

กำลังสภาพไม่ระบายน้ำของฐานรากต่อเนื่องฟังในดินที่รับแรงกระทำทั่วไป

Undrained Capacity of Embedded Strip Footings Subjected to a General Loading

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์^{1)*} และ บุญชัย อุกฤษณ์²⁾

Suraparb Keawsawasvong^{1)*} and Boonchai Ukrithon²

¹⁾นิสิตปริญญาโทและผู้ช่วยสอนประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²⁾รองศาสตราจารย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* Corresponding author : suraparb@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หากการวินิจฉัยแรงกระทำแนวราบ และ โมเมนต์ร่วมกันของฐานรากต่อเนื่องฟังในดินเหนียว วิธีไฟฟ้าในตัวอิเล็กทรอนิกส์แบบบานปลาย ใช้เคราะห์การวินิจฉัยปัญหานี้ ฐานรากต่อเนื่องมีความลึก (D) มีความกว้าง (B) และความหนาที่ฐานและตอนม่อเท่ากัน 0.2D และ 0.2B ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอิเล็กทรอนิกส์ ดินเหนียวถูกจำลองเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ ฐานรากถูกจำลองเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอิลาสติก ซึ่งส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างพื้นที่ที่ติดต่อ 0.67 และเป็นแบบไม่เกิดแรงดึง ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติของแรงกระทำแนวราบด้วยบีติ แรงกระทำแนวราบวินิจฉัย และ โมเมนต์ graf สามมิติของความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างแรงสองแรงและ โมเมนต์ถูกนำเสนอในบทความนี้

คำสำคัญ : ระบบวินิจฉัย ดัชนีเลข แรงงานความเครียด ไฟฟ้าในตัวอิเล็กทรอนิกส์ ฐานรากต่อเนื่อง

Abstract

This paper presents failure of combined vertical load, horizontal load and moment of embedded strip footings in clay. The two dimensional plane strain finite element is employed to determine stability of this problem. The strip footing has footing depth (D), width (B), where its thickness and pier are equal to 0.2D and 0.2B respectively. For finite element analyses, the clay is modelled as volume element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The strip footing is modelled as volume element with elastic material. Soil-structure interface are used around the embedded footing with the conditions of practical surface. Adhesion factor between clay and footing is 0.67 and there is no tension at contacted surfaces between soil and structure. The results of analyses are presented in terms of normalized parameter of vertical load, horizontal load and moment. 3D graphical representation of two forces and moment is also presented in the paper.

Keywords : Numerical analysis, Plane strain, Finite element, Strip footing

1. บทนำ

ฐานรากต่อเนื่องฝังในดินเป็นฐานรากที่นิยมก่อสร้าง เป็นอย่างมากตั้งแต่ติดปีจุบัน เนื่องจากสามารถรับแรงแบนกทาน (Bearing Capacity) หรือแรงกระทำในแนวตั้ง ได้ดี ผู้ที่เสนอสมการกำลังแบนกทานของดินคนแรกคือ Terzaghi (1967) [1] ซึ่งได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาด้านปฐพีกอกศาสตร์ ต่อมาได้มีหนังสือวิเคราะห์ฐานรากเกิดขึ้นมากมาย หนังสือเหล่านี้ได้เสนอวิธีการคำนวนฐานรากต่อเนื่องฝังในดิน เช่น หนังสือของ Das (1990) [2] Salgado (2008) [3] และ Bowles (2001) [4] อายุ่งไว้ก็ตาม หนังสือส่วนใหญ่นำเสนอ แค่เพียงการหาผลเฉลยของแรงวิบัติในแนวตั้งหรืออิเล็กทรอนิกส์ ไม่มีการคำนวณความสัมพันธ์ของแรงวิบัติในแนวราบ หรือโน้มเนตที่กระทำต่อฐานรากต่อเนื่องฝังในดิน และยัง ไม่มีการนำเสนอผลเฉลยเมื่อแรงทั้งสามกระทำร่วมกันใน ทุกทิศทางที่สามารถเกิดขึ้นได้

1.1 งานวิจัยในอดีต

Houlsby และ Puzrin (1997) [5] ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ ลิมิต (Limit Analysis) ที่อยู่ในช่วงของขอบเขตบน (Lower Bound) และขอบเขตล่าง (Upper Bound) เพื่อหาแรงวิบัติ ของฐานรากต่อเนื่อง (Strip Footing) บนดินเหนียว โดย ฐานรากมีแรงทั้งสามกระทำร่วมกัน คือ แรงแนวราบ แรง แนวตั้ง และโน้มเนต Ukritchon et al. (1998) [6], Ukritchon (1998) [7] ได้ใช้วิธีไฟน์ต่ออิมิเนนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งวิธีขอบเขตบนและวิธี ขอบเขตล่างในการหาแรงวิบัติของปัญหาเดียวกัน ต่อมา Zhan (2011) [8] ได้ใช้วิธีไฟน์ต่ออิมิเนนต์ของการวิเคราะห์ ลิมิตในการวิเคราะห์หาแรงวิบัติกระทำร่วมกันบนฐานราก ต่อเนื่องที่วางอยู่บนดินเหนียวสองชั้นที่มีค่ากำลังรับแรง เดือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) แตกต่างกัน แต่งานวิจัยของทั้ง สามเป็นฐานรากต่อเนื่องที่วางอยู่บนผิวดิน ไม่ใช่ฐานราก ต่อเนื่องฝังในดินซึ่งพบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ

ปัญหาสำเร็จในดิน (Embedded Wall) ที่รับแรง กระทำร่วมกันทั้งแรงแนวราบและโน้มเนต ที่ได้มีการหา ผลเฉลยของการวิบัติไว้ในงานวิจัยของ Ukritchon (1998) [7] และ Keawsawasvong และ Ukritchon (2013) [9] โดย Ukritchon (1998) [7] ได้ใช้วิธีไฟน์ต่ออิมิเนนต์ของการ

วิเคราะห์ลิมิต ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่าง หาผลเฉลย แรงวิบัติที่กระทำร่วมกันของปัญหาสำเร็จในดิน ส่วน Keawsawasvong และ Ukritchon (2013) [9] ได้ใช้วิธีไฟ ไนต์อิมิเนนต์ในการหาผลเฉลยของปัญหาเดียวกัน

ปัญหาสาเข็มที่รับแรงกระทำร่วมกันนี้ได้มีศึกษาไว้ บ้าง เช่นงานวิจัยของ Karthigeyan (2009) [10] และ Zadeh (2011) [11] แต่เป็นการศึกษาเรื่องการเคลื่อนตัวและความ ดันดินที่กระทำต่อเสาเข็ม ผลที่ได้เป็นเพียงกรณีศึกษาของ ตัวอย่างสาเข็ม ยังไม่มีการเสนอผลเฉลยแรงวิบัติของสา เข็มในกรณีทั่วไป

