



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่

Slope stability chart of homogeneous clay layer with uniform strength

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256102A1080014

สัญญาเลขที่ 46/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่

Slope stability chart of homogeneous clay layer with uniform strength

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มิถุนายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 46/2561

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินมีด้วยกันหลากหลายวิธีและแต่ละวิธีมักมีข้อสมมติฐาน ข้อจำกัดและความซับซ้อนที่แตกต่างกันออกไป วิธี method of slice ถือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะแบ่งมวลดินที่อยู่เหนือ slip surface เป็น vertical slice โดยสามารถสมมุติ slip surface เป็นวงกลมหรือไม่เป็นวงกลม อย่างไรก็ตามการที่ซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินส่งผลทำให้การประเมินเสถียรภาพลาดดินเบื้องต้นในหน้างานทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวโดยวิธี Morgenstern and Price และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ มุมลาดเอียง, ความสูงของลาดดิน, ความลึกของชั้นดินแข็ง, น้ำหนักบรรทุก และรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน เพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินสำหรับการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับงานถมหรืองานขุดในโครงการก่อสร้างต่างๆ

คำสำคัญ: ความลาด, เสถียรภาพ, แผนภูมิเสถียรภาพความลาด, ดินเหนียวเนื้อเดียว

Abstract

Nowadays, there are a number of slope stability analysis methods. Each method has different of hypothesis, limitations and complexities. The method of slice is one of the most widely used methods of slope stability analysis. This analysis divides the soil mass over the slip surface into a vertical slice. It can be assumed that the slip surface is circular or non-circular. However, the complex equation for slope stability analysis has made it difficult to assess the initial slope stability in the work site. Therefore, the objective of this research is to propose slope stability chart of homogeneous clay layer by Morgenstern and Price method and consider the factors affecting slope stability such as slope factor, slope height, depth of firm subsoil, surcharge factor, and tension crack factor. The result will be beneficial for slope stability analysis of filling or excavation work on various construction projects.

Keywords: slope, stability, slope stability chart, homogeneous clay

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/2

2.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด

2.4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)	
2.4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960)	
2.4.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)	
2.4.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)	
2.4.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)	
2.4.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)	

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลาดดิน	2/1
2.2 สาเหตุของการพังทลายของลาดดิน	2/2
2.2.1 การลดลงของกำลังรับแรงเฉือน (Decreased in shear strength)	2/2
2.2.2 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือน (Increased in shear stress)	2/3
2.3 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน	2/4
2.3.1. การร่วงหล่น (Fall)	2/4
2.3.2 การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides)	2/5
2.3.3 การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Translational Slides)	2/5
2.3.4 การเลื่อนไหล (Flows)	2/5
2.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด	2/7
2.4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)	2/7

2.4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960)	2/10
2.4.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)	2/12
2.4.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)	2/15
2.4.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)	2/17
2.4.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)	2/19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตก บริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/1
4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีมีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตก บริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/2
4.2.1 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก	4/2
4.2.2 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)	4/5
4.2.3 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)	4/7
4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาด ของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012	4/9
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักบรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/9
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/10
4.3.3 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักบรรทุกและมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/11
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ลาดดินต่างๆ	2/1
รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไป	2/5
รูปที่ 2.3 วงกลมเสียดทานของ Taylor (1937, 1948)	2/8
รูปที่ 2.4 นิยามของ depth factor	2/8
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor กรณีดินทราย	2/9
รูปที่ 2.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor กรณีดินเหนียว	2/9
รูปที่ 2.7 Stability coefficients m และ n ของดินแต่ละกรณี	2/10
รูปที่ 2.8 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h = 0.0125$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$	2/12
รูปที่ 2.9 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h = 0.025$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$	2/13
รูปที่ 2.10 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h = 0.05$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$	2/14
รูปที่ 2.11 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)	2/16
รูปที่ 2.12 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)	2/18
รูปที่ 2.13 Relationship between depth D and stability factor N_s for various slope angles	2/18
รูปที่ 2.14 แผนภูมิความลาดของ Hunter and Schuster (1971) สำหรับดินเหนียว	2/19
รูปที่ 2.15 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) สำหรับดินทราย	2/19
รูปที่ 2.16 Surcharge adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi > 0$ soil	2/20
รูปที่ 2.17 Submergence and seepage adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil	2/20
รูปที่ 2.18 Tension crack adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil	2/21
รูปที่ 3.1 เงื่อนไขของปัญหา	3/2
รูปที่ 4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินเหนียวเนื้อเดียว (กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน)	4/1
รูปที่ 4.2 ผลของปัจจัยน้ำหนักรรทุกต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_q/FS_0 ($\beta =$ แปรผัน, $D/H = 1.5$)	4/3
รูปที่ 4.3 ผลของปัจจัยน้ำหนักรรทุกต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_q/FS_0 ($\beta = 40^\circ$, D/H แปรผัน)	4/3
รูปที่ 4.4 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักรรทุก	4/4
รูปที่ 4.5 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_r/FS_0 (β แปรผัน, $D/H = 2.0$)	4/5

รูปที่ 4.6 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_t/FS_0 ($\beta=70^\circ$, D/H แปรผัน)	4/6
รูปที่ 4.7 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)	4/6
รูปที่ 4.8 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_t/FS_0 (β แปรผัน, D/H=2.0)	4/7
รูปที่ 4.9 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_t/FS_0 ($\beta=20^\circ$, D/H แปรผัน)	4/8
รูปที่ 4.10 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)	4/8
รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหน้าหน้าบรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน	4/9
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหน้าหน้าบรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)	4/10
รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหน้าหน้าบรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)	4/10
รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหน้าหน้าบรทุก และมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)	4/11
รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหน้าหน้าบรทุก และมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)	4/12

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แผนภูมิเสถียรภาพความลาด (slope stability charts) ช่วยให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทำได้รวดเร็วสามารถใช้วิเคราะห์เบื้องต้นและวิเคราะห์รายละเอียดได้ ค่าที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดมักมีความถูกต้องและสามารถประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน มีผู้เสนอแผนภูมิเสถียรภาพความลาดไว้หลายกรณี เช่น แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937), Taylor (1948) และ Janbu (1968)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor เป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาดที่นิยมใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินเหนียวเนื้อเดียวแบบหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดยใช้พื้นฐานของหลักการวิธีวงกลมเสียดทาน (friction circle method) คือความต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินบนพื้นระนาบวงกลมเกิดจากความเชื่อมแน่น (cohesion) และแรงลัพท์ของแรงเสียดทานซึ่งเป็นผลรวมของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวเนื่องจากมุมเสียดทานภายในกับแรงเสียดทานเฉือน ทิศทางของแรงลัพท์จะทำมุม ϕ กับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดิน และสัมพันธ์กับเส้นรอบวงของวงกลมกับเสียดทาน การคำนวณหาค่าความสูงวิกฤตของความลาด (H_c) และอัตราส่วนปลอดภัย (FS) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (N_c) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาด มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (β), มุมเสียดทาน (ϕ) และ depth factor (D) อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor จะใช้งานง่ายและเป็นที่ยอมรับ แต่แผนภูมินี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น (i) ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor) (ii) ไม่พิจารณาผลของการไหลซึมผ่านทั้งในและนอกลาดดิน (seepage/submergence factor) (iii) ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor) เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1968 Janbu (1968) ได้เสนอแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเหนียว ($\phi=0^\circ$ และ su คงที่) และดินทราย ($\phi>0^\circ$) โดยพิจารณาลักษณะการวิบัติแบบวงกลมและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมลาดเอียง น้ำหนักบรรทุก, ผลของการไหลซึมผ่านของน้ำ และผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu จะสามารถวิเคราะห์ปัญหาลาดดินได้ครอบคลุมหลายปัจจัย แต่แผนภูมินี้มีข้อจำกัดคือวิธีการใช้งานยุ่งยาก

จากข้อกำหนดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดที่ใช้งานง่ายและสามารถวิเคราะห์ปัญหาลาดดินได้ครอบคลุมหลายปัจจัยเพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินสำหรับการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับงานถมหรืองานขุดในโครงการก่อสร้างต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวโดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการวิเคราะห์และสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่ คือ มุมเสียดทานภายในของดินเท่ากับศูนย์ (friction angle, $\phi = 0$) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength, s_u) มีค่าคงที่ โดยใช้วิธี Morgenstern and Price ซึ่งเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุด และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่

1. ปัจจัยมุมลาดเอียง (slope factor, β) คือ พิจารณาความลาดเอียงของลาดดินระหว่างมุม 10° ถึง 90°
2. ปัจจัยความสูง (depth factor, D/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของชั้นดินแข็ง (depth of firm subsoil, D) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ได้แก่ 0 ถึง 5
3. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (surcharge, q) และน้ำหนักของลาดดิน (weight of soil, γH) ระหว่าง 0 ถึง 0.5
4. ปัจจัยของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor, T/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยแตก (T) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 0.5
5. ปัจจัยรอยแตกไม่มีน้ำและมีน้ำ (Crack fill without and with water)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่ ที่สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ มุมลาดเอียง, ความสูงของลาดดิน, ความลึกของชั้นดินแข็ง, น้ำหนักบรรทุก และรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลาดดิน

ตามธรรมชาติของดินจะไม่อยู่เฉยๆในแนวราบเสมอไป อาจมีส่วนที่มีความลาดเอียง เช่น ภูเขาหรือเหว เป็นต้น ผิวดินส่วนนี้จะมีความลาดทำมุมกับแนวราบ โดยมุมที่เกิดขึ้นจะมีค่าความสูงจำกัดได้ค่าหนึ่ง ซึ่งหากค่าความสูงของดินมีค่ามากกว่าค่าความสูงจำกัดนี้จะทำให้ดินเกิดการวิบัติ (failure) ได้ โดยทั่วไปความลาดของดินอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การขุดและการถมดิน เป็นต้น ซึ่งการเคลื่อนตัวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักของลาดดินและแรงภายนอกที่มากระทำต่อลาดดินมีค่ามากกว่าแรงต้านทานการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งได้แก่ แรงเสียดทาน (Friction) และแรงเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion) แต่ในทางกลับกันแรงต้านทานการเคลื่อนตัวของดินมีค่ามากกว่าน้ำหนักของลาดดินและแรงภายนอกที่มากระทำต่อลาดดินดินจะไม่เกิดการวิบัติ รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของลาดดิน



(ก) ลาดดินเชิงเขา



(ข) ลาดดินทางรถไฟ



(ค) ลาดดินของถนน



(ง) ลาดดินจากการตัดภูเขา

รูปที่ 2.1 ลาดดินต่างๆ

2.2 สาเหตุของการพังทลายของลาดดิน

การออกแบบความลาดของงานดินต่างระดับต้องอาศัยพื้นฐานความเข้าใจพฤติกรรมและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมักเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโครงสร้าง การวิบัติของลาดดินเกิดจาก 2 สาเหตุหลักคือ การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนในดิน (Decreased in shear strength) และการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนในดิน (Increased in shear stress)

2.2.1 การลดลงของกำลังรับแรงเฉือน (Decreased in shear strength)

(1) การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในโพรงดิน (Increased pore pressure)

การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในโพรงดิน (pore pressure) จะส่งผลให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของดินลดลง ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินลดลง เป็นสาเหตุให้ดินเกิดการวิบัติ เช่น เวลาที่มีฝนตกหนักๆ ดินเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำทำให้ไม่สามารถรับน้ำหนักได้จึงเกิดการวิบัติ

(2) รอยแตก (Cracks)

รอยแตกบริเวณผิวดิน ที่เกิดจากดินแห้งทำให้เกิดแรงดึงบริเวณผิวบนของพื้นที่ลาดส่งผลให้ดินเกิดการวิบัติได้

(3) การบวมตัวของดิน (Swelling)

การบวมตัวของดินหรือการขยายปริมาตรของดินส่งผลทำให้กำลังการรับแรงของดินลดลง โดยส่วนใหญ่มักเกิดกับดินเหนียวซึ่งมีค่าการระบายน้ำต่ำ เช่น Kayyal (1991) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุการวิบัติของทางหลวงบริเวณใกล้ฮิลตันและเท็กซัส ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอัด (plastic compacted clays) ภายหลังจาก 10-20 ปี หลังทำการก่อสร้าง พบว่าเป็นผลมาจากการบวมตัวของดิน

(4) การเกิด slickensides

การเกิด slickensides มักเกิดในดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ซึ่งเป็นผลของการเกิดแรงเฉือนบนระนาบที่แตกต่างกันของการเคลื่อนตัวและแผ่นดินเหนียววางต่อขนานกับระนาบการเคลื่อนตัว ทำให้เกิดระนาบเรียบมันเงาเป็นระนาบที่อ่อนแอกว่าระนาบที่แผ่นดินเหนียวจัดเรียงตัวแบบ random. มุมเสียดทานของ slickensides ถูกเรียกว่า residual friction angle.

