

ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดิน

รัฐศักดิ์ ผลานิสงค์^{1*} พงศกร พรณรัตน์ศิลป์²

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น^{1*2}

อีเมล : Ratasak_ph@kkumail.com^{1*}

วันที่รับบทความ 20 มกราคม 2568

วันแก้ไขบทความ 14 กุมภาพันธ์ 2568

วันตอบรับบทความ 25 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ เพื่อให้ผู้วิเคราะห์สามารถเข้าใจถึงความสำคัญของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้ดียิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์จำนวน 9 อย่าง คือ 1) รูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ 2) หน่วยน้ำหนักของดิน 3) แรงยึดเหนี่ยวของดิน 4) มุมเสียดทานภายในของดิน 5) ความชันของลาดดิน 6) ความสูงของลาดดิน 7) ระดับน้ำหน้าลาดดิน 8) แรงภายนอกที่กระทำบนคันดิน และ 9) แรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษาพบว่า วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลโมเมนต์และวิธีสมมูลขีดจำกัด ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยใกล้เคียงกัน ในขณะที่วิธีสมมูลแรงให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุด การเลือกใช้หน่วยน้ำหนักของดินควรสอดคล้องกับลักษณะของดิน เนื่องจากความอ่อนไหวของหน่วยน้ำหนักจะมีผลเฉพาะกับการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดิน สำหรับแรงยึดเหนี่ยวของดินและมุมเสียดทานภายใน เมื่อค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพิ่มสูงขึ้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในด้านความชันและความสูง พบว่าการเพิ่มค่าความชันและความสูงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลง ในขณะที่ระดับน้ำหน้าลาดดินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น โดยความอ่อนไหวของระดับน้ำหน้าลาดดินจะมีผลเฉพาะกับการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดิน สำหรับแรงภายนอกที่กระทำบนคันดินและแรงแผ่นดินไหว การเพิ่มของแรงดังกล่าวจะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลง โดยความอ่อนไหวจากแรงภายนอกที่กระทำบนคันดินมีผลกระทบสูงสุดในการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดินและมุมเสียดทานภายใน

คำสำคัญ : เสถียรภาพของลาดดิน การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน พารามิเตอร์ ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ อัตราส่วนความปลอดภัย

Sensitivity of Parameters in Slope Stability Analysis

Ratasak Phalanisong^{1*}, Pongsakorn Punrattanasin²

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University^{1*,2}

E-mail : Ratasak_ph@kkumail.com^{1*}

Received 20 January 2025

Revised 14 February 2025

Accepted 25 February 2025

Abstract

This study investigates the sensitivity of parameters to enable analysts to better understand the significance of factors influencing the stability analysis of soil slopes. A total of nine parameters were examined: (1) the analysis method used, (2) soil unit weight, (3) soil cohesion, (4) soil internal friction angle, (5) slope inclination, (6) slope height, (7) water level at the slope face, (8) external forces acting on the embankment, and (9) seismic forces. The results show that the moment equilibrium method and the limit equilibrium method yield similar safety factor values, while the force equilibrium method produces the lowest safety factor. The selection of soil unit weight should correspond to the characteristics of the soil, as the sensitivity of this parameter only affects the calculation of soil cohesion. For soil cohesion and internal friction angle, an increase in these parameters results in a higher safety factor. Regarding slope inclination and height, increasing these values decreases the safety factor. Conversely, an increase in the water level at the slope face leads to a higher safety factor, although the sensitivity of the water level is specific to the calculation of soil cohesion. For external forces acting on the embankment and seismic forces, an increase in these forces reduces the safety factor. The sensitivity of external forces acting on the embankment has the most significant impact on the calculation of soil cohesion and internal friction angle.

Keywords : Slope Stability, Slope Stability Analysis, Parameter, Parameter Sensitivity, Factor Of Safety

1. บทนำ

การคำนวณเสถียรภาพของลาดดินเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากเสถียรภาพของลาดดินมีผลกระทบโดยตรงต่อความปลอดภัยและความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เช่น เขื่อน ถนน อาคาร และโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนพื้นที่ลาดชัน โดยปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการเสียเสถียรภาพของลาดดินมีอยู่หลายปัจจัย ได้แก่ ธรณีวิทยา (สุประชา ดามะพา และ พงศกร พวงชมพู, 2565) ความลาดชันของพื้นที่ คุณสมบัติของดิน ปริมาณน้ำฝน (ยศวัศ จันทรา และ พงศกร พวงชมพู, 2565) และการใช้ประโยชน์จากที่ดินซึ่งเกิดจากการกระทำของมนุษย์ โดยมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในหลายพื้นที่ (กฤษณะ มีลักษณะสม และ พงศกร พวงชมพู, 2566) เช่น การศึกษาคุณสมบัติดินในพื้นที่ลาดเขาที่มีความเสี่ยงสูงในภาคเหนือและภาคตะวันตก โดยชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคำนวณจากการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนี้ถือเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน (ปรเมธี เดชปะตังเวลา, โกมลย์ ชัยรัตนงานเดช และ พงศกร พวงชมพู, 2562) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จึงเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ช่วยให้ทราบถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน และสามารถระบุพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุด เพื่อนำข้อมูลไปปรับปรุงการออกแบบให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยมากขึ้น (วรรณวรงค์ รัตนนิคม และ สยาม ยิ้มศิริ, 2564)

ในปัจจุบัน มีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน แต่ส่วนใหญ่ผู้เชี่ยวชาญยังไม่เข้าใจในส่วนของการพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดิน โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์จำนวน 9 อย่าง ได้แก่ รูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ หน่วยน้ำหนักของดิน แรงยึดเหนี่ยวของดิน มุมเสียดทานภายในของดิน ความชื้นของลาดดิน ความสูงของลาดดิน ระดับน้ำหน้าลาดดิน แรงภายนอกที่กระทำบนคันดิน และแรงแผ่นดินไหว ซึ่งการศึกษานี้ช่วยให้เกิดความเข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดินและช่วยสนับสนุนการออกแบบในงานวิศวกรรมโยธาให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และเป็นแนวทางให้ผู้ใช้งานในการออกแบบเสถียรภาพของลาดดิน รมั้ดระวังในการใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เหล่านี้

