

การศึกษาเสถียรภาพลาดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากแผ่นดินไหว ณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

A Study of Slope Stability under Seismic Loads at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Mittraphap Subdistrict, Muak Lek District, Saraburi Province

อริสมันต์ แสงธงทอง^{1*} และพงษ์ฤทธิ์ นิตวิวงศ์¹

Arissaman Sangthongtong^{1*} and Pongrit Nitiwong¹

Received: June 16, 2024; Revised: August 9, 2024; Accepted: August 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพลาดดินภายใต้แรงแผ่นดินไหว ณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งทิศทางแนวราบและแนวดิ่งที่ระยะห่างจากลาดดินในแนวราบ 2 เมตร งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเสถียรภาพลาดดินที่ค่าระดับความชัน 3 ระดับ ได้แก่ 1:1 1:2 และ 1:3 ของดินประเภท C (0.0465 g) และ D (0.0656 g) ที่แบกทานน้ำหนักของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ภายใต้ผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ซึ่งถูกคำนวณโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ. 1301/1302-61) ข้อมูลพารามิเตอร์จากรายงานผลการเจาะสำรวจดิน (Boring Log) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ โดยทำการสร้างแบบจำลองคุณลักษณะชั้นดินด้วยวิธี Mohr - coulomb ที่ประกอบไปด้วย ชั้นดินเหนียว (Undrained Model) ชั้นดินทราย (Drained Model) และชั้นดินแข็ง โดยกำหนดให้ทุกชั้นดินมีการเชื่อมแน่นและส่งผ่านพลังงานให้แก่กัน ผลการศึกษาพบว่า ชั้นดินประเภท C ให้ค่า F.S. มากกว่าชั้นดินประเภท D โดยที่ค่า F.S. จะแปรผันกับค่าระดับความชันของลาดดินที่ระดับความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ ในส่วนของการเคลื่อนตัวในทั้งสองทิศทาง ชั้นดินประเภท D ให้ผลการเคลื่อนตัวทั้ง 2 ทิศทางสูงกว่าชั้นดินประเภท C โดยแปรผันกับค่าระดับความชันของลาดดินที่ระดับความชัน 1:3 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ

คำสำคัญ : แรงแผ่นดินไหว; มยพ. 1301/1302-61; ไฟไนต์เอลิเมนต์; ความลาด; เสถียรภาพ

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

¹ Civil Engineering, Department Division of Education, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

* Corresponding Author, Tel. 06 3224 1755, E - mail: arissaman@rtaf.mi.th

Abstract

This research studied the stability of soil slopes under seismic loads at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy, Mittraphap Subdistrict, Muak Lek District, Saraburi Province. The objective of this research is to examine the Factor of Safety (F.S.) for slope stability and the displacement behavior of soil layers in both horizontal and vertical directions at a horizontal distance of 2 meters from the slope. This study investigated the stability at three slope inclination levels: 1:1, 1:2, and 1:3 of soil type C (0.0465 g) and type D (0.0656 g) which supported the weight of a 6-story residential building. These slopes were subjected to the impact of seismic loads in terms of the spectral response acceleration, which was calculated by the equivalent static force method according to the Department of Public Works and Town & Country Planning standards (DPT 1301/1302-61). The soil parameters from the Boring Log reports were utilized in the analysis using the two-dimensional finite element method. The soil profile was modeled employing the Mohr-Coulomb approach, comprising clay layers (Undrained model), sand layers (Drained model), and hard soil layers, which were assumed to be tightly bonded and capable of transmitting energy to each other. The results indicated that soil type C has a higher F.S. than soil type D, with the F.S. fluctuating according to the slope inclination ratios of 1:1, 1:2, and 1:3, respectively. In terms of displacement in both directions, soil type D exhibited greater movement than soil type C, with displacement varying according to the slope inclination ratios of 1:3, 1:2, and 1:1, respectively.

Keywords: Seismic Load; DPT1301/1302-61; Finite Element; Slope; Stability

บทนำ

จากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจ้างศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่คาดว่าจะมีพลัง รอยเลื่อนลำตะคองของกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพบว่า โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชตรียาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ตั้งอยู่ท่ามกลางรอยเลื่อนแผ่นดินไหว 3 รอยเลื่อน ประกอบไปด้วย รอยเลื่อนมวกเหล็ก รอยเลื่อนลำพญากลาง และรอยเลื่อนลำตะคอง โดยที่รอยเลื่อนที่พาดผ่านอำเภอมวกเหล็ก คือ รอยเลื่อนลำตะคอง ซึ่งมีรอยเลื่อนย่อยพาดผ่านอำเภอมวกเหล็ก จำนวน 2 รอยเลื่อนย่อย ประกอบไปด้วย รอยเลื่อนย่อยซับขาม ตำบลซับสนุ่น อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี มีความยาว 28 กิโลเมตร และรอยเลื่อนย่อยปางหัวช้าง ตำบลหนองย่างเสือ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี มีความยาว 10 กิโลเมตร เมื่ออ้างอิงประกาศกรมอุตุนิยมวิทยา เรื่อง อัปเดตข้อมูลแผ่นดินไหวที่อำเภopakช่อง จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ในอดีตเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 3.0 ริกเตอร์ จำนวน 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ประกาศ ณ วันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 มีจุดเหนือเกิดศูนย์แผ่นดินไหวที่ละติจูด 15.00 องศาเหนือ ลองจิจูด 101.00 องศาตะวันออกบริเวณทิศตะวันตกของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี และครั้งที่ 2 ประกาศ ณ วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559 มีจุดเหนือเกิดศูนย์แผ่นดินไหวที่ละติจูด 14.69 องศาเหนือ ลองจิจูด 101.38 องศาตะวันออกบริเวณอำเภopakช่อง จังหวัดนครราชสีมา โดยทั้ง 2 เหตุการณ์เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนลำตะคองที่มีความยาวของรอยเลื่อน 24 กิโลเมตร ซึ่งส่งผลให้ประชาชนในอำเภอมวกเหล็ก รับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือน แต่ไม่มีรายงานความเสียหาย ด้วยเหตุนี้จึงดำเนินการตรวจสอบพื้นที่โดยรอบโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชตรียาธิราช โดยใช้ข้อมูลทางธรณีวิทยาจากรายงานผลการเจาะสำรวจดิน (Boring Log) และข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์จากแผนที่ GIS (Geographic Information System) พบว่า ลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรือ

อากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เป็นลาดดินที่ผสมผสานระหว่างลาดดินธรรมชาติ (Natural Slope) และลาดดินจากการกระทำของมนุษย์ (Man Made Slope) ที่ความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 อีกทั้งด้านหลังของพื้นที่โรงเรียนฯ เป็นเขามะกอก ที่เป็นภูเขาหิน และมีหน้าผาสูงชัน ซึ่งอาจเกิดความเสียหายได้หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น [1] การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เป็นเหตุการณ์ที่คาดการณ์ล่วงหน้าได้โดยการตรวจวัดหรือวิเคราะห์หาสาเหตุเพื่อการออกแบบแก้ไข โดยจะส่งผลให้ความเสี่ยงเป็นศูนย์ หากรู้เท่าทันและปรับปรุงแก้ไขได้ทันที่ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในปัจจุบัน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [2] - [3] โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สำเร็จรูปที่ใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการใช้ทฤษฎี Pseudo Static Analysis [4] - [6] ร่วมกับน้ำหนักกระทำต่อลาดดิน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวที่กำหนดให้มวลดินต้องรับแรง Body Force จากแรงแผ่นดินไหว โดยอยู่ในรูปของค่าความเร่งในแนวราบ

งานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาความปลอดภัยในการรับน้ำหนักโครงสร้างของชั้นดินที่ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวและเสถียรภาพของพื้นที่ลาดดิน ในพื้นที่กรณีศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรี สำหรับอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง ที่ระยะห่างจากลาดดินในแนวราบ 2 เมตร เพื่อนำเสนอแนวทางการป้องกัน การแก้ไขความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น และก่อให้เกิดประโยชน์สำหรับวิศวกร สถาปนิก ผู้รับเหมาก่อสร้าง และชุมชนในพื้นที่ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

1.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับพื้นที่อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรี

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดพิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยสมมติให้สภาพชั้นดินในทุกพื้นที่เป็นแบบดินแข็งหรือหินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนโดยเฉลี่ยในช่วงจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร ($\bar{v}_s$) เท่ากับ 760 เมตรต่อวินาที ซึ่ง ณ อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรีมีค่า S_s เท่ากับ 0.057 และค่า S_1 เท่ากับ 0.041 [7] - [8]

1.2 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น

สภาพชั้นดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น มีผลกระทบต่อระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม จากหัวข้อ 1.1 มาใช้ในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมให้เหมาะสมกับสภาพดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร โดยประเภทของชั้นดินของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น เลือกใช้ชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็ง และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติ [7] - [8]

1.3 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ด้วยสมการที่ (1) - (2) [7] - [8]

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

โดยที่

S_{MS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

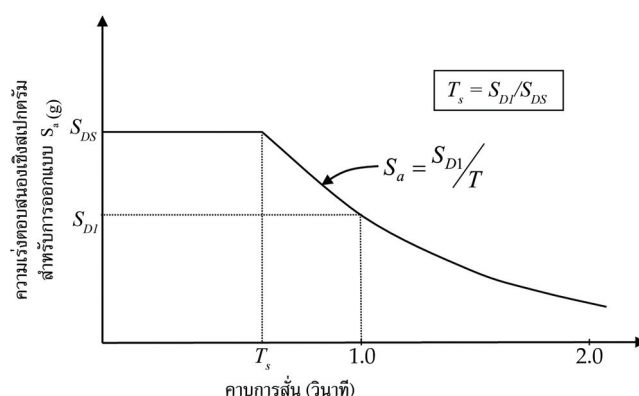
- S_{M1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร
- F_a คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที สำหรับชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็งมีค่า 1.2 ที่ $S_a \leq 0.25$ และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติมีค่า 1.6 ที่ $S_a \leq 0.25$
- F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที สำหรับชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็งมีค่า 1.7 ที่ $S_1 \leq 0.25$ และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติมีค่า 2.4 ที่ $S_1 \leq 0.25$

1.4 การปรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

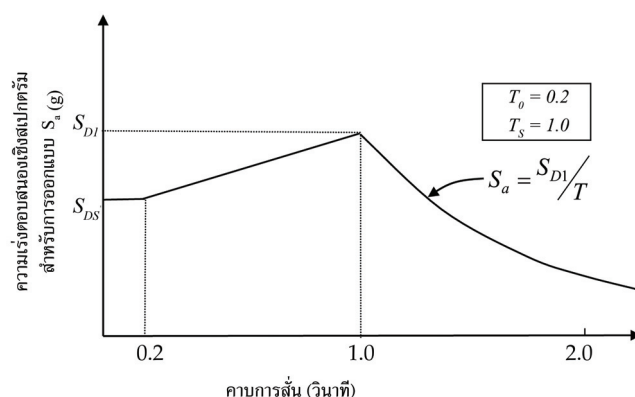
ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D1}) คำนวณจากสมการที่ (3) - (4) ดังรูปที่ 1 และ 2

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (4)$$



รูปที่ 1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ [7] - [8]



รูปที่ 2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ [7] - [8]

2. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope Stability) แบ่งเป็นลาดดินธรรมชาติ และลาดดินจากการกระทำของมนุษย์ โดยลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชเป็นลาดดินที่ผสมผสานทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งสาเหตุการพังทลายของลาดดิน เกิดจากการรบกวนรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น น้ำหนักภายนอก ฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง แรงโน้มถ่วงของโลก แรงเนื่องจากการซึมของน้ำ (Seepage of Water) การเกิดการร่อนของผิวลาดเนื่องจากการไหลของน้ำ การลดลงของระดับน้ำหน้าลาดดิน (Draw Down Effect) ผลจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว โดยแบ่งการพังทลายของลาดดิน ออกเป็น 2 ประเภท [9] - [10]

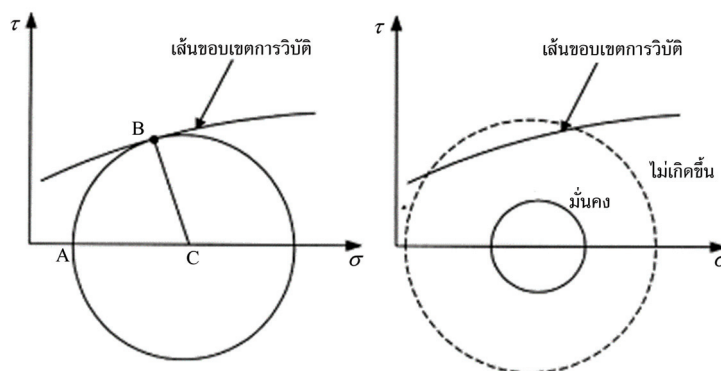
- 2.1 ลาดดินแบบต่อเนื่องไม่จำกัด (Infinite Slope) เกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่องขยายเป็นพื้นที่กว้าง
- 2.2 ลาดดินแบบจำกัด (Finite Slope) เกิดการพังทลายบริเวณจำกัดไม่แผ่ขยายพื้นที่

โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยวิธีลาดดินแบบจำกัด เลือกใช้การพังทลายแบบส่วนหนึ่งของวงกลม (Circular Slip) ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์โดยวิธี Principle of Slice เพื่อใช้แก้ปัญหาของสมการสมดุล โดยมีหลักการดังนี้ คือ [11] - [12]

- 2.2.1 สมดุลของแรงภายในชิ้นแนวดิ่ง (Force Equilibrium of Single Slice)
- 2.2.2 สมดุลของโมเมนต์ภายในชิ้นแนวดิ่ง (Moment Equilibrium of Single Slice)
- 2.2.3 สมดุลของแรงของชิ้นแนวดิ่งทั้งหมด (Force Equilibrium of Total Mass)
- 2.2.4 สมดุลของโมเมนต์ของชิ้นแนวดิ่งทั้งหมด (Moment Equilibrium of Total Mass)

3. กำลังเฉือนของลาดดิน (Shear Strength)

มวลดินจะเกิดการพิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการพิบัติ (Failure Envelop) ทั้งนี้หากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการพิบัติมวลดินจะสามารถรับแรงต่อไปได้โดยไม่พิบัติ [13] - [15] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉาก [11]

โดย Mohr and Coulomb แนะนำความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใด ๆ ของมวลดินในรูปของสมการเชิงเส้นตรงแสดงขอบเขตการวิบัติของมวลดิน ดังสมการที่ (5) - (6) [13] - [15]

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

เมื่อ

τ = หน่วยแรงเฉือนที่จุดพิบัติหรือค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)

σ = หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)

c = การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)

ϕ = มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal Friction Angle)

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (6)$$

เมื่อ

τ = หน่วยแรงตึงฉากจากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน = $\sigma - u$

σ' = แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure)

c' = การยึดเกาะกันประสิทธิผลของเม็ดดิน (Effective Cohesion)

ϕ' = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน

4. การคำนวณหาค่า Factor of Safety (F.S.)