(5) การสลายตัวของ clayey rock fills (Decomposition of clayey rock fills)

Clay shales และ clay stones มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในงานดินถม แต่เมื่อวัสดุเหล่านี้เปียกเนื่องจากน้ำฝนหรือน้ำใต้ดินจะเกิดการแยกตัวของดินเหนียวการบวมตัวของดินเหนียวในช่องว่างของวัสดุถมนี้ ส่งผลทำให้กำลังการรับแรงของชั้นดินถมลดลงและไม่มีเสถียรภาพ

(6) การคืบภายใต้แรงกระทำเป็นเวลานาน (*Creep under sustained loads*)

ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงจะเสียรูปเมื่อได้รับแรงกระทำเป็นเวลานานซึ่งอาจเกิดการวิบัติได้แม้ว่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าน้อยกว่า short-term strength การคืบนี้จะรุนแรงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเข้าไปซ้ำมาในหลายเงื่อนไข เช่น freeze-thaw และ wet-dry

(7) การชะล้าง (*Leaching*)

การชะล้างเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำในโพรงดิน การชะล้างเกลือจากน้ำในโพรงดินเหนียวทะเล (marine clays) ส่งผลให้ดินมีความไวสูง คือเสื่ยกำลังเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน

(8) *Strain softening*

ดินเปราะจะแสดงพฤติกรรมแบบ strain softening คือ ภายหลังจากจากจุด peak บนกราฟ stress-strain หน่วยแรงเฉือนจะลดลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิด progressive failure.

(9) การผุกร่อน (*Weathering*)

หินหรือดินแข็งถูกทำให้กำลังรับแรงลดลงโดยการผุกร่อนทั้งกระบวนการทางกายภาพ (Physical process) คือการทำให้ดินแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และกระบวนการทางเคมี (Chemical process) คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน

(10) *Cyclic loading*

ภายใต้ Cyclic loading พันธะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเกิดการแตกหักและค่าแรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ดินสูญเสียกำลัง

2.2.2 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือน (*Increased in shear stress*)

(1) *แรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน (Loads at the top of the slope)*

การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ส่งผลทำให้ต้องการแรงต้านทานแรงเฉือนของลาดดินเพิ่มขึ้น

(2) *ค่าแรงดันน้ำในรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (Water pressure in cracks at the top of the slope)*

หากในรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินมีน้ำอยู่ แรงดันน้ำในรอยแตกจะทำให้ shear stresses เพิ่มขึ้นและทำให้ลาดดินเกิดความเสียหาย

(3) *การเพิ่มของน้ำหนักดินเนื่องจากความชื้นในดินเพิ่มขึ้น (Increase in soil weight due to increased water content)*

การแทรกซึมของน้ำในลาดดินทำให้ความชื้นในดินเพิ่มสูงขึ้น และน้ำหนักดินมากขึ้น ส่งผลให้ลาดดินขาดเสถียรภาพ

(4) การขุดบริเวณด้านล่างของลาดดิน (Excavation at the bottom of the slope)

การขุดดินทำให้ความลาดชันเพิ่มขึ้นเสถียรภาพของดินลดลง เช่นเดียวกันกับการกัดเซาะโดยน้ำบริเวณฐานของลาดดิน

(5) การลดลงของระดับน้ำบริเวณฐานของความชัน (Drop in water level at the base of slope)

แรงดันน้ำจากภายนอกที่กระทำบริเวณส่วนล่างของลาดดินมีผลต่อเสถียรภาพของดิน หากระดับน้ำลดลงเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเพราะหน่วยแรงเฉือนในดินเพิ่มขึ้น แต่หากกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแรงดันในในโพรงดินลดลงไม่ทันแรงดันน้ำภายนอกจะทำให้ลาดดินมีเสถียรภาพลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า rapid drawdown หรือ sudden drawdown เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

(6) การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว (Earthquake shaking)

แผ่นดินไหวกระทำต่อลาดดินทั้งความเร่งแนวราบและแนวตั้ง เกิดเป็นวงจรการเปลี่ยนแปลงของ stresses ในดิน หากการสั่นสะเทือนไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงของดินเปลี่ยนไปเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเมื่อมีแรงพลศาสตร์มากระทำในทิศทางตรงกันข้าม และหากการสั่นสะเทือนส่งผลให้กำลังรับแรงของดินลดลง ปัญหาเสถียรภาพของดินจะยิ่งรุนแรงขึ้น

2.3 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน

การวิบัติของลาดดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของดิน ลักษณะของชั้นดิน น้ำใต้ดิน แรงดันเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดิน และรูปร่างทางเรขาคณิตของคันดิน ตัวอย่างลักษณะของการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไปมีดังนี้ (รูปที่ 2.2)

2.3.1. การร่วงหล่น (Fall)

การร่วงหล่นเป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วลงมาตามลาดเขาหรือหน้าผาสูงชันโดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก การร่วงหล่นนี้มักมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังนั้นตะกอนดินหรือหินที่พังทลายลงมาจะกองสะสมกันอยู่บริเวณเชิงเขาหรือหน้าผา ถ้าเป็นหน้าผาหินและตะกอนที่ตกลงมาส่วนมากเป็นหิน เรียกว่า rock fall ส่วนถ้าเป็นหน้าผาดินและตะกอนที่ตกลงมาเป็นดินเม็ดละเอียด เรียกว่า debris fall และถ้าตะกอนที่ตกลงมาเป็นดินเม็ดละเอียด เรียกว่า earth fall

2.3.2 การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides)

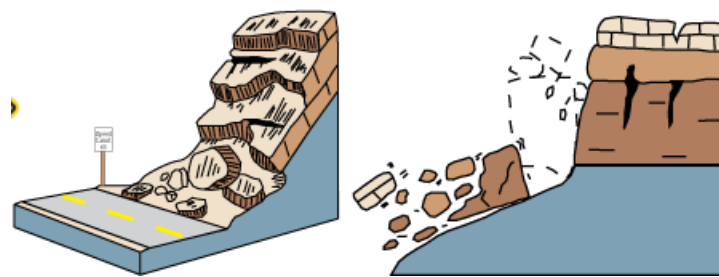
การเคลื่อนหมุนเป็นการเคลื่อนตัวของมวลดินภายในผิวเฉือนที่ใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลมและรูปร่างของมวลดินที่มีการเคลื่อนตัวอาจเป็นส่วนหนึ่งของรูปทรงกระบอก

2.3.3 การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Translational Slides)

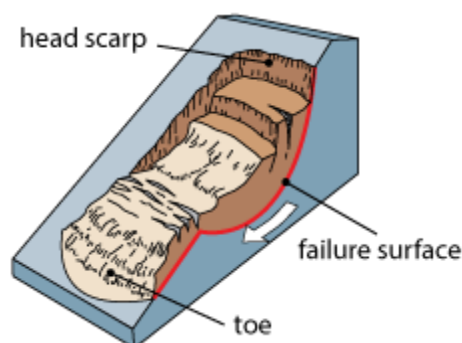
การวิบัติในลักษณะนี้จะปรากฏผิวเคลื่อนเป็นพื้นระนาบซึ่งมักจะขนานกับผิวหน้าของมวลดิน การวิบัติชนิดนี้เกิดจากการที่มีชั้นดินอ่อนแทรกอยู่ในคันดินซึ่งลักษณะของการวิบัติจะเป็นการเลื่อนไถลและมักเกิดในดินเม็ดหยาบ

2.3.4 การเลื่อนไหล (Flows)

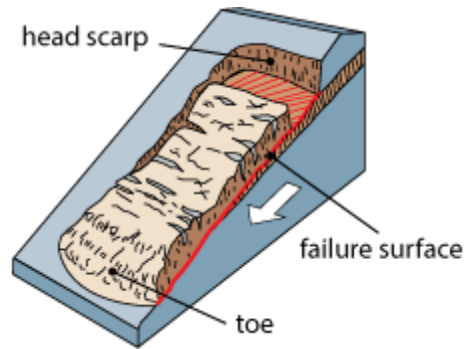
การเลื่อนไหลมักเกิดขึ้นในลาดดินที่มีน้ำเข้าผสมจนดินอ่อนตัวเสียกำลังและเริ่มอึดตัว จนเกิดการไหลของวัสดุชั้นเหลวที่มีความหนืด เช่น กรณีการพังของไหล่เขาในภาคใต้เนื่องจากฝนตกหนัก



(ก) การร่วงหล่น



(ข) การเคลื่อนหมุน



(ค) การเคลื่อนตัวในแนวราบ



(ง) การเลื่อนไหล

รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไป

<https://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/geology/geologic-hazards/landslides#types-of-landslides.7>

2.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดชันช่วยให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทำได้รวดเร็วสามารถใช้วิเคราะห์เบื้องต้นและวิเคราะห์รายละเอียดได้ ค่าที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดชันก็มีความถูกต้องและสามารถประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งได้มีผู้เสนอแผนภูมิเสถียรภาพลาดดินไว้หลายกรณี ดังนี้

2.4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor เป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาดที่นิยมใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินเหนียวเนื้อเดียวแบบหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดยใช้พื้นฐานของหลักการวิธีวงกลมเสียดทาน (friction circle method) คือความต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินบนพื้นระนาบวงกลมเกิดจากความเชื่อมแน่น (cohesion) และแรงลัพท์ของแรงเสียดทานซึ่งเป็นผลรวมของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวเนื่องจากมุมเสียดทานภายในกับแรงเสียดทานเฉือน ทิศทางของแรงลัพท์จะทำมุม ϕ กับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินและสัมผัสกับเส้น รอบวงของวงกลมกับเสียดทาน ดังรูปที่ 2.3 ความสูงวิกฤตของความลาดและอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ และแผนภูมิความลาดของ Taylor (1937, 1948) แสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (β), มุมเสียดทาน (ϕ) และ depth factor (D) ซึ่งนิยามของ depth factor แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และสมการที่ (2.3)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor จะใช้งานง่ายและเป็นที่ยอมรับ แต่แผนภูมินี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น (i) ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor) (ii) ไม่พิจารณาผลของการไหลซึมผ่านทั้งในและนอกลาดดิน (seepage/submergence factor) (iii) ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor) เป็นต้น

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma} \quad (2.1)$$

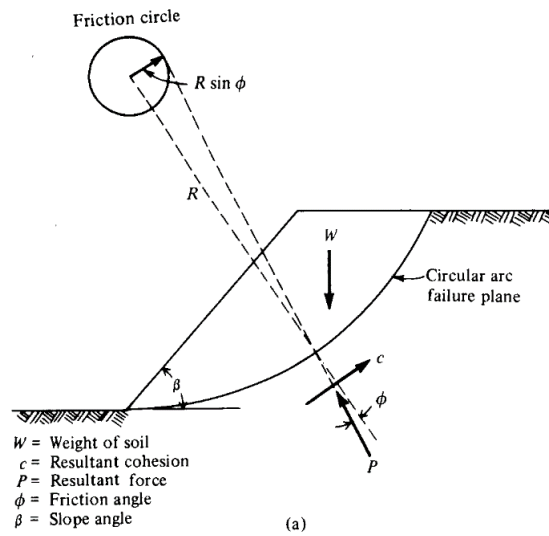
$$FS = \frac{H_c}{H_{act}} \quad (2.2)$$

เมื่อ N_s = Stability factor
 H_c = Critical height
 c = Cohesion
 γ = Unit weight of soil

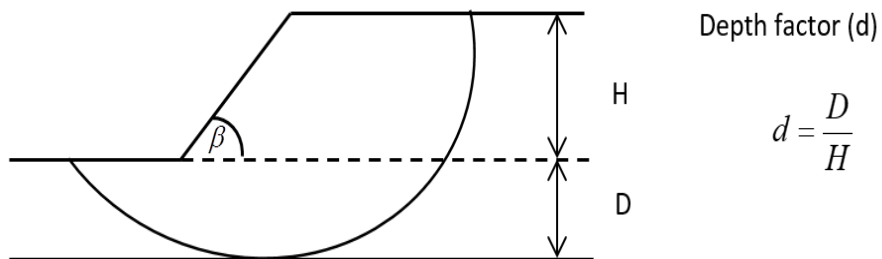
$$d = \frac{D}{H} \quad (2.3)$$

เมื่อ H = ความสูงของความลาด

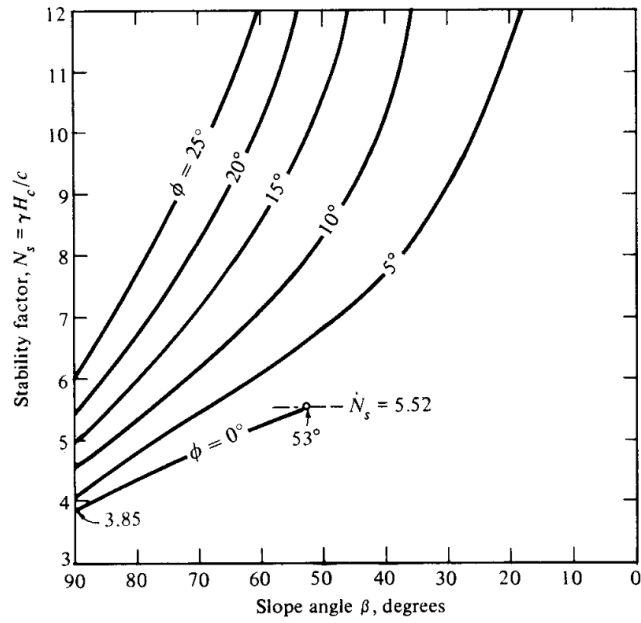
V = ค่าความจากจุดบนสุดของความลาดถึงจุดล่างสุดของผิวเคลื่อนพังของดิน



