

แรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียว

Ultimate Vertical Pullout Load of Planar Caisson in Clay

ศุภภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุกฤษฏชน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียว วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิตแบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหานี้ ฐานรากปล่องแบบระนาบมีความกว้าง (B) และความลึก (L) สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิต ดินเหนียวถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ ฐานรากปล่องแบบระนาบถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบแผ่นที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติก ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของดินและฐานราก แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างแรงถอนวิบัติแนวตั้ง ($P/\rho(B/2+L)^2$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (B/L) และแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) โดย ρ คืออัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่เพิ่มแบบคงที่ตามความลึก

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระนาบความเครียด ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิต ฐานรากปล่อง

Abstract

This paper presents ultimate vertical pullout load of planar caisson in clay. The two dimensional plane strain finite element limit analysis is employed to determine the stability of this problem. The planar caissons have the width (B) and the depth (L). For finite element limit analysis, the clay is modelled as the volume element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The planar caisson is modelled as the plate element with the elastic material. Soil-structure interface are used around the contacted length between caisson and clay. Adhesion factor between clay and caisson (α) is also studied in the range of 0 – 1 with increment of 0.25. The results of analyses are presented in terms of ratio of ultimate vertical pullout load ($P/\rho(B/2+L)^2$) as a function of dimensionless parameters which are the ratio of width and depth (B/L) and the adhesion factor (α), where ρ is the rate of linear increase in undrained shear strength with depth.

Keywords: Numerical Analysis, Plane Strain, Finite Element Limit Analysis, Planar Caisson

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ฐานรากปล่องแบบระนาบ (Planar Caisson) เป็นฐานรากแบบเหล็กที่ถูกปล่อยให้จมลงในดินด้วยน้ำหนักตัวมันเอง ฐานรากนี้นิยมถูกใช้เป็นฐานรากของโครงสร้างขนาดใหญ่ หรือโครงสร้างพวกถังเก็บน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งใช้วิธีขุดแบบธรรมดาไม่ได้ ฐานรากลักษณะนี้รับแรงจะสามารถรับแรงได้มากกว่าฐานรากแบบเสาเข็มรับแรง โดยมากโครงสร้างชนิดนี้มักจะถูกก่อสร้างใกล้ชายฝั่งทะเล เพราะเนื่องจากปัญหาเรื่องแรงดันน้ำจึงทำให้การสร้างฐานรากชนิดอื่น ๆ เป็นไปด้วยความยากลำบาก รายละเอียดต่างๆสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากหนังสือปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก โดย Bowles (2001) [1]

นอกจากฐานรากนี้จะรับแรงจากโครงสร้างได้มากแล้ว แรงถอนออกจากดินของฐานรากชนิดนี้ก็เป็นเรื่องสำคัญที่มีนักวิจัยในอดีตมากมายศึกษากัน เช่นงานวิจัยของ Cauble (1996) [2] ได้ศึกษาผลการทดลองของแบบจำลองฐานรากปล่องในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็งานวิจัยแรกๆที่ได้มีการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของฐานรากปล่อง สำหรับงานวิจัยของฐานรากปล่องด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ยุคต้นๆก็ได้มีนักวิจัยหลายท่านเสนอไว้บ้าง เช่น Clukey และ Morrison (1993) [3] และ Geer (1996) [4] โดยทั้งสามได้ใช้วิธีที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากปล่องแบบระนาบ เช่น วิธีสมดุลลิมิต (Limit Equilibrium) และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element)

ต่อมา Ukritchon (1998) [5] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) สองมิติบนระนาบความเครียด (2D Plane Stain) ในการหาผลเฉลยของแรงถอนในแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียวใกล้ชายฝั่ง ที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน (s_{uu}) เท่ากับศูนย์ และมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนตามความลึก (p) นอกเหนือจากนี้ ตัวแปรอื่นๆที่ Ukritchon (1998) [5] ใช้ในการวิเคราะห์ก็คือตัวแปรความกว้าง (B) และความลึก (L) ของฐานราก รวมไปถึงตัวแปรแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) แต่ในงานวิจัยของ Ukritchon

(1998) [5] ได้ใช้ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นกรณีหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{uu}/s_u$ โดย s_{uu} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานรากปล่อง ผลเฉลยของ Ukritchon (1998) [6] มีทั้งขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound)