วิธี Phi-c Reduction เป็นหลักการที่ใช้เพื่อหาค่า F.S. ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้หลักการลดทอนค่ากำลังของตัวแปร $\tan \phi$ และ c ลงจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการพิบัติดังสมการที่ (7) [3]

$$F.S. = \frac{\text{Available Strength}}{\text{Strength at Failure}} \quad (7)$$

งานวิจัยนี้อาศัยแบบจำลอง Mohr-Coulomb Model สำหรับจำลองพื้นผิววิบัติ (Yield Surface) และกำหนดพฤติกรรมของดินเป็นลักษณะ Elastic-Plastic ซึ่งพื้นผิววิบัติจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของดิน (Soil Parameter) ที่ใส่เข้าไป ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับความเครียดและหน่วยแรงใด ๆ ก็ตามที่อยู่ภายในขอบเขตของพื้นผิววิบัติ ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) โดยสมบูรณ์ [3]

5. ชั้นดินในแบบจำลอง

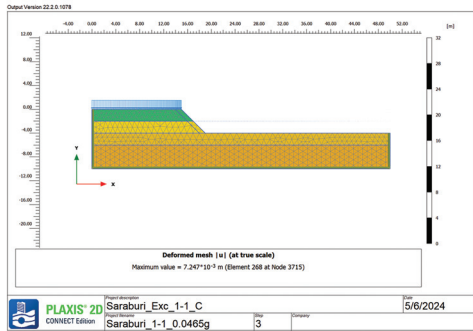
จากการเจาะสำรวจชั้นดิน ณ อาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ทำให้สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ [16] - [19] ที่ใช้ในการวิจัยดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า ที่ระดับ 0 - 2 m เป็นชั้นดินเหนียวปนทราย ที่ระดับ 2 - 6 m เป็นชั้นทราย และที่ระดับ 6 - 8 m เป็นชั้นดินแข็งหรือหิน ทั้งนี้กำหนดระดับน้ำใต้ดินไว้ที่ -2 m ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากการเจาะสำรวจชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลอง

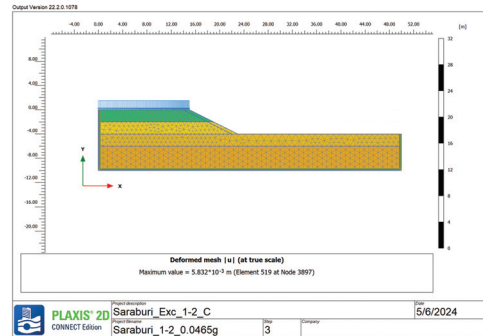
No.	Depth		Soil Classification	γ	SPT(N)	c	ϕ
	from	to		(t/m ³)		(t/m ³)	
1	4	0	Fill Material	1.80	-	2	22.0
2	0	2	Very Stiff Sandy Clay	1.75	13	6	-
3	2	4	Dense to Very Dense Sand	2.00	35	-	34.3
4	4	6	Very Dense Sand	2.10	70	-	39.0
5	6	10	Hard Soil	2.20	-	-	42.7

โดยที่

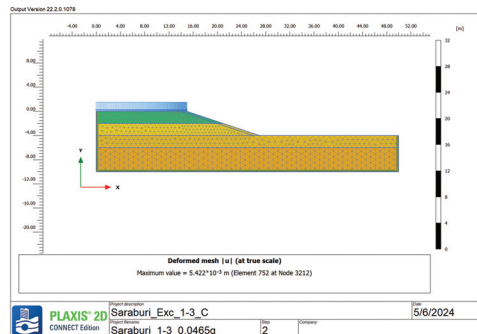
γ	คือ	หน่วยน้ำหนักของดิน (t/m ³)
SPT(N)	คือ	จำนวนครั้งที่นับได้ในการตอกให้ดินยุบ 30 cm
c	คือ	ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน (t/m ³)
ϕ	คือ	มุมเสียดทานภายในของดิน (องศา)



(ก) อัตราส่วนความชัน 1:1



(ข) อัตราส่วนความชัน 1:2



(ค) อัตราส่วนความชัน 1:3

รูปที่ 4 แบบจำลองชั้นดินชุด

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการรวบรวมข้อมูลที่ใช้สำหรับงานวิจัย สามารถแสดงผลได้ดังนี้ คือ

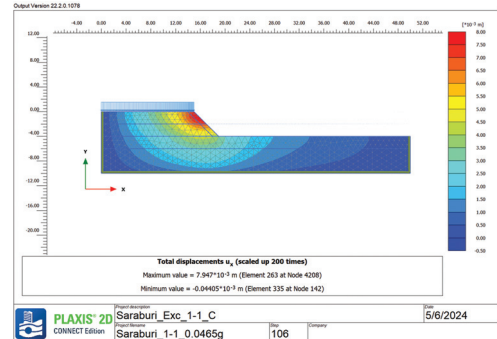
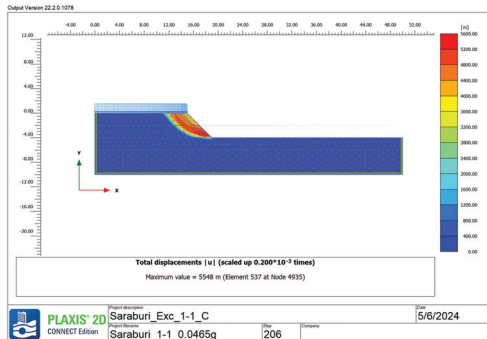
1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้สำหรับดินประเภท C ชั้นดินแข็งที่ 0.0465 g และดินประเภท D ชั้นดินปกติที่ 0.0656 g
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใช้วิธีลาดดินแบบจำกัด ภายใต้หลักการสมดุลของแรงภายในชั้นแนวตั้ง สมดุลของโมเมนต์ภายในชั้นแนวตั้ง สมดุลของแรงของชั้นแนวตั้งทั้งหมด และสมดุลของโมเมนต์ของชั้นแนวตั้งทั้งหมด ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D [20]
3. คำนวณค่ากำลังเฉือนของลาดดิน ด้วยวิธี Mohr and Coulomb เพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรม PLAXIS 2D
4. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดิน ได้แก่ หน่วยน้ำหนักของดิน (t/m^3) จำนวนครั้งที่นับได้ในการตอกให้ดินยุบ 30 cm ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน (t/m^3) และมุมเสียดทานภายในของดิน (องศา)
5. กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในระยะสั้น (Short-Term) 1-3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 ภายใต้มาตรฐานกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม และ FHWA-NHI [21] - [22]

