



รายงานผลการประคิษฐ์
ทุนอุดหนุนโครงการตั้งประคิษฐ์

4
เรื่อง

การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเบ็ดและอุโมงค์ใต้ดิน

สถาบันวิทยบริการ

โดย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวอด

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ทุนอุดหนุนโครงการสิงประดิษฐ์

รายงาน

การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาล
ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มิถุนายน 2538

I114954204 1-6 ม.ค. 2542

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณต่อคณะอนุกรรมการสิ่งประดิษฐ์ประเภทโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความสนับสนุนทางด้านให้คำแนะนำ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายมา ณ ที่นี้ด้วย

งานวิจัยในโครงการนี้นอกจากผู้วิจัยแล้ว ยังมีผู้ช่วยวิจัยหลายท่านที่ช่วยงานนี้ได้แก่งานตรวจสอบความถูกต้อง ของ solutions รวมทั้งตรวจสอบ analysis methods เขียนโปรแกรมย่อย และ compiled รวมเป็น package program ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยหลายท่านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงเป็นรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ ทั้งนี้โดยเฉพาะ อาจารย์จักรพันธ์ แซ่ลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และอาจารย์ไพบูลย์ ศรีภาคกร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ช่วยตรวจสอบ solutions และทีมงานของอดีตนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ได้แก่ นายชาญณรงค์ ทองแจ่ม นายเลิศชาย ภคชมา นายธนพงศ์ อติพันธ์ นายวิจารณ์ พันธุมวนิช นายภาณุ ศรีวัลลภ และ นายบดินทร์ จิตต์รำพึง และทีมงานของอดีต นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา ได้แก่ นายธีรพงษ์ พัฒน์พงศา และนายกิตติพัฒน์ เปล่งขำ ช่วยในการ ทำการวิเคราะห์ทั้งทฤษฎีและเขียนโปรแกรม

อนึ่งสำหรับงานพิมพ์ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณนฤมล อารมณีสวะ คุณจันทร์เพ็ญ ลักษณะ และคุณทัศนีย์ แก้วเจริญ ที่เห็นดีเห็นชอบในการพิมพ์งานวิจัยที่ต้องพิมพ์สัญลักษณ์ถึงสมการที่ยุ่งยาก ตลอดจนมีความอดทนต่อการแก้ไขหลายครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน
 ชื่อผู้ดำเนินงาน รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาล
 เดือนและปีที่ทำการวิจัย มิถุนายน 2538



บทคัดย่อ

การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิด และอุโมงค์ใต้ดิน สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานเปิดหน้าดิน/หิน งานระเบิดเหมืองหิน และการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน เกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโครงการที่อยู่ในขั้นวางแผน ก่อนดำเนินการโดยใช้ ค่าปัจจัยของความปลอดภัย (factor of safety) และกำหนดให้จุดที่สมดุลเชิงสถิตยศาสตร์ มีค่าปัจจัยของความปลอดภัยเท่ากับ หนึ่ง

การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิด และอุโมงค์ใต้ดินแบ่งงานการวิเคราะห์ออกเป็นหลายชนิด หลายวิธีการและหลายรูปแบบ ได้แก่ การพังทลายแนวระนาบ การพังทลายรูปวงกลม(สลิป) การพังทลายรูปลิ้ม การพังทลายแบบทอปเปิล สำหรับส่วนของงานวิเคราะห์นี้ ผู้วิจัยได้อ้างอิงมาจากการแก้ปัญหาของนักวิจัยเด่นๆ หลายท่าน และได้เขียนโปรแกรมการวิเคราะห์เป็นภาษา C และใช้ Turbo C ของบริษัท Borland เป็น compiler จุดเด่นของโปรแกรม คือผู้ใช้สามารถที่จะป้อนข้อมูลเข้า เป็นค่าตัวแปรซึ่งเป็นคุณสมบัติของมวลสารที่เป็นดิน/หิน เข้าไปในเมนูของโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณแสดงผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าปัจจัยของความปลอดภัย และมีบางส่วนจะแสดงผลเป็นภาพกราฟฟิกบนจอ นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ผลลัพธ์ และภาพกราฟฟิกจาก laser printer หรือ dot matrix printer ได้อีกด้วย ทำให้กระบวนการประเมินผลเสถียรภาพของเหมืองเปิด และอุโมงค์ใต้ดินง่ายและสะดวก รวดเร็ว ซึ่งจะกระตุ้นให้ผู้ทำงานในภาคสนามหรือวิศวกรมีแนวทางในการตัดสินใจได้ถูกต้อง แม่นยำ และปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัย

Project Title Stability Evaluation Programs for Open Pits and Tunnels

Name of the Investigator Associate Professor Dr. Sanga Tangchawal

Month and Year June 1995

ABSTRACT

Stability evaluation programs for open pits and tunnels can be applied to excavation works of soils and rocks, rock blasting, and underground tunnelling excavation. A criterion of stability evaluation for planning of construction project is based on factor of safety (F). It is set that the static equilibrium has the factor of safety equals to one ($F=1$)

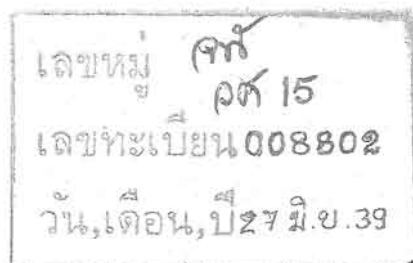
The stability evaluation for open pits and tunnels can be divided their analysis parts into many kinds, methods, and many forms; such as, the evaluation methods of plane failure, circular (slip) failure, wedge failure, and toppling failure. The analysis parts for stability evaluation are based on solutions of many distinguished researchers. In order to apply the analysis results, the programs have been written in C language and using the Turbo C of Borland company as the compiler. Distinction points of these programs are users can key the input data (in which they are variables from material properties) into the menu. The programs will calculate and indicate results and in some parts they will show graphic pictures on screen to ensure that the evaluation process is quick, convenient, and fast. This will give encouragement to field workers or engineers having their precise, accurate, and safe decision.

สารบัญ

	หน้า
ปก	I
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
สารบัญ	V
รายการตารางประกอบ	VIII
รายการรูปประกอบ	IX
รายการสัญลักษณ์และสัญลักษณ์	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับ PLANE FAILURE	4
2.1 สภาวะทั่วไปในการเกิดการพังทลายแบบเป็นแนวระนาบ	4
2.2 การวิเคราะห์การพังทลายแนวระนาบ	5
2.3 อิทธิพลของน้ำใต้ดินต่อเสถียรภาพ	13
2.4 ความถี่วิกฤตของรอยแตกแยก	15
2.5 รอยแตกแยกที่เป็นตัวบ่งความไม่มีเสถียรภาพ	18
2.6 อิทธิพลของการตัดด้านล่างของพื้นลาดเอียง	19
2.7 การเสริมเสถียรภาพของพื้นลาดเอียง	20

2.8	การวิเคราะห์การพังทลายบนผิวขรุขระ	21
2.9	แนวทางใหม่ของอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ลาดเอียง	24
บทที่ 3	วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายเป็นรูปวงกลม	28
3.1	พื้นผิวของรูปอาร์กวงกลม	28
3.2	การวิเคราะห์ของ Taylor	29
3.3	Non - Homogeneous Soil, Method of Slices	36
3.4	วิธีการของ Bishop and Morgenstern	43
3.5	ประโยชน์ของวิธี Bishop และ Morgenstern	45
3.6	โปรแกรมการวิเคราะห์ตามวิธีของ Bishop	50
3.7	โปรแกรมการวิเคราะห์ตามวิธีของ Janbu	52
3.8	โปรแกรมการวิเคราะห์วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Non-Linear Failure	54
บทที่ 4	วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายเป็นรูปโค้ง	59
4.1	การวิเคราะห์มวลดินที่พังทลายเป็นรูปโค้งด้วยวิธี Sarma	59
4.2	การวิเคราะห์มวลหินรูปโค้งที่พังทลายบนพื้นผิวด้วยวิธี Hoek and Bray	70
4.3	การวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินรูปโค้งที่พังทลายภายใต้ พื้นผิวดินด้วยวิธีของ Hoek and Brown	101
บทที่ 5	การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายแบบทอปเปิล	113
5.1	ประเภทของการพังทลายแบบทอปเปิล	113
5.2	การวิเคราะห์แบบ Limit Equilibrium ของการพังทลายแบบทอปเปิล	118
5.3	กระบวนการคำนวณของ Limit Equilibrium for Toppling	123
5.4	ค่าปัจจัยความปลอดภัยสำหรับการวิเคราะห์ Limit Equilibrium	128

บทที่ 6	ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	129
6.1	ตัวอย่างการวิเคราะห์ของ Plane failure	131
6.2	ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Bishop	144
6.3	ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Janbu	150
6.4	ตัวอย่างการวิเคราะห์สำหรับ Non-linear Criterion Material	153
6.5	ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Sarma	155
6.6	ตัวอย่างการวิเคราะห์ Surface Wedge Failure ตามวิธี Hoek and Bray	188
6.7	ตัวอย่างการวิเคราะห์ Underground Wedge Failure ตามวิธี Hoek and Brown	203
6.8	ตัวอย่างการวิเคราะห์ Toppling Failure ตามวิธี Goodman and Bray	207
บทที่ 7	บทสรุปและ FLOW CHARTS	216
7.1	เมนูของโปรแกรม STABILEXE	216
7.2	ข้อแนะนำในการอ่าน CHARTS FLOW	216
7.3	โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายเป็นแนวระนาบ	217
7.4	โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายเป็นวงกลม	225
7.5	โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายเป็นรูปปลี	226
7.6	โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายเป็นรูปทอปเปิด	237
7.7	ข้อสรุปของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ	240
บรรณานุกรม		241



รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1 ช่วงค่า R และ S ในการวิเคราะห์เรื่องการพังทลายแนวระนาบ	10
ตารางที่ 2 ช่วงค่าของ F ในการวิเคราะห์เรื่องการพังทลายแนวระนาบ	13
ตารางที่ 3 ค่าประมาณของวัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักแบบ non-linear	56
ตารางที่ 4 แรงต่างๆและทิศทางที่กระทำบนมวลสารที่เป็นหินรูปสี่เหลี่ยม	78
ตารางที่ 5 การคำนวณค่าแรงต่างๆที่กระทำบน block ต่างๆตามตัวอย่างและรูปที่ 50	126

รายการรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของสภาวะที่เกิดการเลื่อนไหลของการพังทลายแนวระนาบ	5
รูปที่ 2 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของพื้นที่ลาดเอียงที่มี tension crack อยู่ในพื้นผิวด้านบนของพื้นที่ลาดเอียง	7
รูปที่ 3 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของพื้นที่ลาดเอียงที่มี tension crack ที่อยู่ในผิวน้ำของพื้นที่ลาดเอียง	8
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง normal stress กระทำบน failure plane กับ slope face	8
รูปที่ 5 ค่าของอัตราส่วน P และ S สำหรับลักษณะเรขาคณิตต่างๆของ slope	11
รูปที่ 6 ค่าอัตราส่วน Q สำหรับ slope ที่มีลักษณะเรขาคณิตหลายรูปแบบ	12
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ F และ z_w/z ที่ได้จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 1	13
รูปที่ 8 อิทธิพลของความลึกของ tension crack และความลึกของน้ำใน tension crack ต่อ factor of safety ของ slope	16
รูปที่ 9 ค่า critical tension crack depth สำหรับพื้นที่ลาดเอียงแห้ง	17
รูปที่ 10 ตำแหน่งของ critical tension location สำหรับพื้นที่ลาดเอียงแห้ง	18
รูปที่ 11 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ under-cut ต่อพื้นที่ลาดเอียง	20
รูปที่ 12 ลักษณะของการเสริมเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียง	21

	หน้า
รูปที่ 13 การไหลของน้ำบาดาลแบบ unconfined flow บนระนาบราบ	25
รูปที่ 14 การไหลของน้ำบาดาลแบบ unconfined flow ที่มีระดับน้ำบาดาลตัดกับพื้นผิวของพื้นลาดเอียง	25
รูปที่ 15 การวิเคราะห์ห้เรื่อง circular arc failure หรือ rotational failure	29
รูปที่ 16 การวิเคราะห์เสถียรภาพของ free slope สำหรับ homogeneous soil โดยวิธีของ Taylor หรือ Friction Circle Stability Analysis	31
รูปที่ 17 การวิเคราะห์เสถียรภาพของ slope สำหรับ homogeneous soil ที่มีค่า $\phi \leq 0$	33
รูปที่ 18 Taylor's stability charts 2 แบบ	36
รูปที่ 19 วิธีการแก้ปัญหาโดย Method of Slices	39, 40
รูปที่ 20 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่าโดยที่ค่า $r_u = 0$	46
รูปที่ 21 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่าโดยที่ค่า $r_u = 0.25$	47
รูปที่ 22 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่าโดยที่ค่า $r_u = 0.5$	48
รูปที่ 23 แสดงภาพของ parameters ต่างๆของ slip circle failure	49
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety, F และอัตราส่วนของ pore pressure, r_u	49

	หน้า
รูปที่ 25 วิธีแก้ปัญหาโดย Bishop's method of slices	51
รูปที่ 26 Janbu's modified method of slices	53
รูปที่ 27 การหาเสถียรภาพของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ non-linear	58
รูปที่ 28 แสดงรูปเชิงเรขาคณิตและแรงที่กระทำบน slice ของ i^{th}	60
รูปที่ 29 แสดงผลของแรงดันน้ำทั้ง 4 กรณี	63
รูปที่ 30 ค่า factor of safety ที่แปรผันกับค่าความเร่งสำหรับ slope ทั่วไป	64
รูปที่ 31 การพลอตค่าส่วนกลับของ factor of safety ที่แปรผันกับค่าความเร่ง	65
รูปที่ 32 รูปแบบเรขาคณิตของการพังทลายแบบรูปลิ้ม	72
รูปที่ 33 การมองแบบ pictorial view ของรูปลิ้มที่แสดงระนาบและเส้นตัดต่างๆ	73
รูปที่ 34 การมองในแนวที่ตั้งฉาก line of intersection หมายเลข 5 (ของรูปที่ 33) แสดงความสูงของลิ้มและ water pressure distribution	73
รูปที่ 35 ไคอะแกรมที่แสดงโดยใช้ความยาวของเส้นต่างๆที่ประกอบกันเป็นรูป wedge, tension crack และ slope face	74
รูปที่ 36 ภาพสเก็ชของความดันน้ำที่กระทำต่อระนาบของ tension crack	76
รูปที่ 37 ไคอะแกรมของแรงที่กระทำต่อมวลสารรูปลิ้มในรูปนี้เน้นเฉพาะแรงดันน้ำและแรงยกตัว	77

	หน้า
รูปที่ 38 รูปแบบเรขาคณิตของการพังทลายรูปลิ้มที่ใช้กับ Comprehensive Solution	80
รูปที่ 39 ไดอะแกรมที่แสดงภาพระนาบที่แปรปรายต่างๆและเวกเตอร์ของแรงต่างๆที่เกี่ยวข้อง	81
รูปที่ 40 แนวทิศทางที่เหมาะสมที่สุด (optimum direction) เมื่อทำการเสริมเสถียรภาพด้วย tensioned cable	101
รูปที่ 41 ลักษณะรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบรูปลิ้มใต้พื้นผิวดิน	102
รูปที่ 42 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลหินรูปลิ้มใต้พื้นผิวดินและแรงที่มากระทำ	104
รูปที่ 43 ลักษณะของ flexural toppling ที่เกิดขึ้นใน hard rock slope ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น steeply dipping discontinuities	113
รูปที่ 44 แสดงผลการ slide ระหว่าง layers ใน toppling columns	114
รูปที่ 45 Block toppling ที่เกิดขึ้นในมวลหินแบบ hard rock	115
รูปที่ 46 Block flexure toppling ที่มีลักษณะเป็น column ขาวและมี cross joints จำนวนมาก	115
รูปที่ 47 กลไกของการเกิด secondary toppling	116,117,118
รูปที่ 48 แบบจำลองสำหรับ limit equilibrium analysis ของ toppling ในลักษณะเป็นแบบ stepped base	119
รูปที่ 49 สภาวะ limit equilibrium สำหรับการเกิด toppling และ sliding ของ block ที่ n	120,121

	หน้า
รูปที่ 50 การวิเคราะห์ limit equilibrium ของ toppling	127
รูปที่ 51 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ spoil pile with water	156
รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	157
รูปที่ 53 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ spoil pile with water อีกรูปแบบหนึ่ง	160
รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	161
รูปที่ 55 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ partially submerged rockfill slope บนฐานที่เป็น sand	165
รูปที่ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	166
รูปที่ 57 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ slope สำหรับ open pit mine	170
รูปที่ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	171
รูปที่ 59 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ total submerged slope	175
รูปที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	176
รูปที่ 61 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ slope สำหรับ open pit mine อีกรูปแบบหนึ่ง	180
รูปที่ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	181
รูปที่ 63 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ partially submerged slope ที่มีระดับน้ำบาดาลเป็นแบบ hyperbola	185

	หน้า
รูปที่ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety กับค่า acceleration	186
รูปที่ 65 เมนูของทางเลือกโปรแกรม Stabil.Exe	216
รูปที่ 66 โครงสร้างหลักของโปรแกรม Plane	218
รูปที่ 67 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย เมื่อพื้นลาดเอียงแห้ง	219
รูปที่ 68 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย ในกรณีของ tension crack อย่างเดียว	219
รูปที่ 69 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยทั้งของ slope surface และของ tension crack	220
รูปที่ 70 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของพื้นลาดเอียงที่อิ่มตัวด้วยน้ำ	220
รูปที่ 71 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยสำหรับกรณีพื้นลาดเอียง วิกฤตและต้องเสริมเสถียรภาพ	221
รูปที่ 72 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อพื้นลาดเอียงแห้ง	222
รูปที่ 73 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยในกรณีของ tension crack อย่างเดียว	222
รูปที่ 74 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยทั้งของ slope surface และของ tension crack	223
รูปที่ 75 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของพื้นลาดเอียงที่อิ่มตัวด้วยน้ำ	223

	หน้า
รูปที่ 76 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยสำหรับกรณีในพื้นที่ลาดเอียงวิกฤตและต้องเสริมเสถียรภาพ	224
รูปที่ 77 โครงสร้างหลักของโปรแกรม Circu	225
รูปที่ 78 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Bishop	227
รูปที่ 79 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Janbu	228
รูปที่ 80 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Non-Linear	229
รูปที่ 81 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Sarma	230
รูปที่ 82 โครงสร้างหลักของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน	231
รูปที่ 83 รายละเอียดของการป้อนข้อมูลเข้า สำหรับการวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน	232
รูปที่ 84 รายละเอียดของการป้อนข้อมูลเข้า สำหรับการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน (ต่อ)	233
รูปที่ 85 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบสถานะของมวลสารรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน	234
รูปที่ 86 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบสถานะของมวลสารรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน (ต่อ)	235

	หน้า
รูปที่ 87 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบ สถานะของมวลสารรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวคติน (ต่อ)	236
รูปที่ 88 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปสี่เหลี่ยมใต้พื้นผิวคติน	238
รูปที่ 89 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปทอปเปิล	239



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์และสัญกรณ์

เนื่องจากรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ มีความหลากหลายในการวิเคราะห์ การพังทลายของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน เพื่อเป็นการสะดวกในการหาคำนิยามสั้นๆ ของ สัญลักษณ์ (symbol) และสัญกรณ์ (notation) จะเรียงลำดับอักษรตามเสียงที่ออกเป็นภาษาอังกฤษ เช่น α ที่ออกเสียง เป็น alpha ก็จะมาก่อน ψ ที่ออกเสียง psi เป็นต้น อนึ่งคำบรรยายความหมายของสัญลักษณ์และสัญกรณ์ก็คงไว้เป็นภาษาอังกฤษตลอดจนถ้าเป็นเรื่องเฉพาะ ให้หัวข้อการพังทลายชนิดนั้นก็แสดงไว้ในวงเล็บอีกด้วย

1, 2, 3	=	discontinuities in the rock mass
4	=	free face (roof or sidewall)
A	=	area of face of surface wedge
A_1, A_2, A_3	=	areas of underground faces
\vec{a}	=	unit normal vector for plane 1 (wedge)
α	=	dip direction of plane (element, wedge) with horizontal, or trend of force, or horizontal angle of toppling blocks, also angle between radius lines of friction angle
α_i	=	angle with horizontal for Sarma's slice
B_i	=	one corner of three or four-sided element for i^{th} element
b	=	constant of toppling blocks, also distance between slope crest and tension crack
b_i	=	horizontal distance relationship for Sarma's i^{th} slice

- \vec{b} = unit normal vector for plane 2 (wedge)
- β = overall inclination angle of blocks, also angle of underground wedge section
- C = resultant cohesive force in Taylor's analysis
- c = cohesive strength of material, or of each failure plane
- c_d = drained cohesive strength
- c_i = cohesive strength of i^{th} plane
- c_u = undrained cohesive strength
- c' = effective cohesive strength
- c'_i = instantaneous cohesion
- θ = slope angle of toppling blocks, or angle of external load with failure plane, also an angle with horizontal for Sarma's i^{th} slice
- D = depth factor in Taylor's analysis, also a variable in wedge calculation
- d = depth of correction slice
- d_i = vertical distance relationship for Sarma's i^{th} slice
- \vec{d} = unit normal vector for plane 3 (wedge)
- DH = depth to base of critical circle