ต่อมาก็ได้มีนักวิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์ลิมิต (Limit Analysis) หาผลเฉลยของฐานรากปล่องเอาไว้บ้าง เช่นงานวิจัยของ Aubeny และ Murff (2001, 2003, 2005) [6], [7], [8] ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ลิมิตของวิธีขอบเขตบนในการวิเคราะห์หาแรงวิกฤติที่เกิดจากกระทำร่วมกันบนฐานรากปล่องทรงกระบอก (Axisymmetric Caisson) โดยฐานรากรับแรงแนวตั้งและแรงแนวราบ แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ไม่ได้ได้ครบทุกกรณีของตัวแปรไว้มีมิติความกว้างต่อความลึก (B/L) ของฐานรากปล่อง

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิกฤติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนระนาบความเครียด (2D Plane Stain) โดยตัวแปรไว้มีมิติที่ศึกษา คือตัวแปรความกว้างต่อความลึก (B/L) ตั้งแต่ 0 ถึง ∞ และแฟกเตอร์การยึดเกาะตั้งแต่ 0 ถึง 1 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับ 1 หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface)

2. วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐานรากปล่อง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) OptumG2 โดย Krabbenhoft (2014) [9] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาทั้งผลเฉลยแบบขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการของทฤษฎีลิมิตพลาสติก (Plastic limit theorem) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้กับพารามิเตอร์ต่างๆไปทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้ โดยการหาคำตอบแบบวิเคราะห์ขอบด้วยทฤษฎีขอบ

(Bound theorem) กล่าวคือ ถ้าเราสามารถจำกัดขอบเขตของคำตอบให้อยู่ในช่วงๆ หนึ่งที่แน่นอนได้ และปรับปรุงแก้ไขระบบการคำนวณไปเรื่อยๆ จนกระทั่งช่วงของคำตอบนี้เข้าใกล้กันมากที่สุด เราก็จะได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยจริง (Exact solution) มากที่สุด ทฤษฎีขอบเขตถูกแบ่งออกเป็นอีก 2 ทฤษฎีบท คือ ทฤษฎีบทขอบเขตล่าง (Lower bound theorem) และทฤษฎีบทขอบเขตบน (Upper bound theorem) โดยผลจากทฤษฎีทั้งสองนี้เองที่จะกลายมาเป็นขอบเขตของคำตอบในที่สุด

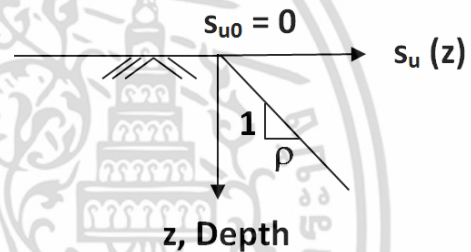
งานวิจัยนี้จำลองให้ดินเหนียวเป็นอิเลเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน (s_{u0}) = 0 ซึ่งเป็นกรณีของดินเหนียวบริเวณชายฝั่งที่มักจะมีการก่อสร้างฐานรากแบบปล่อง ดินเหนียวมีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนตามความลึก (ρ) ทำให้ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนที่ความลึกใดๆ (s_u) = ρz ดังที่แสดงในรูปที่ 1 นอกเหนือจากนี้ ดินเหนียวยังมีอัตราส่วน โมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ($E/\rho L$) = 500 มุมเฉียดทานภายใน (ϕ) = 0° มุมขยายตัวเชิงปริมาตร (ν) = 0° อัตราส่วนของปัวซอง (ν) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร หน่วยน้ำหนัก (γ) ของดินเหนียวใช้ 20 kN/m^3 สำหรับทุกปัญหาของฐานรากปล่องที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้เพราะตัวแปรหน่วยน้ำหนักไม่มีผลต่อผลเฉลยของแรงถอนวิบัติแนวตั้ง

ฐานรากปล่องแบบระนาบถูกจำลองเป็นอิเลเมนต์แบบแผ่น ฐานรากปล่องมีความกว้าง (B) และความลึก (L) ดังแสดงในรูปที่ 2 และเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) นอกเหนือจากนี้ ฐานรากแบบปล่องถูกกำหนดให้มีแรงถอนแนวตั้งที่กึ่งกลางของโครงสร้าง โดยมี P เป็นแรงถอนในแนวตั้ง

