

กำลังแบกทานแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากรูปตัวทีรับแรงกระทำแบบเยื้องศูนย์กลาง

Undrained Bearing Capacity of T-shaped Strip Footing Subjected to Eccentrically Inclined Load

ค่าน้อย กุลละวง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแห่งชาติลาว

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ / ชนะชัย ทองโถม

นิสิตปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากรูปตัวทีรับแรงเยื้องศูนย์กลางในดินเหนียว โดยฐานรากรูปตัวทีจะมีชิ้นส่วนที่ยื่นลงไปดิน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการรับแรงเยื้องศูนย์กลางหรือโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานรากได้เป็นอย่างดี วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติบนระนาบความเครียดถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหานี้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้คือ อัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B) และ อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B) จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ D/B มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่า e/B มากขึ้นจะส่งผลให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลง

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระบายความเครียด ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฐานรากรูปตัวที

Abstract

This paper presents parametric studies of bearing capacity factor of T-shaped strip foundations in clay. The footing has a connected part projected from the center of the footing and embedded into the ground. This part increases the stability and performance of the footing subjected to eccentrically inclined load or moment. The two dimensional finite element with plane strain condition was employed to determine stability of this problem. The computational result is bearing capacity factor (N_c) which is a function of ratio of embedded length and width (D/B) and ratio of eccentric length and width (e/B). The results show that the solution of N_c increase with an increase of D/B and a decrease of e/B .

Keywords : Numerical Analysis, Plane Strain, Finite Element, T-shaped footing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การหาค่ากำลังแบกทานที่ปลายด้านล่างของฐานรากถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Terzaghi [1] ซึ่งมีรูปแบบสมการแปรผันกับพารามิเตอร์เพียงสองตัว ดังนี้

$$q = N_c s_u \quad (1)$$

โดย q คือความดันเฉลี่ยแบกทาน (Average Bearing Pressure) ที่ปลายของฐานราก s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Shear Strength) N_c คือแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (Bearing Capacity Factor)

ในอดีตได้มีงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังแบกทานของฐานราก เช่น งานวิจัยของ Skempton [2] และ Meyerhof [3-4] ที่ได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพเพื่อหาค่ากำลังแบกทานของฐานรากบนดินเหนียวและดินทราย และงานวิจัยของ Prandtl [5-6] ที่ได้หาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่อง (Strip Foundation) บนดินเหนียวเอาไว้ ซึ่งผลเฉลยที่ได้มีค่าเท่ากับ $(2+\pi)$

ต่อมา Houlsby และ Martin [7] และ Salgado et al. [8] ได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากต่อเนื่อง (Strip Footing) และฐานรากวงกลม (Circular Foundation) เอาไว้ซึ่งมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของ Prandtl [5-6] เป็นอย่างมาก

สำหรับวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขอีกวิธีคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ก็ได้มีการนำมาใช้เพื่อหาค่าผลเฉลยของกำลังแบกทานของฐานรากเช่นกัน เช่น งานวิจัยของ Edwards et al. [9] และ Keawsawasvong และ Ukritchon [10] โดยงานวิจัยทั้งสองได้ศึกษาไปถึงกำลังแบกทานของฐานรากแบบยาวที่ฝังในดินเหนียวด้วย เช่น เสาเข็ม นอกเหนือจากนี้ Keawsawasvong และ Ukritchon [11] ก็ยังได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่เท่ากันทุกทิศทางของดินเหนียวเพื่อหาแฟกเตอร์ของกำลังแบกทานวิบัติของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงที่กระทำบนฐานรากบางครั้งไม่ได้กระทำเฉพาะที่ตรงจุดกึ่งกลางของฐานรากเท่านั้น แรงกระทำสามารถเอียงศูนย์กลางไปจากจุดกึ่งกลางของฐานรากได้ทำให้เกิดโมเมนต์ซึ่งส่งผลต่อฐานรากทำให้หมุนและบางส่วนของฐานรากสามารถแยกออกจากผิวดินได้ ลักษณะเช่นนี้ทำให้คุณสมบัติการรับแรงในแนวตั้งของฐานรากแผ่ลดลงอย่างมากเนื่องจากส่วนที่สัมผัสดินของฐานรากน้อยลงทำให้และเกิดความเค้นขึ้นอย่างมากเมื่อแรงเอียงศูนย์กลางไปถึงจุดปลายสุดของฐานราก ซึ่งโดยหลักการแล้วความเค้นที่เอียงศูนย์กลางอยู่ที่ปลายสุดของฐานรากจะทำให้เกิดพฤติกรรมของแรงกระทำแบบจุด (Point Load) ขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นตรงจุดนั้นเข้าสู่อนันต์และไม่สามารถคำนวณได้

