

พฤติกรรมฐานรากแผ่เสาเข็มในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร

Behavior of Piled Raft Foundation in Clay

Subjected to Lateral Cyclic Loading

สมมาตร สวัสดิ์¹ ชัมซุดิน ลาเต๊ะ² และ ธนันท ชุบอุประการ^{3*}

^{1,2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

E-mail: ¹sswasdi@hotmail.com, ²samsudin.lateh@gmail.com ^{3*}tanan.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ฐานรากแผ่เสาเข็มเริ่มเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างฐานรากลงได้ ขณะที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงของฐานรากเสาเข็ม และยังสามารถทำให้ลดจำนวนของเสาเข็มลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาให้ฐานรากรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักร เช่น แผ่นดินไหว หรือแรงลม ที่กระทำต่ออาคารสูง กังหันลม เป็นต้น ดังนั้น การกำหนดให้ฐานรากแผ่เสาเข็มมีความสามารถในการรองรับแรงกระทำด้านข้างนั้น จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงของฐานรากแผ่เสาเข็ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรค่อนข้างที่มีความซับซ้อนและยากต่อการวิเคราะห์ ซึ่งพฤติกรรมที่ซับซ้อนดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้จึงใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างวัฏจักรของฐานรากแผ่เสาเข็มในดินเหนียว โดยทำการแปรเปลี่ยนรูปแบบของแรงวัฏจักร ความถี่ และจำนวนรอบวัฏจักร ผลจากการศึกษาพบว่า แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรส่งผลทำให้พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อจำนวนรอบของแรงวัฏจักรเพิ่มขึ้นและขนาดความถี่แปรเปลี่ยน เนื่องจากการเสียรูปอย่างถาวรของดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มและใต้ฐานราก และค่าโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มเมื่อถอนแรงกระทำด้านข้างออกจนมีค่าเป็นศูนย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ฐานรากแผ่เสาเข็ม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร การเสียรูปอย่างถาวรของดิน

* Corresponding author, e-mail: tanan.c@psu.ac.th

Abstract

The popularity of piled raft foundations is on the rise due to their cost-saving advantages in construction. These foundations not only enhance the efficiency of pile foundations but also reduce the number of required piles. This becomes particularly crucial when considering the ability of foundations to withstand lateral cyclic loads such as those induced by earthquakes, wind loads on tall buildings, or wind turbines. Therefore, it is imperative to comprehend the behavior of piled rafts under lateral loads, especially the complex and challenging analysis of cyclical lateral loads. The finite element method proves instrumental in analyzing such intricate behaviors. This research employed a 3D finite element model to investigate the behavior of piled raft foundations under cyclic lateral loading in clay soils. The study involved varying the pattern of lateral cyclic loading, frequency, and number of cycles. The findings indicated that the lateral load behavior of piled rafts was significantly influenced by cyclic loading, leading to a decrease in lateral load capacity as the number of cyclic force cycles increased, and the frequency magnitude changed. This behavior is attributed to the permanent soil deformation surrounding the piles and beneath the raft. The value of the locked-in moment in piles, when the lateral load was withdrawn to zero, will increase with the increasing number of cycles.

Keywords: Piled raft, Finite element method, Lateral cyclic loading, Permanent deformation of the soil

1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความต้องการโครงสร้างอาคารสูงและโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องด้วยความสะดวกของโครงสร้างที่เพิ่มมากขึ้นของสิ่งปลูกสร้างสมัยใหม่ การออกแบบและการสร้างฐานรากจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรับรองความปลอดภัยและความมั่นคงของโครงสร้างดังกล่าว ฐานรากแผ่เสาเข็ม (Piled raft foundation, PR) กลายเป็นหนึ่งในวิธีแก้ปัญหาที่ได้ผลสำหรับรองรับโครงสร้างบนชั้นดินอ่อนและยุบอัดตัวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพดินเหนียว โดยอาศัยกลสมบัติที่โดดเด่นในแต่ละด้านของระบบฐานรากแผ่ (Raft foundation) และระบบฐานรากเสาเข็ม (Piles foundation) ประสานร่วมกันรับแรงรวมที่มากระทำต่อระบบฐานรากของโครงสร้างหรืออาคารต่าง ๆ ทั้งแรงกระทำในแนวดิ่ง แนวราบ และโมเมนต์ ทั้งแบบสถิตและพลศาสตร์เป็นต้น [1-4] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้การรับแรงด้านข้างวัฏจักรในดินเหนียว โดยมุ่งเน้นที่การทำความเข้าใจต่อผลตอบสนองต่อแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรที่มีต่อฐานรากแผ่เสาเข็ม โดยศึกษาผลกระทบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรที่มีต่อการเคลื่อนที่ด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็ม การเคลื่อนตัวคงค้างของฐานรากค่าโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็ม ค่าโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มภายหลังการถอนแรงกระทำออกจนมีค่าเป็นศูนย์ เป็นต้น

ดินเหนียวนั้น มีคุณสมบัติในด้านความต้านทานแรงเฉือนที่ต่ำและความสามารถในการบีบอัดตัวสูง ทำให้มีความท้าทายในการออกแบบและก่อสร้างฐานราก การใช้ฐานรากเสาเข็มแบบเดิมโดยพิจารณาเฉพาะการรับแรงของเสาเข็มในชั้นดินดังกล่าวมักนำไปสู่การทรุดตัวที่มากเกินไปและอาจเกิดการวิบัติได้ ฐานรากแผ่เสาเข็มหรือที่เรียกว่าฐานรากแบบรวม ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ที่ผสมผสานข้อดีของฐานรากแบบต้น (ฐานรากแผ่) และฐานรากแบบลึก (ฐานรากเสาเข็ม) ช่วยเพิ่มการกระจายน้ำหนักและลดการทรุดตัว [5,6] โดยการรวมเสาเข็มและฐานรากแผ่เข้าด้วยกัน โดยระบบฐานรากแผ่เสาเข็มสามารถถ่ายเทน้ำหนักของโครงสร้างส่วนบนไปยังความลึกที่มากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกระบวนการถ่ายเทน้ำหนักระหว่างเสาเข็มและดินอ่อนโดยรอบ [7,8]

การรับน้ำหนักด้านข้างแบบวัฏจักรเป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับฐานรากของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวได้ง่าย หรือต้องรับแรงกระทำแบบไดนามิก [9] โครงสร้างอาคารในเขตแผ่นดินไหวมีความอ่อนไหวต่อการเคลื่อนตัวของพื้นดินในแนวราบ และฐานรากจะต้องสามารถทนต่อแรงกระทำแบบวัฏจักรเหล่านั้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง การทำความเข้าใจพฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เกิดความมั่นใจ ความน่าเชื่อถือ และความปลอดภัยของโครงสร้างในพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวหรือการสั่นไหวได้ง่าย เช่น อาคารสูง และฟาร์มกังหันลม

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฐานรากแผ่เสาเข็ม เช่น Vu และคณะ [10] ใช้ Plaxis 3D เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากแผ่เสาเข็ม โดยวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนเสาเข็ม ความยาว รูปแบบ และระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อพฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็ม Watcharasawe และคณะ [6] ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากแผ่เสาเข็มในดินกรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) แบบ 3 มิติ พบว่า น้ำหนักบรรทุกที่รองรับโดยเสาเข็มของระบบฐานรากแผ่เสาเข็มได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการพิจารณาการยุบตัวของดิน Hsueh และคณะ [11] ประยุกต์ใช้ FEM เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มกับดินและฐานแผ่ โดยเฉพาะผลที่ตามมาของการแตกตัวของคอนกรีต วัตถุประสงค์ของ FEM คือ การสร้างแบบจำลองที่ตรวจสอบ (Verify) จากข้อมูลการทดสอบและนำไปใช้กับเงื่อนไขที่ไม่สามารถทำได้ในระหว่างทดสอบ ผลลัพธ์ของ FEM แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มแถวหน้าและแถวกลางของกลุ่มมีส่วนแบ่งการรับน้ำหนักสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ Halder และคณะ [12] ศึกษาผลกระทบการเชื่อมต่อหัวเสาเข็มกับฐานแผ่ คือ แบบตายตัวและบานพับ ต่อการตอบสนองของฐานรากแผ่เสาเข็มในดินทรายภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบสถิตย์ (Pseudo-static) โดยใช้ 3D FEM ซึ่งตรวจสอบกับการทดสอบแรงเหวี่ยง พบว่า ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อหัวเสาเข็มกับฐานแผ่มีผลต่อพฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็ม Qin และ Ma [9] ศึกษาการไถสละเทือนของฐานรากแผ่เสาเข็มแบบลอยและแบบฝังดิน โดยการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยงและ FEM พบว่า พฤติกรรมการไถสละเทือนของฐานรากแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยฐานรากแผ่เสาเข็มแบบลอยเสียเปรียบกว่าแบบฝังดิน Chanda และคณะ [13] ทดสอบแบบจำลองย่อสัดส่วนของฐานรากแผ่เสาเข็ม โดยขึ้นอยู่กับแรงกระทำในแนวตั้ง แนวนอน