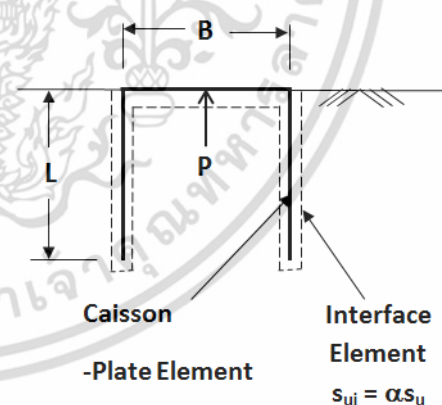
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างฐานรากปล่องและดินเหนียว ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและฐานรากปล่อง (α) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ

0.25 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{ui}/s_u$ โดย s_{ui} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานรากปล่อง นอกเหนือจากนี้ ชิ้นส่วนเชื่อมต่อยังถูกกำหนดให้ผิวสัมผัสเป็นแบบสามารถมีแรงดึงสมบูรณ์ (Full Tension) อีกด้วย

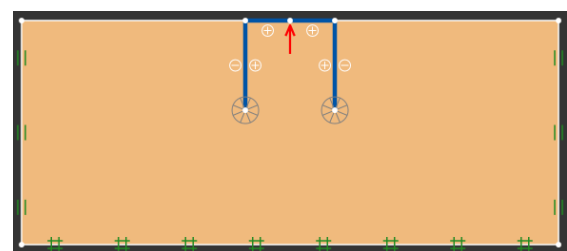
เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ โดยรายละเอียดแสดงอยู่ในรูปที่ 3



รูปที่ 1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวบริเวณชายฝั่ง



รูปที่ 2 ปัญหาแรงถอนวิบัติของฐานรากแบบปล่อง

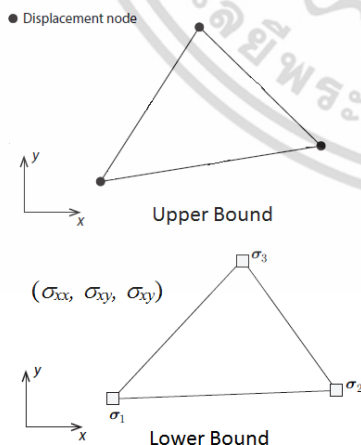


รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากแบบปล่องด้วยโปรแกรม

OptumG2

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ชิ้นส่วนดินของโครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์ของขอบเขตล่างเป็นชิ้นส่วน (Element) รูปสามเหลี่ยมแบบมี 3 จุดต่อของความเค้นประสิทธิภาพ (Nodal Effective Stresses) ส่วนขอบเขตบนมีชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 3 จุดต่อความเค้น (Stress Node) ที่มุมของชิ้นส่วน และมี 3 จุดต่อการเคลื่อนตัว (Displacement Node) รอบๆ ชิ้นส่วน ดังที่แสดงในภาพที่ 4 นอกเหนือจากนี้ โปรแกรม OptumG2 ยังมีฟังก์ชันพิเศษคือการที่แบบจำลองสามารถเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนหรือพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ด้วยตัวเองได้ซึ่งสามารถทำให้ผลเฉลยของปัญหามีความเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) มากยิ่งขึ้น โคนงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แบบจำลองพัฒนาโครงข่ายทั้งหมด 5 รอบต่อการวิเคราะห์หาผลเฉลยของ 1 ปัญหา โดยฟังก์ชันนี้จะเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดสูง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพื้นที่ประสิทธิภาพ (Effective Area) เช่น ตรงตำแหน่งที่เกิดเส้นการวิบัติ (Slip-Line Field) เป็นต้น ผลเฉลยทุกค่าในงานวิจัยนี้ถูกตั้งค่าให้มีชิ้นส่วนเริ่มต้นที่ 5000 ชิ้น และแบบจำลองจะพัฒนาโครงข่ายไปเรื่อยๆ ทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งจะมีการเพิ่มจำนวนของชิ้นส่วน ไปได้ถึง 10000 ชิ้นส่วนหลังจากการพัฒนาโครงข่ายครั้งสุดท้าย