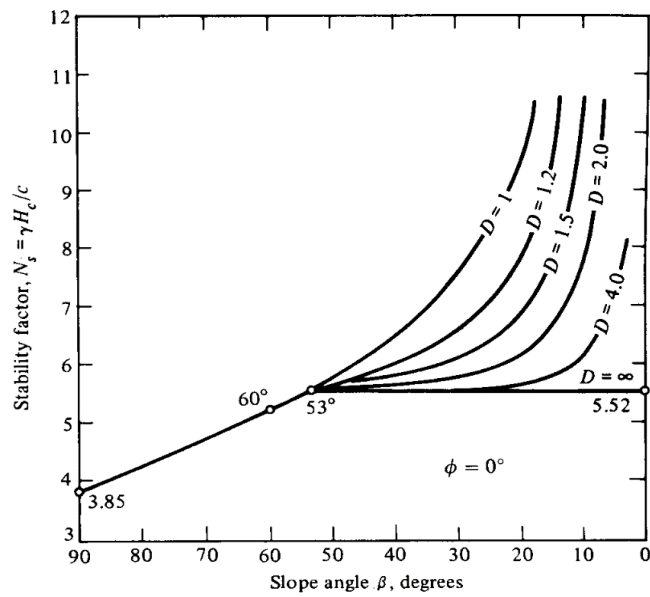
รูปที่ 2.3 วงกลมเสียดทานของ Taylor (1937, 1948)



รูปที่ 2.4 นิยามของ depth factor



รูปที่ 2.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor กรณีดินทราย



รูปที่ 2.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor กรณีดินเหนียว

2.4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960) อาศัยพื้นฐานหลักการวิเคราะห์ของ Bishop (1955) และพิจารณาแรงดันน้ำคงที่ (u =คงที่) เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินเนื้อเดียว (c =คงที่ ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) และรูปที่ 2.7 ซึ่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์โดยวิธีนี้มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาด β , มุมเสียดทาน ϕ และ (depth factor (D)

$$r_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (2.4)$$

$$FS = m - (n)(r_u) \quad (2.5)$$

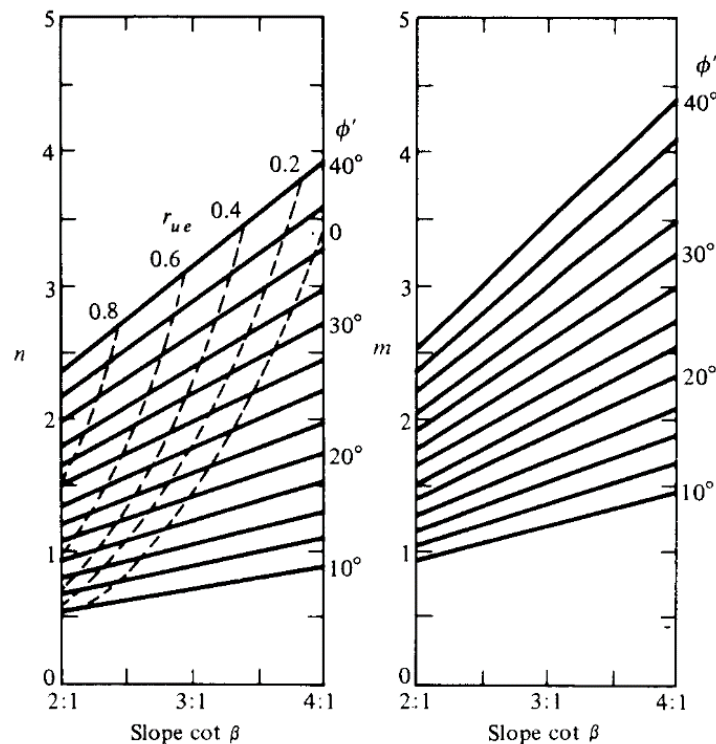
เมื่อ r_u = pore pressure ratio

u = pore water pressure

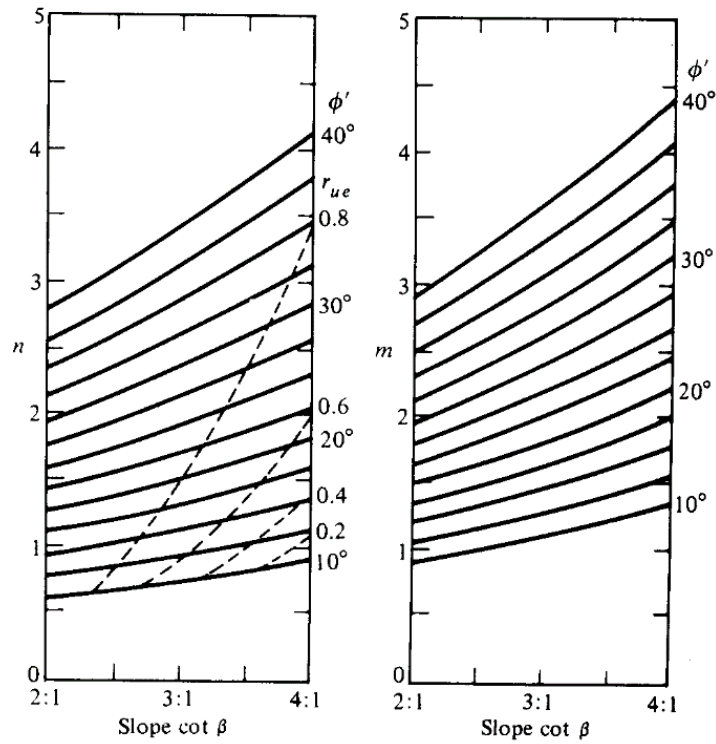
γ = unit weight

h = depth of the point in the soil mass below the ground surface.

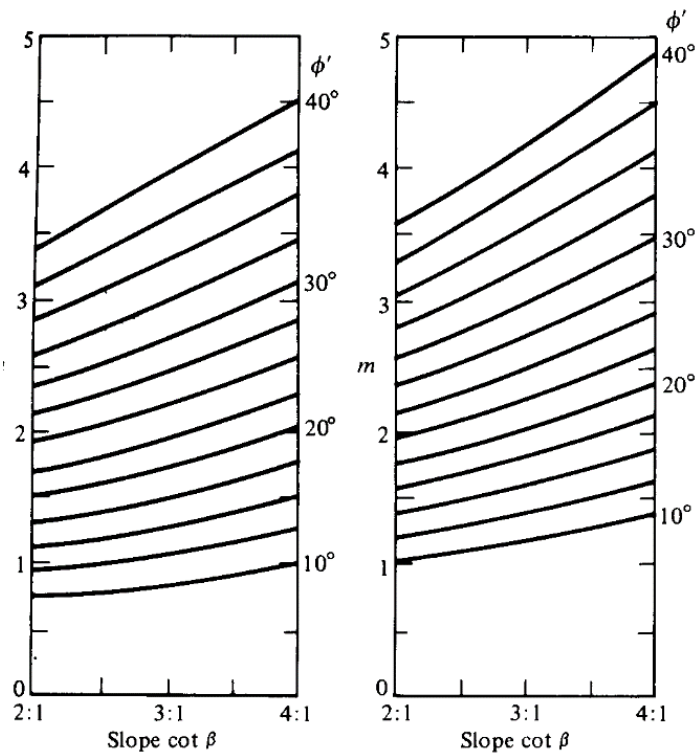
m, n = stability coefficients.



