แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียว

เกษราภรณ์ เกลียวเพียร

ฐิติพร พรมโอก

โครงงานทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

Slope stability chart of homogeneous sand

Miss. Ketsaraporn Kleaypean

Miss. Thitiporn Promaok

An Engineering Project in Partial fulfillment of Requirements

For the Degree of Bachelor of Engineering

Department of Civil engineering

Burapha University 2017

หัวข้อโครงงาน	แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียว
โดย	นางสาวเกษราภรณ์ เกลียวเพียร
	นางสาวฐิติพร พรมโอก
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม)

คณะกรรมการสอบโครงงาน

.....ประธานกรรมการ

(ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

.....กรรมการ

(ดร.อมรชัย ใจยงค์)

บทคัดย่อ

โครงงานทางวิศวกรรมฉบับนี้ได้จัดทำขึ้น เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่โดยวิธี Morgenstern and Price โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่ มุมเสียดทานภายในของดิน ความเชื่อมแน่นของดิน ปัจจัยความเอียง ปัจจัยความสูง ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน

เนื้อหาภายในกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาเสถียรภาพความลาด สาเหตุของการพังทลายของลาดดิน ลักษณะการวิบัติของลาดดิน ปัญหาการวิบัติของลาดดินที่เกิดขึ้นในอดีต และแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Stability Chart) ที่ผู้จัดทำได้ศึกษารวบรวมทั้งสิ้น 9 วิธีการ ได้แก่ Taylor (1937, 1948), Bishop (1955), Bishop and Morganstern (1960), Morganstern (1963), Spencer (1967), Hunter and Schuster (1971), Janbu (1968), Huang (1975,1983) และCousins (1978)

การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย โดยใช้โปรแกรม GeoStudio2012 พิจารณากรณีศึกษาทั้งหมด 20,250 กรณี แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของกราฟ และทำการเปรียบเทียบกับแผนภูมิเสถียรภาพความลาดที่ถูกเสนอไว้ในอดีต

Abstract

The objective of this project is to develop slope stability chart of homogeneous sand by Morgenstern and Price method which considering many factors such as the internal friction angle of the soil, soil cohesion factor, depth factor, surcharge factor, seepage factor and submergence factor.

The detail of this report includes of (i) the important of slope stabilization, (ii) cause of slope failure, (iii) slope failure occurred in the past, and (iv) The stability charts developed by Taylor (1937, 1948), Bishop (1955), Bishop and Morganstern (1960), Morganstern (1963), Spencer (1967), Hunter and Schuster (1971), Janbu (1968), Huang (1975,1983), and Cousins (1978)

Analysis of safety factor using the program GeoStudio2012 considers case studies of 20,250 cases. This will be represented in form of graphs, tables and also comparing with the slope stability chart proposed in the past.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีอาศัยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และผศ.ดร.สยาม ยิ้มศิริ ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำแนวคิดและแนวทางสำหรับใช้ดำเนินงาน อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านอย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สยาม ยิ้มศิริ และดร.อมรชัย ใจยงค์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบโครงงาน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างดีรวมถึงเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้โดยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุด คุณประโยชน์ที่เกิดจากโครงงานเล่มนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบสนองแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้คณะผู้จัดทำประสบผลสำเร็จในการศึกษา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิจัยนี้ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นางสาวเกษราภรณ์ เกลียวเพียร

นางสาวฐิติพร พรมโอก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ค

สารบัญ.....ง

สารบัญภาพ.....จ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....2

1.3 ขอบเขตการศึกษา.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 ลาดดิน.....3

2.2 สาเหตุการพังทลายของลาดดิน.....4

2.2.1 การลดลงของกำลังรับแรงเฉือน (Decrease in shear strength).....4

2.2.2 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือน (Increase in Shear Stress).....6

2.3 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน.....7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ปัญหาการวิบัติของลาดดินที่เกิดขึ้นในอดีต 9

2.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด 13

2.5.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948) 13

2.5.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop (1955) 17

2.5.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960) 20

2.5.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) 22

2.5.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967) 26

2.5.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971) 28

2.5.7 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) 31

2.5.8 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Huang (1975,1983) 35

2.5.9 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Cousins (1978) 40

บทที่ 3 วิธีการศึกษา 44

3.1 วิธีการศึกษาโครงงาน 44

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 46

4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด 46

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 54

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน 66

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....67

บรรณานุกรมกรม.....68

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลาดดินต่างๆ 3

รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไป.....8

รูปที่ 2.3 ดินถล่มในอุโมงค์ส่งน้ำแม่งัด-แม่กวง.....9

รูปที่ 2.4 ดินทรุดตัวบนถนนรัชดาขาเข้า.....9

รูปที่ 2.5 ดินสไลด์ปิดถนน..... 10

รูปที่ 2.6 ทางขาด-ดินทรุดบริเวณถนนสาย 401ช่วงเขาสก รอยต่อพังงา-สุราษฎร์ธานี 10

รูปที่ 2.7 ดินถล่มในโคลอมเบีย..... 11

รูปที่ 2.8 ดินถล่มที่ประเทศญี่ปุ่น..... 11

รูปที่ 2.9 ดินถล่มหนักดีอาร์คองโก-เซียร์ราลีโอน..... 12

รูปที่ 2.10 ดินโคลนถล่ม ที่สวิตเซอร์แลนด์..... 12

รูปที่ 2.11 วงกลมเสียดทานของ Taylor (1937, 1948) 14

รูปที่ 2.12 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948) 15

รูปที่ 2.13 การพังแบบความลึกของผิวเคลื่อนพังอยู่ลึกกว่าตีนของลาดด้านต่ำ..... 16

รูปที่ 2.14 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948) 16

รูปที่ 2.15 Method of slices - Bishop Method 17

รูปที่ 2.16 Values of m_a 19

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.17 Stability coefficients m และ n ของดินแต่ละกรณี 21

(Bishop and Morganstern, 1960)

รูปที่ 2.18 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) 23

รูปที่ 2.19 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) 24

รูปที่ 2.20 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) 25

รูปที่ 2.21 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967) 27

รูปที่ 2.22 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971) 29

รูปที่ 2.23 Relationship between depth D and stability factor N_s for various slope angles(After Hunter and Schuster, 1968 30

รูปที่ 2.24 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) 31

รูปที่ 2.25 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) 31

รูปที่ 2.26 Surcharge adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi > 0$ soil. 32

รูปที่ 2.27 Submergence and seepage adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil. 32

รูปที่ 2.28 Tension crack adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil. 33

รูปที่ 2.29 Stability curve for $\phi = 0$ analysis. 37

รูปที่ 2.29 Stability curve for $\phi = 0$ analysis. (ต่อ) 38

รูปที่ 2.30 Stability Chart for c', ϕ' analysis. 39

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.30 Stability Chart for c', ϕ' analysis. (ต่อ) 40

รูปที่ 2.31 Simples Slopes..... 41

รูปที่ 2.32 ค่า Cousins' Stability Number ของ Toe Circle, $r_u = 0$ 42

รูปที่ 2.33 ค่าพิกัด x และ y ของ Toe Circle, $r_u = 0$ 42

รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ต่างๆ ของลาดดิน..... 47

รูปที่ 4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) = 0 m..... 49

รูปที่ 4.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) =0.1..... 50

รูปที่ 4.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) =1..... 51

รูปที่ 4.5 Surcharge adjustment factor , μ_q 52

รูปที่ 4.6 Submergence adjustment factor, μ_w 53

รูปที่ 4.7 Seepage adjustment factor, $\mu_{w'}$ 53

รูปที่ 4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน 54

รูปที่ 4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน $\mu_{w'}$ 55

รูปที่ 4.10 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณี มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน $\mu_{w'}$ 57

รูปที่ 4.11 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณี มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน $\mu_{w'}$ 58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน และมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน 59

รูปที่ 4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน และมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน $\mu_{w'}$ 61

รูปที่ 4.14 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน 62

รูปที่ 4.15 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน 64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ตามธรรมชาติของดินจะไม่อยู่เฉพาะในแนวราบเสมอไป อาจมีส่วนที่มีความลาดเอียง เช่น ภูเขาหรือเหว เป็นต้น ผิวดินส่วนนี้จะมีความลาดทำมุมกับแนวราบ โดยมุมที่เกิดขึ้นจะมีค่าความสูงจำกัดได้ค่าหนึ่ง ซึ่งหากค่าความสูงของดินมีค่ามากกว่าค่าความสูงจำกัดนี้จะทำให้ดินเกิดการวิบัติ (failure) ได้ โดยทั่วไปความลาดของดินอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การขุดและการถมดิน เป็นต้น มวลดินบริเวณลาดดินมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวลงและออกไปเนื่องจากผลของแรงแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งการเคลื่อนตัวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักของลาดดินและแรงภายนอกที่มากระทำต่อลาดดินมีค่ามากกว่าแรงต้านทานการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งได้แก่ แรงเสียดทาน (Friction) และแรงเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion) แต่ในทางกลับกันแรงต้านทานการเคลื่อนตัวของดินมีค่ามากกว่าน้ำหนักของลาดดินและแรงภายนอกที่มากระทำต่อลาดดินดินจะไม่เกิดการวิบัติ

การเลื่อนไถลของลาดดินเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น แรงเนื่องจากน้ำหนักของลาดดินเองหรือแรงกระทำภายนอกที่มากระทำต่อลาดดินมีค่ามากกว่าแรงต้านทานของดิน ระดับน้ำใต้ดิน และแรงดันเนื่องการไหลของน้ำใต้ดิน เป็นต้น ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของลาดดินมักเกี่ยวกับงานก่อสร้างงานถมหรืองานขุด เช่น ถนน ทางรถไฟหรืองานคัน ถึงแม้ว่าการก่อสร้างจะเป็นไปตามข้อกำหนดแต่ก็อาจเกิดการวิบัติได้ เช่น ในกรณีที่ดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้างเป็นชั้นดินอ่อน เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินถือว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการก่อสร้างประเภทดังกล่าว เช่น ถนน คลอง เขื่อน หรือการศึกษาสภาพของไหล่เขา โดยอาจทำการป้องกันมิให้เกิดการพังทลาย หรือหาสาเหตุของการพังทลายของดิน ทั้งนี้อาจใช้หลักการของ (Limiting Equilibrium) เช่นเดียวกับเรื่องแรงดันด้านข้าง โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ต่อการพังทลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของดิน แรงดันน้ำในดินและสภาพพื้นที่ทางธรณีวิทยาโดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของเสถียรภาพความลาดควรจะมีค่ามากกว่า 1.2

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Stability Chart) ของลาดดินทรายเนื้อเดียว โดยวิธี Morgenstern and Price

1.3 ขอบเขตการศึกษา

สร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Stability Chart) ของลาดดินทรายเนื้อเดียว โดยวิธี Morgenstern and Price โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ ได้แก่

1. มุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ')
2. ความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c')
3. ปัจจัยความเอียง (slope factor, β)
4. ปัจจัยความสูง (depth factor d=D/H)
5. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$)
6. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (submergence factor, Hw/H)
7. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (seepage factor, Hw'/H)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาด (Stability Chart) ของลาดดินทรายเนื้อเดียว โดยวิธี Morgenstern and Price ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลาดดิน

ตามธรรมชาติของดินจะไม่อยู่เฉพาะในแนวราบเสมอไป 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

การออกแบบความลาดของงานดินต่างระดับต้องอาศัยพื้นฐานความเข้าใจพฤติกรรมและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างอย่างมีเสถียรภาพ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมักเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโครงสร้าง การวิบัติของลาดดินเกิดจาก 2 สาเหตุหลักคือ การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนในดิน (Decrease in shear strength) และการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนในดิน (Increase in shear stress)

2.2.1 การลดลงของกำลังรับแรงเฉือน (Decrease in shear strength)

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

(2) รอยแตก (Cracks)
รอยแตกบริเวณผิวดิน ที่เกิดจากดินแห้งทำให้เกิดแรงตึงบริเวณผิวบนของพื้นที่ลาดส่งผลให้ดินเกิดการวิบัติได้

(3) การบวมตัวของดิน (Swelling)
การบวมตัวของดินหรือการขยายปริมาตรของดินส่งผลทำให้กำลังการรับแรงของดินลดลง โดยส่วนใหญ่มักเกิดกับดินเหนียวซึ่งมีค่าการระบายน้ำต่ำ เช่น Kayyal (1991) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุการวิบัติของทางหลวงบริเวณใกล้ฮิลตันและเท็กซิลี ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวบดอัด (plastic compacted clays) ภายหลัง10-20 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 การคืบนี้จะรุนแรงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงซ้ำไปซ้ำมาในหลายเงื่อนไข เช่น freeze-thaw และ wet-dry

(7) การชะล้าง (Leaching)

การชะล้างเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำในโพรงดิน การชะล้างเกลือจากน้ำในโพรงดินเหนียวทะเล (marine clays) ส่งผลให้ดินมีความไวสูง คือเสียกำลังเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน

(8) Strain softening

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

(9) การผุกร่อน (Weathering)

หินหรือดินแข็งถูกทำให้กำลังรับแรงลดลงโดยการผุกร่อนทั้งกระบวนการทางกายภาพ (Physical process) คือการทำให้ดินแตกเป็นชิ้นเล็กๆและกระบวนการทางเคมี (Chemical process) คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน

(10) Cyclic loading

ภายใต้ Cyclic loading พันธะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเกิดการแตกหักและค่าแรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ดินสูญเสียกำลัง

2.2.2 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือน (Increase 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)
แผ่นดินไหวกระทำต่อลาดดินทั้งความเร่งแนวราบและแนวดิ่ง เกิดเป็นวงจรการเปลี่ยนแปลงของ stressesในดิน หากการสั่นสะเทือนไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงของดินเปลี่ยนไปเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเมื่อมีแรงพลศาสตร์มากระทำในทิศทางตรงกันข้าม และหากการสั่นสะเทือนส่งผลให้กำลังรับแรงของดินลดลง ปัญหาเสถียรภาพของดินจะยิ่งรุนแรงขึ้น

2.3 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน

การวิบัติของลาดดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของดิน ลักษณะของชั้นดิน น้ำใต้ดิน แรงดันเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดิน และรูปร่างทางเรขาคณิตของคันดิน ตัวอย่างลักษณะของการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไปมีดังนี้

(ก) การร่วงหล่น (Fall) มักเกิดขึ้นบริเวณหน้าผาที่สูงชันซึ่งมวลหินมีรอยแตกจากการกัดกร่อนผุพังตามธรรมชาติอยู่แล้ว เสียสมดุลจากการกัดเซาะใต้ฐานจะเคลื่อนตัว

(ก) การร่วงหล่น (Fall)

(ข) การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides) ซึ่งจะมีการเคลื่อนตัวของมวลดินภายในผิวเฉือนที่ใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลมและรูปร่างของมวลดินที่มีการเคลื่อนตัวอาจเป็นส่วนหนึ่งของรูปทรงกระบอกถ้าดูการเคลื่อนตัวใน 3 มิติ

(ข) การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides)

(ค) การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Translational Slides) การพิบัติในลักษณะนี้จะปรากฏผิวเคลื่อนเป็นplane หรือพื้นระนาบซึ่งมักจะขนานกับผิวหน้าของมวลดิน การวิบัติชนิดนี้เกิดจากการที่มีชั้นดินอ่อนแทรกอยู่ในคันดิน ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะเป็นการเลื่อนไถล ซึ่งปกติจะเกิดในดินเม็ดหยาบ

(ค) การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Translational Slides)

(ง) การเลื่อนไหล (Flows) มักเกิดขึ้นในลาดดินที่มีน้ำเข้าผสมจนดินอ่อนตัวเสียกำลัง และเริ่มอิ่มตัว จนเกิดการไหลของวัสดุข้นเหลวที่มีความหนืด เช่น กรณีการพังของไหล่เขาในภาคใต้เนื่องจากฝนตกหนัก

(ง) การเลื่อนไหล (Flows)

รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของลาดดินโดยทั่วไป

2.4 ปัญหาการวิบัติของลาดดินที่เกิดขึ้นในอดีต

ในอดีตมีเหตุการณ์ดินถล่มเกิดขึ้นมากมายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ส่งผลให้สูญเสียทั้งทรัพย์สินและชีวิตมากมาย เช่น

- เกิดเหตุดินถล่มในอุโมงค์ส่งน้ำแม่งัด-แม่กวง เมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2560 มีผู้เสียชีวิต 2 ราย ดินถล่มนี้ครั้งนี้เชื่อว่าน่าจะมาจากสาเหตุการระเบิดหินเพื่อทำอุโมงค์นั้น ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อระเบิดหินเสร็จ จะทำการนำเหล็กเข้าไปค้ำยันเพื่อรับน้ำหนัก แต่เหตุการณ์นี้คาดว่านักธรณีวิทยาได้เข้าไปในจุดที่ระเบิดเร็วเกินไปและหินร่วงยังไม่หมดจึงทำให้เกิดโศกนาฏกรรมดังกล่าว

รูปที่ 2.3 ดินถล่มในอุโมงค์ส่งน้ำแม่งัด-แม่กวง

- วันที่ 30 พฤษภาคม 2560 เกิดเหตุดินทรุดตัวบนถนนรัชดาขาเข้า เนื่องจากฝนตกหนักต่อเนื่องหลายวัน

รูปที่ 2.4 ดินทรุดตัวบนถนนรัชดาขาเข้า

- เมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม 2560 จากการที่มีฝนตกหนักติดต่อกันหลายวันทำให้ดินบนภูเขาเกิดการอุ้มน้ำจนไม่สามารถรับน้ำหนักได้ ทำให้เกิดการสไลด์ลงทับถนนหมายเลข 1390 ที่เชื่อมระหว่างผาช้างมูบ-วัดพระธาตุดอยตุง-พระธาตุดอยตุง เป็นระยะทางประมาณ 5 - 10 เมตร

รูปที่ 2.5 ดินสไลด์ปิดถนน

- เมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2560 จากเหตุการณ์ฝนตกต่อเนื่องเป็นเวลาหลายวัน ทำให้เกิดการแตกร้าวของผิวจราจรบนถนนสาย 401 กม.27+150 เขาสก บริเวณรอยต่อ จังหวัดพังงา-จังหวัดสุราษฎร์ธานี

รูปที่ 2.6 ทางขาด-ดินทรุดบริเวณถนนสาย 401ช่วงเขาสก รอยต่อพังงา-สุราษฎร์ธานี

- เมื่อวันที่ 1 เมษายน 2560 เกิดเหตุน้ำท่วมและดินถล่มฉับพลันในเมืองโมโกอา (Mocoa) ทางตะวันตกเฉียงใต้ของโคลอมเบีย เนื่องจากฝนที่ตกลงมาอย่างหนักนานติดต่อกันหลายชั่วโมง ทำให้ระดับน้ำในแม่น้ำต่างๆ 3 สายในพื้นที่เพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว จนเอ่อล้นตลิ่งพัดเอาดินโคลนและซากต่างๆสร้างความเสียหายต่อบ้านเรือนของประชาชนในพื้นที่