รูปที่ 4 ชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ขอบเขตบนและ

ขอบเขตล่างใน โปรแกรม OptumG2

ตัวแปรป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

ของการวิเคราะห์ลิมิตมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

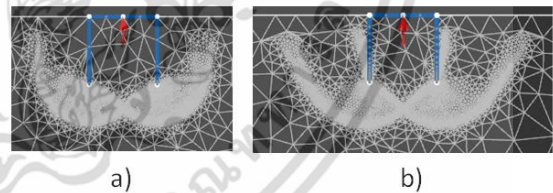
1. อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของฐานรากแบบปล่อง (L/B) = 0, 2.5, 5, 0.75, 1 และ (B/L) = 0, 2.5, 5, 0.75, 1

2. แพลกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) = 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1

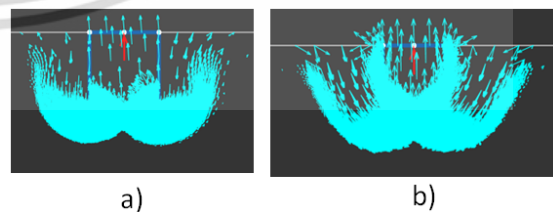
ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิตคือ $P/\rho((B/2)+L)^2$

3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 5 แสดงผลการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ครั้งสุดท้ายของฐานรากปล่องแบบระนาบที่มี L/B = 1 เปรียบเทียบระหว่างสองกรณีคือ $\alpha = 0$ และ 1 หลังจากการพัฒนาโครงข่ายครั้งที่ 5 จำนวนชิ้นส่วน (Element) ของแบบจำลองจะถูกเพิ่มจำนวนในพื้นที่ประสิทธิภาพ (Effective Area) หรือตรงส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนสูง จากรูปจะเห็นว่าที่ $\alpha = 0$ มีพื้นที่วิบัติจะขยายออกจากส่วนกึ่งกลางด้านล่างของฐานรากปล่องไปเรื่อยๆ จนเกือบแตะผิวดินซึ่งมีลักษณะคล้ายใบพัดและสัมพันธ์กับขาทั้งสองข้างของฐานราก แต่ที่ $\alpha = 1$ จะมีลักษณะแตกต่างเล็กน้อย โดยพื้นที่วิบัติจะมีลักษณะกว้างกว่าดังที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การพัฒนาโครงข่ายของกรณี L/B = 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 1$

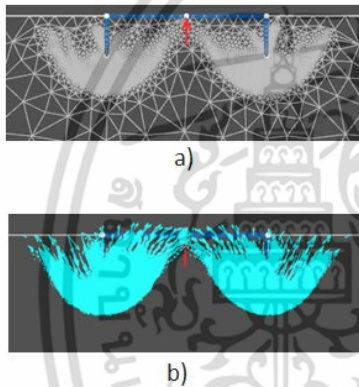


รูปที่ 6 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของกรณี L/B = 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 1$

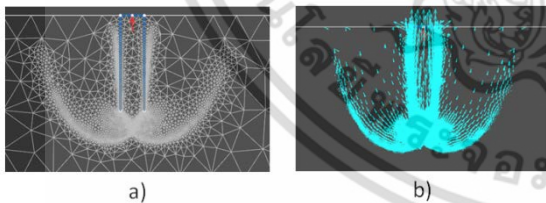
รูปที่ 6 แสดงเวกเตอร์การเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น (Total Incremental Vector) ของกรณี L/B = 1 เปรียบเทียบระหว่างสองกรณีคือ $\alpha = 0$ และ 1 เช่นเดียวกัน จากรูป

พบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะเดียวกันกับการพัฒนาโครงข่ายในรูปที่ 5

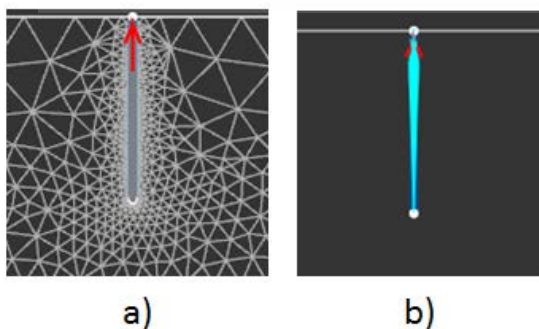
รูปที่ 7, 8, 9 แสดงการพัฒนาโครงข่ายและเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของกรณี $L/B = 0.25$, $B/L = 0.25$ และ $B/L = 0$ ตามลำดับ โดยทั้งสามรูปคือกรณี $\alpha = 1$ จากรูปพบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นและการพัฒนาโครงข่ายมีลักษณะจะมีความแตกต่างกันไปตามความกว้างและความลึกซึ่งแปรผันกับค่า B และ L ของแบบจำลอง สำหรับกรณี $B/L = 0$ พบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นได้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับฐานรากเท่านั้น ไม่มีการแผ่ขยายไปบริเวณข้างๆ เหมือนกับฐานรากปล่องขนาดอื่นๆ



