

การศึกษาความเหมาะสมของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดงานขุดโดยเปรียบเทียบ วิธีสมดุลจำกัด, ไฟไนต์อีลิเมนต์ และสมดุลจำกัดร่วมกับการพิจารณาหน่วยแรงในมวลดิน

Study of Slope Stability Analysis by Comparing the Limit Equilibrium, Finite Element and Stress Based Method

วารุณี กะการดี¹ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์² และ รัฐธรรม อัสโรพาร³

¹ วิศวกรปฐพี, ² รองศาสตราจารย์ และ ³ วิศวกรปฐพีอาวุโส

หน่วยวิจัยงานออกแบบทางวิศวกรรมปฐพี ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (GERD)

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กทม.

E-mail: ¹ warunee_bn@hotmail.com, ² Sorulump_s@yahoo.com, ³ nuk_civil@yahoo.com

บทคัดย่อ

การจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินมีหลายวิธี แต่ยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่าวิธีใดที่เหมาะสมกับลาดงานขุดดินระดับลึก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการขุดดินเพื่อขายในเชิงพาณิชย์ ทำให้เกิดเป็นบ่อดินขนาดใหญ่และลึก บทความนี้นำเสนอผลวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดงานขุดในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้ง 3 วิธี ได้แก่ LEM, FEM และ SBM สำหรับบทความนี้เสนอการศึกษา 2 กรณี ได้แก่ 1) การศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปร ได้แก่ ความลึก ความกว้างและความลาดชัน 2) การศึกษาความปลอดภัยเนื่องมาจากรูปแบบการรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (รูปแบบ A, B และ C) พิจารณาทั้งกรณีมีและไม่มีชั้น Weathered Crust

ผลการศึกษาพบว่าดินที่มีค่า $c \geq 2.5 \text{ t/m}^2$ การขุดที่ความลึก 3.0 เมตร มีความปลอดภัย สำหรับดินที่มีค่า $c < 2.5 \text{ t/m}^2$ พบว่าค่า F.S. ขึ้นอยู่กับความลึกและความลาดชันของการขุดโดยตรง นอกจากนี้พบว่าความกว้างปากบ่อขุดไม่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน และการมีชั้น Weathered Crust ช่วยให้ชั้นดินที่มีพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนตามความลึก (รูปแบบ A และ C) มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อชั้นดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนคงที่ตามความลึก (รูปแบบ B) นอกจากนี้กรณีวิเคราะห์พบวิธี SBM_FE อาจทำให้เข้าใจผิดถึงจุดยิบติ (Yield Point) ที่แท้จริง ซึ่งจากวิธี FEM ตำแหน่งการเกิด Yield Point มีระยะไกลกว่าวิธี SBM_FE เป็นเหตุผลว่าเมื่อวิเคราะห์โดยวิธี FEM จะสามารถขุดได้ลึกกว่าวิธีอื่น

คำสำคัญ: เสถียรภาพของลาดดิน, กำลังรับแรงเฉือน

Abstract

This paper study of the slope stability in excavation work. Two case studies have been brought to attention for the research. 1) The affect of depth, width and slope of excavation pit to slope safety. 2) The affect of undrained shear strength (S_u) pattern of Soft Bangkok Clay. Three analysis methods, have been used namely: LEM, FEM and SBM. The study results are found that when cohesion (c) value of Soft Bangkok Clay $\geq 2.5 \text{ t/m}^2$, the excavation at 3 m depth is still in good safety. However, if $c < 2.5 \text{ t/m}^2$ it found that the F.S. depend on the depth and slope of the excavation pit. As for the affect of weathered crust there

has no affect on stability for shear strength pattern B. On the other hand pattern A and C, the weathered crust has positive affect to slope stability. The result also found that the majority of failure plane has been found in soft clay layer. However, SBM_FE might miscalculate actual yield points this were effect the safety of slope.

Keywords: Limit Equilibrium, Finite Element, Stress Based

1. คำนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในงานวิศวกรรมปฐพีที่ซับซ้อนอาจจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง ซึ่งวิธีการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในแบบจำลองมีด้วยกันหลายวิธี ทั้งนี้ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าวิธีที่เหมาะสมหรือเพียงพอต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในงานขุดระดับลึก การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับดุลพินิจของวิศวกรแต่ละท่าน งานวิจัยนี้นำวิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method, LEM), วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และวิธีสมดุลจำกัดร่วมกับการพิจารณาหน่วยแรงในมวลดิน (Stress Based Method, SBM) มาใช้วิเคราะห์สำหรับเปรียบเทียบ ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) อันได้แก่ ความลึกการขุด ความลาดชันการขุด ความกว้างของปากบ่อขุด รูปแบบลักษณะของกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่แตกต่างกัน อีกทั้งเนื่องจากงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการพัฒนาและปรับปรุงจัดทำประมวลข้อบังคับอาคาร (Building Code) สำหรับประเทศไทย โครงการย่อยที่ 8: ข้อบังคับเกี่ยวกับการขุดดินและถมดิน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาข้อกำหนดทางด้านเทคนิคสำหรับงานขุดดินในปัจจุบันว่ามีความถูกต้องเหมาะสมหรือไม่สำหรับพระราชบัญญัติการขุดดินและถมดิน พ.ศ. 2543

