



การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 4

“GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2022 iHappiness: ความสุขและคุณภาพชีวิตที่ดีอย่างยั่งยืนในยุคสังคมดิจิทัล”

กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากตื้นกรณีมี 2 ฐานรากใกล้เคียงกัน

ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์หาลิมิต

Ultimate Bearing Capacity of Two Interfering Shallow Foundation

By Finite Elements Limit Analysis

ดูลพินิจ หนูเอียต¹

รศ.ดร.วีรยา ฉิมอ้อย²

ผศ.ดร.สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

dulpinit.noo@dome.tu.ac.th

²อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

sweeraya@engr.tu.ac.th

³อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ksurapar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากตื้นกรณีมี 2 ฐานรากใกล้เคียงกันเป็นหนึ่งในหัวข้อที่สำคัญในการวิจัยวิศวกรรมปฐพี งานวิจัยชิ้นนี้ นำเสนอพารามิเตอร์ไร้มิติซึ่งอยู่ในรูปของ Efficiency Factor 3 ค่า ที่อธิบายถึงการพัฒนาการรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากตื้นกรณีมีฐานราก 2 ฐานรากวางใกล้เคียงกัน ประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการของ Terzaghi โดยอาศัยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์หาลิมิตวิธีขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ภายใต้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน (Strength parameters) ของดิน คือค่าความเชื่อมแน่นและมุมเสียดทานภายใน รวมทั้งผลจากน้ำหนักกระทำบนผิวดิน (Surcharge Load) ผลการวิจัยพบว่า Efficiency Factor ได้รับอิทธิพลจากค่าความเชื่อมแน่น มุมเสียดทานภายในของดินและค่าอัตราส่วนระยะห่างของฐานราก ฐานรากจะได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่วางใกล้เคียงกัน ในระยะห่างระหว่างฐานรากค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับค่ามุมเสียดทานภายในของดิน จากการศึกษาค่ามุมเสียดทานภายในของดินตั้งแต่ 5 – 45 องศา พบว่าค่ามุมเสียดทานภายในของดินที่สูงกว่าจะส่งผลให้ดินใต้ฐานรากพัฒนาการรับน้ำหนักแบกทานได้มากกว่าโดยเฉพาะค่ามุมเสียดทานภายในที่มากกว่า 25 องศา ดินจะสามารถพัฒนาการรับน้ำหนักแบกทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับผลการวิจัยอื่นๆ และแสดงกลไกการวิบัติ (Failure Mechanism) ของฐานรากที่วางใกล้กัน นอกจากนี้ยังนำเสนอแผนภูมิออกแบบ (Design Chart) เพื่อไปใช้ในทางปฏิบัติ



คำสำคัญ: ฐานรากตื้น, กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัย, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิต

Abstract

The bearing capacity of closely spaced footings, is one of the important topics in geotechnical engineering research. In this paper, three efficiency factors that describe the effects of closely spaced footings on the bearing capacity are developed and incorporated in the traditional Terzaghi's bearing capacity equation. Using the advanced finite element limit analysis of upper and lower bound theorems, both the two closely spaced strip footings on cohesive-frictional soil with surcharge effect are proposed in the study. From the results, it is found that the efficiency factors are significantly influenced by the cohesion, internal friction angle and the spacing ratio. Footings are influenced by closing footing within one distance depends on the internal friction angle of soil. From the range of internal friction angle 5 to 45 degrees, it is found that the higher the internal friction angle, the higher bearing capacity developed. Especially, when the internal friction angle is greater than 25 degrees, the bearing capacity effectively develops. Various comparisons with published solutions are carried out. Failure mechanisms of closely spaced footings are investigated. The design charts are also proposed for practical use.

Keywords: Shallow Foundation, Ultimate Bearing Capacity, Finite Elements Limit Analysis