รูปที่ 2.7 ดินถล่มในโคลอมเบีย

- เมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2559 จากฝนตกหนักติดต่อกันหลายวันดินอิ่มตัวด้วยน้ำจนไม่สามารถรับน้ำหนักได้ทำให้เกิดดินถล่ม บ้านเรือนที่อยู่บริเวณเชิงเขาถล่มลงมาพังถล่มลงมาทับบ้านที่อยู่ด้านล่างพร้อมกับดินโคลนในประเทศญี่ปุ่น

รูปที่ 2.8 ดินถล่มที่ประเทศญี่ปุ่น

- เมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2560 เกิดดินถล่มหนักในทวีปแอฟริกาโดยเฉพาะในเซียร์ราลีโอนและสาธารณรัฐประชาธิปไตยคองโก ทำให้มีผู้เสียชีวิตเกือบถึง 700 คน

รูปที่ 2.9 ดินถล่มหนักดีอาร์คองโก-เซียร์ราลีโอน

- เมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2560 เกิดเหตุดินโคลนและหินสไลด์ถล่มลงมาจากภูเขา พิซ เซนกาโล ที่หมู่บ้าน Bondo ในเมือง Graubuenden ทางตะวันออกเฉียงใต้ของสวิตเซอร์แลนด์เป็นเหตุให้มีผู้สูญหาย 8 ราย

รูปที่ 2.10 ดินโคลนถล่ม ที่สวิตเซอร์แลนด์

2.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดชัน (Slope Stability charts) ช่วยให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทำได้รวดเร็วสามารถใช้วิเคราะห์เบื้องต้นและวิเคราะห์รายละเอียดได้ ค่าที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดมักมีความถูกต้องและสามารถประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งได้มีผู้เสนอแผนภูมิเสถียรภาพลาดดิน (Slope Stability charts) ไว้หลายกรณี ดังนี้

2.5.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)

Taylor (1937, 1948) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินเหนียวเนื้อเดียวแบบหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดยใช้พื้นฐานของหลักการวิธีวงกลมเสียดทาน (friction circle method) คือความต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินบนพื้นระนาบวงกลมเกิดจากความเชื่อมแน่น (cohesion) และแรงลัพธ์ของแรงเสียดทานซึ่งเป็นผลรวมของแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวเนื่องจากมุมเสียดทานภายในกับแรงเสียดทานเฉือน ทิศทางของแรงลัพธ์จะทำมุม ϕ กับแรงปฏิกิริยาตั้งฉากบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินและสัมผัสกับเส้นรอบวงของวงกลมกับเสียดทาน ดังรูปที่ 2.11 ความสูงวิกฤตของความลาดและอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ และแผนภูมิความลาดของ Taylor (1937, 1948) แสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.14 โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (β), มุมเสียดทาน (ϕ) และ depth factor (D)

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma} \tag{2.1}$$

$$FS = \frac{H_c}{H_{act}} \tag{2.2}$$

เมื่อ N_s = Stability factor

H_c = Critical height

c = Cohesion

γ = Unit weight of soil

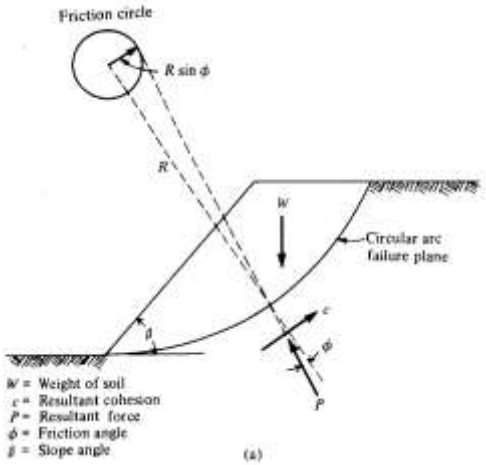
ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Taylor

แผนภูมิเสถียรภาพของ Taylor นั้นมีสำหรับทั้งที่ใช้กับลาดดินทรายและลาดดินเหนียว ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะลาดดินทราย ซึ่งมีข้อจำกัดดังนี้

1. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน (slope factor, β) ระหว่างมุม 20° ถึง 90°
2. พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') ได้แก่ 5°, 10°, 15°, 20°, และ 25°
3. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$)
4. ไม่พิจาณาผลของระดับน้ำทั้งในและนอกลาดดิน (seepage factor, H_w'/H and submergence factor, H_w/H)
5. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)

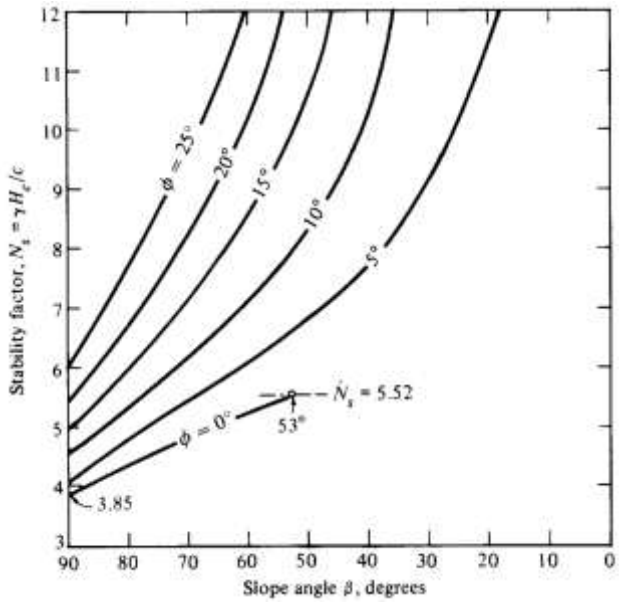
หมายเหตุ : ที่ความลาดเอียงของลาดดิน (slope factor, β) ระหว่างมุม 20° ถึง 30° ใช้พิจารณาค่า (stability factor, N_s) ได้เฉพาะกับมุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') 5° เท่านั้น

แผนภูมิของ Taylor Method 2 Chart ซึ่งแต่ละ Chart จะมีหลักเกณฑ์การใช้ ดังนี้



รูปที่ 2.11 วงกลมเสียดทานของ Taylor (1937, 1948)

1.1 สำหรับกรณีทั่วไป ที่มีค่า Fiction angle ϕ = 0 – 25 องศา และ Slope angle $\beta = 0 - 90^{\circ}$

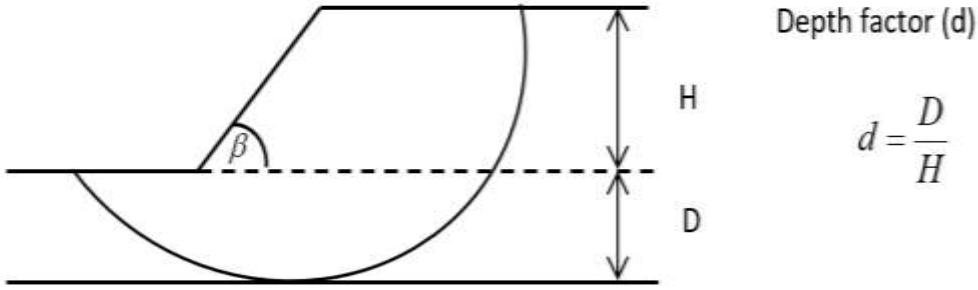


รูปที่ 2.12 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Taylor Method รูปที่ 2.12

1. จะต้องทราบค่า Fiction angle ϕ = 0 – 25 องศา
2. จะต้องทราบค่า Slope angle β = 0 – 90 องศา
3. เมื่อทราบค่า Fiction angle ϕ และ Slope angle β = 0 ก็สามารถอ่านค่า Stability factor (N_s) ได้เลย

1.2 สำหรับดินเหนียวที่มีความลึกของผิวเคลื่อนพังอยู่ลึกกว่าตีนของลาดด้านต่ำ D = 1 - ∞



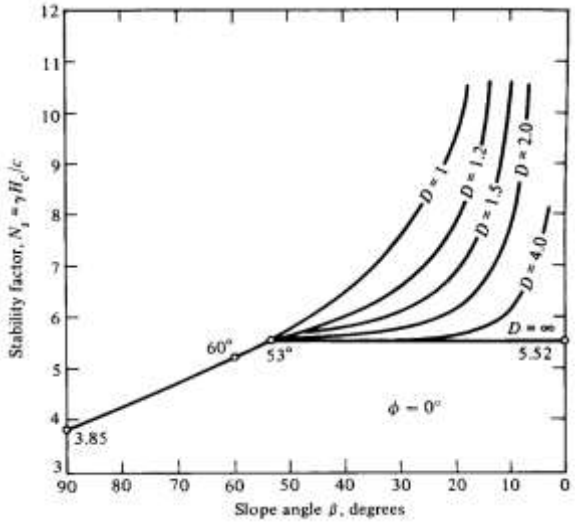
รูปที่ 2.13 การพังแบบความลึกของผิวเคลื่อนพังอยู่ลึกกว่าตีนของลาดด้านต่ำ

สูตรการหาค่า Depth factor (d)

$$d = \frac{D}{H} \tag{2.3}$$

เมื่อ H = ความสูงของความลาด

V = ค่าความจากจุดบนสุดของความลาดถึงจุดล่างสุดของผิวเคลื่อนพังของดิน



รูปที่ 2.14 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Taylor (1937, 1948)

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Taylor Method รูปที่ 2.14

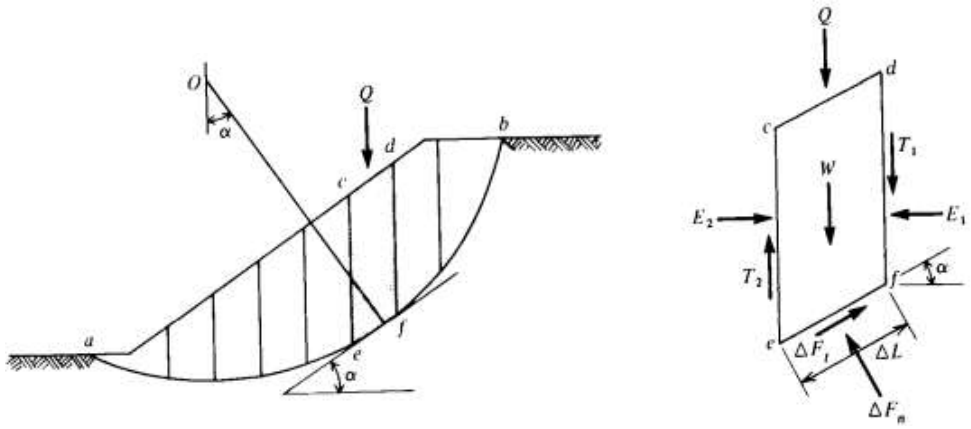
1. จะต้องทราบค่า Depth factor (D)

2. จะต้องทราบค่า Slope angle β = 0 – 90 องศา

3. เมื่อทราบค่า Depth factor (D)และ Slope angle β ก็สามารถเปิดหาค่า Stability factor (N_s) ได้เลย

2.2.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop (1955)

Bishop (1955) ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด โดยสมมติฐานให้มีแรงกระทำต่อผนังด้านข้างระนาบในแนวดิ่งของดินแต่ละชิ้นด้วย สำหรับแนวการวิบัติสมมติให้เป็นส่วนของวงกลม



รูปที่ 2.15 Method of slices - Bishop Method

การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ต้อง Trial and Error หาอัตราส่วนปลอดภัย (FS) โดยสมมติ FS ในการหาค่า m_a จาก $\frac{\tan\phi}{FS}$ กับค่า α_n นำค่าที่ได้คำนวณหา FS จากสมการ (2.4) และทำซ้ำจนได้ค่า FS เท่ากัน ซึ่งจะได้ค่า FS ของระนาบที่เกิดการเคลื่อนตัว

$$F = \frac{\sum \{c'\Delta L\cos\alpha + [(W + Q - u\Delta L\cos\alpha) + (T_1 - T_2)]\tan\phi'\}[\cos\alpha + (\tan\phi'\sin\alpha / F)]^{-1}}{\sum (W + Q)\sin\alpha} \quad (2.4)$$

เมื่อ $F =$ Safety factor

$c' =$ Effective cohesion

$\phi' =$ Effective angle of internal friction

$\alpha =$ Slope angle

$L =$ Length, width of slice

$Q =$ Surcharge load

$W =$ Weight of soil

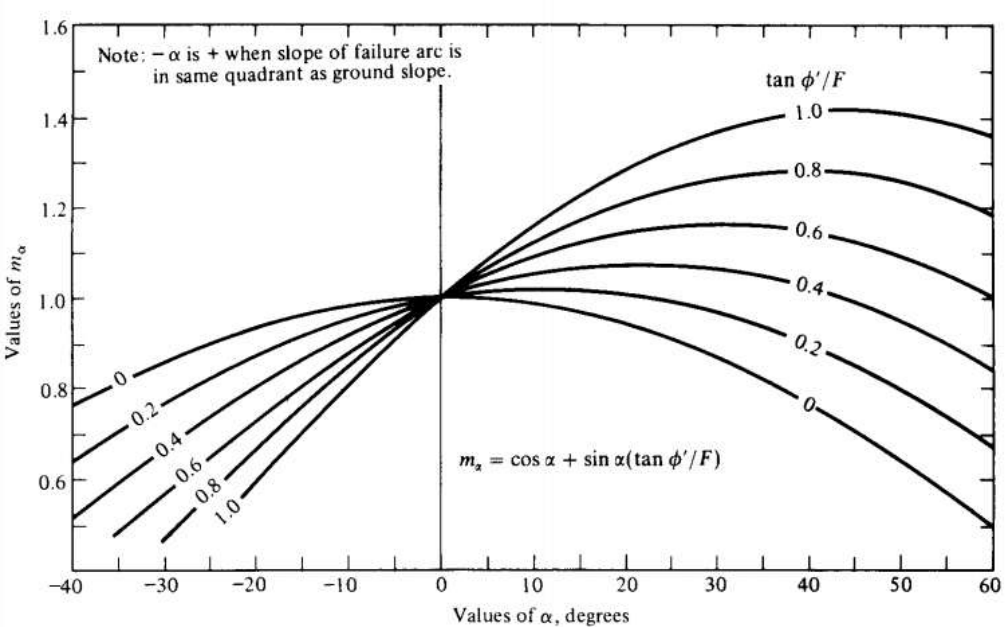
$u =$ Pore presser

$T_1, T_2 =$ Shear force between slices

<u>ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Bishop</u>

1. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน Slope angle α ระหว่างมุม -40° ถึง 60°
2. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH)
3. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)
4. วิธีการหาค่า Safety factor โดยวิธีของ Bishop จะเป็นการ Trial and Error Method

หมายเหตุ : มีการพิจารณาผลค่าแรงดันน้ำในลาดดิน (pore pressures, u)



รูปที่ 2.16 Values of m_a

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Bishop รูปที่ 2.16

วิธีการหาค่า Safety factor โดยวิธีของ Bishop จะเป็นการ Trial and Error Method

1. ต้องทำการสมมติค่า Safety factor, F ขึ้นมา1 ค่า แล้วแทนค่าเพื่อหาค่า $\tan\phi/F$ เพื่อใช้ในการเปิดกราฟ
2. ต้องทราบค่า Slope angle α = -40 ถึง 60 องศา
3. เมื่อทราบค่า $\tan\phi/F$ และ Slope angleม α ทำกราฟเปิดกราฟจากได้ ค่า m_a ซึ่ง
   $m_a = \cos\alpha + \sin\alpha(\tan\phi/F)$
4. จากนั้นนำค่า m_a ไปแทนในสมการ (2.4)

$$F = \frac{\sum\{c'\Delta L\cos\alpha + [(W+Q-u\Delta L\cos\alpha)+(T_1-T_2)]\tan\phi'\}[\cos\alpha+(\tan\phi'\sin\alpha/F)]^{-1}}{\sum(W+Q)\sin\alpha}$$

5. เมื่อแทนค่าในสมการ (2.4) แล้ว ค่า Safety factor, F จากการคำนวณต้องเท่ากับค่า Safety factor, F ที่ทำได้สมมติขึ้นในตอนแรก ถ้าไม่ได้เท่ากันจะต้องทำการสมมติค่า Safety factor, F ขึ้นมาใหม่แล้วทำตามข้อ 1-5 จนค่า Safety factor, F จากการคำนวณ เท่ากับ Safety factor, F ที่สมมติ

2.5.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Bishop and Morganstern (1960) อาศัยพื้นฐานหลักการวิเคราะห์ของ Bishop (1955) และพิจารณาแรงดันน้ำคงที่ (u=คงที่) เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดินเนื้อเดียว (c=คงที่) ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) และรูปที่ 2.17 ซึ่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์โดยวิธีนี้มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (β), มุมเสียดทาน (ϕ) และ depth factor (D)

$$r_u = \frac{u}{\gamma h} \tag{2.5}$$

โดย $r_u =$ pore pressure ratio

$u =$ pore water pressure

$\gamma =$ unit weight

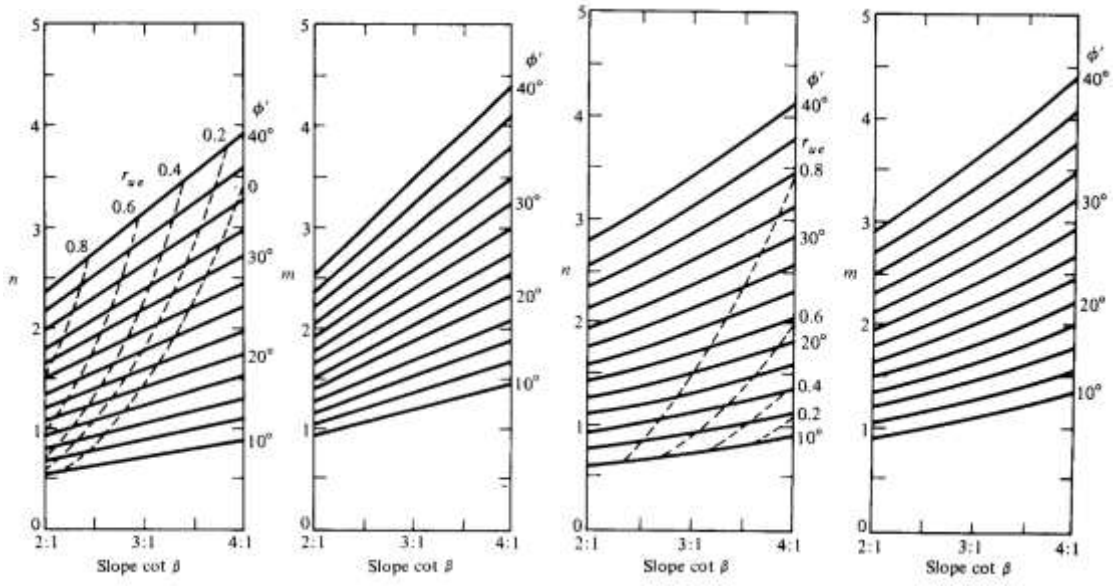
$h =$ depth of the point in the soil mass below the ground surface.

$$FS = m - (n)(r_u) \tag{2.6}$$

โดย $m, n =$ stability coefficients.