- δ = angle with horizontal for toppling blocks (also cable bolt)
- δ_i = angle with vertical for Sarma's i^{th} slice
- E = external load, also side force component
- η = -1, if slope is overhanging, and
 = +1, if slope does not overhang
- F = factor of safety for total strength, also for against sliding along the line of intersection, or on plane 1, or on plane 2
- F_1 = factor of safety for plane 1 when contact is maintained on plane 1 only
- F_2 = factor of safety for plane 2 when contact is maintained on plane 2 only
- F_3 = factor of safety for plane 3 when contact is maintained on both planes 1 and 2
- F_c = minimum (critical) factor of safety
- F_H = factor of safety with respect to slope height
- F_i = factor of safety with respect to slope
- F_ϕ = factor of safety with respect to friction angle
- f_o = approximate correction factor
- \vec{f} = unit normal vector for plane 4
- \vec{f}_5 = unit normal vector for plane 5

- G = square of magnitude of vector \vec{g}
- G_5 = square of magnitude of vector \vec{g}_5
- G_i = center of Sarma's i^{th} slice
- \vec{g} = vector in direction of intersection line of plane 1 and plane 4
- \vec{g}_5 = vector in direction of intersection line of plane 1 and plane 5
- γ = unit weight of material
- γ_R = rock unit weight
- γ_r = unit weight of material forming Sarma's slice
- γ_w = unit weight of water
- H = slope height, element height
- H_1 = slope height referred to plane 1 (wedge)
- H_f = actual height of failure slope
- H_i = horizontal force on Sarma's i^{th} slice
- H_R = depth of element of rock
- h = average height of slice, or overburden depth
- h_w = average height of submerged slice
- i = angle with horizontal for an infinite slope element

- \vec{i} = vector in direction of intersection line of plane 1 and plane 2
 \vec{j} = vector in direction of intersection line of plane 3 and plane 4
 \vec{j}_5 = vector in direction of intersection line of plane 3 and plane 5
 K = constant in Janbu's correction factor, acceleration value in Sarma's analysis
 K_c = critical horizontal acceleration
 K_n = distance between normal reaction and contact point for n^{th} block
 \vec{k} = vector in plane 2 normal to \vec{i}
 L = distance of tension crack from crest, measured along the trace of plane 1, length of correction slice (plane failure)
 L_n = distance between preventing slide force and contact point for n^{th} block
 l = length of circular arc failure element
 \vec{T} = vector in plane 1 normal to \vec{i}
 λ = one of given angle in circular failure
 $\lambda_{c\phi}$ = parameter involving cohesion and friction angle (Cousins' analysis)
 M_C = capacity moment (circular failure)
 M_D = demand moment (circular failure)

- M_n = distance between induced sliding force and contact point for n^{th} block
- m = empirical constant for material properties, also stability coefficient
- N = normal reaction force (on plane or contact)
- N_1 = effective normal reaction to plane 1 where contact is maintained on both planes 1 and 2
- N_2 = effective normal reaction to plane 2 where contact is maintained on both planes 1 and 2
- N_a = total normal force on plane 1 when contact is maintained on plane 1 only
- N_b = total normal force on plane 2 when contact is maintained on plane 2 only
- N_{ae} = effective normal reaction on plane A
- N_{be} = effective normal reaction on plane B
- N_F = stability number in Cousins' analysis
- N' = effective normal reaction force (wedge failure)
- N'_1 = value of N_1 when $T = 0$ (similar to S')

N_2' = value of N_2 when $T = 0$

N_1'' = value of N_1 when $E = 0$ (similar to S'')

N_2'' = value of N_2 when $E = 0$

n = stability coefficient

nH = distance from slope toe to the toe or tip of the slip

O = center of circle for friction angle analysis

P = dimensionless ratio for plane failure, also one of water forces on Sarma's slice

p_a, p_b = pore pressure at points a, b

ϕ = internal angle of friction of each failure plane (contact surface)

ϕ_d = drained friction angle

ϕ_f = failure friction angle

ϕ_i = friction angle of i^{th} slice

ϕ_u = undrained friction angle

ϕ' = effective friction angle

ϕ_i' = instantaneous friction angle

- Ψ = dip of plane, or plunge of force
- Ψ_f = dip angle of slope face
- Ψ_o = inclined angle of under-cutting of the slope toe
- Ψ_p = dip angle of failure plane
- Q = dimensionless ratio for plane failure, also the total shear resistance on planes 1 and 2 where contact is maintained on both planes 1 and 2
- Q_a = shear resistance on plane 1 where contact is maintained on plane 1 only
- Q_b = shear resistance on plane 2 where contact is maintained on plane 2 only
- R = resisting shear force on plane failure, dimensionless ratio for plane failure, radius of circular arc failure, lateral force, magnitude of vector \vec{i}
- R_F = resultant frictional force in Taylor's analysis
- R_n = normal reaction of n^{th} block (toppling)
- r_u = pore pressure ratio
- S = dimensionless ratio for plane failure, also total shear stress reaction planes 1 and 2 where contact is maintained on both planes 1 and 2
- S_a = shear force on plane 1 where contact is maintained on plane 1 only

- S_b = shear force on plane 2 where contact is maintained on plane 2 only
- S_n = shear reaction of n^{th} block (toppling)
- s = empirical constant material properties
- σ = normal compressive stress
- σ_c = uniaxial compressive strength of intact rock
- σ' = effective normal stress
- T = external force applied by cable anchors or rockbolts, or a constant for Mohr envelope, also lateral force
- T_i = one corner of three or four-sided element for i^{th} element
- T_t = cable force to prevent toppling
- T_s = cable force to prevent sliding
- τ = shear stress
- U = water (uplift) force, or pore thrust
- U_1 = independent pore water thrust in Taylor's analysis
- U_A = uplift force (due to water) on plane A
- U_B = uplift force (due to water) on plane B

- U_i = water (uplift) force Sarma's i^{th} slice
 u = average water pressure on face of wedge, pore pressure of material
 V = water thrust force in tension crack on each crack face
 W = self weight of material (slice, wedge, mass)
 W_i = weight of Sarma's i^{th} slice
 ΔW = segment weight
 $\Delta W'$ = effective segment weight
 X = dimensionless form in plane failure, or one of horizontal distance of cartesian coordinates, also side force component
 x = given horizontal distance
 x_1 = distance of moment arm
 Y = dimensionless form in plane failure, or one of horizontal distance of cartesian coordinates
 y = given vertical distance
 Z = dimensionless form in plane failure, or one of cartesian coordinates
 Z_a, Z_b = height of water distribution at points a, b
 Z_i = height of submerged phreatic surface for Sarma's i^{th} slice
 z = height of phreatic surface in tension crack
 z_w = height of water pressure distribution in tension crack

บทที่ 1

บทนำ



การวิเคราะห์เสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน ได้มีการพัฒนา
มานานหลายสิบปี เพื่อนำมาวิเคราะห์สำหรับงานขุดเจาะ ระเบิด และเปิดหน้าเหมือง ซึ่ง
เกี่ยวข้องกับทั้งของงานโครงการวิศวกรรมเหมืองแร่และวิศวกรรมโยธา

1.1 แนวทางเบื้องต้น

ตามข้อตกลงทั่วไปจะใช้ค่า ปัจจัยของความปลอดภัย (factor of safety) เป็น
เกณฑ์ในการกำหนดจุดสมดุลเชิงสถิตยศาสตร์ ค่านิยามของค่าปัจจัยของความปลอดภัย
คือ อัตราส่วนที่เกิดจากแรงต้านทานทั้งหมดต่อการเลื่อนไถลบนมวลของ open pit or
slope (tunnel) แรงทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการไหลเลื่อนบนมวลของ open pit or slope
(tunnel) ภาวะสมดุลของแรงต้านทานทั้งหมดกับแรงที่ก่อให้เกิดการไหลเลื่อน จะมีค่าเท่า
กัน นั่นคือ Factor of Safety, $F = 1$ (หนึ่ง)

วิธีการวิจัยการประเมินเสถียรภาพ (stability) ของ slopes และ tunnels
มีหลายรูปแบบ ผู้วิจัยได้จำแนกงานวิเคราะห์ออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

- งานวิเคราะห์ในเรื่องของ การพังทลายเป็นแนวระนาบ หรือที่เรียกว่า
plane failure
- งานวิเคราะห์ในเรื่องของ การพังทลายเป็นรูปวงกลม หรือที่เรียกว่า
circular failure
- งานวิเคราะห์ในเรื่องของ การพังทลายเป็นรูปลิ้ม หรือที่เรียกว่า
wedge failure
- งานวิเคราะห์ในเรื่องของ การพังทลายแบบทอปเปิล หรือที่เรียกว่า
toppling failure

1.2 จุดประสงค์และแนวทางในการนำโปรแกรมไปใช้งาน

โปรแกรมงานวิเคราะห์การพังทลายในรูปแบบต่างๆ นี้ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง
ดินและหิน โดยสามารถใช้ได้กับมวลสารที่เป็น homogeneous และ non-homogeneous
material

การวิเคราะห์ในเรื่องเสถียรภาพที่มีจุดมุ่งหมายและการประยุกต์ใช้งานได้ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ในเรื่อง การพังทลายเป็นแนวระนาบ หรือที่เรียกว่า plane failure งานวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ [ใช้ชื่อย่อของโปรแกรมว่า Plane] เป็นจุดตั้งต้นของการหาจุดสมดุลของการพังทลาย โดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโยธา และงานวิศวกรรมเหมืองแร่ ที่มีการพังทลายในแนวระนาบ วัสดุที่วิเคราะห์จะเป็นชั้นดินหรือชั้นหินก็ได้ที่มีโซนเปราะบางต่อการพังทลาย (weak zone) เช่น joint, bedding plane เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการก่อให้เกิด failure

2. การวิเคราะห์ในเรื่อง การพังทลายที่เป็นรูปวงกลม หรือที่เรียกว่า circular failure หรือ slip failure งานการวิเคราะห์มักใช้กับงานวิศวกรรมโยธาเป็นส่วนใหญ่ โดยมีแนวโน้มที่ซ้ำมากกับงานเปิดหน้าดินของงานก่อสร้างทั่วไป รวมทั้งงานตัดถนนสร้างคันเขื่อนและคันอ่างเก็บน้ำ ปรับปรุงสนามบิน เป็นต้น

เนื่องจากงานวิเคราะห์ในเรื่องนี้สามารถวิเคราะห์ทั้งสำหรับมวลสารที่เป็นดินหรือหิน (ที่มีแร่ดินเหนียวปนอยู่สูงมาก) และใช้ได้ทั้ง homogeneous และ non-homogeneous material การวิจัยในเรื่องนี้ได้หลายรูปแบบจึงต้องแยกออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

ก) งานวิเคราะห์หา slope stability ของ Fellenius และ Taylor โดยใช้ friction angle analysis

ข) งานวิเคราะห์หา slope stability ของ Bishop, Morgenstern และ Janbu โดยใช้ method of slices ประยุกต์ใช้ทั้งมวลสารที่มีพฤติกรรมแบบ linear และ non-linear failure criterion

ค) งานวิเคราะห์หา slope stability ของ Sarma ประยุกต์ใช้ในเรื่อง plane, circular และ wedge failure ของดิน

โปรแกรมที่ใช้สำหรับงานประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิดหรือของ slope แบบ circular failure ได้เขียนตาม solutions ของสมมุติฐานที่ได้จากต้นแบบของนักวิจัยเด่นๆ หลายคน และสามารถจะแยกหัวเรื่องได้ดังนี้

- Bishop's failure analysis [ใช้ชื่อของโปรแกรมว่า Bishop method]
- Janbu's failure analysis [ใช้ชื่อของโปรแกรมว่า Janbu method]
- Non-linear failure criterion [ใช้ชื่อของโปรแกรมว่า Non-linear method]

3. การวิเคราะห์ในเรื่อง การพังทลายที่เป็นรูปสามเหลี่ยม หรือที่เรียกว่า wedge failure ประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมการพังทลายของดิน (งานวิศวกรรมโยธา) และการพังทลายของหิน (งานวิศวกรรมเหมืองแร่) แบ่งออกเป็น

- wedge failure ของมวลดิน ใช้โปรแกรมคำนวณที่เขียนตาม solution ของ Sarma [ใช้ชื่อของโปรแกรมว่า Sarma]
- surface wedge failure ของมวลหิน ใช้โปรแกรมคำนวณที่เขียนตาม solution ของ Hoek and Bray [โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า Wedge failure]
- underground wedge failure ใช้โปรแกรมคำนวณที่เขียนตาม solution ของ Hoek and Brown [โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า Underground wedge failure]

4. การวิเคราะห์ในเรื่อง การพังทลายแบบทอปเปิล หรือที่เรียกว่า topping failure ประยุกต์ใช้กับงานวิเคราะห์การพังทลายของหินแบบ bending และ sliding เรื่องนี้เขียนขึ้นมาตาม solution ของ Goodman and Bray [ใช้ชื่อย่อของโปรแกรมว่า Toppl]

บทที่ 2

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายแนวระนาบ

งานการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาของแนวทางการวิเคราะห์สำหรับมวลดิน/หิน ที่มีโซนเปราะบางและมีการพังทลายตามแนวระนาบในการแก้ปัญหาการไหลเลื่อนของมวลสารบนระนาบเดี่ยว มักจะพิจารณาให้มวลสารเป็น slice of unit thickness ที่มีมุมตั้งฉากกับ slope face

2.1 สภาวะทั่วไปในการเกิดการพังทลายแบบเป็นแนวระนาบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของพื้นลาดเอียง (slope) วิธีการแบบง่ายที่สุดก็คือ การกำหนดให้มีการเลื่อนไถล (sliding) ในลักษณะของระนาบการพังทลาย (plane failure)

การเกิดสภาวะเชิงเรขาคณิตที่ทำให้เกิดการไหลเลื่อนบนระนาบเดี่ยว (ดูรูปที่ 1) มีองค์ประกอบดังนี้

ก) ระนาบที่จะเกิดการเลื่อนไถลจะต้องมี strike ขนานหรือเกือบจะขนานกับ slope face (ประมาณ $\pm 20^\circ$)

ข) ระนาบการพังทลายที่จะเกิดการเลื่อนไถลต้องมีมุม dip น้อยกว่ามุม dip ของ slope face นั่นคือ $\psi_f > \psi_p$

ค) มุม dip ของระนาบการพังทลายจะต้องมากกว่ามุมเสียดทาน (friction angle) นั่นคือ $\psi_p > \phi$

ง) พื้นผิวที่หลุดออก (release surfaces) ในบริเวณนี้จะไม่เกิดการต้าน (resistance) เมื่อเกิดการ slide และเป็นส่วนที่แสดงขอบเขตของการเลื่อนไถล ในแนวด้านข้าง ในอีกกรณีหนึ่งการพังทลายสามารถเกิดบนระนาบการพังทลายผ่าน convex ของพื้นลาดเอียง (slope)

ในการวิเคราะห์ปัญหาของ two-dimensional slope มักจะพิจารณาเป็น slice of unit thickness ที่มีมุมตั้งฉากกับ slope surface ดังนั้นพื้นที่ของ sliding surface สามารถหาจากความยาวของ surface ที่เห็นบนระนาบของการตัด vertical section ผ่าน slope และ volume ของ sliding block สามารถแสดงได้โดยพื้นที่ของรูปที่แทนบล็อกนี้บน vertical section

2.2 การวิเคราะห์การพังทลายแนวระนาบ

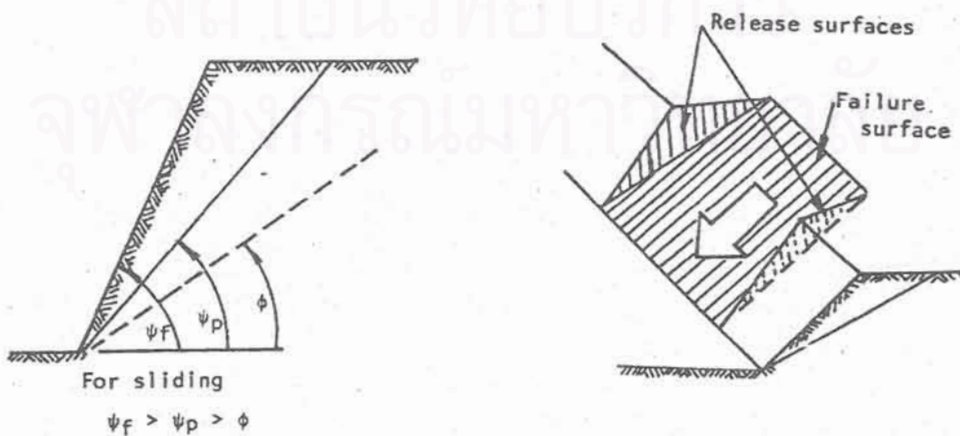
ลักษณะเชิงเรขาคณิตของพื้นลาดเอียงที่ใช้พิจารณาประกอบการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2 มีกรณีสำคัญที่พิจารณาสองกรณี ดังนี้

- ก) พื้นลาดเอียงมี tension crack ในส่วนบน (upper surface)
- ข) พื้นลาดเอียงมี tension crack ที่ผิวหน้า (slope face)

$$\frac{z}{H} = (1 - \cot \psi_f \tan \psi_p) \quad (1)$$

สมมุติฐานประกอบการวิเคราะห์ มีข้อควรคำนึง ดังต่อไปนี้

- ก) sliding surface และ tension crack surface จะต้อง strike ทั้งคู่ขนานกับ slope surface
- ข) เกิด tension crack ในแนวตั้ง และมีน้ำแทรกอยู่ในรอยแตกที่ระดับลึก
- ค) น้ำที่ไหลผ่านเข้าไปใน sliding surface ที่อยู่ตาม base ของ tension crack และจะไหลซึมออกสู่บรรยากาศบริเวณที่ sliding surface ตัดกับ slope face ทำให้เกิด pressure distributions ที่เกิดขึ้นจากน้ำใน tension crack และตามแนว sliding surface ได้อธิบายไว้ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของสภาวะที่เกิดการไหลเลื่อนของการพังทลายแนวระนาบ

- ง) แรงแน้ำหนัก W (น้ำหนักของ sliding block) และแรงยกตัว U [uplift force ที่เกิดจาก water pressure บน sliding surface] และแรงดัน V [แรงเนื่องจาก water pressure ใน tension crack] แรงที่กระทำทั้งหมดผ่าน centroid ของมวลสารที่ไหลเลื่อน (sliding mass) ในอีกแง่หนึ่งเป็นการสมมุติว่า บล็อกไม่เกิดการหมุน (rotation) ข้อสมมุตินี้อาจผิดพลาดได้บ้างในกรณีของพื้นลาดเอียงจริงๆ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีน้อยมากสามารถละเลยไม่ต้องนำมาคำนวณ อย่างไรก็ตามในพื้นลาดเอียงที่ลาดชันสูงที่มี dip ของความไม่ต่อเนื่องในหิน (joint, bedding plane) อาจมีผลทำให้เกิด toppling failure ได้
- จ) ตามปกติค่า shear strength ของ sliding surface จะถูกกำหนดด้วยแรง cohesion, c และ friction angle, ϕ ตามความสัมพันธ์ดังสมการ $\tau = c + \sigma \tan \phi$ ในกรณีของพื้นผิวขรุขระ (rough surface) จะได้ curvilinear shear strength ตามกฎของ Mohr-Colomb แรง cohesion และ friction angle จะถูกกำหนดโดย tangent ของ curve ที่มาสัมผัสกับ tangent นี้จะสัมผัสได้ค่า normal stress [ที่แสดงถึง normal stress ที่กระทำบน failure plane] ในกรณีนี้ การวิเคราะห์จะประยุกต์ได้เฉพาะ slope height ที่จะใช้หาระดับของ normal stress (ดูรูปที่ 4)
- ข) เมื่อพิจารณา slice ของ unit thickness และสมมุติว่ามี release surfaces เกิดขึ้น ดังนั้นจึงสมมุติว่าไม่มีความต้านทานต่อการเกิดการไหลเลื่อนที่แนว lateral boundaries ของ failure

ค่าของปัจจัยของความปลอดภัย (factor of safety) ของกรณีการพังทลาย
แนวระนาบ คือ

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (2)$$

เมื่อ c = cohesion A = พื้นที่อยู่ฐานของ block

จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$A = (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (4)$$