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อศึกษาเกณฑ์ขั้นต่ำของความลึกการขุดที่ปลอดภัยโดยไม่มีโครงสร้างป้องกันสำหรับชั้นดินทั่วไป
- 1.2 เพื่อศึกษาความปลอดภัยของพื้นที่ลาดงานขุดอันเนื่องมาจากรูปแบบกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
- 1.3 เพื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมความปลอดภัยของการขุดดินโดยวิธี LEM, FEM และ SBM

2. บทความปรีทัศน์และทฤษฎีพื้นฐาน

เนื่องจากบทความฉบับนี้เป็นบทความที่มีเนื้อหาต่อเนื่องจากบทความการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 วารุณี และสุทธิศักดิ์ (2533) ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องบางส่วนไว้แล้ว ในบทความนี้จะนำเสนอเนื้อหาเฉพาะในส่วนของการสมการสำหรับการคำนวณค่า F.S. ของลาดชันและรูปแบบกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพ

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันมีหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป งานศึกษานี้ได้นำวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ 3 วิธี ได้แก่ LEM, FEM และ SBM มาเปรียบเทียบพฤติกรรมความปลอดภัยของการขุดดิน

โดยวิธี LEM มีสมมุติฐานว่าวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน (Rigid Material) ซึ่งในความเป็นจริงวัสดุไม่ได้เป็นเช่นนั้น แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) จึงเป็นที่นิยมน้อยกว่าหลาย ส่วนวิธี FEM เป็นวิธีใหม่ที่น่าสนใจนำมาใช้กับงานวิศวกรรมปฐพี นอกจากจะทราบค่า F.S. ยังสามารถแสดงค่าอื่นได้อีกหลายอย่าง เช่น ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องเข้าใจแบบจำลองและมีค่าตัวแปรที่ถูกต้องในการวิเคราะห์ และวิธี SBM เป็นการนำวิธี LEM และ FEM มารวมกันโดยค่า F.S. ที่ได้จะมี 2 ค่า ทั้งค่าที่ได้จากวิธี LEM และวิธี FEM ต่อไปนี้ใช้ตัวย่อ SBM_LE และ SBM_FE ตามลำดับ วิธีนี้สามารถแสดงค่าได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นค่า กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น (Shear Mobilized) เป็นต้น ในแต่ละวิธีมีสมการเพื่อหาค่า F.S. ดังนี้

วิธีสมมูลจำกัด (LEM) [3] โดยปกติใช้วิธีการพิจารณาสมมูลจำกัดของมวลดิน ซึ่งสมมติให้มวลดินที่สนใจเกิดการเคลื่อนที่พอดี โดยจะทำการคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) แล้วทำการทดลองหาค่าของ F.S. โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือตำแหน่งของผิวเคลื่อนที่ซึ่งน่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนพบค่า F.S. ที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ (1)

$$F.S. = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear Stress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

ค่า F.S. ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM ในงานวิจัยนี้มาจากวิธีการคำนวณโดย Simplified Bishop Method

วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) เป็นวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) วิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่งานวิศวกรรมปฐพีนำมาใช้วิเคราะห์แก้ปัญหาต่างๆ เช่น การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของมวลดิน การวิเคราะห์การไหลซึม การวิเคราะห์การยุบตัวของดินเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เป็นต้น

วิธี Phi-c reduction เป็นหลักการที่ใช้เพื่อหาค่า F.S. ของวิธี FEM โดยวิธีดังกล่าว ใช้หลักการลดทอนค่ากำลังของตัวแปร $\tan \phi$ และ c ลงจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการพิบัติ ดังสมการที่ (2)

$$S.F. = \frac{\text{Available Strength}}{\text{Strength at Failure}} \quad (2)$$

งานวิจัยนี้อาศัยแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model) สำหรับจำลองพื้นผิวพิบัติ (Yield Surface) และกำหนดพฤติกรรมของดินเป็นลักษณะ Elastic-Plastic ซึ่ง Yield Surface นี้จะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของดิน (Soil Parameters) ที่ใส่เข้าไป และ Yield Surface นี้จะไม่ขึ้นอยู่กับความเครียด (Strain) หน่วยแรง (Stress) ใดๆก็ตามที่อยู่ภายในขอบเขตของ Yield Surface จะมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) โดยสมบูรณ์

วิธีสุดท้ายคือวิธีสมมูลจำกัดร่วมกับการพิจารณาหน่วยแรงในมวลดิน (SBM) [8] ค่า F.S. จะคำนวณโดยใช้หลักการเดียวกับวิธี LEM แต่หน่วยแรงที่กระทำกับผิวการเคลื่อนที่ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ FEM เพื่อความแตกต่างวิธี SBM จะเรียกค่าความปลอดภัยที่ได้ว่า Stability Factor (S.F.) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนต้านทาน (Available Resisting Shear Forces, S_r) ที่มีอยู่บริเวณพื้นผิวการเคลื่อนที่ (Slip Surface) ต่อผลรวมของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น (Mobilized Shear Forces, S_m) ดังสมการที่ (3)