(a) กรณี $\frac{c'}{\gamma H} = 0.05$ และ $D = 1.00$



(b) กรณี $\frac{c'}{\gamma H} = 0.05$ และ $D = 1.25$

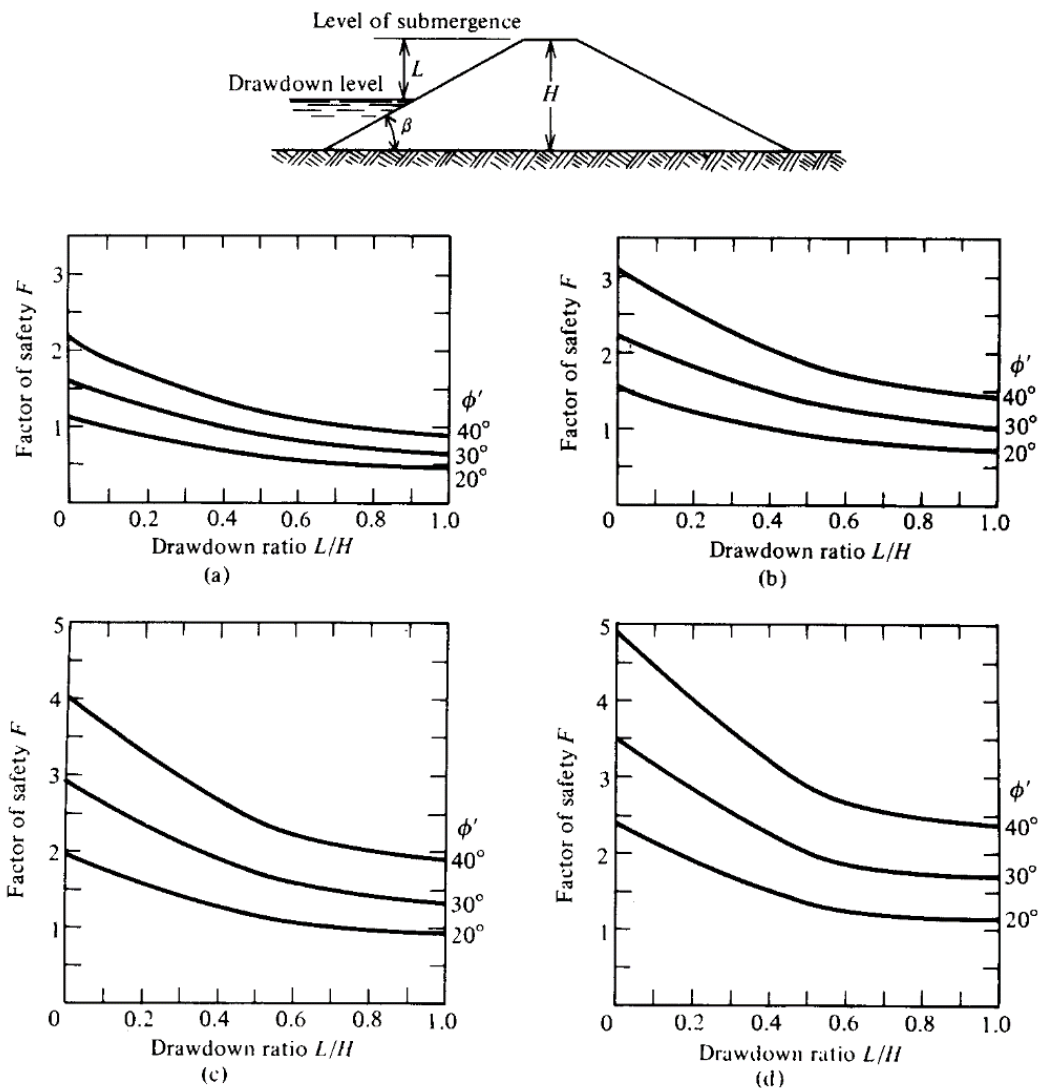


(c) กรณี $\frac{c'}{\gamma H} = 0.05$ และ $D = 1.50$

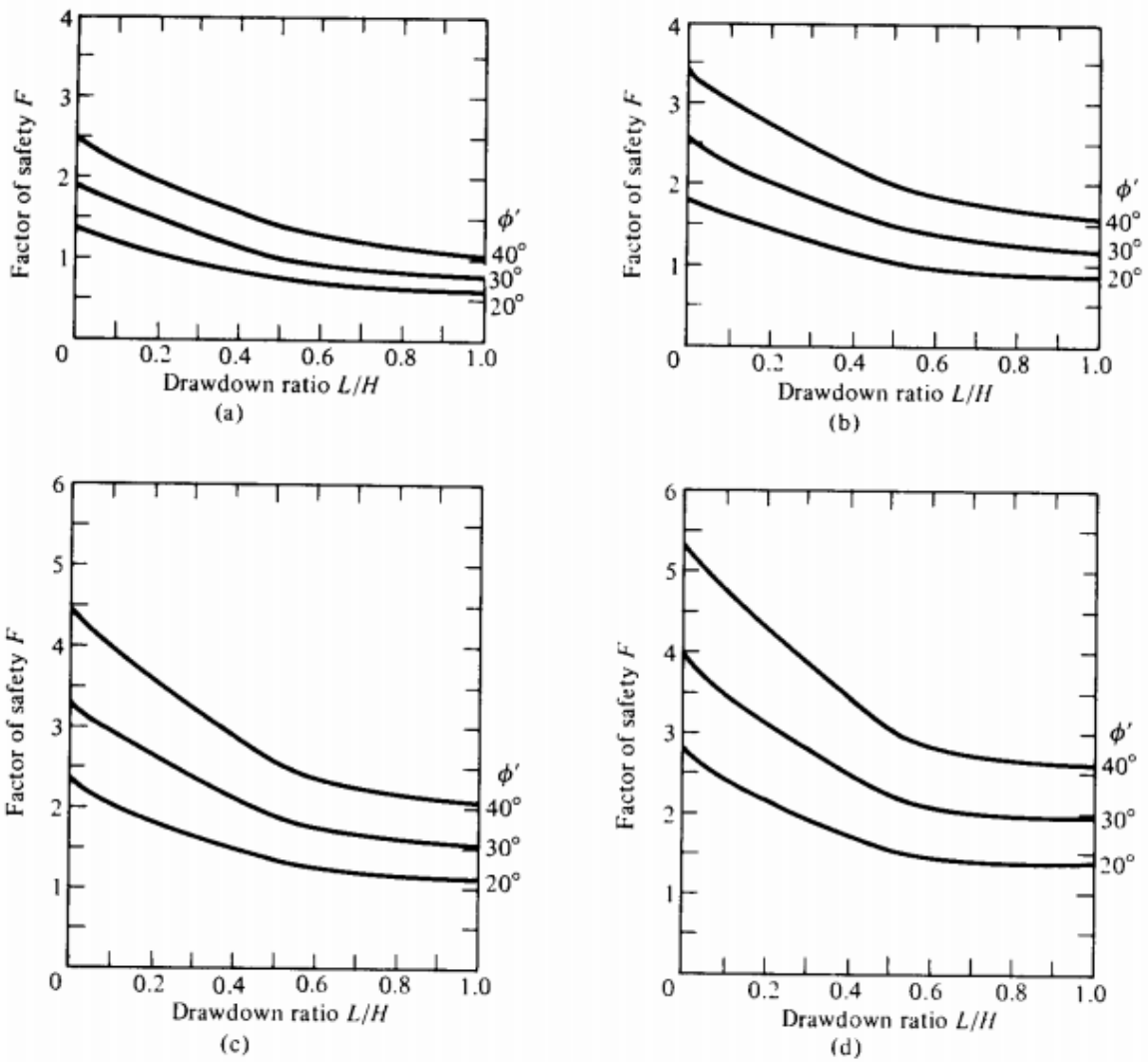
รูปที่ 2.7 Stability coefficients m และ n ของดินแต่ละกรณี (Bishop and Morganstern, 1960)

2.4.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)

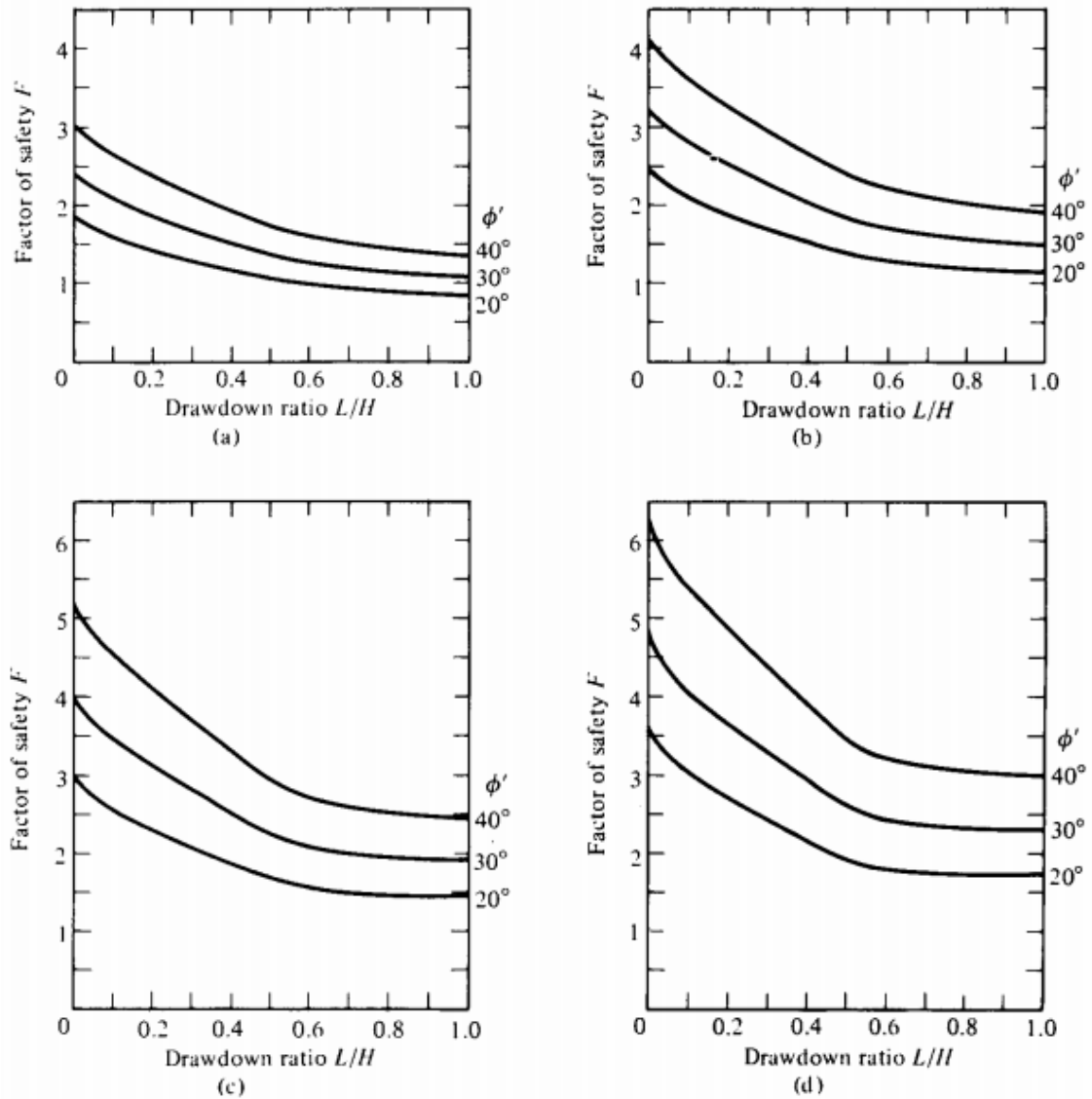
Morganstern (1963) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้หลักการของ Bishop and Morganstern (1960) และพิจารณาปัจจัยของระดับน้ำที่ลดลง (Rapid drawdown) โดยสมมติให้ดินเนื้อเดี่ยวนี้อุดมสมบัติ c และ γ คงที่ และความลาดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำซึ่งสูงกว่าระดับความสูงของดินถม ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.8-2.10



รูปที่ 2.8 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)
เมื่อ $c'/\gamma h = 0.0125$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$



รูปที่ 2.9 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)
 เมื่อ $c'/\gamma h = 0.025$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$



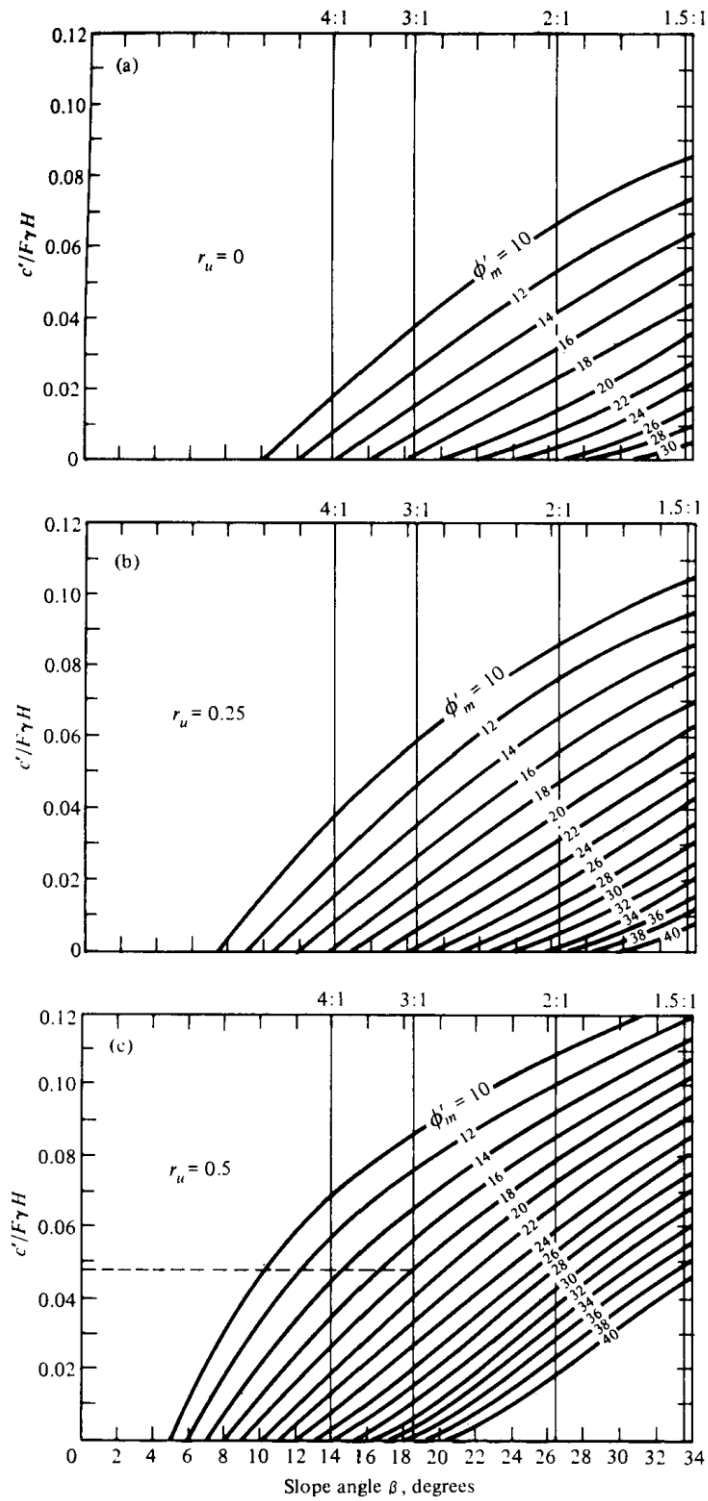
รูปที่ 2.10 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)
 เมื่อ $c'/\gamma h = 0.05$ (a) $\beta = 2:1$; (b) $\beta = 3:1$; (c) $\beta = 4:1$; (d) $\beta = 5:1$

2.4.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967) วิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress analysis) โดยใช้หลักการของ Fellenius (1927) และ Bishop (1955) สมมติให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ depth factor (D) มีค่ามากและแรงดันน้ำคงที่ ($u = \text{คงที่}$) ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6) และรูปที่ 2.11

$$N_s = \frac{c'}{(FS)\gamma H} \quad (2.6)$$

เมื่อ c' = cohesion with respect to effective stress
 F = Factor of safety
 γ = unit weight of soil
 H = height of slice
 N_s = stability factor



รูปที่ 2.11 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)

2.4.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)

Hunter and Schuster (1971) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ ($\phi = 0$) และ c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามระดับความลึก สามารถคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากสมการที่ (2.7) และ (.218) และรูปที่ 2.12 และ 2.13

$$M = \left(\frac{h}{H} \right) \left(\frac{\gamma_w}{\gamma'} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ M = water table ratio

h = depth from top of slope to the water table during consolidation

H = height of cut

$$F = \left(\frac{c}{p'} \right) \left(\frac{\gamma'}{\gamma} \right) N_s \quad (2.18)$$