3. วิธีการวิจัย

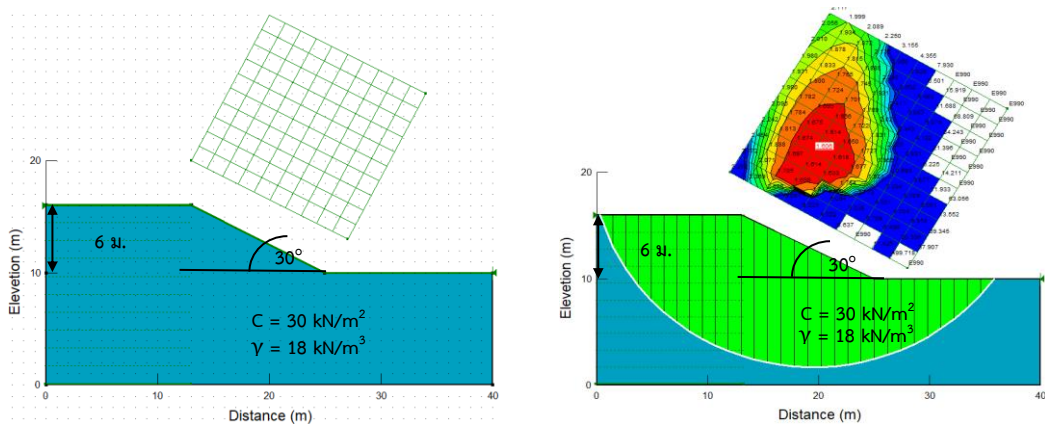
3.1 การศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Geo Studio (Student Edition) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

3.2 ในการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 เพื่อศึกษาดูว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์นั้นจะส่งผลต่อผลการคำนวณอย่างไร โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้

3.3 ในการคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูป จะคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากหลายตำแหน่งและเลือกใช้ค่าที่คำนวณได้ต่ำที่สุด ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ลำดับที่	วิธีการวิเคราะห์	หน่วยน้ำหนักของดิน (kN/m ³)	แรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน (kN/m ²)	มุมเสียดทานภายใน (องศา)	ความชื้น (องศา)	ความสูง (เมตร)	ระดับน้ำ (%)	แรงภายนอก (kN/m ²)	แรงแผ่นดินไหว (g)
1. ความอ่อนไหวของรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์	วิธีสมดุลแรงวิธีสมดุลโมเมนต์วิธีสมดุลขีดจำกัด	12, 14, 16, 18, 20, 22	-	30	30	6	-	-	-
	วิธีสมดุลแรงวิธีสมดุลโมเมนต์วิธีสมดุลขีดจำกัด	12, 14, 16, 18, 20, 22	30	-	30	6	-	-	-
2. ความอ่อนไหวของหน่วยน้ำหนักของดิน	วิธีสมดุลแรง	12, 14, 16, 18, 20, 22	-	30, 35, 40	30	6	-	-	-
	วิธีสมดุลแรง	12, 14, 16, 18, 20, 22	5, 10, 15	-	30	6	-	-	-
3. ความอ่อนไหวของแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน	วิธีสมดุลแรง	18	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	-	15, 30, 45, 60, 75, 90	2, 4, 6, 8, 10	-	-	-
4. ความอ่อนไหวของมุมเสียดทานภายใน	วิธีสมดุลแรง	18	-	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	15, 30, 45, 60, 75, 90	2, 4, 6, 8, 10	-	-	-
5. ความอ่อนไหวของความชื้นของลาดดิน	วิธีสมดุลแรง	18	-	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	15, 30, 45, 60, 75, 90	2, 4, 6, 8, 10	-	-	-
6. ความอ่อนไหวของความสูงของลาดดิน	วิธีสมดุลแรง	18	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	-	15, 30, 45, 60, 75, 90	2, 4, 6, 8, 10	-	-	-
7. ความอ่อนไหวของระดับน้ำหน้าลาดดิน	วิธีสมดุลแรง	18	30	-	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	0, 25, 50, 75, 100	-	-
	วิธีสมดุลแรง	18	-	30	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	0, 25, 50, 75, 100	-	-
8. ความอ่อนไหวของแรงภายนอกที่กระทำบนคันดิน	วิธีสมดุลแรง	18	30	-	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	-	0, 200, 400, 600, 800	-
	วิธีสมดุลแรง	18	-	30	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	-	0, 200, 400, 600, 800	-
9. ความอ่อนไหวของแรงแผ่นดินไหว	วิธีสมดุลแรง	18	30	-	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	-	-	0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 0.75, 1
	วิธีสมดุลแรง	18	-	30	15, 30, 45, 60, 75, 90	4	-	-	0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 0.75, 1

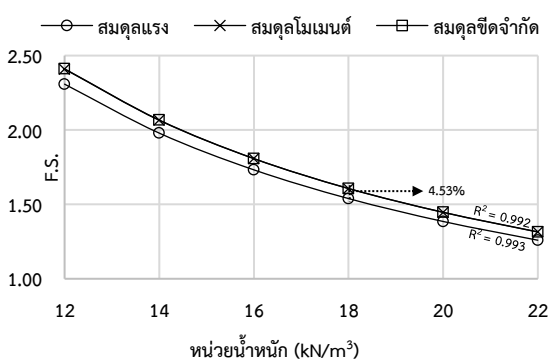


รูปที่ 1 ตัวอย่างผลคำนวณที่ได้ โปรแกรมจะแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่าง ๆ