และโมเมนต์ เพื่อหาผลตอบสนองด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำดังกล่าว พบว่า แรงในแนวดิ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการตอบสนองด้านข้างของฐานราก นอกจากนี้ยังใช้ FEM ศึกษาพฤติกรรมการแบ่งปันน้ำหนักของฐานรากแผ่นเสาเข็ม Jamil และคณะ [2] ทดสอบแบบจำลองขนาดเล็ก เพื่อศึกษาการตอบสนองของผนังชั้นใต้ดินในฐานรากของอาคารสูงภายใต้แรงกระทำด้านข้าง ผลแสดงให้เห็นว่าความต้องการใช้เสาเข็มแต่ละฐานรากลดลง และการเคลื่อนตัวด้านข้างของฐานรากลดลงเมื่อมีผนังชั้นใต้ดิน สำหรับอาคารสูง การออกแบบระบบฐานรากเป็นฐานรากแผ่นเสาเข็มสามารถประหยัดค่าก่อสร้างได้มากกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของฐานรากแผ่นเสาเข็มในส่วนที่แตกต่างจากการศึกษาในอดีต คือ ฐานรากแผ่นเสาเข็มในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวและสองทาง การแปรเปลี่ยนความถี่ และจำนวนรอบวัฏจักร โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของฐานรากแผ่นเสาเข็ม ซึ่งเป็นการศึกษาเพิ่มเติมจากการศึกษาการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มของการทดสอบเท่าขนาดจริงในสนาม (Full scale test, FST) ของ [14] เป็นการศึกษาโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ทำการตรวจสอบ (Verify) กับผลการทดสอบในสนามของ [14] ในส่วนของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มขนาด 3x5 ต้น โดย [14] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างแบบสถิตชนิดกระทำซ้ำ ๆ ของเสาเข็มเท่าขนาดจริงในสนาม โดยเสาเข็มได้ถูกปักลงในชั้นดินเหนียวในบริเวณพื้นที่สนามบินนานาชาติ Salt Lake City เมือง Utah ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เสาเข็มเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 324 มิลลิเมตร หน้า 9.5 มิลลิเมตร โดยเป็นเหล็กเกรด 3 ตาม ASTM 252 ค่าความเค้นที่ยอมให้ 404,592 kPa ค่าความเค้นดึงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 584,087 kPa ค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ของเสาเข็มเหล็กมีค่าเท่ากับ 350 kN-m เสาเข็มถูกปักลึกลงไปในดิน 11.6 m และปลายเสาเข็มโผล่พ้นผิวดินประมาณ 2.10 m ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 1.27 m (3.92 เท่าของขนาดเสาเข็ม) ตามทิศทางของเสาเข็มจำนวน 5 ต้น และห่าง 1.07 m (3.29 เท่าของขนาดเสาเข็ม) ตามทิศทางของเสาเข็มจำนวน 3 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ตลอดความยาวของเสาเข็ม เพื่อวัดความเครียดในเสาเข็มตลอดการทดสอบและนำไปคำนวณหาแรงเค้นในเสาเข็ม กระทำแรงด้านข้างในทิศทางของเสาเข็ม 5 ต้น โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 1.34 MN (150 ton) โดยวัดแรงด้านข้างจากการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างตั้งแต่ 4 mm ถึง 89 mm สำหรับเสาเข็มเดี่ยว และ 6 mm ถึง 89 mm สำหรับเสาเข็มกลุ่ม โดยแต่ละการเคลื่อนที่ที่กำหนดจะกระทำแรงสถิตซ้ำจำนวน 15 รอบ โดยแต่ละรอบเมื่อเคลื่อนที่ถึงระยะที่กำหนดไว้จะค้างแรงกระทำไว้เป็นระยะเวลา 5 นาที และจึงค่อยถอนแรงกระทำให้เป็นศูนย์ จากนั้นค่อยขึ้นแรงกระทำในรอบถัดไป โดยใช้ผลการศึกษา FST ของ [14] เพื่อทำการตรวจสอบ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเฉพาะค่าพารามิเตอร์ของดิน สำหรับค่ากลสมบัติต่าง ๆ ของดินและเสาเข็มที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเริ่มแรกก่อนทำการตรวจสอบจะใช้ค่าจากการศึกษาของ [14] ที่ได้จากการทดสอบและเก็บค่าในสนาม จากนั้นทำการตรวจสอบและปรับแก้พารามิเตอร์ของดินจนได้ผลของพฤติกรรมการรับแรง

ด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ FST [6,15-20] สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการตรวจสอบแล้วนั้นให้ผลการศึกษาของพฤติกรรมของการรับแรงด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำด้านข้างแบบสถิตยศาสตร์ทำซ้ำเป็นรอบ ๆ ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเท่าขนาดจริงในสนาม จากนั้นปรับเปลี่ยนรูปแบบของฐานรากจากเสาเข็มกลุ่ม (Pile group foundation, PG) เป็นแบบฐานรากแผ่เสาเข็ม (Piled raft foundation, PR) ซึ่ง [14] ยังไม่ได้ทำการศึกษามาก่อนโดยเฉพาะแรงกระทำด้านข้างวัฏจักร การศึกษานี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมของฐานรากแผ่ (Raft หรือ Pile cap) เมื่อประกอบกับเสาเข็มกลุ่มเป็นลักษณะฐานรากแผ่เสาเข็มนั้น มีพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างลักษณะเป็นเช่นไร โดยเฉพาะภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร แต่เนื่องจากการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาการทดสอบ FST ของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรยังมีการศึกษาน้อย และการทดสอบ FST นั้นไม่สามารถแสดงถึงพฤติกรรมที่ซับซ้อนของฐานรากแผ่เสาเข็มได้ จึงเลือกวิธีการศึกษาพฤติกรรมของฐานรากดังกล่าวโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5-7,9-13,21] ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกผลการทดสอบ FST เสาเข็มกลุ่มของ [14] มาใช้เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์ของดินก่อนนำไปศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างวัฏจักรของฐานรากแผ่เสาเข็มโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนที่ [14] ยังไม่ได้ทำการศึกษามาก่อน

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีขนาด คือ กว้าง 36 เมตร ยาว 72 เมตร และมีความลึก 30 เมตร ซึ่งมีความกว้างเป็น 11.25 เท่าของความกว้างและความยาวของขนาดฐานราก คือ กว้าง 3.2 เมตร ยาว 6.4 เมตร ความหนาของชั้นดินทั้งหมด มีขนาดเป็น 2.6 เท่าของความยาวเสาเข็ม [21] สำหรับค่าปฏิสัมพันธ์ (Interface) ระหว่างเสาเข็มกับดินและฐานรากแผ่กับดินใช้ค่าเท่ากับ 0.67 [22-24] สำหรับจุดรองรับด้านข้างเป็นแบบยึดรั้งเฉพาะแนวราบเท่านั้น (Horizontally constrained boundary) และตรงฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่น (Fixed boundary)

แบบจำลองดินที่ใช้ คือ Hardening soil model with small strain (HSsmall) ซึ่งเป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีอยู่ในโปรแกรม PLAXIS โดยแบบจำลอง HSsmall จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของดินอ่อนและดินไม่แข็งมากภายใต้แรงกระทำวัฏจักร โดยอาศัยกลสมบัติของดินภายใต้ความเครียดต่ำ (Small strain, $\epsilon < 10^{-3}$) โดยตัวแบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมของดินในรูปแบบของวงลูปฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loops) ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic loading) แบบจำลองดิน HSsmall นั้นเป็นแบบจำลองดินที่พัฒนาเพิ่มเติมจากแบบจำลอง Hardening soil model (HSM) โดยมีพารามิเตอร์ที่เพิ่มเติมจาก HSM ที่สำคัญ คือ Reference shear modulus (G_0^{ref}) ที่ความเครียดต่ำมาก (Very small strain, $\epsilon < 10^{-6}$) และ Threshold shear strain ($\gamma_{0.7}$) ซึ่งเป็นค่าความเครียดเฉือนตำแหน่งที่ค่า Secant shear modulus (G_s) มีค่าร้อยละ 72.2 ของค่า Shear modulus (G_0) แบบจำลองดิน HSsmall มักจะถูกใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของดินภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำ ๆ โดยมีการกระทำของแรง ถอนแรง และกระทำแรงซ้ำ (Loading, unloading, and reloading) เช่น แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรที่กระทำต่อฐานรากแผ่เสาเข็ม [6,15,16,18]