ปัญหาฐานรากปล่อง (Caisson) ที่รับแรงกระทำร่วม กันนี้ได้มีศึกษาไว้ เช่น งานวิจัยของ Ukritchon (1998) [7] ได้หาแรงวิบัติที่กระทำร่วมกันบนฐานรากปล่องแบบต่อ เนื่อง (Strip Caisson) ด้วยวิธีไฟน์ต่ออิมิเนนต์ของการวิเคราะห์ ลิมิต ทั้งวิธีขอบเขตบนและวิธีขอบเขตล่าง โดยฐานรากรับ ทั้งแรงแนวราบ แรงแนวตั้ง และโน้มเนต ต่อมา Aubeny และ Murff (2001, 2003, 2005) [12], [13], [14] ได้ใช้วิธี การวิเคราะห์ลิมิตของวิธีขอบเขตบนในการวิเคราะห์หาแรง วิบัติที่เกิดจากกระทำร่วมกันบนฐานรากปล่องทรงกระบอก (Axisymmetric Caisson) โดยฐานรากรับแรงแนวตั้งและ แรงแนวราบ

ปัญหาฐานรากโครงสร้างโภกชายฝั่ง (Offshore Foundation) ที่รับแรงกระทำร่วมกันทั้งแรงแนวราบ แรงแนวตั้ง และโน้มเนต ที่ถูกหาผลเฉลยไว้ เช่น งานวิจัยของ Martin (1994) [15] ซึ่งฐานรากของโครงสร้างชนิดนี้จะมีลักษณะ คล้ายกับรูปทรงสามเหลี่ยมฟังอยู่ในดินทำให้ลักษณะการ วิบัติแตกต่างจากปัญหาอื่นๆ และในปัญหาเดียวกันนี้ยัง สามารถศึกษาเพิ่มได้จากหนังสือ Offshore Geotechnical Engineering ของ Dean (2010) [16] และ Randolph (2011) [17]

จากการวิจัยต่างๆ ข้างต้นพบว่ามีการศึกษาค่อนข้าง น้อยในเรื่องการหาแรงวิบัติของปัญหาฐานรากต่อเนื่องฝัง (Embedded Strip Footing) ในดินเหนียวที่มีแรงกระทำแนวนอน แรงกระทำแนวราบ และโน้มเนตร่วมกัน งานวิจัยนี้นำ เสนอผลเฉลยของฐานรากต่อเนื่องฝังในดินเหนียว รวมไป ถึงพื้นผิวสามมิติของการวิบัติของแรงกระทำร่วมกันทั้งสาม แรงด้วยวิธีไฟน์ต่ออิมิเนนต์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาผลเฉลยการวิบัติของฐานรากต่อเนื่องฝังในดินเหนียว ซึ่งรับแรงกระทำแนวตั้ง แรงกระทำแนวนอน และไมมีแนวตั้งร่วมกัน เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟฟ้าในตัวอิเล็กทรอนิกส์ Plaxis 2D โดย Brinkgreve et al. (2002, 2007) [18], [19] ในการจำลองและวิเคราะห์ผลเฉลยของปัญหา

2.1 แบบจำลองของดินเหนียว

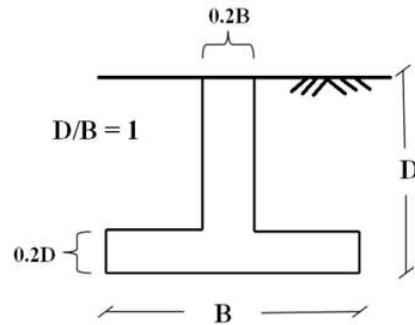
การวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอิเล็กทรอนิกส์จำลองให้ดินเหนียวเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบ Linear Elastic Perfectly Plastic ที่มีการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์โดยมีตัวแปรแสดงคุณสมบัติวัสดุได้แก่ อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (E_s) = 500 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 0 นูนขยายตัวคงปริมาตร, (Ψ) = 0 หน่วยน้ำหนักของดินเหนียว (γ) อัตราส่วนของปื้นช่อง (v) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรดังที่แสดงในรูปที่ 2

2.2 แบบจำลองของฐานราก

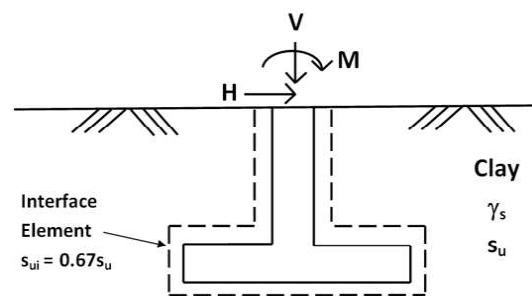
ฐานรากต่อเนื่องถูกจำลองเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบปริมาตรแบบ Linear Elastic โดยมีตัวแปรแสดงคุณสมบัติวัสดุได้แก่ อัตราส่วนของปื้นช่อง (v) = 0.21 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (γ_c) โมดูลัสของยัง (E) = 2.545×10^7 kPa ฐานรากมีอัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง (D/B) = 1 และมีความหนาที่ฐานและตอนอ่อนท่อกัน 0.2D และ 0.2B ตามลำดับ โดยรายละเอียดทั้งหมดแสดงอยู่ในรูปที่ 1 และ 2

2.3 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างฐานรากและดินเหนียว

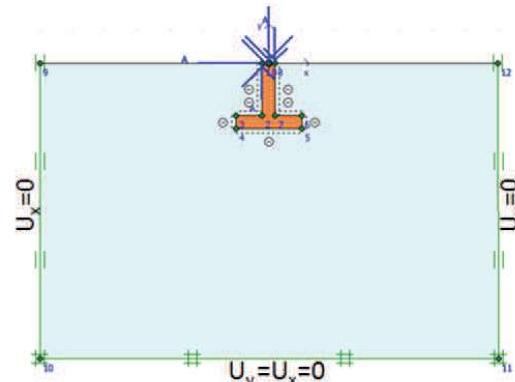
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินเหนียวและฐานรากกำหนดให้เป็นค่าแฟกเตอร์การขัดเคือง = 0.67 กล่าวคือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของชิ้นส่วนเชื่อมต่อ, $s_{ui} = 0.67 s_u$ โดย s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างฐานรากและดินเหนียว งานวิจัยนี้กำหนดให้ชิ้นส่วนเชื่อมต่อเป็นการเชื่อมต่อแบบไม่เกิดแรงดึง (No Tension) ดังที่



รูปที่ 1 สัดส่วนแบบจำลองฐานรากต่อเนื่องฝังในดิน



รูปที่ 2 ปัญหาแบบจำลองฐานรากต่อเนื่องฝังในดิน



รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากด้วยโปรแกรม Plaxis

แสดงในรูปที่ 2

2.4 เสื่อนในการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขต

ขอบด้านของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ โดยรายละเอียดทั้งหมดแสดงอยู่ในรูปที่ 3

2.5 โครงข่ายไฟไนต์อิลิเมนต์

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ชั้นส่วนดินและฐานรากเป็นชั้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และความเด่นภายในชั้นส่วน 12 จุด (Stress Points) ชั้นส่วนเชื่อมต่อกัน 10 จุดต่อ และความเด่นภายในชั้นส่วน 5 จุด การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชั้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 4

2.6 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรป้อนเข้าของการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์มีดังนี้

1. อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง (D/B) = 1
2. อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตต่อหน่วยน้ำหนักของดินเหนียว (γ_c/γ_s) = 1.2
3. อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวคูณด้วยความลึกต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระนาบหน้าของดินเหนียว ($\gamma_s D/s_u$) = 1

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์คือ

1. แรงวิบัติแนวตั้ง (V) โดยแบ่งเป็น

- แรงวิบัติแนวตั้งแบบกดลง (V มีค่าเป็นบวก)
- แรงวิบัติแนวตั้งแบบดึงขึ้น (V มีค่าเป็นลบ)