บทนำ

โครงสร้างเกือบทุกประเภททั้งที่อยู่บนดินหรืออยู่ในชั้นดิน เช่น อาคารทั่วไป สะพาน ถนน เขื่อน อุโมงค์ จะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งเพื่อใช้ถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างลงบนดินหรือลึกลงไปในชั้นดิน นั่นคือ ฐานราก (Foundation) ซึ่งปัจจุบันฐานรากในงานวิศวกรรมมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของโครงสร้างที่รับน้ำหนักถ่ายส่งมายังฐานราก และคุณสมบัติของชั้นดินที่รองรับน้ำหนักโครงสร้าง รวมไปถึงสภาพแวดล้อม ที่ตั้ง ซึ่งเป็นปัจจัยภายนอกที่จะเข้ามามีบทบาทต่อการเลือกใช้ฐานราก โดยฐานรากที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่พบเห็นได้ทั่วไป ที่โครงสร้างรับน้ำหนักไม่มากนักหรือเป็นโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนชั้นดินที่มีความแข็งแรงค่อนข้างมากคือ ฐานรากตื้น (Shallow Foundation) ซึ่งเป็นฐานรากที่รับน้ำหนักจากโครงสร้างถ่ายลงชั้นดินโดยตรง ปัจจัยที่กำหนดรูปร่างและขนาดของฐานรากตื้น ขึ้นอยู่กับน้ำหนักกระทำ และกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินที่ยอมให้ ซึ่งกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินนั้น นอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของดิน ลักษณะชั้นดิน ความลึกของฐานราก ฯลฯ ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยซึ่งบ่อยครั้งผู้ออกแบบไม่ได้คำนึงถึง คือ ผลจาก



ฐานรากที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งหลายงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างฐานรากสองตัวหรือหลายตัวที่วางใกล้เคียงกันนั้น ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน โดยเมื่อระยะห่างระหว่างฐานรากอยู่ในระยะที่กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินมีอิทธิพลต่อกัน จะส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินเพิ่มมากขึ้น ดังผลการศึกษาปัญหาโดย Mabrouki et al. (2010) และ ของ Kumar & Kouzer (2008) ดังนั้นการศึกษานี้จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติรูปร่างต่าง ๆ ของฐานรากต้นแบบฐานรากแถบ (Rough Footing) ที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากต้นกรณีมี 2 ฐานรากใกล้เคียงกัน ในอัตราส่วนระยะห่างระหว่างฐานรากต่าง ๆ กับความกว้างของฐานราก ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิต โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยในอดีตซึ่งใช้กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีแตกต่างกัน และแสดงแผนภูมิออกแบบ (Design Chart) ซึ่งจะได้นำไปใช้ในทางปฏิบัติต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากต้น กรณีมี 2 ฐานรากวางใกล้เคียงกัน โดยมีมิติความกว้างเดียวกันและรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน โดยการวิเคราะห์ผ่านวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบลิมิต
2. หาผลเฉลยกำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากต้น ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า Efficiency Factor กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างฐานรากต่อความกว้างฐานราก ในแสดงแผนภูมิออกแบบ (Design Chart) และเปรียบเทียบผลเฉลยจากงานวิจัยอื่นๆ ในอดีต

ขอบเขตการวิจัย

1. ในงานวิจัยชิ้นนี้กำหนดให้ฐานรากต้นแบบแข็งเกร็ง (Rigid Footing) ที่วางอยู่บนผิวดิน และมีผิวสัมผัสระหว่างฐานรากกับดินเป็นแบบขรุขระ (Rough Footing) และเป็นฐานรากแถบ (Strip Footing) ที่มีความกว้าง 1 หน่วย โดยมีฐานรากแบบเดียวกันอยู่ใกล้เคียงเป็นระยะห่างแตกต่างกัน ในรูปอัตราส่วน s/B ค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10
2. กำหนดให้ดินที่รับน้ำหนักได้ฐานรากเป็นเนื้อดินชั้นเดียวโดย มีเนื้อดินสม่ำเสมอ (Homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน (Strength parameters) ของดิน คือ ค่าความเชื่อมแน่น (c) และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของดินค่าตั้งแต่ 5 ถึง 45 องศา และกำหนดให้ดินมีการวิบัติแบบ Mohr-Coulomb
3. พิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อฐานรากและผิวดิน โดยกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกประลัยของฐานรากแบบแข็งเกร็ง (Rigid Footing) กระทำกระจายสม่ำเสมอเหนือฐานราก โดยไม่คิดผลเนื่องจากน้ำหนักของฐานราก กรณีพิจารณาหาค่าตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทานของดิน N_q จะกำหนดให้มีน้ำหนักกระทำบนผิวดิน (Surcharge Load) เท่ากับ 1 หน่วยแรงต่อพื้นที่ รอบฐานรากที่พิจารณา