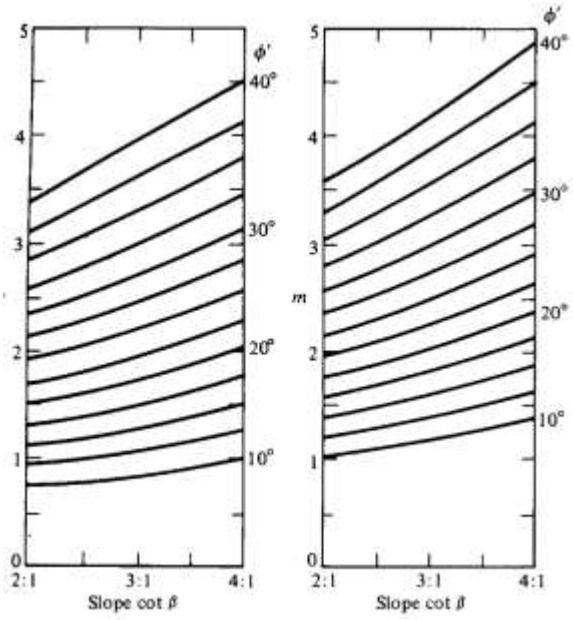
<u>ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Bishop & Morgenstern</u>

1. พิจารณาค่าความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c′) เป็นฟังก์ชั่นของ $\frac{c'}{\gamma H} = 0.05$ เท่านั้น
2. พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกจาก toe ของลาดดินถึงจุดต่ำสุดบนวงกลมวิบัติ (depth from the toe of slope to the lowest point on the slip circle, D) ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 1.0,1.25, และ 1.50
3. มีการพิจารณาผลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อลาดดิน ซึ่งแรงดันน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง
4. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน Slope cot β ระหว่าง 2:1 ถึง 4:1
5. พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') ระหว่าง 10°ถึง 40°
6. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH)
7. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)



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

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Bishop & Morgenstern Method รูปที่ 2.17

1. ต้องมีค่า $c'/\gamma h = 0.05$
2. ต้องทราบค่า Fiction angle ϕ = 10 – 40 องศา
3. ต้องทราบค่า Slope angle β = 2:1, 3:1, และ 4:1
4. ต้องทราบค่า Depth factor, D โดยเมื่อ ค่า D=1.00 จะใช้กราฟรูปที่2.17a ,D=1.25 จะใช้กราฟรูปที่ 2.17b และค่า D=1.50 จะใช้กราฟรูปที่ 2.17c
5. เมื่อทราบค่า ϕ , β , และค่า D ทำการเปิดกราฟตามข้อกำหนดของแต่ละกราฟ จะได้ค่า stability coefficient, m และ n
6. นำค่า m และ n ไปแทนในสมการ (2.6) จะได้ค่า Safety factor, F

$$F = m - (n)(r_u)$$

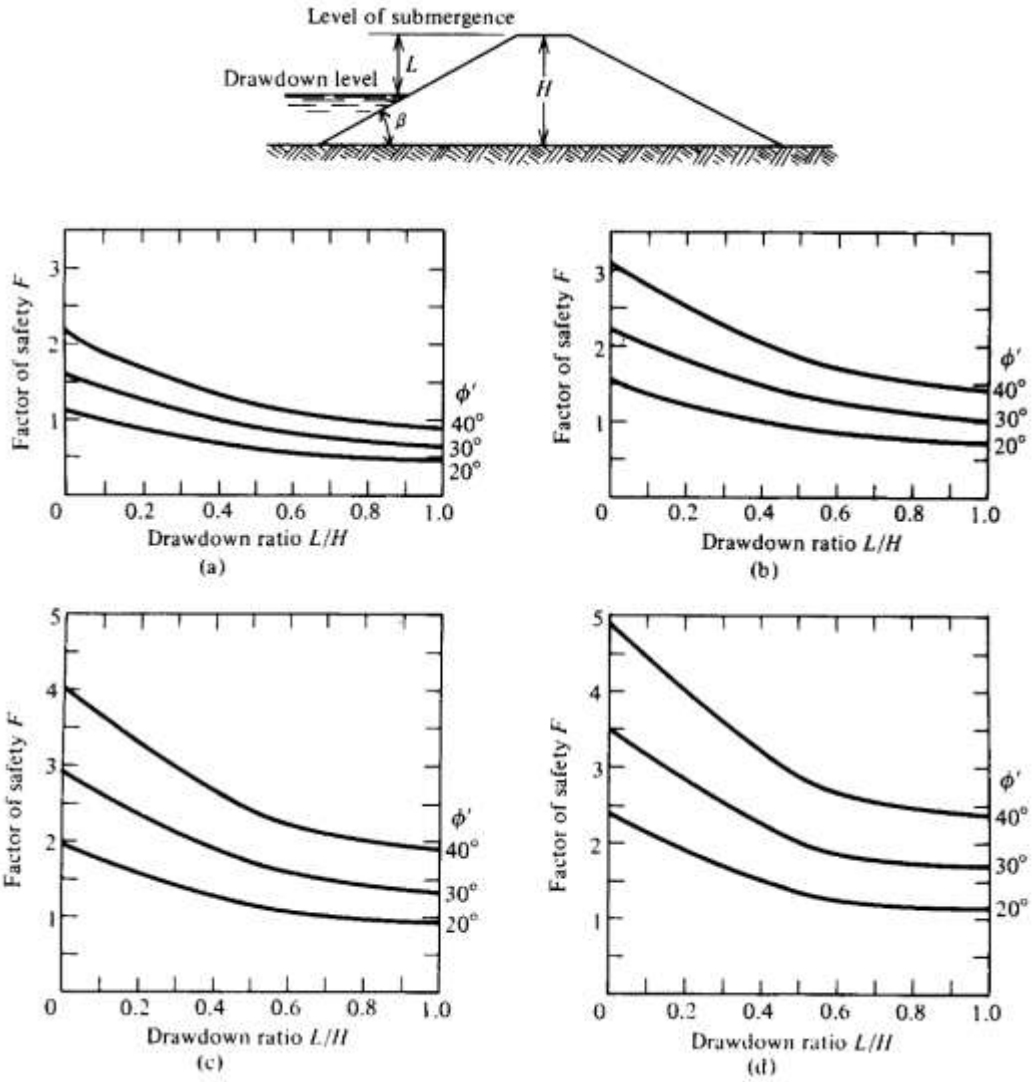
2.5.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963)

Morganstern (1963) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้หลักการของ Bishop and Morganstern (1960) และพิจารณาปัจจัยของระดับน้ำที่ลดลง (Rapid drawdown) โดยสมมติให้ดินเนื้อเดียวมีคุณสมบัติ c และ γ คงที่ และความลาดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำซึ่งสูงกว่าระดับความสูงของดินถม ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.18-2.20

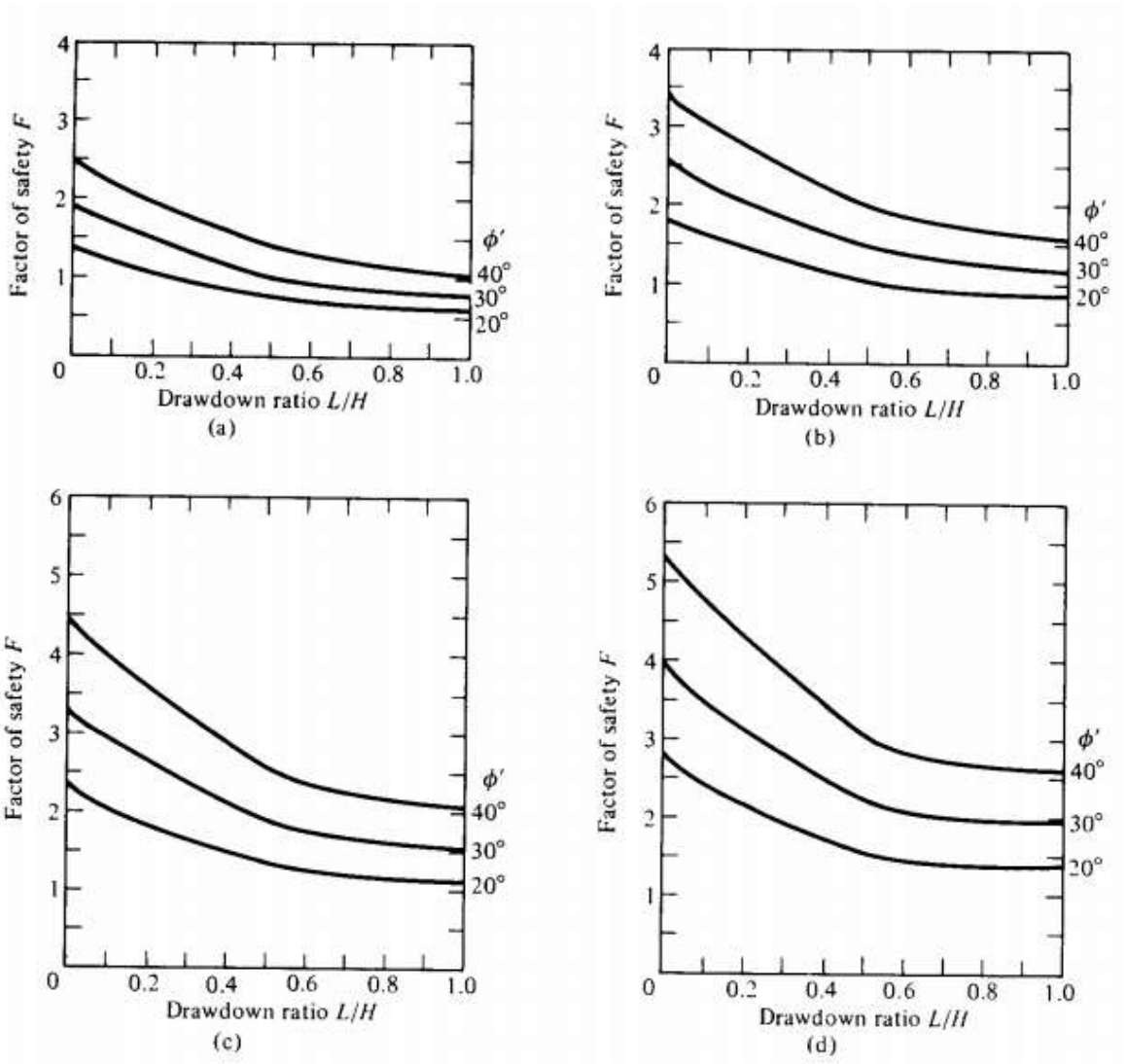
<u>ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Morgenstern</u>

1. พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ′) ระหว่าง 20°ถึง 40°
2. ไม่พิจารณาระดับน้ำในลาดดิน
3. พิจารณาค่าความเชื่อมแน่นของดินเป็นฟังก์ชั่นของ c= $\frac{c'}{\gamma H}$ ได้แก่ 0.0125, 0.025, และ 0.05
4. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน Slope cot β ระหว่าง 2:1 ถึง 5:1
5. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH)
6. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)
7. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH)

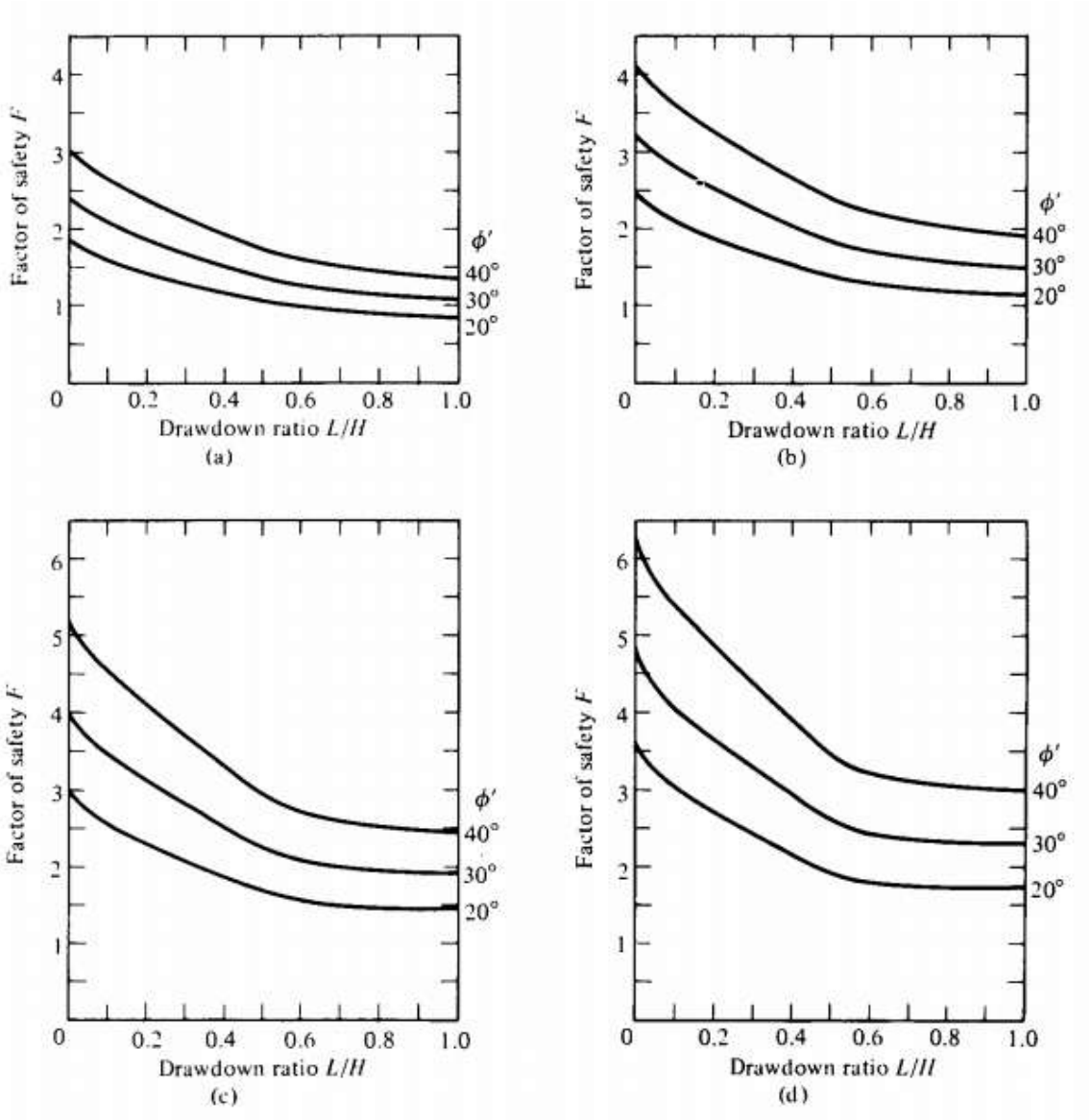
8. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)



รูปที่ 2.18 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h$ =0.0125 (a) β =2:1; (b) β =3:1; (c) β =4:1; (d) β =5:1



รูปที่ 2.19 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h$ =0.025 (a) β =2:1; (b) β =3:1; (c) β =4:1; (d) β =5:1



รูปที่ 2.20 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Morganstern (1963) เมื่อ $c'/\gamma h$ =0.05 (a) β =2:1; (b) β =3:1; (c) β =4:1; (d) β =5:1

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Morgenstern Method รูปที่ 2.18-2.20

1. ต้องทราบค่า c'/γ เมื่อค่า c'/γ =0.0125 ใช้กราฟรูปที่ 2.18, c'/γ =0.025 ใช้กราฟรูปที่ 2.19, และ c'/γ =0.05 ใช้กราฟรูปที่ 2.20
2. ต้องทราบค่า β เมื่อ (a) β =2:1; (b) β =3:1; (c) β =4:1; (d) β =5:1
3. ต้องทราบค่า Drawdown L/H= 0-1
4. เมื่อทราบค่า c'/γ , β , และ L/H สามารถหาค่า Safety factor ได้

2.5.5 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967) วิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress analysis) โดยใช้หลักการของ Fellenius (1927) และ Bishop (1955) สมมติให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ depth factor (D) มีค่ามากและแรงดันน้ำคงที่ (u = คงที่) ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

$$N_s = \frac{c'}{(FS)\gamma H} \tag{2.7}$$

โดยที่ c' = cohesion with respect to effective stress

F = Factor of safety

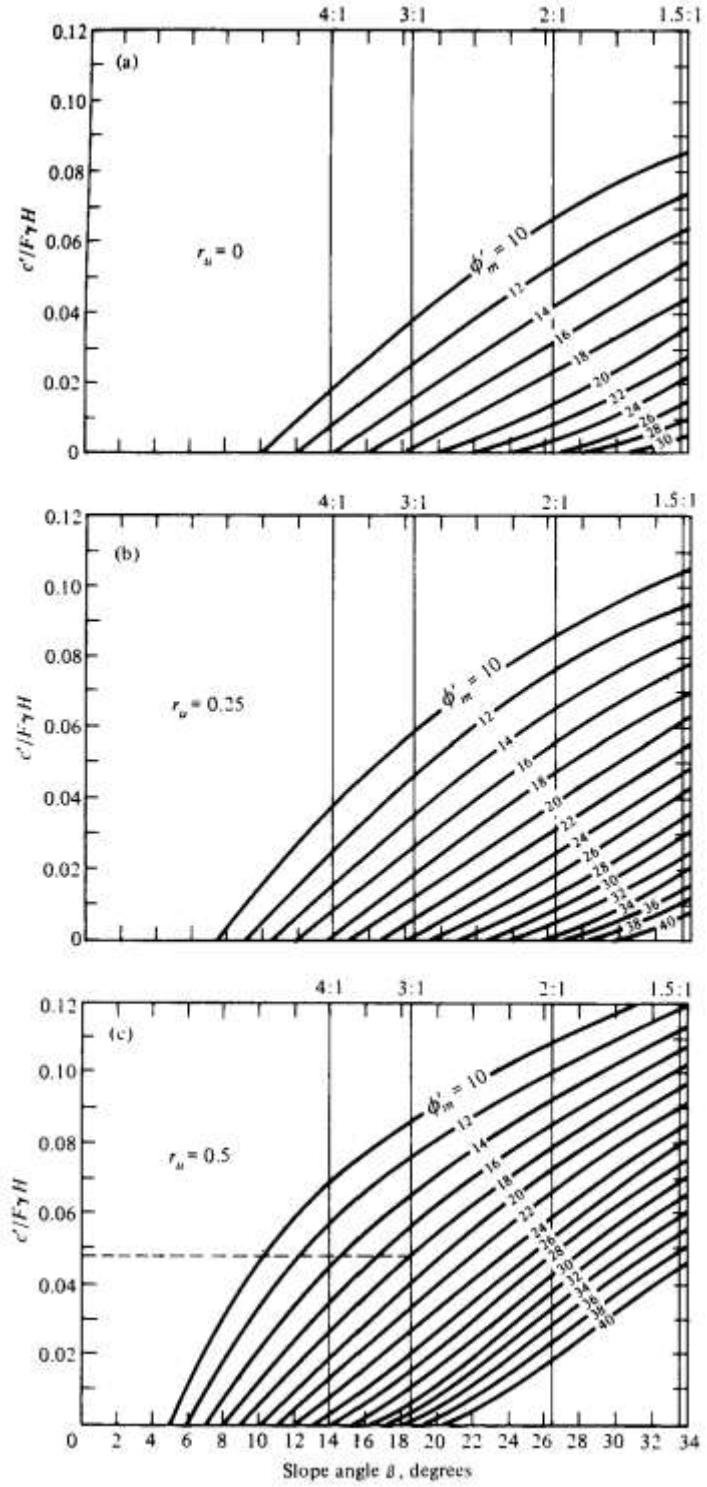
γ = unit weight of soil

H = height of slice

N_s = stability factor

<u>ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Spencer</u>

1. กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง0.12
2. กำหนดให้ค่า mobilized friction angle ϕ'_m มีค่าระหว่าง 10° ถึง 40°
3. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน (slope factor, β) ระหว่างมุม 0° ถึง 34°
4. กำหนดให้ค่า pore presssure ratio r_u เป็นค่าคงที่ 3 ค่า ได้แก่ 0, 0.25, และ 0.5
5. วิธีการหาค่า Safety factor โดยวิธีของ Spencer จะเป็นการ Trial and Error Method