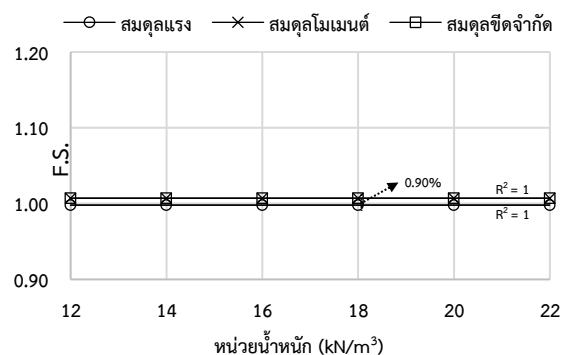
4. ผลการศึกษา

4.1 ความอ่อนไหวของวิธีการที่ใช้วิเคราะห์

หากใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 ลำดับที่ 1 จากการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ 3 วิธี คือ 1) วิธีสมมูลแรง (Janbu, N., 1973) 2) วิธีสมมูลโมเมนต์ (Bishop, A. W., and Morgenstern, N., 1960) และ 3) วิธีสมมูลขีดจำกัด (Spencer, E., 1967) จากรูปที่ 2(ก) เมื่อมีการใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เท่ากัน ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีสมมูลโมเมนต์ และวิธีสมมูลขีดจำกัด ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่วิธีสมมูลของแรงจะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุด โดยมีค่าต่างจาก 2 วิธีแรกอยู่ 4.53% และจากรูปที่ 2(ข) การคำนวณใช้ค่ามุมเสียดทานภายใน พบผลการคำนวณที่ได้ในลักษณะเดียวกันกับที่คำนวณโดยแรงยึดเหนี่ยวของดิน โดยที่วิธีสมมูลโมเมนต์ และวิธีสมมูลขีดจำกัด ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เท่ากัน และได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดจากการคำนวณด้วยวิธีสมมูลแรง โดยมีค่าต่างจากวิธีสมมูลโมเมนต์ และวิธีสมมูลขีดจำกัดอยู่ 0.90% ดังนั้น ในการคำนวณพารามิเตอร์ถัดไปจะใช้การคำนวณด้วยวิธีสมมูลแรง



(ก) แรงยึดเหนี่ยวของดิน

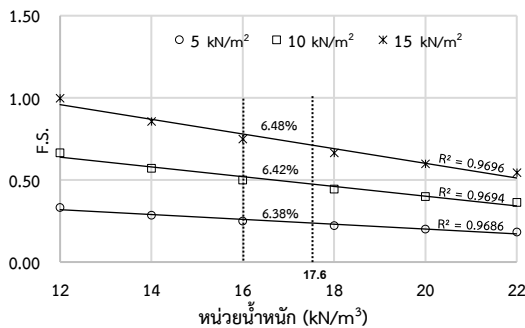


(ข) มุมเสียดทานภายใน

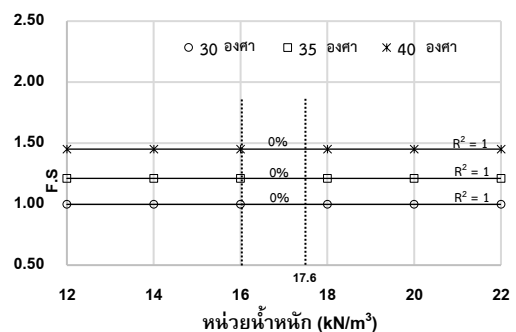
รูปที่ 2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อความอ่อนไหวของวิธีการวิเคราะห์

4.2 ความอ่อนไหวของหน่วยน้ำหนักของดิน

จากผลการวิเคราะห์รูปที่ 3(ก) การใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน 5 kN/m^2 โดยหน่วยน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มหน่วยน้ำหนักขึ้น 10% จาก 16 kN/m^3 เป็น 17.6 kN/m^3 พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงประมาณ 6% และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินที่ 10 kN/m^2 และ 15 kN/m^2 แต่สำหรับการวิเคราะห์ที่ใช้ค่ามูเสียตทานภายในคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยน้ำหนักและมูเสียตทานภายในเท่ากับ 30 องศา, 35 องศา และ 40 องศา พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 3(ข) และไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามหน่วยน้ำหนัก ดังนั้น ความอ่อนไหวของหน่วยน้ำหนักเกิดขึ้นเฉพาะกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน



(ก) แรงยึดเหนี่ยวของดิน

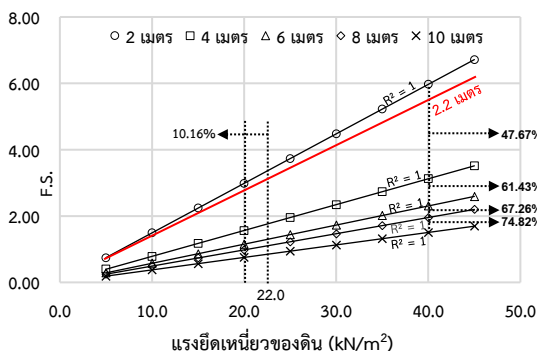


(ข) มูเสียตทานภายใน

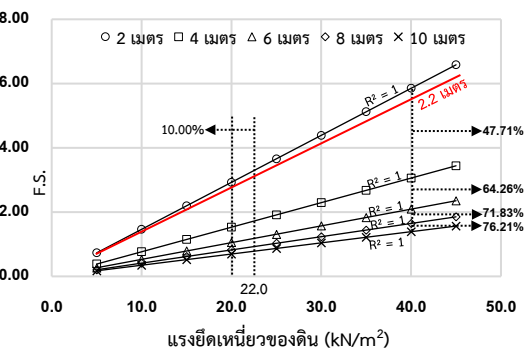
รูปที่ 3 ความอ่อนไหวของหน่วยน้ำหนักของดิน