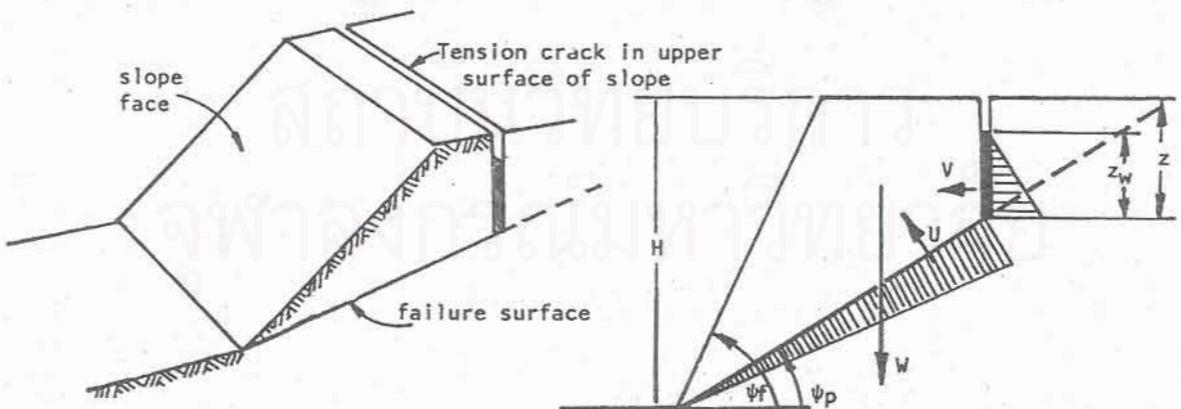
$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad (5)$$

สำหรับ tension crack ที่ upper slope surface (รูปที่ 2)

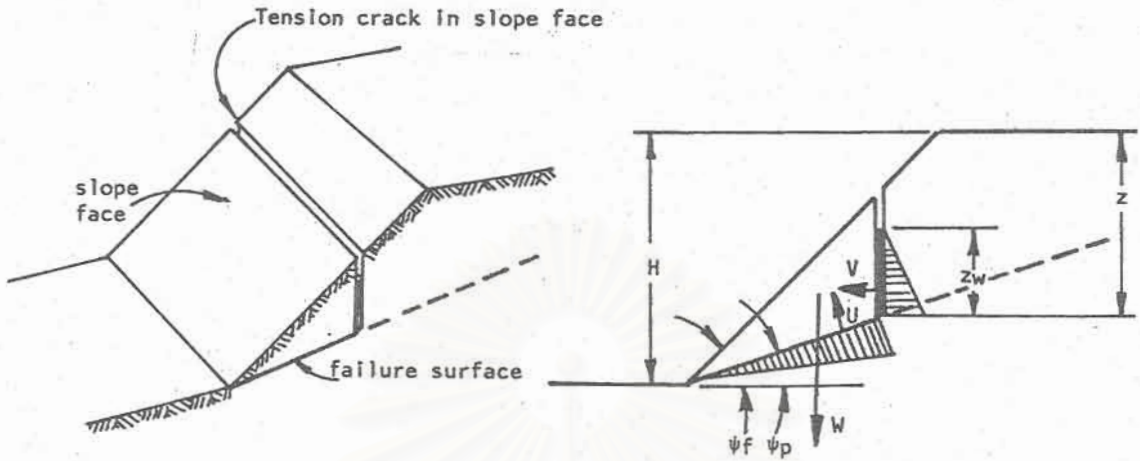
$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \cot \psi_p - \cot \psi_f \right] \quad (6)$$

สำหรับ tension crack ที่อยู่ใน slope face (รูปที่ 3)

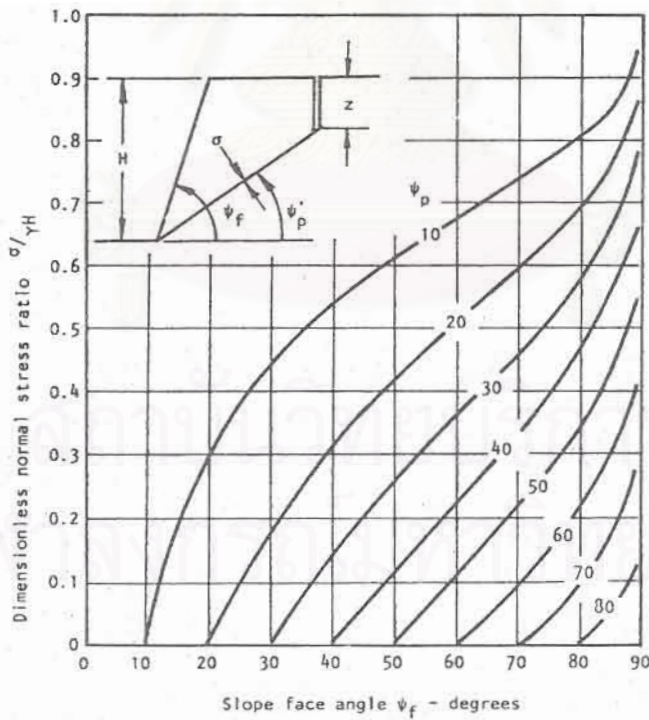
$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \right] \quad (7)$$



รูปที่ 2 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของพื้นลาดเอียงที่มี tension crack อยู่ในพื้นผิวด้านบนของพื้นลาดเอียง



รูปที่ 3 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ slope ที่มี tension crack ที่อยู่ใน slope face



$$\frac{\sigma}{\gamma H} = \frac{((1 - (z/H)^2) \cot \psi_p - \cot \psi_f) \sin \psi_p}{2(1 - z/H)}$$

where $z_c/H = 1 - \sqrt{\cot \psi_f \cdot \tan \psi_p}$

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง normal stress กระทำบน failure plane กับ slope face

เมื่อทราบลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นลาดเอียง (slope) และระดับความลึกของน้ำในรอยแตกของ tension crack จะทำให้การคำนวณหาค่า factor of safety ทำได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม บางครั้งอิทธิพลของ different shear strengths, ระดับความลึกของน้ำและรูปร่าง เช่น ลักษณะเชิงเรขาคณิตแปรเปลี่ยน ก็ต้องนำมาเปรียบเทียบกับ เพื่อที่จะทำให้การคำนวณง่ายขึ้น สมการที่ 2 สามารถจัดรูปใหม่ในลักษณะของ dimensionless form ได้ดังนี้

$$F = \frac{\left(\frac{2c}{\gamma H}\right)P + \{Q \cot \psi_p - R(P + S)\} \tan \phi}{Q + RS \cot \psi_p} \quad (8)$$

$$\text{เมื่อให้ } P = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (9)$$

$$Q = \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2\right) \cot \psi_p - \cot \psi_f \right] \sin \psi_p \quad (10)$$

เมื่อมี tension crack อยู่ใน slope face

$$Q = \left[\left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \cos \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \right] \quad (11)$$

$$R = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H} \quad (12)$$

$$S = \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H} \sin \psi_p \quad (13)$$

อัตราส่วน P, Q, R และ S ทั้งหมดเป็น dimensionless ซึ่งหมายความว่า P, Q, R และ S ขึ้นอยู่กับลักษณะเชิงเรขาคณิต แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของ slope ดังนั้น ถ้า cohesion, $c = 0$ ค่า factor of safety จะไม่พึ่งพิงกับขนาดของ slope ค่า dimensionless เหล่านี้ จะเป็น

ประโยชน์ ในงาน rock engineering และเป็นแนวทางการศึกษา wedge failure และ circular failure ในกรณีที่จะใช้ประโยชน์จากการประยุกต์สมการนี้ในการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการค่าของอัตราส่วน P, Q และ S สำหรับช่วงหนึ่งของ slope geometries ได้แสดงไว้เป็นกราฟ ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 สังเกตตำแหน่งของ tension crack อยู่ในกราฟสำหรับ ratio Q ดังนั้น ค่าของ Q สามารถใช้คำนวณได้สำหรับ slope รูปทรงใดๆ โดยไม่ต้องตรวจสอบตำแหน่งของ tension crack ต้องวัดจากส่วนบนสุดของ slope ดังได้อธิบายไว้ใน รูปที่ 3

ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้ความสูงของ slope 100 ฟุต และมี face angle, $\psi_f = 60^\circ$ มุม dip ของ bedding plane, $\psi_p = 30^\circ$ พบรอยแตกของ tension crack เกิดขึ้นที่ระยะ 29 ฟุต ด้านหลังยอด (crest) ของ slope ความลึกของ tension crack วัดได้ 50 ฟุต กำหนดให้ unit weight ของหิน, $\gamma = 160 \text{ lb/ft}^3$ และ unit weight ของน้ำ $\gamma_w = 62.5 \text{ lb/ft}^3$ สมมติว่า cohesive strength ของ bedding plane, $c = 1,000 \text{ lb/ft}^3$ และ friction angle, $\phi = 30^\circ$ จงหาค่าความลึกของน้ำ (z_w) ที่มีผลต่อ factor of safety ของ slope

ค่า P และ Q หาจาก รูปที่ 5 และ 6 เมื่อ $z/H = 0.5$

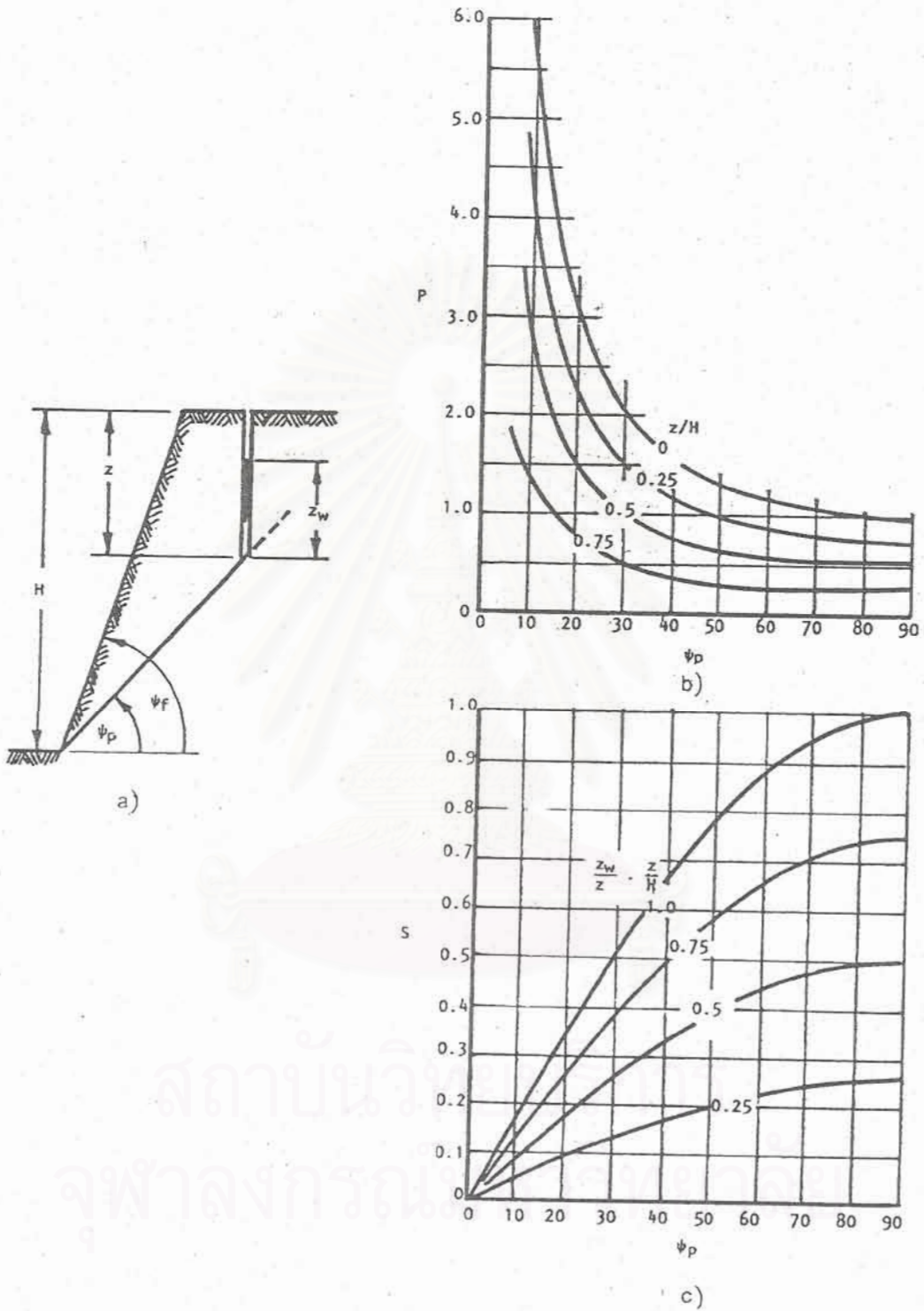
$$P = 1.0 \text{ และ } Q = 0.36$$

ค่าของ R (จากสมการที่ 12) และ S (หาจากรูปที่ 5) สำหรับ a range of values ของ z_w/z คือ

ตารางที่ 1 ช่วงค่า R และ S ในการวิเคราะห์เรื่อง plane failure (ตัวอย่างที่ 1)

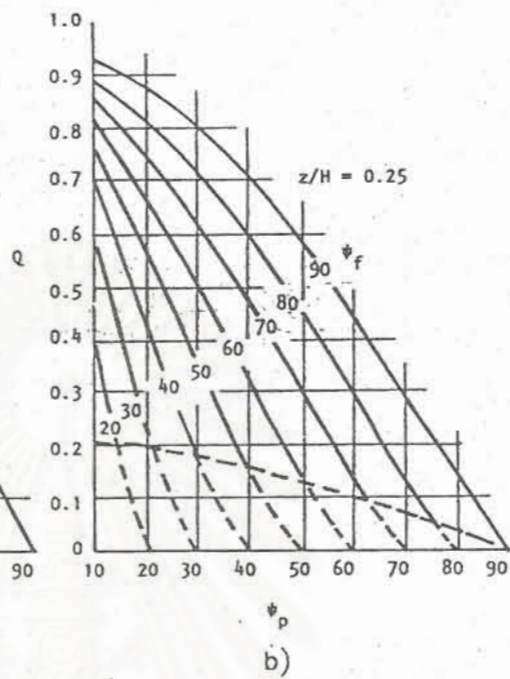
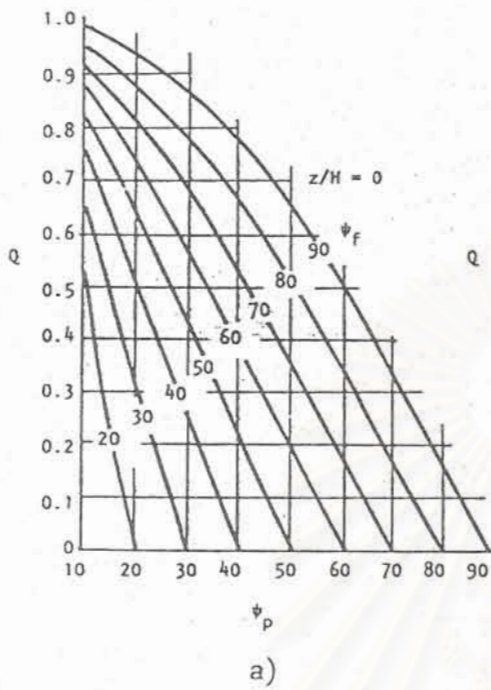
z_w/z	1.0	0.5	0
R	0.195	0.098	0
S	0.26	0.13	0

$$\text{ค่าของ } 2c/\gamma H = 0.125$$

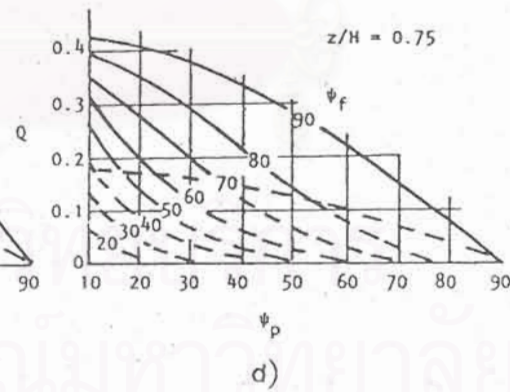
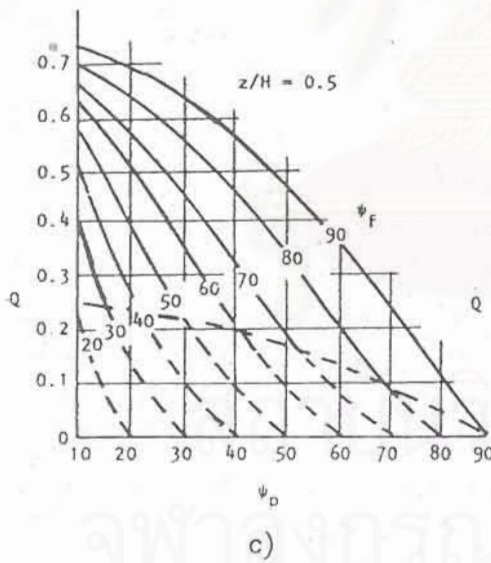


รูปที่ 5 ค่าของอัตราส่วน P และ S สำหรับลักษณะเรขาคณิตต่างๆ ของ slope

- a) รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ slope ที่มี tension บนพื้นผิวด้านบน (upper surface)
- b) ค่าอัตราส่วน P สำหรับ slope ที่มีลักษณะเรขาคณิตหลายรูปแบบ
- c) ค่าอัตราส่วน S สำหรับ slope ที่มีลักษณะเรขาคณิตหลายรูปแบบ



Note:
Dashed lines refer to tension crack
in slope face.



รูปที่ 6 ค่าของอัตราส่วน Q สำหรับ slope ที่มีลักษณะเรขาคณิตหลายรูปแบบ

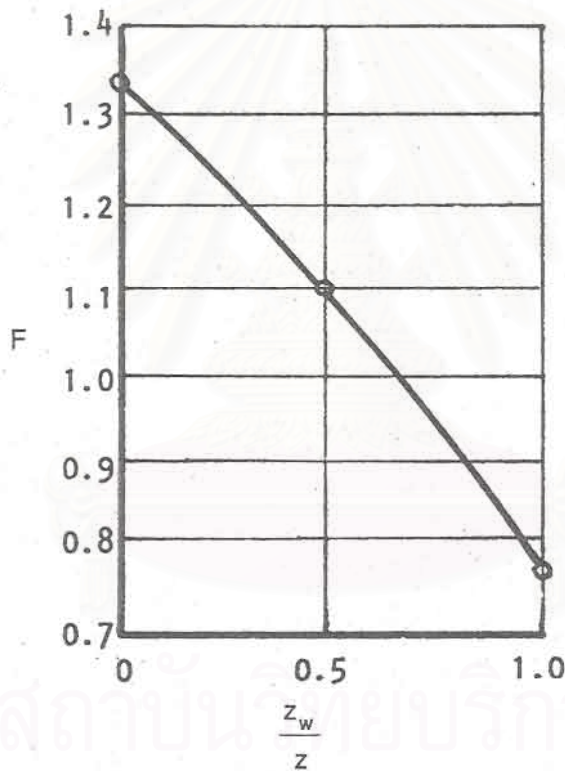
- a) อัตราส่วนของ $z/H = 0.0$
- b) อัตราส่วนของ $z/H = 0.25$
- c) อัตราส่วนของ $z/H = 0.50$
- d) อัตราส่วนของ $z/H = 0.75$

หมายเหตุ เส้นประแสดงถึงการเกิด tension crack ใน slope face

ดังนั้น factor of safety ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันไป tension crack จากสมการที่ 8 เปลี่ยนแปลงดังนี้

ตารางที่ 2 ช่วงค่าของ F ในการวิเคราะห์เรื่อง plane failure (ตัวอย่างที่ 1)

z_w / z	1.0	0.5	0
F	0.77	1.1	1.34



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ F และ z_w / z ที่ได้จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 1

2.3 อิทธิพลของน้ำใต้ดินต่อเสถียรภาพ

จากหัวข้อเดิมที่กล่าวมาแล้ว กำหนดให้น้ำมีอยู่ในเฉพาะ tension crack และตามพื้นผิวของระนาบของการพังทลาย ซึ่งความดันน้ำนี้มีผลต่อเสถียรภาพของพื้นลาดเอียงหมายความว่าน้ำไม่สามารถซึมซาบผ่านเนื้อดินหินได้ (impermeable) ซึ่งข้อสมมุติฐานนี้อาจไม่ถูกต้องเสมอ

ความรู้ในปัจจุบัน ยังไม่สามารถรู้ถึงรูปแบบการไหลที่แน่นอนของน้ำใต้ดินในมวลสาร (ดิน/หิน) ได้ ดังนั้นการหาค่าปัจจัยของความปลอดภัยและการประเมิน sensitivity ของพื้นที่ลาดเอียง ที่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะของน้ำใต้ดินจะใช้ในลักษณะที่เป็นช่วงค่าที่เป็นไปได้ (possible) หลายกรณี ดังต่อไปนี้

ก) พื้นที่ลาดเอียงแห้ง

กรณีที่ง่ายที่สุดจะสมมุติให้พื้นที่ลาดเอียงเป็นแบบ completely drained เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาในทางปฏิบัติหมายถึงไม่มีความดันน้ำใน tension crack หรือตาม sliding surface อย่างไรก็ตามอาจจะมีความชื้นในพื้นที่ลาดเอียงบ้าง ซึ่งไม่มีผลที่จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพ

ภายใต้สภาวะเหล่านี้ แรง V and U จะเป็นศูนย์ทั้งคู่ และสมการที่ 2 ในรูปแบบใหม่เป็น

$$F = \frac{cA}{W \sin \psi_p} + \cot \psi_p \tan \phi \quad (14)$$

ทำนองเดียวกัน สมการที่ 8 จะได้รูปแบบใหม่เป็น

$$F = \frac{2c}{\gamma H} \cdot \frac{P}{Q} + \cot \psi_p \tan \phi \quad (15)$$

ข) น้ำที่ขังในรอยแตก

เมื่อสมมุติว่าชั้นหินมีคุณสมบัติที่น้ำไม่ซาบซึมผ่าน tension surface เนื่องจากมีดินเหนียว (clay) อุดตัน ดังนั้นแรงยกตัว (uplift force, U) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ จะได้สมการใหม่เป็น

$$F = \frac{cA + \{W \cos \psi_p - V \sin \psi_p\} \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (16)$$

หรือ ได้ความสัมพันธ์อีกแบบเป็น

$$F = \frac{\left(\frac{2c}{\gamma H P}\right) + (Q \cot \psi_p - RS) \tan \phi}{Q + RS \cot \psi_p} \quad (17)$$

ค) น้ำในรอยแตกและบนพื้นผิวสันไถล

ปกติ pressure distribution ตามแนว sliding surface จะสมมุติให้ลดลงแบบ linear จากส่วนล่างสุด (ฐาน) tension crack ไปยังส่วนที่ติดกันของ failure surface กับ slope face

อย่างไรก็ตาม การสมมุติเช่นนี้ค่อนข้างจะเป็นลักษณะ ที่เรียกว่า excessive conservative slope ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่พบบ่อย

ง) พื้นลาดเอียงที่อึดตัวด้วยน้ำ

ในกรณีนี้จะเกิดเมื่อมีฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานานมีผลทำให้ groundwater flow pattern คล้ายคลึงกับที่เกิดใน porous system ทำให้เกิด flow nets ของ saturated slope ซึ่งจะเกิดได้กรณีมีฝนตกเป็นระยะเวลานาน และ water pressure distributions ที่ใช้คำนวณ factor of safety จะได้จาก flow nets ซึ่งค่า factor of safety สามารถประมาณได้จากสมการที่ 2 (หรือสมการที่ 8) โดยสมมุติให้ในรอยแตกของ tension crack มีน้ำอยู่เต็ม

2.4 ความลึกวิกฤตของรอยแตกแยก

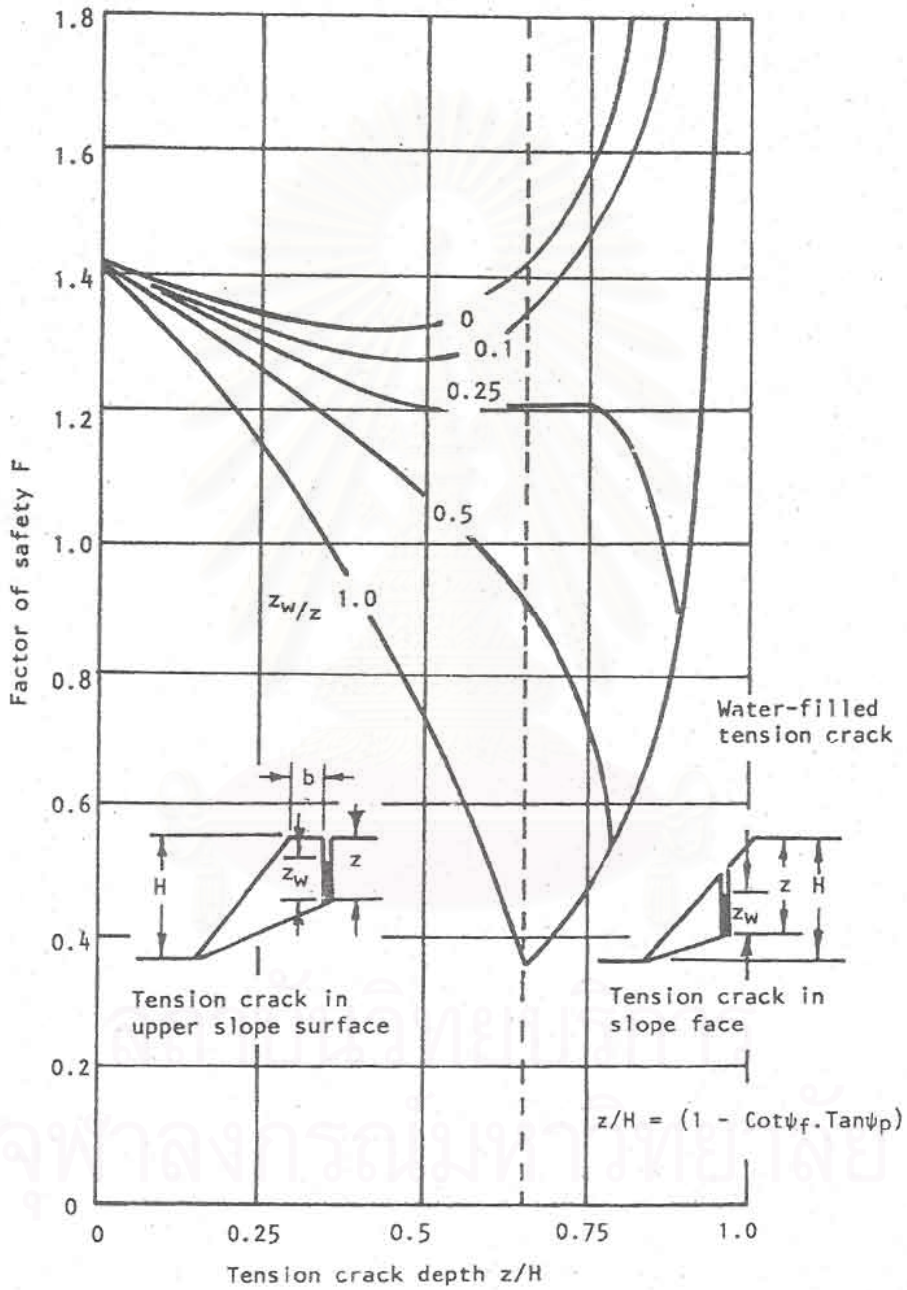
ในการวิเคราะห์ที่ได้แสดงผ่านมาแล้ว จะสมมุติว่าตำแหน่งของ tension crack สามารถจะสังเกตเห็นได้ในภาคสนามจาก upper surface หรือบน face of slope และความลึกสามารถหาได้จากภาพตัดขวางของ slope จะเห็นได้ว่าความลึกของ tension crack และความลึกของน้ำใน tension crack ขึ้นกับ factor of safety ของ slope แต่ละประเภทดังได้อธิบายในรูปที่ 8 (ตามตัวอย่างที่ 1)

ค่าของ critical tension crack depth สำหรับพื้นลาดเอียงแห่งนี้สามารถจะได้จากการ minimize พจน์ด้านขวาของสมการ 14 ที่เทียบกับค่า z/H หรืออาจหาได้จากสมการ

$$\frac{z_c}{\gamma H} = 1 - \sqrt{\cot \psi_f \tan \psi_p} \quad (18)$$

จากลักษณะเรขาคณิตของพื้นลาดเอียง ตำแหน่งของ tension crack จะหาได้จากสมการ

$$\frac{b_c}{H} = \sqrt{\cot \psi_f \cot \psi_p} - \cot \psi_f \quad (19)$$

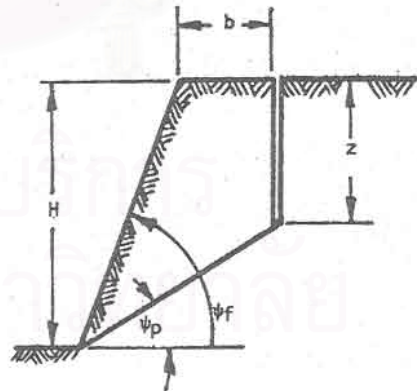
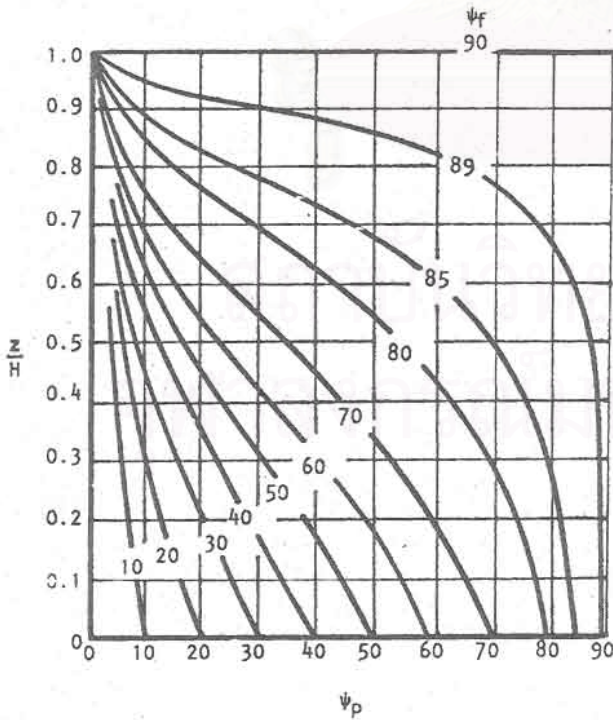


รูปที่ 8 อิทธิพลของความลึกของ tension crack และความลึกของน้ำ
ใน tension crack ต่อ factor of safety ของ slope
(รูปแบบเชิงเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุเป็นไปตามตัวอย่างที่ 1)

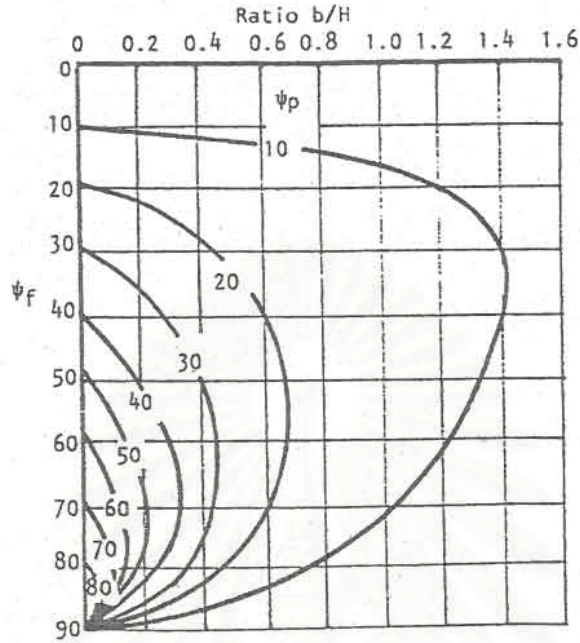
ค่าของ critical tension crack depth และตำแหน่งที่เกิด critical tension crack ของ dry slope ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 และรูปที่ 10

รูปที่ 8 แสดงถึงเมื่อระดับน้ำ z ที่เกินประมาณ $1/4$ ของ tension crack depth ค่า factor of safety ของ slope จะยังไม่ถึงค่าต่ำสุดจนกว่าจะมีน้ำอยู่ใน tension crack ในกรณีนี้ ค่า minimum factor of safety จะใช้ตำแหน่งที่ tension crest ของ slope ($b = 0$)

สิ่งที่สำคัญที่สุดเมื่อพิจารณาผลของน้ำใน tension crack จะพิจารณาถึงอิทธิพลของน้ำที่มีอยู่ใน tension crack จากการสังเกต tension crack มักเกิดในส่วนหลัง crest ของ slope และจากรูปที่ 8 สรุปได้ว่า tension crack จะเกิดขึ้นใน dry หรือ nearly dry slope ถ้า tension crack มีน้ำลงไป เนื่องจากพายุฝน อิทธิพลของความดันน้ำ (water pressure) จะเข้ามาเกี่ยวข้องกับความลึก (depth) และตำแหน่ง (location) ของ tension crack โดยไม่พึงพิงกับสภาวะของน้ำใต้ดิน



รูปที่ 9 ค่า critical tension crack depth สำหรับพื้นลาดเอียงแห้ง



รูปที่ 10 ตำแหน่งของ critical tension location สำหรับพื้นลาดเอียงแห้ง

ค่าความลึกและตำแหน่งของ tension crack หาได้จากสมการที่ 18 และ 19 ถ้า tension crack เกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนัก หรือตำแหน่งที่เกิดอยู่บริเวณโครงสร้างของหินที่มีรอยแตก รอยแยกมาก่อน เช่น vertical joint สมการที่ 18 และ 19 จะไม่สามารถใช้ได้กับกรณีนี้ (มีรอยแตกอยู่ก่อนแล้ว) สิ่งที่น่าระวังคือ เมื่อไม่รู้ตำแหน่งของ tension crack และความลึกของน้ำจะต้องสมมุติให้ tension crack ต้องเกิดบริเวณ slope crest และมีน้ำอยู่ด้วย

2.5 รอยแตกแยกที่เป็นตัวบ่งความไม่มีเสถียรภาพ

ในการสังเกตภาคสนามจะเห็น tension crack ใน upper surface ของ slope และ cracks บางแห่งจะปรากฏให้เห็นนานเป็นสิบ ๆ ปี แต่ในหลายกรณีน่าจะวิเคราะห์ว่า cracks ที่เกิดมีผลต่อเสถียรภาพของ slope หรือไม่

การวิจัยในรายละเอียดของแบบจำลองที่ศึกษา failure ของ slope ใน jointed rock นั้น Barton (1971) พบว่า tension crack เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ small shear movement ใน rock mass ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ (movement) จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ผลโดยรวมจะมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) ของ slope surfaces และมีผลเพียงพอที่ก่อให้เกิดการแยกตัวของ vertical joint หลัง slope crest และก่อให้เกิด tension crack ดังนั้นเมื่อเห็น tension crack อันแรกเกิดขึ้นใน surface ของ slope จะต้องสมมุติว่า shear failure เริ่มเกิดขึ้นใน rock mass ความรุนแรงของ failure ที่เกิดขึ้นไม่สามารถประมาณได้ เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นซับซ้อนมาก ในบางกรณีที่มีการระบายน้ำออกจากโครงสร้างของดิน/หิน ลักษณะของ interlocking ของ individual blocks ในเนื้อหินก็อาจมีผลทำให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพของ slope ได้

2.6 อิทธิพลของการตัดด้านล่างของพื้นลาดเอียง

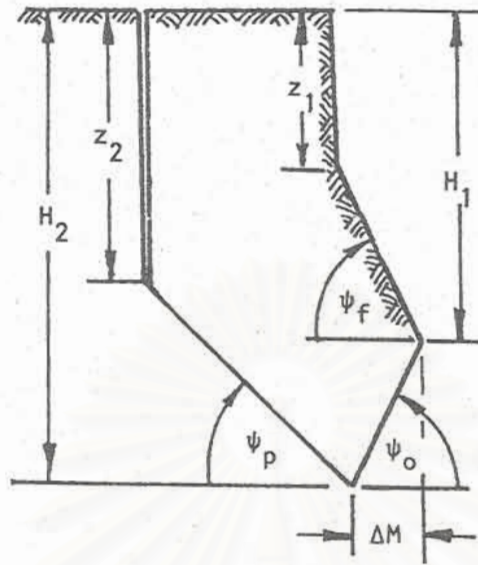
บริเวณ toe ของ slope จะถูก under-cut เนื่องจากการทำเปิดหน้าดินหรือการทำเหมืองเปิด หรือจากการกัดกร่อนตามธรรมชาติดังรูปที่ 11 สมมุติให้มุม slope face ของ failure อันก่อนเป็น ψ_1 และมีค่า vertical tension crack ที่มีความลึก z_1 ผลจาก under-cut ในส่วน ΔM (ดูรูปที่ 11) มีมุมเอียงกับแนวราบทำมุม ψ_0 มุมเอียงของ plane failure อันใหม่ทำมุมเท่ากับ ψ_p และมี tension crack ที่ระดับลึก z_2

ค่าของ factor of safety ของ slope นี้ได้จากสมการที่ 2 ในรูปของ weight term มีค่าดังนี้

$$W = \frac{1}{2} \gamma \left[(H_2^2 - z_2^2) \cot \psi_p - (H_1^2 - z_1^2) \cot \psi_1 + (H_1 - H_2) \Delta M \right] \quad (20)$$

สังเกตว่า เมื่อ $\psi_0 > 0$

$$\Delta M = (H_2 - H_1) \cot \psi_0 \quad (21)$$



รูปที่ 11 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ under-cut ต่อพื้นลาดเอียง

ค่าของ critical tension crack depth สำหรับ dry under-cut slope หาได้จาก

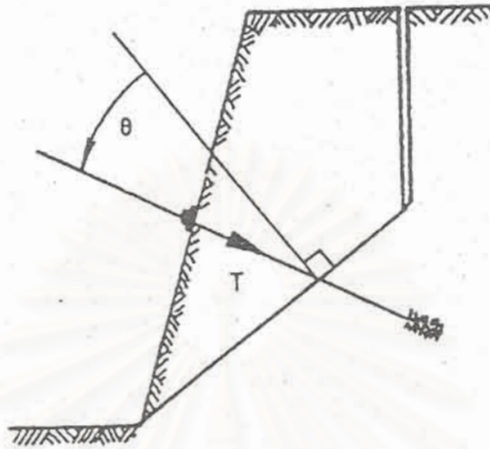
$$z_2 = \frac{c \cos \phi}{\gamma \cos \psi_p \sin (\psi_p - \phi)} \quad (22)$$

มุมเอียงของ critical failure plane จะมีค่าเป็น

$$\psi_p = \frac{1}{2} \left[\phi + \arctan \frac{H_2^2 - z_2^2}{(H_1^2 - z_1^2) \cot \psi_f + (H_1 - H_2) \Delta M} \right] \quad (23)$$

2.7 การเสริมเสถียรภาพของพื้นลาดเอียง

เมื่อ slope ที่กำลังทำการวิเคราะห์มีความไม่เสถียรภาพ (instability) เกิดขึ้น ดังนั้นควรแก้ไขโดยการ drainage หรือจากการประยุกต์ใช้โหลดภายนอก (external loads) ตัวอย่างของผล external loads ได้แก่การติดตั้ง rock bolts หรือ cables ยึดติดกับมวลหิน (rock mass) หรือบนพื้นผิวของ failure surface หรือ โดยการสร้างสิ่งก่อสร้างที่เสริมเสถียรภาพเช่น berm บริเวณ toe ของ slope



รูปที่ 12 ลักษณะของการเสริมเสถียรภาพของพื้นลาดเอียง

ค่าของ factor of safety เมื่อมี external load ขนาด T กระทำกับ slope ทำมุมเอียงเป็นมุม θ กับ failure plane (ดังแสดงในรูปที่ 12) มีค่าเป็น

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p + T \cos \theta) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p - T \sin \theta} \quad (24)$$

2.8 การวิเคราะห์การพังทลายบนผิวนูนขรุขระ

เมื่อทำการพิจารณา slope geometry ดังได้อธิบายในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อ normal stress ซึ่งกระทำบน failure surface สามารถหาจากสมการที่ 3 ถึง 7

$$\sigma' = \frac{W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p}{A} \quad (25)$$

และอาจหาได้จากสมการที่ 9 ถึง 13

$$\sigma' = \frac{\gamma H}{2P} [Q \cot \psi_p - R(P+S)] \quad (26)$$

จากการได้ค่า effective normal stress, σ' และ shear strength, τ ของ failure surface จึงทำการคำนวณค่า factor of safety ของ slope หาได้จากการทำ modification ของสมการที่ 2 และ สมการที่ 8 ดังนี้

$$F = \frac{\tau A}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (27)$$

หรือ

$$F = \frac{2P\tau}{\gamma H (Q + RS \cot \psi_p)} \quad (28)$$

ตัวอย่างที่ 2

จากการพิจารณา slope ที่มี $H = 100$ ฟุต, $z = 50$ ฟุต, $\psi_f = 60^\circ$ และ $\psi_p = 30^\circ$ ค่าของ unit weight ของหิน, $\gamma = 160 \text{ lb/ft}^3$ และ unit weight ของน้ำ, $\gamma_w = 62.5 \text{ lb/ft}^3$ มีกรณีที่ต้องพิจารณา 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 $z_w = 0$ (drained slope)

กรณีที่ 2 $z_w = z$ นั่นคือ มีน้ำเข้าไปแทรกใน tension crack

แทนค่าที่โจทย์กำหนดให้ลงในสมการที่ 3 ถึง 6 และสมการที่ 9, 10, 12 และ สมการที่ 13 ได้ค่าดังนี้

กรณีที่ 1

$$A = 100 \text{ ft}^2/\text{ft}, \quad U = 0, \quad V = 0, \quad W = 577,350 \text{ lb/ft}, \\ P = 1.00, \quad Q = 0.36, \quad R = 0 \text{ และ } S = 0$$

กรณีที่ 2

$$A = 100 \text{ ft}^2/\text{ft}, \quad U = 156,250 \text{ lb/ft}, \quad V = 78,125 \text{ lb/ft}, \\ W = 577,350 \text{ lb/ft}, \quad P = 1.00, \quad Q = 0.36, \quad R = 0.195 \text{ และ } S = 0.25$$