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐานรากแถบ จะใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ของ OptumG2 ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาทั้งผลเฉลยแบบขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการทฤษฎีลิมิตพลาสติก (Plastic Limit Theorem) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้กับพารามิเตอร์ทั่ว ๆ ไปทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้ โดยกำหนดวิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐานราก

1. การวิเคราะห์หาค่าลึงแบกทานประลัยของดินใต้ฐานราก (q_u) โดยอาศัยสมการของ Terzaghi (1943) พิจารณาแยกเป็นแต่ละพจน์ โดยกำหนดตัวแปรต้นคือ ค่ามุมเสียดทานของดิน (ϕ) และกำหนดให้ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (c) และหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) เป็นค่าคงที่ระหว่างค่าใดค่าหนึ่งและค่าที่เป็นศูนย์

1.1 เมื่อพิจารณาพจน์ที่เกิดจากค่า c จะกำหนดให้ $c \neq 0, \gamma = 0$ เมื่อ c คือ ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง

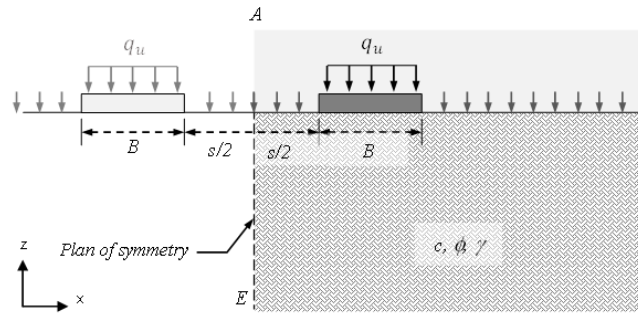
1.2 เมื่อพิจารณาพจน์ที่เกิดจากค่า γ จะกำหนดให้ $c = 0, \gamma \neq 0$ เมื่อ γ คือ ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง

1.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของพจน์ของหน่วยแรงกดทับเนื่องจากน้ำหนักดินเหนือฐานราก (q) ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ฐานรากวางบนผิวดินและให้มีน้ำหนักกระทำบนผิวดิน (Surcharge Load, q) เป็นค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ($q \neq 0$) โดยให้ค่า $c = 0, \gamma = 0$

2. การวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทาน (N_c, N_q, N_γ) และ Efficiency Factor ($\xi_{c,q,\gamma}$) ในฐานรากแถบ โดยกำหนดให้ค่า Efficiency Factor ค่าเท่ากับ q'_u/q_u โดย q'_u คือ กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากต้นกรณีมี 2 ฐานรากวางใกล้เคียงกันและ q_u คือ กำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากเดี่ยว ในมิติความกว้าง ความยาวเดียวกันในแต่ละพจน์ที่สนใจ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์กับสมการของ Terzaghi (1943) ดังสมการที่ 1

$$q'_u = c\xi_c N_c + q\xi_q N_q + 0.5\gamma B\xi_\gamma N_\gamma \quad (1)$$

3. วิเคราะห์ฐานรากในรูปแบบ Plane Strain ในแบบจำลองฐานรากแถบ สำหรับกรณีของฐานราก 2 ฐานรากที่วางอยู่ใกล้กัน จะกำหนดให้ความกว้างของฐานรากทั้งสองตัวมีขนาดที่เท่ากันคือ B โดยมีระยะห่างระหว่างฐานรากทั้งสองตัวคือ s ดังที่แสดงในภาพที่ 1 โดยพิจารณาปัญหานี้เพียงครั้งเดียว ตั้งแต่ระยะนาบ AE ซึ่งเป็นระยะนาบสมมาตร ไปทางด้านขวาของปัญหา โดยกำหนดขอบเขตซ้ายสุดและขวาสุดของปัญหาให้มีการเคลื่อนตัวในแนวแกน x มีค่าเท่ากับศูนย์ ($u_x = 0$) มีลักษณะคล้าย Roller Supports ขอบเขตล่างสุดของปัญหาจะถูกกำหนดให้การเคลื่อนตัวในแนวแกน x และแกน z มีค่าเท่ากับศูนย์ ($u_x = u_z = 0$) มีลักษณะคล้าย Fixed Supports และขอบเขตด้านบนจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวได้อิสระ ยกเว้นตำแหน่งที่มีฐานรากจะเกิดการเคลื่อนตัวลงในแนวดิ่งได้

