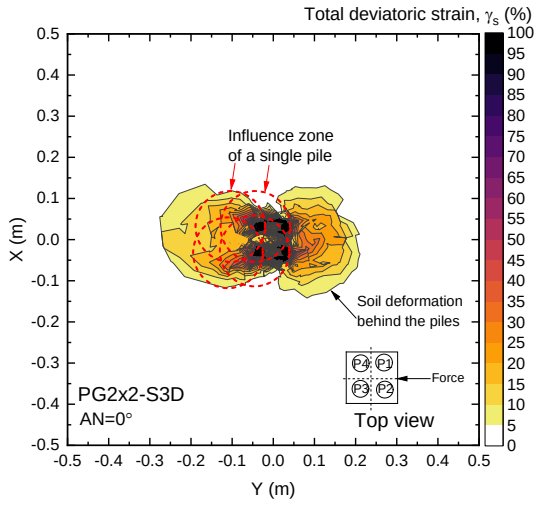
เมื่อ V_{union} คือ ปริมาตรโซนอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็ม

V_{single} คือ ปริมาตรโซนอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว

N_p คือ จำนวนเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็ม



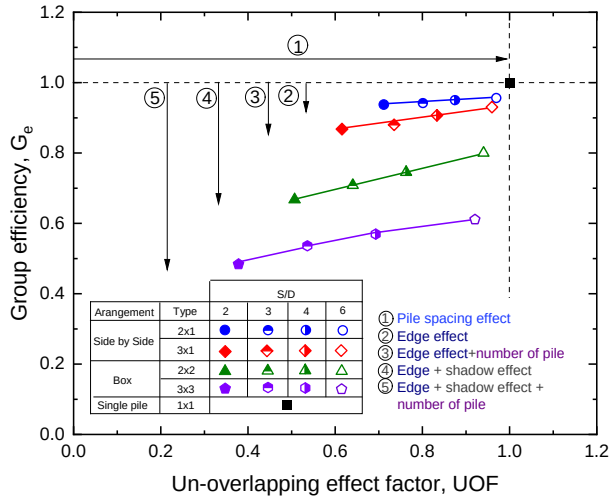
รูปที่ 14 แผนภูมิความเครียดเบี่ยงเบนเมื่อมอกจากด้านบนสำหรับกรณีการจัดเรียงแบบเรียงหน้ากระดาน 2x1 (S6D)



รูปที่ 15 แผนภูมิความเครียดเบี่ยงเบนเมื่อมอกจากด้านบนสำหรับการจัดเรียงแบบเรียงล้อมกรอบ 2x2 (S3D)



รูปที่ 16 แผนภูมิความเครียดเบี่ยงเบนเมื่อมอกจากด้านบนสำหรับการจัดเรียงแบบเรียงล้อมกรอบ 2x2 (S6D)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Geและ UOF สำหรับกลุ่มเสาเข็มที่มีการจัดเรียงแตกต่างกัน

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ge และค่า UOF สำหรับการจัดเรียงเสาเข็มและค่าอัตราส่วน S/D ที่แตกต่างกัน ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของกลุ่มเสาเข็มจะลดลงตามผลกระทบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงของเสาเข็มสมาชิกในกลุ่มเสาเข็ม ซึ่งสามารถสังเกตพฤติกรรมได้ดังนี้

- Ge จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วยการเพิ่ม S/D ซึ่งสังเกตได้จาก UOF เพิ่มขึ้น สามารถสังเกตได้จาก ①
- กลุ่มเสาเข็มแบบเรียงหน้ากระดาน ไม่ได้เพียงแต่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลขอบเท่านั้น แต่ยังรวมถึงจำนวนเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นด้วย สามารถสังเกตได้ว่าค่า G_e ลดลงตามจำนวนเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นตามที่ระบุไว้กับ ② และ ③
- การเพิ่มขึ้นของจำนวนเสาเข็มสำหรับการจัดเรียงแบบล้อมกรอบส่งผลให้ค่า G_e ลดลงซึ่งคล้ายกับพฤติกรรมในการจัดเรียงแบบเรียงหน้ากระดานแต่การจัดเรียงแบบล้อมกรอบจะได้รับผลกระทบจากกลุ่มเสาเข็มมากกว่าการจัดเรียงแบบหน้ากระดาน โดยแนวโน้มนี้สามารถสังเกตได้จากหมายเลข ④ และ ⑤
- เมื่อเปรียบเทียบที่ S/D เท่ากัน ค่า G_e และ UOF ของการจัดเรียงแบบล้อมกรอบจะน้อยกว่าการจัดเรียงแบบหน้ากระดาน ซึ่งเป็นที่ยืนยันได้ว่า การจัดเรียงแบบล้อมกรอบได้รับอิทธิพลบดบังและอิทธิพลขอบซึ่งส่งผลกระทบที่มากกว่าการจัดเรียงแบบหน้ากระดานจะได้รับอิทธิพลขอบเพียงอย่างเดียว
- ในการจัดเรียงรูปแบบเดียวกัน ค่า Ge โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของค่า UOF