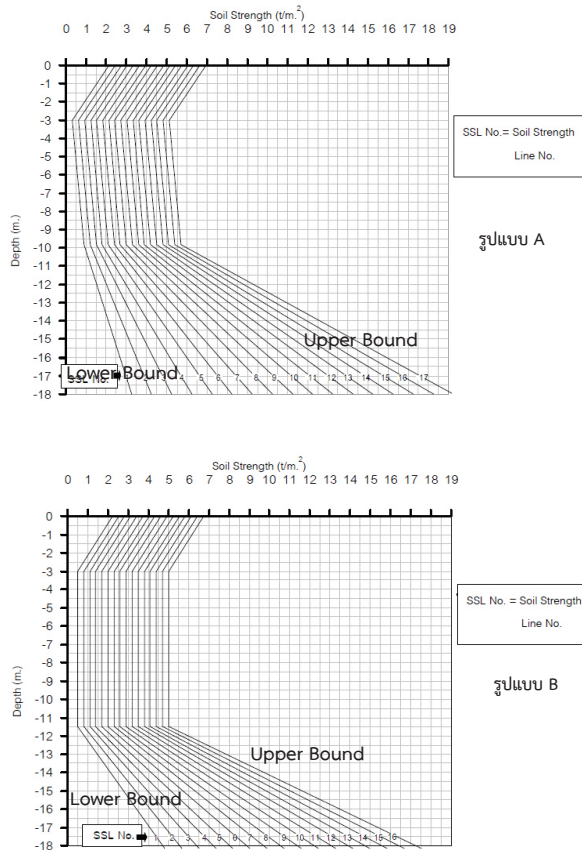
$$S.F. = \frac{\text{Available Resisting Shear Forces, } S_r}{\text{Mobilized Shear Forces, } S_m} \quad (3)$$

2.2 รูปแบบรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

[2] ได้ศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และความลึกพบว่าสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 1

- กำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะค่อย ๆ ลดลงตามความลึกในชั้น Weathered Crust จนถึงชั้นดินเหนียวอ่อนกำลังรับแรงเฉือนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเลยชั้นดินเหนียวอ่อนลงไปค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

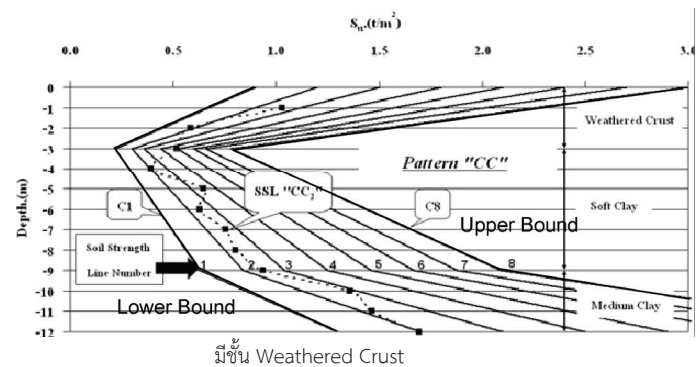
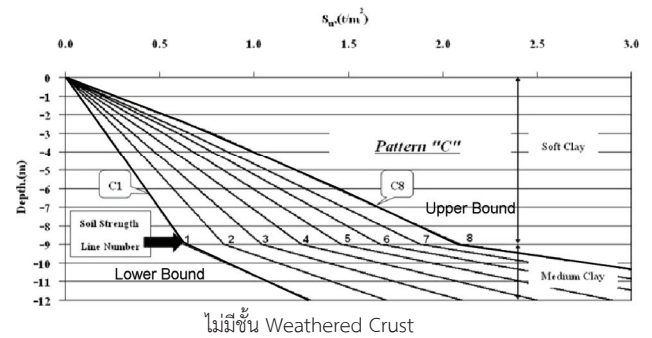
- กำลังรับแรงเฉือนรูปแบบที่ B ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะค่อย ๆ ลดลงตามความลึกในชั้น Weathered Crust จนถึงชั้นดินเหนียวอ่อนถึงจุดนั้นค่ากำลังรับแรงเฉือนจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเลยชั้นดินเหนียวอ่อนลงไปค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 เส้นแบ่งกำลังของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soil Strength Line of Soft Bangkok Clay) รูปแบบ A และ B [2]

นอกจากนี้ [7] ได้ศึกษาพฤติกรรมค่า S_u ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และความลึก จากโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ พบว่าสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบเช่นกัน เรียกว่า Soil Strength Line Pattern “C” (SSL “C”) เป็นกราฟที่ไม่มีชั้น Weathered Crust และ Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL “CC”) เป็นกราฟที่มีชั้น Weathered Crust ดังรูปที่ 2

SSL “C” มีลักษณะค่า S_u ในชั้นดินเหนียวอ่อน (ช่วงความลึก 0.0 ถึง -9.0 เมตร) ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเลยชั้นดินเหนียวอ่อนลงไปค่า S_u จะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจาก SSL “CC” ที่มีการแบ่งชั้น Weathered Crust (ช่วงความลึก 0.0 ถึง -3.0 เมตร) เพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะค่า S_u จะค่อยๆ ลดลงตามความลึก



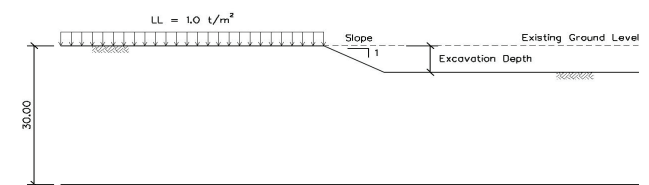
รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ของค่า S_u และความลึกของ SSL “CC” [7]

3. วิธีการศึกษาวิจัย

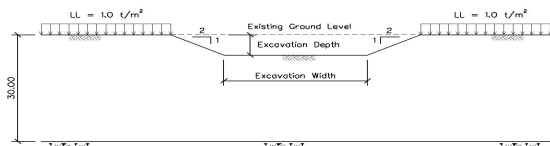
3.1 การศึกษาพฤติกรรมความปลอดภัยของการขุดดิน