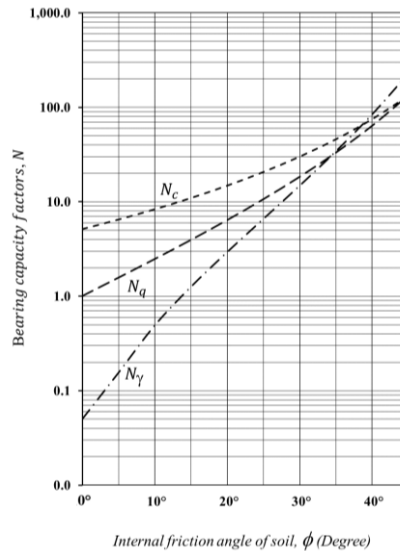


ภาพที่ 1 ขอบเขตของปัญหาสำหรับฐานรากสองตัว

4. การหาค่าผลเฉลยในงานวิจัยนี้ถูกตั้งค่าให้มีชิ้นส่วนเริ่มต้นแบบจำลองที่ 5,000 ชิ้น และจะพัฒนาโครงข่ายไปจำนวนทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งจะมีการเพิ่มจำนวนของชิ้นส่วนไปได้ถึง 10,000 ชิ้นส่วนหลังจากการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ครั้งสุดท้าย

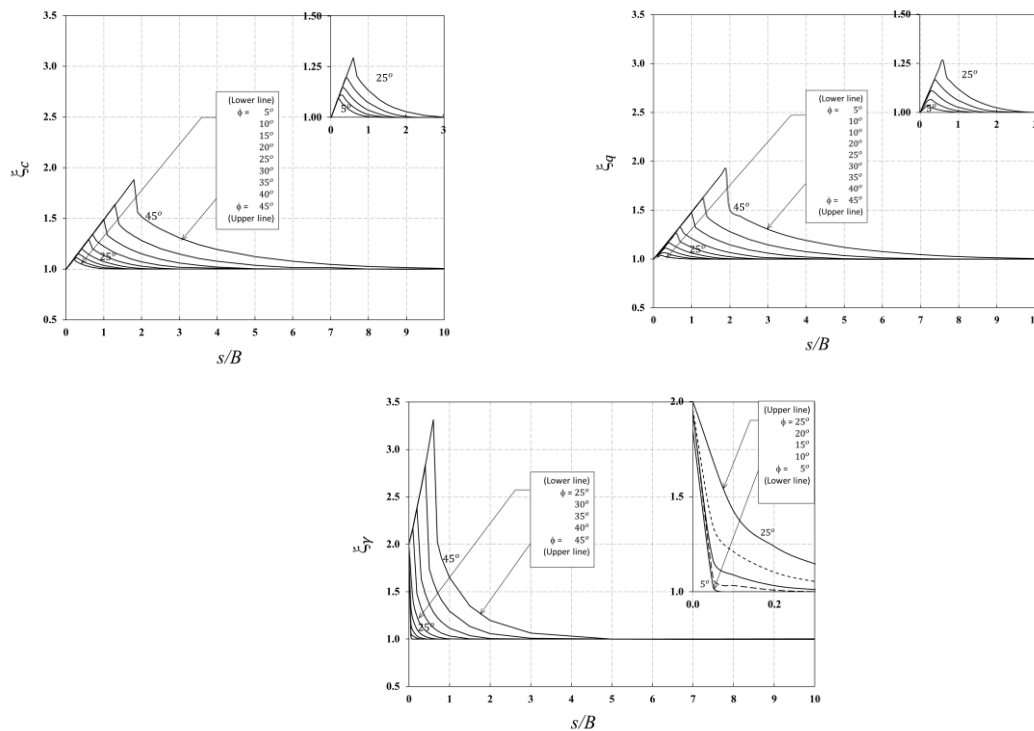
ผลการวิจัย

1. ผลเฉลยค่าตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทาน (N_c, N_q, N_γ) ของฐานรากต่อเนื่องที่เป็นฐานรากเดี่ยว (Isolated Footing) จากงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัดทั้งวิธี Upper Bound วิธี Lower Bound โดยภาพที่ 2 แสดงค่า *FELA* ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างวิธี Upper Bound และ Lower Bound เมื่อเปรียบเทียบกับค่า N_γ ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบกำลังแบกทานที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของฐานรากมากกับค่าผลเฉลยของ Martin (2005) ซึ่งได้ใช้วิธี Method of Characteristics หาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ตั้งแต่ค่า $\phi = 35^\circ$ ขึ้นไป ค่า *FELA* จะให้ค่าที่แม่นยำที่สุดโดยเฉพาะค่า $\phi = 20^\circ$ ขึ้นไป โดยมีค่า %Error ที่น้อยกว่า 4% แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาค่าขีดจำกัดของ OptumG2 ให้ผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพ ภายในเงื่อนไขจำนวนชิ้นส่วนย่อย (Element) ค่าหนึ่ง และการอาศัยกระบวนการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) จะให้ค่าผลเฉลยใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง



ภาพที่ 2 ค่าตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทาน N_c, N_q, N_γ กรณีฐานรากเดี่ยว

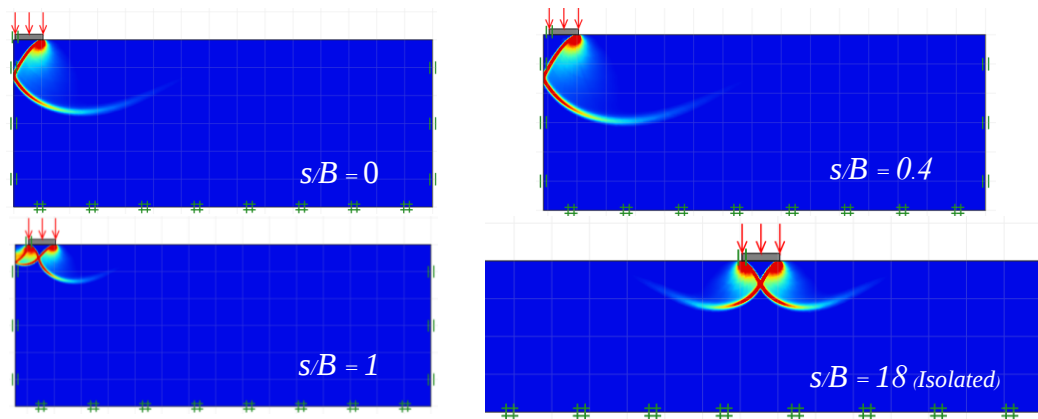
2. ผลการศึกษากำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากตื้นกรณีมี 2 ฐานรากใกล้เคียงกัน แสดงผลเป็นค่า Efficiency Factor ($\xi_{c,q,\gamma}$) กับ s/B ของ 2 ฐานรากที่วางใกล้กัน โดยอาศัยผลจากการวิเคราะห์ลิมิตแบบ Upper Bound แสดงในภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาในของพจน์ของค่า c และ q ค่า ξ_c และ ξ_q เห็นได้ว่าฐานรากได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากมีค่าเพิ่มขึ้นแปรตามค่า s/B ในทุกค่า ϕ ที่พิจารณา และฐานรากจะส่งอิทธิพลต่อกันจนไปหยุด ณ ค่า s/B ที่ ξ_{peak} ก่อนจะลดลง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างฐานราก จนค่า $\xi = 1.00$ ซึ่งแสดงว่าฐานรากไม่ได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่อยู่ใกล้เคียงกันแล้ว โดยค่ามุมเสียดทานภายในของดินที่สูง จะส่งผลให้ดินใต้ 2 ฐานรากที่วางใกล้กันพัฒนากำลังรับแรงแบกทานได้มากและส่งอิทธิพลต่อกันในระยะห่างระหว่างฐานรากที่มากกว่า จากภาพที่ 3 เห็นได้ว่าค่า ϕ ที่มีค่าไม่เกิน 25 องศา ฐานรากจะได้รับอิทธิพลต่อกันเมื่อฐานรากวางห่างกันไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างฐานราก ขณะเดียวกันค่า ϕ ที่ 45 องศา ฐานรากจะได้รับอิทธิพลระหว่าง 2 ฐานรากที่วางห่างกันถึง 9 เท่าของความกว้างฐานราก



ภาพที่ 3 แผนภูมิออกแบบที่แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency Factor, ξ กับ s/B ของ 2 ฐานรากแบบแถบที่วางใกล้กัน