รูปที่ 2.21 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Spencer (1967)

วิธีใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Spencer

วิธีการหาค่า Safety factor โดยวิธีของ Spencer จะเป็นการ Trial and Error Method

1. คำนวณค่า r_u เพื่อเลือกใช้กราฟตามข้อกำหนด คือ $r_u = 0, r_u = 0.25, r_u = 0.5$
2. ต้องทำการสมมติค่า FS เพื่อหา ϕ'_m

   จากสมการ $\tan\phi'_m = \dfrac{\tan\phi}{F}$

3. เมื่อทราบค่า ϕ'_m และ β นำไปเปิดกราฟ รูปที่ 2.21 จะได้ค่า $N_s = c'/F\gamma H$
4. นำค่า N_s แทนในสมการที่ 2.7 เพื่อหาค่า FS
5. ค่า FS ที่คำนวณได้ ต้องเท่ากับค่า FS ที่สมมติขึ้น ถ้าไม่เท่ากันต้องทำซ้ำจนกว่าจะได้

2.5.6 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)

Hunter and Schuster (1971) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ = 0) และ c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามระดับความลึก สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากสมการที่ (2.9) และรูปที่ 2.22

$$M = \left(\frac{h}{H}\right)\left(\frac{\gamma_w}{\gamma'}\right) \tag{2.8}$$

โดยที่ M = water table ratio

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

H = height of cut

$$F = \left(\frac{c}{p'}\right)\left(\frac{\gamma'}{\gamma}\right)N_s \tag{2.9}$$

โดยที่ c = cohesion

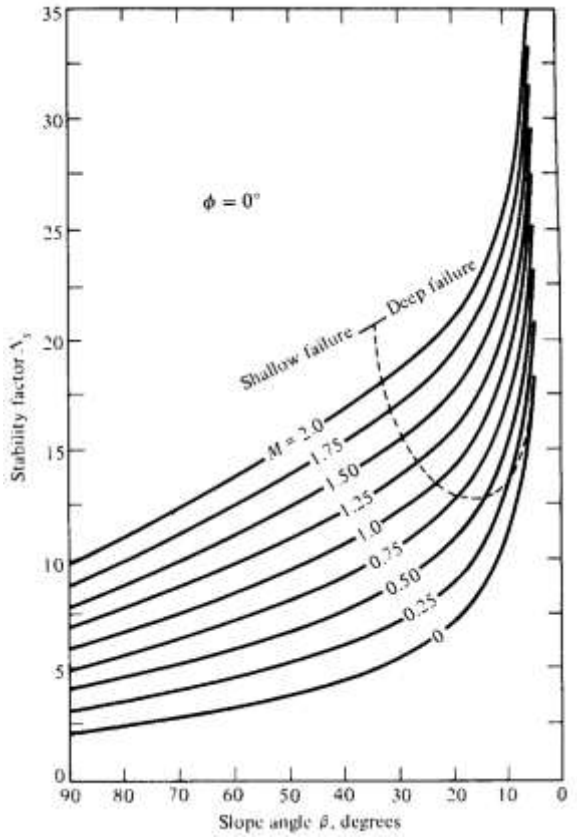
p' =effective vertical stress

γ = unit weight of soil

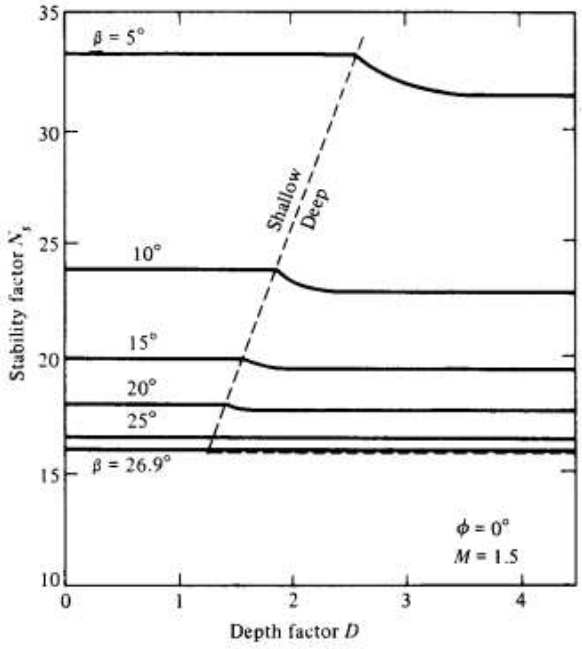
γ' = submerged or buoyant unit weight of soil ($\gamma' = \gamma - \gamma_w$)

γ_w = unit weight of water

N_s = Stability factor



รูปที่ 2.22 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Hunter and Schuster (1971)



รูปที่ 2.23 Relationship between depth D and stability factor N_s for various slope angles(After Hunter and Schuster, 1968

วิธีใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Hunter and Schuster รูปที่ 2.22

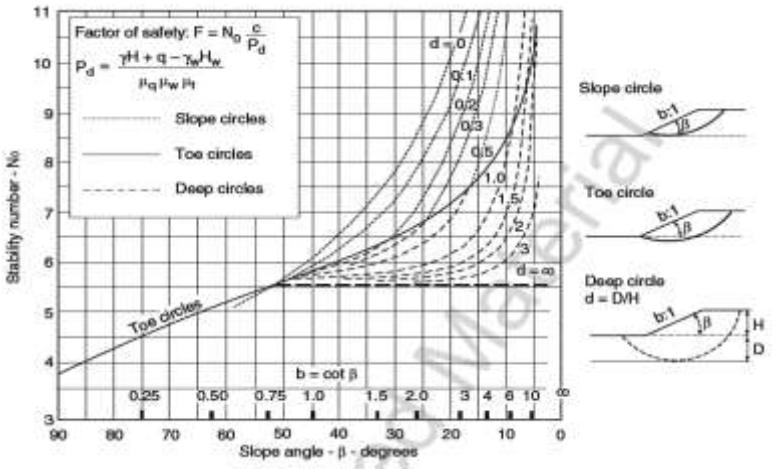
1. ต้องทราบค่า slope angle, β
2. ต้องทราบค่า M (water table ratio) = $\left(\frac{h}{H}\right)\left(\frac{\gamma_w}{\gamma'}\right)$
3. สามารถเปิดกราฟได้ค่า N_s
4. นำค่า N_s ไปแทนค่าในสมการที่ 2.9 จะได้ค่า FS

วิธีใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Hunter and Schuster รูปที่ 2.23

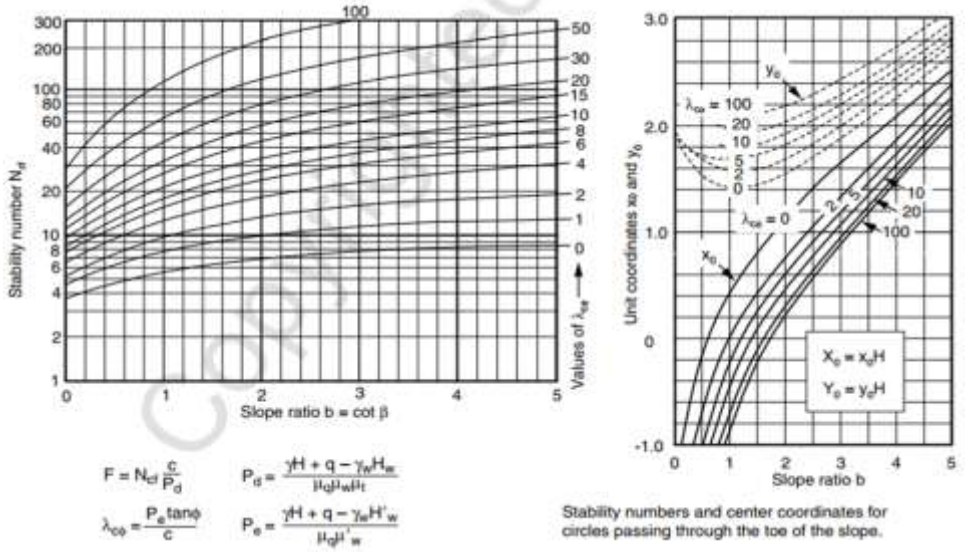
1. ต้องทราบค่า depth factor, D (อ้างอิงจากค่า depth factor, D จาก Taylor)
2. ต้องทราบค่า slope angle, β
3. $\phi = 0°$, M = 1.5
4. สามารถเปิดกราฟได้ค่า N_s
5. นำค่า N_s ไปแทนค่าในสมการที่ 2.9 จะได้ค่า FS

2.5.7 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)

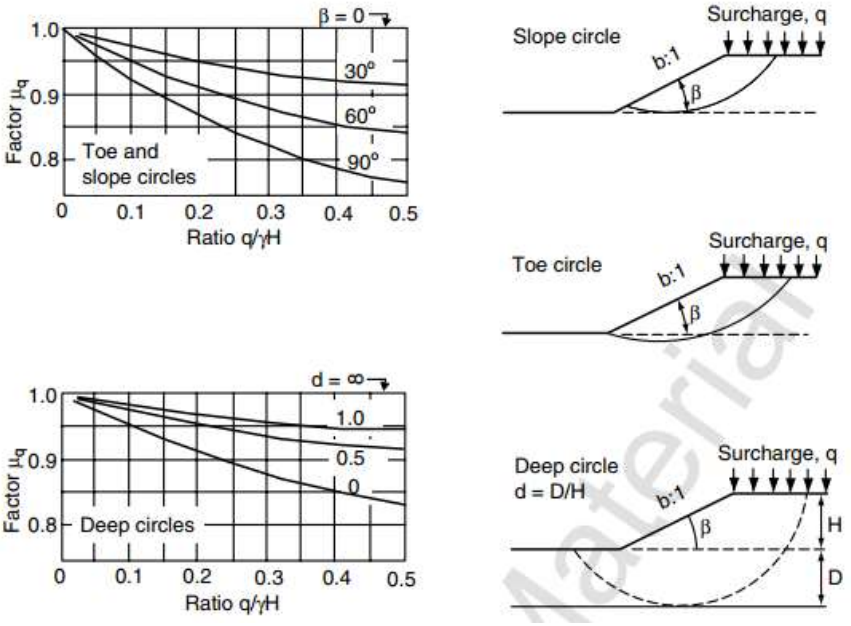
Janbu (1968) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของดินเหนียว (ϕ = 0 และ c = คงที่) โดยพิจารณาลักษณะการวิบัติแบบวงกลมและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมลาดดิน น้ำหนักบรรทุก (surcharge factor) การไหลซึมผ่านของน้ำ (seepage/submergence factor) และ tension crack factor สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากรูปที่ 2.24 และสำหรับดินทราย (ϕ >0) สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ได้จากรูปที่ 2.25



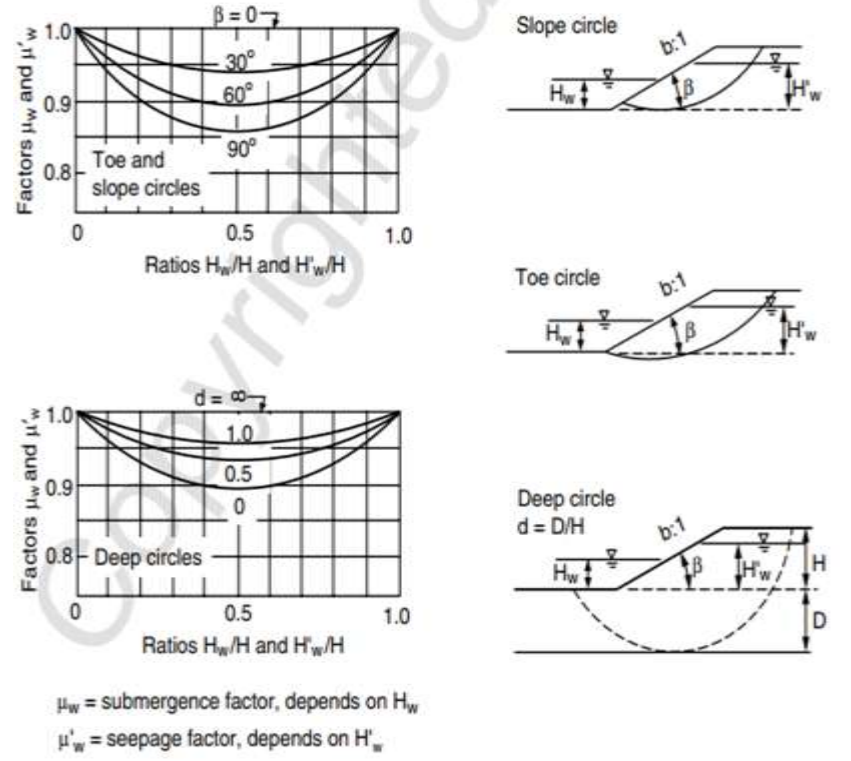
รูปที่ 2.24 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)



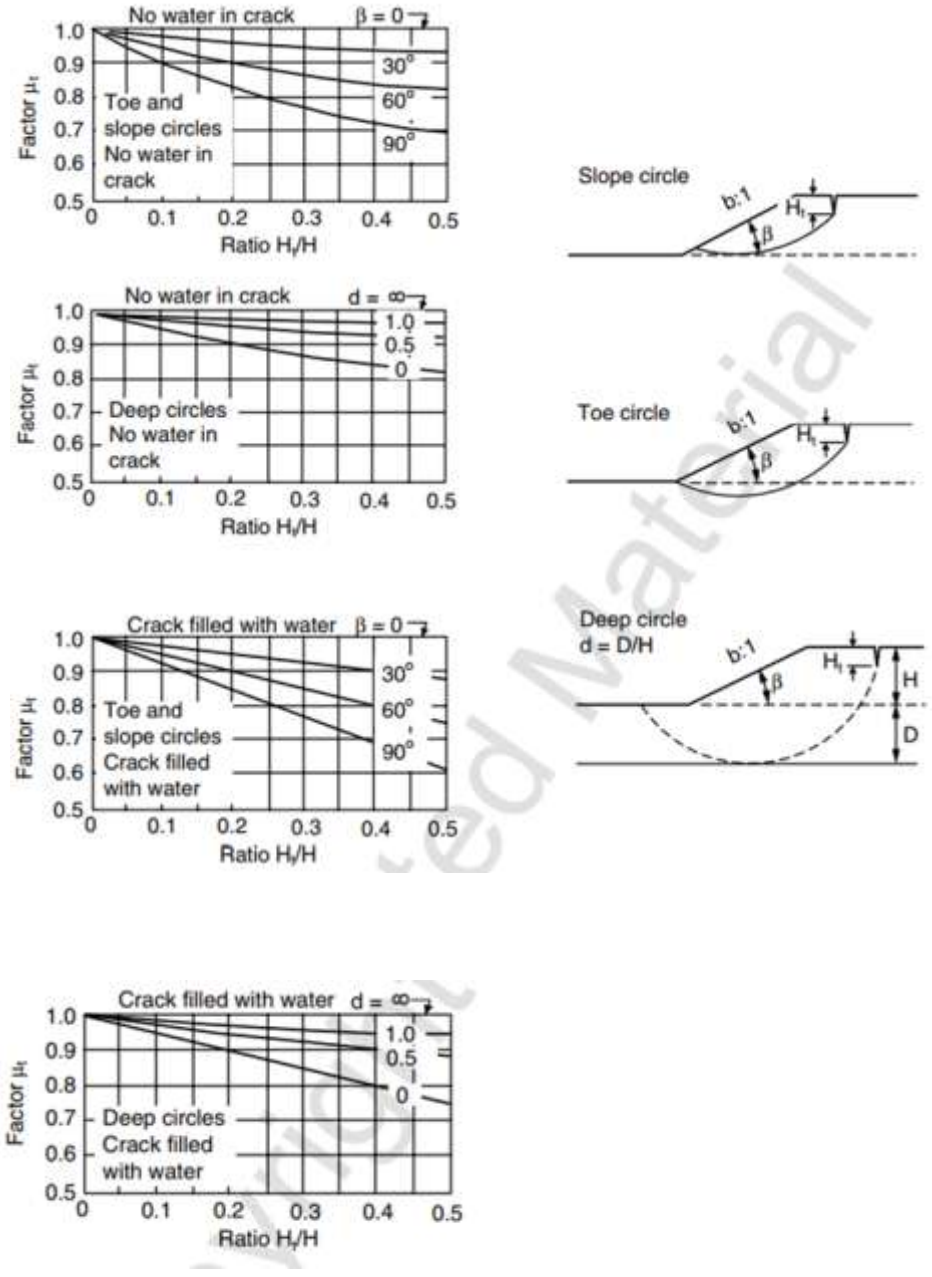
รูปที่ 2.25 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)



รูปที่ 2.26 Surcharge adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi > 0$ soil.



รูปที่ 2.27 Submergence and seepage adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil.



รูปที่ 2.28 Tension crack adjustment factor for $\phi = 0$ and $\phi \geq 0$ soil.

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Janbu เมื่อ $\phi = 0$ รูปที่ 2.24

1. คำนวณ depth factor (d) (จากรูปที่ 2.24)

$$d = \frac{D}{H}$$

2. เมื่อทราบค่า d และ β นำไปเปิดกราฟที่จะได้ค่า N_0
3. คำนวณ quantity (P_d) (จากรูปที่ 2.24)

$$P_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t}$$

4. หาค่า μ_q, μ_w, μ_t ได้จากรูปที่ 2.26,2.27 และ 2.28 ตามลำดับ
5. คำนวณค่า factor of safety (F)

$$F = N_c \frac{c}{P_d}$$

วิธีการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Janbu เมื่อ $\phi > 0$ รูปที่ 2.25

1. คำนวณค่า P_e (จากรูปที่ 2.25)

$$P_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H'_w}{\mu_q \mu'_w}$$

2. คำนวณ Dimensionless parameter $(\lambda_{c\phi})$ (จากรูปที่ 2.25)

$$\lambda_{c\phi} = \frac{P_e \tan\phi}{c}$$

3. เมื่อทราบค่า $\lambda_{c\phi}$ และ Slope ratio b= $\cot\beta$ นำไปเปิดกราฟจะได้ค่า N_{cf}
4. คำนวณค่า P_d (จากรูปที่ 2.25)

$$P_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t}$$

5. หาค่า μ_q, μ_w, μ_t ได้จากรูปที่ 2.26,2.27 และ 2.28 ตามลำดับ
6. คำนวณค่า factor of safety (F)

$$F = N_{cf} \frac{c}{P_d}$$

2.5.8 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Huang (1975,1983)

Huang (1975, 1983) ได้เสนอแผนภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดไว้ 2 กรณี ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในระยะสั้น (Short-term stability) และการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในระยะยาว (Long-term Stability)

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในระยะสั้น (Short-term stability) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในระหว่างหรือหลังทำการก่อสร้าง ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในระยะยาว (Long-term Stability) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหลังการก่อสร้างเสร็จเป็นเวลานานแล้ว

<u>ข้อกำหนดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพของ Huang</u>

แผนภูมิเสถียรภาพของ Huang นั้นมีสำหรับทั้งลาดดินเหนียวและลาดดินทราย ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะลาดดินทราย ซึ่งมีข้อจำกัดดังนี้

1. พิจารณาผลของน้ำที่กระทำกับลาดดินในรูปของ poer pressure ratio , r_u =0 (แสดงเป็นเส้นทึบในแผนภูมิ) และ r_u =0.5 (แสดงเป็นเส้นประในแผนภูมิ) เท่านั้น
2. พิจารณาปัจจัยความลาดเอียงของลาดดิน เป็นระยะในแนวราบของลาดดิน (s) 6 ค่า ได้แก่ s=1.0, s=1.5, s=2.0, s=2.5, s=3.0, และ s=4.0
3. พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') ระหว่าง 5°ถึง 40°
4. พิจารณาค่าความเชื่อมแน่นของดินเป็นฟังก์ชั่นของ cohesion factor (C.F.)