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้นำเสนอพฤติกรรมของกลุ่มเสาเข็มและเสาเข็มเดี่ยวที่ติดตั้งในทราย เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างทิศทางเดียว ด้วยการวิเคราะห์ 3D FEM ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผล 3D FEM กับผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากงานวิจัยในอดีต ส่วนที่สองอธิบายถึงอิทธิพลของโซนอิทธิพลที่พัฒนาขึ้นจากผลการวิเคราะห์ด้วย 3D FEM โดยมีข้อสรุปต่อไปนี้

1.ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเสียรูปของเสาเข็มทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ 3D FEMกับผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพมีความใกล้เคียงกัน

2. ประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเสาเข็ม เนื่องจากการลดลงของการทับซ้อนกันของแรงต้านในดินที่ต่อต้านแรงที่ถ่ายโอนจากเสาเข็มที่ได้รับแรงกระทำด้านข้าง ในทางกลับกันประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มจะลดลงเมื่อจำนวนเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายแรงไปยังเสาเข็มสมาชิกที่ไม่เท่ากัน ซึ่งการกระจายที่ไม่เท่ากันนี้เกิดจาก "อิทธิพลบดบัง" และ "อิทธิพลขอบ" นอกจากนี้โซนอิทธิพลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย 3D FEM สามารถอธิบายโซนอิทธิพลที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปัจจัยผลกระทบที่ไม่ทับซ้อนกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Reese, L.C. and W.F. Van Impe, (2001) Single piles and pile groups under lateral loading. CRC press.

[2] Nanda Kishore, Y., S. Narasimha Rao, and J. Mani. (2009). The behavior of laterally loaded piles subjected to scour in marine environment. KSCE Journal of Civil Engineering, 13(6), pp.403-408.

[3] Brown, D.A., C. Morrison, and L.C. Reese. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, 114(11), pp.1261-1276.

[4] Cox, W.R., D.A. Dixon, and B.S. Murphy, (1984) Lateral-load tests on 25.4-mm (1-in.) diameter piles in very soft clay in side-by-side and in-line groups. ASTM International.

[5] Suebthawinkul, P. (2019). Effects of Lateral Cyclic Loading Directions on p-y Curves of Single Pile and Piles in Groups. King Mongkut's University of Technology Thonburi,KMUTT Library.

[6] Weerakul, P. (2016). A Study on Cyclic Lateral Resistance of Single Pile and Pile Groups in Sand by Physical Modeling. King Mongkut's University of Technology Thonburi,KMUTT Library.

[7] Marjanović, M., et al. (2016). Modeling of laterally loaded piles using embedded beam elements. Zbornik radova 4. Međunarodne konferencije Savremena dostignuća u građevinarstvu 2016, 32, pp.349-358.

[8] Brinkgreve, R., et al., (2016) PLAXIS3DCE-V21.00-02-Reference-3D.

[9] Srithranon, K. (2014). Yielding characteristics of KMUTT sand by shearing in triaxial compression test. King Mongkut's University of Technology Thonburi,KMUTT Library.

[10] Schanz, T. and P. Vermeer, (1998) On the stiffness of sands. Thomas Telford Publishing, pp.383-387.

[11] Khatibi, S.K. (2021). Experimental comparison of shadowing effect and edge effect in pile group of integral bridge. Arabian Journal of Geosciences, 14(13), pp.1-10.

[12] Prakash, S. and H.D. Sharma, (1991) Pile foundations in engineering practice. John Wiley & Sons.