4.3 ความอ่อนไหวของค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน

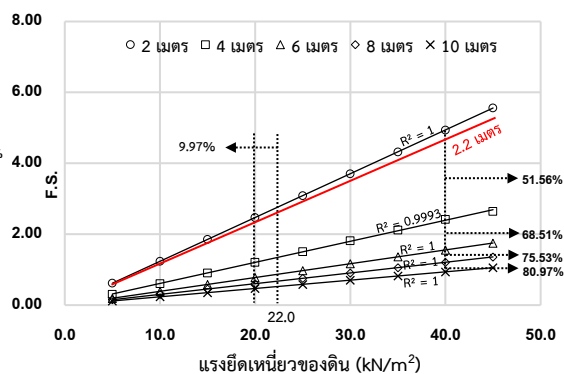
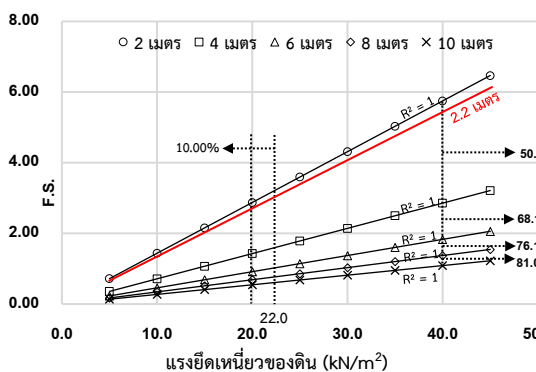
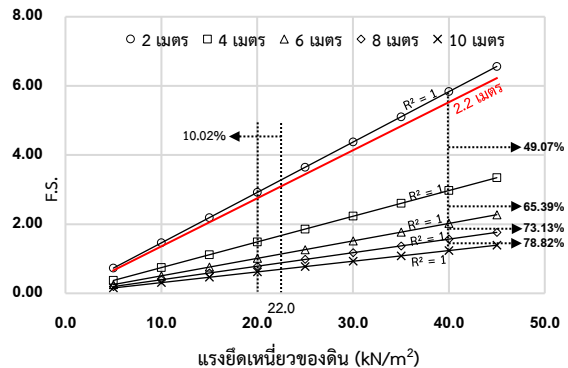
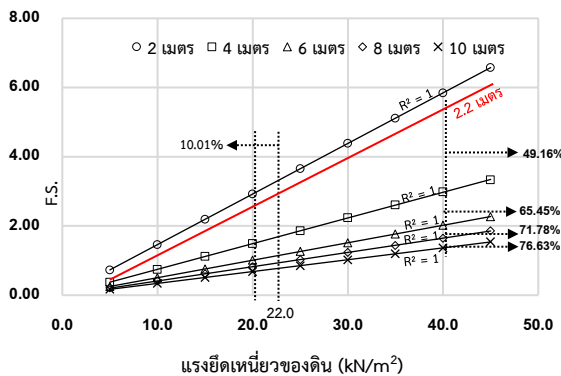
จากผลการศึกษาในรูปที่ 4(ก) เมื่อลาดดินมีความชัน 15 องศา และความสูง 2 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยเมื่อแรงยึดเหนี่ยวของดินเพิ่มขึ้น 10% จาก 20 kN/m^2 เป็น 22 kN/m^2 ที่ความสูง 2 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จะเพิ่มขึ้น 10.16% และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงความสูง จาก 2 เมตร เป็น 4 เมตร, 6 เมตร, 8 เมตร และ 10 เมตร พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณที่ความสูง 2 เมตร และในการศึกษาครั้งนี้ ยังได้ขยายการวิเคราะห์ไปกับความชัน 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา, 75 องศา และ 90 องศา ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4(ข) ถึง 4(ด) โดยผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเหมือนที่ศึกษาไว้กับที่ความชัน 15 องศา



(ก) ความชัน 15 องศา



(ข) ความชัน 30 องศา



รูปที่ 4 ความอ่อนไหวของแรงยึดเหนี่ยวของดิน

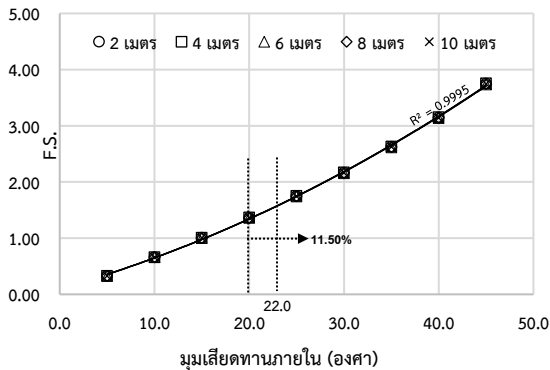
จากรูปที่ 4(ก) ถึง 4(ฉ) เมื่อนำอัตราส่วนความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น 10% จาก 20 kN/m² เป็น 22 kN/m² ของแต่ละความชันมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อแรงยึดเหนี่ยวของดินเพิ่มขึ้น 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงยึดเหนี่ยวของดิน 10.02%

ตารางที่ 2 การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อแรงยึดเหนี่ยวของดินเพิ่มขึ้น 10%

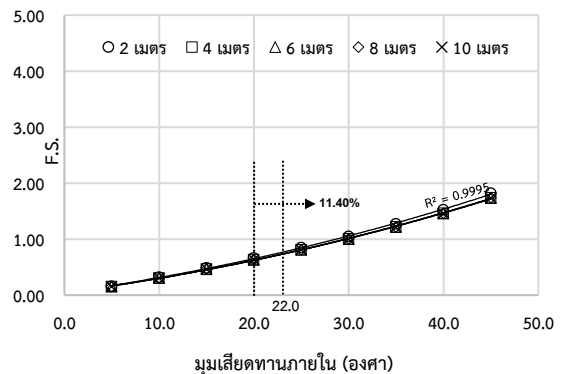
	ความชัน 15 องศา	ความชัน 30 องศา	ความชัน 45 องศา	ความชัน 60 องศา	ความชัน 75 องศา	ความชัน 90 องศา	เฉลี่ย องศา
การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน ความปลอดภัยที่ 10%	10.16%	10.00%	10.01%	10.02%	10.00%	9.97%	10.02%

4.4 ความอ่อนไหวของมุมเสียดทานภายใน

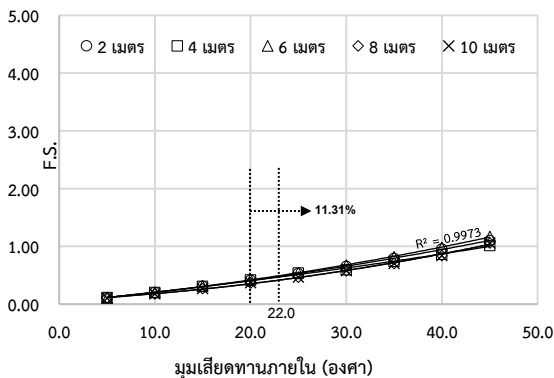
จากผลการศึกษาในรูปที่ 5(ก) ที่ความชัน 15 องศา และความสูง 2 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมเสียดทานภายใน โดยเมื่อมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น 10% จาก 20 องศา เป็น 22 องศา พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 11.50% และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงความสูง จาก 2 เมตร, เป็น 4 เมตร, 6 เมตร, 8 เมตร และ 10 เมตร พบแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับที่คำนวณความสูง 2 เมตร และเมื่อเพิ่มความชัน เป็น 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา, และ 90 องศา ผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับการศึกษาที่ความชัน 15 องศา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(ข) ถึง 5(ง)