กรณีที่ 1 การศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปร (Parametric Study) โดยได้ศึกษาความลึก ความกว้างและความลาดชันที่มีผลต่อพฤติกรรมความปลอดภัยของงานขุดเพื่อนำผลที่ได้นำมาสรุปเป็นเกณฑ์ขั้นต่ำของความปลอดภัยการขุดที่ปลอดภัยโดยไม่ต้องมีโครงสร้างป้องกันสำหรับดินทั่วไป การศึกษารูปแบบนี้ทำการวิเคราะห์โดยวิธี LEM ด้วยโปรแกรม KUSlope 2.0 ซึ่งจำลองชั้นดินให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันคุณสมบัติค่าตัวแปรของดินสำหรับงานขุดดินแสดงในตารางที่ 1

รูปร่างหน้าตัด (Geometry Section) ในการวิเคราะห์สำหรับงานขุดดิน เพื่อทำการวิเคราะห์ความลึกและความลาดชันในการขุดรวมถึงกรณีการวิเคราะห์ความกว้างบ่อขุดดิน แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะหน้าตัดในการวิเคราะห์สำหรับงานขุดดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4 ลักษณะหน้าตัดในการวิเคราะห์ความกว้างขุดดิน

กรณีที่ 2 การศึกษาความปลอดภัยเนื่องมาจากรูปแบบการรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

สำหรับการศึกษากำหนดวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM, FEM และ SBM ซึ่งลักษณะชั้นดินที่ศึกษาคือกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A, B และ C รายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

การศึกษาความปลอดภัยเนื่องมาจากรูปแบบการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้นำกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C กรณีไม่มีชั้น Weathered Crust มาเป็นฐานในการหาค่า S_u ของกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A และ B โดยแบ่งค่า S_u ออกเป็นช่วงระหว่าง Upper Bound และ Lower Bound โดยกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C ได้นำค่า Soil Strength Line เส้นที่ 1 (Lower Bound) และ 8 (Upper Bound) มาศึกษา และจากค่า S_u ที่ได้จากกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C สามารถหาค่า S_u จาก Soil Strength Line ของกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A และ B ได้แก่เส้นที่ 1 (Lower Bound) และ 4 (Upper Bound) จากทั้ง 2 รูปแบบ (ดังรูปที่ 1 และ 2) แสดง Soil Strength Line ของกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A, B และ C เส้นที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์

ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากจำลองการขุดชั้นละ 1 เมตร จนกระทั่งถึงความลึก 15 เมตร การศึกษาพิจารณาทั้งกรณีที่มีและไม่มี Weathered Crust ค่า S_u อยู่ช่วงระหว่าง Upper Bound และ Lower Bound ความลาดชัน 1:2 (ตั้ง:ราบ) ทั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงแรงกระทำภายนอก

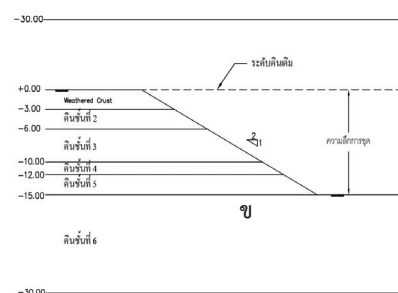
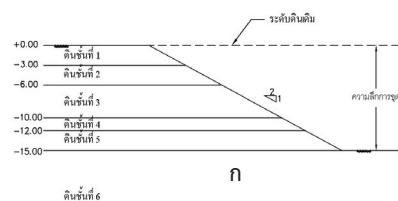
ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษากำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A, B และ C แสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สำหรับค่าตัวแปรจากทั้ง 3 รูปแบบเก็บทั้งหมดมาจากการศึกษาของ [2] และ [7] ยกเว้นค่า Young's modulus (E) และค่า Poisson's Ratio (ν) ที่ได้จากการศึกษารวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาโดยอ้างอิงจาก [1] ที่ได้ตรวจสอบเอกสารและรวบรวมไว้ สำหรับการวิเคราะห์กรณีนี้กำหนดให้ค่า $E = 240S_u$ อ้างโดย [1]

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรในการวิเคราะห์การศึกษากำหนดวิธี 1

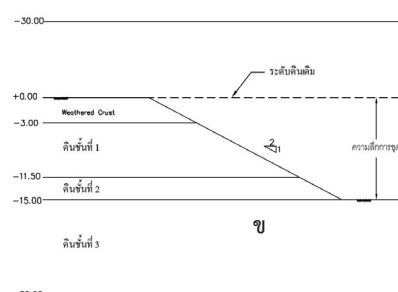
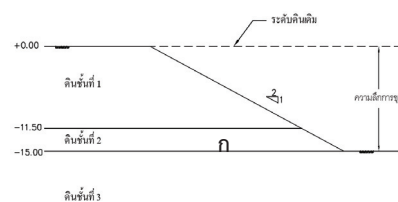
ลำดับที่	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์
1	ความลึกในการขุด	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 เมตร
2	ความลึกในการขุด - กรณีวิเคราะห์ความกว้างงานขุด	1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0 เมตร
3	คุณสมบัติดินขุด - Cohesion	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 ตัน/ตารางเมตร
4	คุณสมบัติดินขุด - Friction Angle	0, 10, 15, 20, 25, 30 องศา
5	ความลาดชันดินขุด (ตั้ง : ราบ)	1 : 0.0, 1 : 0.5, 1 : 1.0, 1 : 1.5, 1 : 2.0, 1 : 2.5, 1 : 3.0

6	ความกว้างขุด	2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 20.0 เมตร
7	ความหนาชั้นดิน	30.0 เมตร
8	หน่วยน้ำหนักดินขุด	2.0 ตัน/ลูกบาศก์เมตร
9	หน่วยน้ำหนักจรร	1.0 ตัน/ตารางเมตร

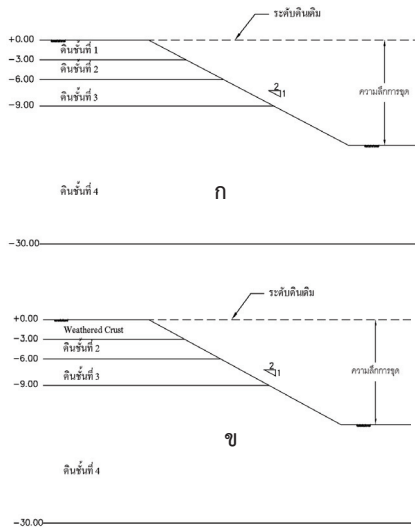
รูปร่างหน้าตัด (Geometry Section) สำหรับในการวิเคราะห์งานขุดดินที่มีลักษณะรูปแบบตามกำลังรับแรงเฉือนของรูปแบบ A, B และ C ดังแสดงในรูปที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 5 หน้าตัดตามกำลังรับแรงเฉือนของรูปแบบ A (ก.ไม่มีชั้น Weathered Crust ข.ชั้น Weathered Crust)



รูปที่ 6 หน้าตัดตามกำลังรับแรงเฉือนของรูปแบบ B (ก.ไม่มีชั้น Weathered Crust ข.ชั้น Weathered Crust)



รูปที่ 7 หน้าตัดตามกำลังรับแรงเฉือนของรูปแบบ C
(ก.ไม่มีชั้น Weathered Crust ข.ชั้น Weathered Crust)

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปร (Parameters) สำหรับกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ A

ค่าตัวแปร	ชั้นดิน (Soil Layer)							Unit	
	Weathered Crust	1	2	3	4	5	6		
γ_{sat}	15.1	14.8	15.1	15.3	15.6	16.2	17.0	kN/m ³	
γ_{sat}	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	14.0	14.0	kN/m ³	
E	E _{Lower}	1.92E+03	4.80E+02	1.20E+03	1.92E+03	2.88E+03	4.56E+03	7.20E+03	kN/m ²
	E _{Upper}	4.80E+03	2.64E+03	2.88E+03	3.84E+03	6.72E+03	9.12E+03	1.32E+04	kN/m ²
v	V _{Lower}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35	0.33	
	V _{Upper}	0.30	0.30	0.35	0.35	0.35	0.33	0.33	
c	c _{Lower}	8.00	2.00	5.00	8.00	12.00	19.00	30.00	kN/m ²
	c _{Upper}	20.00	11.00	12.00	16.00	28.00	38.00	55.00	kN/m ²
ϕ	0	0	0	0	0	0	0	o	

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปร (Parameters) สำหรับกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ B

ค่าตัวแปร		ชั้นดิน (Soil Layer)				Unit
		Weathered Crust	1	2	3	
γ_{sat}		15.6	15.1	15.9	17.4	kN/m ³
γ_{usat}		12.0	12.0	12.0	14.0	kN/m ³
E	E _{Lower}	3.12E+03	1.20E+03	3.60E+03	9.12E+03	kN/m ²
	E _{Upper}	5.04E+03	3.55E+03	9.12E+03	1.44E+03	kN/m ²
v	v _{Lower}	0.35	0.30	0.35	0.33	
	v _{Upper}	0.35	0.35	0.35	0.33	
c	c _{Lower}	13.00	5.00	15.00	38.00	kN/m ²
	c _{Upper}	21.00	14.80	38.00	60.00	kN/m ²
ϕ		0	0	0	0	°

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปร (Parameters) สำหรับกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C

ค่าตัวแปร	ชั้นดิน (Soil Layer)					Unit	
	Weathered Crust	1	2	3	4		
γ_{sat}	16.0	16.0	18.0	18.0	20.0	kN/m ³	
γ_{usat}	14.0	14.0	15.0	15.0	16.0	kN/m ³	
E	E _{Lower}	1.22E+03	3.60E+02	8.40E+02	1.22E+03	2.35E+03	kN/m ²
	E _{Upper}	6.96E+03	1.22E+03	2.88E+03	4.08E+03	6.48E+03	kN/m ²
V	V _{Lower}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
	V _{Upper}	0.33	0.30	0.35	0.35	0.35	
C	C _{Lower}	5.10	1.50	3.50	5.10	9.80	kN/m ²
	C _{Upper}	12.00	5.10	12.00	17.00	27.00	kN/m ²
ϕ	0	0	0	0	0	°	

สรุปวิธีการวิเคราะห์และแบบจำลองในการพิจารณาสำหรับ
การศึกษา แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปวิธีการวิเคราะห์และแบบจำลองในการศึกษา

วิธี	โปรแกรม	เสถียรภาพ ลาดชัน	แบบจำลอง ขอบเขตการ พิบัติ	แบบจำลองพฤติกรรม วัสดุ	
LEM	KUslope2.0	Bishop	Mohr-Columb	Rigid Perfectly Plastic	
FEM	PLAXIS 8.2	c- ϕ Reduction	Mohr-Columb	Elastic Perfectly Plastic	
SBM	Geo Studio 2004	Bishop	Mohr-Columb	LEM	FEM
				Rigid Perfectly Plastic	Linear-Elastic