เมื่อพิจารณาในพจน์ของหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของดินมาก ค่า ϕ ที่ไม่เกิน 25 องศา เกิดค่า ξ_{peak} ที่ค่า $\xi_\gamma = 2.00$ เมื่อค่า $s/B = 0$ เปรียบเหมือนฐานรากมีความกว้างเป็น 2 เท่า ซึ่งจะส่งผลให้กำลังแบกทานของดินในพจน์ของหน่วยน้ำหนักของดินเพิ่มเป็น 2 เท่าเช่นกัน จากนั้นค่า ξ_γ จะลดลง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างฐานราก จนกระทั่งฐานรากไม่ได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่อยู่ใกล้เคียงกันเมื่อ $\xi_\gamma = 1.00$ ในภาพที่ 3 ที่ค่า ϕ ที่ไม่เกิน 25 องศา ฐานรากจะได้รับอิทธิพลต่อกันเมื่อฐานรากวางห่างกันไม่เกิน 1 เท่าของความกว้างฐานราก และเมื่อพิจารณาค่า ϕ ตั้งแต่ 30 - 45 องศา จะมีตั้งแต่ค่า $\xi_\gamma = 2.00$ เมื่อค่า $s/B = 0$ และเพิ่มขึ้นตามค่า s/B จนถึงค่าที่กำลังแบกทานของดินพัฒนากำลังได้สูงสุดเมื่อถึงค่า ξ_{peak} ก่อนจะลดลง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างฐานราก จนกระทั่งฐานรากไม่ได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่อยู่ใกล้เคียงกันเมื่อ $\xi = 1.00$ โดยที่ค่า ϕ ที่ 45 องศา ฐานรากจะได้รับอิทธิพลระหว่าง 2 ฐานรากที่วางห่างกันถึง 5 เท่าของความกว้างฐานราก และสามารถพัฒนากำลังรับแรงแบกทานของดินได้ถึง 3.3 เท่า เมื่อมีฐานรากวางห่างออกไป 0.6 เท่าของความกว้างฐานราก เมื่อตัวแปร ϕ ระหว่าง 5 - 45 องศา Efficiency Factor ($\xi_{c,q,\gamma}$) จากภาพที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่าค่า ϕ ที่มากกว่าจะให้ค่า Efficiency Factor (ξ) ที่มากกว่า และมีผลต่อค่า s/B ที่มากกว่าด้วย เนื่องด้วยค่า ϕ เหมือนค่ากำลังเสียดทานระหว่างเม็ดดินซึ่งทำหน้าที่เป็นกำลังรับแรงเฉือนของดิน ทั้งยังเป็นค่าที่ส่งผลต่อตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทาน

โดยตรง และสังเกตได้ว่าเมื่อค่ามุมเสียดทานของดินตั้งแต่ 25 องศาขึ้นไป จะส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเพื่อพิจารณาจากทุกพจน์



ภาพที่ 4 แสดงเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) ของฐานรากตีน 2 ฐานรากที่วางใกล้กันบนดิน $\phi = 40^\circ$ ($\gamma \neq 0$, $c = q = 0$)

3. กลไกการวิบัติ (Failure Mechanism) โดยการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) เนื่องจากโดยปกติแล้วดินจะวิบัติด้วยแรงเฉือน ดังนั้นในงานวิจัยจึงพิจารณาการวิบัติด้วยเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงบริเวณของดินใต้ฐานรากที่เกิดความเค้นเฉือนสูง กล่าวคือมีโอกาสที่ดินจะวิบัติตามแนวเส้นดังกล่าวมากกว่าบริเวณอื่น

เมื่อพิจารณาการวิบัติที่ค่า s/B ต่างๆ พบว่าในช่วงค่า s/B ช่วงหนึ่ง ฐานรากจะได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่วางอยู่ใกล้เคียง ซึ่งทำให้กำลังรับน้ำหนักของฐานรากพัฒนาได้สูงสุด ซึ่งจะปรากฏแนวเส้นการวิบัติที่ขึ้นไปแตะผิวดินที่ไกลจากขอบฐานราก ตัวอย่างเห็นได้ชัดจากภาพที่ 4 ที่ $\phi = 40^\circ$ ($\gamma \neq 0$, $c = q = 0$) ที่ช่วงค่า $s/B = 0-0.4$ นั้น กำลังรับน้ำหนักของฐานรากสามารถพัฒนาขึ้นไปจนกระทั่งมากที่สุด ณ ค่า $s/B = 0.4$ จากนั้น แนวเส้นการวิบัติที่ขึ้นไปแตะผิวดินจะใกล้เข้ามาตามค่า s/B ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง s/B ค่าหนึ่งที่ฐานรากไม่ได้รับอิทธิพลจากฐานรากใกล้เคียง ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิค่า Efficiency Factor (ξ_r) และ s/B แสดงในภาพที่ 5 ที่ $\phi = 40^\circ$ กำลังของฐานรากพัฒนาได้กำลังสูงสุดที่ $s/B = 0.4$