   $C.F. = \frac{100c'}{\gamma H}$ โดยที่ s=1.0 และ s=1.5 ค่า C.F. มีค่าระหว่าง 0-40, s=2.0, s=2.5 และ s=3.0 ค่า C.F. มีค่าระหว่าง 0-30 และที่ s=4.0 ค่า C.F. มีค่าระหว่าง 0-20
5. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$)
6. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)

(1.) Huang Method : (Short-term stability)

ใช้การคำนวณแบบ total stress พิจารณาภายใต้ข้อกำหนดดังนี้

1. เป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (completely saturated soil)
2. เป็นดินเหนียว ($\phi = 0$)
3. เป็นดินเนื้อเดียว (homogeneous soil)
4. วิบัติแบบ Circular failure surface

สมการ Stability factor (N_s)

$$N_s = \frac{\gamma H}{C_d} \tag{2.10}$$

โดยที่ C_d = develop cohesion

γ = unit weight of soil

H = height of slice

สมการ Safety of factor (F)

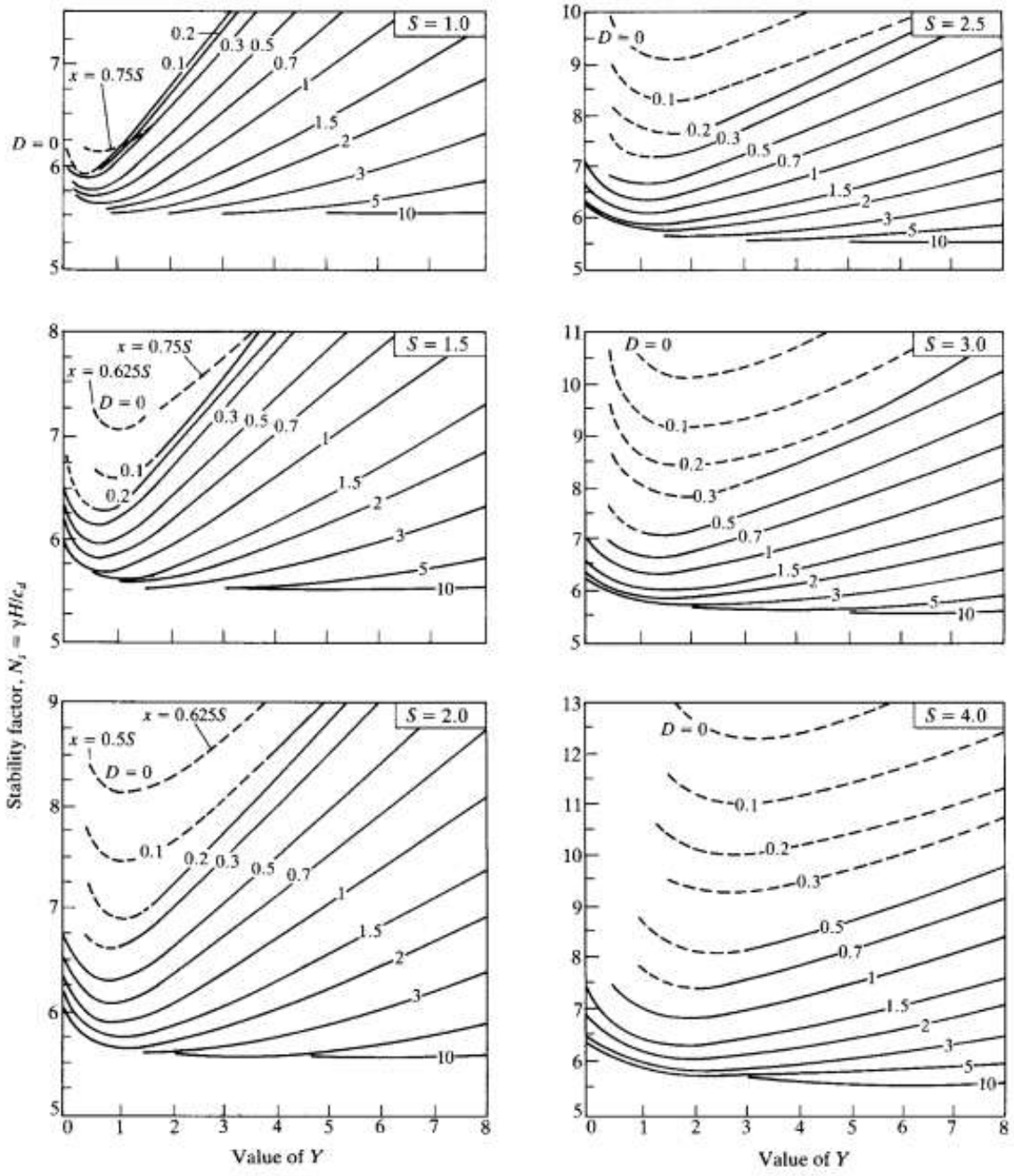
$$F = \frac{C_e}{C_d} \tag{2.11}$$

โดยที่ C_d = develop cohesion

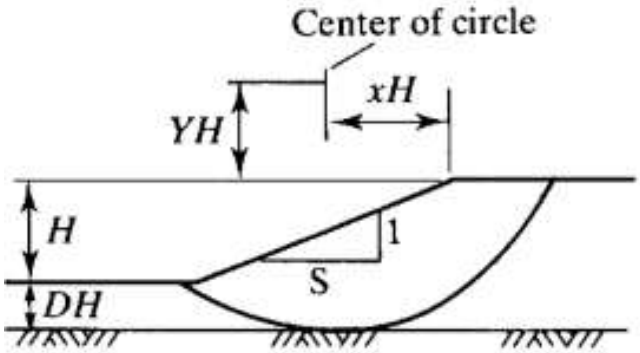
C_e = the average effective cohesion or maximum cohesion

คำนวณค่า C_e ได้จาก

$$C_e = \frac{\sum (\text{ความยาวของ slope surface x ค่า cohesion})}{\sum(\text{ความยาวของ slope surface})} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.29 Stability curve for $\phi = 0$ analysis.



รูปที่ 2.29 Stability curve for $\phi = 0$ analysis. (ต่อ)

วิธีใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Huang Method : (Short-term stability) รูปที่ 2.29

1. ค่าที่ต้องทราบได้แก่ S, Y, และ D เพื่อใช้อ่านค่า N_s จากกราฟ รูปที่ 2.29
2. เมื่อได้ค่า N_s แล้ว ให้นำไปแทนในสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่า C_d

   - จะได้ว่า $C_d = \frac{\gamma H}{N_s}$

3. คำนวณค่า C_e จากสมการที่ 2.12

4. หาค่า Safety of factor (F) ได้จากสมการที่ (2.11) ; $F = \frac{C_e}{C_d}$

(2.) Huang Method: Long-term Stability

คำนวณแบบ effective stress พิจารณารูปที่ 2.30 ภายใต้ข้อกำหนด

1. Pore pressure = 0 (แสดงเป็นเส้นทึบในกราฟ)
2. Pore pressure ratio = 0.5 (แสดงเป็นเส้นประในกราฟ)

โดยที่ Pore pressure ratio (r_u) ใช้สมการที่ (2.5) ของ Bishop and Morgenstern

$$r_u = \frac{u}{\gamma h}$$

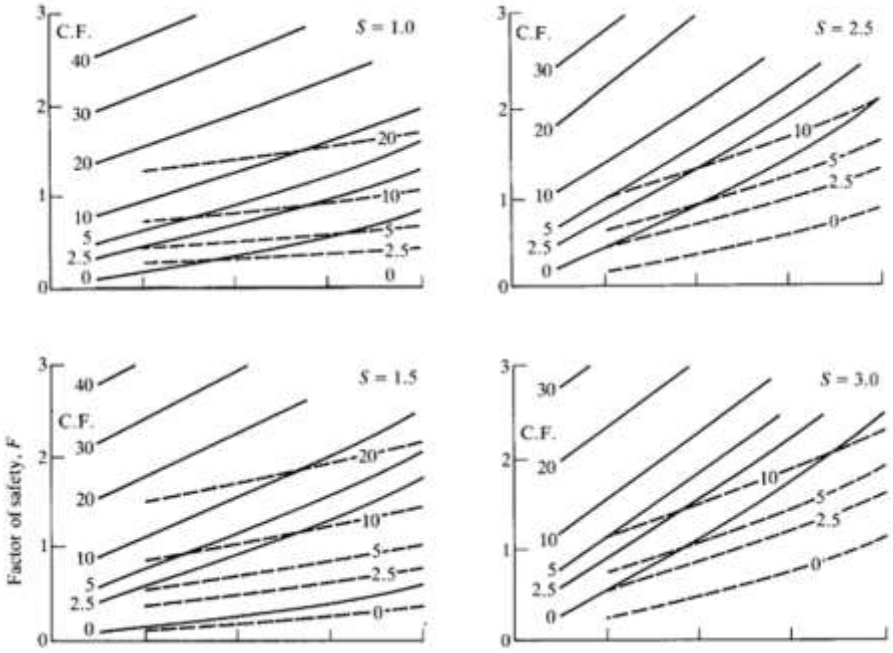
3. ใช้ค่า cohesion factor (C.F.) สำหรับอ่านค่า Factor of safety (F) จากกราฟ

$$C.F. = \frac{100c'}{\gamma H} \tag{2.13}$$

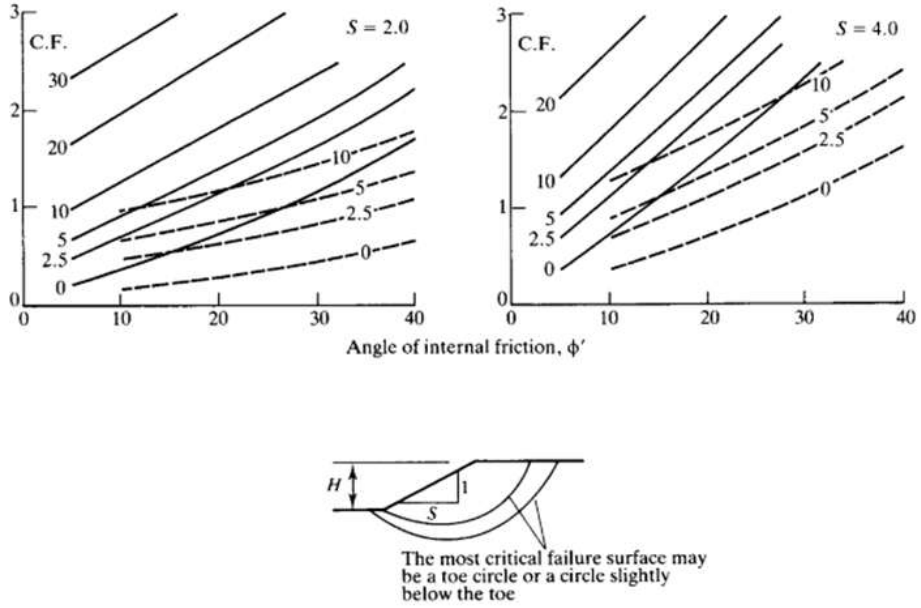
โดยที่ c' = effective cohesion

$\gamma =$ unit weight of soil

H = height of embankment



รูปที่ 2.30 Stability Chart for c', ϕ' analysis.



รูปที่ 2.30 Stability Chart for c', ϕ' analysis. (ต่อ)

วิธีใช้แผนภูมิเสถียรภาพของ Huang : Long-term Stability เพื่อหาค่า Factor of safety (F)

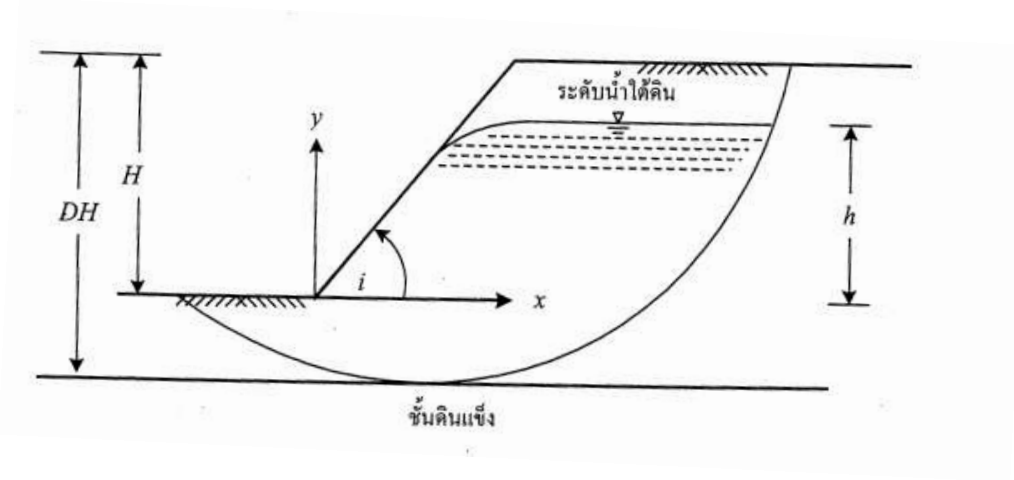
1. ต้องทราบค่า S (ระยะในแนวราบของ slope)
2. ต้องทราบค่า Angle of internal friction (ϕ')
3. ต้องทราบค่า u, r_u (เพื่อพิจารณาว่าต้องใช้ค่าจากเส้นประหรือเส้นทึบ)
4. ต้องทราบค่า cohesion factor (C.F.) (หาได้จากสมการที่ 2.13)

เมื่อทราบค่าจากข้อที่ 1-4 แล้ว สามารถอ่านค่า Factor of safety (F) ที่จากกราฟรูปที่ 2.30

2.5.8 แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Cousins (1978)

Cousins (1978) ได้สร้างแผนภูมิการวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลหาเสถียรภาพของความลาดที่สามารถใช้กับสภาพธรรมชาติที่เกิดขึ้นตามความเป็นจริง และคำนวณหาค่าของเทอมต่างๆ ได้ง่ายมากขึ้น อนึ่งการวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลของเสถียรภาพความลาด ความดันน้ำในมวลดินและแรงยึด

เหนี่ยวจะพิจารณาแยกจากกัน โดยผลของความดันน้ำอยู่ในเทอมของอัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure Ratio) ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 Simples Slopes

Cousins Stability Number (N_s) สามารถหาจาก

$$N_s = \frac{F \cdot S \cdot \gamma H}{c'} \tag{2.14}$$

Cousin's ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับความสูงของลาดต่างๆ

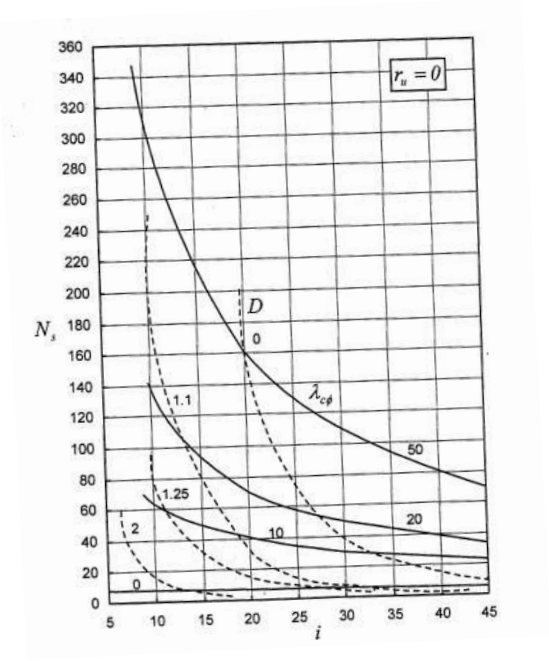
$$\lambda_{c\phi} = \frac{\gamma H \tan\phi'}{c'} \tag{2.15}$$

ปัจจัยความลึก (Depth Factor) สามารถหาจาก

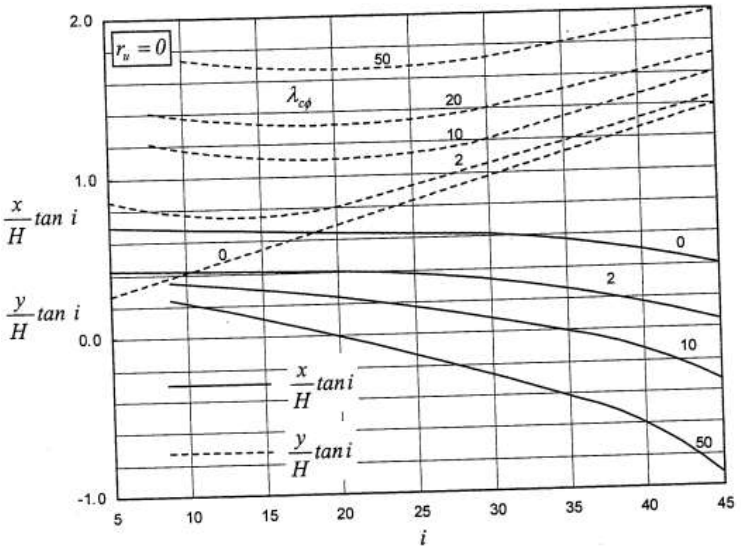
$$D = \frac{V}{H} \tag{2.16}$$

เมื่อ V=ระยะทางแนวดิ่งจากจุดบนสุดของความลาดถึงจุดล่างสุดบนพื้นระนาบการเคลื่อนตัว
H=ระยะสูงของความลาด

เมื่อความลาดสภาพภายใต้การกระทำของน้ำซึมผ่าน ความดันของน้ำละอัตราส่วนแรงดันจะแปรผันตามพื้นระนาบการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งอัตราส่วนแรงดัน (r_u) จะเป็นค่าเฉลี่ย (Average Pore Pressure Ratio)



รูปที่ 2.32 ค่า Cousins' Stability Number ของ Toe Circle, $r_u = 0$



รูปที่ 2.33 ค่าพิกัด x และ y ของ Toe Circle, $r_u = 0$

ขั้นตอนการใช้แผนภูมิของ Cousins มีดังนี้

1. คำนวณหาค่า $\frac{c\gamma}{H}$ และ $\lambda_{c\phi}$
2. ตรวจสอบแนวโน้มการวิบัติ (Base Failure หรือ Toe Failure) ที่ค่า r_u ต่างๆ โดยเลือกค่า N_s ที่ได้มากที่สุดเป็นแนวการวิบัติ
3. หาค่า F.S. จากสมการที่ 4.1
4. หาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งของวงกลมวิบัติ (x,y) จากรูปที่ 2.33