เมื่อ c = cohesion

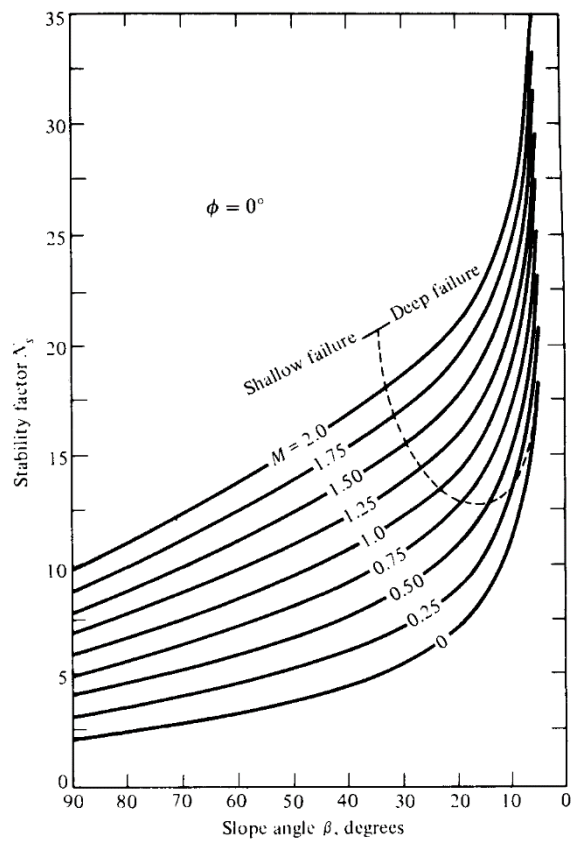
p' = effective vertical stress

γ = unit weight of soil

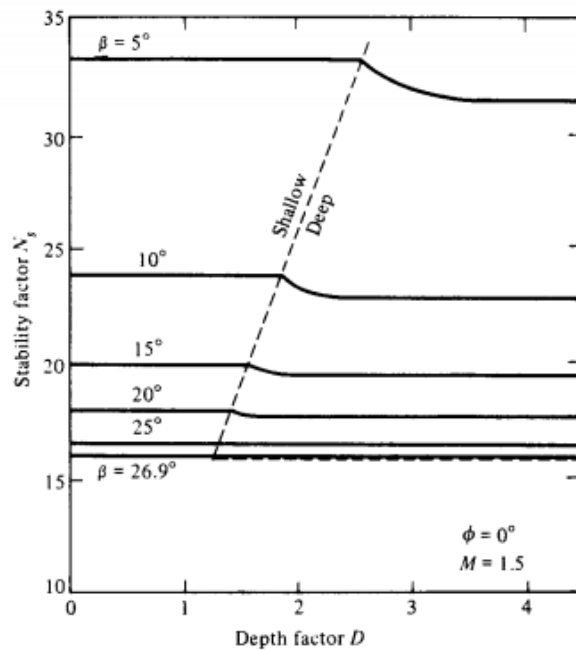
γ' = submerged or buoyant unit weight of soil ($\gamma' = \gamma - \gamma_w$)

γ_w = unit weight of water

N_s = Stability factor



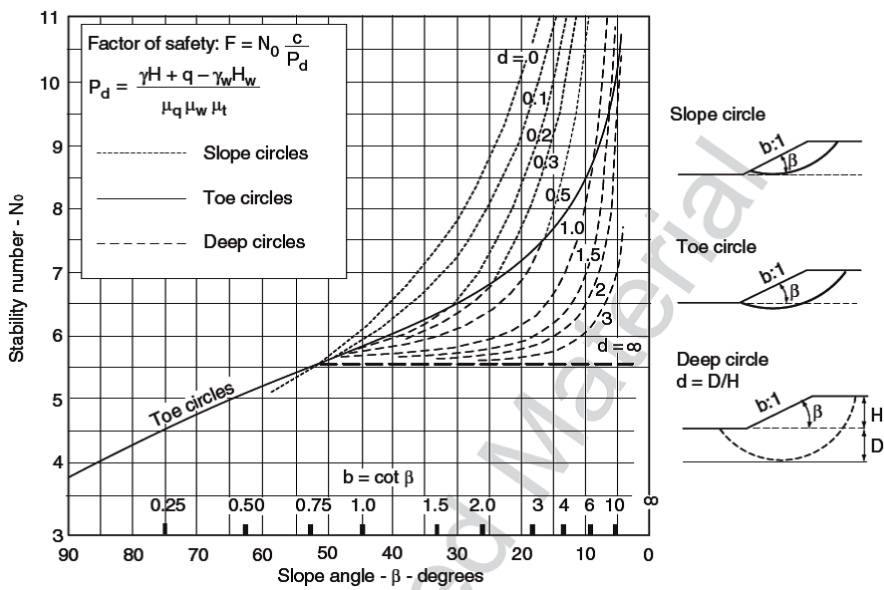
รูปที่ 2.12 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)



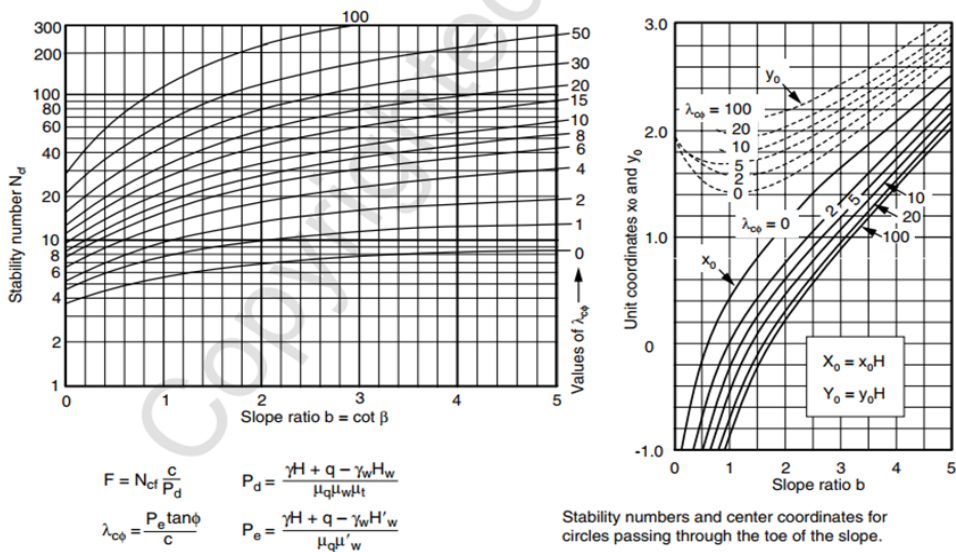
รูปที่ 2.13 Relationship between depth D and stability factor N_s for various slope angles (After Hunter and Schuster, 1968)

2.4.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)

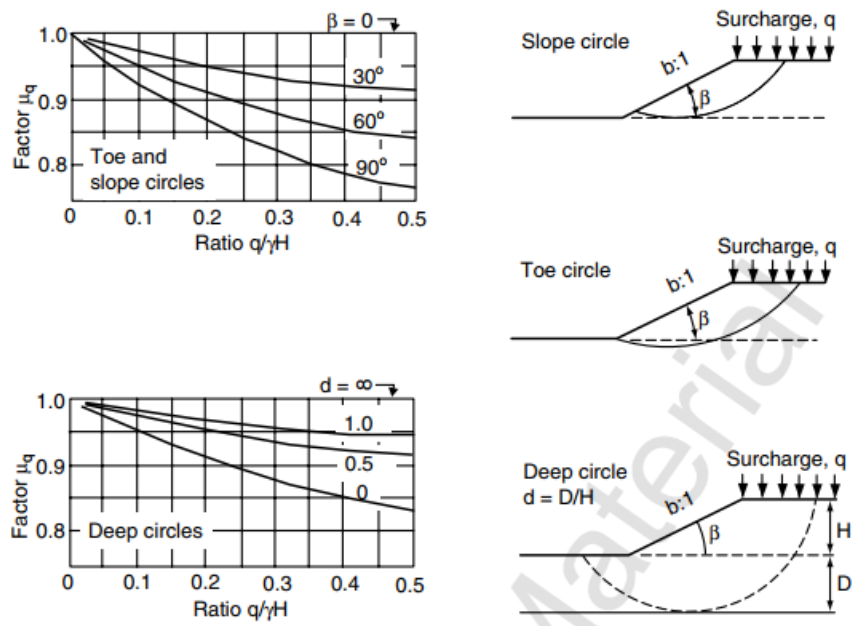
Janbu (1968) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของดินเหนียว ($\phi = 0$, $c =$ คงที่) โดยพิจารณาลักษณะการวิบัติแบบวงกลมและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมลาดดิน น้ำหนักบรรทุก (surcharge factor) การไหลซึมผ่านของน้ำ (seepage/submergence factor) และ tension crack factor สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากรูปที่ 2.14 และสำหรับดินทราย ($\phi > 0$) สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากรูปที่ 2.15



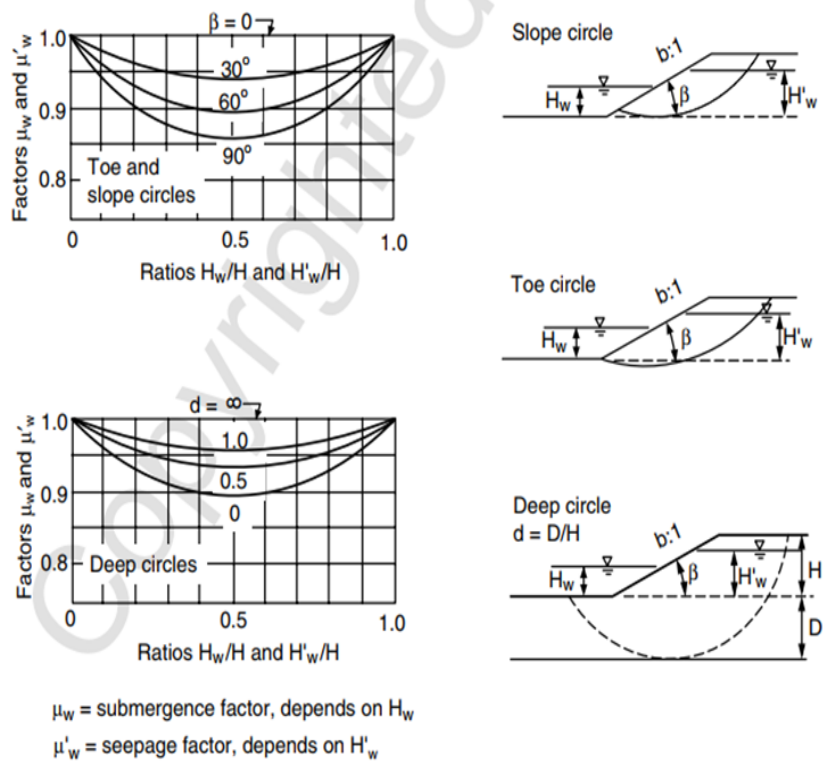
รูปที่ 2.14 แผนภูมิความลาดของ Hunter and Schuster (1971) สำหรับดินเหนียว