2. แรงวิบัติแนวราบ (H)

3. โมเมนต์วิบัติ (M)

ซึ่งทั้งหมดคืออยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$1. V/s_u B$$

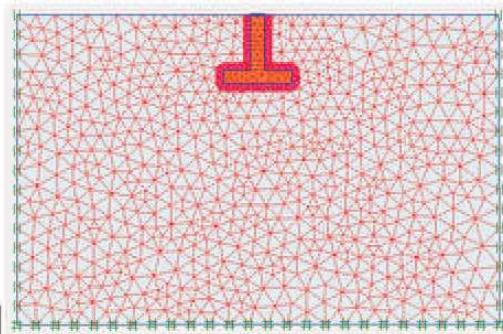
$$2. H/s_u B$$

$$3. M/s_u B^2$$

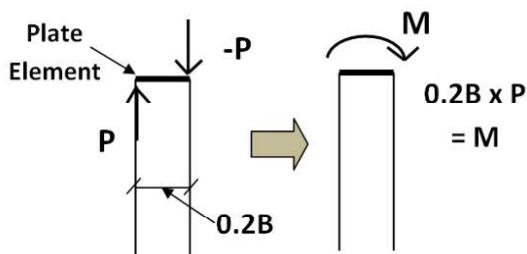
สำหรับโมเมนต์ผู้เขียนได้ใช้วิธีใส่แรงคู่ค่วงไว้ที่ปลายบนสุดด้านซ้ายและขวาของฐานราก โดยตำแหน่งบนสุดของฐานรากมีชั้นส่วนแบบแผ่น (Plate Element) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) เมื่อแรงคู่ค่วงพึ่งสองแรงกระทำกันแผ่นแข็งเกร็ง แรงทั้งสองจะถูกโอนถ่ายให้มาอยู่ในรูปของโมเมนต์ดังที่แสดงในรูปที่ 5

3. ผลการวิเคราะห์

การตรวจสอบตัวแปรไร้มิติจากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ของปัญหาฐานรากต่อเนื่องฟังก์ชันเด่นในดินแสดงใน



รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงข่ายไฟไนต์อิลิเมนต์



รูปที่ 5 การใส่โมเมนต์ในโปรแกรม Plaxis

ตารางที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ตัวแปรไร้มิติ $D/B = 1$, $\gamma_c/\gamma_s = 1.2$ และ $\gamma_s D/s_u = 1$ โดยตัวแปรไร้มิติทั้งสามตัวมีค่าคงที่ตลอดการวิเคราะห์

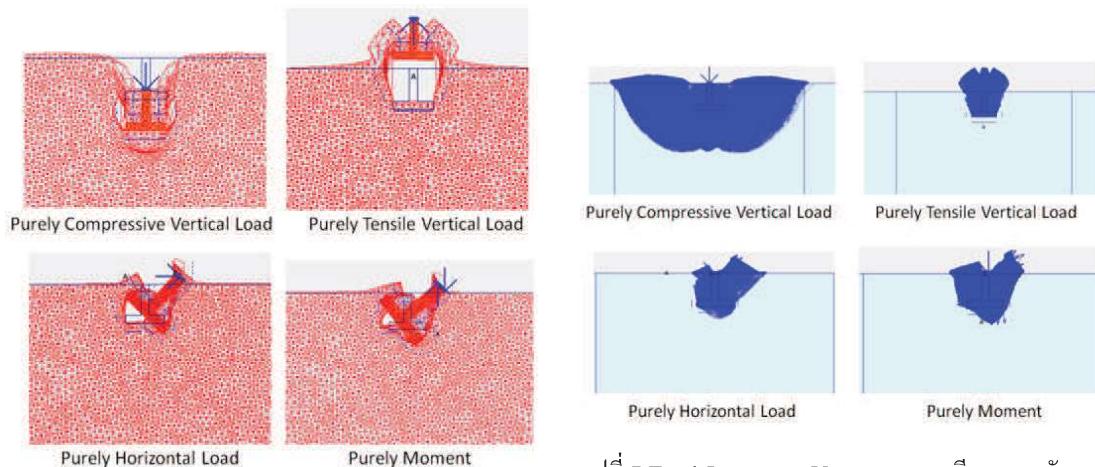
จากการที่ 1 คู่ของตัวอย่าง No. 1 และ No. 2 มีค่า D , B , s_u ที่ต่างกัน แต่มีตัวแปรไร้มิติ D/B , γ_c/γ_s และ $\gamma_s D/s_u$ ที่เท่ากัน ถึงแม้ว่าแรงวิบัติในแนวตั้งแบบกดลงมีค่าแตกต่างกัน แต่ผลเฉลยตัวแปรไร้มิติ $V/s_u B$ มีค่าเท่ากัน นอกเหนือจากนี้ คู่ตัวอย่าง No.3 - No.4 และ No.5 - No.6 ก็สามารถนับชี้ได้ว่าผลเฉลยตัวแปรไร้มิติ $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ มีค่าเท่ากันเมื่อ D/B , γ_c/γ_s และ $\gamma_s D/s_u$ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแรงวิบัติของปัญหาเป็นฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติสามตัวคือ D/B , γ_c/γ_s และ $\gamma_s D/s_u$

รูปที่ 6-9 แสดงตัวอย่างการวิบัติ (Failure Mechanism) ของฐานรากต่อเนื่องฟังก์ชันเด่นจากวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ ผลการวิบัติประกอบด้วย Deformed Mesh, Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่าง 4 กรณีคือ

1. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวตั้งแบบกดลง (V มีค่าเป็นบวก) กระทำเพียงอย่างเดียว

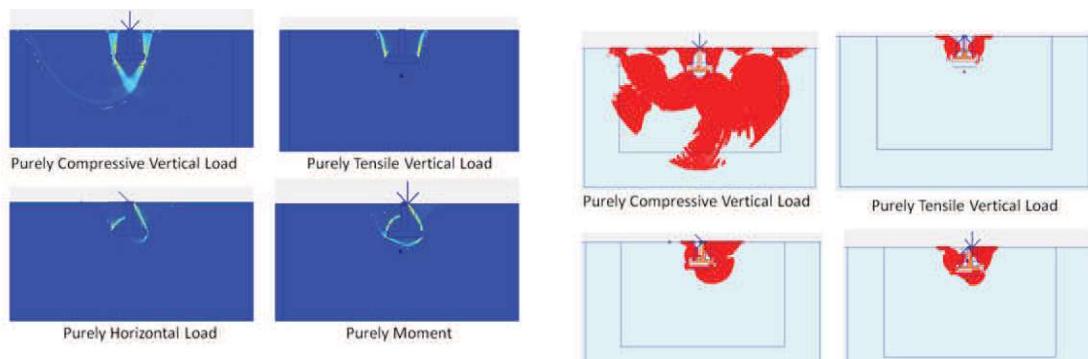
ตารางที่ 1 การตรวจสอบความเป็นเอกลักษณ์ของตัวแปรไร้มิติ