หลักการคำนวณแรงเอียงศูนย์กลางบนฐานรากแผ่สามารถศึกษาได้จากหนังสือการออกแบบฐานรากต่างๆไป เช่น หนังสือของ Das [12]

ต่อมา Kaya และ Ormek [13] ได้นำเสนอฐานรากรูปตัวที (T-shaped Strip Footing) ที่มีส่วนของระยะฝังออกไปจากกึ่งกลางของฐาน ซึ่งชั้นส่วนนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเอียงศูนย์กลางหรือโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานรากได้เป็นอย่างดี โดย Kaya และ Ormek ได้ทำการทดสอบทั้งแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากรูปตัวทีนี้ ซึ่งผลที่ได้บ่งบอกถึงความสามารถของฐานรากชนิดนี้ที่สามารถรับแรงเอียงศูนย์กลางและโมเมนต์ได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับฐานรากแผ่แบบทั่วไป อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Kaya และ Ormek เป็นเพียงแค่กรณีศึกษาเท่านั้น ผลเฉลยที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ทุกๆตัวของฐานรากรูปตัวที เช่น อัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของฐานราก หรืออัตราส่วนระยะเอียงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากที่ส่งผลต่อแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) ก็ยังไม่ได้ถูกนำเสนออย่างครอบคลุมในงานวิจัยของ Kaya และ Ormek

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงกดแนวตั้งแบบเอียงศูนย์กลางของฐานรากรูปตัวทีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระยะ

ฝั่งต่อความกว้างของฐานราก ต่อแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) สำหรับทุกๆค่าของอัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานราก เพื่อแสดงให้เห็นถึงความประสิทธิผลของของฐานรากรูปตัวทีฝังในดินที่สามารถรับแรงเชิงศูนย์กลางได้ดีกว่าฐานรากแผ่นแบบปกติ

2. วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐาน

รากปล่อง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) Plaxis 2D โดย Brinkgreve [14] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาทั้งผลเฉลย

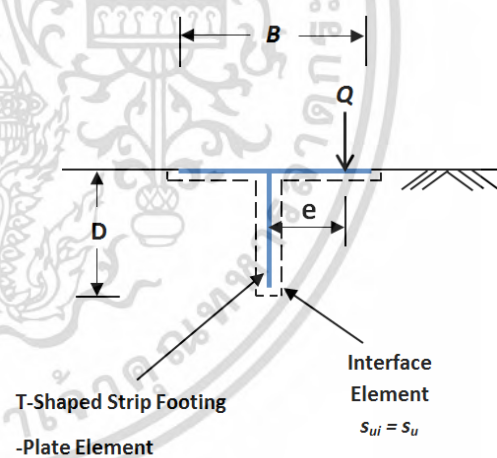
งานวิจัยนี้จำลองให้ดินเหนียวเป็นอิลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่คงที่ตลอดความลึก (s_u) ดินเหนียวมีอัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (E/s_u) = 500 (เป็นค่าที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์หา Limit State โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [15]) มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 0° มุมขยายตัวเชิงปริมาตร (ψ) = 0° อัตราส่วนของปริมาตรของ (V) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ดินเหนียวเป็นดินแบบไม่มีหน่วยน้ำหนักหรือ Weightless Soil ซึ่งมี $\gamma = 0$ การกำหนดให้ดินไม่มีหน่วยน้ำหนักเพื่อจะหาค่ากำลังแบกทานซึ่งไม่มีผลของหน่วยน้ำหนักและอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก (Surcharge Factor) [1]

ฐานรากรูปตัวทีแบบระนาบถูกจำลองเป็นอิลิเมนต์แบบแผ่น ฐานรากมีความกว้าง (B) และระยะฝัง (D) ดังแสดงในรูปที่ 1 และเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) นอกเหนือจากนี้ ฐานรากแบบปล่องถูกกำหนดให้มีแรงกดแนวตั้ง (Q) ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง โดยมีค่า $Q = qB = N_c s_u B$ นอกเหนือจากนี้ แรงกดแนวตั้งสูงสุด (Q) สามารถกระทำเอียงไปจากจุดกึ่งกลางของฐานรากเป็นระยะ e โดยระยะเชิงศูนย์กลางนี้สามารถมีค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 0.5B