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D สามารถแสดงผลได้ดังต่อไปนี้

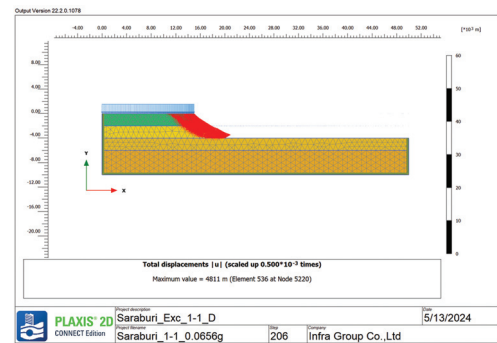
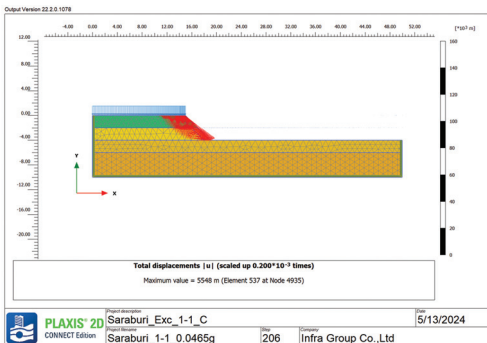
1. กรณีอัตราส่วนความชัน 1:1

อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 2.11 และดินประเภท D มีค่า 2.06 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 5

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวดิ่งที่อัตราส่วนความชัน 1:1 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 6.01 และ -5.10 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 6.55 และ -5.16 mm. ดังรูปที่ 6 โดยมีลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 7

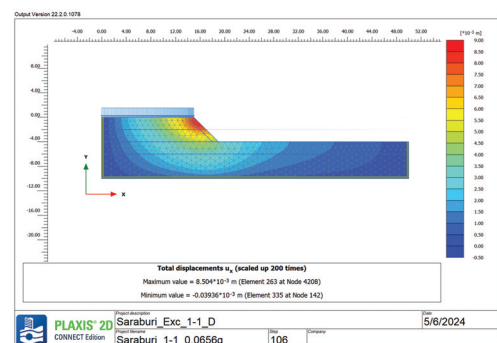
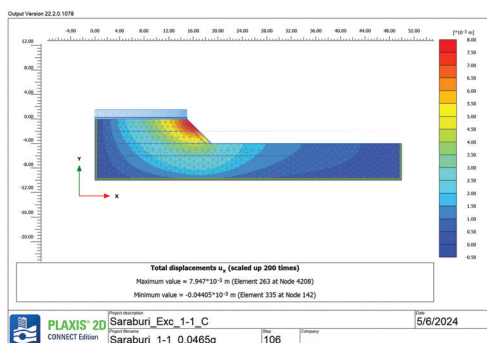


(ก) F.S. = 2.11 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g (ข) F.S. = 2.06 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



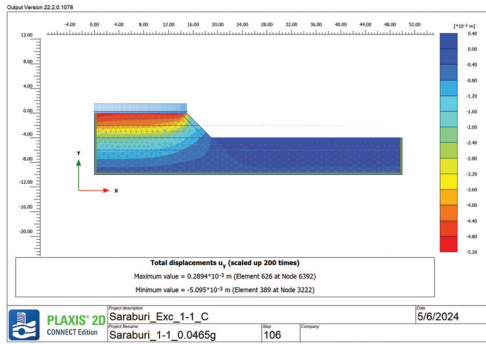
(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:1 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g
รูปที่ 5 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1

(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:1 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



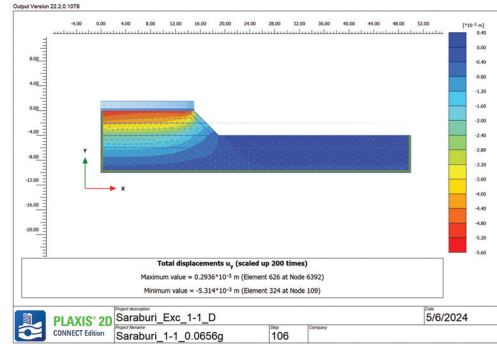
(ก) แนวราบ 6.01 mm. ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g
รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวดิ่งที่อัตราส่วนความชัน 1:1

(ข) แนวราบ 6.55 mm. ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



(ค) แนวโค้ง -5.10 mm.

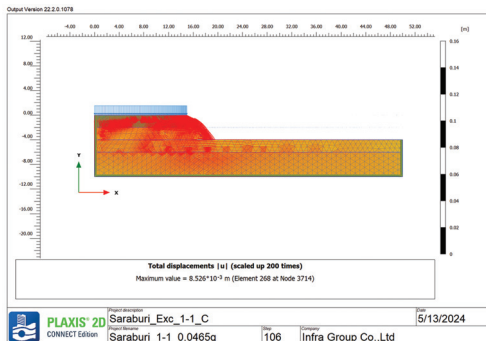
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



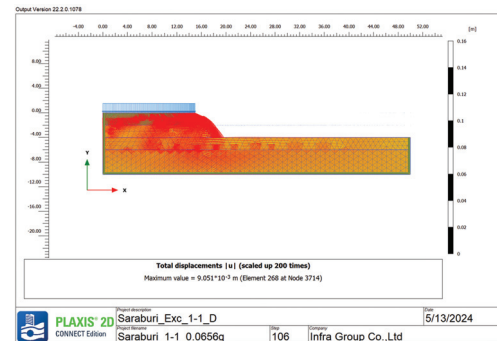
(ง) แนวโค้ง -5.16 mm.

ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:1 (ต่อ)



(ก) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



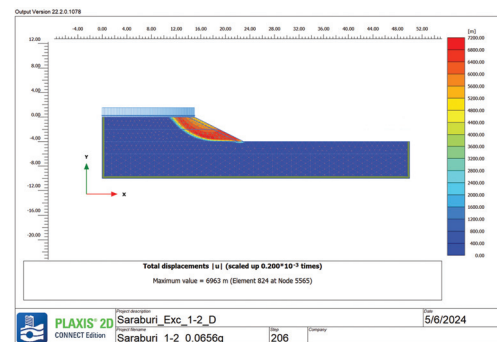
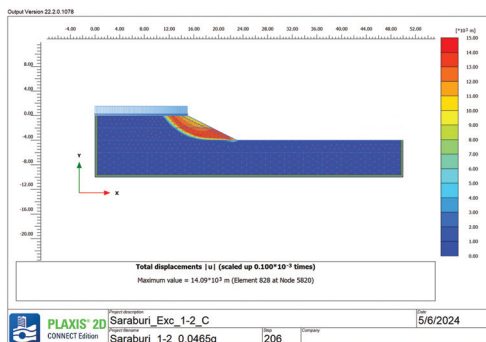
(ข) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 7 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:1