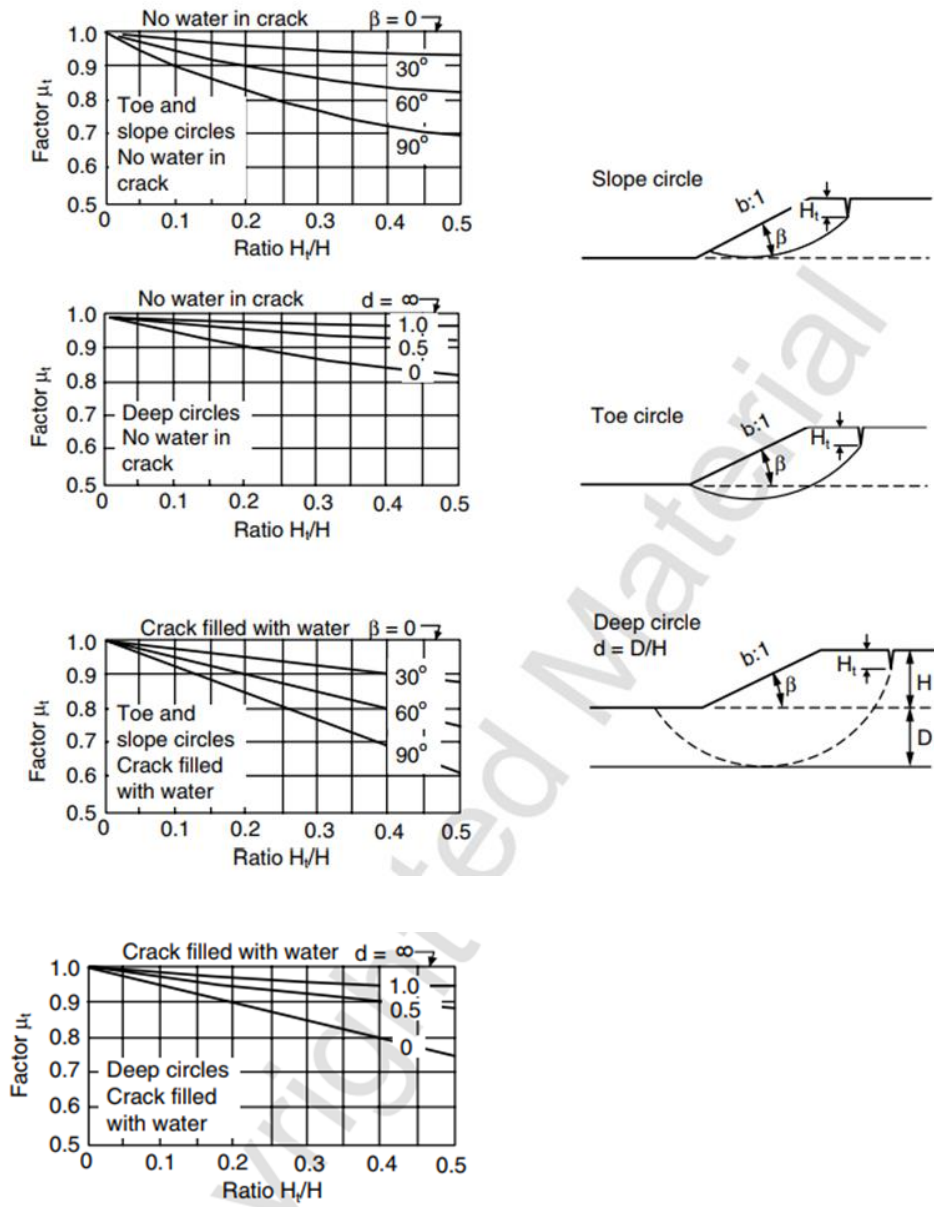
รูปที่ 2.15 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) สำหรับดินทราย



รูปที่ 2.16 Surcharge adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi > 0$ soil



รูปที่ 2.17 Submergence and seepage adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil



รูปที่ 2.18 Tension crack adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

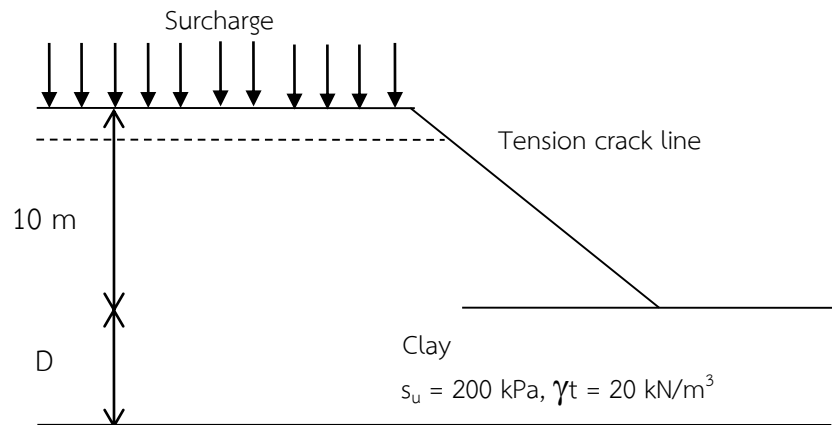
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยออกแบบระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 ทำการวิเคราะห์และสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังการรับแรงคงที่ คือ มุมเสียดทานภายในของดินเท่ากับศูนย์ (friction angle, $\phi = 0$) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength, s_u) มีค่าคงที่ โดยใช้วิธี Morgenstern and Price ซึ่งเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุด และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ (รูปที่ 3.1)

1. ปัจจัยมุมลาดเอียง (slope factor, β) คือ พิจารณาความลาดเอียงของลาดดินระหว่างมุม 10° ถึง 90°
2. ปัจจัยความสูง (depth factor, D/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของชั้นดินแข็ง (depth of firm subsoil, D) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ได้แก่ 0 ถึง 5
3. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (surcharge, q) และน้ำหนักของลาดดิน (weight of soil, γH) ระหว่าง 0 ถึง 0.5
4. ปัจจัยของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor, T/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยแตก (T) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 0.5
5. ปัจจัยรอยแตกไม่มีน้ำและมีน้ำ (Crack fill without and with water)

ส่วนที่ 2 นำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหรืออัตราส่วนปลอดภัย FS ของทุกกรณี (ส่วนที่ 1) มาสร้างเป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Slope stability chart) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังการรับแรงคงที่



D	=	0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 m
Surcharge	=	0, 25, 50, 75, 100 kPa
β	=	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 deg
Tension crack	=	0, 1.25, 2.5, 3.75, 5 m
Crack fill with water	=	Y, N

รูปที่ 3.1 เงื่อนไขของปัญหา

บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

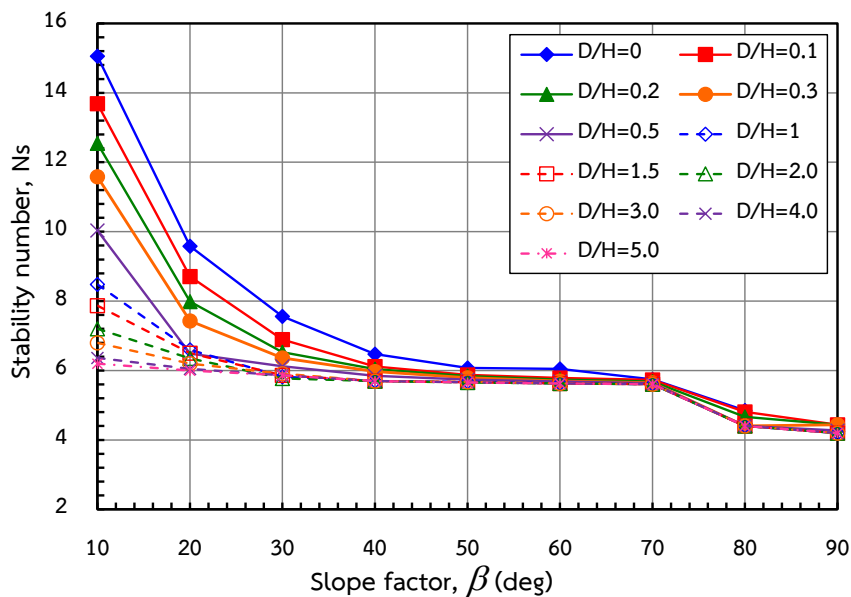
จากปัจจัยที่พิจารณาต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วในส่วนระเบียบวิธีวิจัย สามารถสร้างเป็นกรณีเพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้วยโปรแกรม GeoStudio 2012 จำนวน 5,500 กรณี จากนั้นนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหรืออัตราส่วนปลอดภัยของทุกกรณี มาสร้างเป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีลาดดินเหนียวเนื้อเดียว ดังนี้

4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน

ปัญหาเสถียรภาพลาดดินเหนียวเนื้อเดียว ($\phi=0^\circ$, γ และ s_u คงที่) ในกรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดเอียง (β) และปัจจัยความสูง (D/H) ค่าความสูงวิกฤตของความลาด (H_c) และอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ

$$H_c = N_s \frac{s_u}{\gamma} \quad (3.1)$$

$$FS = \frac{H_c}{H} \quad (3.2)$$



รูปที่ 4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินเหนียวเนื้อเดียว (กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน)

4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีมีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน

เพื่อให้การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพลาดดินครอบคลุม (i) ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก และ (ii) ปัจจัยของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน ผู้วิจัยจึงได้สร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยดังกล่าวดังสมการที่ (4.3)

$$FS = \mu_q \mu_r FS_0 \quad (4.3)$$

เมื่อ FS = ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (กรณีมีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน)

FS_0 = ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (กรณีไม่มีปัจจัยน้ำหนักบรรทุกและรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน: วิเคราะห์จากรูปที่ 4.1 และสมการที่ 4.2)

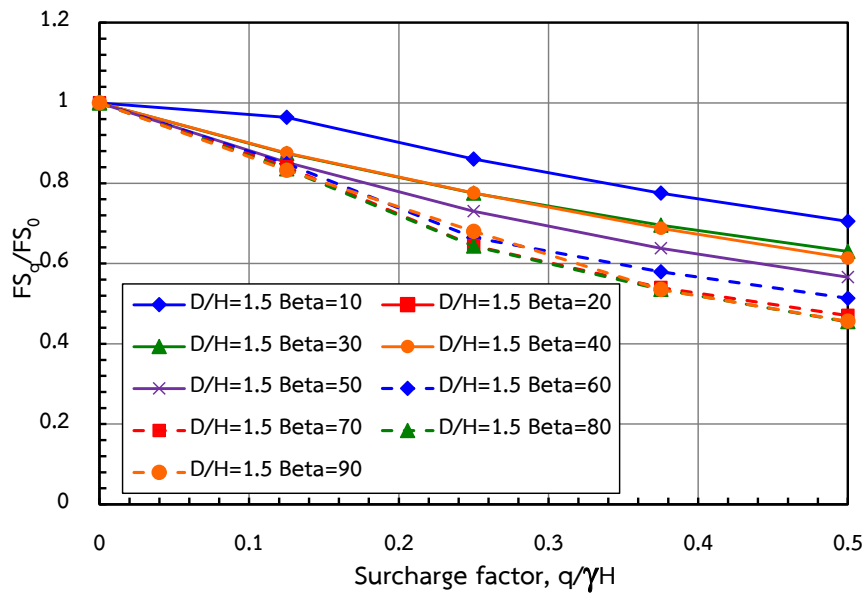
μ_q = ค่าปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก

μ_r = ค่าปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน

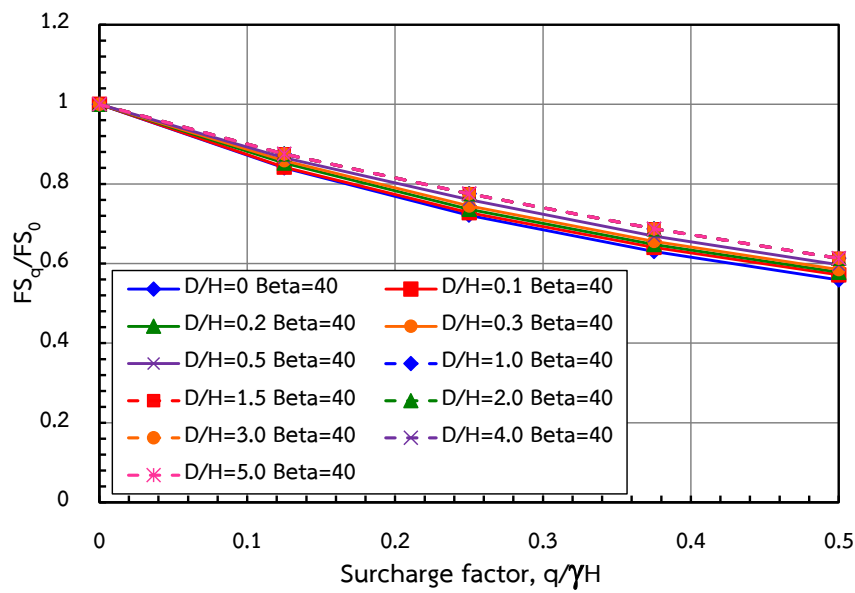
โดยค่าปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (μ_q) และค่าปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (μ_r) สามารถวิเคราะห์ได้จากแผนภูมิปรับแก้ดังจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2.1 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก

แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุกถูกวิเคราะห์มาจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยน้ำหนักบรรทุก ($q/\gamma H$) และ FS_q/FS_0 (สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยในกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกและไม่มีน้ำหนักบรรทุกที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม GeoStudio 2012) ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2 (กรณี β แปรผัน, $D/H=1.5$) และรูปที่ 4.3 (กรณี $\beta=40^\circ$, D/H แปรผัน) ตามลำดับ

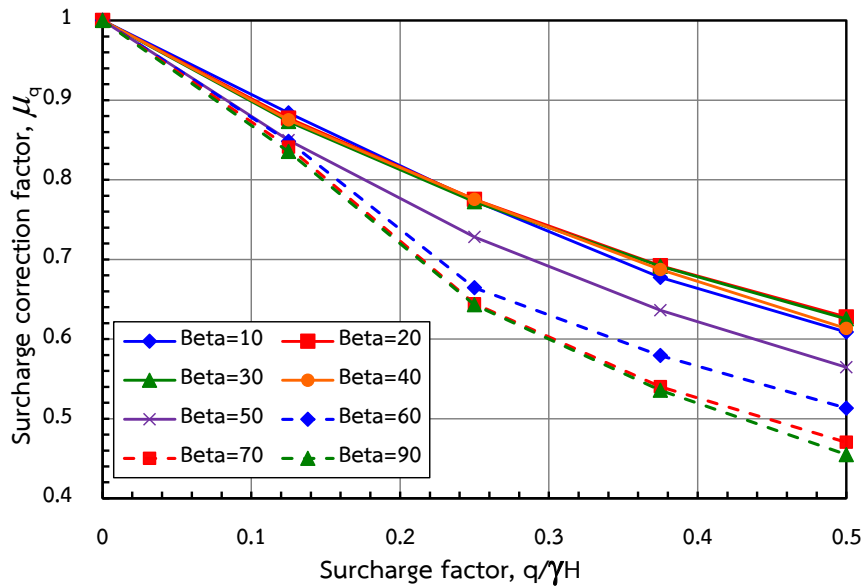


รูปที่ 4.2 ผลของปัจจัยน้ำหนักบรรทุกต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_q/FS_0 (β =แปรผัน, $D/H=1.5$)