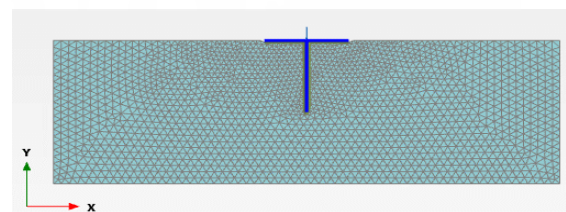
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างฐานรากรูปตัวทีและดินเหนียว ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและฐานราก (α) มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{ui}/s_u$ โดย s_{ui} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานราก

เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และหน่วยแรงภายในชิ้นส่วน 12 จุด (Stress Points) การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แบบจำลองฐานรากรูปตัวทีในดินเหนียว



รูปที่ 2 การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองฐานรากฐานรากรูปตัวทีโดย Plaxis 2D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หัลิมิตดังนี้

1. อัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B) = 0, 0.25, 0.5, 1 และ 1.5
2. อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B) = 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หัลิมิตคือ $N_c = Q/Bs_u$

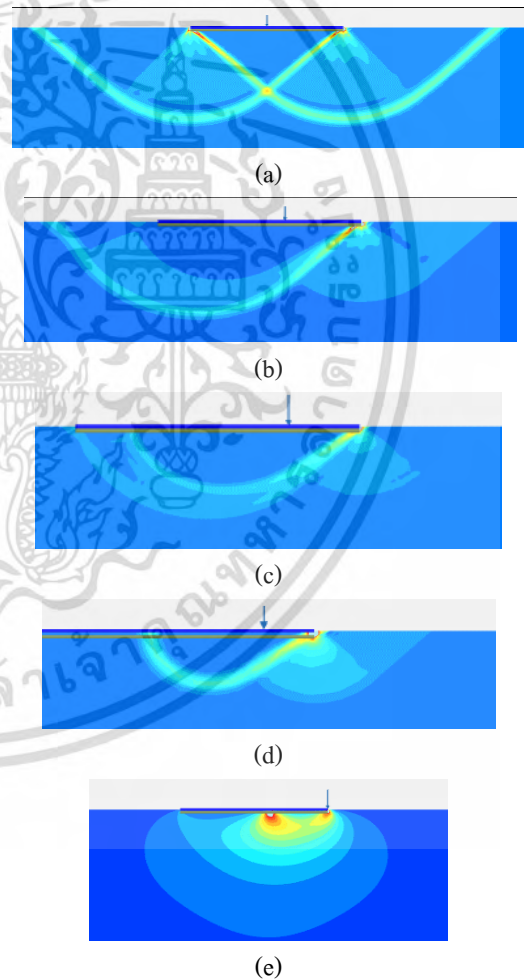
3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 3, 4, 5 แสดงเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) ในกรณีอัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B) = 0, 0.25 และ 1.5 ตามลำดับ โดยในแต่ละกรณีจะเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B) เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรดังกล่าว

จากรูปที่ 3 พบว่า ในกรณีที่ D/B = 0 การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม e/B ที่เพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีการเยื้องศูนย์กลางเส้นความเครียดเฉือนจะมีความสมมาตรเป็นลักษณะครึ่งวงกลมซ้อนทับกัน โดยความเครียดเฉือนจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณปลายของฐานราก โดยค่าการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่ตรงกลางของฐานรากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น และเมื่ออัตราส่วน e/B มีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมมาตร เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยตำแหน่งที่ความเครียดเฉือนสูงสุดจะอยู่บริเวณมุมของฐานรากที่ใกล้กับตำแหน่งแรงกระทำ จนกระทั่งในกรณีที่ e/B สูงสุดเท่ากับ 0.5 การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางและบริเวณมุมของฐานราก โดยกรณีนี้ที่ตรงบริเวณมุมของฐานรากจะเกิดความเค้นที่มีค่าเข้าสู่อนันต์ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาแรงในแนวตั้งได้

รูปที่ 4 แสดงการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ D/B = 0.25 พบว่าความเครียดเฉือนมีค่าสมมาตรในกรณีที่ e/B = 0 เมื่อ e/B มีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนแปลง

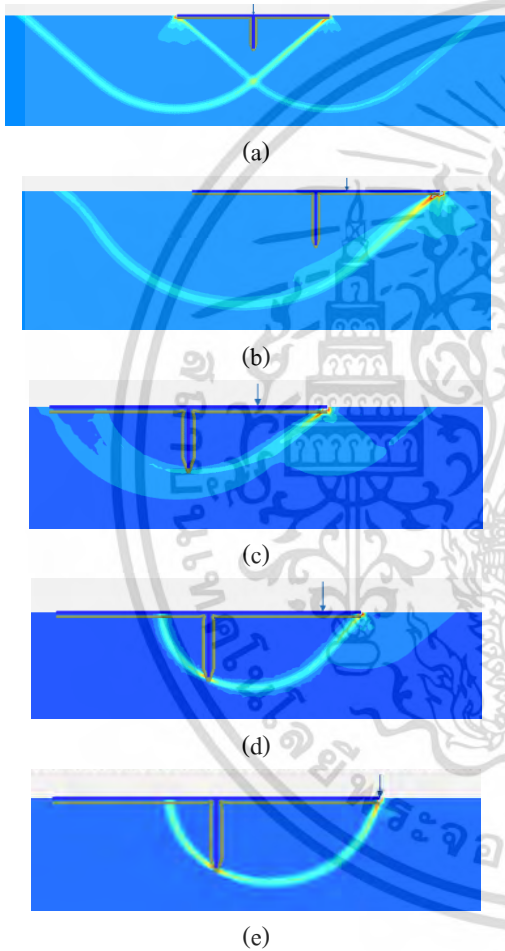
มากที่สุดที่บริเวณมุมของฐานรากเช่นเดียวกับกรณีที่ D/B = 0 แต่เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนจะค่อยๆตัดผ่านบริเวณปลายฐานรากรูปตัวที โดยความเครียดเฉือนในกรณี e/B = 0.5 จะเหมือนกับกรณีที่ D/B เท่ากับ 0 โดยเส้นความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มจากปลายสุดและเคลื่อนผ่านข้างใต้สุดของส่วนที่ฝังในดินของฐานรากรูปตัวที การขยายตัวของเส้นแรงเฉือนในลักษณะนี้เป็นข้อพิสูจน์ได้ว่า ความเค้นตรงปลายสุดของฐานรากรูปตัวทีจะไม่เข้าสู่อนันต์ ทำให้ฐานรากรูปตัวทีที่มีแรงเยื้องศูนย์กลางอยู่ที่ปลายสุด (e/B = 0) สามารถคำนวณหาแรงกระทำในแนวตั้งสูงสุด (Q) ที่กระทำได้



รูปที่ 3 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า D/B = 0 และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ $D/B = 1.5$ พบว่าความเครียดเฉือนมีค่าสมมาตรในกรณีนี้ $e/B = 0$ เมื่อ e/B มีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนไปในกรณีนี้ จะมีความเครียดเฉือนอยู่บริเวณมุมทั้งสองมุมของฐานราก และค่อยๆเปลี่ยนไปตามอัตราส่วน e/B ที่เพิ่มขึ้น โดยแนวความเครียดเฉือนจะเลื่อนตำแหน่งขึ้นมามากกว่าระยะยื่นของฐานรากรูปตัวที ซึ่งต่างจากกรณีนี้ $D/B = 0$ และ 0.25

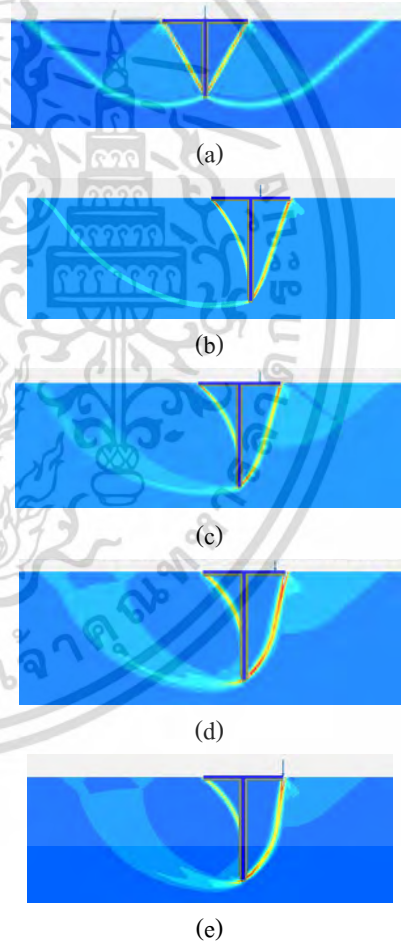


รูปที่ 4 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า $D/B = 0.25$ และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5