จากรูปที่ 2.32 และ 2.33 สามารถหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งของวงกลมวิบัติ (Failure Circle) ได้ โดยติดอยู่ในรูป $\frac{x\tan i}{H}$ และ $\frac{y\tan i}{H}$

<u>ข้อจำกัดสำหรับแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Cousins</u>

1. พิจารณาผลของน้ำที่กระทำกับลาดดินในรูปของ poer pressure ratio , r_u =0 เท่านั้น
2. พิจารณาความลาดเอียงของลาดดิน (slope factor, β) ระหว่างมุม 5° ถึง 45°
3. พิจารณาปัจจัยความลึก (Depth Factor, D) ในรูปของ $D=\frac{V}{H}$ ซึ่งมีได้ 4 ค่า คือ 0, 1.1, 1.25, และ 2
4. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับความสูงของลาดต่างๆ ในรูปของ $\lambda_{c\phi}=\frac{\gamma H\tan\phi'}{c'}$ ซึ่ง $\lambda_{c\phi}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-50
5. ไม่พิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH)
6. ไม่พิจารณาผลของรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน (tension crack factor)

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วิธีการศึกษาของโครงงาน

วิธีการศึกษาของโครงงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (วิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัย FS) ในกรณีลาดดินทรายเนื้อเดียว คือ มุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (cohesion, c') มีค่าคงที่ โดยใช้วิธี Morgenstern and Price และแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดิน ได้แก่

1. มุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') คือ พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน ได้แก่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35°
2. ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c') คือ พิจารณาค่าความเชื่อมแน่นของดินเป็นฟังก์ชั่นของ $\frac{c'}{\gamma H}$ ได้แก่ 0.0125, 0.025, และ 0.05
3. ปัจจัยค่าความลาดเอียง (slope factor, β) คือ พิจารณาความลาดเอียงของลาดดินระหว่างมุม 0° ถึง 90° (20°, 40°, 65°, 80 และ 90°)
4. ปัจจัยความสูง (depth factor, d=D/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกจาก toe ของลาดดินถึงจุดต่ำสุดบนวงกลมวิบัติ (depth from the toe of slope to the lowest point on the slip circle, D) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) 0, 1, และ 10
5. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (surcharge, q) และน้ำหนักของลาดดิน (weight of soil, γH) ระหว่าง 0 ถึง 0.5 (0, 0.25, และ 0.5)
6. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (submergence factor, H_w /H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความสูงของน้ำภายนอกลาดดิน (height of external water level above toe, H_w) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 1 (0, 0.25, 0.5, 0.75, และ 1)

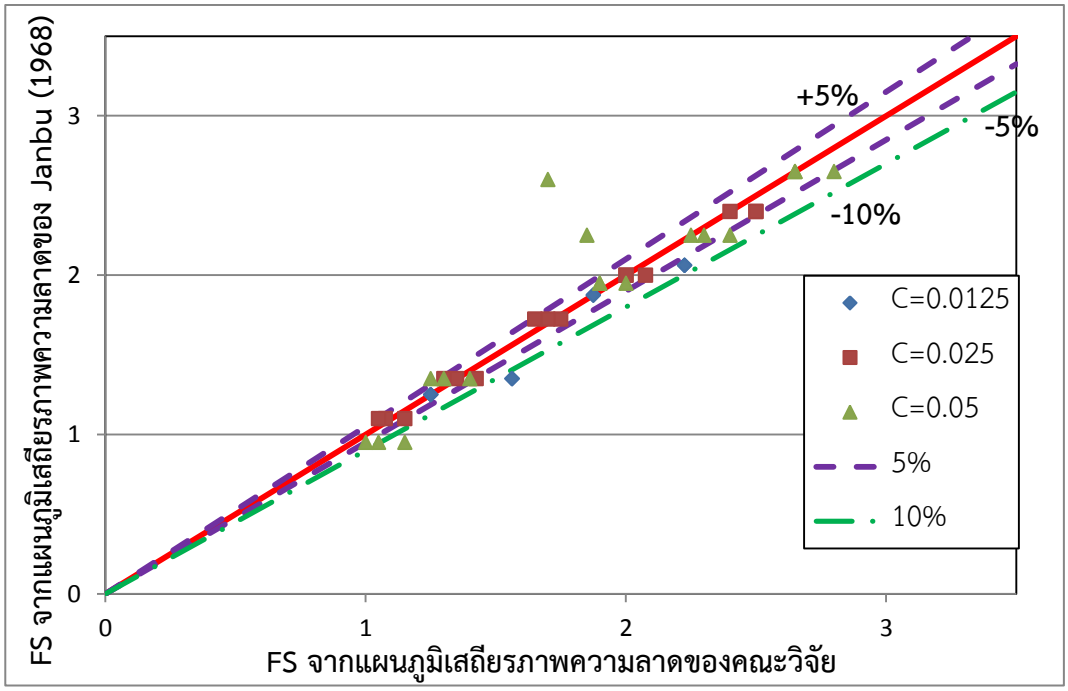
7. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (seepage factor, H_w' /H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความสูงของน้ำภายในลาดดิน (height of internal water level above toe, H_w') และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 1 (0, 0.25, 0.5, 0.75, และ 1)

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

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968)

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียวที่ได้จากโครงงานนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแผนภูมิเสถียรภาพความลาด Janbu (1968) โดยแสดงผลในรูปของกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้

4.2.1 กรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุกและไม่มีการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน

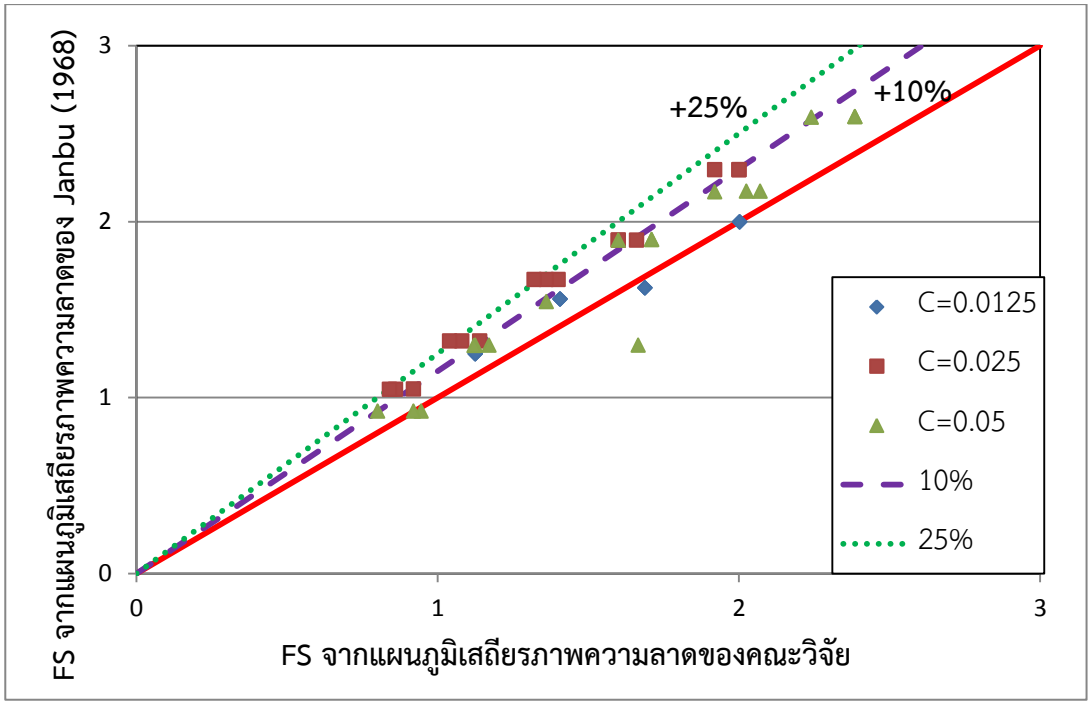


รูปที่ 4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) กรณีไม่มีแรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีน้ำทั้งในและนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (slope factor, β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°,

25°, 30° และ 35°, และปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันที่ +5% ถึง -10% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่กลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C) ที่ C=0.05 บางส่วน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีความแตกต่างกันเกิน 10% อาจเกิดจากการอ่านค่า Stability number (N_{cf}) จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ซึ่งเป็น log scale ต้องใช้การอ่านโดยประมาณค่าส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในกลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (c) ที่ C=0.05 เกิดความแตกต่างกันมาก

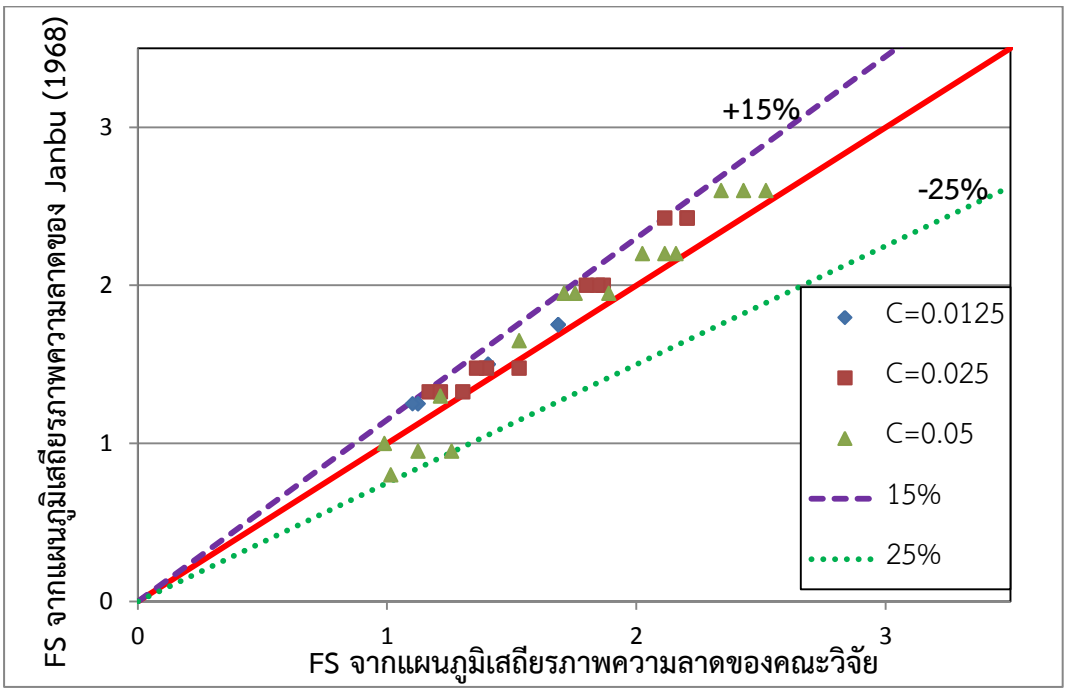
4.2.2 กรณีมีน้ำหนักบรรทุก แต่ไม่มีการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน



รูปที่ 4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) กรณีมีแรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีน้ำทั้งในและนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle,ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° และปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05 และปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ($q/\gamma H$) ที่ 0.25 และ 0.5 จะเห็นว่าค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) มากกว่าค่า FS ที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยไม่เกิน +25% โดยที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.0125 และ C=0.05 ความแตกต่างของค่า FS ไม่เกิน 10% ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่กลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินบางส่วนที่ C=0.025 ค่า FS มีความแตกต่างกันในช่วง +10% ถึง +25% ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันมาก อาจเกิดจากการอ่านค่า Stability number (N_{cf}) จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ซึ่งเป็น log scale ต้องใช้การอ่านโดยประมาณค่าส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย(FS) ในกลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c) บางส่วนที่ C=0.05 เกิดความแตกต่างกันมาก

4.2.3 กรณีมีการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน แต่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกและไม่มีการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน

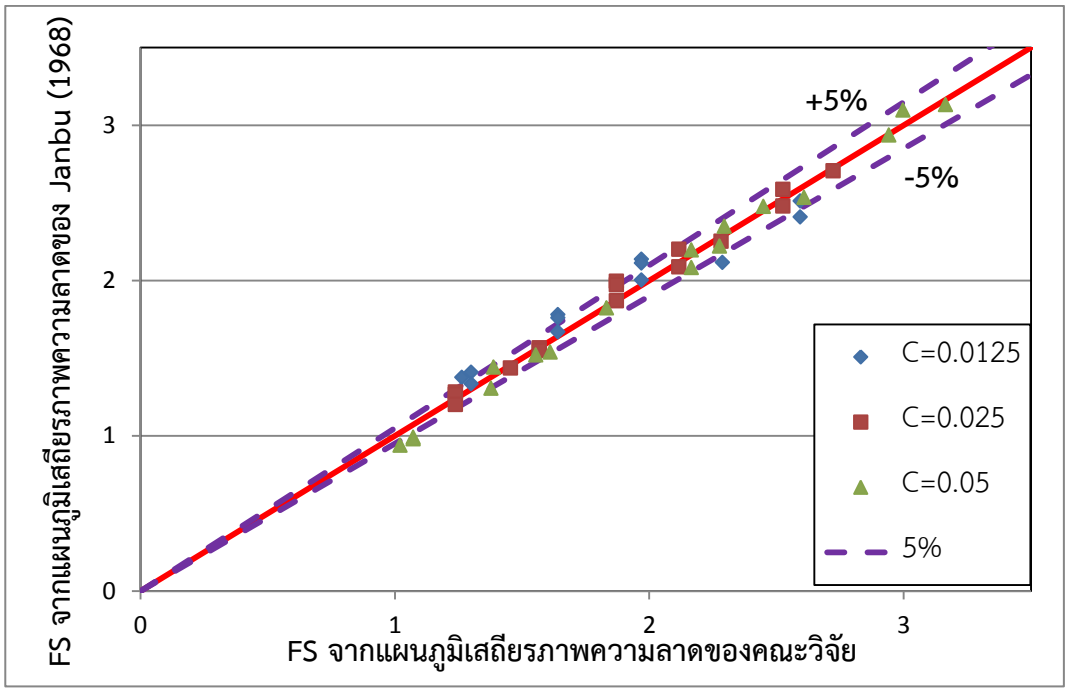


รูปที่ 4.10 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณี มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 36 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05 และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Hw/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มากกว่าค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัย 15%

ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่กลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินบางส่วนที่ C=0.05 ค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยน้อยกว่าค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) 25% ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันมาก อาจเกิดจากการอ่านค่า Stability number (N_{cf}) จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ซึ่งเป็น log scale ต้องใช้การอ่านโดยประมาณค่าส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย(FS) ในกลุ่มตัวอย่างที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน C=0.05 เกิดความแตกต่างกันมาก

4.2.4 กรณีมีการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน แต่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกและไม่มีการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน



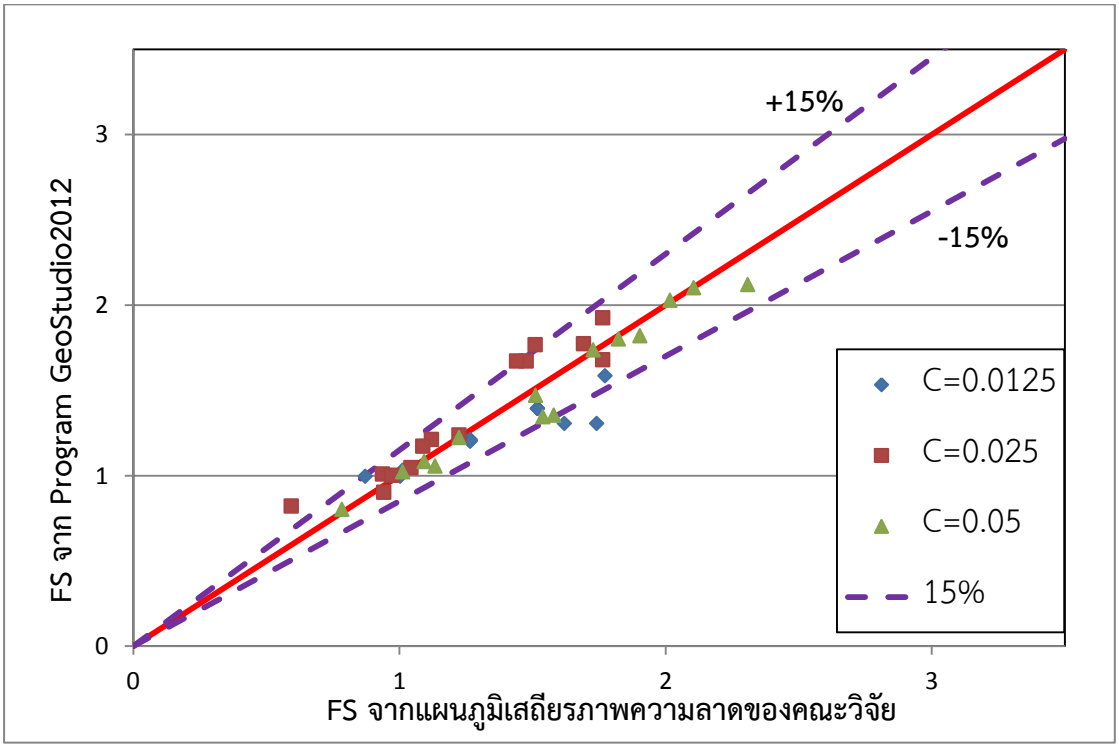
รูปที่ 4.11 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณี มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึม

ผ่านของน้ำนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05 และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (Hw/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75 จะเห็นว่าค่า FS ที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันที่ ±5% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยและจากโปรแกรม GeoStudio2012

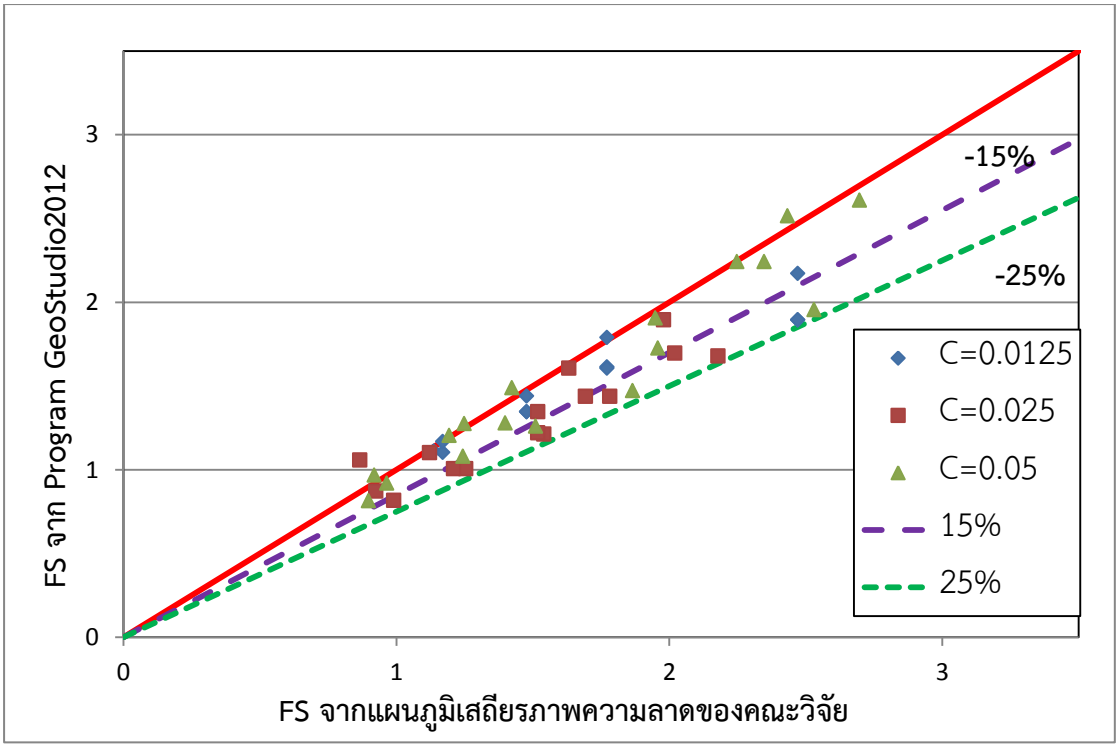
4.3.1 กรณีมีน้ำหนักบรรทุกและมีการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน



รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน และมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่า FS จาก Program GeoStudio2012 กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 40 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05, ปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ($q/\gamma H$) ที่ 0.25 และ 0.5, และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Hw'/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75 จะเห็นว่าค่า FS ที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของ Janbu (1968) ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันที่ ± 15% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.025 ค่า FS จาก Program GeoStudio2012 จะมากกว่าของคณะวิจัย 15% ส่วนปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.0125 และ C=0.05 ค่า FS ของคณะวิจัยจะน้อยกว่าค่า FS จาก Program GeoStudio2012 15% ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอาจเกิดจากการใช้จากแผนภูมิเสถียรภาพของคณะวิจัยสำหรับหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยมีการนำปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดินมารวมกับปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน แต่ค่า FS จาก Program GeoStudio2012 นั้นเป็นการสร้างกรณีศึกษาด้วยการนำปัจจัยที่ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติมาสร้างเฉพาะของกรณีนั้นๆ

4.3.2 กรณีมีน้ำหนักบรรทุกและมีการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน

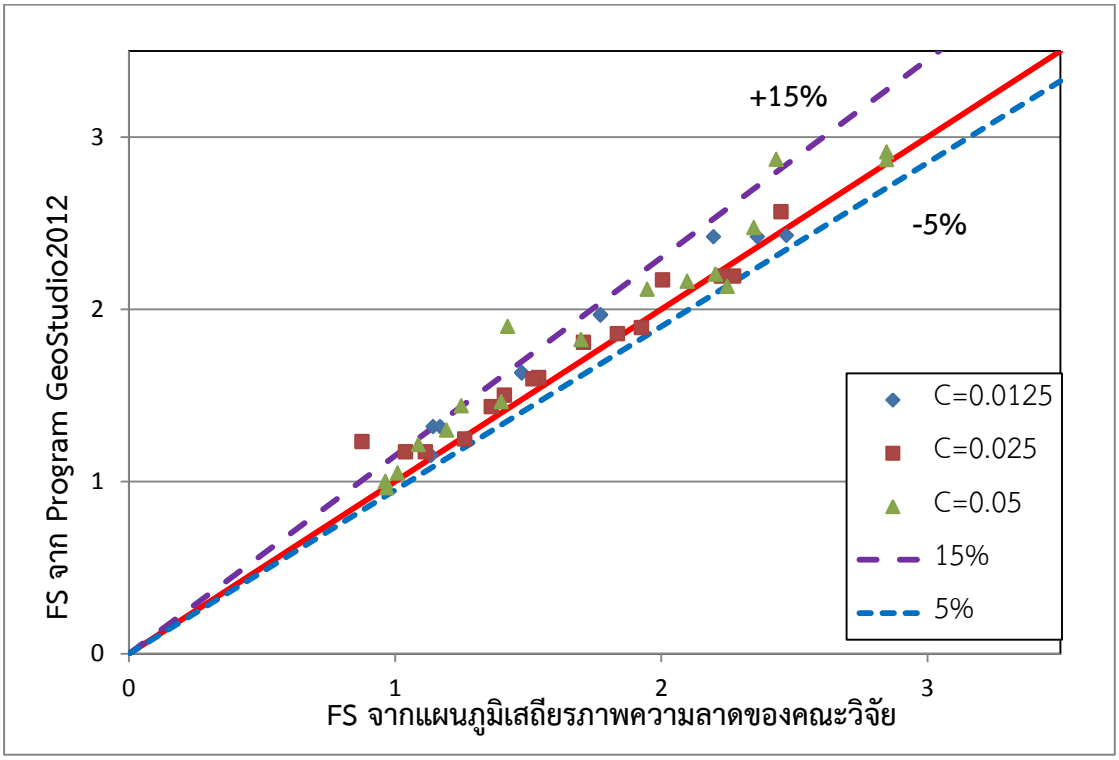


รูปที่ 4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน และมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จาก Program GeoStudio2012 กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ไม่มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน และมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05, ปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ($q/\gamma H$) ที่ 0.25 และ 0.5, และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (Hw/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับน้อยกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจาก Program GeoStudio2012 ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มี

ความแตกต่างกันที่ ±15% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.025 ค่า FS จาก Program GeoStudio2012 ถึง 25% ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอาจเกิดจากการใช้จากแผนภูมิเสถียรภาพของคณะวิจัยสำหรับหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยมีการนำปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดินมารวมกับปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน แต่ค่า FS จาก Program GeoStudio2012 เป็นการสร้างกรณีศึกษาด้วยการนำปัจจัยที่ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติมาสร้างเฉพาะของกรณีนั้นๆ

4.3.3 กรณีมีการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน

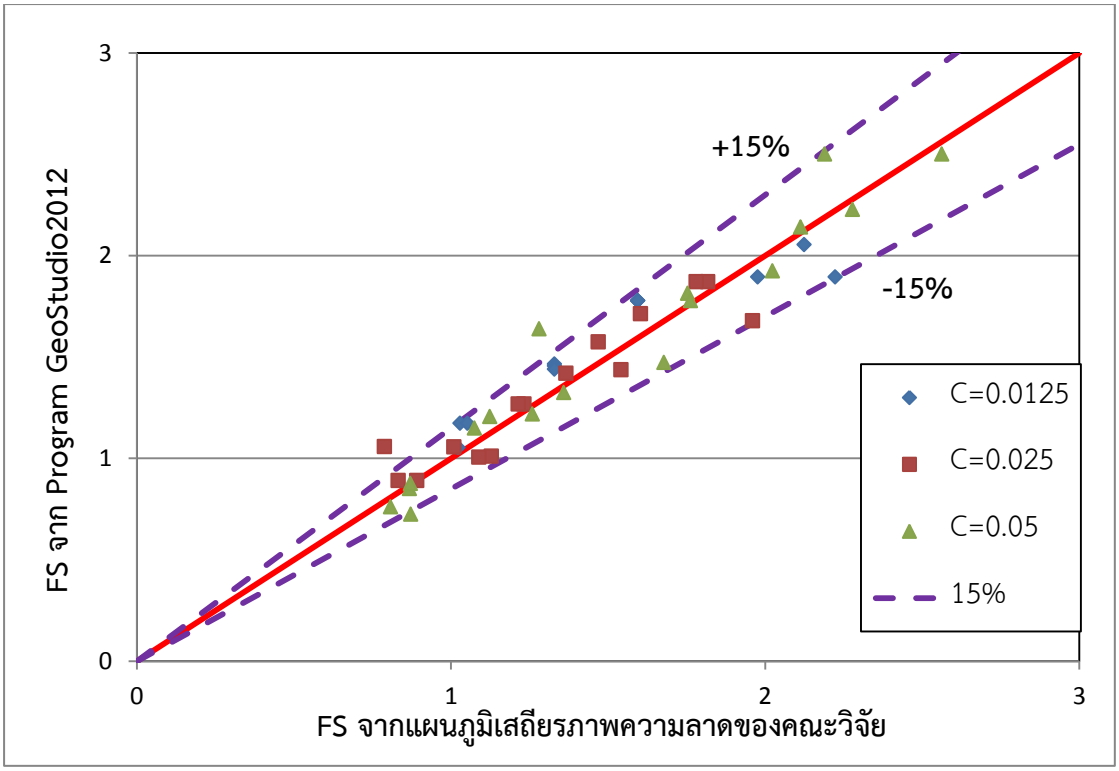


รูปที่ 14 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จาก Program GeoStudio2012 กรณีไม่มีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี

(ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle,ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05, ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (Hw/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75, และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Hw'/H) ที่ 0.25, Hw'/H=0.5, และ 0.75 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จาก Program GeoStudio2012 มีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัย ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 15% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ข้อมูลบางส่วนของปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.0125 มีค่าความแตกต่างมากกว่า 15% ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างบางส่วนของปัจจัยความเชื่อมแน่นของดินที่ C=0.025 และ C=0.05 จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าค่าที่ได้จาก Program GeoStudio2012 ที่ 5% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก ซึ่งความแตกต่างของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอาจเกิดจากการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของคณะวิจัยสำหรับหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยมีการนำปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดินมารวมกัน แต่ค่า FS จาก Program GeoStudio2012 นั้น เป็นการสร้างกรณีศึกษาด้วยการนำปัจจัยที่ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติมาสร้างเฉพาะของกรณีนั้นๆ

4.3.4 กรณีมีน้ำหนักบรรทุกและมีการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน



รูปที่ 15 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน

จากการเปรียบเทียบค่า FS จากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของคณะวิจัยกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จาก Program GeoStudio2012 กรณีมีปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน มีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 44 กรณี (ลาดดินไม่วิบัติ) ประกอบด้วย ปัจจัยความเอียง (β) ที่ 20°และ 40°, ปัจจัยความสูง (depth factor, d) ที่ 0, 0.1 และ 10, ปัจจัยของค่ามุมเสียดทานของดิน (friction angle, ϕ) ที่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30° และ 35° ปัจจัยความเชื่อมแน่นของดิน (C=c/γH) ที่ 0.0125, 0.025 และ 0.05, ปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ($q/\gamma H$) ที่ 0.25 และ 0.5 ,ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (Hw/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75, และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Hw'/H) ที่ 0.25, 0.5, และ 0.75 จากแผนภูมิเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเห็นว่าข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันที่ $\pm$ 15% ถือว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งความ

แตกต่างของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอาจเกิดจากการใช้แผนภูมิเสถียรภาพของคณะวิจัยสำหรับหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยมีการนำปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งในและนอกลาดดิน รวมถึงปัจจัยของน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ส่วนบนของลาดดินมารวมกัน แต่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย FS จาก Program GeoStudio2012 นั้น เป็นการสร้างกรณีศึกษาด้วยการนำปัจจัยที่ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติมาสร้างเฉพาะของกรณีนั้นๆ

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด

จากวัตถุประสงค์ของโครงงาน คือเพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทราย ผู้ศึกษาจึงได้ทำการออกแบบแผนการศึกษาโดยทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (วิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัย FS) ในกรณีลาดดินทรายเนื้อเดียว คือ มุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle, ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (cohesion, c′) มีค่าคงที่ โดยใช้วิธี Morgenstern and Price และแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดิน (ดูรูปที่ 4.1) ได้แก่

1. มุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle,ϕ') คือ พิจารณามุมเสียดทานภายในของดิน ได้แก่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30°และ 35°

2. ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c′) คือ พิจารณาค่าความเชื่อมแน่นของดินเป็นฟังก์ชั่นของ $C = \frac{c'}{\gamma H}$ ได้แก่ 0.0125, 0.025, และ 0.05

3. ปัจจัยค่าความลาดเอียง (slope factor,β) คือ พิจารณาความลาดเอียงของลาดดินระหว่างมุม 20° ถึง 90°

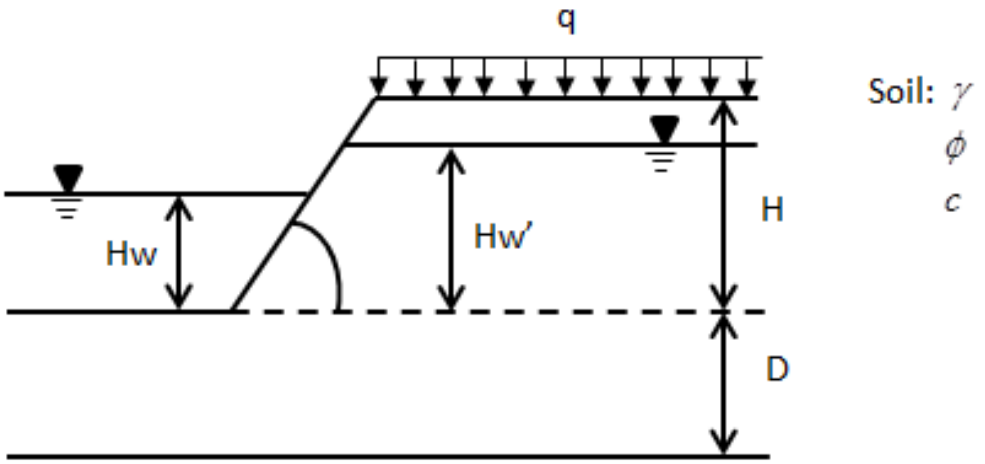
4. ปัจจัยความสูง (depth factor, d=D/H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความลึกจาก toe ของลาดดินถึงจุดต่ำสุดบนวงกลมวิบัติ (depth from the toe of slope to the lowest point on the slip circle, D) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) 0, 1, และ 10

5. ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, q/γH) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (surcharge, q) และน้ำหนักของลาดดิน (weight of soil, γH) ระหว่าง 0 ถึง 0.5

6. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (submergence factor, H_w /H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความสูงของน้ำภายนอกลาดดิน (height of external water level above toe, H_w) และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 1

7. ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (seepage factor, H_w' /H) คือ พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความสูงของน้ำภายในลาดดิน (height of internal water level above toe, H_w') และความสูงของลาดดิน (slope height, H) ระหว่าง 0 ถึง 1

จากปัจจัยที่พิจารณาดังกล่าวสามารถสร้างกรณีเพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ด้วยโปรแกรม GeoStudio 2012 จำนวน 20,125 กรณี จากนั้นนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหรืออัตราส่วนปลอดภัย (FS) ของทุกกรณี มาสร้างเป็นแผนภูมิเสถียรภาพความลาดเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในกรณีลาดดินทรายเนื้อเดียวคงที่ โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือแผนภูมิหลักและแผนภูมิสำหรับปรับแก้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ต่างๆ ของลาดดิน

4.1.1 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุกและปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกและในลาดดิน

แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทราย โดยสมมติให้ดินเนื้อเดียวมีคุณสมบัติ γ คงที่ ความสูงวิกฤตของความลาดและอัตราส่วนปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ และแผนภูมิเสถียรภาพความลาดแสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 โดยค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมลาดชัน (slope factor, β), มุมเสียดทาน (friction angle, ϕ) ,ความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c') และ ปัจจัยความสูง (depth factor d=D/H)

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma} \tag{4.1}$$

$$FS = \frac{H_c}{H_{act}} \tag{4.2}$$

เมื่อ N_s = Stability factor

H_c = Critical height

c = Cohesion

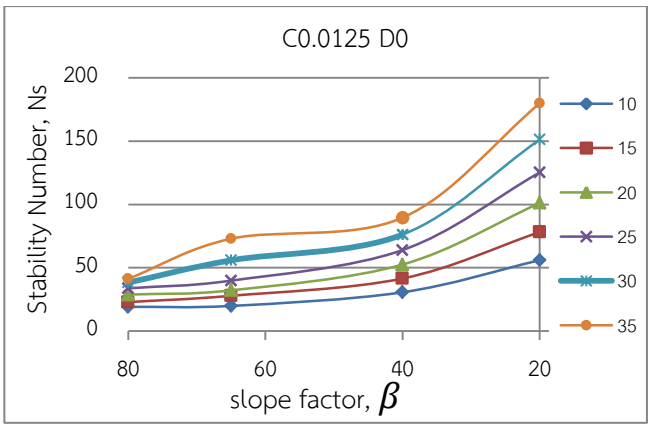
γ = Unit weight of soil

ผู้ศึกษาได้สร้างแผนภูมิหลักขึ้นมาทั้งหมด 9 แผนภูมิตามหลักการของ Taylor (1937) โดยสามารถใช้หาค่าตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ตามขั้นตอนดังนี้

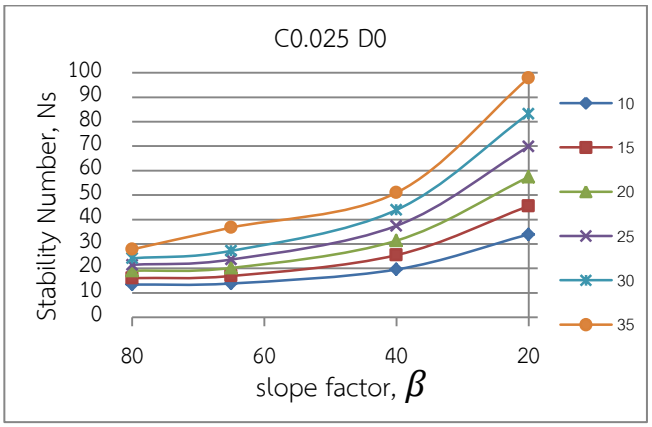
1. ผู้ใช้แผนภูมิต้องทราบค่ามุมลาดชัน (slope factor, β) และค่ามุมเสียดทาน(friction angle, ϕ) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 10-35 องศา สำหรับอ่านค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s)

2. นำค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) ไปคำนวณหาความสูงวิกฤติของลาดดิน H_c ตามสมการที่ 4.1

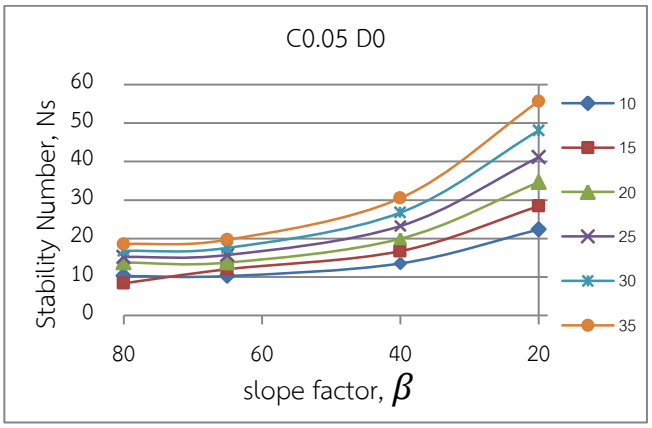
3. คำนวณค่าตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ตามสมการที่ 4.2