ค่ากลสมบัติต่าง ๆ ของดิน เสาเข็มและฐานรากแผ่ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินได้จากการตรวจสอบจากผลการทดสอบของ [14] สำหรับ

กลสมบัติของเสาเข็มเหล็กใช้ค่าจากการศึกษาของ [14] ส่วนค่ากลสมบัติของฐานรากแผ่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยกำหนดให้ฐานรากแผ่เป็นวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ผ่านการตรวจสอบกับผลการทดสอบในสนามให้ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงในสนาม โดยผลการวิเคราะห์การตรวจสอบได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

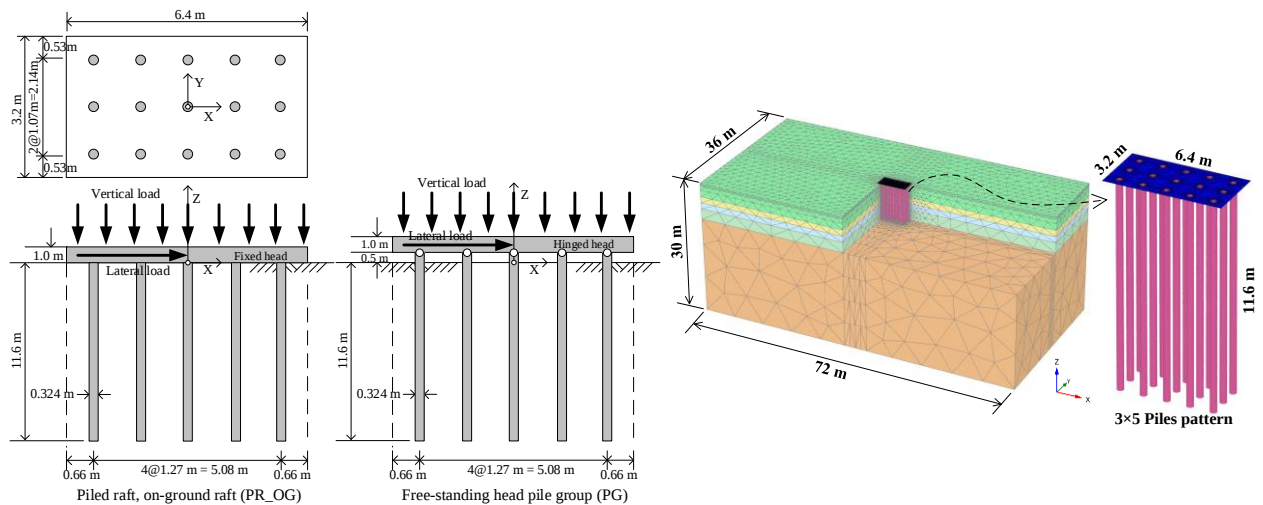
การศึกษาพฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร ทำการศึกษาฐานรากแผ่เสาเข็มโดยที่ฐานแผ่วางอยู่บนผิวดิน กำหนดแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทางแบบสมมาตร (Full cyclic loading หรือ Symmetric two-way cyclic loading) และทางเดียว (Haft cyclic loading หรือ One-way cyclic loading) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยกำหนดความถี่ (Frequency, f) เท่ากับ 0.1, 1 และ 10 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแรงลมและแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง [25] ขนาดของแอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับขนาดของแรงกระทำด้านข้างที่ทำให้ฐานรากแผ่เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างร้อยละ 10 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3430 kN จำนวนรอบวัฏจักร (Number of cycles, N) สูงสุดเท่ากับ 20 รอบ และ 50 รอบ สำหรับความถี่ 1 Hz โดยภายหลังการกระทำของแรงด้านข้างวัฏจักร ทำการให้แรงกระทำแบบสถิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างแบบสถิตภายหลังจากการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร สำหรับแรงกระทำในแนวตั้งตลอดการศึกษาจะกำหนดให้มีขนาดเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการหลุดตัวในแนวตั้งเท่ากับร้อยละ 10 ของขนาดเสาเข็มก่อนให้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร พฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสามารถแสดงได้โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้าง ความสามารถในการรับแรงด้านข้างสถิตภายหลังแรงกระทำวัฏจักร การเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้าง โมเมนต์ดัดคงค้างและโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็ม เป็นต้น

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองดินแบบ HSsmall ที่ผ่านการตรวจสอบกับผลการทดสอบในสนาม

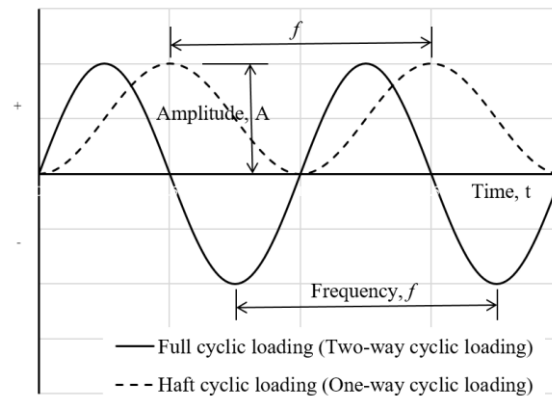
Parameters	Clay
Depth of soil layer (m)	0-30
Unsaturated unit weight, γ_{unsat} (kN/m ³)	17
Saturated unit weight, γ_{sat} (kN/m ³)	19
Effective cohesion, c' (kN/m ²)	15
Effective friction angle, ϕ' (°)	25
Secant stiffness in standard drained triaxial test, E_{50}^{ref} (kN/m ²)	2×10^4
Tangent stiffness for primary oedometer loading, E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	2.56×10^4
Unloading/reloading stiffness from drained triaxial test, E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	9.48×10^4
Reference shear modulus at very small strains, G_0^{ref} (kN/m ²)	2.7×10^5
Threshold shear strain at which $G_s = 0.722G_0, \gamma_{0.7}$ (-)	1.2×10^{-4}

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเสาเข็มและฐานรากแผ่ ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Parameters of piles		Parameters of rafts	
Outside diameter of steel tube pile, D_p (m)	0.324	The thickness of the raft, t_r (m)	1.00
Wall thickness of steel tube pile, t_p (mm)	9.5	Raft size, $B \times L_r$ (m ²)	3.2×6.4
Structure behavior	3D Embedded beam	Structure behavior	3D Plate
Material type	Elastoplastic	Material type	Elastoplastic
Elastic modulus, E (kN/m ²)	200×10^6	Elastic modulus, E (kN/m ²)	23×10^6
Max. normal force, N_p (kN)	3141	Max. normal force, N_p (kN/m)	5485
Max. bending moment, M_p (kN m)	350	Max. bending moment, M_p (kN m/m)	1583
หมายเหตุ: ค่ากลสมบัติต่างๆ ของเสาเข็มใช้ค่าจากการศึกษาของ [14] และของฐานรากได้จากการออกแบบ ค.ส.ล.			



รูปที่ 1 รูปแบบของฐานรากและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

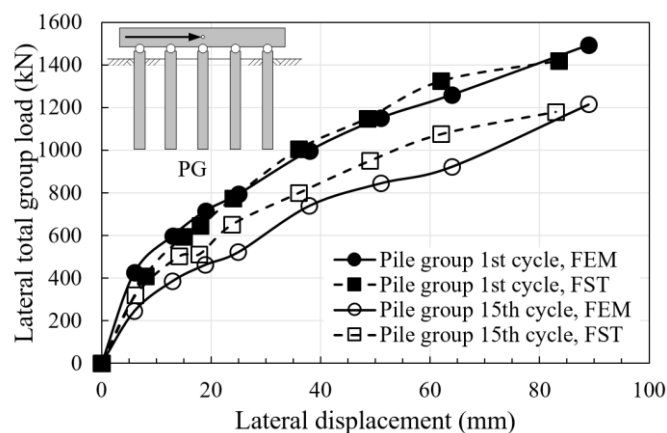


รูปที่ 2 รูปแบบของแรงกระทำวัฏจักรทางเดียวและสองทาง

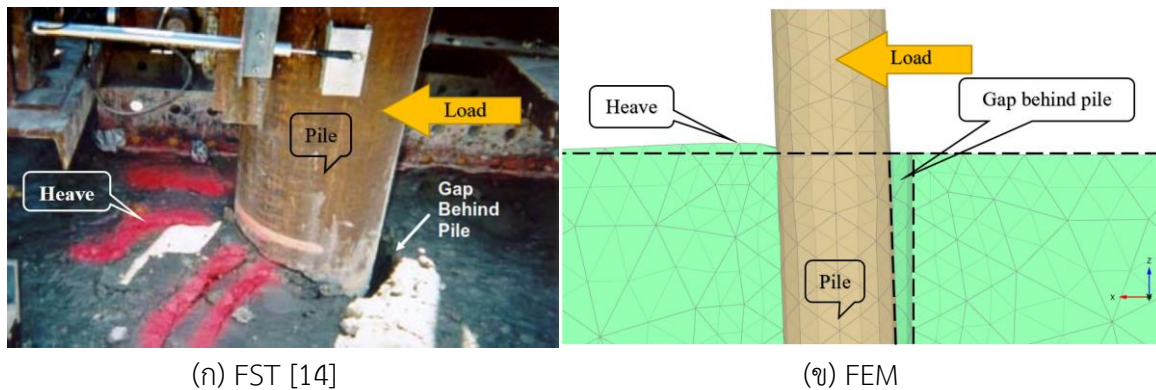
3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 การตรวจสอบแบบจำลอง FST กับ FEM

รูปที่ 3 แสดงผลการตรวจสอบแบบจำลอง FEM กับ FST ซึ่งเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างสถิตกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกลุ่ม มีลักษณะที่ใกล้เคียงและค่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกันระหว่าง FEM และ FST นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มมีความสามารถในการรับแรงต้านข้างหลังจากรับแรงวัฏจักรลดลงเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำเพิ่มขึ้น (รอบที่ 1 และ รอบที่ 15) เนื่องจากดินได้มีการสูญเสียความสามารถในการรับแรงต้านข้างเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงผลโดยการเกิดการเสียรูปอย่างถาวรของดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็ม และเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น [25-32] การเสียรูปอย่างถาวรของดินสามารถแสดงออกมาทางกายภาพโดยแสดงลักษณะการเกิดช่องว่าง (Gap) บริเวณหลังเสาเข็ม และเกิดการปูดของดิน (Heave) บริเวณหน้าเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) จากรูปที่ 4(ข) ผลลัพธ์จาก FEM แสดงให้เห็นพฤติกรรมดังกล่าวภายหลังการกระทำของแรงต้านข้าง โดยมีความสอดคล้องกันทั้งการทดสอบ FST และ FEM ทั้งนี้ยังแสดงพฤติกรรมดังกล่าวที่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tuladhar และคณะ [33] และ Basack [34]



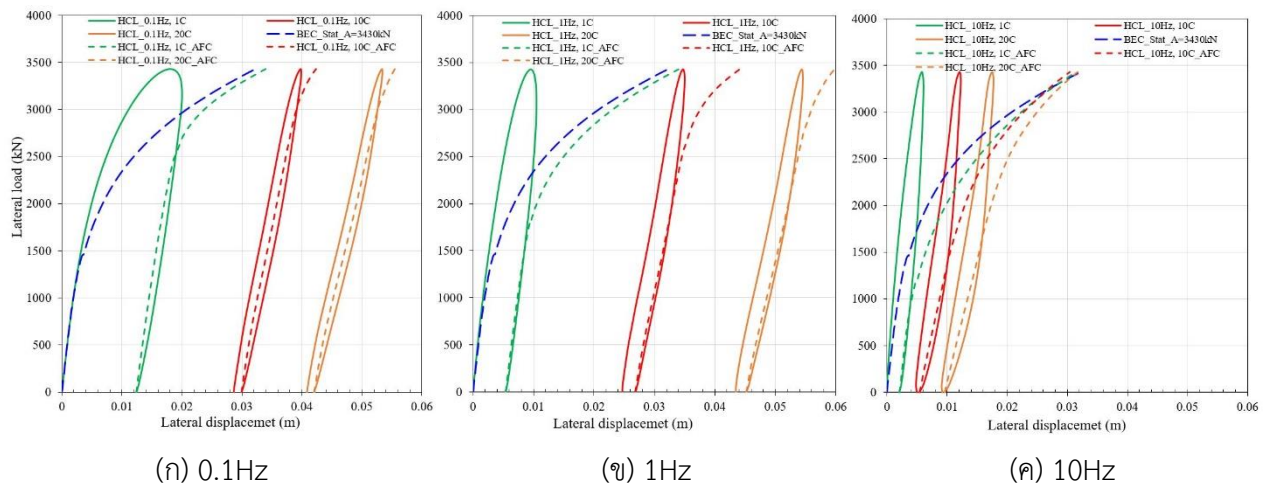
รูปที่ 3 แรงต้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกลุ่ม จากผลการตรวจสอบ FST กับ FEM รอบที่ 1 และรอบที่ 15



รูปที่ 4 การเกิด Gap และ Heave ด้านหลังและหน้าเสาเข็ม

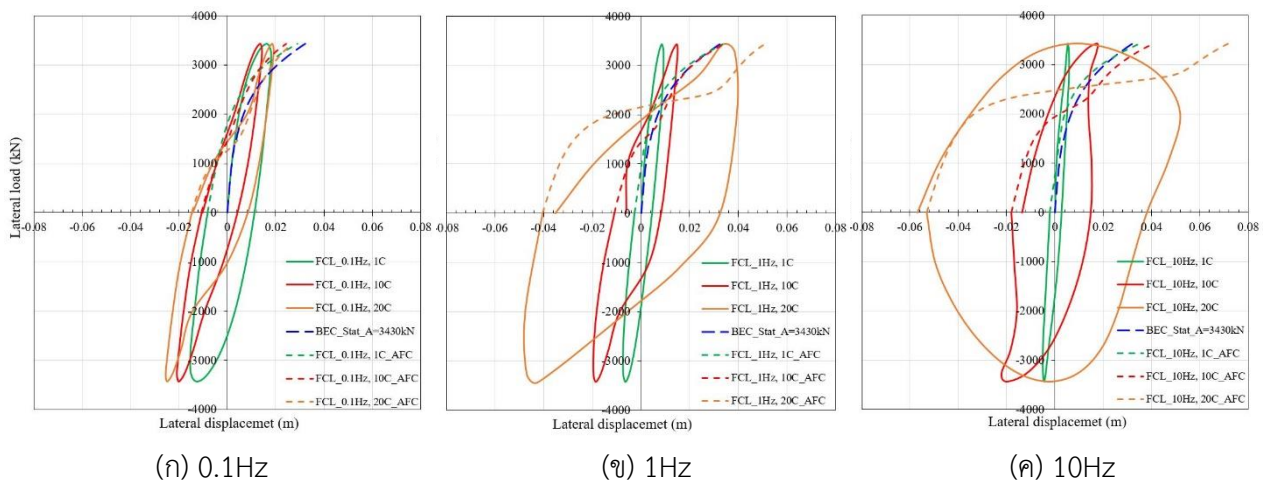
3.2 การรับแรงด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำวัฏจักร

รูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำวัฏจักรทางเดียว (HCL-Haft cyclic loading) จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของฐานรากมีค่าเพิ่มขึ้น และภายใต้แรงกระทำวัฏจักรทางเดียวที่ความถี่ต่ำ ๆ (0.1 – 1 Hz) จะมีค่าการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าอย่างเด่นชัด เมื่อเทียบกับความถี่สูง (10 Hz) เมื่อพิจารณาที่แรงด้านข้างขนาดเดียวกัน สำหรับความสามารถในการรับแรงด้านข้างสถิตภายหลังแรงกระทำวัฏจักร (AFC) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแรงสถิตก่อนกระทำแรงวัฏจักร (BEC) เนื่องจากภายหลังการกระทำของแรงด้านข้างวัฏจักรทางเดียวนั้นส่งผลทำให้ดินด้านหน้าเสาเข็มมีค่ากำลังเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายหลังสิ้นสุดการกระทำของแรงวัฏจักรในแต่ละรอบนั้นเปรียบเสมือนดินด้านหน้าเสาเข็มถูกบดอัดดินให้แน่นมากยิ่งขึ้น หรือโดนกระทำของ Preconsolidation pressure ส่งผลทำให้ดินเกิดการยุบตัวแน่นขึ้นสามารถรับแรงด้านข้างได้เพิ่มขึ้น โดยจากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าภายใต้แรงกระทำด้านข้างสถิตขนาดเดียวกันระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างจะมีค่าลดลงภายหลังแรงกระทำวัฏจักร และแรงกระทำแบบทางเดียวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างน้อยกว่าแบบสองทาง สำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทาง (FCL-Full cyclic loading) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า การเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบและค่าความถี่วัฏจักรเพิ่มมากขึ้น สำหรับพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างสถิตภายหลังแรงกระทำวัฏจักรสองทาง พบว่า มีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแรงด้านข้างสถิตก่อนกระทำแรงวัฏจักร ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบสถิตก่อนแรงวัฏจักร (BEC_Stat_A = 3430kN) นั้น สำหรับทุกความถี่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของภายใต้แรงกระทำด้านข้างสถิตภายหลังการกระทำของแรงวัฏจักร (AFC) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบและความถี่วัฏจักรสองทางเพิ่มมากขึ้น ดินใต้ฐานรากแผ่จะเกิดการสูญเสียกำลังเนื่องจากการเสียรูปอย่างถาวรของดิน โดยสามารถพิจารณาได้จากเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8