รูปที่ 7 กรณี $L/B = 0.25$: a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

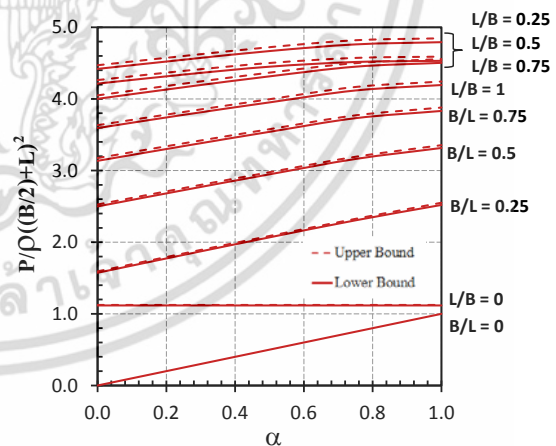


รูปที่ 8 กรณี $B/L = 0.25$: a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 กรณี $B/L = 0$: a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

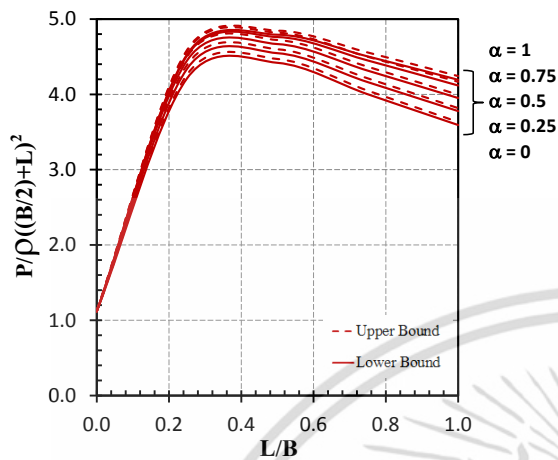
รูปที่ 10 แสดงผลเฉลยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาค่าจำกัด ด้วยโปรแกรม Optum G2 ผลเฉลยที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้ง, $P/P((B/2)+L)^2$ กับแฟกเตอร์การบิดเกาะ, α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยกราฟในรูปจะแบ่งเป็นสองแบบคือแบบผลเฉลยของขอบเขตบนจะเป็นเส้นประ ส่วนผลเฉลยของขอบเขตล่างจะเป็นเส้นทึบ จากรูปจะเห็นได้ว่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างมีความใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกันซึ่งแสดงว่าผลเฉลยที่ได้มีค่าใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมาก เส้นต่างๆ ในรูปที่ 10 มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึก, L/B แตกต่างกัน โดยเส้นบนสุดมีค่า $L/B = 0.25$ และเส้นล่างสุดมีค่า $B/L = 0$ ซึ่งเส้นล่างสุดเป็นกรณีที่ไม่มีโครงข่ายหรือกรณีที่ฐานรากมีลักษณะเป็นแผ่น สำหรับกรณี $L/B = 0$ เป็นกรณีที่ฐานรากปล่องไม่มีความลึกโดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นวางอยู่บนดินเหนียวและค่าแฟกเตอร์การบิดเกาะไม่มีผลต่อกรณีนี้ ทำให้กรณีนี้มีค่า $P/P((B/2)+L)^2$ เพียงค่าเดียวคือ 1.12 (เฉลี่ยจากขอบเขตบนและขอบเขตล่าง) นอกเหนือจากนี้ เมื่อพิจารณาจากเส้นทุกเส้นในรูปที่ 10 พบว่าค่า $P/P((B/2)+L)^2$ จะเพิ่มขึ้นตามค่า α ที่เพิ่มขึ้น