แทนค่าข้างบนลงในสมการที่ 25 และ 26 ได้ค่า effective normal stress, σ' บน failure plane ของ

$$\text{กรณีที่ 1} = 5,000 \text{ lb/ft}^2$$

$$\text{กรณีที่ 2} = 3,049 \text{ lb/ft}^2$$

สมมติให้ shear strength ของ surface คำนวณจาก Barton's equation มีค่า

$$\tau_{rj} = \sigma' \tan \left[\phi + \text{JRC} \cdot \log_{10} \frac{\sigma_j}{\sigma'} \right] \quad (29)$$

โดยที่

$$\tau_{rj} = \text{shear strength of rough joint material}$$

$$\sigma' = \text{effective normal stress on joint surface}$$

$$\phi = \text{Internal friction angle}$$

$$\text{JRC} = \text{Joint Roughness Coefficient}$$

มีค่าเท่ากับ 20 สำหรับ tension joints
มีค่าเท่ากับ 10 สำหรับ non-planar bedding
และมีค่าเท่ากับ 5 สำหรับ planar bedding

$$\sigma_j = \text{joint compressive strength}$$

เมื่อ $\phi = 30^\circ$, $\text{JRC} = 10$ และ $\sigma_j = 720,000 \text{ lb/ft}^2$ จะได้ค่า $\tau_{rj} = 6,305 \text{ lb/ft}^2$ ในกรณีที่ 1 และค่า $\tau_{rj} = 4,155 \text{ lb/ft}^2$ ในกรณีที่ 2 แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ 27 หรือ 28 ได้

$$\text{กรณีที่ 1} = F = 2.18$$

$$\text{กรณีที่ 2} = F = 1.17$$

2.9 แนวทางใหม่ของอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ลาดเอียง

การไหลของน้ำบาดาลใต้พื้นผิว (groundwater flow) ในมวลสาร(ดิน/หิน) ที่เป็น slope ที่อยู่ในสภาวะ unconfined state มีลักษณะ 2 มิติของการไหลเป็นแบบ hyperbola (Harr, 1962) ดังนั้นการจำลองแบบของน้ำที่ขังอยู่ใน slope face โดยสมมุติให้เป็นแนวเส้นตรง และหาค่าแรงดันน้ำจากไดอะแกรมรูปสามเหลี่ยมของ water pressure distribution ดังที่ได้ใช้ในหัวข้อ 2.2 เรื่องการวิเคราะห์การพังทลายแนวระนาบจึงนับว่ายังไม่ถูกต้องนัก

ผู้วิจัยได้หาแนวทางที่จะประยุกต์ใช้ระดับน้ำบาดาลในมวลสารของ slope ที่เป็นรูป hyperbola แล้วหาค่า factor of safety ออกมาเปรียบเทียบกับแนวทางของการใช้ไดอะแกรมรูปสามเหลี่ยม (ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2 หน้า 7 กับรูปที่ 3 หน้า 8) ปรากฏว่าโปรแกรมการคำนวณค่าปัจจัยของความปลอดภัย ที่ใช้ระดับน้ำบาดาล (groundwater table) ได้ค่าของการประเมินเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียงใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า จึงได้ใช้รูปแบบเชิงเรขาคณิตกับสมการการคำนวณในโปรแกรมการวิเคราะห์ของการพังทลายแนวระนาบ โดยขออธิบายแนวทางใหม่ที่เกี่ยวกับอิทธิพลของน้ำบาดาล ดังต่อไปนี้

2.9.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของพื้นที่ลาดเอียงจมน้ำบางส่วน

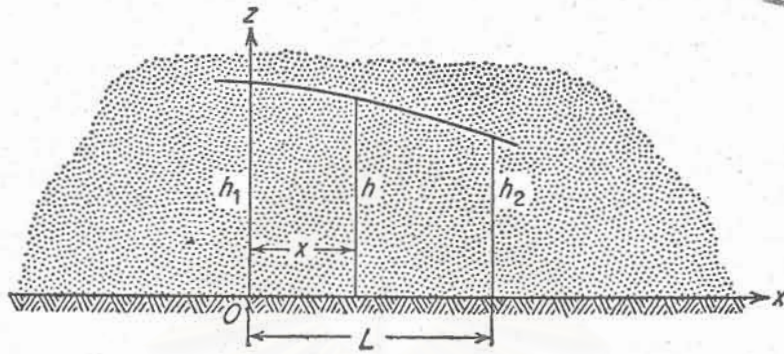
1. การไหลของบนระนาบราบ

ถ้าหากกำหนดให้ลักษณะการไหลแบบ 2 มิติ ของน้ำบาดาลบนระนาบที่วางตัวอยู่ในแนวราบ จากไดอะแกรมในรูปที่ 13 เมื่อกำหนดให้ระนาบ xz เป็นระนาบของการไหล ระยะ h_1 และระยะ h_2 แทนค่าของระดับความสูงของน้ำบาดาลที่ไหลในสภาวะไม่มีการปิดกั้น (unconfined) เมื่อต้องการหาระยะ h (ซึ่งเป็นตัวแปรไม่รู้ค่า) ตรงจุดใดๆ จะหาความสัมพันธ์ได้เป็น

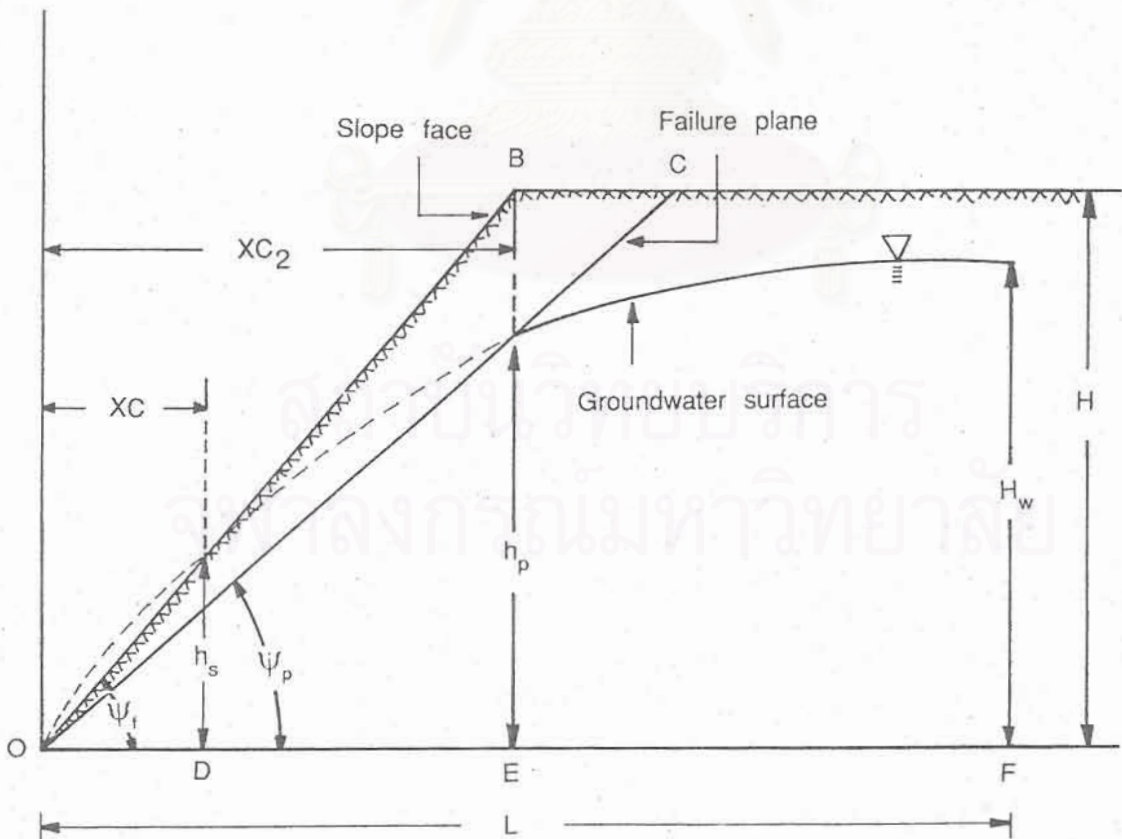
$$h = \sqrt{h_1^2 - (h_1^2 - h_2^2) \frac{x}{L}} \quad (30)$$

2. การไหลของน้ำบาดาลใน slope

ถ้าหากกำหนดให้ระดับน้ำบาดาลที่ระยะ (จุด) ดำสุดเริ่มต้นที่ 0 และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นรูป hyperbola curve ในพื้นที่ลาดเอียงดังแสดงรูปแบบเรขาคณิตไว้ในรูปที่ 14



รูปที่ 13 การไหลของน้ำบาดาลแบบ unconfined flow บนระนาบราบ



รูปที่ 14 การไหลของน้ำบาดาลแบบ unconfined flow
ที่มีระดับน้ำบาดาลตัดกับ slope face

สภาวะที่เกิดขึ้นของ partially submerged slope ในภาคสนามที่มักพบ บ่อยมาก คือ มวลของดิน/หิน มักจะไม่แห้งสนิท หรืออิมตัวด้วยน้ำ โดยมีน้ำใต้ดินแทรก อยู่ใน slope และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการไหลมาเพิ่มเติมของน้ำใต้พื้นผิวดิน (เช่น ฝนตก) หรือ น้ำใต้ดินใน slope ลดต่ำลงเนื่องจากไม่มีการไหลมาเพิ่มเติมของน้ำใต้พื้นผิวดินและ ระเหยออกไป (เช่น อากาศแห้งแล้งเป็นเวลานาน)

2.9.2 ความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำบาดาลแบบไฮเพอโบล่า

จากรูปที่ 14 กำหนดให้ H เป็นค่า slope height, ψ_f เป็นมุมเอียงของ slope face, ψ_p เป็นมุมเอียงของ failure plane, BC เป็นระยะในแนวราบจาก slope crest ถึง จุดที่เกิด tension crack บนพื้นผิวด้านบนของ slope, XC เป็นระยะในแนวราบที่ groundwater surface ตัดกับ slope face (OD), h_s เป็นค่าความลึก (สูง) ที่ระดับ groundwater surface ตัดกับ slope face, XC_2 เป็นระยะในแนวราบที่ groundwater surface ตัดกับ failure plane (OE), h_p เป็นระยะค่าความลึก (สูง) ของ groundwater surface ตัดกับ failure plane, H_w เป็นระยะค่าความลึก (สูง) ของ groundwater surface ที่จุดสุดท้ายของ surface boundary ที่ระยะ L, ส่วน L เป็นระยะในแนวราบ (OF) ตั้งแต่จุด ตั้งต้น (ที่จุดที่ O) ของ groundwater surface ถึงจุดสุดท้ายของ surface boundary

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่ 13 กับรูปที่ 14 จะได้ความสัมพันธ์ คล้ายคลึงกับสมการที่ 30 เมื่อกำหนดให้ $h_1 = 0$ จะได้ ค่าความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำ บาดาลตัดกับ slope face เป็น

$$h_s = H_w \sqrt{\frac{XC}{L}} \quad (31)$$

จากนั้น หาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติของรูปที่ 14

$$h_s = XC \tan(\psi_f) \quad (32)$$

จากสมการที่ 31 และ 32 หาความสัมพันธ์ของระยะในแนวราบของจุดที่ groundwater ตัดกับ slope face ได้เป็น

$$XC = \frac{H_{w_2}^2}{L \tan^2(\psi_r)} \quad (33)$$

ทำนองเดียวกับสมการที่ 31 จะได้ค่าความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับ failure plane เป็น

$$h_p = H_w \sqrt{\frac{XC_2}{L}} \quad (34)$$

ในกรณีของ failure plane ก็จะได้

$$h_p = XC_2 \tan(\psi_p) \quad (35)$$

จากสมการที่ 34 และสมการที่ 35 จะได้ความสัมพันธ์ของระยะในแนวราบที่ groundwater surface ตัดกับ failure plane จะได้เป็น

$$XC_2 = \frac{H_w^2}{L \tan^2(\psi_p)} \quad (36)$$

ใน source code ของโปรแกรม Plane จะนำความสัมพันธ์ของสมการที่ 33 และสมการที่ 36 ไปเขียนไว้เป็นการคำนวณระยะในแนวราบของระดับน้ำบาดาลที่ตัดกับ slope face และที่ตัดกับ failure plane ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายเป็นรูปวงกลม

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับการพังทลายของมวลดินโดยเฉพาะชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีโอกาสเกิดการพังทลายเป็นแบบวงกลมได้มาก

3.1 พื้นผิวของรูปอาร์กวงกลม

วิธีการขั้นต้นในการจำกัดการวิเคราะห์ limit equilibrium ของ circular arc slide คือ

1. สมมุติว่ามี failure surface R, โดยมีจุดศูนย์กลาง O (รูปที่ 15)
2. ใช้สมการ statics ในการคำนวณ normal force N, ที่จุดตรงรอยแตกของพื้นผิว failure (rupture) plane
3. คำนวณ shear strength parameters c, ϕ สำหรับของดินโดยใช้ทั้งการทดสอบภาคสนามได้ค่า c, ϕ หรืออาจจะได้เป็น total c_u, ϕ_u หรือได้เป็น effective stress parameters c', ϕ'
4. สมมุติว่า shear strength ของดินนั้นถูกทำให้ลดลงจนเกิดการพังทลายตามสมมุติฐานของการพังทลายของ failure surface โดยมี shear force ที่กระทำบนผิวหน้าที่มีระยะความยาว l เป็น

$$S = \frac{c_u l + N \tan \phi_u}{F} \quad \text{or} \quad \frac{c' l + N' \tan \phi'}{F} \quad (37)$$

5. หาค่า moments ของ F รอบจุด O (รูปที่ 14) และ disturbing moment (demand moment, M_D) Wx_1 จะเท่ากับ stabilizing moment (capacity moment, M_C)

ในกรณีของ total stress analysis ได้ค่า

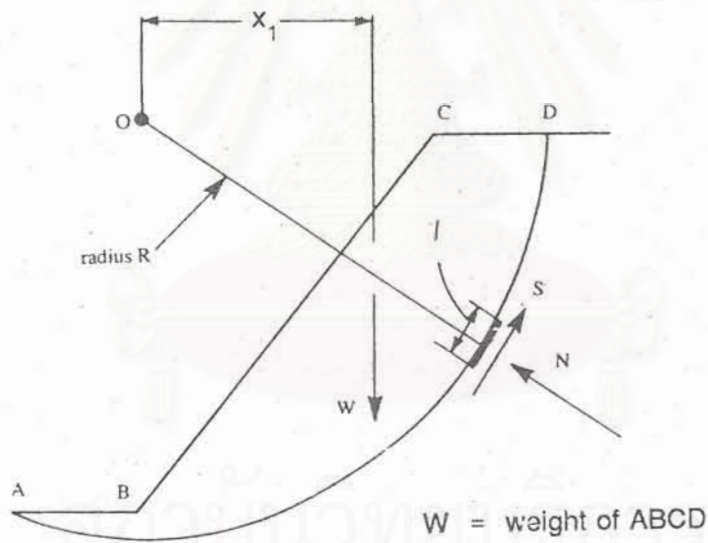
$$Wx_1 = \frac{R \sum c_u l + N \tan \phi_u}{F} \quad (38)$$

และสำหรับ effective stress analysis เป็น

$$Wx_1 = \frac{R \sum c' + N' \tan \phi'}{F} \quad (39)$$

และเมื่อรู้ค่าของ W และ x_1 แล้วค่า F สามารถคำนวณได้

F เป็น factor of safety เมื่อเทียบกับ strength เนื่องจากว่าทั้งค่าตัวแปร c และ $\tan \phi$ จะถูกลดลงด้วยองค์ประกอบเดียวกัน



รูปที่ 15 การวิเคราะห์เรื่อง circular arc failure หรือ rotational failure

3.2 การวิเคราะห์ของ Taylor

Taylor ได้พัฒนาการวิเคราะห์เชิงสถิติศาสตร์เพื่อหาค่า shear stress ที่มีการพังทลายตามรอยแตกที่มีพื้นผิวแบบ circular rupture surface

การที่จะแก้ปัญหาในการหาค่า stress จะกำหนดให้กระจายความเค้นตามรอยผิวแตกของรูปที่ 16a ซึ่ง Taylor ได้แนะนำวิธีการคือกำหนด friction circle ขึ้นมาและให้ circle มีรัศมี $R \sin \phi$ ที่จุดศูนย์กลาง O ซึ่ง R คือรัศมีของ failure surface (จุดศูนย์กลางของ failure surface คือ จุด O ซึ่งเป็นจุดเดียวกัน) ϕ เป็น slope ของ strength envelope ค่าของ ϕ จะเท่ากับศูนย์สำหรับกรณี short term stability analysis ของ saturated intact clay และค่าของ ϕ ใช้เป็น drained value สำหรับ long term state โดยไม่จำเป็นต้องให้ความสำคัญของการกระจาย normal stress ตามแนว AD ผลลัพธ์ของแรงเสียดทาน R_f จะใกล้เคียงกับ tangent ของ friction circle แสดงให้เห็นว่า ค่าประมาณของ shear stress ที่เกิดขึ้นจริงตามแนว AD ก็สามารถหาได้จากวิธีเชิงสถิตยศาสตร์

ดังนั้นแรงที่กระทำต่อ wedge ที่พังทลายซึ่งแสดงเป็น ABCD segment คือ

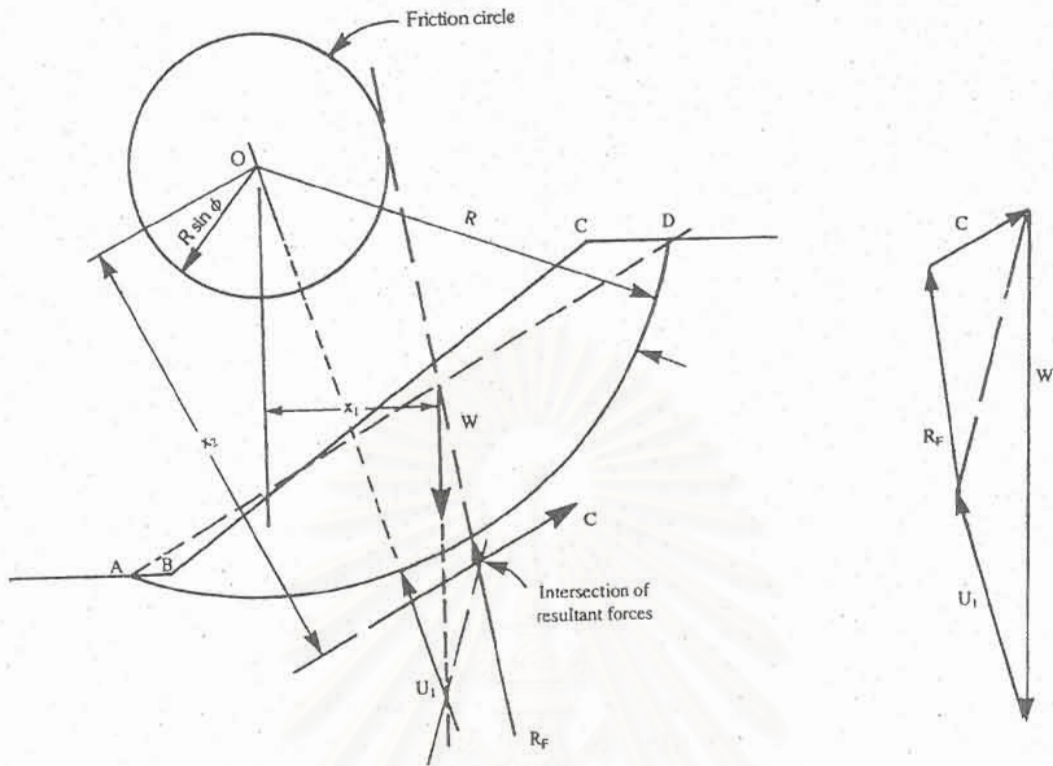
- น้ำหนักตัวมันเอง (W) ซึ่งเท่ากับปริมาตร ABCD x bulk unit weight
- Independent pore water thrust, U_1
- resultant cohesive force, C
- resultant frictional force, R_f

สังเกตว่า resultant pore water thrust U_1 จะต้องผ่านจุด O ผลรวมของ W และ U_1 สามารถหาได้จากนำแรง 3 แรงมาเขียนในไดอะแกรมเดียวกัน ทิศทางของ R จะระบุได้โดยผลรวมของแรงทั้งหมด ซึ่งก็คือทิศทางของ tangent ต่อ friction circle รูปที่ 16b เป็น vector diagram ที่แสดงค่า C สำหรับจุดสมดุล

$$C = c \times (\text{chord AD}) \quad (40)$$

$$x_2 = R \times (\text{arc AD}/\text{chord AD}) \quad (41)$$

สมการหลังเป็น moment ของ C ที่จุด O ซึ่งเท่ากับ moment ที่จุด O ของ cohesive component, c รอบเส้น arc AD



a) แรงและรูปแบบเชิงเรขาคณิตของ
พื้นลาดเอียงที่วิเคราะห์

b) ไดอะแกรมเวกเตอร์ของแรงที่มา
กระทำ

รูปที่ 16 การวิเคราะห์เสถียรภาพของ free slope สำหรับ homogeneous soil
โดยวิธีของ Taylor หรือ Friction Circle Stability Analysis

ก) $\phi = 0$ analysis

จากสมดุลของโมเมนต์ที่จุด O ทำให้ได้สมการ factor of safety เป็น

$$F = \frac{Rc_u \text{arc AD}}{Wx_1} \quad (42)$$

R_F นั้นผ่านจุด O เมื่อ $\phi = 0$ ดังนั้นจึงไม่ต้องเขียน R_F ในสมการ

(ดูรูปที่ 17a)

ในขณะที่ไม่ทราบ critical failure surface จะต้องทำการคำนวณ trial circles ซ้ำเพื่อหา factor of safety ที่ต่ำสุด ซึ่ง Taylor หาได้จากพจน์ของ stability number, S ดังนี้

$$S = \frac{c}{F_c \gamma H} = f\left(i, \frac{D}{H}\right) \quad (43)$$

โดยที่ S คือ stability number, D เป็น depth factor, H เป็น slope height, ส่วนระยะ DH เป็นความลึกถึงฐาน (base) ของวงกลมวิกฤต (critical circle) ที่แสดงดังรูปที่ 17b

จากลักษณะของ failure circle (Taylor, 1948; Lo, 1965) จะได้ความสัมพันธ์

$$S = (Y-Z) \frac{\sin^2 \alpha \sin^2 \lambda}{6\alpha} \quad (44)$$

ค่าของ α , λ แสดงอยู่ในรูปที่ 17a และ

$$Y = 1 - 2\cot^2 i + 3\cot \lambda \cot i + 3\cot \alpha \cot \lambda - 3\cot \alpha \cot i \quad (45)$$

$$Z = 6n(n + \cot i - \cot \lambda + \cot \alpha) \quad (46)$$

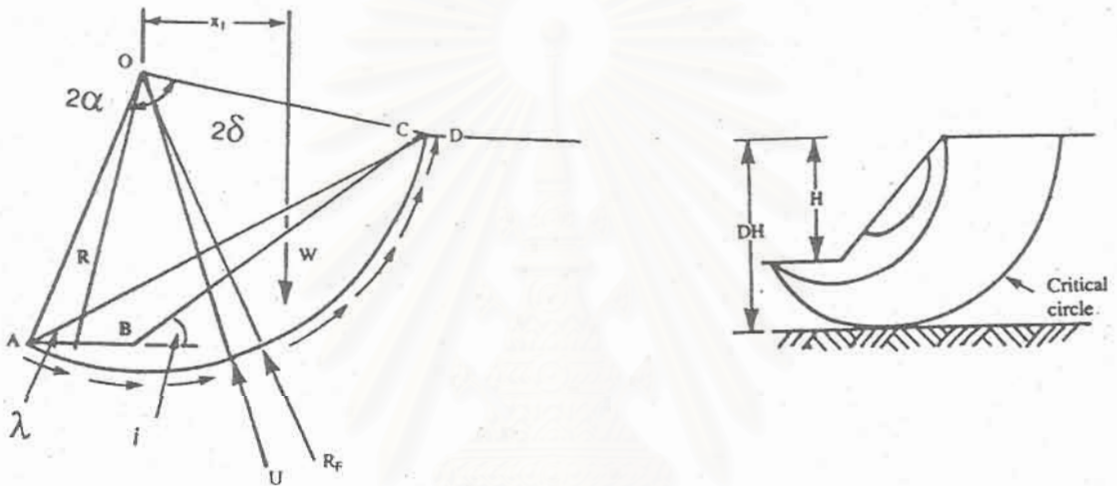
เมื่อ nH คือ ระยะทางจาก toe ของ slope ถึง toe หรือ ระยะ tip ของ slip (ดังรูปที่ 18b)

สำหรับ slope ที่เอียงมากกว่า 54 องศา critical failure circle ผ่าน toe ($n = 0$) แต่สำหรับ slope ที่เล็กกว่า critical circle อยู่ด้านนอกของ toe ค่าจริงของ n จะแสดงใน contour เป็นเส้นประสั้น ซึ่งเป็น Case A ของรูปที่ 18b และ stability data สำหรับ wedge excavation แสดงเป็นเส้นประยาว ซึ่งเป็น Case B ของรูปที่ 18b

สำหรับชั้นของ clay ที่ลึกมากๆ ($D = \infty$) ค่า stability number เป็น 0.182 เมื่อ $i \geq 54^\circ$ ในเหตุการณ์ปกติ ชั้นดินมีความลึกที่จำกัด critical circle จะถูกจำกัดที่ความลึกนี้ และค่า stability number ที่เกี่ยวข้องน้อยกว่า 0.182 และค่า factor of safety สูงขึ้น (รูปที่ 18b)

factor of safety ลดลงช้าๆ ในขณะที่ D เพิ่มขึ้นช้าๆ เหมือนกัน สำหรับ เหตุการณ์ทั่วไปจะมีความลึกจำกัดและจะเกิด critical circle

stability number สัมพันธ์กับ critical failure circle ดังแสดงในรูปที่ 18a และ รูปที่ 18b (ทั้งสองรูปดัดแปลงจาก Taylor, 1948)



(a) แรงและรูปแบบเชิงเรขาคณิตของ slope ที่วิเคราะห์

(b) สภาวะที่เกิดขึ้นในภาคสนาม

รูปที่ 17 การวิเคราะห์เสถียรภาพของ slope สำหรับ homogeneous soil ที่ค่า $\phi \leq 0$

ข) c_u, ϕ_u Analysis

เหมาะสำหรับดินบางชนิด เช่น saturated silt และ unsaturated silt มี friction angle ภายใต้สภาวะที่เป็น undrained condition ในบางกรณีสามารถใช้ stability chart สำหรับค่า undrained parameters, c_u และ ϕ_u ที่เหมาะสม

ค) c_d, ϕ_d Analysis

ทำการโมเมนต์รอบจุด O ของ c_d, ϕ_d โดยมี factor of safety ซึ่ง เกี่ยวข้องกับ cohesion แสดงไว้ในสมการ

$$Wx_1 = R \left(\frac{c_d}{F_c} \text{arc AD} + R_F \sin \phi_d \right) \quad (47)$$

หรือ factor of safety ที่เกี่ยวข้องกับ total strength, F

$$Wx_1 = R \left(\frac{c_d}{F} \right) \text{arc AD} + R_F \sin \left[\arctan \left(\frac{\tan \phi_d}{F} \right) \right] \quad (48)$$

เราสามารถแก้สมการ (47) กับสมการ (48) เป็น stability number ดังนี้

$$\frac{c_d}{F_c \gamma H} \quad \text{or} \quad \frac{c_d}{F \gamma H}$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ slope i และ friction angle (ϕ) หรือ $\arctan \left(\frac{\tan \phi_d}{F} \right)$

ตามลำดับ

สำหรับค่า i ค่า ϕ และค่า stability number S ที่จำเพาะเจาะจงบางค่าพบว่า critical factor of safety, F_c เป็นสัดส่วนกลับกัน (inverse) กับความสูงของ slope และเป็นสัดส่วนโดยตรง (proportional) กับค่าของ cohesive strength parameter ดังนั้นค่า F_c จะมีค่าเท่ากับ factor of safety ที่เทียบกับความสูงของ slope เรียกว่า F_H ดังนั้นค่า F_H จะเป็นอัตราส่วนของความสูงซึ่งมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพังทลาย นั่นคือค่า H_f ต่อค่าความสูงจริง H ดังสูตร

$$F_H = \frac{H_f}{H} = \frac{c}{S \gamma H} = F_c \quad (49)$$

โดยวิธีเดียวกัน เราสามารถกำหนดค่า factor of safety ซึ่งขึ้นกับค่าของ $\tan \phi$ ตามสมการ

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_f} \quad (50)$$

ซึ่งวิธีนี้เราสามารถสมมุติว่าค่า ϕ จะค่อยๆ ลดลงจนถึงค่า ϕ_f ซึ่งก่อให้เกิดการพังทลายโดยวิธีของ Fellenius และ Bishop (ในขณะที่ค่า c ไม่เปลี่ยนแปลง)

ในขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงว่าธรรมชาติของดินมีหลายลักษณะ ได้ค่า c ต่างกัน และมีผลทำให้ค่า $\tan \phi$ ต่างกัน หรือสรุปได้ว่า F_c ควรจะมีค่ามาก (สูง) กว่า F_ϕ

ถ้า F_ϕ และ F_H เท่ากันแล้วเราจะได้ factor of safety ที่เทียบกับ total strength, F

ง) Immediate Stability - Fully Submerged Slope

ถ้าสมมติให้ slope จมน้ำทั้งหมด ความหนาแน่นที่ควรใช้ในการคำนวณคือ buoyant density สำหรับการวิเคราะห์แบบ $\phi = 0$

$$F_c = \frac{c_u}{S(\gamma - \gamma_w)H} \quad (51)$$

จ) Sudden Drawdown

ถ้าระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว stability of slope จะลดลง เนื่องจาก stabilizing effect ของแรงที่เกิดจาก water thrust บน slope ถูกจำกัดออกไป

เมื่อทำการประมาณค่า (approximation) ครั้งแรก factor of safety สามารถคำนวณโดยลดค่า ϕ_d ในอัตราส่วน

$$\text{Reduced } \phi_d \text{ ratio} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma} \quad (52)$$

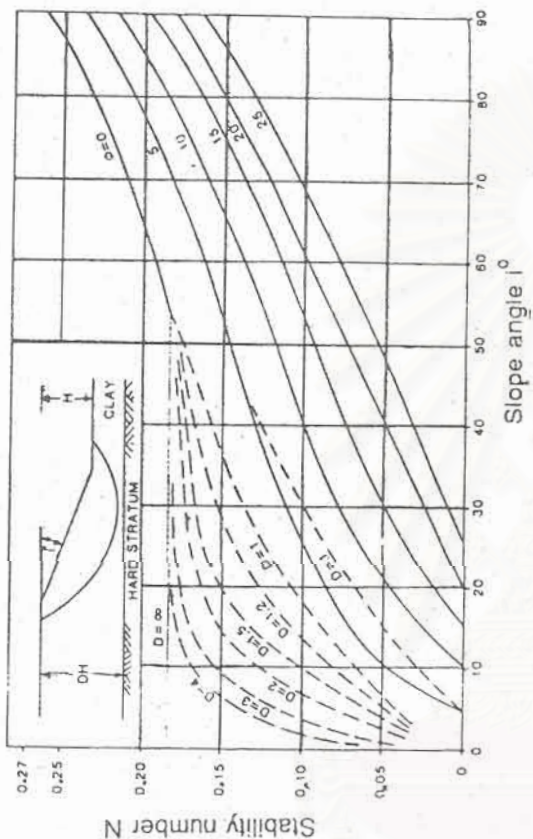
ฉ) Long Term Stability - Fully Submerged Slope

การหาค่า F จะต้องหาโดยวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error)

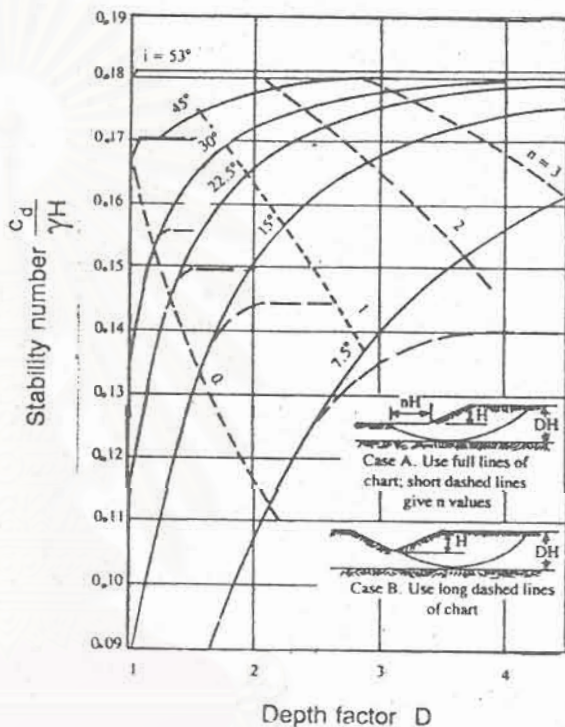
ช) Long Term Stability - Steady Seepage State

ค่า factor of safety ไม่สามารถคิดได้โดยตรง สำหรับในกรณีนี้ และการวิเคราะห์ slip circle ใช้การวาด (ลาก) flow net สำหรับการประมาณค่าครั้งแรกสถานะ steady seepage สามารถกล่าวได้ว่าเป็น stability เหมือนกับกรณี sudden drawdown หรือสามารถใช้การแก้ปัญหาโดยวิธีของ Hoek และ Bray (1981)

วิธีการเหล่านี้ง่าย สะดวก แต่การประมาณค่านั้นแสดงในรูป graphics และเกี่ยวข้องกับผลกระทบของ seepage ถึง 5 สภาวะ และต้องให้ความสำคัญของ tension ด้วยโดยที่ตัวแปรของวิธีนี้คือ $\frac{c'}{\gamma H}$, ϕ' และ i



รูปที่ 18a Taylor's Stability Chart ที่รวมพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นการหาค่า stability number จากมุมของ slope



รูปที่ 18b Taylor's Stability Chart for a $\phi_u = 0$ ที่รวมพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นการหาค่า stability number จากค่า depth factor

3.3 Non - Homogeneous Soil, Method of Slices

Fellenius ได้เสนอวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพทั่วไปว่าขึ้นอยู่กับ limit equilibrium method วิธีวิเคราะห์ของเขารวมทั้งความผันแปรที่เกิดขึ้นภายหลังนั้น สามารถนำมาประยุกต์ได้เป็นค่าเฉลี่ยของ factor of safety ทั้งของ total หรือ effective stresses

พื้นฐานสำหรับวิธีการวิเคราะห์ในแบบของ Fellenius คือ

1. แบ่งมวลสารของดินที่จะถึงจุดที่ก่อให้เกิด circular failure ไปตามจำนวนที่เหมาะสมของ slices แนวตั้ง (ดูรูปที่ 19a)
2. คำนวณ shear force และ normal force บนฐานของแต่ละ slice
3. คำนวณ shear strength บนฐานของแต่ละ slice โดยใช้กฎของ Coulomb
4. คำนวณโมเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับศูนย์กลางของ circular failure surface ของ stabilizing moment (M_C) และ disturbing moment (M_D) ของค่ากำลังวัสดุเฉือน
5. ค่า factor of safety ที่เกี่ยวข้องกับ total strength ได้มาจาก

$$F = M_C / M_D \quad (53)$$

ตามรูป 19a มวล ABCD เริ่มต้นจะถูกแยกเป็นหลาย slices เพื่อที่จะหาองค์ประกอบของแรงทั้งหมดที่อยู่ในลักษณะของ free slope ที่ประกอบด้วย free surface และ failure surface จากนั้นทำการแบ่งเป็น slice อีกระหนึ่ง slice ได้แก่ slice i จากมวลของดิน โดยต้องมีการประยุกต์ใช้ค่า force components ทั้งหมด ค่า components เหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 19b ซึ่งได้แก่แรงกระทำต่างดังนี้ self weight, ΔW_i ; lateral force, ΔR_i ; surcharge force, ΔQ_i ; และ side force components, $E_i, X_i, E_{i+1}, X_{i+1}$ กับค่าของ force components ที่กระทำบน failure arc T_i และ N_i'

ถ้าหาก pore pressure ถูกพิจารณาว่าเป็นแรงดันแบบ pore thrust, U_i , กระทำตั้งฉากกับ failure arc เมื่อ $F = 0$ และ $M = 0$ เพื่อที่จะคิดหา T_i, N_i' อย่างไรก็ตาม ค่าของ side force components $E_i, X_i, E_{i+1}, X_{i+1}$ ยังไม่ทราบค่า และตำแหน่งของ components ทั้งสี่เหล่านี้ก็ยังไม่รู้เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการคิดแบบ statical indeterminate ในการแก้ปัญหาแบบ Fellenius ไม่ได้คิดผลกระทบของ side force components

แรงที่กระทำให้เกิดเสถียรภาพ S_i ตามความยาวของ failure arc l_i คือ

$$S_i = c_i + (N_i - U_i) \tan \phi \quad (54)$$

ซึ่ง c และ ϕ นั้นสามารถเป็นได้ทั้ง total หรือ effective stress parameters ถ้าหาก U_i ไม่ได้รับผลกระทบจาก pore pressure และ $c = c_u$, $\phi = \phi_u$ สำหรับในช่วงสั้นๆ ของ stability มีค่า $c = c_d$, $\phi = \phi_d$ สำหรับช่วงยาวของ stability ถ้ามี pore pressure มากเกินต้องใช้ effective normal stress parameters c' , ϕ' หรือ drained parameters c_d , ϕ_d จึงได้โมเมนต์ทั้งหมดรอบจุด O สำหรับการพังทลายจาก

$$\begin{aligned} F &= \frac{R \sum_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i + \Delta Q_i)x - \Delta R_i y} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^N c' l_i + (N_i - U_i) \tan \phi'}{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i + \Delta Q_i) \sin \alpha_i - \Delta R_i \frac{y}{R}} \quad (55) \end{aligned}$$

สำหรับวิธีการหาค่าแบบประมาณค่า (approximate) ที่ยอมรับได้โดยวิธีของ Fellenius และ Bishop เพื่อหาแรง N'_i ที่เป็น total thrust บนแนว bc มีรายละเอียดดังนี้

ก) Fellenius analysis - Free slope

$$N'_i + U_i = N_i = (\Delta W_i + \Delta Q_i) \cos \alpha_i + \Delta R_i \sin \alpha_i \quad (56)$$

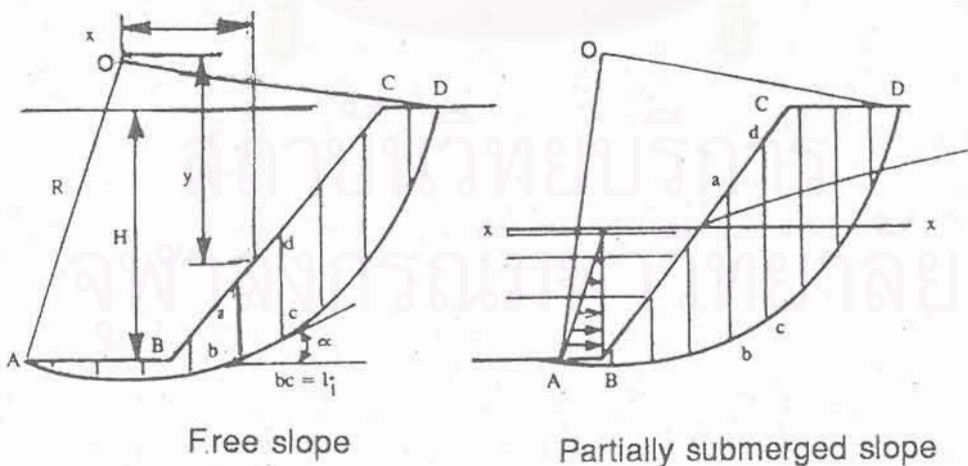
นั่นคือ Fellenius ได้ละทิ้งพจน์ของ $(X_{i+1} - X_i) \cos \alpha_i + (E_{i+1} - E_i) \sin \alpha_i$

เมื่อแทนค่า N_i ในสมการ (55) ได้ค่าเฉลี่ย factor of safety เมื่อเทียบกับ strength เป็น

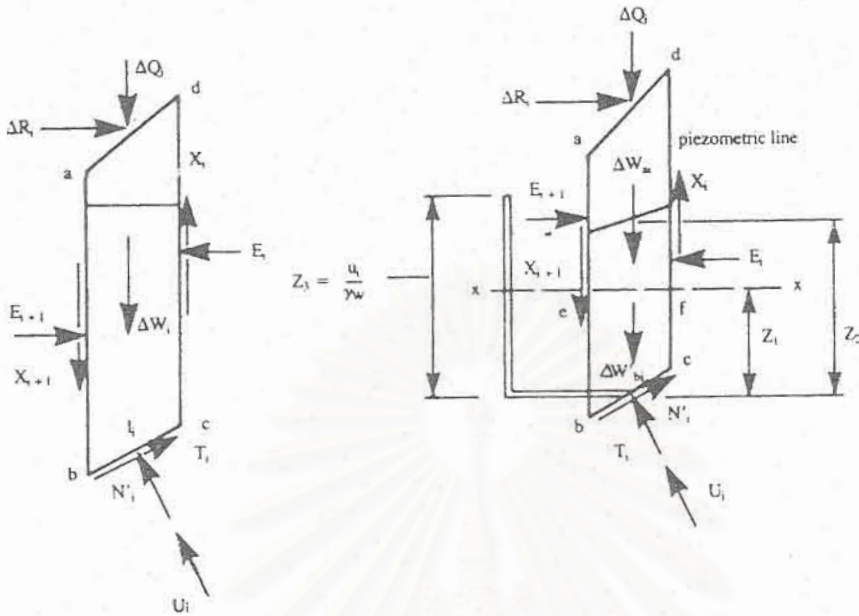
$$F = \frac{\sum_{i=1}^N c' l_i + [(\Delta W_i + \Delta Q_i) \cos \alpha_i + \Delta R_i \sin (\alpha_i - u_{i1})] \tan \phi'}{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i + \Delta Q_i) \sin \alpha_i - \Delta R_i \frac{y}{R}} \quad (57)$$

ข) Bishop analysis - Free slope คิดตามแนวตั้ง
Bishop ได้แก้ปัญหาโดยคำนวณค่าในแนวตั้งได้

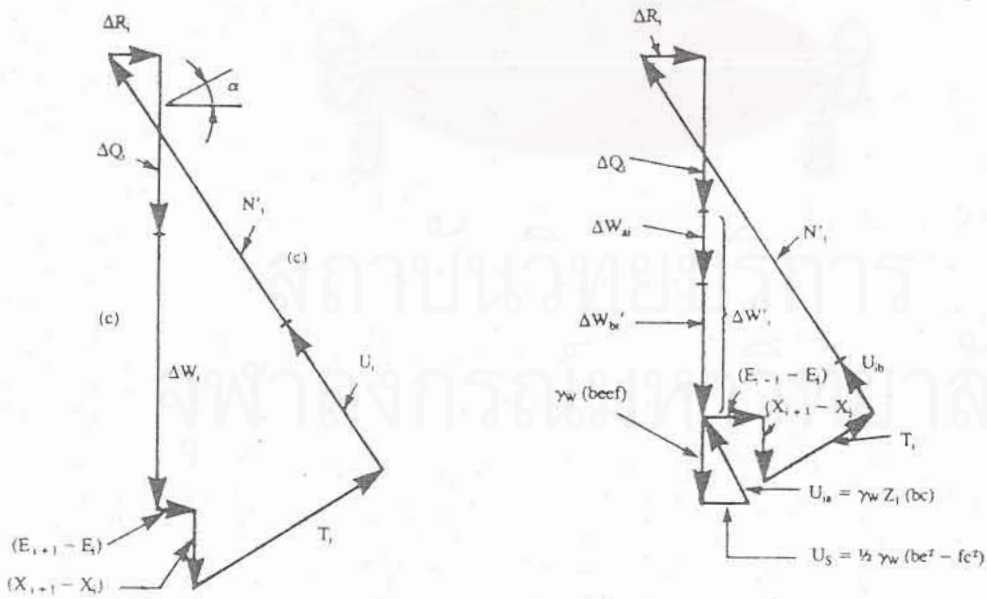
$$(\Delta W_i + \Delta Q_i) + (X_{i+1} - X_i) = T_i \sin \alpha_i + (N'_i + U_i) \cos \alpha_i \quad (58)$$



(a) รูปแบบเรขาคณิตแบบ free slope และ partially submerged slope



(b) การวิเคราะห์ force components ที่อยู่บน slice ตัวอย่าง



(c) รูปไดอะแกรมเวกเตอร์ของแรงบน slice ตัวอย่าง

รูปที่ 19 (ต่อ) วิธีแก้ปัญหาโดย Method of Slices

ในกรณีที่จะกำจัด T_i , Bishop ใช้ expression ดังนี้

$$T_i = \frac{S_i}{F} = \frac{c'l_i + (N_i - U_i) \tan \phi'}{F} \quad (59)$$

สมมุติว่า F มีค่าเท่ากับทุก slice แทนค่า T_i ในสมการ 58 ได้

$$N'_i = \left[(\Delta W_i + \Delta Q_i) + (X_{i+1} - X_i) - u_i \cos \alpha_i - \frac{c'}{F} l_i \sin \alpha_i \right] \frac{l}{m_\alpha} \quad (60)$$

เมื่อกำหนดให้

$$m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F} \right) \quad (61)$$

แทนค่าลงในสมการ 55 เพื่อหา F จะได้

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \left[c'b_i + (\Delta W_i + \Delta Q_i - u_i b_i + X_{i+1} - X_i) \tan \phi' \right] \frac{l}{m_\alpha}}{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i + \Delta Q_i) \sin \alpha_i - \Delta R_i \frac{y}{R}} \quad (62)$$

ถ้าหากทำการประมาณค่า (approximation) จะได้พจน์ของ

$$(X_{i+1} - X_i) \frac{\tan \phi'}{m_\alpha}$$

สามารถจะละทิ้งได้ จึงทำสมการที่ 62 ให้ง่ายขึ้นเป็นสมการทั่วไปของ Bishop

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \left[c'b_i + (\Delta W_i + \Delta Q_i - u_i b_i) \tan \phi' \right] \frac{l}{m_\alpha}}{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i + \Delta Q_i) \sin \alpha_i - \Delta R_i \frac{y}{R}} \quad (63)$$

จากการศึกษาพบว่าวิธีของ Bishop นั้นมี error terms ซึ่งเล็กกว่าวิธีของ Fellenius โดยที่ error ของวิธี Bishop นั้นมีตั้งแต่ 1-5% แต่วิธีของ Fellenius นั้นมีตั้งแต่ 10-15% วิธีการของ Bishop นั้นต้องใช้การลองผิดลองถูก (trial and error) ในการคำนวณเพื่อให้ค่านั้นมีความถูกต้อง (accuracy) มากที่สุด วิธีการของ Fellenius เป็นการคิดคำนวณโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ธรรมดา ซึ่งคิดง่ายกว่า แต่ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณแล้ว ควรใช้วิธีของ Bishop จะมีประสิทธิภาพมากกว่า

ค) Bishop method - Partially Submerged slope

ในกรณีที่ slope มีการจมน้ำไปบางส่วนสามารถหาค่า total weight of typical "abcd" wedge segment

$$\begin{aligned}\Delta W_i &= \Delta W_{ai} + W_{bi} \\ &= \Delta W_{ai} + W'_{bi} + \gamma_w (bcef)\end{aligned}\quad (64)$$

$$= \Delta W'_i + \gamma_w (bcef)\quad (65)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\Delta W_{ai} = \gamma(ade f)$$

$$\Delta W_{bi} = \gamma(bcef)$$

$$\Delta W'_{bi} = (\gamma - \gamma_w)(bcef)$$

ในกรณีที่หาค่าคำนวณ factor of safety ก็ควรที่จะสามารถยอมรับ 1 ใน 2 วิธีของ statical equivalent methods ซึ่งได้แก่

วิธี (a) เป็นวิธีซึ่งเกี่ยวข้องกับ density คือ bulk density และ total pore thrust เหนือ bc (U_{bc}) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังภาพแสดงเวกเตอร์ของแรงอยู่ในรูปที่ 19c

วิธี (b) ความหนาแน่นเหนือระดับ xx ของ partially submerged slope คือค่าของ bulk density ส่วนความหนาแน่นต่ำกว่าระดับ xx คือค่าของ buoyant density ถ้าหากไม่มี pore thrust บน bc ก็ไม่มีการ drain น้ำออก (no seepage) แต่สำหรับการ drain น้ำออก pore thrust เหนือ bc จะเท่ากับ

$$U_i = u_i(bc) = \gamma_w(bc)(Z_3 - Z_1) \tag{66}$$

เนื่องจาก Z_3 เป็น piezometric head สัมพันธ์กับระดับเฉลี่ยของ bc ที่เป็น datum และ Z_1 เป็นระดับ upstream water level เมื่อเทียบกับ datum

จากเหตุผลของวิธี (b) ที่ได้แสดงไดอะแกรมของเวกเตอร์สำหรับกรณี partially submerged จะพบว่า pore thrust บนส่วน bcef เกิดจากระดับน้ำที่ xx อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงสถิตยศาสตร์ นั่นคือ จะได้แรง

$$U_{ia} = \gamma_w Z_1 (bc) \tag{67}$$

$$U_s = 0.5\gamma_w [(be)^2 - (fc)^2] \tag{68}$$

เมื่อมีการ balance แรงเนื่องจากน้ำหนักตัวมันเอง $\gamma_w (bcef)$ จึงเกิด pore thrust U_i เนื่องจากเกิด pore pressure ที่มากเกินไปของ $\gamma_w Z_1$ มีผลทำให้เกิด downward component ของการไหลและพลังงานสูญเสียเมื่อมีการ drain น้ำออก ทำให้ pore pressure ที่ bc มีมากเกินไปเท่ากับ $\gamma_w Z_1$ ข้อสังเกตพบว่า Z_3 มีความสูงมากกว่าของ phreatic surface, Z_2

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เป็นสมมุติฐานที่เกี่ยวกับขนาดและตำแหน่งของแรงที่กระทำต่อ slices ที่มีแนวคิดต่างกับวิธีของ Bishop เพียงเล็กน้อย (Spencer, 1967, 1968) จึงพอสรุปได้ว่า วิธี extension of slice โดยที่มี tension crack นำมาคิดในการคำนวณเสถียรภาพนั้นสำคัญตรง slices ที่มี cracks นั้นจะต้องคิดโดยวิธี non-circular failure surface (Morgenstern and Price, 1965) และจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.4 วิธีการของ Bishop และ Morgenstern

Bishop และ Morgenstern (1960) ได้ประยุกต์ method of slices ทำให้สามารถใช้ได้กับ slope ที่เป็น complex soil หรือเป็น uniform soil ซึ่ง pore pressure, u จะเป็นไปตามสมการ

$$u = r_u h \gamma \tag{69}$$

โดยที่ h คือความสูงของ overburden เหนือจุดที่ทำการวิเคราะห์ ค่า γ เป็น bulk density ของดิน

ตามสมการของ Bishop (สมการข้างล่าง)

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum [c' b + W (1 - r_u) \tan \phi'] \cdot \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (70)$$

เมื่อกำหนดให้ $\Delta Q_i = \Delta R_i = 0$ factor of safety จะแสดงได้ในเทอมของ $\frac{c'}{\gamma H}$, ϕ' และ r_u ความสัมพันธ์ที่ได้คือ

$$F = m - nr_u \quad (71)$$

ค่า m และ n เรียกว่า stability coefficients

ค่าต่างๆ ของ coefficients จะแสดงเป็นฟังก์ชันของ $\frac{c'}{\gamma H}$, ϕ' , i และ D สำหรับค่า c' , ϕ' กำหนดให้เป็น effective stress parameters, γ เป็น bulk unit weight, H เป็นความสูงของ slope, i เป็นค่าความลาดเอียงของ slope และ D เป็น depth factor (ซึ่งกำหนดอยู่ในรูปที่ 18b) และสมการที่ 43 รูป charts ของ Bishop และ Morgenstern จะถูกจำกัดสำหรับความลาดเอียงของ slope ในช่วง 11-27 องศา และต้องใช้ charts ซึ่งขยายค่าประมาณออกไปด้วย

สำหรับ charts อื่นๆ ถูกสร้างโดย Spencer (1967), Janbu (1967) และ Cousins (1978) ซึ่ง Cousins ได้สร้าง charts ขึ้นมาชุดหนึ่ง ซึ่งสามารถหา stability number และตำแหน่งของ critical slip circle และ charts เหล่านี้ได้เตรียมไว้สำหรับค่า pore pressure ratio 0.25 และ 0.5 รวมทั้งที่มีค่าศูนย์ กรณีหลังสุดนี้มีลักษณะเกี่ยวพันกับ Taylor's solution ด้วย

Cousins คำนวณค่า stability โดยใช้ parameters

$$N_F = \frac{F\gamma H}{c} = f(i, \phi', r_u, D) \quad (72)$$

$$\lambda_{\phi} = \frac{\gamma H \tan \phi'}{c'} \quad (73)$$

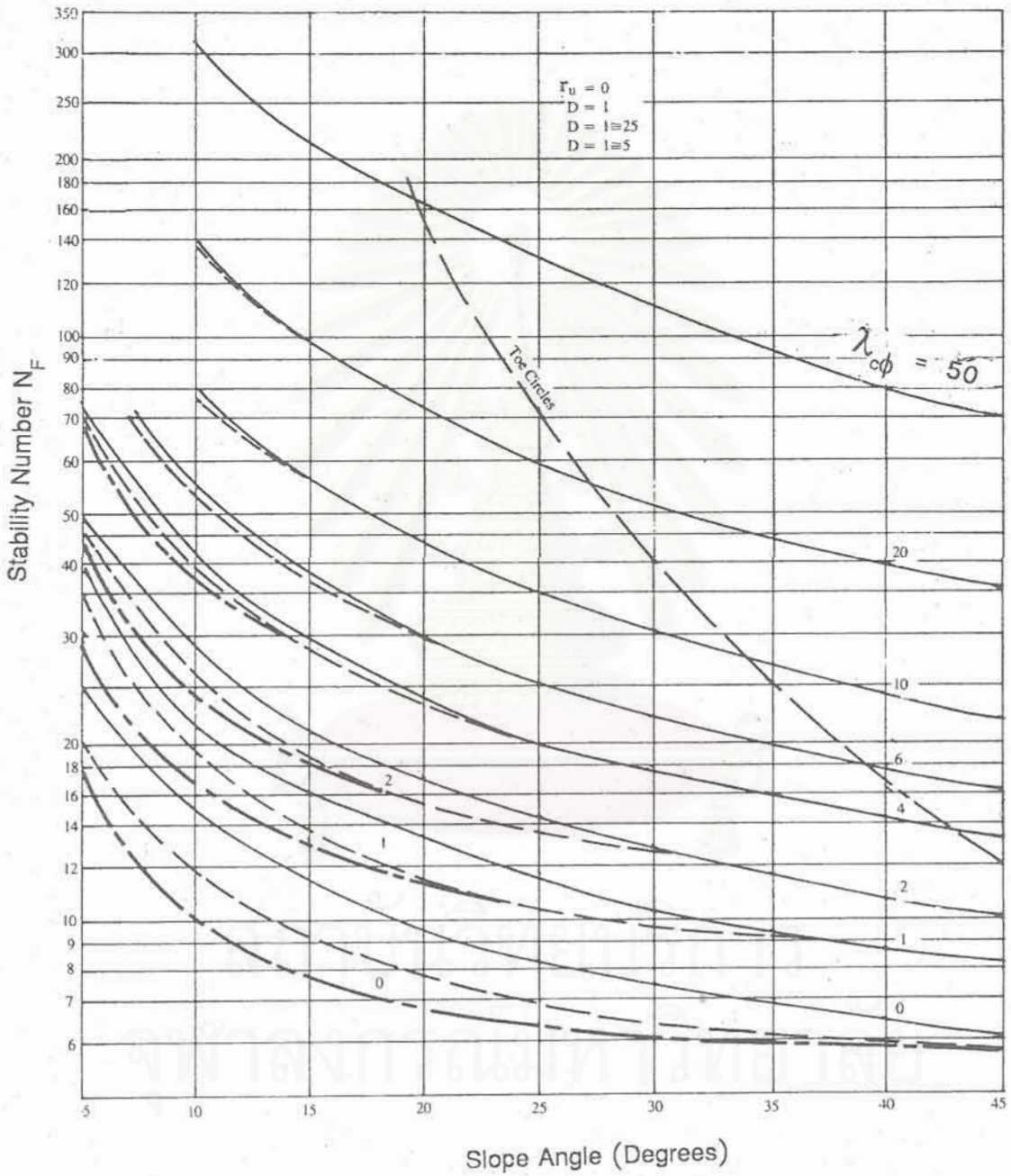
วิธีการแก้ปัญหาโดยใช้ friction circle method ยังแสดงไว้ในรูปที่ 20-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_F กับ slope ที่มีค่าของ λ_{ϕ} และ r_u รูปกราฟเหล่านี้ใช้ได้กับกรณีของ slip circles ที่ผ่าน toe

3.5 ประโยชน์ของวิธี Bishop และ Morgenstern

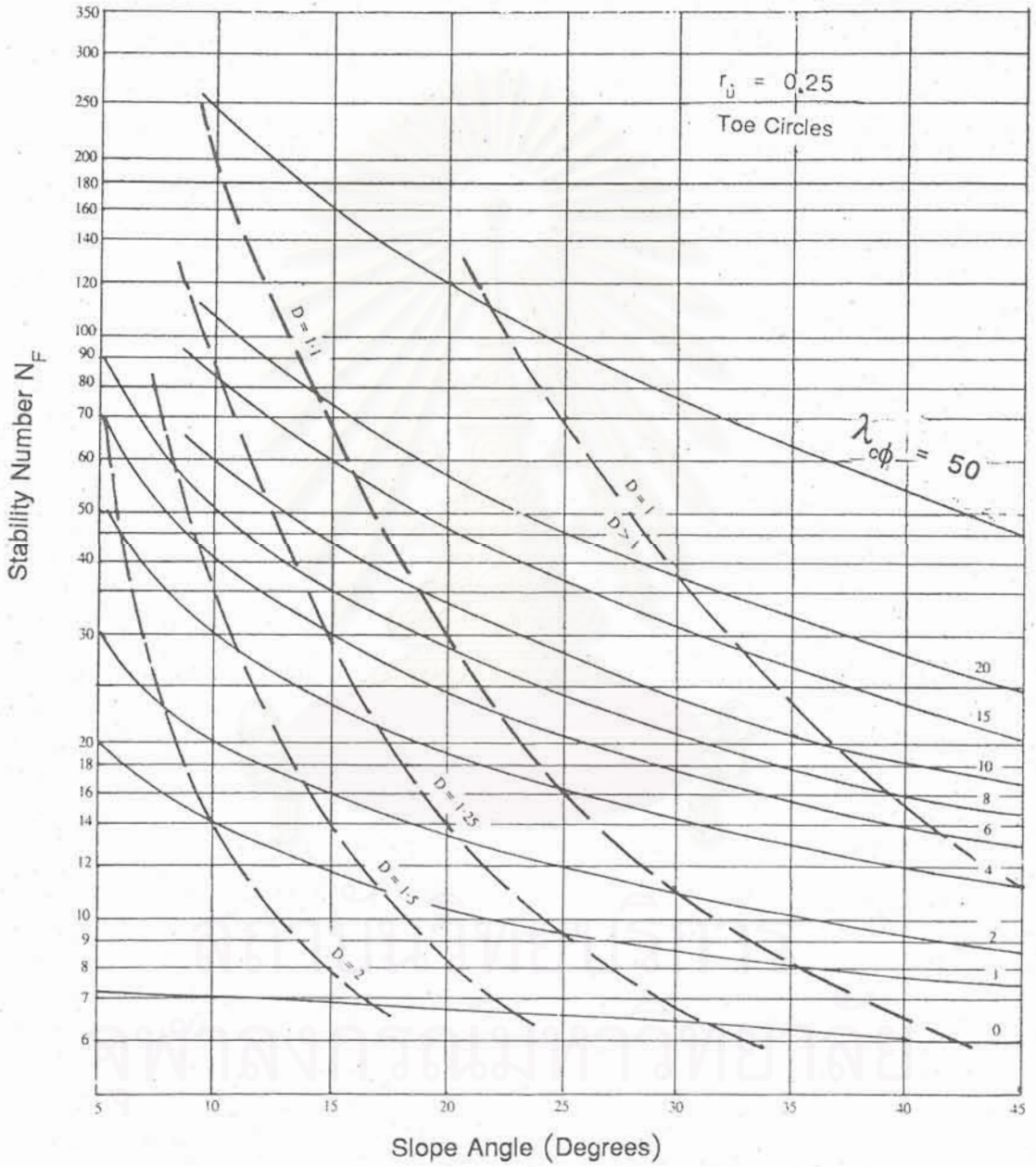
การวิเคราะห์เสถียรภาพของ slope ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จะเที่ยงตรงที่สุด และ สะดวกที่สุด โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณด้วยวิธีการคำนวณซ้ำๆ ซากๆ และลดการผิดพลาดจากการคำนวณด้วยมือ

ในความเป็นจริงแล้ว การใช้คอมพิวเตอร์นั้น สะดวกกว่าแน่นอนอยู่แล้ว แต่ในกรณีนี้ slope stability สามารถจะประมาณค่าได้จากการใช้ design charts หนึ่งใน charts ที่มีประโยชน์มากที่สุดเป็นของ Bishop และ Morgenstern (1960) ซึ่ง slope มีลักษณะตามรูปที่ 23 และ soil strength parameters นั้นไม่มีหน่วยอยู่ในพจน์ของ $\left(\frac{c'}{\gamma H}\right)$, $\cot \beta$ และ D (แสดงอยู่ในรูปที่ 23) กับอัตราส่วน pore pressure r_u เป็นความลึกของมวลสารจากผิวดิน [$r_u = u / \gamma h$] โดยที่ u เป็นค่า pore pressure ที่จุดใดๆ ค่า h เป็นความลึกที่ต่ำกว่า soil surface ของ soil mass ค่า γ เป็น bulk density ของดิน