เมื่อเปรียบเทียบค่า ξ_r จากงานวิจัยนี้ กับผลการศึกษาในอดีต ให้ผลเฉลยค่า ξ_r ที่มีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ จะให้ค่า ξ_r ที่เพิ่มขึ้นแปรตามค่า s/B จนเกิดค่า ξ_{peak} จึงลดลงตามค่า s/B ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลการศึกษาของ Mabrouki et al. (2010) ด้วยวิธี Finite-Difference Method แบบ Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) และผลการศึกษาของ Kumar และ Kouzer (2008) ซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ผลเฉลยด้วยวิธี Finite Element Limit Analysis - Upper Bound ที่ยังไม่มีกระบวนการ Adaptive Mesh สำหรับพารามิเตอร์ ξ_r



สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลเฉลยกำลังรับน้ำหนักแบกทานประลัยของฐานรากต้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห้ลิมิต ภายใต้เงื่อนไขการวิบัติของ Mohr-Coulomb ภายในเงื่อนไขจำนวนชิ้นส่วนย่อยค่าหนึ่ง และอาศัยกระบวนการพัฒนาโครงข่าย จะให้ค่าผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพ ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำ และแผนภูมิออกแบบ ที่แสดงความสัมพันธ์ในรูป Efficiency Factor ($\xi_{c,q,\gamma}$) กับตัวแปรไร้มิติ s/B ระหว่างฐานรากแฉกวางบน ดิน 2 ฐานราก ภายใต้ตัวแปรพารามิเตอร์ของดินคือ ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน(ϕ) ตั้งแต่ 5 – 45 องศา แสดงให้เห็นว่าฐานรากจะได้รับอิทธิพลจากฐานรากที่วางใกล้เคียงกัน ในระยะห่างระหว่างฐานรากค่าหนึ่งซึ่ง ขึ้นอยู่กับค่า ϕ โดยค่า ϕ ที่สูงกว่าจะส่งผลให้ดินใต้ฐานรากพัฒนากำลังรับน้ำหนักแบกทานได้มากกว่า โดยเฉพาะค่า ϕ ที่มากกว่า 25 องศา ดินจะสามารถพัฒนากำลังรับน้ำหนักแบกทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากพจน์ ξ_γ จะเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของดินมากกว่า 2 เท่าก่อนจะเกิด ξ_{peak} อีกทั้งผลการศึกษายังแสดงให้เห็นการพัฒนากำลังของดินใต้ฐานรากที่ถูกรบกวนโดยฐานรากใกล้เคียง แสดงในรูปแบบกลไกการวิบัติด้วยแรงเฉือนของดินใต้ฐานรากให้เห็นได้อย่างชัดเจน โดยกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินใต้ฐานราก แปรตามความยาวเส้นการวิบัติ (Slip-Line Field) ที่ขึ้นไปแตะผิวดิน

อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับฐานรากต้นรูปร่างอื่นๆ อาทิ ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ฐานรากวงกลม รวมถึงฐานรากต่างขนาดกันที่วางใกล้กัน อีกทั้งควรศึกษาถึงปัจจัยอื่น อาทิ ปัจจัยเนื้อดินหลายชั้น ระดับน้ำใต้ดิน ระยะฝังของฐานราก รวมถึงแรงที่กระทำต่อฐานรากในรูปแบบอื่น

เอกสารอ้างอิง

- Kumar, J., & Kouzer, K. M. (2008). Bearing capacity of two interfering footings. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(3), 251–264. <https://doi.org/10.1002/nag.625>
- Mabrouki, A., Benmeddour, D., Frank, R., & Mellas, M. (2010). Numerical study of the bearing capacity for two interfering strip footings on sands. *Computers and Geotechnics*, 37(4): 431–439. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.12.007>
- Martin, C.M. (2005). Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics. *Proceedings of the 11th International Conference of IACMAG, Turin*, 4, 441–450.
- OptumCE, 2019. OptumG3. Optum Computational Engineering, Copenhagen, Denmark. See <https://optumce.com/>
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.