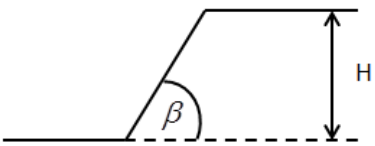
(ก) C=0.0125 และ D=0 m



(ข) C=0.025 และ D=0 m

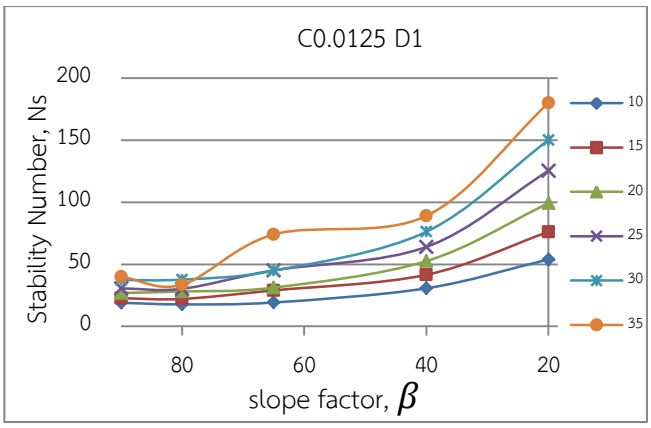


(ค) C=0.05 และ D=0 m

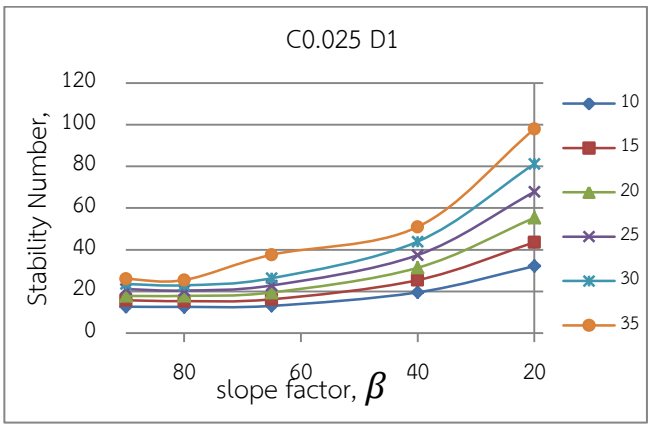


(ง) ลาดดิน

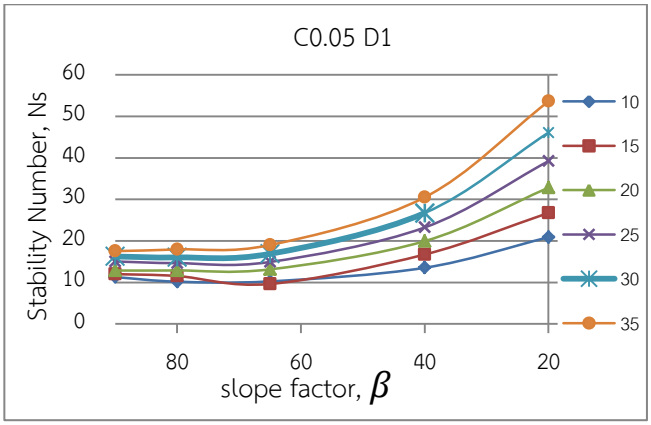
รูปที่ 4.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) = 0 m



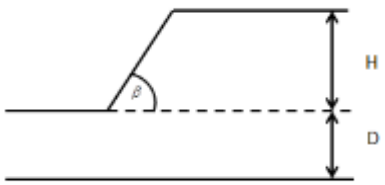
(ก) C=0.0125 และ D=1 m



(ข) C=0.025 และ D=1 m

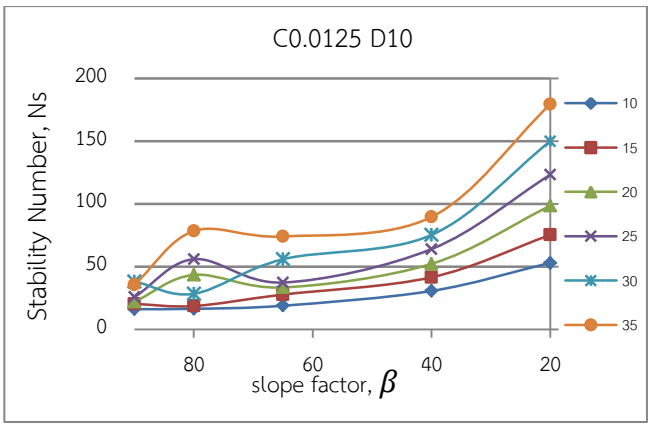


(ค) C=0.05 และ D=1 m

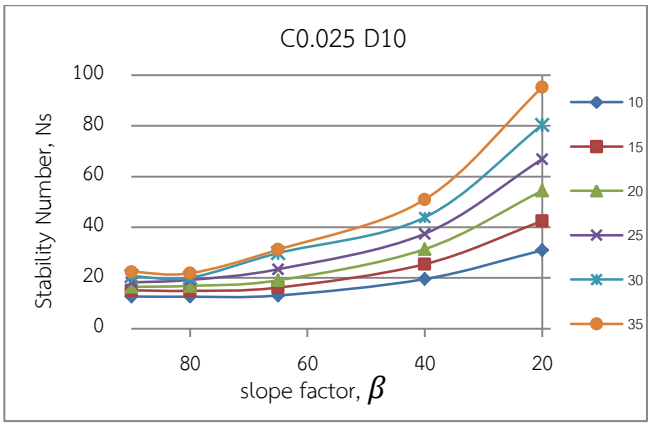


(ง) ลาดดิน

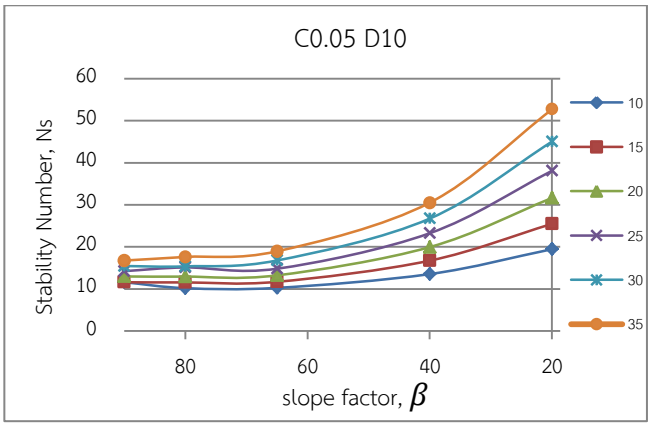
รูปที่ 4.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) =0.1



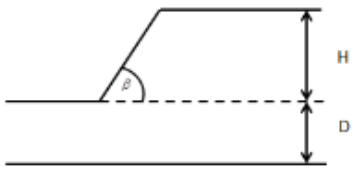
(ก) C=0.0125 และ D=10 m



(ข) C=0.025 และ D=10 m



(ค) C=0.05 และ D=10 m



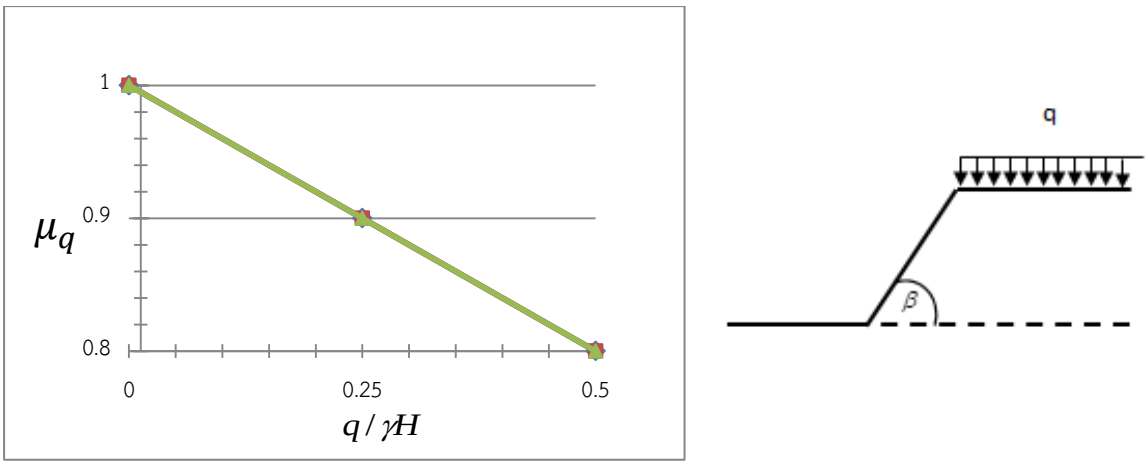
(ง) ลาดดิน

รูปที่ 4.4 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด เมื่อ depth factor (d=D/H) =1

เนื่องจากแผนภูมิเสถียรภาพความลาดหลักที่นำเสนอในหัวข้อ 4.1.1 มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือไม่ครอบคลุมถึง (1) ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$), (2) ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (submergence factor, H_w/H) และ (3) ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (seepage factor, H_w'/H) ผู้ศึกษาจึงได้สร้างแผนภูมิสำหรับปรับแก้ค่าตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เพื่อให้แผนภูมินี้ครอบคลุมปัจจัยดังกล่าว ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.2 – 4.1.3 ตามลำดับ

4.1.2 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีมีน้ำหนักบรรทุก

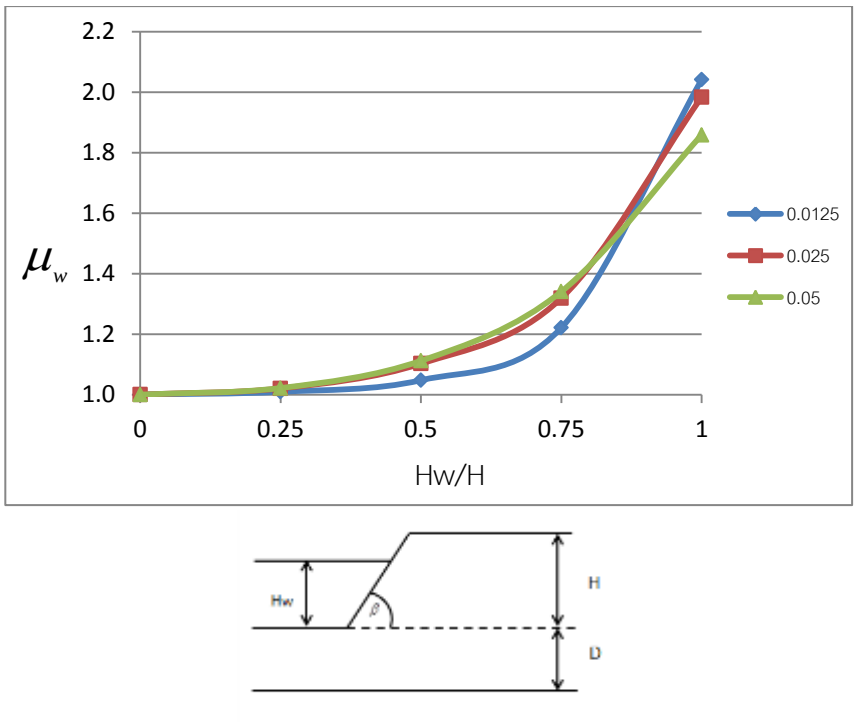
แผนภูมิสำหรับปรับแก้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากแผนภูมิหลัก โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินคือปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (surcharge factor, $q/\gamma H$) แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อทราบค่า μ_q แล้ว ให้นำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) จากแผนภูมิหลักแล้วคำนวณค่าตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ต่อไป



รูปที่ 4.5 Surcharge adjustment factor , μ_q

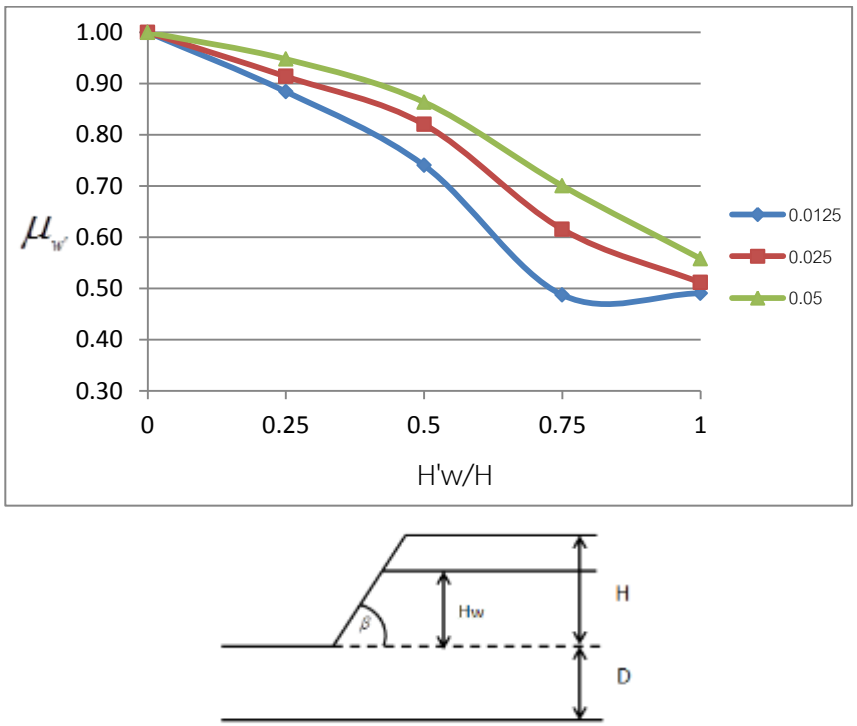
4.1.3 แผนภูมิเสถียรภาพความลาด กรณีมีปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกและในลาดดิน

แผนภูมิสำหรับปรับแก้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากแผนภูมิหลัก โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน คือปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน (submergence factor,H_w/H)และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (seepage factor, H_w'/H) แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 เมื่อทราบค่า $\mu_w, \mu_{w'}$ แล้ว ให้นำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability factor, N_s) จากแผนภูมิหลักแล้วคำนวณค่าตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ต่อไป



(ก) ลาดดิน

รูปที่ 4.6 Submergence adjustment factor, μ_w



(ก) ลาดดิน

รูปที่ 4.7 Seepage adjustment factor, $\mu_{w'}$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาโครงงานวิจัยเรื่องเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียว การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเพื่อสร้างแผนภูมิเสถียรภาพความลาดของลาดดินทรายเนื้อเดียว โดยวิธี Morgenstern and Price สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการสร้างกรณีศึกษาจากปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย จากโปรแกรม Geostudio 2012 และได้นำมาสร้างแผนภูมิเสถียรภำความลาดตามวัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย จะได้แผนภูมิ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. แผนภูมิเสถียรภาพความลาด ที่เป็นแผนภูมิหลัก เป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพความลาด (stability Number, Ns) กับปัจจัยความเอียง จะมีทั้งหมด 9 แผนภูมิ โดยแต่ละแผนภูมิจะมีค่า ความเชื่อมแน่นของดิน และปัจจัยความสูงเป็นตัวกำหนดของแต่ละแผนภูมิ

2. แผนภูมิปรับแก้ คือ แผนภูมิสำหรับปรับแก้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากแผนภูมิหลัก โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินเพิ่มเติม มีทั้งหมด 3 แผนภูมิ คือแผนภูมิปรับแก้ ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก, ปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำนอกลาดดิน และปัจจัยการไหลซึมผ่านของน้ำในลาดดิน

จากการที่ได้ทำการทดลองใช้แผนภูมิ และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแผนภูมิ กับแผนภูมิเสถียรภาพของ Janbu (1968) ผลที่ได้ถือว่ามีความใกล้เคียง แสดงว่าแผนภูมิสามารถใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรกำหนดค่าปัจจัยการความเอียง (slope factor, β) โดยเน้นที่ค่าความเอียงต่ำๆ เพราะในส่วนของความเอียงสูงๆ ที่ ความชัน 65, 80 และ 90 องศา ลาดดินจะวิบัติเป็นส่วนมาก ทำให้ผลที่ได้จากการรันโปรแกรมไม่เป็นไปตามทฤษฎี
2. ความเชื่อมแน่นของดิน (cohesion, c') มีค่าน้อยเกินไป ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำมากๆ ส่งผลให้ลาดดินเกิดการวิบัติเป็นส่วนใหญ่
3. ควรทำการเก็บข้อมูลจากโปรแกรมให้ได้เร็วที่สุด เพื่อจะได้มีเวลาในการวิเคราะห์ผลได้ละเอียดยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2546). วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. (พิมพ์ครั้งที่11). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา มหาวิทยาลัยรังสิต (2554). ปฐพีกลศาสตร์. (พิมพ์ครั้งที่3). กรุงเทพฯ: โฟร์เฟซ

สราวุธ จริตงาม (2545). กลศาสตร์ของดิน (พิมพ์ครั้งที่1). สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์

บุญเทพ นาเนกรังสรรค์ (2552). วิศวกรรมปฐพีและฐานรากและการก่อสร้างอุโมงค์. (พิมพ์ครั้งที่7). กรุงเทพฯ: ท้อป

วรากร ไม้เรียง (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน (พิมพ์ครั้งที่7). กรุงเทพฯ: ไลบรารี่ นาย

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ (2554). ปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพฯ: ท้อป

Taylor, D. W. (1937). Stability of earth slopes, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 24(3). Reprinted in Contributions to Soil Mechanics, 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, 1940, pp. 337-386

Taylor, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, Wi- ley, Hoboken, NJ.

Bishop, A. W. (1955). The use of slip circles in the stability analysis of earth slopes, Geotechnique, 5(1), 7-17

Bishop, A. W., and Morgenstern, N. (1960). Stability coef- ficients for earth slopes, Geotechnique, 10(4), 129-150.

Morgenstern, N. R. (1963). Stability charts for earth slopes during rapid drawdown, Geotechnique, 13 (2), 121-131.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Geo technique, 17(1), 11-26.

บรรณานุกรม

Janbu, N. (1968). Slope stability computations, soil Mechan- ics and Foundation Engineering Report, The Technical University of Norway, Trondheim

Huang, Y.H. (1975), Stability charts for earth embankments, Transportation Research Record 548, pp. 1-12.

Huang, Y. H. (1983), Stability Analysis of Earth Slopes, Van Nostrand Reinhold Co., New York, N.Y

Hunter, J. H. and Schuster, R. L. (1971), Chart solutions for analysis of earth slopes, Highway Research Record No. 345, pp 77-89

ประวัดผู้จัดทำ

ชื่อสกุล	นางสาวเกษราภรณ์ เกลียวเพียร
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม 2533
สถานที่เกิด	สุรินทร์, ไทย
ที่อยู่ปัจจุบัน	141 หมู่ 9 ตำบล ท่าตูม อำเภอ ท่าตูม จังหวัด สุรินทร์
ประวัติการศึกษา	- ระดับประถมศึกษา โรงเรียนท่าตูมสนิทราษฎร์วิทยาคม - ระดับมัธยมศึกษา มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนท่าตูมประชาเสริมวิทย์ มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสิรินธร - ระดับประกาศนียบัตร โรงเรียนผู้ช่วยพยาบาลคณะแพทยศาสตร์ศิราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล
การศึกษาปัจจุบัน	นิสิตชั้นปีที่4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี

ชื่อสกุล	นางสาวฐิติพร พรมโอก
วัน เดือน ปีเกิด	28 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	สกลนคร, ไทย
ที่อยู่ปัจจุบัน	41/1 หมู่ 9 ตำบล นาแต้ อำเภอ คำตากล้า จังหวัด สกลนคร
ประวัติการศึกษา	–ระดับประถม โรงเรียนบ้านหนองแสง-ดงอีบ่าง -ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนคำตากล้าราชประชาสงเคราะห์
การศึกษาปัจจุบัน	นิสิตชั้นปีที่4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี