วงการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียว ภายใต้แรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน
Failure Envelopes for Circular Piles in Clays Under Combined Horizontal Load and Moment

สุทธิกาญจน์ พนมชัยวัฒน์* สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และ สายันต์ ศิริมนตรี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: suttikarn.pano@dome.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน การวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิตในระบบสามมิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหานี้ โดยพิจารณาเสาเข็มวงกลมมีความลึกและความกว้าง สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ เสาเข็มวงกลมถูกจำลองด้วยวัสดุแบบแข็งเกร็ง ไม่เกิดการวิบัติ และดินเหนียวถูกจำลองเป็นวัสดุแบบเทรสกาในสภาพไม่ระบายน้ำ ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างเสาเข็มและดินเหนียวให้เป็นแบบไม่มีแรงดึง ผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกันนี้ถูกนำเสนอในรูปแบบของพารามิเตอร์ไร้มิติของแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนระหว่างความลึกและความกว้างของเสาเข็มวงกลมมีผลต่อลักษณะและขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียว

คำสำคัญ: ไฟไนต์อิลิเมนต์, เสาเข็มวงกลม, แรงกระทำแบบ, แบบปริมาตรสามมิติ

Abstract

This research presents failure envelopes for circular piles in clays subjected to combined horizontal load and moment. A three-dimensional finite element analysis was conducted to determine the solution for this problem, considering the depth and width of the circular piles. For finite element analyses, the circular pile was modeled as a volume element with rigid material, while the clay was modeled using Tresca material in an undrained condition. Soil-structure interfaces were modeled with no tension. The failure envelopes of circular piles in clay under combined horizontal load and moment are presented in terms of normalized parameters of horizontal load and moment. The result of this study found that the ratio between depth and width of circular piles affects the character and failure of the envelope of circular piles in clays.

Keywords: Finite Element, Circular Piles, Combined Load, Three-dimentional

1. คำนำ

เสาเข็มเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งในโครงสร้าง เนื่องจากเป็นส่วนที่รับการถ่ายน้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง และส่งต่อน้ำหนักทั้งหมดลงสู่ชั้นดิน สำหรับการออกแบบเสาเข็มของโครงสร้างที่มีความซับซ้อน เช่น โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเล หรือโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น สะพานหรืออาคารสูงนั้นควรพิจารณาแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ที่กระทำต่อเสาเข็มร่วมด้วย เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงจากสภาพความเป็นจริงมากที่สุด เนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริงนั้นมีแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทั้งแรงจากลมและแรงจากคลื่น ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ต่อเสาเข็มที่รองรับโครงสร้างเหล่านี้

งานวิจัยนี้นำเสนอเรื่องวงการวิบัติของเสาเข็มในดินเหนียวภายใต้แรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน โดยมีผลการวิเคราะห์เป็นแผนภูมิของพารามิเตอร์ไร้มิติ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำในแนวราบ โมเมนต์ ความลึกของเสาเข็ม กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว และหน่วยน้ำหนักของดินเหนียว รวมไปถึงแผนภูมิแสดงขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope) ระหว่างแรงในแนวราบและโมเมนต์ โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิตในระบบสามมิติ ด้วยโปรแกรม OptumG3

2. วิธีการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงกระทำ

2.1 การวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงดันด้านข้างด้วยวิธีการดั้งเดิม

Brum [1] ได้นำแบบจำลองแรกสำหรับเสาเข็มรับแรงด้านข้างแบบระบบ 2 มิติ แต่สามารถใช้ได้เฉพาะกับดินทราย และมีลักษณะการวิบัติคล้ายกับกำแพงกันดินมากกว่า Brom [2] ได้นำเสนอผลเฉลยของแรงวิบัติเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยวในดินเหนียว ซึ่งสามารถนำไปได้หลากหลายและเป็นที่นิยม ต่อมา Muff และ Hamilton [3] ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ผลเฉลย

ของเสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีขอบเขตบน ทำให้ผลเฉลยที่ได้นั้นมีค่าสูงเกินไป