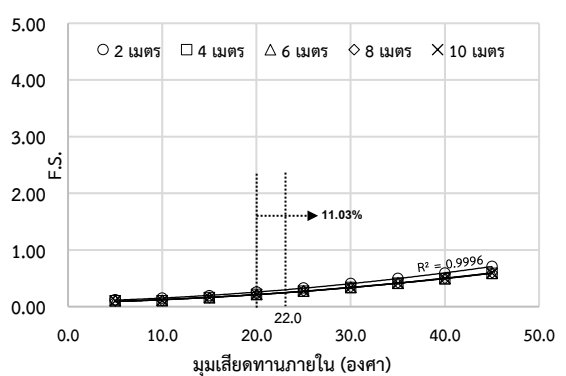
(ก) ความชัน 15 องศา



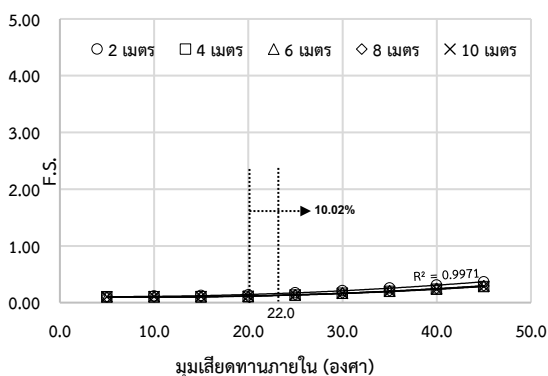
(ข) ความชัน 30 องศา



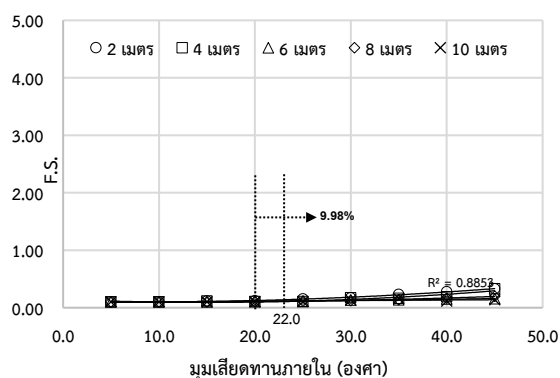
(ค) ความชัน 45 องศา



(ง) ความชัน 60 องศา



(จ) ความชัน 75 องศา



(ฉ) ความชัน 90 องศา

รูปที่ 5 ความอ่อนไหวของมุมเสียดทานภายใน

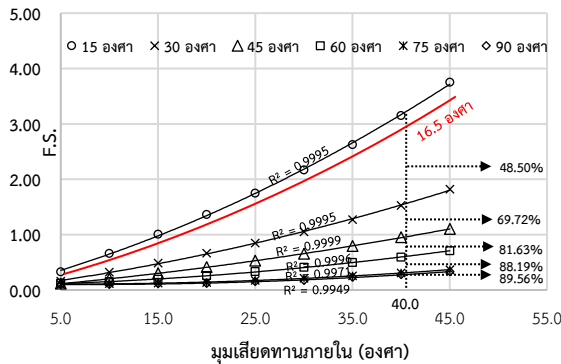
จากรูปที่ 5(ก) ถึง 5(ฉ) เมื่อนำอัตราส่วนความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น 10% จาก 20 องศา เป็น 22 องศา ของในแต่ละความชันมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ดังตารางที่ 3 พบว่า ในการคำนวณมุมเสียดทานภายในเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายในที่ 10% ค่าอัตราส่วน ความปลอดภัย ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น 10.87%

ตารางที่ 3 การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เมื่อมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น 10 %

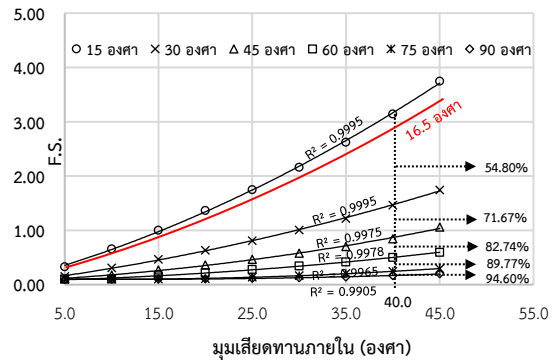
	ความชัน 15 องศา	ความชัน 30 องศา	ความชัน 45 องศา	ความชัน 60 องศา	ความชัน 75 องศา	ความชัน 90 องศา	เฉลี่ย องศา
การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน ความปลอดภัยที่ 10%	11.50%	11.40%	11.31%	11.03%	10.02%	9.98%	10.87%

4.5 ความอ่อนไหวของความชันของลาดดิน

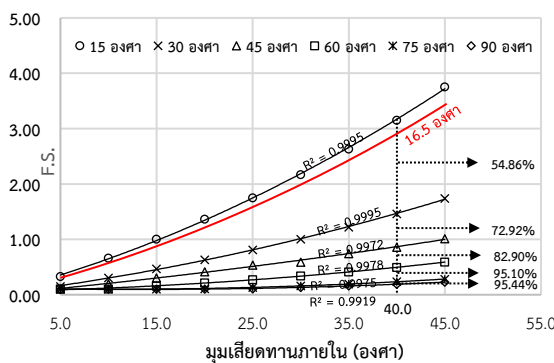
จากผลการศึกษาในรูปที่ 6(ก) เมื่อลาดดินมีความสูง 2 เมตร ที่ความชัน 15 องศา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าลดลงตามมุมเสียดทานภายใน โดยเมื่อความชันมีค่าเพิ่มขึ้น 10% (เส้นสีแดง) จาก 15 องศา เป็น 16.5 องศา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 5 และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันแต่มีการเปลี่ยนแปลงความสูง จาก 2 เมตร เป็น 4 เมตร, 6 เมตร, 8 เมตร และ 10 เมตร พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณที่ความชัน 15 องศา โดยผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 6(ข) ถึง 6(จ) โดยผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเหมือนที่ศึกษาไว้กับที่ความสูง 2 เมตร



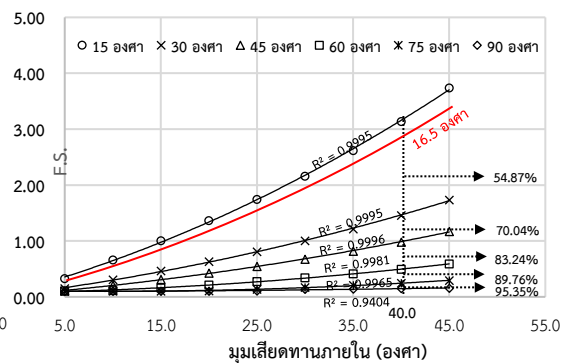
(ก) ความสูง 2 เมตร



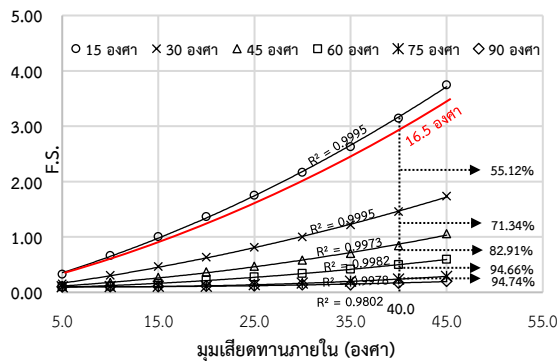
(ข) ความสูง 4 เมตร



(ค) ความสูง 6 เมตร



(ง) ความสูง 8 เมตร



(จ) ความสูง 10 เมตร

รูปที่ 6 ความอ่อนไหวของความชันของลาดดิน

จากรูปที่ 6(ก) ถึง 6(จ) เมื่อนำอัตราส่วนความปลอดภัยและความชันที่เพิ่มขึ้น 10% จาก 15 องศา เป็น 16.5 องศา ของแต่ละความสูงมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ดังตารางที่ 4 พบว่า ในการคำนวณมุมเสียดทานภายในเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความชันที่ 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จะมีค่าลดลง 5.36%

ตารางที่ 4 การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เมื่อมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น 10 %

การเปลี่ยนแปลง ความชันในช่วง	การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (%)						
	ความสูง 2 เมตร	ความสูง 4 เมตร	ความสูง 6 เมตร	ความสูง 8 เมตร	ความสูง 10 เมตร	ความสูง เฉลี่ย (เมตร)	ความต่างของ ความสูงเฉลี่ย ที่ 10%
15 องศา – 30 องศา	48.50	54.80	54.86	54.87	55.12	53.63	5.36

4.6 ความอ่อนไหวของความสูงของลาดดิน

จากการศึกษาในรูปที่ 4(ก) เมื่อลาดดินมีความชัน 15 องศา ที่ความสูง 2 เมตร เมื่อความสูงมีค่าเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าลดลง โดยเมื่อความสูงมีค่าเพิ่มขึ้น 10% จาก 2.0 เมตร เป็น 2.2 เมตร (เส้นสีแดง) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จะมีค่าลดลง และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงความชันจาก 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา, 75 องศา และ 90 องศา พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับศึกษาไว้กับที่ความสูง 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) ถึง 4(ฉ)

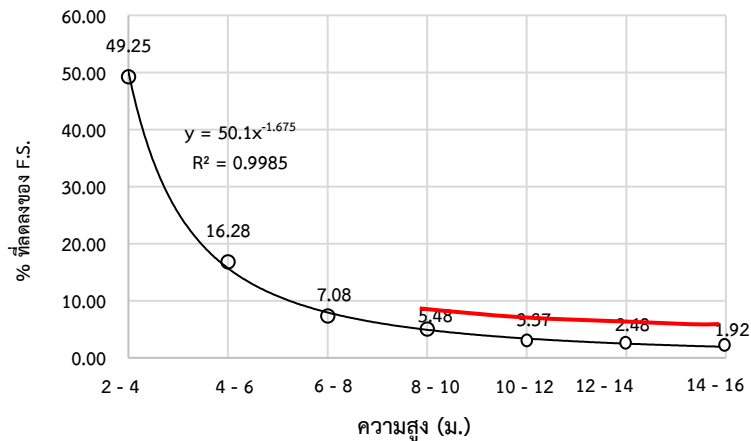
เมื่อวิเคราะห์อย่างละเอียดในรูปที่ 4(ก) ที่ความชันเดียวกันหากความสูงของลาดดินเพิ่มจาก 2 เมตร เป็น 4 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงประมาณ 48% และเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 6 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงประมาณ 16% เมื่อเทียบกับความสูงที่ 2 เมตร และเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงจะลดน้อยลงเมื่อความชันเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าจะลดลงประมาณ 7% และ 5% เมื่อความสูงเปลี่ยนจาก 8 เมตร เป็น 10 เมตร ตามลำดับ ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้เกิดขึ้นกับรูปที่ 4(ข) – 4(ฉ) ผู้วิเคราะห์จึงทำการเฉลี่ยค่าเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของอัตราส่วนความปลอดภัยกับความสูง สามารถสรุปไว้ในตารางที่ 5 และจึงนำค่าที่ได้ไปเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 5 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากความอ่อนไหวของแรงยึดเหนี่ยวของดิน

การเปลี่ยนแปลง ความสูงในช่วง (เมตร)	การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (%)							
	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความชัน 15 องศา	ความต่าง ของความ ชันเฉลี่ย
2 - 4	47.67	47.71	49.16	49.07	50.35	51.46	49.25	4.92
4 - 6	61.43	64.26	65.45	65.39	68.15	68.51	65.53	1.62
6 - 8	67.26	71.83	71.78	73.13	76.15	75.53	72.61	0.70
8 - 10	74.82	76.21	76.63	78.82	81.08	80.97	78.09	0.54

จากผลการศึกษาในรูปที่ 4 และตารางที่ 5 นำมาวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับความสูงที่แตกต่างกัน พบว่า (เส้นสีดำ) ในช่วงความสูง 2 เมตร – 4 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงมากที่สุด ในช่วงความสูง 4 เมตร – 8 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีแนวโน้มชะลอการลดลง และในช่วงความสูง 10 เมตรขึ้นไป การเพิ่มของความสูง

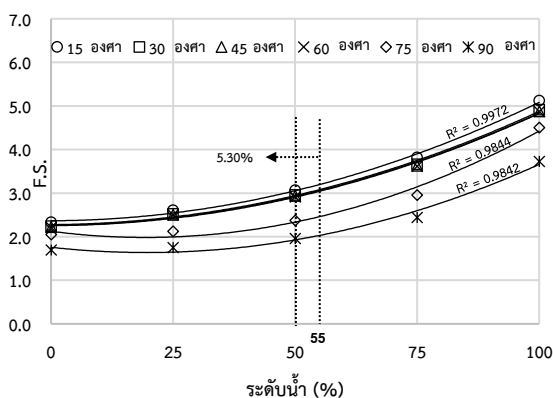
ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน จากการวิเคราะห์ข้อมูล (เส้นสีแดง) สามารถพยากรณ์การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล $y = 50.1x^{-1.675}$