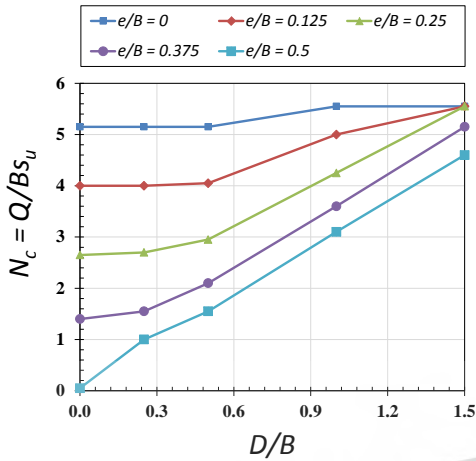
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทาน (N_c) กับอัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรูปตัวที (D/B) ที่อัตราส่วน $e/B = 0, 0.125, 0.25, 0.375$ และ 0.5 พบว่าเมื่ออัตราส่วน D/B ที่ค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีนี้

e/B มาก ส่วนในกรณีนี้ e/B น้อย ($e/B = 0$ และ 0.375) จะมีแฟกเตอร์กำลังก่อนข้างคงที่ในช่วงแรกก่อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อ $D/B = 0.3$ เมื่อพิจารณาที่กรณี $D/B = 0$ และ $e/B = 0$ พบว่ามีค่าผลเฉลยเท่ากับ 5.14 ซึ่งเท่ากับผลเฉลยแม่นยำตรงของ Prandtl [5-6]

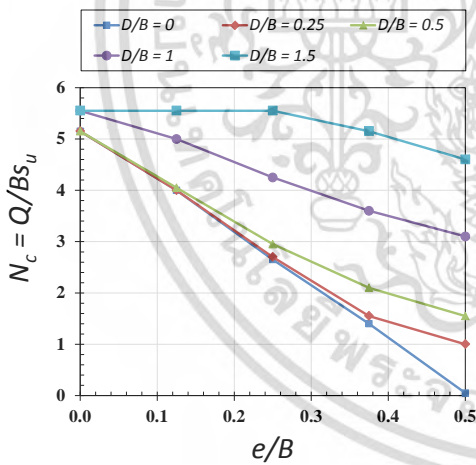
รูปที่ 7 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับ อัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที ที่อัตราส่วน $D/B = 0, 0.25, 0.5, 1$ และ 1.5 พบว่า ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลงเมื่อค่า e/B มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน D/B จะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า $D/B = 1.5$ และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5



รูปที่ 6 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับอัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรูปตัวที นอกจากนี้ จากรูปที่ 6 และ 7 ยังพบว่า กรณี $D/B = 0, 0.25, 0.5$ จะมีค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานใกล้เคียงกันในช่วงแรก และจะเริ่มแตกต่างกันในช่วงหลัง สำหรับกรณีที่ $e/B = 0.5$ กรณี $D/B = 0$ จะให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานเท่ากับ 0 หรือแรงกด (Q) เท่ากับ 0 ในขณะที่สองกรณีที่เหลือให้ค่ามากกว่า 0



รูปที่ 7 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับ อัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรูปตัวที

ในแง่ของการใช้งาน เนื่องจากผลเฉลยทั้งหมดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ผู้ใช้ตารางสามารถคำนวณได้จากขนาดความกว้าง (B) ของฐานรากรูปตัวที เช่น $B = 1$ เมตร จากนั้นก็พิจารณาว่าแรงเชิงศูนย์กลางไปจากจุดกึ่งกลางของฐานราก (e) เท่าไหร่ เช่น เชียงไป $e = 0.25$ เมตร ดังนั้นจะได้ว่า $e/B = 0.25$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ

จากนั้นผู้ใช้ต้องลองกำหนดความยาวของระยะฝั่ง (D) ของฐานรากขึ้นมา เช่น $D = 1$ เมตร ก็จะได้ว่า $D/B = 1$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติเช่นกัน จากนั้น นำค่าพารามิเตอร์ไร้มิติทั้งสอง (e/B และ D/B) ไปพิจารณาในรูปที่ 6 (หรือรูปที่ 7) ก็จะพบว่า ค่า N_c หรือ Q/Bs_u ที่ได้จะมีค่าประมาณ 3.6 ซึ่งหมายถึงฐานรากสามารถรับแรงกดแนวตั้งสูงสุดหรือ $Q = 3.6Bs_u$ สำหรับค่า s_u หรือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนชั้นบนสุด (First Layer Soft Clay) ของกรุงเทพมหานคร จะมีค่าอยู่ประมาณ 1.5 ตัน/เมตร ดังนั้นค่า $Q = (3.6 \times 1 \times 1.5) = 5.4$ ตัน ซึ่งหมายถึงฐานรากที่มีความยาว 1 เมตร ในดินเหนียวอ่อนชั้นแรกของกรุงเทพมหานครสามารถรับแรงแนวตั้งที่เชิงศูนย์กลาง 0.25 เมตร (อาจจะป็นแรงที่ถ่ายลงมาจากเสาเป็นต้น) ได้ด้วยแรงสูงสุด 5.4 ตัน (โดยค่า Q ตัวนี้ ยังไม่มีการนำเอาไปหาร FS (Factor of Safety) หากนำไปหาร FS จะได้ $Q_{FS} = Q/FS$ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าน้อยลงโดยค่า FS ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนด)

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์แรงกดในแนวตั้งเชิงศูนย์กลางของฐานรากรูปตัวทีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทาน (N_c) จากผลการศึกษาพบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

1. อัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B)
2. อัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B)

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ D/B มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่า e/B มากขึ้นจะส่งผลให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลง

ท้ายที่สุด ผู้เขียนได้นำเสนอตัวอย่างการออกแบบฐานรากรูปตัวทีในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครโดยใช้รูปที่ 6 หรือ 7 ในการคำนวณ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*, New York: Wiley. USA, 1943.
- [2] A. W. Skempton, "The Bearing Capacity of Clays", *Building Research Congress*, London, 1, pp. 180–189, 1951.
- [3] G. G. Meyerhof, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Geotechnique*, No. 4, pp. 301–332, 1951.
- [4] G. G. Meyerhof, "Some Recent Research on Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, pp. 16–26, 1963.
- [5] Prandtl, L. "U"ber die Ha"rte Plastischer Ko"rper. *Nachr. Ges. Wiss. Go"tt.*, Math-Phys. Kl. 12, pp. 74–85, 1920.
- [6] L. Prandtl, "Eindringungsfestigkeit und Festigkeit von Schneiden. *Zeit Angew*", *Math. Mech.* 1, 15, 1921.
- [7] G. T. Houlsby, C. M. Martin, "Undrained Bearing Capacity Factors for Conical Footings on Clay", *Geotechnique* 53, No. 5, pp. 513–520, 2003.
- [8] R. Salgado, A. V. Lyamin, S. W. Sloan, H. S. Yu, "Two and Three-Dimensional Bearing Capacity of Foundations in Clay", *Geotechnique* 54, No. 5, pp. 297–306, 2004.
- [9] D. H. Edwards, L. Z. Dravkovic, D. M. Potts, "Depth Factors for Undrained Bearing Capacity". *Geotechnique* Vol. 55, No. 10, pp. 755–758, 2005.
- [10] S. Keawsawasvong, B. Ukritchon, "Effect of Embedded Depth on End Bearing Capacity of Footing on Clays", *Engineering Journal Chiang Mai University*, Vol. 23, No. 1, pp. 11-19, 2016.
- [11] S. Keawsawasvong, B. Ukritchon, "Bearing Capacity of Strip Foundations on Anisotropic Clay Using NGI-ADP Constitutive Model" *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 98-103, 2016.
- [12] B.M. Das, *Principle of Foundation Engineering* 2nd ed. PWS Kent Publishing Company, USA, 190.
- [13] N. Kaya, M. Ornek, "Experimental and Numerical Studies of T-shaped Footing", *Acta Geotechnica Slovenica*, Vol. 10, No. 1, pp. 43-58, 2013.
- [14] R. B. J. Brinkgreve, *PLAXIS 2D Version 8 Manual*. A.A. Balkema Publishers, 2002: www.plaxis.com.
- [15] S.W. Sloan, "Geotechnical Stability Analysis". *Geotechnique*, Vol. 63, No. 7, pp.531–572, 2013.