AFC – แรงต้านข้างสถิตภายหลังแรงกระทำวัฏจักร, BEC_Stat_A = 3430kN – แรงต้านข้างสถิตก่อนแรงกระทำวัฏจักรโดยมีขนาด 3430 kN, C – จำนวนรอบวัฏจักร

รูปที่ 5 แรงต้านข้างและการเคลื่อนตัว ของ PR ภายใต้แรงกระทำวัฏจักรทางเดียว (HCL)



AFC – แรงต้านข้างสถิตภายหลังแรงกระทำวัฏจักร, BEC_Stat_A = 3430kN – แรงต้านข้างสถิตก่อนแรงกระทำวัฏจักรโดยมีขนาด 3430 kN, C – จำนวนรอบวัฏจักร

รูปที่ 6 แรงต้านข้างและการเคลื่อนตัว ของ PR ภายใต้แรงกระทำวัฏจักรสองทาง (FCL)

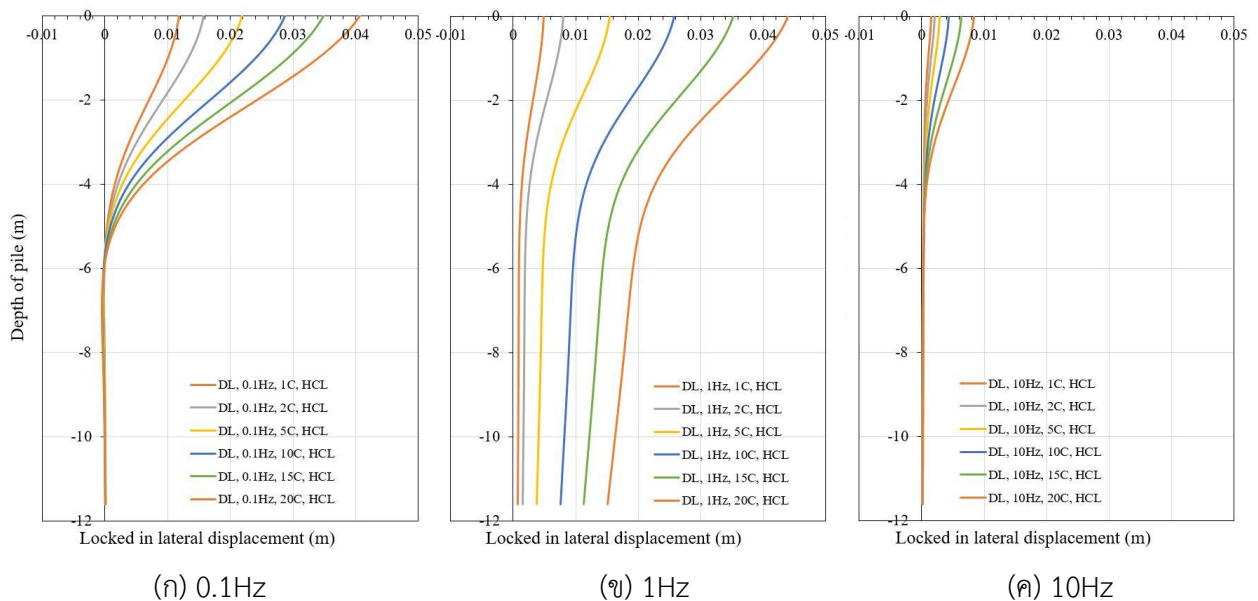
3.3 การเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ในเสาเข็ม

การเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างของเสาเข็ม (Locked in lateral displacement, D_L) คือ ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มภายหลังสิ้นสุดของการกระทำของแรงวัฏจักรในแต่ละรอบ (แรงกระทำด้านข้างเป็นศูนย์) จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างตามความยาวของเสาเข็มภายใต้แรงวัฏจักรทางเดียวและสองทาง ที่ความถี่ขนาดต่าง ๆ และจำนวนรอบวัฏจักร 1 - 20 รอบ (1C - 20C) พบว่าขนาดของถี จำนวนรอบและรูปแบบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรส่งผลต่อการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 7 ภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวการเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบวัฏจักรที่เพิ่มขึ้น แต่มีรูปแบบและขนาดที่แตกต่างกันตามขนาดของความถี่ โดยความถี่ 0.1 และ 1 Hz มีค่าการเคลื่อนตัวคงค้างของหัวเสาเข็มที่ใกล้เคียงกัน แต่รูปแบบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีความแตกต่างกัน โดยที่ความถี่ 0.1 Hz การเคลื่อนตัวจะอยู่บริเวณหัวเสาเข็มโดยมีความลึกไม่เกิน 6 เมตร แต่สำหรับความถี่ 1 Hz จะมีการเคลื่อนตัวทั้งเสาเข็มตั้งแต่หัวและปลายของเสาเข็ม ซึ่งอาจเนื่องมาจากแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวที่ความถี่ 1 Hz นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบฐานรากแผ่เสาเข็มในตัวอย่างนี้ คือ ประมาณ 1 Hz โดยคำนวณมาจากสมการที่ (1) [35] ซึ่งอาจทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขึ้นได้ จึงเป็นสาเหตุทำให้ดินรอบ ๆ และตลอดความยาวของเสาเข็มเกิดการเสียดสีและทำให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มได้มากกว่าความถี่อื่น ๆ กรณีความถี่ 10 Hz การเคลื่อนตัวด้านข้างของหัวเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าประมาณร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับความถี่ 0.1 และ 1 Hz

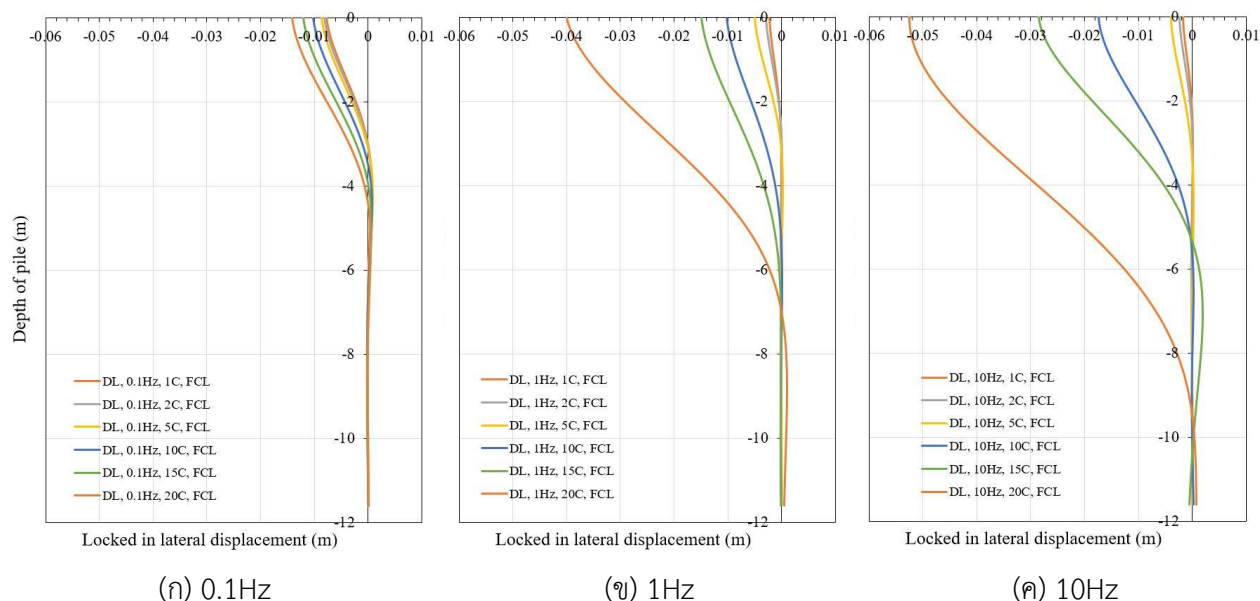
$$f(\text{Hz}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(\text{kN/m})}{m(\text{kg})}} \quad (1)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ธรรมชาติของฐานราก (Hz) k คือ ค่า Stiffness ของการเคลื่อนตัวด้านข้างของฐานราก (kN/m) m คือ มวลรวมทั้งหมดของฐานราก (kg)



DL – การเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้าง

รูปที่ 7 การเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างของเสาเข็ม ของ PR ภายใต้แรงกระทำวัฏจักรทางเดียว