No	D (m)	B (m)	γ_c (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	s_u (kPa)	V	H	M	D/B (-)	γ_c/γ_s (-)	$\gamma_s D/s_u$ (-)	V/s B (-)	H/s B (-)	M/s B ² (-)
1	2	2	24	20	40	698.04	0	0	1	1.2	1	8.73	0	0
2	4	4	24	20	80	2793.6	0	0	1	1.2	1	8.73	0	0
3	2	2	24	20	40	0	182.34	0	1	1.2	1	0	2.28	0
4	4	4	24	20	80	0	730.24	0	1	1.2	1	0	2.28	0
5	2	2	24	20	40	0	0	313.12	1	1.2	1	0	0	1.96
6	4	4	24	20	80	0	0	2509.8	1	1.2	1	0	0	1.96



รูปที่ 6 Deformed Mesh ของกรณีฐานรากรับแรงหรือโมเมนต์เพียงอย่างเดียว

รูปที่ 7 Total Increment Vector ของกรณีฐานรากรับแรงหรือโมเมนต์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 8 Incremental Shear Strain Contour ของกรณีฐานรากรับแรงหรือโมเมนต์เพียงอย่างเดียว

รูปที่ 9 Plastic Point ของกรณีฐานรากรับแรงหรือโมเมนต์เพียงอย่างเดียว

2. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวคิ่งแบบดึง (V มีค่าเป็นลบ)
ขึ้นกระทำเพียงอย่างเดียว

3. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวราบ (H) กระทำเพียงอย่างเดียว

4. กรณีที่ฐานรากมีโมเมนต์ (M) กระทำเพียงอย่างเดียว
กรณีที่ฐานรากรับโมเมนต์หรือแรงแนวราบเพียงอย่างเดียว จะมีลักษณะการวินบิตที่ใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีที่ฐานรากรับแรงแนวคิ่งแบบดึงบดคล่องและแนวคิ่งขึ้นจะแตกต่างกันตรงที่บดคล่องจะมีพื้นที่การวินบิตมากกว่าแนวคิ่งขึ้น

ผลเฉลยของหัวส่วนในรูปของตัวแปรไรรัมิตนิค่าดังนี้

$$1. V_{\max}/s_u B = 8.73$$

$$2. V_{\min}/s_u B = -2.91$$

$$3. H/s_u B = 2.28$$

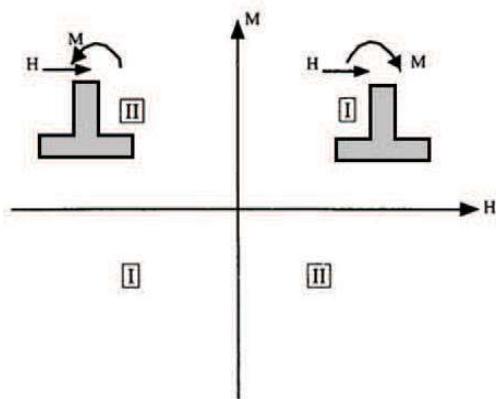
$$4. M/s_u B^2 = 1.96$$

ผลของการวิเคราะห์จะถูกนำมาเสนอในรูปของกราฟขอบเขตการวินบิต (Failure Envelope) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกคือแรงแนวราบและโมเมนต์ดันฐานรากไปในทิศทางเดียวกัน (I) อยู่ในความครันต์ 1 และ 3 กรณีที่สองคือแรงแนวราบและโมเมนต์ดันฐานรากไปในทิศทางที่ส่วนกัน (II) อยู่ในความครันต์ 2 และ 4 ดังรูปที่ 10

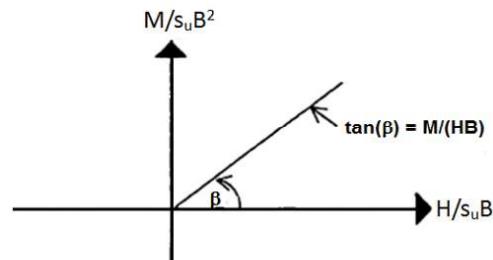
รูปที่ 10 กราฟขอบเขตการวินบิตพื้นที่ระหว่างตัวแปรไรรัมิตของแรงแนวราบ $H/s_u B$ และตัวแปรไรรัมิตของโมเมนต์ $M/s_u B^2$ โดยมีสัดส่วนโมเมนต์ต่อแรงแนวราบคือ M/HB ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\tan(\beta)$ โดย บีโอมุนท์วัดจากแกนในแนวราบของความครันต์ 1 หวานเข้มนาฬิกา ดังรูปที่ 11 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า $\beta = 0, 15, 30, 60, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170$ และ 180 องศา

รูปที่ 12 แสดงเส้นขอบเขตการวินบิตของกรณีรับแรงกระทำแนวคิ่งแบบดึงอัด ทุกเส้นมีลักษณะคล้ายๆ กันที่มุ่งไปประมาณ $3\pi/4$ จากแกนในแนวราบของความครันต์ 1 และเป็นวงรีแบบสมมาตร ตรงปลายสุดของวงรีทั้งสองฝั่ง เป็นลักษณะที่บิดเบี้ยวเล็กน้อย วงรีแต่ละวงจะมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่า V/V_{\max} ค่า V/V_{\max} คือกรณีกรณีที่ฐานรากมีแรงวินบิตในแนวคิ่งแบบบดคล่องกระทำเพียงอย่างเดียว วงรีที่ใหญ่ที่สุดคือวงรีของกรณี $V/V_{\max} = 0.2$ ตามด้วย $V/V_{\max} = 0.4, 0, 0.6, 0.8$ วงที่เล็กที่สุดคือกรณี $V/V_{\max} = 0.8$

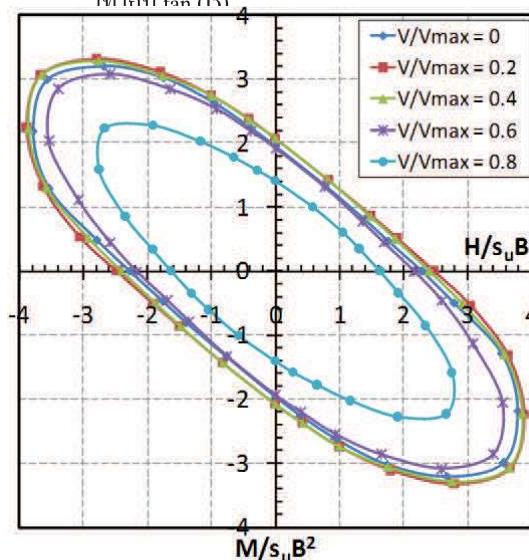
รูปที่ 13 แสดงเส้นขอบเขตการวินบิตกรณีแรงกระทำแนวคิ่งเป็นแรงดึง ทุกเส้นมีลักษณะคล้ายๆ กันที่ใหม่อนรูปที่



รูปที่ 10 กราฟขอบเขตการวินบิต

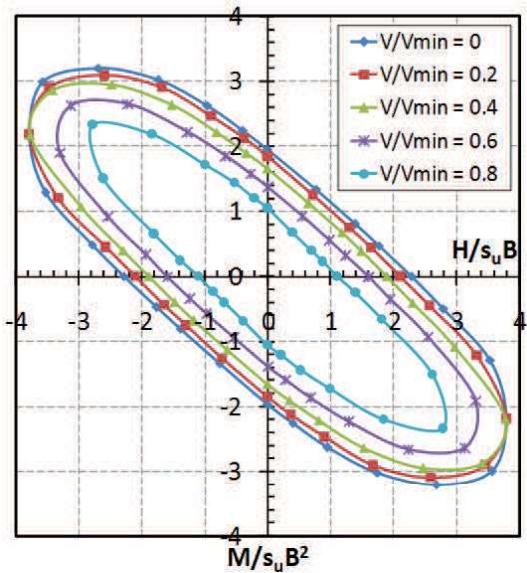


รูปที่ 11 สัดส่วนโมเมนต์ต่อแรงแนวราบ M/HB ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\tan(\beta)$



รูปที่ 12 เส้นขอบเขตการวินบิตกรณีแรงอัด

11 วงรีแต่ละวงจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อค่า V/V_{\min} ลดลง โดยค่า V_{\min} คือกรณีกรณีที่ฐานรากมีแรงวินบิตในแนวคิ่งแบบดึง แรงดึงนี้กระทำเพียงอย่างเดียว วงรีที่ใหญ่ที่สุดคือวงรีของ

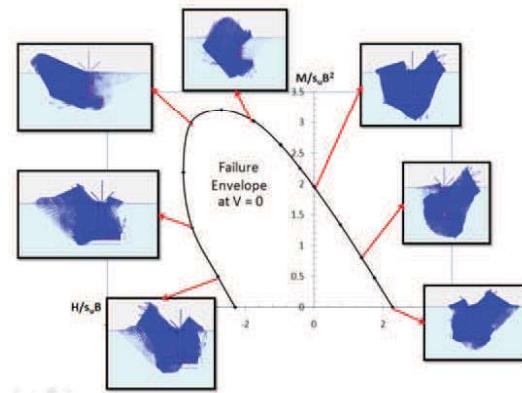


รูปที่ 13 เส้นขอบเขตการวิบัติกรณีแรงดึง

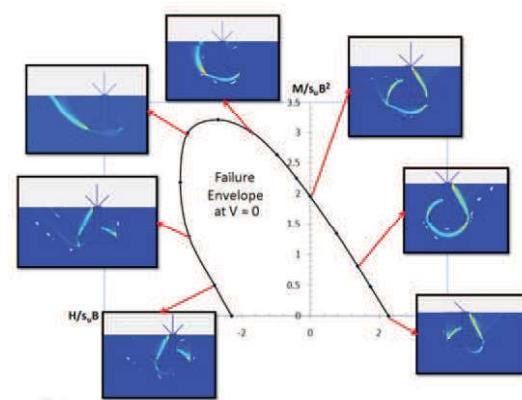
กรณี $V/V_{min} = 0$ ตามด้วย $V/V_{min} = 0.2, 0.4, 0.6$ วงที่เลือกที่สุดคือกรณี $V/V_{min} = 0.8$

รูปที่ 14-16 แสดงตัวอย่างกลไกการวินาศ (Failure Mechanism) บนเส้นกราฟของเขตการวินพิธของฐานรากต่อเนื่องฝังในดินหนีดูดโดยฐานรากรับแรงแนวราบและโน้มนต์โดยแสดง Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point ของตำแหน่งต่างๆที่ $\theta = 0^\circ, 160^\circ, 140^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 30^\circ$, และ 170° องศา ตัวอย่างที่ได้แสดงคือกราฟของเขตการวินพิธของกรณีที่มี $V = 0$

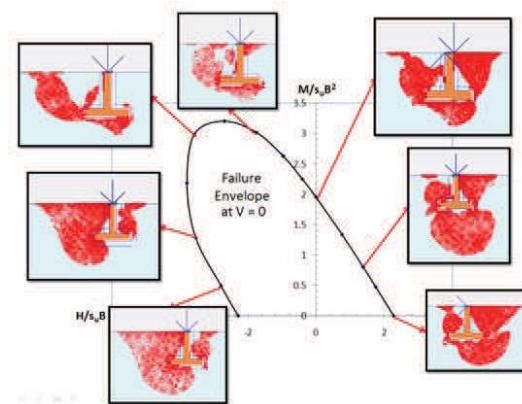
รูปที่ 17-19 แสดงผลการวินิจฉัยรากต่อเนื่องฟังในคืนหนึ่งว่าที่รับแรงแนวดึงและแรงแนวราบ หรือกรณี $0 = \square \square$ โดยแสดง Total Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point ของตำแหน่งต่างๆ ที่ $V/V_{max} = 0.4, 0.8$ และ $V/V_{min} = 0.4, 0.8$ สำหรับผลการวินิจฉัยรากต่อเนื่องฟังในคืนหนึ่งว่าที่รับแรงแนวดึงและโมเมนต์ จะมีลักษณะคล้ายกันกับกรณีรากที่รับแรงแนวดึงและแรงแนวราบ ในรูปที่ 16-18 กรณีที่ $V/V_{min} = 0.8$ ผลการวินิจฉัยไม่ลักษณะเป็นวงกว้างมากนัก เมื่อ $V/V_{min} = 0.4$ ผลการวินิจฉัยเริ่มขยายใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะ Plastic Point เมื่อ $V/V_{max} = 0.4$ และ 0.8 ผลการวินิจฉัยจะขยายใหญ่ขึ้นลงไปในส่วนได้ของรากต่อ ($\text{พารา}\rightarrow\text{แรงแนวบิด}$) ทำให้ผลการวินิจฉัยเป็นวงกว้างโดยเฉพาะกรณี $V/V_{max} =$



รูปที่ 14 Total Increment Vector ที่ $V=0$

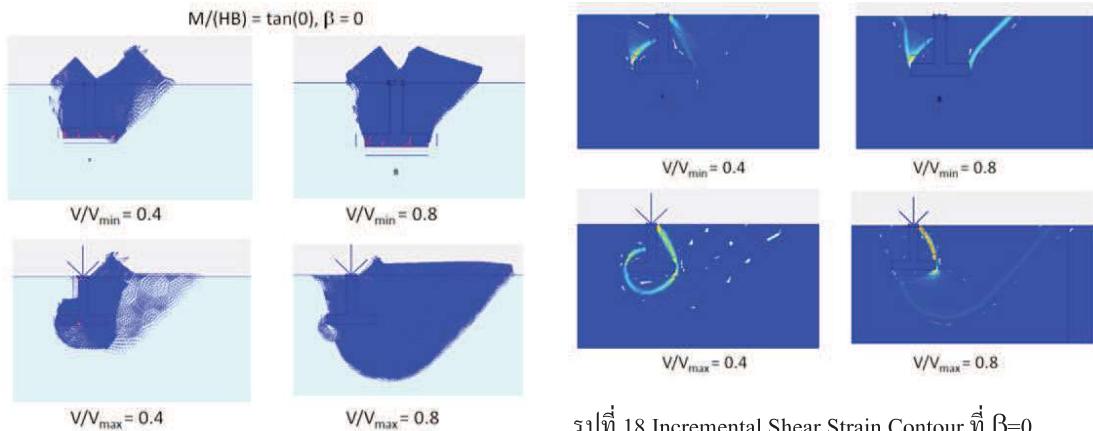


รูปที่ 15 Incremental Shear Strain Contour ที่ $V=0$

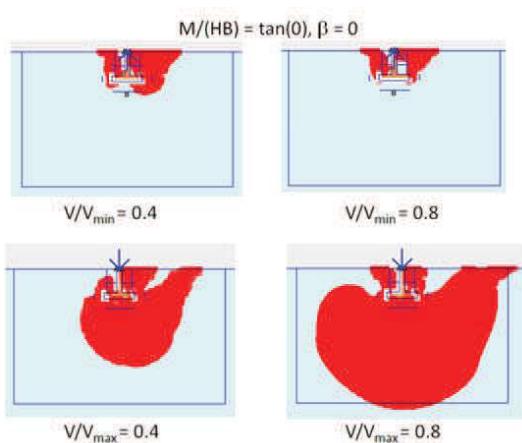


รูปที่ 16 Plastic Point ที่ $V=0$

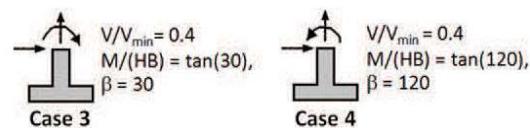
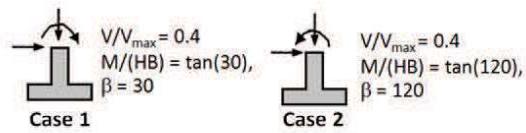
0.8 ผลการวินิจฉัยเหมือนกับกรณีที่ฐานรากรับเค้าไพ่แรง
กลดลงมากที่สุด