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

1. การศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปร (Parametric Study)

การศึกษาความลึก ความกว้างและความลาดชันที่มีผลต่อพฤติกรรมความปลอดภัยของงานชุด (สำหรับกรณีนี้ความปลอดภัยที่ใช้ในการพิจารณา F.S. ≥ 1.5) กรณีนี้วิเคราะห์ด้วยวิธี LEM เท่านั้น

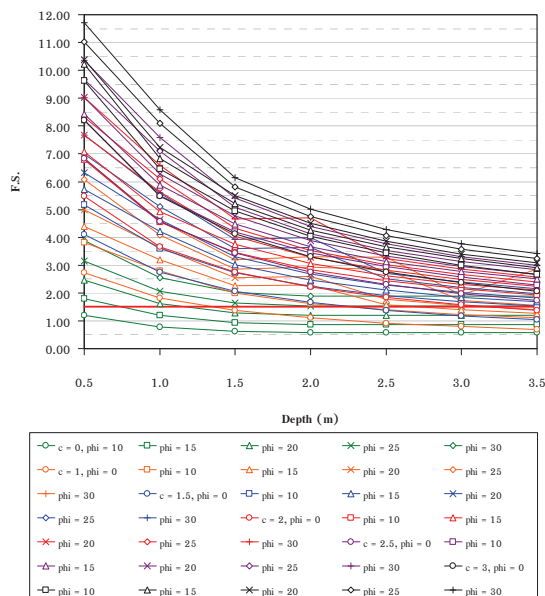
(ก) งานชุดดินทั่วไป

จากผลการวิเคราะห์ค่า F.S. ที่ความลึกในการขุด และความลาดชันต่างๆ เมื่อชั้นดินขุดมีกำลังที่แตกต่างกัน พบว่าทั้งความลึกและความลาดชันการขุดมีผลต่อค่า F.S. ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงค่า F.S. มีค่าลดลงตามความลึกการขุดและรูปที่ 9 แสดงความชันที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า F.S. ลดลง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมปกติที่ควรจะเป็น

(ข) งานชุดดินที่มีความกว้างปากขุดไม่เท่ากัน

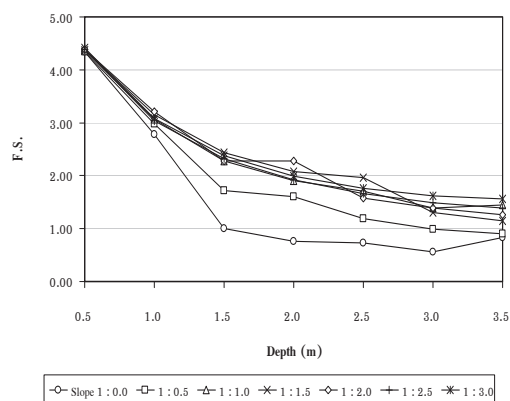
ผลการวิเคราะห์พบว่าความกว้างปากขุดพบว่ามีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินทุกลักษณะชั้นดิน ดังรูปที่ 10 แสดงตัวอย่างกรณีการขุดที่มีความลึก 3.0 เมตร ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟวางตัวในแนวนอนทุกความกว้างในการขุด

งานขุดดิน (Slope 1 : 2.0)



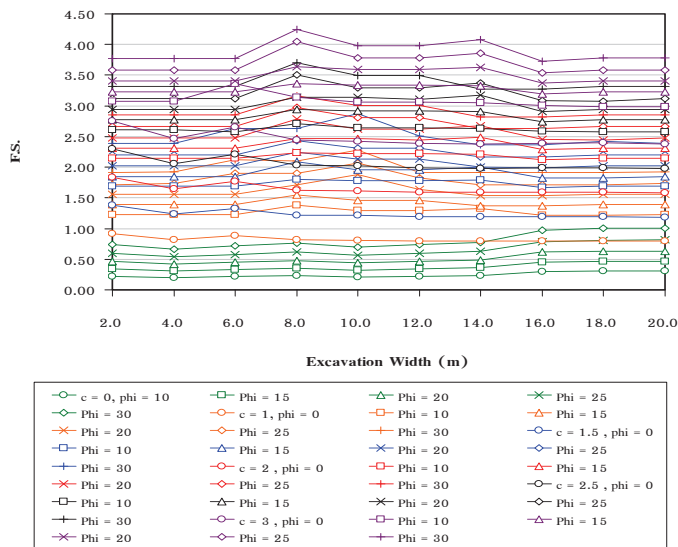
รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์สำหรับงานขุดดิน กรณีความลาดชัน 1 : 2.0

งานขุดดิน ($c = 1.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 15 \text{ deg}$)



รูปที่ 9 อัตราส่วนปลอดภัยสำหรับงานขุด เมื่อดินมีค่า $c = 1.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 15 \text{ deg}$.