รูปที่ 4.3 ผลของปัจจัยน้ำหนักบรรทุกต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_q/FS_0 ($\beta=40^\circ$, D/H แปรผัน)

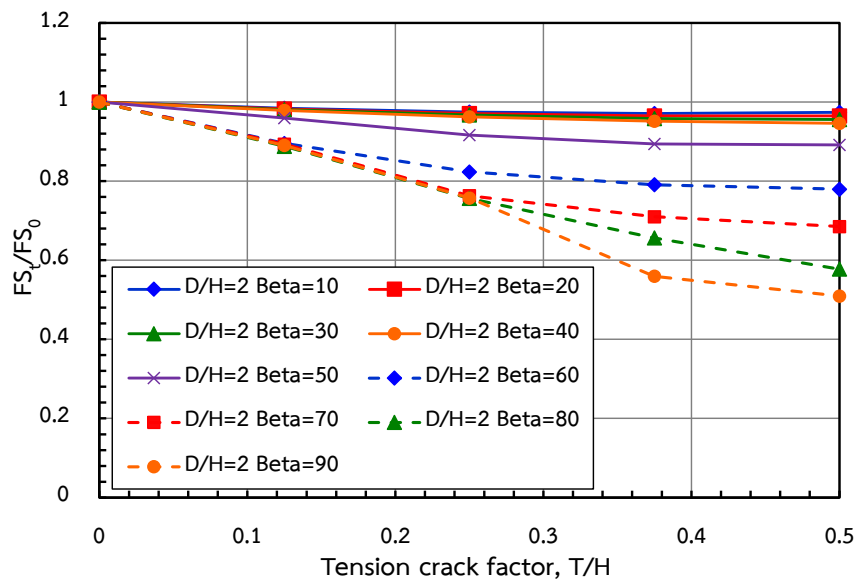
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่อลาดดินมีน้ำหนักรรทุกกระทำเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละกรณีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ไม่มีน้ำหนักรรทุกกระทำ นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีน้ำหนักรรทุกกระทำจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมลาดเอียง (β) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.2) แต่มีแนวโน้มคงที่เมื่อปัจจัยความสูง (D/H) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.3) นั้นหมายความว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีน้ำหนักรรทุกกระทำแปรผันตามมุมลาดเอียงแต่ไม่แปรผันตามปัจจัยความสูงของลาดดิน ดังนั้นแผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักรรทุกจึงถูกวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยของ FS_q/FS_0 (นิยามเป็นสัญลักษณ์ μ_q) ที่ค่ามุมลาดเอียงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4



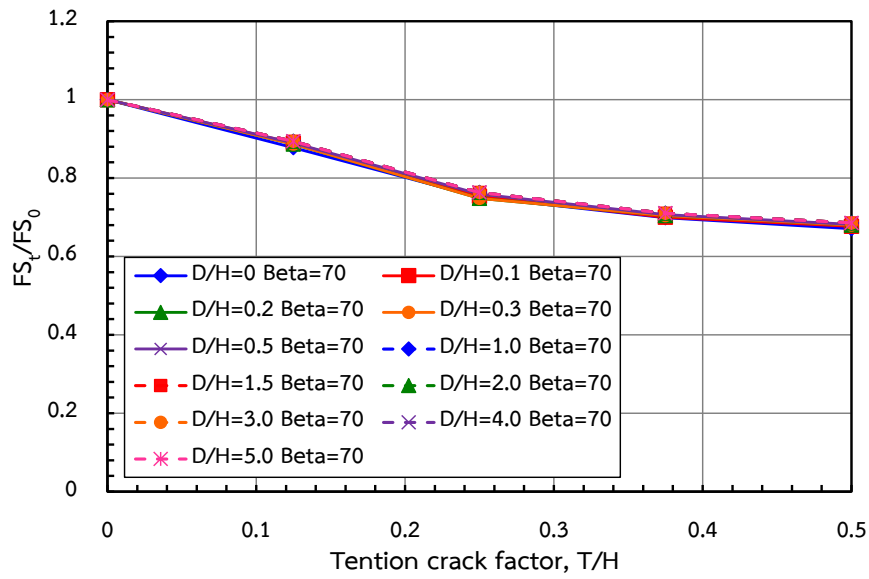
รูปที่ 4.4 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยน้ำหนักรรทุก

4.2.2 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)

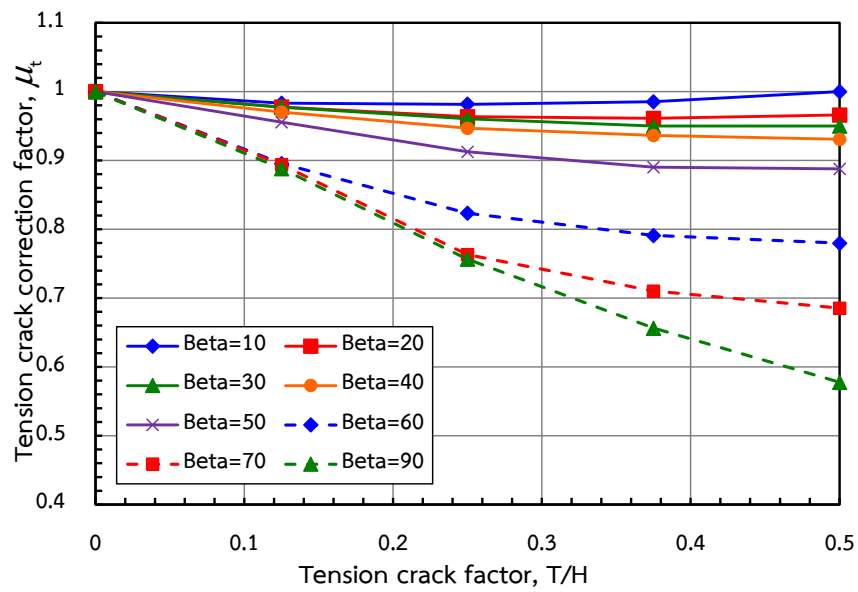
แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินถูกวิเคราะห์มาจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (T/H) และ FS_r/FS_0 (สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยในกรณีที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ) และไม่มีน้ำหนักบรรทุกที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม GeoStudio 2012) ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5 (β แปรผัน, $D/H=2.0$) และ รูปที่ 4.6 ($\beta=70^\circ$, D/H แปรผัน) พบว่า เมื่อลาดดินมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละกรณีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมลาดเอียง (β) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.5) แต่มีแนวโน้มคงที่เมื่อปัจจัยความสูง (D/H) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.6) นั่นหมายความว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินแปรผันตามมุมลาดเอียงแต่ไม่แปรผันตามปัจจัยความสูงของลาดดิน ดังนั้นแผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินจึงถูกวิเคราะห์โดยใช้ความเฉื่อยของ FS_r/FS_0 (นิยามเป็นสัญลักษณ์ μ_r) ที่ค่ามุมลาดเอียงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_r/FS_0 (β แปรผัน, $D/H=2.0$)



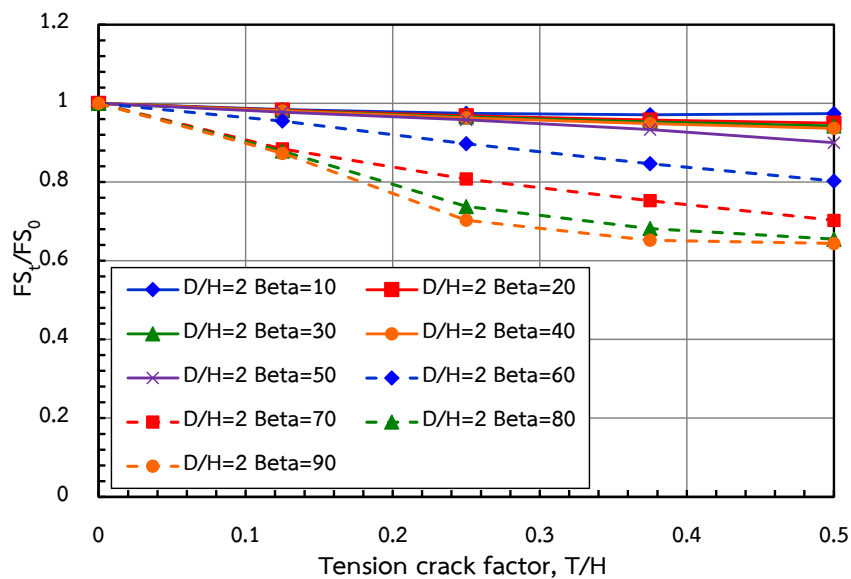
รูปที่ 4.6 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปกติภัย FS_r/FS_0
 ($\beta=70^\circ$, D/H แปรผัน)



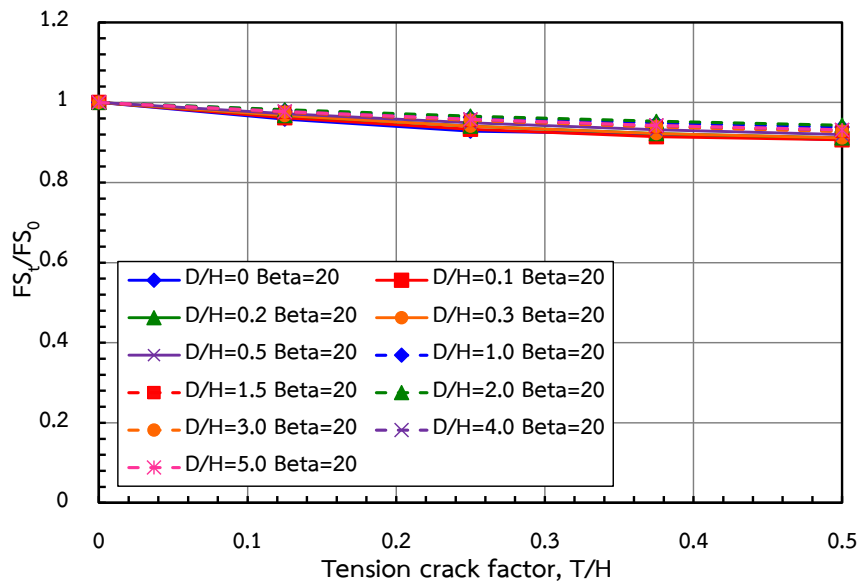
รูปที่ 4.7 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)

4.2.3 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)

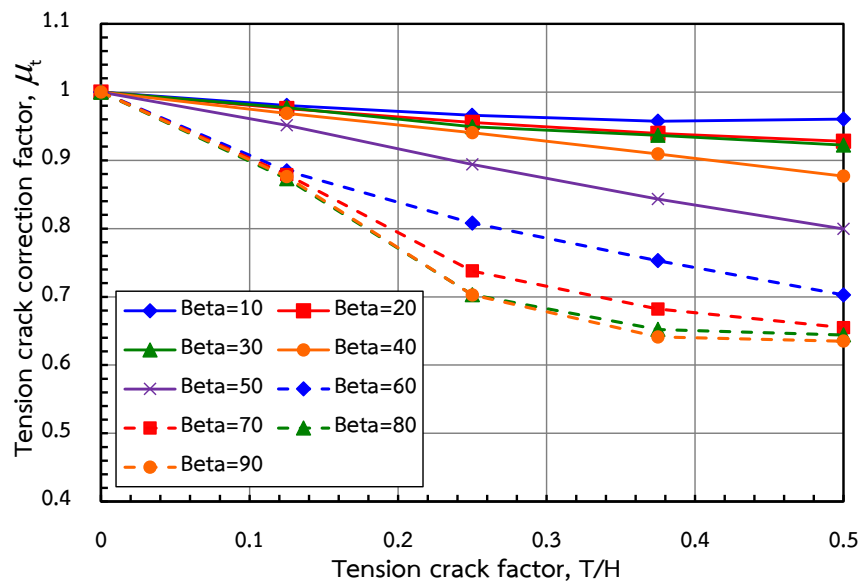
แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินถูกวิเคราะห์มาจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (T/H) และ FS_r/FS_0 (สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยในกรณีที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ) และไม่มีน้ำหน้กับบรรทุกที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม GeoStudio 2012) ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 (β แปรผัน, $D/H=2.0$) และ รูปที่ 4.9 ($\beta=70^\circ$, D/H แปรผัน) พบว่า เมื่อลาดดินมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละกรณีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมลาดเอียง (β) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.8) แต่มีแนวโน้มคงที่เมื่อปัจจัยความสูง (D/H) เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.9) นั่นหมายความว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินแปรผันตามมุมลาดเอียงแต่ไม่แปรผันตามปัจจัยความสูงของลาดดิน ดังนั้นแผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินจึงถูกวิเคราะห์โดยใช้ความเฉื่อยของ FS_r/FS_0 (นิยามเป็นสัญลักษณ์ μ_r) ที่ค่ามุมลาดเอียงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_r/FS_0 (β แปรผัน, $D/H=2.0$)