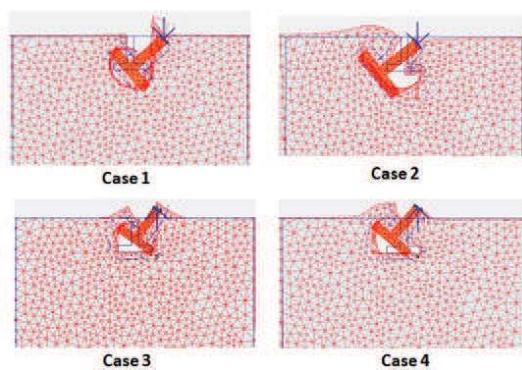
รูปที่ 17 Total Increment Vector ที่ $\beta=0$



รูปที่ 18 Incremental Shear Strain Contour ที่ $\beta=0$



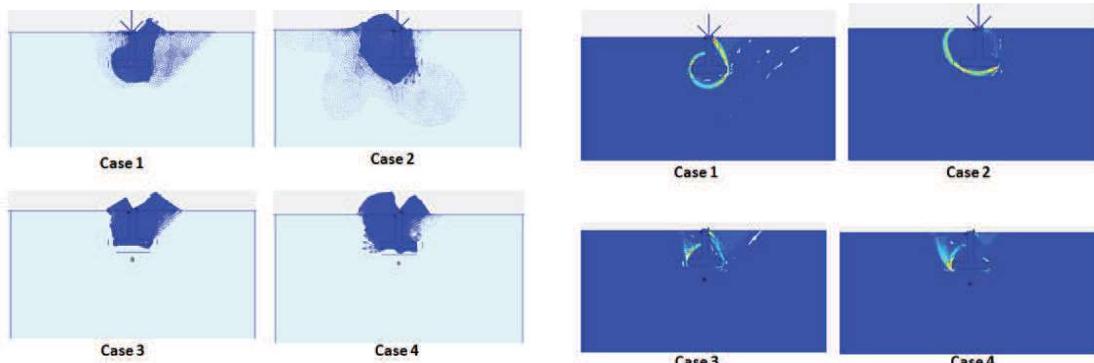
รูปที่ 20 กรณีตัวอย่างที่ฐานรากรับแรงทั้งสองแรงและไม่มีแนวต่อพื้นกัน



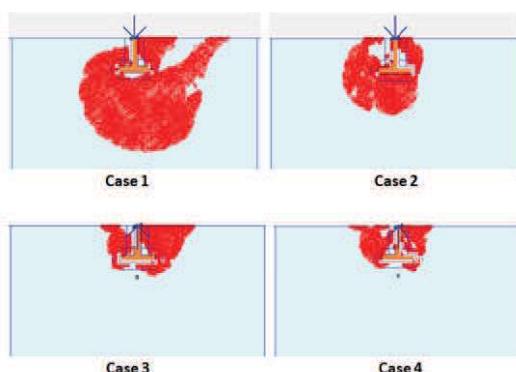
รูปที่ 21 Deformed Mesh ของฐานรากรับแรงทั้งสองแรงและไม่มีแนวต่อพื้นกัน

รูปที่ 20 แสดงกรณีตัวอย่างที่ฐานรากต่อเนื่องผึ้งในดินเหนียวรับแรงทั้งสองแรง, แรงแนวดึง และโมเมนต์พื้นกัน โดยแบ่งเป็น 4 กรณี คือการผังแบบ

1. แรงแนวดึงคงดlong และแรงแนวราบกระทำไปทิศเดียวกันกับโมเมนต์
2. แรงแนวดึงคงดlong และแรงแนวราบกระทำไปทิศทางตรงกันข้ามกับโมเมนต์
3. แรงแนวดึงดึงขึ้นและแรงแนวราบกระทำไปทิศเดียวกันกับโมเมนต์
4. แรงแนวดึงดึงขึ้นและแรงแนวราบกระทำไปทิศทางตรงกันข้ามกับโมเมนต์



รูปที่ 22 Total Increment Vector ของฐานรากรับแรงทั้งสองแรงและโมเมนต์พร้อมกัน

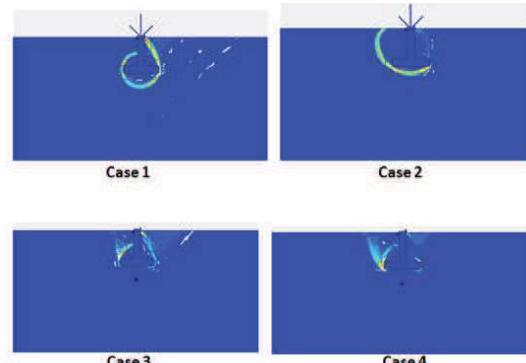


รูปที่ 24 Plastic Point ของฐานรากรับแรงทั้งสองแรงและโมเมนต์พร้อมกัน

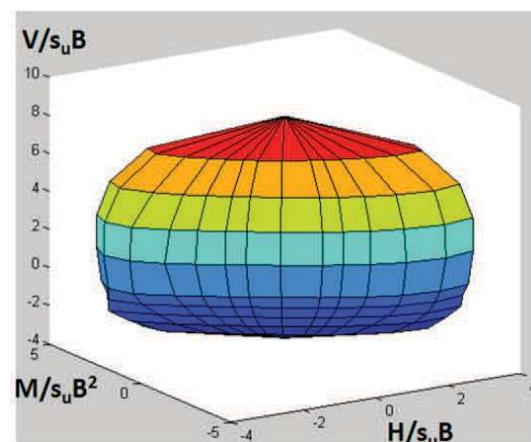
รูปที่ 21-24 แสดงผลการวิบัติของฐานรากต่อหนึ่งฟังในดินเหนียวที่รับแรงแนวดึงและแรงแนวราบ และโมเมนต์พร้อมกัน แบ่งเป็น 4 กรณีตามรายละเอียดในรูปที่ 19 โดยแบ่งเป็น Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point

รูปที่ 25-29 แสดงพื้นผิวสามมิติ (3D Surface) ระหว่าง $V/s_u B$, $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ โดย V ที่มีค่าเป็นบวกคือ กรณีฐานรากรับแรงดึงและ V มีค่าเป็นลบคือกรณีฐานรากรับแรงดึง โดยที่ $|V_{max}/s_u B| = 8.73$ และ $|V_{min}/s_u B| = 2.91$