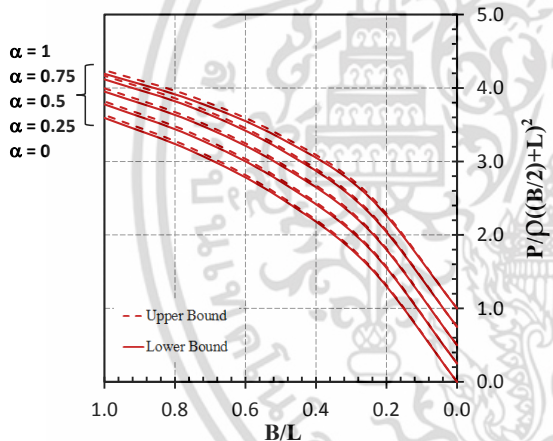
รูปที่ 10 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่ $\alpha = 0 - 1$

รูปที่ 11 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $P/P((B/2)+L)^2$ กับ L/B ตั้งแต่ 0 ถึง 1 และ $B/L = 1$ ถึง 0 ตามลำดับ โดยเส้นบนสุดของรูปทั้งสองคือกรณีที่ $\alpha = 1$ และเส้นล่างสุดคือกรณีที่ $\alpha = 0$ จากรูปทั้งสองพบว่าผลเฉลยที่ได้มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นกับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว สำหรับกรณีที่ค่า

$P/\rho((B/2)+L)^2$ มากที่สุดคือตรงที่ค่า $L/B = 0.25$ และค่าที่น้อยที่สุดคือกรณี $B/L = 0$ และ $\alpha = 0$ โดยผลเฉลยที่ได้ก็จะมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 11 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่ $L/B = 0 - 1$



รูปที่ 12 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่ $B/L = 1 - 0$

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบ (Planar Caisson) ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนระนาบความเครียด (2D Plane Stain) จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรไร้มิติของแรงถอนวิบัติแนวตั้ง ($P/\rho((B/2)+L)^2$) ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

1. ตัวแปรไร้มิติความกว้างต่อความลึก (B/L)
2. แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α)

จากผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $P/\rho((B/2)+L)^2$ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทำนองเดียวกัน เมื่อ B/L เพิ่มขึ้น ค่า $P/\rho((B/2)+L)^2$ ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนไปถึงที่ $B/L = 4$ หรือ $L/B = 0.25$ จะเป็นตำแหน่งที่ค่า $P/\rho((B/2)+L)^2$ มีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นเมื่อค่า B/L เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนใกล้ค่า ∞ พบว่าค่า ($P/\rho((B/2)+L)^2$) จะลดลงเรื่อยๆอย่างรวดเร็วและที่ตำแหน่ง $B/L = \infty$ ค่า α จะไม่มีผลต่อ $P/\rho((B/2)+L)^2$ ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1.12

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. E. Bowles, "Foundation Analysis and Design, 5th ed.", McGraw-Hill, USA, 2001.
- [2] D.F. Cauble. "Experimental Measurements for a Model Suction Caisson" PhD Thesis, MIT, 1996.
- [3] E.C. Clukey, M.J. Morrison. "a Centrifuge and Analytical study to Evaluate Suction Caissons for TLP Applications in Gulf of Mexico", Design and Performance of Deep Foundation, ASCE, 141-156, 1993.
- [4] M. Geer. "Analysis of Pile and Suction Caisson Behavior in Axial Loading". PhD Thesis, MIT, USA, 1996.
- [5] B. Ukritchon "Application of Numerical Limit Analyses for Undrained Stability Problems in Clay". ScD Thesis, MIT, USA, 1998.
- [6] C.P. Aubeny, J.D. Murff, S.K. Moon, "Lateral Undrained Resistance of Suction Caisson Anchors" International Journal of Offshore and Polar Engineering Vol. 11, No. 3, 2001
- [7] C.P. Aubeny, S.W. Han, J.D. Murff "Inclined Load Capacity of Suction Caissons". Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 27:1235-1254, 2003.
- [8] C.P. Aubeny, J.D. Murff. "Simplified Limit Solutions for the Capacity of Suction Anchors under Undrained Conditions" Ocean Engineering 32. 864-877. 2005.
- [9] K. Krabbenhoft, A. Lyamin, J. Krabbenhoft. "Optum Computational Engineering Version 1.14: Manual", OptumG2 Company, 2014.