2. อัตราส่วนความชัน 1:2

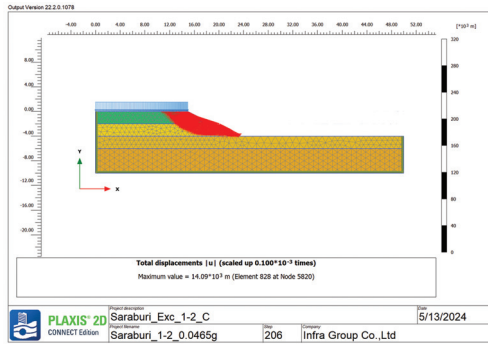
อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 2.62 และดินประเภท D มีค่า 2.54 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 8

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:2 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 4.98 และ -4.57 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 5.49 และ -4.61 mm. ดังรูปที่ 9 โดยมีลักษณะการเสียรูป และตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 10



(ก) F.S. = 2.62 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g (ข) F.S. = 2.54 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

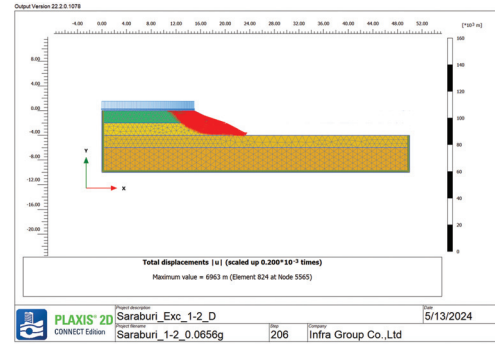
รูปที่ 8 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2



(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:2

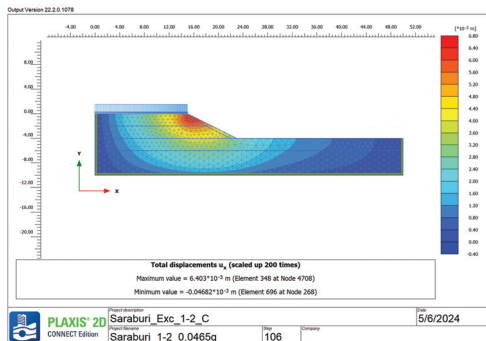
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

รูปที่ 8 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 (ต่อ)



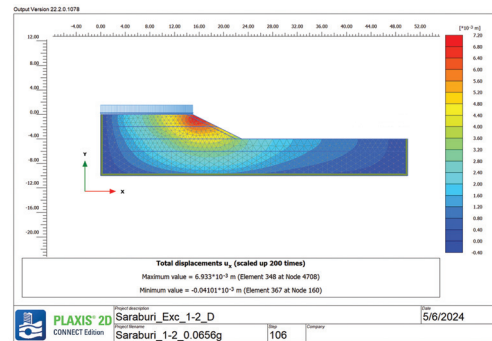
(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:2

ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



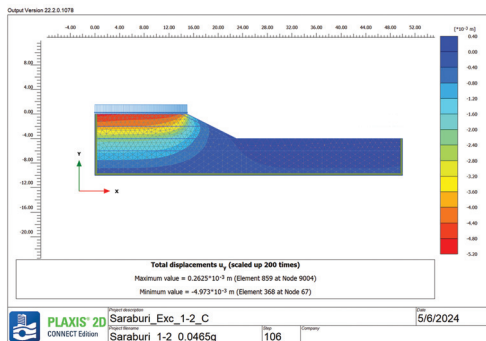
(ก) แนวราบ 4.98 mm.

ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



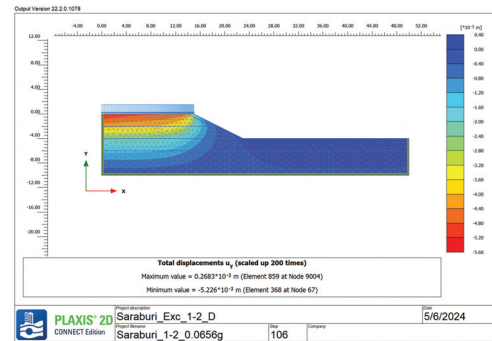
(ข) แนวราบ 5.49 mm.

ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



(ค) แนวตั้ง -4.57 mm.

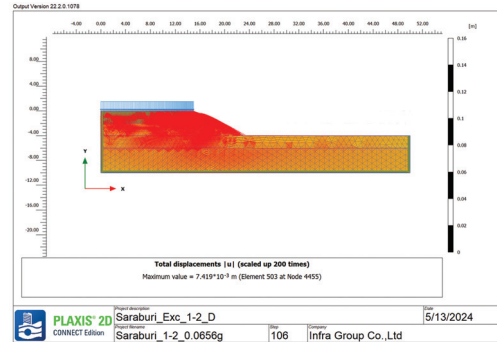
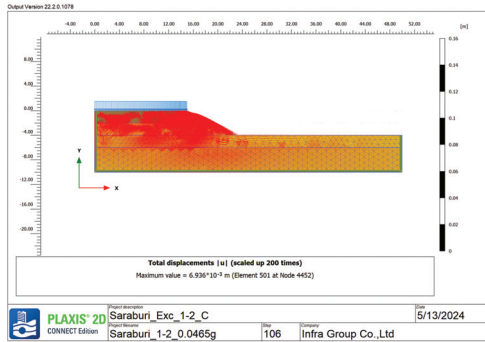
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



(ง) แนวตั้ง -4.61 mm.

ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:2

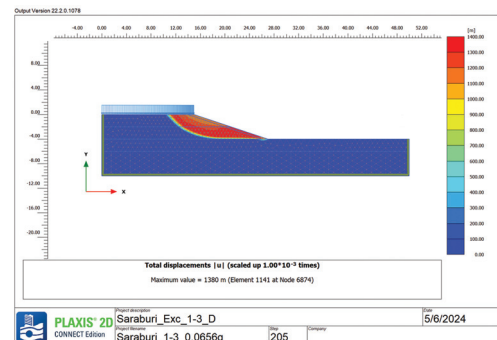
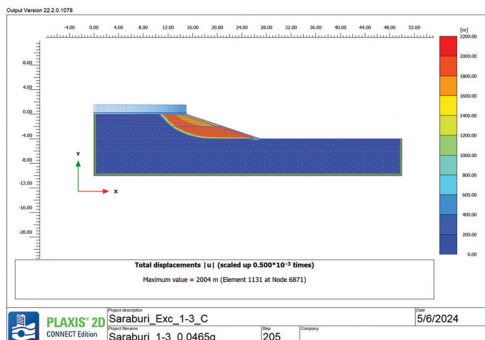


(ค) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g
รูปที่ 10 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:2