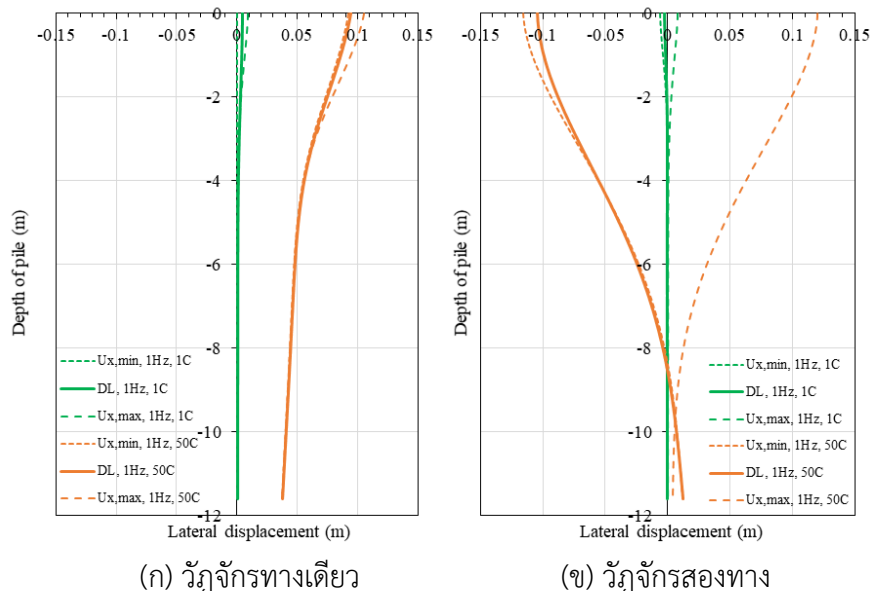
DL – การเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำ

รูปที่ 8 การเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำของเสาเข็ม ของ PR ภายใต้แรงกระทำวัฏจักรสองทาง

สำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทาง การเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำของเสาเข็มให้ผลการศึกษาที่มีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียว คือ จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำของเสาเข็มที่ความถี่ 0.1 Hz มีค่าน้อยกว่า 1 Hz และความถี่ 1 Hz มีค่าน้อยกว่า 10 Hz และที่ความถี่ 10 Hz ยังแสดงถึงการเสียรูปของดินรอบเสาเข็มที่รุนแรงบริเวณผิวดินและไล่ระดับลึกลงตามความยาวของเสาเข็มที่มากกว่าความถี่อื่น ๆ ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 8(ค) ความถี่ 10 Hz ที่จำนวนรอบความถี่ 20 รอบ จะแสดงลักษณะของการเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำตลอดความยาวของเสาเข็มที่เคลื่อนห่างจากแนวเดิม (0 m) มากที่สุด โดยระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำมากที่สุด คือ 0.052 m ที่ผิวดิน และมีค่าประมาณ 0 m ที่ระดับความลึกประมาณ 10 m จากผิวดิน โดยค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเสียความสามารถในการรับแรงด้านข้างของดินซึ่งแสดงพฤติกรรมออกมาในลักษณะของการเสียรูปอย่างถาวรของดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มและใต้ฐานรากแผ่

รูปที่ 9 แสดงการเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำสุด สูงสุด และการเคลื่อนตัวด้านข้างค้ำของเสาเข็ม ภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวและสองทางขนาดความถี่ 1 Hz โดยพบว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวและสองทางมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบวัฏจักร 50 รอบ พบว่า ภายใต้แรงวัฏจักรทางเดียวเสาเข็มทั้งต้นมีการเคลื่อนตัวด้านข้างออกจากแนวเดิม (ก่อนมีแรงกระทำ) มากกว่าแรงวัฏจักรสองทาง แต่ความแตกต่างของระยะการเคลื่อนที่ระหว่างหัวเสาเข็มและปลายเสาเข็มของแรงแบบทางเดียวมีค่าน้อยกว่าแบบสองทาง โดยพิจารณาจากรูปที่ 9(ก) สำหรับแรงวัฏจักรทางเดียวที่จำนวนรอบ 50 รอบ พบว่า การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 0.105 m และที่ตำแหน่งปลายเสาเข็มมีค่า 0.038 m โดยจะมีผลต่างของการเคลื่อนที่ของหัวและปลายเสาเข็มเท่ากับ 0.067 m และเมื่อพิจารณารูปที่ 9(ข) กรณีของแรงวัฏจักรสองทางที่จำนวนรอบ 50 รอบ พบว่า การเคลื่อนที่สูงสุดของหัวเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 0.120 m และที่ตำแหน่งปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 0.005 m ผลต่างของการ

เคลื่อนที่ระหว่างหัวและปลายเสาเข็มเท่ากับ 0.115 m ดังนั้น จึงจะเห็นได้ว่าผลต่างของการเคลื่อนที่สูงสุดของหัวและปลายเสาเข็มของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวมีค่าน้อยกว่าสองทาง ซึ่งส่งผลทำให้ค่าโมเมนต์ในเสาเข็มสำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวที่ความถี่ 1 Hz มีค่าน้อยกว่าแรงวัฏจักรสองทาง ดังแสดงในรูปที่ 11

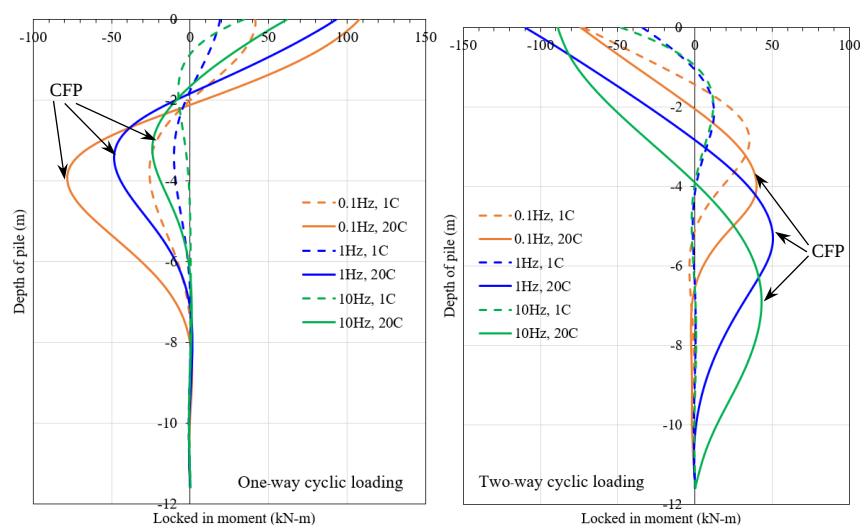


$U_{x,min}$ – การเคลื่อนที่ด้านข้างต่ำสุด, $U_{x,max}$ – การเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด,
DL – การเคลื่อนที่ด้านข้างคงค้าง

รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ด้านข้างของ PR ภายใต้แรงวัฏจักรทางเดียวและสองทาง ความถี่ 1 Hz
จำนวนรอบ 1-50 รอบ

โมเมนต์คงค้างในเสาเข็ม (Locked in moment, M_L) คือ ค่าโมเมนต์ในเสาเข็มภายหลังสิ้นสุดของการกระทำของแรงวัฏจักรในแต่ละรอบ จากรูปที่ 10 สำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียวแสดงให้เห็นว่าโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มและจุดดัดกลับของโมเมนต์ (Contraflexure point, CFP) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มมากขึ้น และที่จำนวนรอบ 20 รอบ ค่าโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ตำแหน่งความลึกของจุดดัดกลับของโมเมนต์จะน้อยลง (ตื้นขึ้น) เมื่อวัดจากตำแหน่งของหัวเสาเข็ม สำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทางให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากวัฏจักรทางเดียว คือ ที่จำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่พบว่าที่จำนวนรอบสูงๆ (20 รอบ) ความลึกของตำแหน่งจุดดัดกลับของโมเมนต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น (ลึกลง) อย่างเด่นชัดเมื่อความถี่และจำนวนรอบวัฏจักรมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรที่จำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของดินเนื่องจากเกิดการเสียรูปอย่างถาวรของดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็ม โดยพิจารณาได้จากระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็มคงค้าง (เมื่อถอนแรงกระทำเป็นศูนย์) ที่จำนวนรอบวัฏจักรสูง ๆ พบว่า มีค่ามากขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดโมเมนต์คงค้างในเสาเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างคงค้างในเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบวัฏจักร โดยขึ้นอยู่กับขนาดของความถี่ จำนวนรอบและรูปแบบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักร โดยผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ [28]