รูปที่ 4.9 ผลของปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย FS_v/FS_0
($\beta=20^\circ$, D/H แปรผัน)

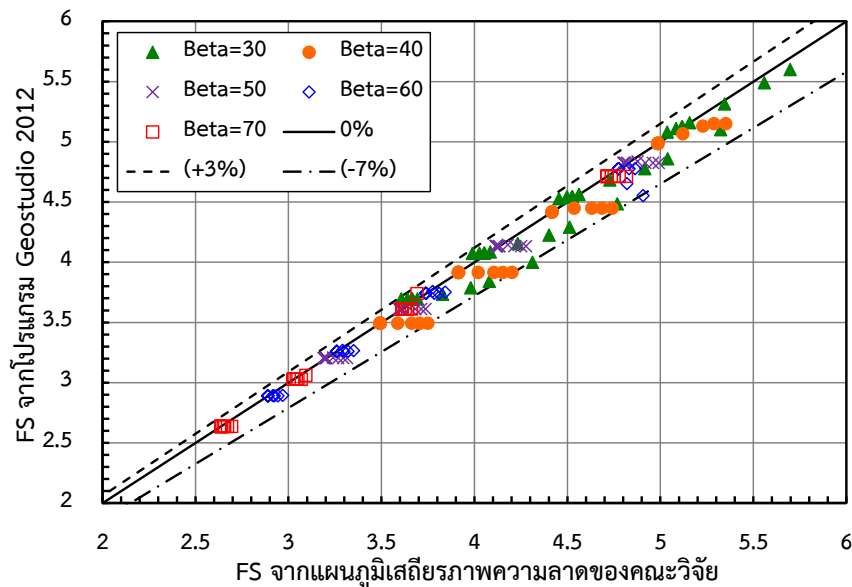


รูปที่ 4.10 แผนภูมิปรับแก้ปัจจัยรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)

4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012

ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 2,750 กรณี ประกอบด้วย β เท่ากับ 30° , 40° , 50° , 60° และ 70° D/H เท่ากับ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 และ 5 $c/\gamma H$ เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5 T/H เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5

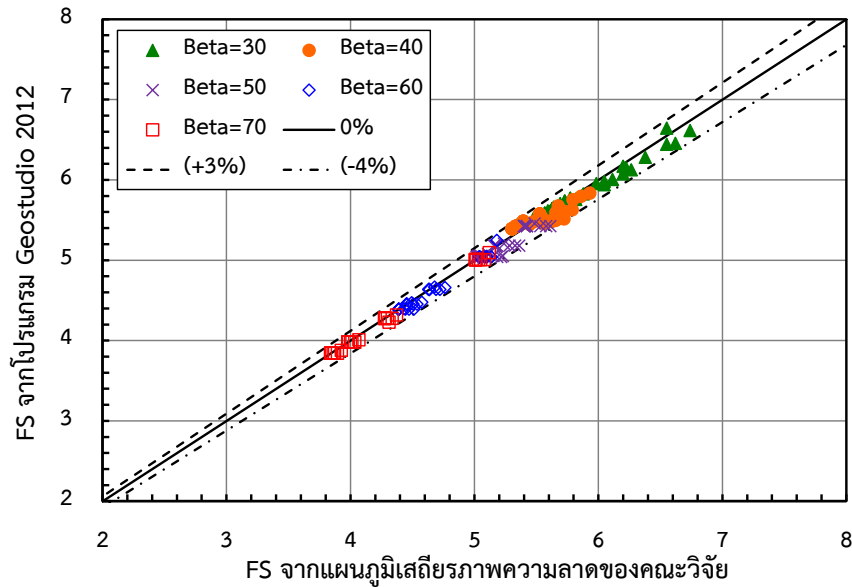
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน



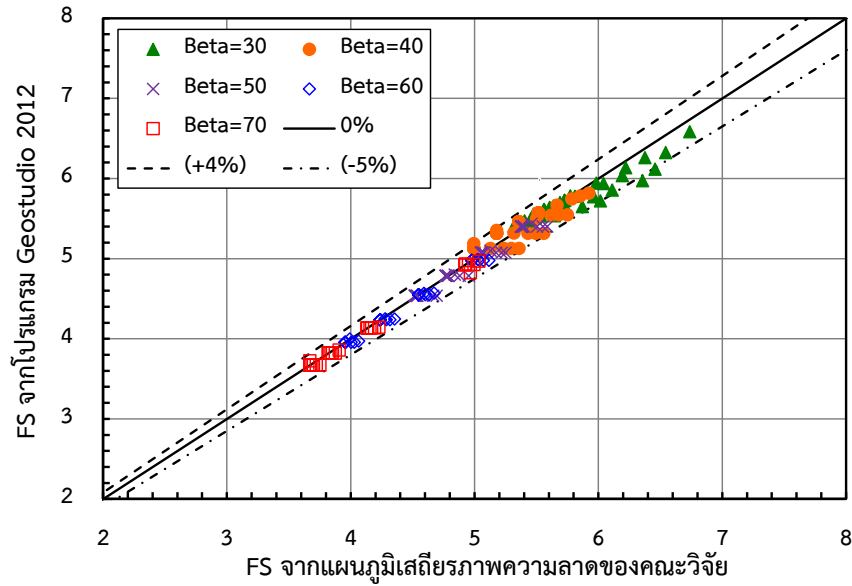
รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน

รูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +3% ถึง -7%

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหน้กบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน



รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหน้กบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)

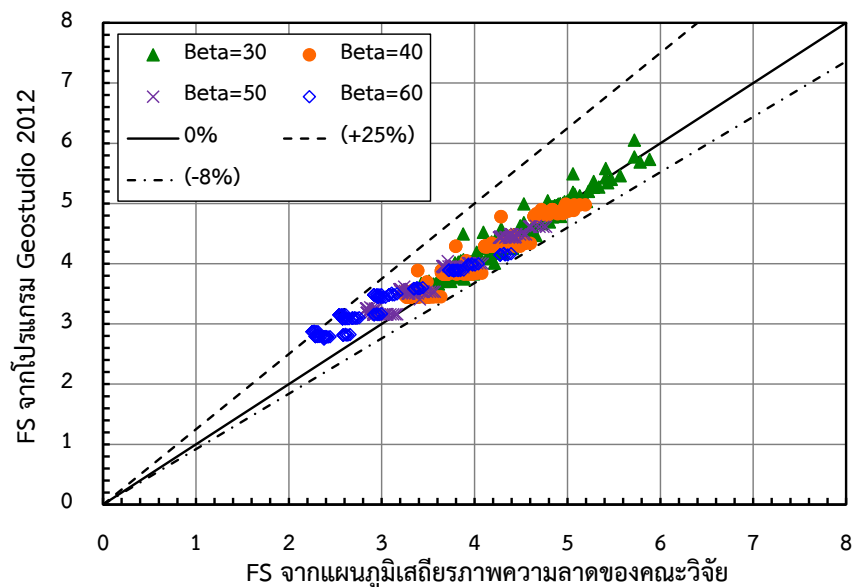


รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหน้กบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)

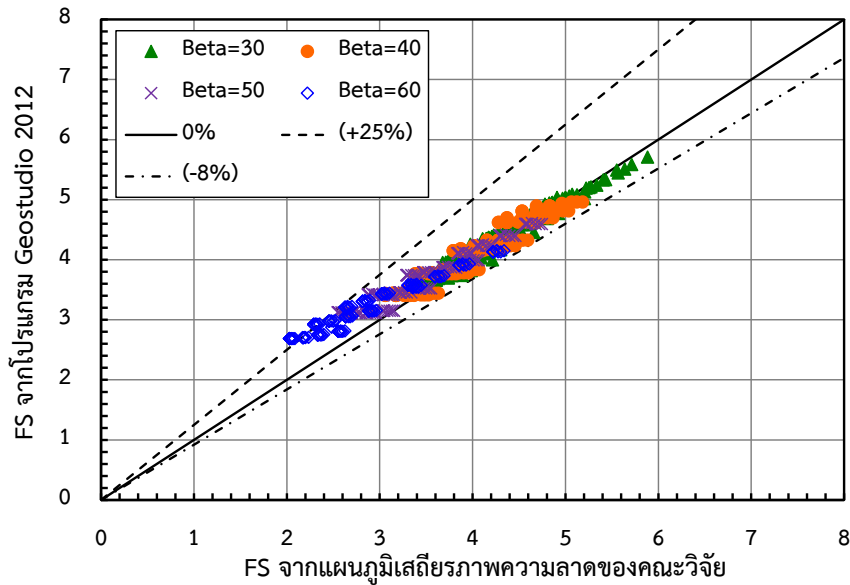
รูปที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหนักรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ) พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +3% ถึง -4%

รูปที่ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบกรณีไม่มีน้ำหนักรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ) พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +4% ถึง -5%

4.3.3 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุกและมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน



รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหนักรรทุก และมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ)



รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกรณีมีน้ำหน้กบรรทุกทุก
และมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ)

และเมื่อพิจารณาปัญหากรณีมีน้ำหน้กบรรทุกทุกและมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (รูปที่ 4.14 กรณีไม่มีน้ำ และรูปที่ 4.15 กรณีมีน้ำ) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นคืออยู่ระหว่าง +25% ถึง -8% โดยความคลาดเคลื่อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ β เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิเสถียรภาพความลาดจะมีค่าค่อนข้างสูง แต่จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนโดยส่วนใหญ่มักมีลักษณะ lower prediction คือ ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม Geostudio 2012 นั้นหมายความว่าแผนภูมิเสถียรภาพความลาดนี้ยังคงใช้งานได้อย่างปลอดภัย แต่อาจส่งผลทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 งานวิจัยนี้นำเสนอแผนภูมิเสถียรภาพความลาดสำหรับลาดดินเหนียวเนื้อเดียวที่ใช้งานง่าย และสามารถพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ มุมลาดเอียง, ความสูงของลาดดิน, ความลึกของชั้นดินแข็ง, น้ำหนักบรรทุก และรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน กรณีไม่มีน้ำและมีน้ำ โดยสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยดังกล่าวดังสมการที่ (5.1)

$$FS = \mu_q \mu_r FS_0 \quad (5.1)$$

5.1.2 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีมีน้ำหนักบรรทุก แต่ไม่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าต่ำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +3% ถึง -7%

5.1.2 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีไม่มีน้ำ) เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าต่ำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +3% ถึง -4%

5.1.3 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก แต่มีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (กรณีมีน้ำ) เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 มีค่าต่ำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง +4% ถึง -5%

5.1.4 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยในกรณีมีน้ำหนักบรรทุกและมีรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 อยู่ระหว่าง +25% ถึง -8% ความคลาดเคลื่อนโดยส่วนใหญ่มีลักษณะ lower prediction คือผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม GeoStudio 2012 ในกรณีที่มีมุมลาดเอียงสูง

บรรณานุกรม

- Bishop, A. W., and Morgenstern, N. (1960), "Stability coefficients for earth slopes", *Geotechnique*, Vol. 10, No. 4, pp. 129–150.
- Hunter, J. H., and Schuster, R. L. (1968), "Stability of simple cuttings in normally consolidated clays", *Geotechnique*, Vol. 18, No. 3, pp. 372–378.
- Janbu, N. (1973), Slope stability computations, in *Embankment-Dam Engineering: Casagrande Volume*, Eds. Hirschfeld & Poulos, pp. 47-86.
- Morgenstern, N. R. (1963), "Stability charts for earth slopes during rapid drawdown", *Geotechnique*, Vol. 13, No. 2, pp. 121–131.
- Spencer, E. (1967), "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces", *Geotechnique*, Vol. 17, No. 1, pp. 11-26.
- Taylor, D. W. (1937), "Stability of earth slopes", *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 24, pp. 197-246.
- Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, Hoboken, NJ.
- <https://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/geology/geologic-azards/landslides#types-of-landslides.7>
-