ความกว้างปากขุดดิน (Depth = 3.0 m)



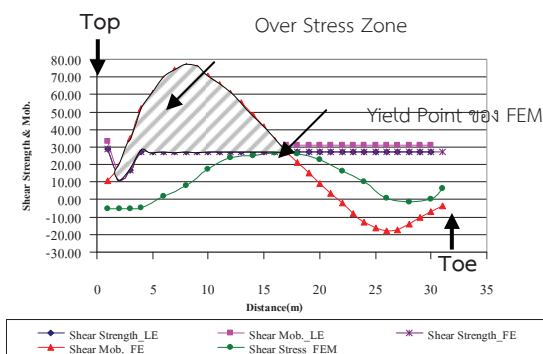
รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์สำหรับความกว้างปากขุดไม่เท่ากัน กรณีขุดลึก 3.0 เมตร

2. การศึกษาความปลอดภัยเนื่องมาจากรูปแบบการรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (สำหรับกรณีความปลอดภัยที่ใช้ในการพิจารณา $F.S. \geq 1.0$) การวิเคราะห์โดยวิธี LEM, FEM และ SBM ผลการศึกษาความลึกการขุดสูงสุดที่ได้จากทั้ง 3 วิธี ของกำลังรับแรงเฉือนในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในแต่ละรูปแบบแสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าค่าความลึกการขุดสูงสุดที่ได้จากวิธี LEM มีค่าใกล้เคียงกับกับวิธี SBM_LE และสำหรับวิธี FEM มีค่าความลึกการขุดใกล้เคียงกับ SBM_FE เช่นกัน จากการศึกษาลักษณะชั้นดินตามกำลังรับแรงเฉือนพบว่าวิธี LEM ให้ค่าที่ปลอดภัยที่สุด (Conservative) ทุกกรณี นอกจากนี้สำหรับวงการพิบัติที่เกิดขึ้นจากกำลังรับแรงเฉือนในแต่ละรูปแบบมีวงการพิบัติส่วนใหญ่อยู่บนชั้นดินอ่อนวงการพิบัติตัดผ่านชั้นดินที่มีความแข็งได้ยาก ยกเว้นกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C กรณีมีชั้น Weathered Crust ที่วงการพิบัติอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay)

ตารางที่ 6 สรุปความลึกสูงสุดที่สามารถขุดได้ในแต่ละรูปแบบ

รูปแบบ	Maximum Excavation Depth (ไม่มีชั้น Weathered Crust)			
	LEM	FEM	SBM	
			SBM_LE	SBM_FE
A	6	15	7	7
B	5	7	5	7
C	4	6	5	5
รูปแบบ	Maximum Excavation Depth (มีชั้น Weathered Crust)			
	LEM	FEM	SBM	
			SBM_LE	SBM_FE
A	7	15	9	12
B	6	8	6	7
C	7	9	8	9

สำหรับวิธี SBM สามารถพิจารณาค่า Shear Strength และ Shear Mobilization ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าการพิบัติได้ โดยรูปที่ 11 ได้แสดงตัวอย่างขณะเกิดการพิบัติของกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C กรณีมีชั้น Weathered Crust โดยการพิบัติจะเกิดขึ้นต่อเมื่อค่า Shear Mobilization รวม มีค่ามากกว่าค่า Shear Strength รวม ซึ่งแต่ละช่วงความยาวของหน้าการพิบัติค่า Shear Mobilization อาจมีค่ามากกว่าค่า Shear Strength เรียกว่าช่วง Over Strength Zone ซึ่งพฤติกรรมจริงการ Over Strength ดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงซึ่งแตกต่างจากวิธี FEM เมื่อถึงตำแหน่งที่เกิดการพิบัติตำแหน่งค่า τ_{xy} จะมีค่าเท่ากับค่า Shear Strength (ไม่มีการ Over Strength) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าแรงการพิบัติที่เกิดขึ้นของวิธี FEM พบว่ามีระยะไกลกว่าวิธี SBM โดยวิธี SBM การพิบัติจะอยู่บริเวณด้านบนจนกระทั่งถึงประมาณกึ่งกลางของความลาดชัน ซึ่งอาจทำให้เข้าใจผิดคิดว่าถึงจุด Yield Point แล้วดังนั้นการป้องกันและเสริมกำลังของเสถียรภาพที่เคยปฏิบัติกันมาที่ทำการเสริมกำลังเฉพาะด้านบนหรือบริเวณกึ่งกลางความลาดชันอาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมมากนัก จากการศึกษาพบว่าควรจะทำการป้องกันลาดชันเริ่มต้นที่กึ่งกลางของลาดชันจนกระทั่งเข้าใกล้ Toe Slope จะเหมาะสมมากกว่า



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Strength และ Shear Mobilization กับระยะหน้าการพิบัติ (Distance) กำลังรับน้ำหนักของชั้นดินมีเฉพาะ ค่า c ความชื้น 1:2 (ตั้ง : ราบ)

5. สรุป

1. ดินที่มีค่า $c \geq 2.5 \text{ t/m}^2$ หรือตั้งแต่ Medium Clay เป็นต้นไป การขุดลึก 3.0 เมตร (ตามข้อบังคับ) มีความปลอดภัย สำหรับดินที่มีค่า $c < 2.5 \text{ t/m}^2$ หรือ Soft to Very Soft Clay หรือ Loose to Very Loose Sand ($\phi < 25^\circ$) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับความลึก และความลาดชันการขุดโดยตรง
2. ความกว้างปากบ่อขุดไม่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ทุกลักษณะชั้นดิน
3. จากรูปแบบกำลังรับแรงเฉือนที่ศึกษาพบว่าเมื่อจำลองการขุดที่ความลึกมากขึ้น เสถียรภาพจะลดน้อยลงตามที่ควรจะเป็น จนกระทั่งเมื่อถึงความลึกระดับหนึ่ง พบว่าค่า F.S. จะคงที่ไม่ว่าจะขุดไปมากกว่าเดิม ทั้งนี้เนื่องจากการพิบัติส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นดินเหนียวอ่อน ยกเว้นกรณีกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบ C ที่วางการพิบัติอาจตัดผ่านชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) บ้าง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองชั้นดินให้มีคุณสมบัติสม่ำเสมอเป็นชั้นเดียว ดังกรณีศึกษา