(ง) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

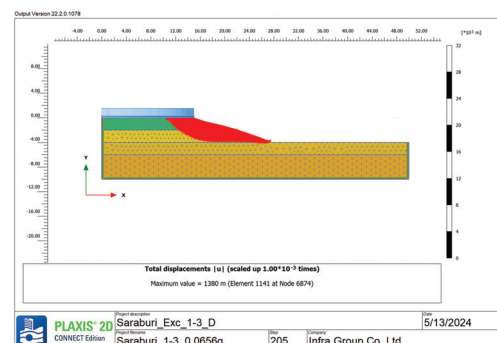
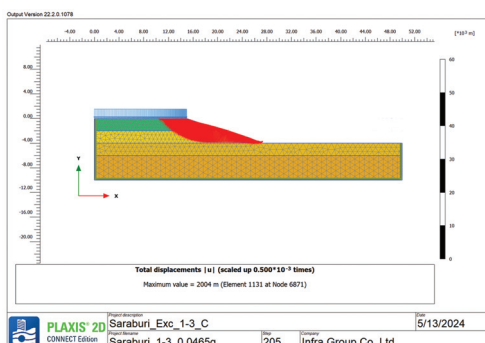
3. อัตราส่วนความชัน 1:3

อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 3.05 และดินประเภท D มีค่า 2.94 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 11



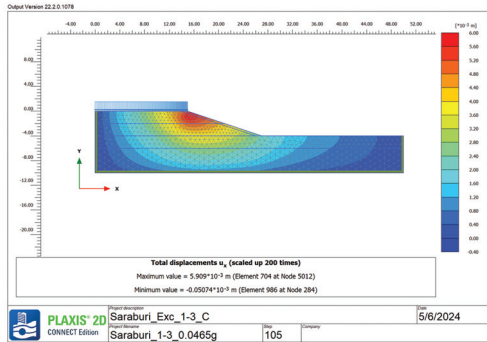
(ก) F.S. = 3.05 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

(ข) F.S. = 2.94 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

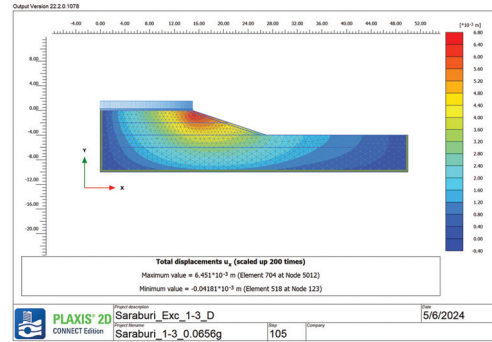


(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:3
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g
รูปที่ 11 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3

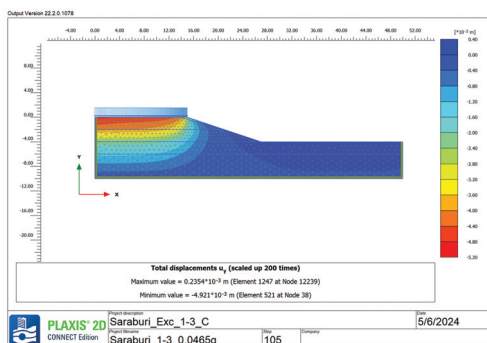
(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:3
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



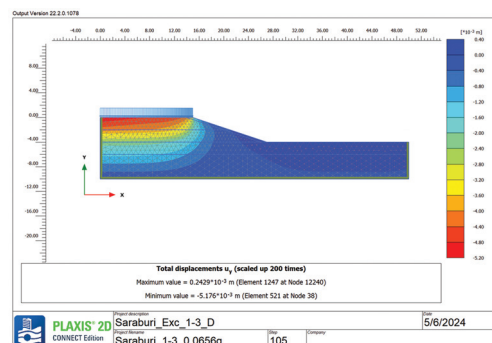
(ก) แนวราบ 4.64 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



(ข) แนวราบ 5.17 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

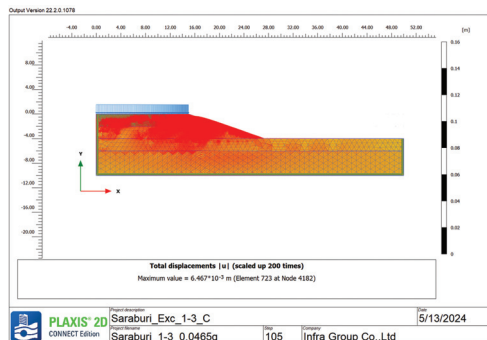


(ค) แนวตั้ง -4.41 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

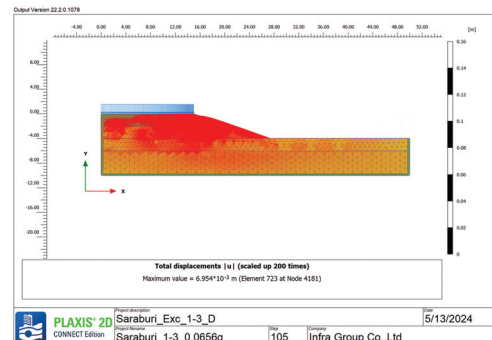


(ง) แนวตั้ง -4.46 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 12 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:3



(ก) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



(ข) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 13 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:3

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:3 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 4.64 และ -4.41 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 5.17 และ -4.46 mm. ดังรูปที่ 12 โดยมีลักษณะการเสียรูป และตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ของเสถียรภาพลาดดินที่มีอัตราส่วนความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวดิ่งที่ความชัน 3 ระดับ

Phase	Factor of Safety		Horizontal Displacement (mm)		Vertical Displacement (mm)	
	Zone C	Zone D	Zone C	Zone D	Zone C	Zone D
Excavation Slope 1:1	2.11	2.06	6.01	6.55	-5.10	-5.16
Excavation Slope 1:2	2.62	2.54	4.98	5.49	-4.57	-4.61
Excavation Slope 1:3	3.05	2.94	4.64	5.17	-4.41	-4.46

จากตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จะพิจารณาความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวเพิ่มเติม โดยกำหนดค่า F.S. ขึ้นภายใต้มาตรฐานกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม และ FHWA-NHI [21] - [22] ซึ่งค่า F.S. ในระยะสั้น (Short-Term) 1 - 3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และ F.S. ในส่วนระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า F.S. ที่อัตราส่วนความชันทั้ง 3 ระดับ มีค่ามากกว่า 1.3 และ 1.5 โดยค่า F.S. ต่ำสุดอยู่ที่ 2.06 ของระดับความชัน 1:1 ในดินประเภท D ชั้นดินปกติ ที่ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม 0.0656 g ซึ่งมากกว่าค่า F.S. ที่กำหนด อันเนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของดินต้นกำเนิด การเรียงตัวของชั้นดิน แรงต้านของดิน และมุมเสียดทานของดินที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคของดินที่ติดกันในลักษณะป้องกันการเคลื่อนที่ของดินไม่ให้อนุภาคดินเกิดการลาดตัวหรือการเคลื่อนไหวยของดินได้ ส่งผลให้ดินเกิดเสถียรภาพต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทุกทิศทางและแรงแผ่นดินไหวได้ เมื่อพิจารณาถึงประเภทของชั้นดินพบว่า ค่า F.S. ของดินประเภท C ชั้นดินแข็งจะมีค่ามากกว่าดินประเภท D ชั้นดินปกติทุกระดับความชัน อันเนื่องมาจากผลของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่กระทำต่อชั้นดินแปรผันตรงกับประเภทของชั้นดิน หากชั้นดินได้รับการสั่นสะเทือนมากจะส่งผลให้ค่า F.S. ต่ำลง และในส่วนของอัตราส่วนความชันทั้ง 3 ระดับของชั้นดินทั้ง 2 ประเภท จะแปรผกผันกับค่า F.S. กล่าวคือ เมื่อลาดดินมีความชันมาก ค่า F.S. จะต่ำ และเมื่อลาดดินมีความชันต่ำ ค่า F.S. จะสูง อันเนื่องมาจากค่าอัตราส่วนความชันที่มากขึ้นจะทำให้แรงโน้มถ่วงมีความแรงมากขึ้นและในกรณีที่มีแผ่นดินไหวประกอบจะทำให้เพิ่มความเสี่ยงในการเกิดการล้มลงหรือการลาดตัวของดินได้ ทั้งนี้หากพื้นที่มีค่า F.S. ต่ำ การลดความชันของลาดดินจะสามารถเพิ่มค่า F.S. เพื่อให้โครงสร้างหรือสิ่งก่อสร้างมีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นได้