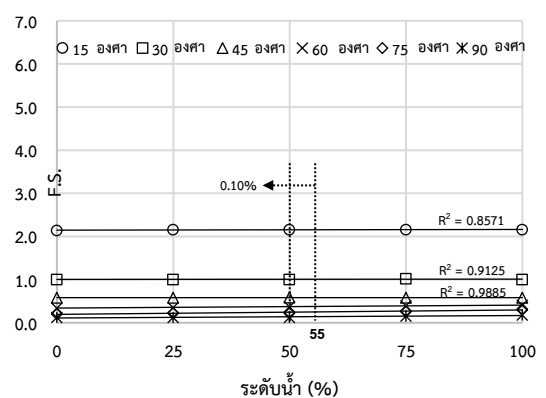
รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากความอ่อนไหวของแรงยึดเหนี่ยวของดิน

4.7 ความอ่อนไหวของระดับน้ำที่หน้าลาดดิน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำหน้าลาดดิน จากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดิน 30 kN/m^2 จากรูปที่ 8(ก) พบว่าเมื่อระดับน้ำหน้าลาดดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ที่ความชัน 15 องศา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าสูงสุด โดยเมื่อระดับน้ำหน้าลาดดินเพิ่มขึ้น 10% จาก 50% เป็น 55% พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าสูงขึ้น 5.30% และจากการคำนวณมุมเสียดทานภายใน เมื่อระดับน้ำหน้าลาดดินเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นที่ 10% เหมือนในกรณีแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น 0.10% นั้นหมายความว่า ความอ่อนไหวของระดับน้ำหน้าลาดดินจะเกิดขึ้นเฉพาะกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินแต่ไม่เกิดขึ้นกับการคำนวณมุมเสียดทานภายใน



(ก) แรงยึดเหนี่ยวของดิน = 30 kN/m^2

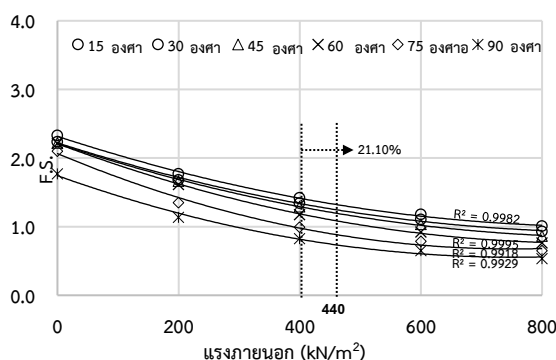


(ข) มุมเสียดทานภายใน = 30 องศา

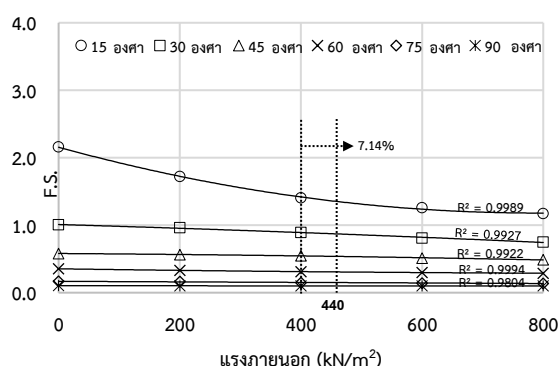
รูปที่ 8 ความอ่อนไหวของระดับน้ำหน้าลาดดิน

4.8 ความอ่อนไหวของแรงภายนอกที่มากกระทำบนคันดิน

จากผลการศึกษาในรูปที่ 9(ก) ที่ความชัน 15 องศา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแรงภายนอกที่มากกระทำบนคันดิน โดยเมื่อแรงยึดเหนี่ยวของดินเพิ่มขึ้น 10% จาก 400 kN/m^2 เป็น 440 kN/m^2 พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง 21.10% และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณมุมเสียดทานภายในพบว่า เมื่อแรงภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มแรงภายนอกขึ้น 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าลดลง 7.14% แสดงให้เห็นว่า ความอ่อนไหวของแรงภายนอกที่มากกระทำบนคันดินจะเกิดขึ้นกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินและการคำนวณมุมเสียดทานภายใน



(ก) แรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน = 30 kN/m^2

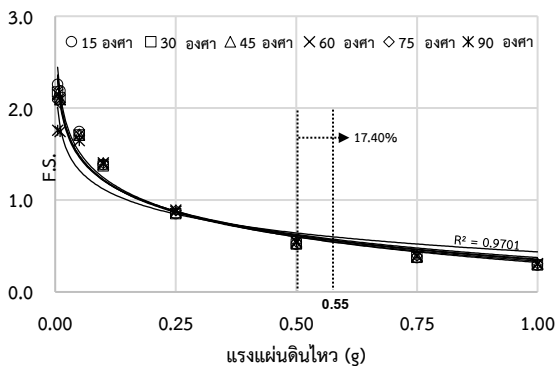


(ข) มุมเสียดทานภายใน = 30 องศา

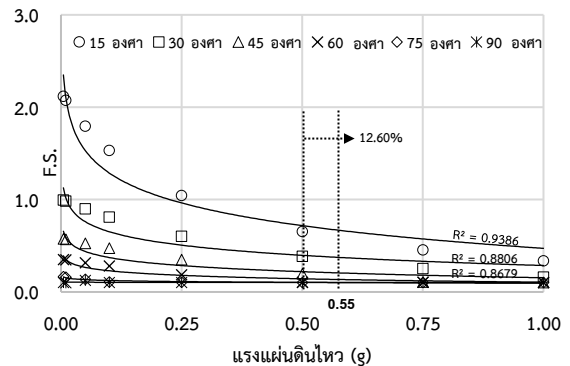
รูปที่ 9 ความอ่อนไหวของแรงภายนอก

4.9 ความอ่อนไหวของแรงแผ่นดินไหว

จากผลการศึกษาในรูปที่ 10(ก) ความอ่อนไหวของแรงแผ่นดินไหวจากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดิน ที่ความชัน 15 องศา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแรงแผ่นดินไหว และจะมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันเมื่อความชันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา, 75 องศา และ 90 องศา โดยเมื่อแรงแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้น 10% จาก 0.50 g เป็น 0.55 g พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง 17.40% และหากวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณมุมเสียดทานภายในพบว่า เมื่อแรงแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มแรงแผ่นดินไหวขึ้น 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าลดลง 12.60% นั่นหมายความว่า ความอ่อนไหวของแรงแผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นกับการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดินและมุมเสียดทานภายใน



(ก) แรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน = 30 kN/m²



(ข) มุมเสียดทานภายใน = 30 องศา

รูปที่ 10 ความอ่อนไหวของแรงแผ่นดินไหว

5. อภิปรายผลและสรุปผล

จากการศึกษาความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดิน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 วิธีการที่ใช้วิเคราะห์ ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ 3 วิธี คือ 1) วิธีสมมูลแรง (Janbu, N., 1973) 2) วิธีสมมูลโมเมนต์ (Bishop, A. W., and Morgenstern, N., 1960) และ 3) วิธีสมมูลขีดจำกัด (Spencer, E., 1967) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลโมเมนต์และวิธีสมมูลขีดจำกัดให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยใกล้เคียงกัน (พิทักษ์ชน ทันมั่ง และวีรยา นิมอ้อย, 2559) แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลแรง จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด

5.2 หน่วยน้ำหนักของดิน ในการคำนวณการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักที่ 10% พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดินมีค่าลดลงประมาณ 6% แต่จากการคำนวณค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าความอ่อนไหวจากหน่วยน้ำหนักของดินมีผลต่อการคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินแต่ไม่มีผลกับมุมเสียดทานภายใน

5.3 แรงยึดเหนี่ยวของดิน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงยึดเหนี่ยวของดิน และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น 10.02%

5.4 มุมเสียดทานภายใน เมื่อมุมเสียดทานภายในมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น 10.87%

5.5 ความลาดชันของลาดดิน เมื่อความชันมีค่าเพิ่มขึ้น 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้มีค่าลดลง 5.36%

5.6 ความสูงของลาดคันดิน เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น 10% ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง 4.92%

5.7 ระดับน้ำหน้าลาดดิน เมื่อระดับน้ำหน้าลาดดินเพิ่มขึ้น 10% จากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดิน พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับการคำนวณค่ามุมเสียดทานภายใน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้มีค่าคงที่ และไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระดับน้ำ นั่นหมายความว่า ความอ่อนไหวของระดับน้ำจะเกิดขึ้นเฉพาะกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน

5.8 แรงภายนอกที่กระทำบนคันดิน เมื่อแรงภายนอกเพิ่มขึ้น 10% จากการคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลง 21.10% และจากการคำนวณมุมเสียดทานภายในค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลง 7.14% นั่นหมายความว่า ความอ่อนไหวของแรงภายนอกที่กระทำบนคันดินจะเกิดขึ้นกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินและมุมเสียดทานภายใน

5.9 แรงแผ่นดินไหว ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงตามความรุนแรงของแผ่นดินไหว และเมื่อแรงแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้น 10% จากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง 17.40% และจากการคำนวณมุมเสียดทานภายในค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลง 12.60% โดยความอ่อนไหวจากแรงแผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นกับการคำนวณที่ใช้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดินและมุมเสียดทานภายใน

จากการศึกษาพบว่า ความอ่อนไหวจากแรงภายนอกที่กระทำบนคันดินจากการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวของดินจะเกิดผลกระทบต่อการคำนวณมากที่สุด และความอ่อนไหวจากหน่วยน้ำหนักของดินและระดับน้ำหน้าลาดดินจากการคำนวณมุมเสียดทานภายในจะเกิดผลกระทบในการคำนวณน้อยที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ GeoStudio 2012 ที่ให้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SLOPE/W (Student Edition) ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดิน

เอกสารอ้างอิง

- เกษมณี มีลักษณะสม และ พงศกร พวงชมพู. (2566). การวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติเชิงลาดด้วยวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการปรับปรุงแก้ไข กรณีศึกษา ทางหลวง 2159 ตอนชัยภูมิ-หัวเวียงดำ ที่ กม. 27+700. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์*, 8(1), 112–124.
- ปรเมธี เดชปะตังเวสา และ โกมลีย์ ชัยรัตนงานเดช และ ดร.พงศกร พวงชมพู. (2562). การวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติเชิงลาด และแนวทางการปรับปรุงแก้ไข: กรณีศึกษา ทางหลวงหมายเลข 1194 ตอน แม่สะเรียง – แม่สามแลบ ที่ กม. 21+150 Study on Slope Failure of Highway Embankment No.1194 Mae Sariang -Mae Saplaep Route sta. 21+150. *วารสาร วิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 19(4), 127-138.
- พิทักษ์ชน ทันมั่ง และวีรยา นิมอ้อย. (2559). การเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 24(1), 184-196.
- ยศวัศ จันทรา และ พงศกร พวงชมพู. (2565). การศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงลาดดินคันทางด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษา ทางหลวงหมายเลข 1270 ตอน กองลอย -แม่แอ้ใต้ ที่ กม.26+200 -กม. 26+450. *วารสาร วิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 22(1), 38-50.
- วรรณวรงค์ รัตนานิคม , และสยาม ยิ้มศิริ. (2566). วิธีอย่างง่ายในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเหนียวที่มีกำลังเพิ่มขึ้นตามความลึก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี*, 2(2), 157-68.
- สุประชา คามะนา และ พงศกร พวงชมพู. (2565). การวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติของเชิงลาดด้วยวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการปรับปรุงการแก้ไข: กรณีศึกษา ทางหลวงหมายเลข 1270 ตอน กองลอย-แม่แอ้ใต้ ที่ กม.21+000. *วารสาร วิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 22(1), 13-25.
- Bishop, A. W., and Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes”. *Geotechnique*, 10(4), 129–150. <https://doi.org/10.7939/R35M62D9F>
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations, in Embankment-Dam Engineering: Casagrande Volume, Eds. Hirschfeld & Poulos. (pp. 47-86). John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>