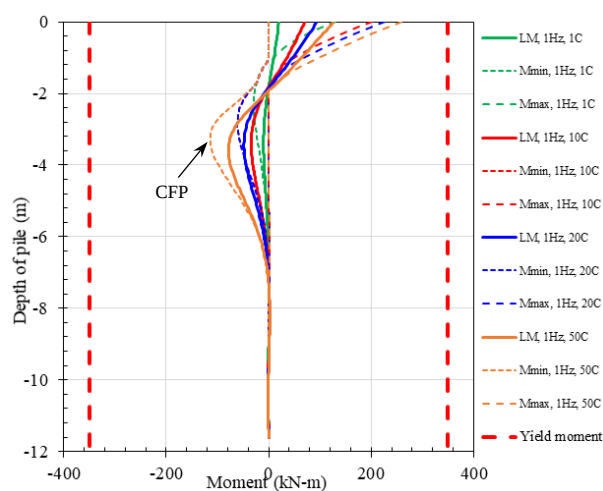
รูปที่ 11 แสดงค่าโมเมนต์ดัดตามความลึกของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรแบบทางเดียวและสองทางที่ความถี่ 1 Hz โดยมีจำนวนรอบที่ต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรมีค่าเพิ่มมากขึ้น และมีค่าเข้าใกล้จุดที่ยอมให้ของโมเมนต์ในเสาเข็ม (Yield moment = 350 kPa [14]) และค่าโมเมนต์คงค้างก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และจุดดัดกลับของโมเมนต์ในเสาเข็มจะมีค่าลึกขึ้นตามจำนวนรอบวัฏจักร ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากการเสียรูปอย่างถาวรของดินรอบ ๆ เสาเข็ม โดยเริ่มจากบริเวณผิวดินแล้วค่อย ๆ ไล่ระดับลึกลงมาเรื่อย ๆ (สังเกตจากตำแหน่งจุดดัดกลับของโมเมนต์ค่อย ๆ ลึกลงตามจำนวนรอบวัฏจักรที่เพิ่มขึ้น) โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะมีลักษณะเช่นเดียวกันระหว่างแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรแบบทางเดียวและสองทาง แต่จะแสดงผลที่โดดเด่นกว่าสำหรับแรงวัฏจักรสองทาง



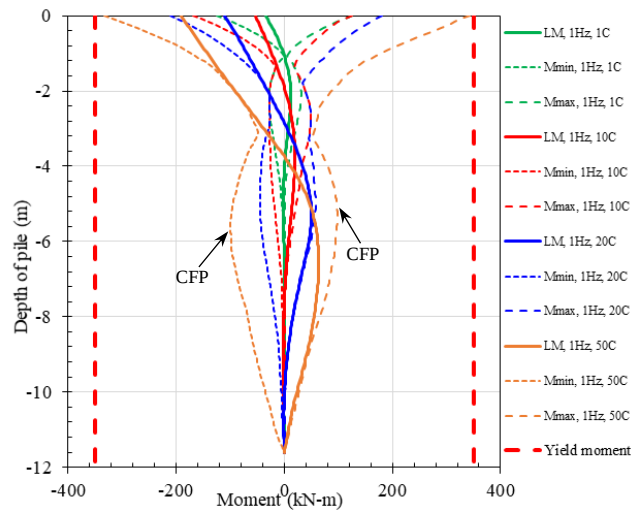
(ก) วัฏจักรทางเดียว

(ข) วัฏจักรสองทาง

รูปที่ 10 โมเมนต์คงค้างในเสาเข็มของ PR ภายใต้แรงกระทำวัฏจักรทางเดียวและสองทาง



(ก) วัฏจักรทางเดียว



(ข) วัฏจักรสองทาง

Mmin – โมเมนต์ดัดต่ำสุด, Mmax – โมเมนต์ดัดสูงสุด, LM – โมเมนต์ดัดคงค้าง

รูปที่ 11 โมเมนต์ในเสาเข็มของ PR ภายใต้แรงวัฏจักรทางเดียวและสองทางขนาด 1 Hz

จำนวนรอบ 1 – 50 รอบ

เมื่อจำนวนรอบวัฏจักรสองทางเพิ่มมากขึ้น (50 รอบ) ค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม บริเวณหัวเสาเข็มตรงจุดยึดรั้งกับฐานรากแผ่ (บริเวณใต้ฐานรากแผ่) มีค่าสูงสุดถึงจุดครากของเสาเข็ม ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Crack) ในตัวเสาเข็มขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ในเสาเข็มภายใต้แรงกระทำทางเดียว ที่จำนวนรอบวัฏจักร ความถี่และขนาดของแรงกระทำเดียวกัน พบว่า การเกิดโมเมนต์ในบริเวณหัวเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่าแรงกระทำวัฏจักรสองทางอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเสียดทานของดินบริเวณหัวเสาเข็มภายใต้แรงกระทำวัฏจักรสองทางมีค่ามากกว่าทางเดียวอย่างชัดเจน

4. สรุปผล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรโดยทำการแปรเปลี่ยน รูปแบบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรแบบทางเดียวและสองทาง ความถี่และจำนวนรอบวัฏจักร จากผลการศึกษาพบว่า

4.1 แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรส่งผลทำให้ความสามารถของฐานรากแผ่เสาเข็มในการรับแรงด้านข้างลดลง เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียกำลังของดินและทำให้เกิดการเสียดทานของดินรอบเสาเข็มจากจำนวนรอบของแรงวัฏจักรที่เพิ่มขึ้น แรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทางส่งผลทำให้ความสามารถในการรับแรงด้านข้างของฐานรากแผ่เสาเข็มลดลงมากกว่าแรงวัฏจักรทางเดียว

4.2 ประสิทธิภาพของการรับแรงด้านข้างสถิตภายหลังจากกระทำวัฏจักรของฐานรากแผ่เสาเข็ม จะมีค่าลดลงอย่างเด่นชัด เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรและความถี่เพิ่มขึ้นสำหรับแรงวัฏจักรสองทาง

4.3 การเสียรูปอย่างถาวรของดินรอบเสาเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มมากขึ้น และแสดงผลที่โดดเด่นกว่าสำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทางเมื่อเทียบกับทางเดียว

4.4 ค่าโมเมนต์คดโค้งในเสาเข็มภายหลังจากถอนแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรจนเป็นศูนย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มขึ้น สำหรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรทางเดียว ค่าโมเมนต์คดโค้งในเสาเข็มจะมีค่ามากกว่าที่ความถี่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่สูง และแรงกระทำด้านข้างวัฏจักรสองทาง ค่าโมเมนต์คดโค้งในเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่สูง และเมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบวัฏจักรสูง ๆ โดยสอดคล้องกับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างคงค้างที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มขึ้น

4.5 ค่าโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็มจะเกิดขึ้นบริเวณจุดยึดระหว่างหัวเสาเข็มกับฐานรากแผ่ และจะมีค่าใกล้เคียงค่าโมเมนต์ที่ยอมให้ของเสาเข็มเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเพิ่มมากขึ้น

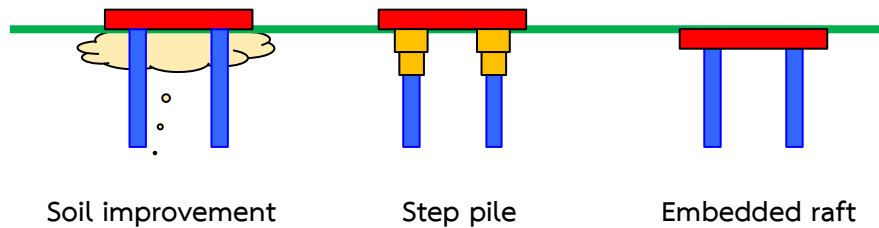
5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นพฤติกรรมของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร โดยพบว่าเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรมีค่าเพิ่มมากขึ้นภายใต้แรงกระทำด้านข้างขนาดคงที่ ส่งผลทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรของดินบริเวณรอบเสาเข็มและได้ฐานแผ่ ส่งผลทำให้ฐานรากเกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น ค่าโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลทำให้เกิดโมเมนต์คดโค้งในเสาเข็มเพิ่มขึ้นอีกด้วย ถึงแม้จะถอนแรงกระทำด้านข้างจนออกจนเป็นศูนย์ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจากการศึกษาจะเป็นข้อมูลพื้นฐานอย่างดีสำหรับการพิจารณาออกแบบให้ฐานรากแผ่เสาเข็มรองรับแรงกระทำด้านข้างวัฏจักร ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น หรือเพื่อเสริมความแข็งแรงของฐานรากแผ่เสาเข็มให้มีประสิทธิภาพในการรับแรงเพิ่มมากขึ้นทางคณะผู้ทำการวิจัยขอเสนอแนะแนวทางดังต่อไปนี้