ในส่วนการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวดิ่งพบว่า มีค่าเคลื่อนตัวสูงสุดในทิศทางแนวราบที่ 6.55 mm. (ไปทางขวา) และค่าเคลื่อนตัวสูงสุดในทิศทางแนวดิ่งที่ -5.16 mm. (ทรุดตัวลง) เมื่อมีความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม 0.0656 g มากกระทำ ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวทั้ง 2 ทิศทาง ไม่เกินค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง (Lateral Story Drift) ตามมาตรฐาน มยพ. 1301/1302-61 [7] ทั้งนี้หากชั้นดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชมีการเคลื่อนตัวในแนวราบดินจะเกิดการพังทลายในลักษณะไหลลงด้านความชัน (ไปทางขวา) เนื่องจากพื้นที่ด้านขวาเป็นพื้นที่ลาดดินจึงส่งผลให้ชั้นดินเกิดการสั่นไถลลงตามระนาบการเคลื่อนที่ สอดคล้องกับ [1] ที่ศึกษาปรากฏการณ์ดินเหลวเมื่อได้รับความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมส่งผลให้ดินขาดเสถียรภาพและเคลื่อนตัวลงในด้านที่มีความชันต่อไป ในส่วนการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งชั้นดินจะมีการทรุดตัวลง เพราะดินในแนวราบมีการเคลื่อนที่ไปทางขวา ส่งผลกระทบบั้ดินเฉือนขาดออกจากกันและมวลดินที่มีน้ำหนักจะเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างภายใต้แรงโน้มถ่วง จึงส่งผลให้โครงสร้างอาคารด้านบนเกิดความเสียหายได้ต่อไป สอดคล้องกับ [2] ที่ศึกษากำลังรับแรงของฐานรากเสาเข็มทั้งนี้เมื่อมีแรงกระทำลงสู่เสาเข็มจะส่งผลให้ค่าแรงเชื่อมต่อกันระหว่างดินและค่าแรงเสียดทานตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มจะถูกการรบกวนส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของโครงสร้าง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการพังทลายทั้ง 2 ทิศทางพบว่า ดินในพื้นที่จะมีรูปแบบการพังทลายเฉพาะจุด ด้วยกลไกการเฉือนขาดที่ระนาบ (Translational Slide) [23] - [24] เนื่องจากโครงสร้างชั้นดินในภาพรวมมีการยึดเหนี่ยว

กันแน่นทำให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ หากมีการพังทลายจึงเกิดการพังทลายเฉพาะจุดนั้น ๆ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การที่ความชันของลาดดินมีอัตราส่วนที่มากขึ้น (หรือความชันน้อยลง) โอกาสในการเกิดการเคลื่อนที่ของดินจะลดลง อันเนื่องมาจากความชันที่มากขึ้นจะทำให้แรงโน้มถ่วงลดลง แรงต้านของดินและมุมเสียดทานของดินมากขึ้น ซึ่งทำให้ดินมีความต้านทานต่อการเคลื่อนที่มากขึ้น ทั้งนี้การลดความชันของลาดดินจะช่วยลดความเสี่ยงของการเคลื่อนที่ของดิน อาทิเช่น การล่อลวงล้ม การพังทลาย

เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวเกิดขึ้นการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวราบจะมีการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบคลื่นที่ไปกระตุ้นการเคลื่อนที่ของชั้นดิน โดยชั้นดินอาจเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและรุนแรงตามทิศทางของคลื่นนั้น ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับความผันผวนของชั้นดิน โดยชั้นดินที่มีความผันผวนน้อยจะเคลื่อนที่น้อยลงในทิศทางนั้น แต่ชั้นดินที่มีความผันผวนมาก หรือเป็นดินที่มีความผันแปร (Heterogeneous Soil) จะมีการเคลื่อนที่มากขึ้น สอดคล้องกับ [16] ที่ศึกษาปฏิสัมพันธ์ด้านจลนศาสตร์ระหว่างชั้นดินและโครงสร้างในแอ่งดินเหนียว ซึ่งแรงจลนศาสตร์จะมีพฤติกรรมที่รุนแรงขึ้นเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวเดินทางผ่านรอยต่อของชั้นดินเหนียวที่มีความไม่ต่อเนื่องกันในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวแข็งที่มีความแข็งต่างกัน และมีโมดูลัสเฉือนที่มีค่าต่างกันมากพอ ในส่วนการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตั้งแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดแรงดันยกขึ้น (Uplift) ตามแนวสันคลื่นที่พาดผ่านพื้นที่ และการทรุดตัว (Subsidence) ตามแนวท้องคลื่นที่พาดผ่านพื้นที่ ส่งผลให้อนุภาคดินเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงแรงยึดเหนี่ยวที่ส่งผ่านกันถูกเฉือนขาดด้วยแรงเฉือน ทำให้พื้นที่เกิดความเสียหายและพังทลายได้ ซึ่งสอดคล้องกับ [25] ที่ศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนใต้ผิวดินเพื่อจำแนกประเภทพื้นที่การตอบสนองแผ่นดินไหว หากพื้นที่มีลักษณะเป็นชั้นดินอ่อนถึงดินปกติประกอบกับมีคาบธรรมชาติของพื้นที่ใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติของแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดการสั่นพ้องและมีการขยายแอมพลิจูดของคลื่นแผ่นดินไหว ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งปลูกสร้างได้