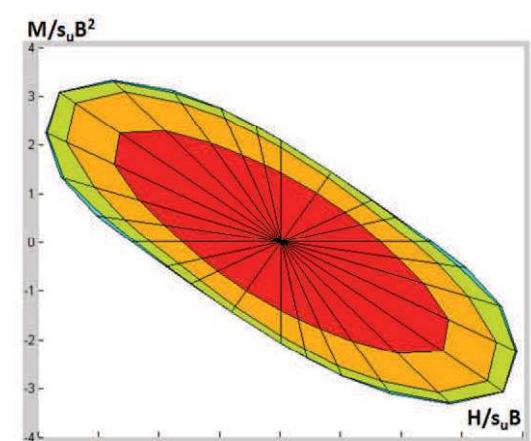
รูปที่ 25 แสดงพื้นผิวสามมิติของตัวแปร ไร้มิติ คือ $V/s_u B$, $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ รูปที่ 26-27 แสดงการพล็อตในด้านของ $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ ทั้งด้านที่ V เป็นบวกคือมุมมองด้านบน (Top View) และด้านที่ V เป็นลบคือมุมมองด้าน



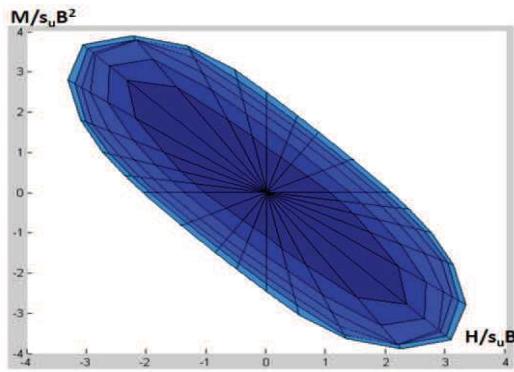
รูปที่ 23 Incremental Shear Strain Contour ของฐานรากรับแรงทั้งสองแรงและโมเมนต์พร้อมกัน



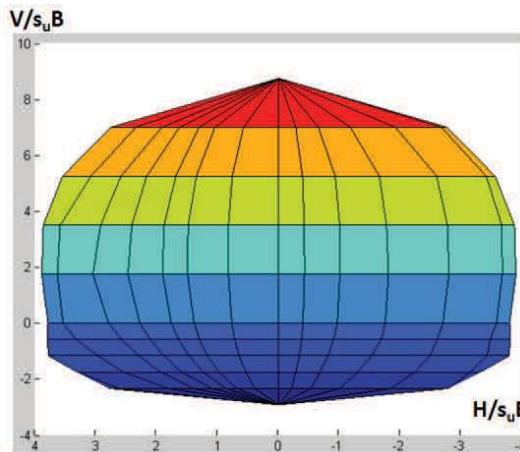
รูปที่ 25 กราฟสามมิติระหว่าง $V/s_u B$, $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$



รูปที่ 26 กราฟสามมิติระหว่าง $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ (ด้าน V เป็นบวก)



รูปที่ 27 กราฟสามมิติระหว่าง H/s_uB และ M/s_uB^2 (ด้าน V เป็นคง)

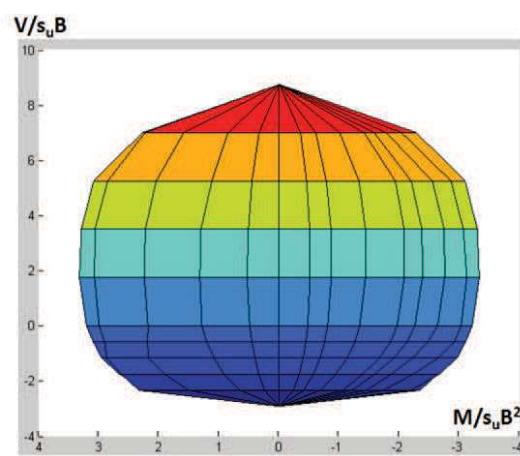


รูปที่ 28 กราฟสามมิติระหว่าง V/s_uB และ H/s_uB

ล่าง (Bottom View) ซึ่งรูปที่ 26-27 นี้มีลักษณะคล้ายกราฟในรูปที่ 12-13 แตกต่างกันตรงที่กราฟรูปที่ 12-13 เป็นการพล็อตแบบสองมิติ แต่กราฟรูปที่ 26-27 เป็นการพล็อตแบบสามมิติจากมุมมองด้านบนและด้านล่างตามลำดับ รูปที่ 28 แสดงการพล็อตในด้านของ V/s_uB และ H/s_uB คือมุมมองด้านหน้า (Front View) รูปที่ 29 แสดงการพล็อตในด้านของ V/s_uB และ M/s_uB^2 คือมุมมองด้านข้าง (Side View)

รูปพื้นผิวสามมิติเป็นพื้นผิวเรียบปิด (Closed Surface) และมีรูปร่างคล้ายรูปกลูกกักน้ำ โดยในแกน V/s_uB จะมีลักษณะแหลมทึบมากคล้ายยอดภูเขา โดยส่วนที่ $V > 0$ จะมีความแหลมมากกว่าส่วนที่ $V < 0$ สำหรับ ในด้านของ H/s_uB และ M/s_uB^2 เป็นลักษณะรูปทรงกระบอก (Ellipsoid) ที่หมุนไปประมาณ $3\pi/4$ จากแกนในแนวราวนของความดันรัตน์ 1 และเป็นวงรีแบบสมมาตร ตรงปลายสุดของวงรีทั้งสองฝั่งเป็นลักษณะที่บิดเบี้ยวเล็กน้อย

การนำรูปพื้นผิวสามมิติไปใช้งาน คือการนำแรงที่กระทำกันฐานรากมาแปลงเป็นค่าตัวแปรไร์นิติ (Input Normalized Parameter) ค่าที่ V/s_uB , H/s_uB และ M/s_uB^2 หากค่าตัวแปรไร์นิติพล็อตตอกกันอย่างในรูปพื้นผิว หมายถึงฐานรากมีความปลอดภัยและไม่วินาศ แต่หากค่าตัวแปรไร์นิติพล็อตตอกกันอย่างในรูปพื้นผิว หมายถึงฐานรากไม่มีความปลอดภัยและมีการวินิจฉัยคืบชื้น หากค่าตัวแปรไร์นิติอยู่บนพื้นผิวสามมิติใดใด ก็จะมีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) เท่ากับ 1 กราฟพล็อตค่าตัวแปรไร์นิติทั้ง 3 ค่าตอกกันอยู่ภายในพื้นผิวสามมิติ ระยะห่างจากศูนย์พื้นผิวนั่ง



รูปที่ 29 กราฟสามมิติระหว่าง V/s_uB และ M/s_uB^2

หากถึงค่าสัดส่วนความปลอดภัยของฐานราก ยิ่งห่างมากเท่าไรรากจะยิ่งมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยมากขึ้นเท่านั้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ฐานรากต่อเนื่องฟังในดินเหนียวด้วยวิธีไฟฟ้าศักดิ์ส่องมิติแบบความเครียดบนระนาบที่มีแรงกระทำแนวตั้ง แรงกระทำแนวราวน และโน้มแน่นร่วมกัน จากผลการศึกษาพบว่าการวินิจฉัยคืบชื้นทั้งสองไปป็น

1. อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง (D/B)
2. อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตต่อหน่วยน้ำหนักของดินเหนียว (γ_c/γ_s)

3. อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของดินเหนี่ยวคูณด้วยความลึกต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนี่ยว ($\gamma_s D/s_u$)

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร์นิคที่ได้จากวิธีไฟฟ้าในต่ออิเลมันต์คือ

1. แรงวิบติแนวเดียว (V) โดยแบ่งเป็น
 - แรงวิบติแนวเดียว แบบกดลง ($V > 0$)
 - แรงวิบติแนวเดียวเดียงขี้น ($V < 0$)

2. แรงวิบติแนวราบ (H)

3. โอมเมนต์ (M)

ซึ่งทั้งหมดคือในรูปของตัวแปรไร์นิคดังนี้

1. $V/s_u B$
2. $H/s_u B$
3. $M/s_u B^2$

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวอย่างการวิบติ (Failure Mechanism) ทั้ง Deformed Mesh, Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point ไปริยบเทียบระหว่าง 4 กรณีดังนี้

1. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวเดียว แบบกดลง ($V > 0$) กระทำเพียงอย่างเดียว

2. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวเดียวเดียงขี้น ($V < 0$) กระทำเพียงอย่างเดียว

3. กรณีที่ฐานรากมีแรงแนวราบ (H) กระทำเพียงอย่างเดียว

4. กรณีที่ฐานรากมีโอมเมนต์ (M) กระทำเพียงอย่างเดียว
จากผลที่ได้พบว่าผลเฉลยตัวแปรไร์นิคของกรณีที่มีแรงแนวเดียวแบบกดลงมีค่ามากกว่าที่สุด ส่วนกรณีของแรงแนวเดียวเดียงขี้นและกรณีแรงแนวราบมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีที่ฐานรากมีโอมเมนต์กระทำเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้ยังได้เปรียบเทียบตัวอย่างการวิบติเมื่อฐานรากรับแรงร่วมกันโดยแบ่งได้ดังนี้

1. ผลการวิบติเมื่อฐานรากรับแรงแนวเดียว กระแสแรงร่วมกัน

2. ผลการวิบติเมื่อฐานรากรับแรงแนวราบและโอมเมนต์ร่วมกัน

3. ผลการวิบติเมื่อฐานรากรับแรงแนวเดียว แรงแนวราบ และโอมเมนต์ร่วมกัน

ผลที่ได้พบว่าเมื่อฐานรากโคนแรกกระทำร่วมกัน ผลการวิบติ (Failure Mechanism) จะมีลักษณะร่วมกัน เช่น เมื่อเมื่อฐานรากรับแรงแนวเดียวและแรงแนวราบร่วมกัน ผลการวิบติจะมีทั้งการทรุดตัวในแนวเดียวและเอียงตัวไปในแนวราบและผลการวิบติแบบแรงแนวเดียวและโอมเมนต์เป็นไปในทำงานของเดียวกัน สำหรับเมื่อฐานรากรับแรงแนวราบและโอมเมนต์ร่วมกัน ค่าผลเฉลยหักหมัดของตัวแปรไร์นิคในทุกๆ อัตราส่วน M/HB หรือ $\tan(\beta)$ จะลักษณะจะเริ่มที่หมุนไปประมาณ $3\pi/4$ จากแกนในแนวราบของค่าอัตรานี้ 1 และเป็นวงรีแบบสมมาตร

นอกจากนี้งานวิจัยนี้นำเสนอผลเฉลยของฐานรากต่อเนื่องฟังในดินเหนี่ยวเมื่อโคนแรกกระทำร่วมกัน รวมไปถึงพื้นผิวสามมิติระหว่าง $V/s_u B$, $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ สำหรับผลการวิบติจะเป็นแบบกราฟรูปพื้นผิวสามมิติเป็นพื้นผิวรูปปิด (Closed Surface) ที่มีรูปทรงคล้ายรูปกลอร์กนี่ โดยในแกน $V/s_u B$ จะมีลักษณะเหลี่ยมมากกว่าส่วนที่ $V < 0$ และสำหรับในด้านของ $H/s_u B$ และ $M/s_u B^2$ จะเป็นลักษณะรูปทรงรี (Ellipsoid) ที่หมุนไปประมาณ $3\pi/4$ ซึ่งมีลักษณะไม่สมมาตรทั้งด้าน V เป็นบวกและ V เป็นลบ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Terzaghi K., Peck R.B. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons Inc, USA, 1967.
- [2] Das B.M., Principle of Foundation Engineering 2nd ed. PWS Kent Publishing Company, USA, 1990.
- [3] Salgado R., the Engineering of Foundation. McGraw-Hill, USA, 2008.
- [4] Bowles J. E., Foundation Analysis and Design 5th ed. McGraw-Hill, USA, 2001.
- [5] Housby G.T., Puzrin A.M., The Bearing Capacity of a Strip Footing on Clay under Combined Loading. Report No. OUEL 2144/97, 1997.
- [6] Ukritchon B., Whittle A. J. and Sloan S. W. Undrained limit analysis for combined loading of strip footings on clay. J. Geotech. Geoenviron. Div. ASCE124, No. 3, 265–276. 1998.
- [7] Ukritchon B. Application of Numerical limit analyses

- for Undrained stability problems in clay. [ScD Thesis], Massachusetts Institute of technology, USA, 1998.
- [8] Zhan Y. Undrained Bearing Capacity Behavior of Strip Footings on Two-layer Clay Soil Under Combined Loading. EJGE Vol. 16, 2011.
- [9] Keawsawasvong S., Ukritchon B. Failure Envelope of Embedded Walls in Clay Subjected to Combined Horizontal Load and Moment, Proceeding of the 6th ASEAN Civil Engineering Conference (ACEC) & 6th ASEAN Environmental Engineering Conference (AEEC), Thailand, pp. CE19-1 – CE19-12, 2013.
- [10] Karthigeyan S., Rajagopal K. Lateral Response of 2 × 2 Pilegroup under Combined Axial and Lateral Loading. IGC 2009, Guntur, INDIA, 2009.
- [11] Zadeh N.G., Kalantari B. Performance of Single Pile under Vertical and Lateral Load in Sand, Clay and Layered Soil. EJGE Vol. 16, 2011.
- [12] Aubeny C.P., Murff J.D. and Moon S.K. Lateral Undrained Resistance of Suction Caisson Anchors International Journal of Offshore and Polar Engineering Vol. 11, No. 3, September 2001
- [13] Aubeny C. P., Han S. W. and Murff J. D. Inclined load capacity of suction caissons. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 27:1235–1254, 2003.
- [14] Aubeny C.P. and Murff J.D. Simplified limit solutions for the capacity of suction anchors under undrained conditions Ocean Engineering 32. pp 864–877. 2005.
- [15] Martin C.M. Physical and Numerical Modelling of Offshore Foundations under Combine Loads, [PHD Thesis], University of Oxford, 1994.
- [16] Dean E.T.R. Offshore Geotechnical Engineering. Thomas Telford. 2010.
- [17] Randolph M. and Gourvence S. Offshore Geotechnical Engineering. Spon Press. Taylor & Francis, 2011.
- [18] Brinkgreve R.B.J., et al. PLAXIS 2D Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers. 2002.
- [19] Brinkgreve R.B.J. PLAXIS 2D Version 8.5 finite-element code for soil and rockanalyses: Complete set of manuals, R. Brinkgreve, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 2007.