5.1 ปรับปรุงคุณภาพของดินบริเวณใต้ฐานรากแผ่ บริเวณรอบ ๆ หัวเข็มเสาเข็ม ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเสียรูปของดิน หรือเกิดการเคลื่อนตัวคดโค้งของฐานรากแผ่เสาเข็มสูง ๆ ภายใต้อาการกระทำวัฏจักร เพื่อให้ดินบริเวณดังกล่าวมีคุณสมบัติในการรับแรงหรือมีค่ากำลังที่เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม

5.2 เพิ่มขนาดของเสาเข็มให้มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าเดิมลักษณะเป็นเสาเข็มแบบขั้น ๆ (Step pile) โดยเฉพาะบริเวณหัวเสาเข็มที่ยึดติดกับฐานรากแผ่ โดยมีความลึกจากท้องฐานรากมากพอที่จะรองรับโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำด้านข้างวัฏจักร

5.3 สำหรับการฝังฐานรากแผ่ของระบบฐานรากแผ่เสาเข็มลึกลงไปจากผิวดินก็เป็นอีกแนวทางที่จะช่วยให้ฐานรากแผ่เสาเข็มมีประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างที่ดีขึ้น และยังช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและด้านข้างลงได้ เนื่องจากการฝังฐานรากแผ่นั้นทำให้ฐานรากแผ่เสาเข็มเพิ่มแรงด้านต้านข้าง (Passive force) และช่วยเพิ่มแรงแบกทานในแนวตั้ง (Bearing capacity) ให้มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับการวางฐานรากแผ่อยู่บนผิวดิน



รูปที่ 12 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของฐานรากแผ่เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างวัฏจักร

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ทุนมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ENG6601098S) และทุนผู้มีศักยภาพสูงเพื่อเพิ่มขีดความสามารถให้กับเศรษฐกิจ สังคม และชุมชน แบบ 1 (Talent Utilization Type 1, TU1-04/2564) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีการศึกษา 2564

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Amornfa, K., Quang, H. T., & Tuan, T. (2022). 3D numerical analysis of piled raft foundation for Ho Chi Minh City subsoil conditions. *Geomechanics and Engineering*, 29(2), 183-192.
- [2] Jamil, I., Ahmad, I., Rehman, A. U., Ahmed, A., Hamza, A., & Ullah, W. (2022). Response of basement wall in tall buildings foundation under lateral loading. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(11), 1415-1423.
- [3] Karira, H., Kumar, A., Ali, T. H., Mangnejo, D. A., & Mangi, N. (2022). A parametric study of settlement and load transfer mechanism of piled raft due to adjacent excavation using 3D finite element analysis. *Geomechanics and Engineering*, 30(2), 169-185.
- [4] Soomro, M. A., Mangi, N., Memon, A. H., & Mangnejo, D. A. (2022). Responses of high-rise building resting on piled raft to adjacent tunnel at different depths relative to piles. *Geomechanics and Engineering*, 29(1), 25-40.
- [5] Azizkandi, A. S., Baziar, M. H., & Yeznabad, A. F. (2018). 3D dynamic finite element analyses and 1 g shaking table tests on seismic performance of connected and nonconnected piled raft foundations. *KSCE journal of Civil Engineering*, 22(5), 1750-1762.
- [6] Watcharasawe, K., Kitiyodom, P., & Jongpradist, P. (2017). 3-D numerical analysis of consolidation effect on piled raft foundation in Bangkok subsoil condition. *GEOMATE Journal*, 12(31), 105-111.
- [7] Balakumar, V., Huang, M., Oh, E., & Balasubramaniam, A. S. (2017, September 14-15).

- A Critical and Comparative Study on 2 D and 3 D Analyses of Raft and Piled Raft Foundations. Paper presented at the SEAGS 50th Anniversary Symposium Proceedings, AIT, Bangkok, Thailand.
- [8] Elwakil, A., & Azzam, W. (2016). Experimental and numerical study of piled raft system. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 547-560.
 - [9] Qin, H., & Ma, K. (2021). Dynamic behaviour difference between high-and low-raft forms of piles in earthquakes. *Geotechnical Research*, 8(3), 85-92.
 - [10] Vu, A., Pham, D., Nguyen, T., & He, Y. (2014). 3D finite element analysis on behaviour of piled raft foundations. *Applied Mechanics and Materials*, 580, 3-8.
 - [11] Hsueh, C. K., Lin, S. S., & Ong, D. E. (2018). Finite Element Analysis to Characterize the Lateral Behaviour of a Capped Pile Group. *Geotechnical Engineering (00465828)*, 49(2), 22-31.
 - [12] Halder, P., Manna, B., & Sur, A. (2020). Impact of pile head rigidity on the response of piled raft in sand under pseudo-static loading. *Indian Geotechnical Journal*, 50(5), 810-824.
 - [13] Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., Nayak, B. C., & Kumar, E. V. (2023). Scaled Modeled Tests and Finite Element Numerical Study on Lateral Responses of PRF System under VHM Loading. *Geomechanics and Geoengineering*, 18(4), 321-345.
 - [14] Snyder, J. L. (2004). Full-scale lateral-load tests of a 3x5 pile group in soft clays and silts. (Master of Science), Brigham Young University.
 - [15] Likitlersuang, S., Chheng, C., Surarak, C., & Balasubramaniam, A. (2018). Strength and stiffness parameters of Bangkok clays for finite element analysis. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 49(2), 150-156.
 - [16] Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., & Balasubramaniam, A. (2013). Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT. *Soils and Foundations*, 53(5), 756-773.
 - [17] Likitlersuang, S., Teachavorasinskun, S., Surarak, C., Oh, E., & Balasubramaniam, A. (2013). Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok clays. *Soils and Foundations*, 53(4), 498-509.
 - [18] Surarak, C. (2010). Geotechnical aspects of the Bangkok MRT blue line project. (Ph.D.), Griffith University.
 - [19] Vakili, K., Barciaga, T., Lavasan, A., & Schanz, T. (2013). A practical approach to constitutive models for the analysis of geotechnical problems. Paper presented at the The Third

- International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo III), at Krakow, Poland.
- [20] Zhao, C., Lavasan, A. A., Barciaga, T., Zarev, V., Datcheva, M., & Schanz, T. (2015). Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations– The Western Scheldt tunnel case. *Computers and Geotechnics*, 69, 601-614.
 - [21] Kumar, A., & Choudhury, D. (2018). Development of new prediction model for capacity of combined pile-raft foundations. *Computers and Geotechnics*, 97, 62-68.
 - [22] D’Aguiar, S., Modaressi-Farahmand-Razavi, A., Lopez-Caballero, F., & Santos, J. (2008). Soil-structure interface modeling: Application to pile axial loading. Paper presented at the Proceedings of the 12th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
 - [23] Knappett, J., & Craig, R. F. (2019). *Craig's soil mechanics (Eighth Edition)*: CRC press.
 - [24] Tomlinson, M., & Woodward, J. (2007). *Pile design and construction practice*: CRC press.
 - [25] Klevsjø, C. (2014). *Numerical Modeling of Cyclic Loading on Clay*. (Master's degree), Norwegian University of Science and Technology, Norway.
 - [26] Basack, S., & Dey, S. (2012). Influence of relative pile-soil stiffness and load eccentricity on single pile response in sand under lateral cyclic loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4), 737-751.
 - [27] Basack, S., & Nimbalkar, S. (2018). Measured and Predicted Response of Pile Groups in Soft Clay Subjected to Cyclic Lateral Loading. *International Journal of Geomechanics*, 18(7), 04018073.
 - [28] He, B., Wang, L., & Hong, Y. (2017). Field testing of one-way and two-way cyclic lateral responses of single and jet-grouting reinforced piles in soft clay. *Acta Geotechnica*, 12(5), 1021-1034.
 - [29] Hong, Y., He, B., Wang, L., Wang, Z., Ng, C., & Mašin, D. (2017). Cyclic lateral response and failure mechanisms of semi-rigid pile in soft clay: centrifuge tests and numerical modelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(6), 806-824.
 - [30] Poulos, H. G. (1982). Single pile response to cyclic lateral load. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 108(GT3), 355-375.
 - [31] Sawada, K., & Takemura, J. (2014). Centrifuge model tests on piled raft foundation in sand subjected to lateral and moment loads. *Soils and Foundations*, 54(2), 126-140.

- [32] Thian, S., & Lee, C. (2017). Cyclic stress-controlled tests on offshore clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 376-381.
- [33] Tuladhar, R., Maki, T., & Mutsuyoshi, H. (2007). Cyclic behavior of laterally loaded concrete piles embedded into cohesive soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(1), 43-59.
- [34] Basack, S. (2010). Response of vertical pile group subjected to horizontal cyclic load in soft clay. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 7(2), 91-103.
- [35] Roy, J., Kumar, A., & Choudhury, D. (2018). Natural frequencies of piled raft foundation including superstructure effect. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 112, 69-75.