สรุปผลและการอภิปรายผล

โดยทั่วไปค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน หากมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า พื้นที่ดังกล่าวมีความปลอดภัยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทุกในแนวตั้งได้ [21] ในส่วนงานวิจัยฉบับนี้กำหนดค่า F.S. ของเสถียรภาพลาดดินในระยะสั้น (Short-Term) 1 - 3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และ F.S. ในส่วนระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 อันเนื่องมาจากพิจารณาความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวเพิ่มเติม [22] ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ค่า F.S. ที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ทุกกรณี เพราะชั้นดินในพื้นที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งอ้างอิงจากค่า SPT-N ในรายงานผลการเจาะสำรวจดิน ณ อาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ได้ค่ามากกว่า 50 ครั้งต่อความลึก 30 cm รวมถึงพื้นที่ท่าเรือมากเหล็ก จังหวัดสระบุรี มีค่า S_v และ S_d ที่ใช้ในการคำนวณความเร่งสูงสุดด้วยชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็ง และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติที่ 0.0465 g และ 0.0656 g นั้น ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหาย หรือได้ค่า F.S. ที่น้อยกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนด [22] จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดินลดลง และการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น
2. อัตราส่วนความชันของลาดดินที่มากขึ้น (ความชันน้อยลง) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดินมากขึ้น และการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งลดลง
3. จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า หากแรงกระทำแผ่นดินไหวมีค่าสูงจนถึงชั้นลาดดินพังทลายจะเป็นการพังทลายเฉพาะจุด ด้วยกลไกการเฉือนขาดที่ระนาบ (Translational Slide) [23] - [24]
4. เสถียรภาพลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชมีอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) สูงกว่าความปลอดภัยที่กำหนด [22] สามารถต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาโครงการวิจัยเพื่อดำรงคุณวุฒิและคุณสมบัติของอาจารย์ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช ประจำปี พ.ศ. 2567 และคุณปฎิพัทธ์ นิमितพงศ์ถาวร ที่สนับสนุนโปรแกรม PLAXIS 2D ในการดำเนินการวิจัย

References

- [1] Sethabouppha, S. (2022). A Study of Soil Liquefaction Caused by the 2014 Earthquake in Chiang Rai Province. In **The 27th National Convention on Civil Engineering**. GTE23-1-GTE23-8 (in Thai)
- [2] Kanjanakul, C., Pornbunyanon, N., and Chukree, T. (2022). Bearing Capacity Analysis of Embedded Piles in Cohesive Soils with 2D FEM. In **The 27th National Convention on Civil Engineering**. GTE01-1-GTE01-7 (in Thai)
- [3] Kakarndee, W., Soralump, S., and Isrolan, R. (2013). Study of Slope Stability Analysis by Comparing the Limit Equilibrium, Finite Element and Stress Based Method. In **The 18th National Convention on Civil Engineering**. GTE339-GTE346 (in Thai)
- [4] Bilotta, E., Lanzano, G., Russo, G., Santucci de Magistris, F., Aiello, V., Conte, E., Silvestri, F., and Valentino, M. (2007). Pseudostatic and Dynamic Analyses of Tunnels in Trasversal and Longitudinal Direction. In **4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**. Greece, Paper No. 1550
- [5] Akhlaghi, T. and Nikkar, A. (2014). Evaluation of the Pseudostatic Analyses of Earth Dams Using FE Simulation and Observed Earthquake-Induced Deformations: Case Studies of Upper San Fernando and Kitayama Dams. **The Scientific World Journal**. Vol. 2014, pp. 1-12. DOI: 10.1155/2014/585462
- [6] Fatehi, M., Hosseinpour, I., Chenari, R. J., Meghdad, P., and Javankhoshdel, S. (2022). Deterministic Seismic Stability Analysis of Reinforced Slopes using Pseudo-Static Approach. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**. Vol. 47, pp. 1025-1040. DOI: 10.1007/s40996-022-00970-2
- [7] DPT 1301/1302-61. (2018). **Standard of Earthquake-Resistant Design**. Annual Book of Department of Public Works and Town & Country Planning (in Thai)
- [8] ASCE/SEI 7-16. (2017). **Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures**. Annual Book of American Society of Civil Engineers
- [9] Ratananikom, W. (2019). **Slope Stability Chart of Homogeneous Clay Layer with Uniform Strength**. Burapha University Research Information (in Thai)
- [10] Chalermyanon, T. (2011). **Stability Study of U-Tapao River Bank Due to Erosion**. Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (in Thai)
- [11] Khachanan, R. (2015). **Study of Slope Stability by Used Engineering Properties: A Case Study of Theppharat Sichon District**. Master's Thesis, Faculty of Engineering Civil Engineering, Prince of Songkla University (in Thai)
- [12] Khongkan, T. (2013). **Blasting Vibration Effect on Rock Slope Stability in a Limestone Quarry**. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University (in Thai)

- [13] Soralump, S., Yangsaenpu, S., and Jinakunwipat, M. (2013). The Study of Rock Slope Failure and Design Approach for Improving the Rock Slope Stability: A Case Study of Eastern Railway, Chachoengsao-Sattahip Port Junction, Chonburi Province. In **The 18th National Convention on Civil Engineering**. GTE308-GTE314 (in Thai)
- [14] Kanjanakul, C. (2019). Foundation Design and Slope Failure Protection for A Large Community Building in Khanom, Nakhon Si Thammarat. **International Journal of GEOMATE**. Vol. 18, Issue 70, pp. 88 -93. DOI: 10.21660/2020.70.9287
- [15] Chingulkitniwatana, A. (2020). **Hydrological Responses and Stability Analysis of Rainfall-Induced Shallow Slope Failures**. In Research, Suranaree University of Technology (in Thai)
- [16] Nimitphongthaworn, P. and Boonyatee, T. (2023). A Study of Kinematic Interaction Between Soil and Pile in Bangkok's Subsoils. In **The 28th National Convention on Civil Engineering**. GTE14-1-GTE14-10 (in Thai)
- [17] Suebsinsajjawong, C. and Keawsawasvong, S. (2023). Finite Element Limit Analysis for Stability of Tunnels Considering the Effect of Seismic Force. In **The 28th National Convention on Civil Engineering**. GTE13-1-GTE13-5 (in Thai)
- [18] Jirasakjamroonsri, A. (2017). **Assessment of Seismic Site Effects and Development of Design Response Spectrum in Bangkok Basin**. Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering, Thammasat University (in Thai)
- [19] Yodkhamyan, S., Sujitapan, C., and Chalermyanont, T. (2013). Joint Analysis of Shear Wave Velocity from SH-Wave Refraction and MASW Techniques for SPT-N Estimation. **Songklanakarin Journal Science Technology**. Vol. 36, No. 3, pp. 333-344
- [20] Jacob, A. S. and Venkataramana, K.(2020). Slope Stability Analysis Under Earthquake Load Using Plaxis Software. **Journal of Advances in Geotechnical Engineering**. Vol. 3, No. 3, pp. 1-8
- [21] DPT 195-62. (2019). **Standard of Construction on Slope**. Annual Book of Department of Public Works and Town & Country Planning (in Thai)
- [22] Elias, V., Christopher, B. B., and Berg, R. R. (2009). **Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines**. Publication No. FHWA-NHI-10-024. Vol. 1
- [23] Geotechnical Engineering Research & Development Center. (2016). **The Study of the Safety Criteria from Dam Instruments for Improvement the Lampao Dam in Kalasin Province**. Faculty of Engineering, Kasetsart University (in Thai)
- [24] Semmad, S., Chalermyanont, T., and Chub-uppakarn, T. (2010). Stability Study of U-Tapao Riverbank: A preliminary study. In **The 8th Conference on Engineering and Technology**. pp. 36-40 (in Thai)
- [25] Sawasdee, Y. (2012). **Determination of Subsurface Shear Wave Velocity for Seismic Site Classification in Hatyai, Songkhla Province**. Faculty of Science, Prince of Songkla University (in Thai)