ที่ 1 พบว่าลักษณะวงการพิบัติมีขนาดกว้างและมีพื้นที่ผลกระทบมากกว่าการจำลองชั้นดินเป็นหลายชั้นดังนั้นการจำลองรูปแบบชั้นดิน จึงมีผลมากต่อลักษณะวงการพิบัติพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบและอัตราส่วนความปลอดภัย

4. ดินที่มีกำลังรับแรงเฉือน รูปแบบ A และ C การที่มีชั้น Weathered Crust จะช่วยให้เสถียรภาพของลาดชันดีขึ้น ทั้งนี้สำหรับรูปแบบ B) ไม่ว่าจะไม่มีหรือไม่มีชั้น Weathered Crust พบว่าเสถียรภาพของลาดชันไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่าชั้น Weathered Crust สำหรับกำลังรับแรงเฉือนบางรูปแบบมีส่วนช่วยให้เสถียรภาพการขุดเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันพบว่ามีการขุดหน้าดินชายในบางพื้นที่ ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวเป็นการลดเสถียรภาพของลาดชันการขุด

5. จากผลการวิเคราะห์พบว่าความลึกการขุดที่สามารถขุดได้บางกรณีมีค่าแตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM และวิธี FEM เนื่องจากทั้ง 2 วิธีมีทฤษฎีในการคำนวณ F.S. ที่แตกต่างกันส่งผลให้เสถียรภาพของลาดชันการขุดที่ได้แตกต่างกัน

6. สำหรับวิธีการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี พบว่าให้ค่า F.S. ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามสำหรับผู้ออกแบบควรพิจารณาเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมบางลักษณะงานอาจจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มากกว่า 1 วิธี สำหรับการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักอาจใช้วิธี LEM แต่หากจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมอย่างอื่นร่วมด้วยเช่น การเคลื่อนตัว เป็นต้น ควรใช้วิธี FEM ในการวิเคราะห์

7. วิธี SBM_FE เป็นทางเลือกอีกทางสำหรับการวิเคราะห์หาค่า F.S. ซึ่งเป็นวิธีใหม่สำหรับการหาค่า F.S. โดยพิจารณาหน่วยแรงที่กระทำต่อมวลพิบัติ (ที่พิจารณาเป็น Rigid Body) จากการศึกษพบว่าค่า F.S. ที่ได้จากการศึกษากรณีนี้ให้ค่าที่อยู่ในช่วงระหว่างวิธี LEM กับวิธี FEM (ค่า F.S. ของวิธี SBM_LE ใกล้เคียงกับวิธี LEM สำหรับ SBM_FE ใกล้เคียงกับวิธี FEM)

8. พระราชบัญญัติการขุดดินและถมดิน พ.ศ. ๒๕๔๓ อนุญาตให้การขุดดินที่ความลึกไม่เกิน 3 เมตร จะไม่ต้องแจ้งต่อเจ้าพนักงานท้องถิ่น จากการศึกษพบว่าข้อกำหนดดังกล่าวอาจไม่ครอบคลุมสำหรับดินทุกประเภท เนื่องจากดินที่มีกำลังน้อยมากไม่สามารถทำการขุดได้ที่ระดับความลึกไม่เกิน 3 เมตรอย่างปลอดภัย นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความลาดชันที่เหมาะสมอีกด้วย ดังนั้นการประกาศข้อบังคับเฉพาะพื้นที่นั้นมีความจำเป็น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีดินเหนียวอ่อน

6. กิตติกรรมประกาศ

ในนามของผู้วิจัยขอขอบพระคุณกรมโยธาธิการและผังเมืองภายใต้โครงการพัฒนาและปรับปรุงจัดทำประมวลข้อบังคับอาคาร (Building Code) สำหรับประเทศไทย โครงการย่อยที่ 8 : ข้อบังคับเกี่ยวกับการขุดดินและถมดิน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ก้องรัฐ นกแก้ว, 2547. การศึกษาพฤติกรรมทางกลในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] มณฑา ตันติพรหมินทร์, 2546. แผนภูมิสำหรับการออกแบบความสูงคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในเขตพื้นที่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] วรากร ไหมเรียง, 2546. วิศวกรรมเขื่อนดิน. โลบราลี นาย. กรุงเทพฯ.
- [4] วารุณี กะการดี, 2553. การศึกษาความเหมาะสมของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์: กรณีศึกษาทางลาดดินในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] วารุณี กะการดี และสุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2553. การศึกษาเสถียรภาพของลาดบ่อขุดดินระดับลึกในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ:กรณีศึกษาเปรียบเทียบวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, GTE023.
- [6] วันชัย เทพรักษ์, 2548. เอกสารประกอบการบรรยายเรื่องการก่อสร้างชั้นใต้ดินในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ,คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] สมพงศ์ โรจน์กังสดาล, 2552. คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์:กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] Krahn John. (2004). Stability Modeling with Slope/W.An Engineering Methodology.