Klar และ Randolph [4] ได้ใช้วิธีขอบเขตบน และวิธี Load-Displacement ในการวิเคราะห์ผลเฉลยของเสาเข็มรับแรงดันด้านข้างในระบบ 3 มิติ ต่อมา Yu, Huang และ Zhang [5] ได้วิเคราะห์หาค่าของ Ultimate bearing capacity ของเสาเข็มแบบแข็งเกร็งรับแรงดันด้านข้างด้วยวิธีการวิเคราะห์ลิมิติแบบขอบเขตบน

2.2 การวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

Chaudhry [6] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เสาเข็มหน้าตัดแนวราบในดินเหนียวและดินทรายแบบ 2 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่แตกต่างกัน Pradhan [7] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์หาค่าสติฟเนส ของเสาเข็มในแนวราบด้วยโปรแกรม Plaxis 2D และ 3D ต่อมา Mardfekri และคณะ [8] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ศึกษาผลการเคลื่อนที่ของเสาเข็มในแนวดิ่งที่อยู่ในดินทรายและดินเหนียว

Keawsawasvong และ Ukritchon [9-11] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ศึกษาการวิบัติของเสาเข็มรับแรงดันทางด้านข้างในดินเหนียวแบบ 2 มิติ ต่อมาได้ทำการศึกษาวิ นต์อิลิเมนต์

3.2 แบบจำลองของเสาเข็ม

แบบจำลองของเสาเข็มถูกจำลองให้เป็นอิลิเมนต์แบบปริมาตรสามมิติแบบครึ่งระบบ โดยเป็นเสาเข็มหน้าตัดวงกลม มีความกว้าง = D และความลึก = L และมีคุณสมบัติแบบแข็งเกร็ง (Rigid Body) มีหน่วยน้ำหนักของเสาเข็ม (γ_c) = 0 kN/m^3 และไม่เกิดการวิบัติใดๆในเสาเข็ม โดยแบบจำลองของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวแสดงดังรูปที่ 1(a) และรูปที่ 1(b) แสดงถึงรูปแบบของแรงที่กระทำบนเสาเข็ม

3.3 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินเหนียวและเสาเข็ม

ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินเหนียวและพื้นผิวรอบเสาเข็มถูกกำหนดให้เป็นแบบหยาบ (Rough surface) โดยค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินเหนียวและเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดินเหนียวเชื่อมต่อกันแบบไม่มีแรงดึง (No tension) เป็นการจำลองสภาพการแยกตัวระหว่างดินเหนียวและเสาเข็ม สามารถเกิดแรงดึงขึ้นได้ และให้สมบัติการแยกตัวของวัสดุเป็นแบบเทรสกา (Tresca)

3.4 เงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวกำหนดให้ขอบด้านข้างของแบบจำลองไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบหรือแกน x และ y (Size fixed x, y) กล่าวคือ $U_x = U_y = 0$ และขอบด้านล่างของแบบจำลองไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแนวดิ่งและแนวราบหรือแกน x, y และ z (Bottom fixed x, y, z) กล่าวคือ $U_x = U_y = U_z = 0$

3.5 โครงข่ายของแบบจำลองเสาเข็ม

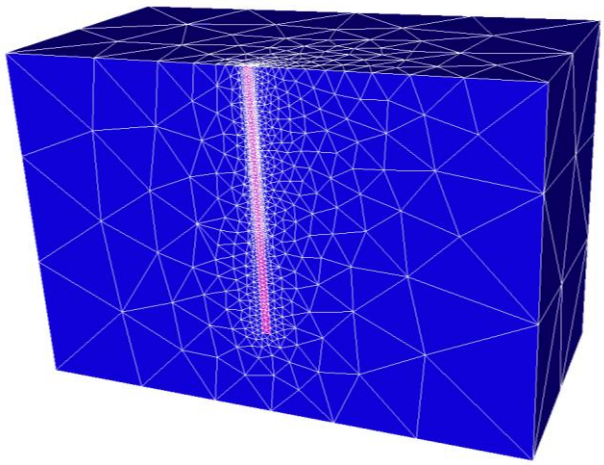
แบบจำลองเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวในโปรแกรม OptumG3 มีลักษณะของอิลิเมนต์เป็นชิ้นส่วนรูปทรงสามเหลี่ยมแบบมี 4 จุดต่อ และมีฟังก์ชันพิเศษ คือแบบจำลองสามารถขยายโครงข่ายของชิ้นส่วนย่อย (Adaptive Mesh) ได้โดยอัตโนมัติ โดยฟังก์ชันนี้จะเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนย่อยในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด เช่นตำแหน่งที่เกิดระนาบการวิบัติ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการลู่เข้าของผลเฉลยจากการวิเคราะห์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนอิลิเมนต์ที่กำหนดไว้ โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งจำนวนอิลิเมนต์เริ่มต้นที่ 5,000 อิลิเมนต์ และขยายโครงข่ายจำนวน 5 รอบ แต่ละรอบจะเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ขึ้นและลู่เข้าสู่ค่าคำตอบที่แท้จริง ซึ่งเพิ่มอิลิเมนต์สูงสุดได้ถึงจำนวน 10,000 อิลิเมนต์ และแบบจำลองการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียว แสดงดังรูปที่ 2

3.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษา

พารามิเตอร์ที่ศึกษาในแบบจำลองมีดังนี้ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (s_u) กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินเหนียวและเสาเข็ม (s_{ui}) หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_s) เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (D) และความลึกของเสาเข็ม (L) โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นตัวแปรไร้มิติ และเมื่อกำหนดให้อยู่ในความสัมพันธ์จะมีค่าช่วงดังนี้

1. s_{ui} / s_u กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1
2. $\gamma_s L / s_u$ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0
3. L/D กำหนดให้อยู่ในช่วง 5-60 โดย D มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

ผลเฉลยจากการวิเคราะห์กำหนดให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติดังนี้ H/s_uL และ M/s_uL^2



รูปที่ 2 แบบจำลองการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวแบบครึ่งระบบในโปรแกรม OptumG3

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มวงกลมรับแรงกระทำเพียงแรงเดียว

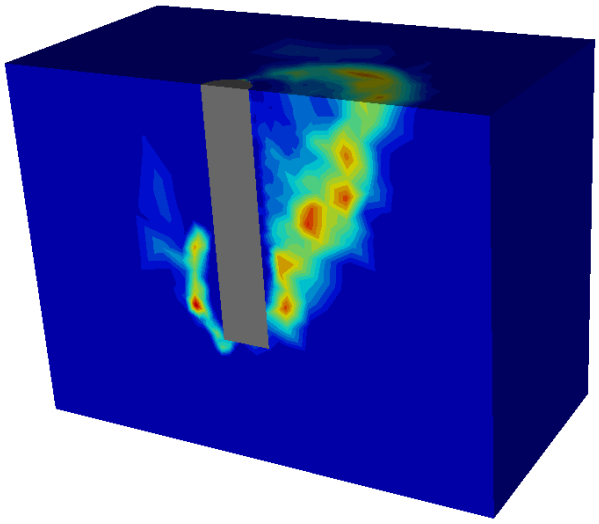
ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงกระทำเพียงแรงเดียวด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบลิมิต แบ่งเป็น 2 กรณี คือกรณีเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงในแนวราบเพียงแรงเดียว และกรณีเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับโมเมนต์เพียงแรงเดียว กำหนดให้ค่า $\gamma_s L / s_u$ = 0 และ s_u = 1

4.1.1 เสาเข็มที่รับเฉพาะแรงกระทำในแนวราบเพียงแรงเดียว

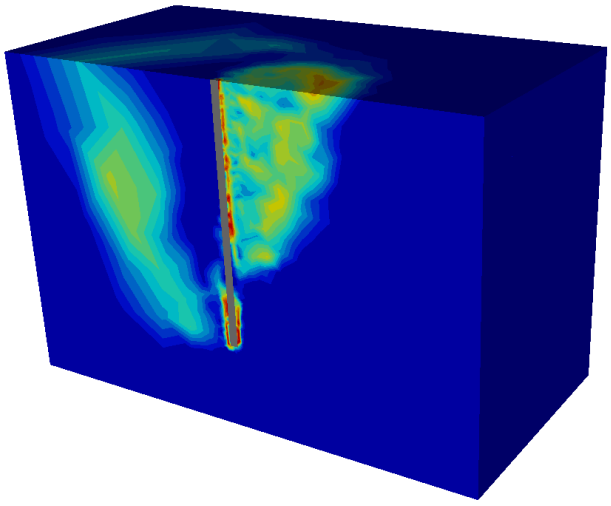
เสาเข็มวงกลมในดินเหนียวที่รับเฉพาะแรงกระทำในแนวราบเพียงแรงเดียว (H/s_uL) มีผลลักษณะการวิบัติ Shear dissipation ของเสาเข็มแสดงดังรูปที่ 3 โดยในรูปที่ 3(a) เป็นเสาเข็มกรณี L/D = 5 และ 3(b) เป็นเสาเข็มกรณี L/D = 30 จะพบว่าค่า L/D มีผลต่อวงขอบเขตการวิบัติของดินเหนียว โดยขนาดของวงขอบเขตการวิบัติด้าน Active จะมีขนาดที่กว้างขึ้นตามความลึกของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4 แสดงผลเฉลยแรงวิบัติของเสาเข็มที่รับเฉพาะแรงในแนวราบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบลิมิตนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ อย่างวิธี Limit equilibrium method (LEM) ศึกษาโดย Brom [2], Meyerhof และคณะ [15] และ Georgiadis และคณะ [16] วิธี Upper bound (UB) Limit analysis ศึกษาโดย Murff และ Hamilton [3] และ Yu และคณะ [5] และวิธี Finite element method (FEM) ได้ทำศึกษาโดย Keawsawasvong และ Ukritchon [11] พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆนั้น ความลึกของเสาเข็มมี

ผลต่อผลเฉลยแรงวิบัติของเสาเข็มเสมอ โดยเมื่อค่า L/D เพิ่มขึ้น ค่า H/s_uL จะเพิ่มขึ้นตาม และวิธี Upper bound มีค่าผลเฉลยสูงกว่าวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ศึกษา และวิธี Limit equilibrium method จะมีค่าผลเฉลยต่ำกว่าวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ศึกษา



(a)



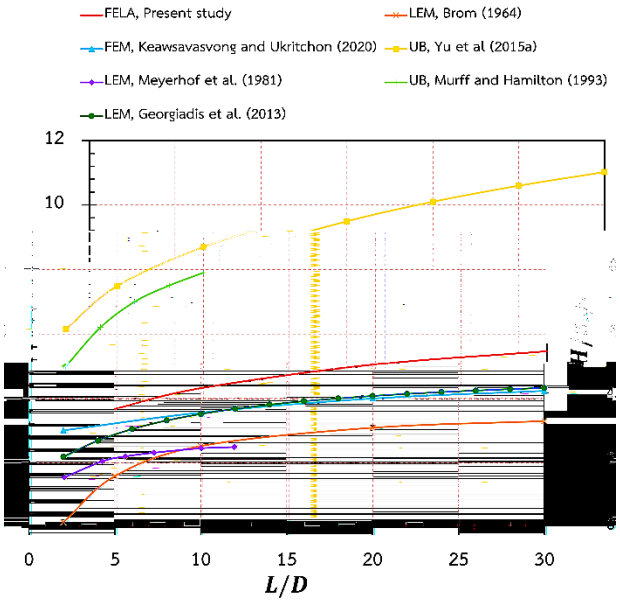
(b)

รูปที่ 3 Shear Dissipation ของเสาเข็มที่รับเฉพาะแรงในแนวราบ

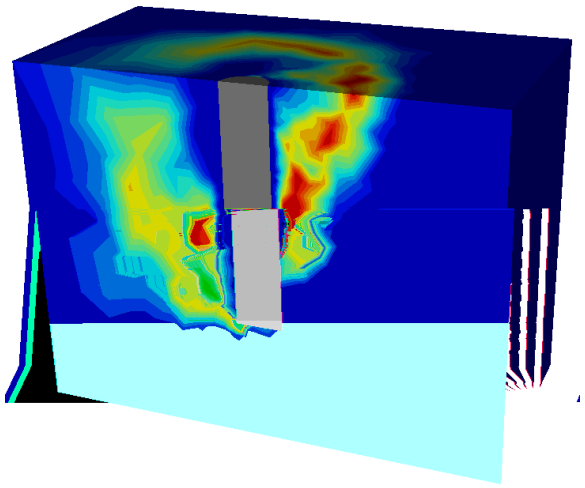
(a) L/D = 5; (b) L/D = 30

4.1.2 เสาเข็มที่รับเฉพาะโมเมนต์เพียงแรงเดียว

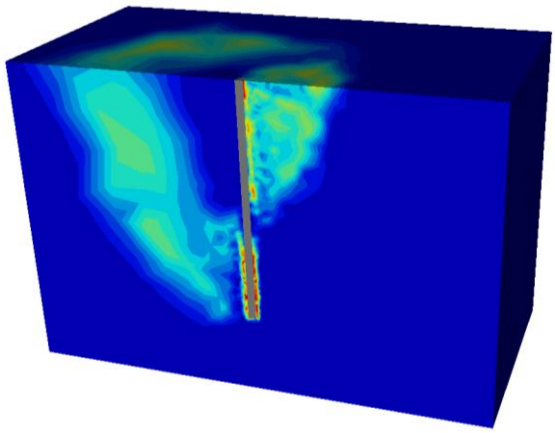
เสาเข็มที่รับเฉพาะโมเมนต์เพียงแรงเดียว (M/s_uL^2) มีลักษณะการวิบัติ Shear dissipation ของเสาเข็มแสดงดังรูปที่ 5 โดยรูปที่ 5(a) เป็นกรณี L/D = 5 และ 5(b) เป็นกรณี L/D = 30 พบว่าค่า L/D มีผลต่อความกว้างของวงขอบเขตการวิบัติ โดยเมื่อความลึกของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ขนาดความกว้างของวงขอบเขตการวิบัติของดินเหนียวในด้าน Active จะเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มที่รับเฉพาะแรงในแนวราบกับงานวิจัยในอดีต



(a)



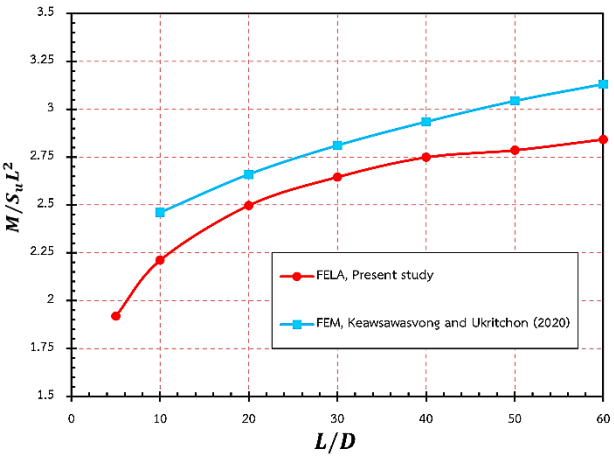
(b)

รูปที่ 5 Shear Dissipation ของเสาเข็มที่รับเฉพาะโมเมนต์

(a) L/D = 5; (b) L/D = 30

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มในดินเหนียวรับโมเมนต์เพียงแรงเดียวกับงานวิจัยในอดีตอย่างงานของ Keawsawasvong และ Ukritchon [11] พบว่าทั้งสองงานวิจัยเมื่อค่า L/D เพิ่มขึ้น ค่า M/s_uL^2 จะเพิ่มขึ้นตาม และงานวิจัยในอดีตมีค่าผลเฉลยต่ำกว่างานวิจัยที่ศึกษา อาจมาจากการแบ่งจำนวนอิลิเมนต์ที่ไม่เท่ากัน

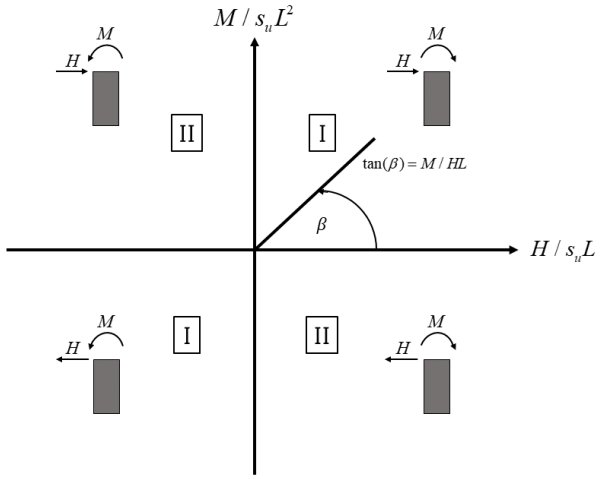
จากผลเฉลยทั้งสองกรณีจะพบว่าความลึกของเสาเข็มนั้นมีผลต่อความกว้างของขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มและผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็ม กล่าวได้ว่าเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ขนาดความกว้างของขอบเขตการวิบัติและผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มที่รับเฉพาะโมเมนต์กับงานวิจัยในอดีต

4.2 ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มวงกลมรับแรงกระทำร่วม

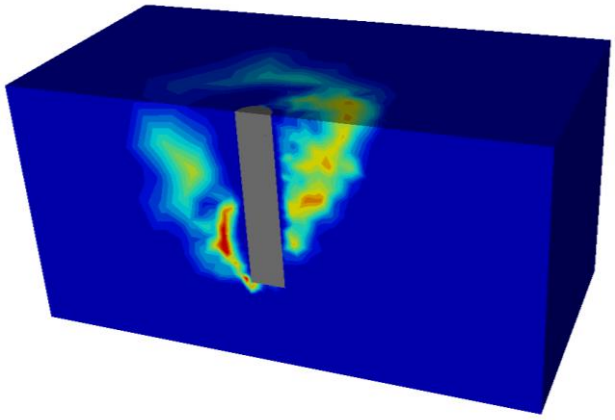
ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มวงกลมรับแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกันด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบลิมิต โดยมีค่า $\gamma_s L / s_u$ = 0 และ S_u = 1 จะถูกนำเสนอในรูปของกราฟขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ดังรูปที่ 7



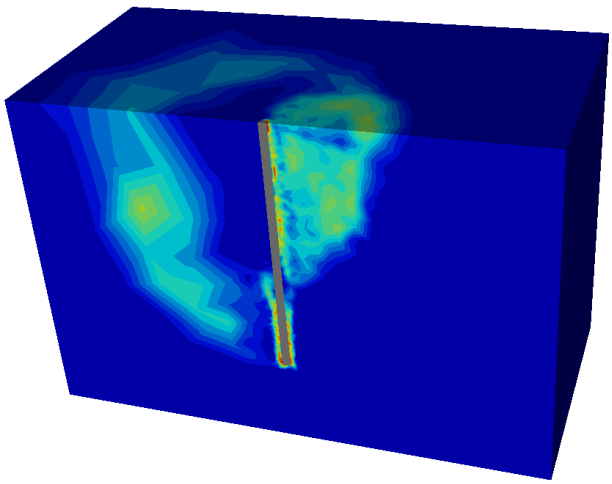
รูปที่ 7 รูปแบบแสดงขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope)

รูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H/s_uL และ M/s_uL^2 ซึ่งมีสัดส่วนโมเมนต์ต่อแรงในแนวราบคือ M/HL หรือเท่ากับ $\tan(\beta)$ โดย β คือมุมระหว่างแรงกระทำในแนวดิ่งและโมเมนต์ โดยให้ควอดรันต์ 1 เป็นควอดรันต์ที่แรงกระทำร่วมกันมีทิศไปทางเดียวกัน และควอดรันต์ 2 เป็นควอดรันต์ที่แรงกระทำร่วมกันมีทิศไปทางตรงข้ามกัน

จากการวิเคราะห์เสาเข็มวงกลมในดินเหนียวที่รับแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน ได้ผลลักษณะการวิบัติ Shear dissipation แสดงดังรูปที่ 8 โดยรูปที่ 8(a) เป็นกรณี L/D = 5 และรูปที่ 8(b) เป็นกรณี L/D = 30 จะพบว่าเมื่อความลึกของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ความกว้างของวงขอบเขตการวิบัติด้าน Active จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงกระทำเพียงแรงเดียว



(a)

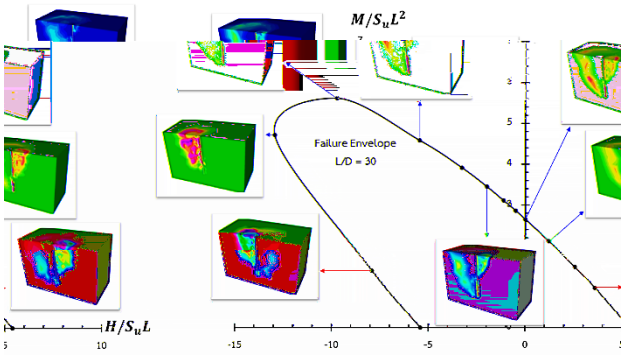


(b)

รูปที่ 8 Shear Dissipation ของเสาเข็มที่รับแรงในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน (a) L/D = 5; (b) L/D = 30

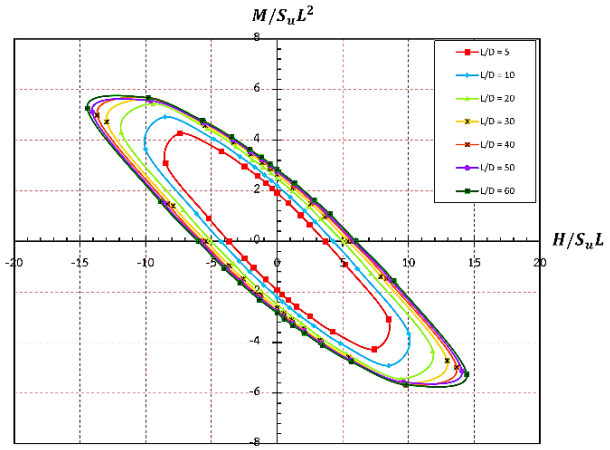
รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างกลไกการวิบัติบนเส้นขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน โดยแสดง Shear dissipation ที่ตำแหน่ง β = 0, 30, 90, 120, 140, 150, 160

และ 170 องศา ตัวอย่างที่แสดงคือขอบเขตการวิบัติของกรณี L/D = 30 พบว่ากรณี β = 0-150 องศา มีลักษณะวงขอบเขตการวิบัติที่แตกต่างจากกรณี β = 160-170 องศา เนื่องจากเสาเข็มมีการเคลื่อนที่ไปคนละทิศทาง โดยกรณี β = 0-150 องศา เสาเข็มเคลื่อนที่ไปทางฝั่งขวา แต่กรณี β = 160-170 องศา เสาเข็มมีการเคลื่อนที่ไปทางฝั่งซ้าย



รูปที่ 9 ลักษณะ Shear dissipation ของตำแหน่งต่างๆ บนขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มรับแรงกระทำแบบร่วม

รูปที่ 10 แสดงขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มในดินเหนียวรับแรงในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน โดยแสดงเส้นขอบเขตการวิบัติของกรณี L/D = 5, 10, 20, 30, 50 และ 60 พบว่าเส้นขอบเขตการวิบัติทุกเส้นมีลักษณะเหมือนวงรีที่เฉียงประมาณ $3\pi/4$ องศา นับจากแกนในแนวราบของควอดรันต์ 1 ตรงปลายวงรีของควอดรันต์ที่ 2 และ 3 มีลักษณะที่บิดเบี้ยวคล้ายปลายใบพัดกังหัน และพบว่าเมื่ออัตราส่วน L/D เพิ่มขึ้น ขนาดวงการวิบัติจะเพิ่มขึ้นตาม และตั้งแต่กรณี L/D = 30-60 ผลเฉลยจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกรณี L/D = 5 เส้นขอบเขตการวิบัติจะมีขนาดเล็กที่สุด และเส้นขอบเขตการวิบัติที่ใหญ่ที่สุดคือกรณี L/D = 60



รูปที่ 10 ผลเฉลยขอบเขตการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียว ที่รับแรงในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสาเข็มวงกลมในดินเหนียว 2 กรณีคือ กรณีเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงเพียงแรงเดียว และกรณีเสาเข็มวงกลมในดินเหนียวรับแรงกระทำในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกัน ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบลิมิตสามมิติ

ผลเฉลยตัวแปรไร้มิติจากการศึกษาคือแรงวิบัติในแนวราบ (H) และโมเมนต์ (M) ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรดังนี้ H/s_uL และ M/s_uL^2 และได้นำผลเฉลยจากการวิเคราะห์เสาเข็มที่รับแรงเพียงแรงเดียวมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยของงานวิจัยในอดีตหลายๆงานที่ใช้วิธีวิเคราะห์ที่ต่างกัน พบว่าผลเฉลยการวิบัติทั้งกรณีรับแรงในแนวราบเพียงแรงเดียว และกรณีรับโมเมนต์เพียงแรงเดียว มีลักษณะเส้นการวิบัติที่คล้ายกัน แต่ค่าไม่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้วิธีวิเคราะห์ที่ต่างกัน และได้นำผลเฉลยกรณีรับแรงในแนวราบและโมเมนต์ร่วมกันนำเสนอเป็นรูปแบบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H/s_uL และ M/s_uL^2

จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนระหว่างความลึกและความกว้างของเสาเข็มวงกลม (L/D) มีผลต่อขอบเขตการวิบัติและลักษณะการวิบัติของเสาเข็มวงกลมในดินเหนียว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนคนที่หนึ่งขอขอบคุณทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสเข้าศึกษาปริญญาโท และศึกษาในสิ่งที่ชอบและสนใจ รวมถึงได้ทดลองทำงานวิจัยต่างๆในระดับปริญญาโท

เอกสารอ้างอิง

[1] Blum, H. (1932). *Wirtschaftliche dalbenformen und deren berechnung. Verlag nicht ermittelbar,* pp.49-60.

[2] Broms, B. B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division,* 90(2), pp.27-63.

[3] Murff, J. D., & Hamilton, J. M. (1993). P-ultimate for undrained analysis of laterally loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering,* 119(1), pp.91-107.

[4] Klar, A., & Randolph, M. F. (2008). Upper-bound and load–displacement solutions for laterally loaded piles in clays based on energy minimisation. *Géotechnique,* 58(10), pp.815-820.

[5] Yu, J., Huang, M., & Zhang, C. (2015). Three-dimensional upper-bound analysis for ultimate bearing capacity of laterally loaded rigid pile in undrained clay. *Canadian Geotechnical Journal,* 52(11), pp.1775-1790.

[6] Chaudhry, A. R. (1994). *Static pile-soil-pile interaction in offshore pile groups.* Ph.D. dissertation, University of Oxford, England.

[7] Pradhan, D. L. (2012). *Development of py curves for monopiles in clay using finite element model Plaxis 3D Foundation.* Master's thesis, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norway.

[8] Mardfekri, M., Gardoni, P., & Roesset, J. M. (2013). Modeling laterally loaded single piles accounting for nonlinear soil-pile interactions. *Journal of Engineering 2013,* pp.1-7.

[9] Keawsawasvong, S., & Ukritchon, B. (2016). Ultimate lateral capacity of two-dimensional plane strain rectangular pile in clay. *Geomechanics and Engineering,* 11(2), pp.235-252.

[10] Keawsawasvong, S., & Ukritchon, B. (2017). Undrained lateral capacity of I-shaped concrete piles. *Songklanakarin Journal of Science & Technology,* 39(6), pp.751-758.

[11] Keawsawasvong, S., & Ukritchon, B. (2020). Failure modes of laterally loaded piles under combined horizontal load and moment considering overburden stress factors. *Geotechnical and Geological Engineering,* 38, pp.4253-4267.

[12] Graine, N., Hjiaj, M., & Krabbenhoft, K. (2021). 3D failure envelope of a rigid pile embedded in a cohesive soil using finite element limit analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* 45(2), pp.265-290.

[13] Izadi, A., & Jamshidi Chenari, R. (2021). Three-dimensional finite-element lower bound solutions for lateral limit load of piles embedded in Cross-Anisotropic Clay Deposits. International *Journal of Geomechanics,* 21(12), 04021234.

[14] Izadi, A., & Chenari, R. J. (2023). Combined load bearing capacity of rigid piles embedded in a cross-anisotropic clay deposit using 3D finite element lower bound. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 15(3), pp.717-737.

[15] Meyerhof, G. G., Mathur, S. K., & Valsangkar, A. J. (1981). Lateral resistance and deflection of rigid walls and piles in layered soils. *Canadian Geotechnical Journal,* 18(2), pp.159-170.

[16] Georgiadis, K., Georgiadis, M., & Anagnostopoulos, C. (2013). Lateral bearing capacity of rigid piles near clay slopes. *Soils and Foundations,* 53(1), pp.144-154.