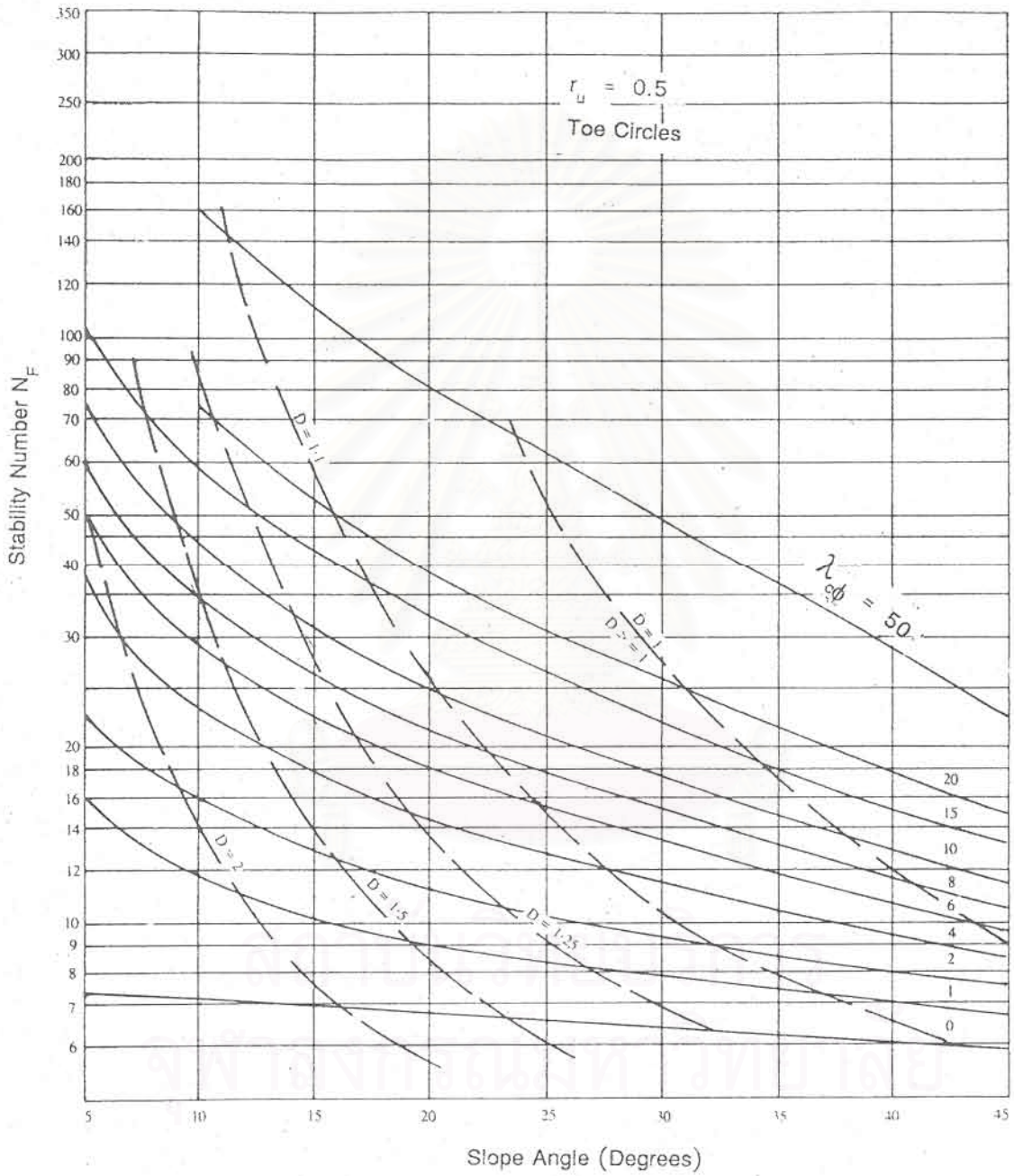
Bishop และ Morgenstern (1960) ได้กำหนด charts ของเขาเองโดยให้ค่าของ $\left(\frac{c'}{\gamma H}\right)$ ช่วงดังกล่าวเพราะว่า slope ในธรรมชาติจะประกอบขึ้นด้วย sensitive soil เช่นพวก clay บางชนิดที่มีแร่ประเภท expandable mineral structures ซึ่ง slope ตามธรรมชาตินี้มีโอกาสพังทลายง่ายจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องใช่วิธีที่รวดเร็วในการประมาณค่าความมั่นคงของ slope การประมาณค่าโดยใช้ charis ของ Bishop และ Morgenstern จะทำให้ประหยัดเวลา และประสิทธิภาพค่อนข้างดี



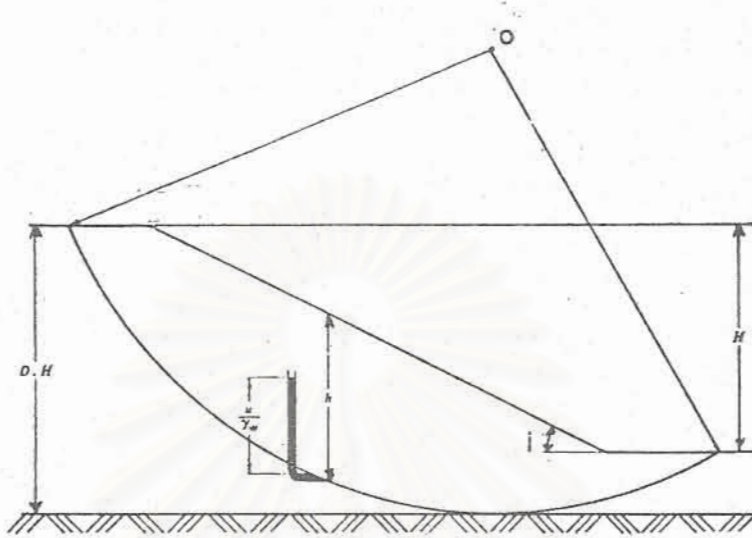
รูปที่ 20 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่า
โดยที่ค่า $r_u = 0$



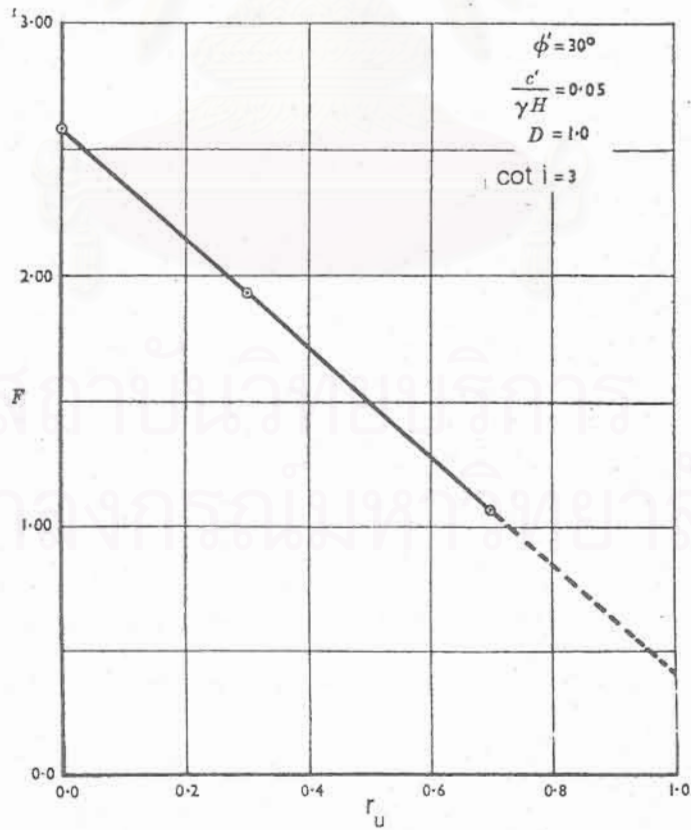
รูปที่ 21 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่า
โดยที่ $r_u = 0.25$



รูปที่ 22 Stability chart สำหรับค่า depth factors หลายค่า
โดยที่ $r_u = 0.5$



รูปที่ 23 แสดงภาพของ parameters ต่างๆ ของ slip circle failure



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety, F และ อัตราส่วนของ pore pressure, r_u

3.6 โปรแกรมการวิเคราะห์ตามวิธีของ Bishop

เรื่องการวิเคราะห์ method of slices นั้น Bishop (1955) ได้ปรับปรุงหลักการและเพิ่มแนวทางให้ใช้ได้ ในสภาวะ free slope และ partially submerged slope (ดูรูปที่ 25) ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการคำนวณเสถียรภาพของ slope ในโปรแกรมของ Bishop Method ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

จากรูปแบบเชิงเรขาคณิตของ slope ในรูปที่ 25a จะเห็นว่ามวลดินได้ถูกแบ่งเป็น หลาย slices แต่ละ slice จะถูกล้อมรอบด้วย free surface ของ slope กับ failure surface กำหนด slice แยกมาจากมวลเป็น slice ตัวอย่าง (ดูรูปที่ 25b) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์แรง บน slice

$$F = \frac{\sum X / (1 + \frac{Y}{F})}{\sum Z + Q} \quad (74)$$

โดยที่ค่า X, Y, Z, Q มีค่าความสัมพันธ์เมื่อเทียบกับรูปที่ 25 ได้แก่

$$X = [c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \tan \phi'] \Delta x / \cos \alpha$$

$$Y = \tan \alpha \tan \phi'$$

$$Z = \gamma h \Delta x \sin \alpha$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \alpha / R$$

สมการที่ 74 มีเงื่อนไขเป็น 2 กรณี คือ

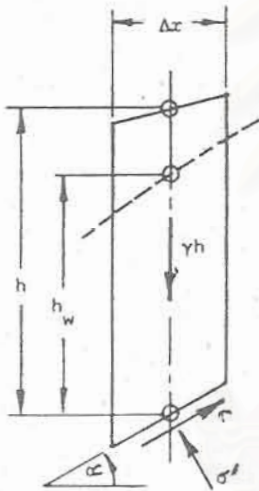
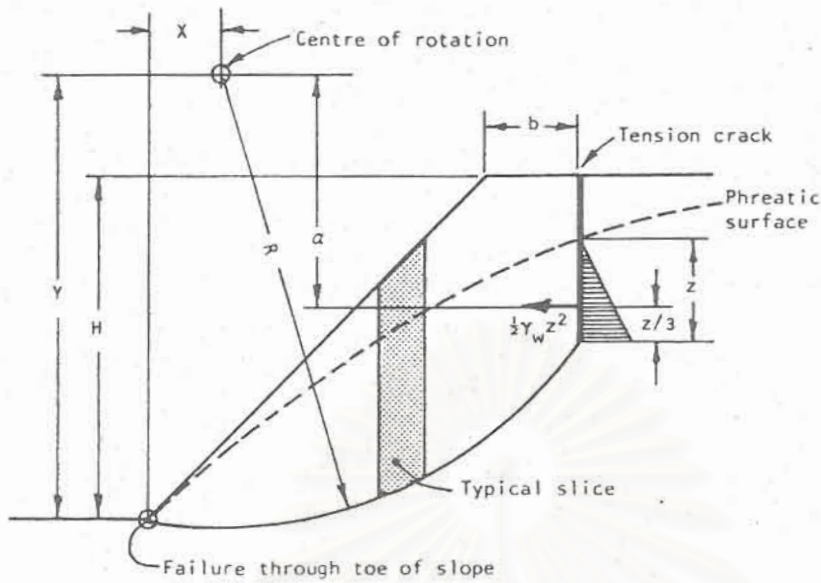
กรณีที่แรก

$$\sigma' = \frac{\gamma h - \gamma_w h_w - c' \tan \alpha / F}{1 + \frac{Y}{F}} > 0 \quad (75)$$

กรณีที่สอง

$$\cos \alpha (1 + \frac{Y}{F}) > 0.2 \quad (76)$$

ถ้าหาไม่ได้เงื่อนไขทั้งสองกรณีผู้ใช้จะต้องเลื่อนจุด center of rotation แล้วทำการคำนวณใหม่ให้ใช้ได้กับเงื่อนไขทั้งสอง



Note : Angle α is negative when sliding is uphill.

Factor of Safety :

$$F = \frac{\sum X / (1 + Y/F)}{\sum Z + Q}$$

where

$$X = (c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \tan \phi') \Delta x / \cos \alpha$$

$$Y = \tan \alpha \tan \phi'$$

$$Z = \gamma h \Delta x \sin \alpha$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \alpha / R$$

The following conditions must be satisfied for each slice :

$$1) \sigma' = \frac{\gamma h - \gamma_w h_w - c' \tan \alpha / F}{1 + Y/F} > 0$$

$$2) \cos \alpha (1 + Y/F) > 0.2$$

รูปที่ 25 วิธีแก้ปัญหโดย Bishop's method of slices

- a) รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ free slope และ partially submerged slope
- b) การวิเคราะห์หา force components ที่กระทำบน slice ตัวอย่าง

3.7 โปรแกรมการวิเคราะห์ตามวิธีของ Janbu

วิธีการของ Bishop นั้นกำหนดให้ใช้ method of slices กับ circular failure surface แต่ Janbu (1954) ได้เสนอที่ใช้ method of slices กับ non - circular failure surface ซึ่งวิธีการของ Janbu นี้ดูจะน่าเชื่อถือกว่าเมื่อนำมาคำนวณกับมวลที่ไหลเลื่อน ในระดับดินและมวลนั้นมีค่า friction angle ต่ำ

Janbu's modified method (ดูรูปที่ 26) มีขั้นตอนที่สำคัญคล้ายคลึงกับ Bishop's method ดังนี้คือ

1. กำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีค่าปัจจัยของความปลอดภัยต่ำสุดในการวิเคราะห์ของ Janbu นี้ failure surface อาจกำหนดจากโครงสร้างของมวลดิน มวลหิน ที่เป็นโซนเปราะบาง

2. ทำการแบ่ง vertical slice/unit thickness ปกติควรมีจำนวนต่ำสุด 5 slices

3. คำนวณค่า shear strength ที่กระทำบนฐานของแต่ละ slice เนื่องจากวัสดุที่ ประกอบกันเป็นอาจมีพฤติกรรมแตกหักแบบ non-linear (ดูสมการของ non-linear failure criterion ในหัวข้อถัดไป) จึงจำเป็นต้องหาค่า instantaneous cohesion, c'_i กับ ค่า instantaneous friction angle, ϕ'_i ของแต่ละ slice

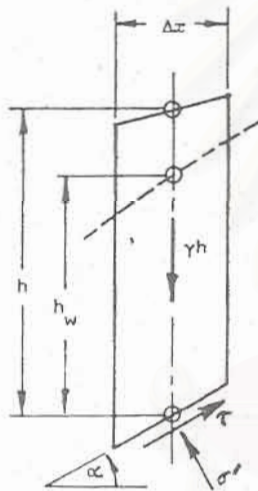
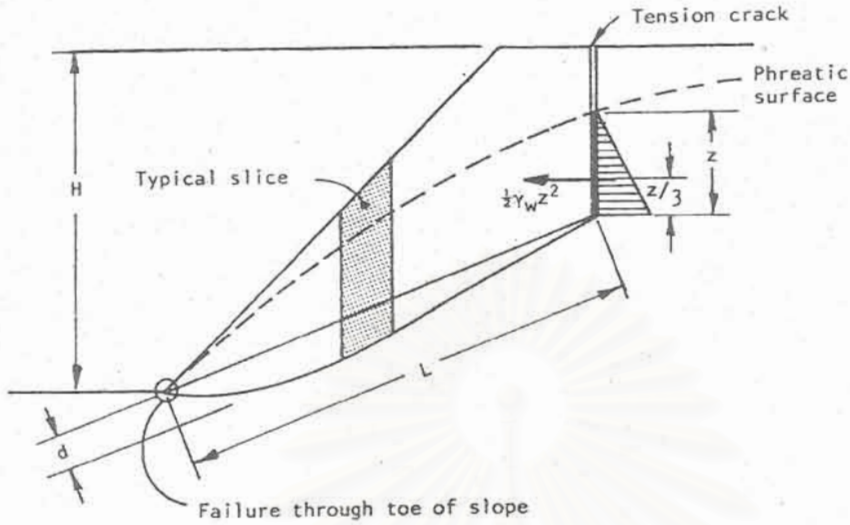
4. เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของ slice และ shear strength สามารถที่จะหาค่าได้แล้วจึงทำการคำนวณค่าของ X, Y และ Z ของแต่ละ slice จากนั้นแรงดันน้ำ Q ถูกรวมเข้ากับ $\sum Z$

การประมาณค่าปัจจัยของความปลอดภัยจะเริ่มต้น ให้ค่า F เท่ากับ 1.00 โดยที่

$$F = \frac{f_o \sum X / (1 + \frac{Y}{F})}{\sum Z + Q} \quad (77)$$

ค่าตัวแปรในสมการข้างบนนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 26 นั่นคือ

$$X = [c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha) \Delta x \quad (78)$$



Note : Angle α is negative when sliding is uphill.

Factor of Safety :

$$F = \frac{f_o \sum \frac{X}{(1 + Y/F)}}{\sum Z + Q}$$

where

$$X = (c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \tan \phi') (1 + \tan^2 \alpha) \Delta x$$

$$Y = \tan \alpha \tan \phi'$$

$$Z = \gamma h \Delta x \tan \alpha$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w z^2$$

Approximate correction factor f_o

$$f_o = 1 + K \left(\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right)$$

for $c' = 0$; $K = 0.31$,

$c' > 0, \phi' > 0$; $K = 0.50$

รูปที่ 26 Junbu's modified method of slices

a) รูปแบบเชิงเรขาคณิต slope ตัวอย่างที่อยู่ใน partially submerged state

b) การวิเคราะห์แรงที่กระทำบน slice ตัวอย่าง

$$Y = \tan \alpha \tan \phi' \quad (79)$$

$$Z = \gamma h \Delta x \tan \alpha \quad (80)$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \quad (81)$$

สำหรับค่า f_0 คือค่า approximate correction factor กำหนดให้

$$f_0 = 1 + K \left\{ \frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right\} \quad (82)$$

สมการของ f_0 นี้ มีเงื่อนไขเป็น 2 กรณีคือ

กรณีแรก

$$c' = 0; \quad K = 0.31 \quad (83)$$

กรณีที่สอง

$$c' > 0; \quad \phi' > 0; \quad K = 0.50 \quad (84)$$

ถ้าหากผลต่างระหว่าง calculated F กับ assumed F มีค่ามากกว่า 0.001 จะทำการคำนวณซ้ำโดยให้ค่า calculated F ที่ได้ครั้งแรกเป็น second estimate สำหรับค่า F ที่ได้จากการคำนวณซ้ำใหม่ครั้งที่สอง ทำการคำนวณซ้ำกันเรื่อย ๆ จนได้ผลต่างของค่า F ที่ต่อเนื่อง (successive factor of safety) น้อยกว่า 0.001

3.8 โปรแกรมการวิเคราะห์วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Non - Linear Failure

Hoek and Bray (1981) ได้เสนอแนะการหาค่า shear strength ของหิน เมื่อมีการทดสอบแบบ triaxial test นั่นคือ

$$\tau = A \sigma_c \left[\frac{\sigma'}{\sigma_c} - T \right]^B \quad (85)$$

ค่า A และ B เป็นค่าคงที่ที่สามารถกำหนดรูปร่างของ Mohr failure envelope ของมวลหิน และได้ค่า

$$T = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (86)$$

ค่า T, m และ s เป็น empirical constants ที่จะดูรายละเอียดได้จากตารางที่ 3 ของรายงานเล่มนี้ที่คัดลอกมาจากหนังสือ Rock Slope Engineering : Third Edition หน้า 108

สำหรับกระบวนการคำนวณแบบ non-linear จะคล้ายคลึงกับวิธีการของ Bishop และ Janbu ได้แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิต และ slice ตัวอย่างไว้ในรูปที่ 27 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่า factor of safety ที่กำหนดให้

$$F = \frac{\sum (c'_i + \sigma' \tan \phi'_i) \frac{\Delta x}{\cos \alpha}}{\sum \gamma h \Delta x \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left(\frac{\alpha}{R} \right)} \quad (87)$$

2. คำนวณค่า effective normal stress ที่กระทำบนฐานของแต่ละ slice ตาม Fellenius solution

$$\sigma' = \gamma h \cos^2 \alpha - \gamma_w h_w \quad (88)$$

3. ใช้ค่า σ' นี้ มาคำนวณหาค่าของ $\tan \phi'_i$ และ c'_i จากสมการ 89 และ 90 กับเงื่อนไขดังมีรายละเอียดข้างล่าง

$$\tan \phi'_i = AB \left(\frac{\sigma'}{\sigma_c} - T \right)^{B-1} \quad (89)$$

ตารางที่ 3 ค่าประมาณของวัสดุที่พฤติกรรมของการแตกหักแบบ non - linear

APPROXIMATE RELATIONSHIP BETWEEN ROCK MASS QUALITY AND EMPIRICAL CONSTANTS					
Empirical failure criterion $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2}$ $\tau = A \sigma_c \left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_c} - T \right)^B$ where $T = \frac{1}{2} \left[m - \sqrt{m^2 + 4s} \right]$	CARBONATE ROCKS WITH WELL DEVELOPED CRYSTAL CLEAVAGE <i>dolomite, limestone and marble</i>	LITHIFIED ARGILLACEOUS ROCKS <i>mudstone, siltstone, shale and slate (normal to cleavage)</i>	ARENACEOUS ROCKS WITH STRONG CRYSTALS AND POORLY DEVELOPED CRYSTAL CLEAVAGE <i>sandstone and quartzite</i>	FINE GRAINED POLYMINERAL-LIC IGNEOUS CRYSTALLINE ROCKS <i>andesite, dolerite, diabase and rhyolite</i>	COARSE GRAINED POLYMINERAL-LIC IGNEOUS AND METAMORPHIC CRYSTALLINE ROCKS <i>amphibolite, gabbro, gneiss, granite, norite and quartz-diorite.</i>
INTACT ROCK SAMPLES <i>Laboratory size specimens free from joints</i> CSIR rating 100 NGI rating 500	m = 7.0 s = 1.0 A = 0.816 B = 0.658 T = -0.140	m = 10.0 s = 1.0 A = 0.918 B = 0.677 T = -0.099	m = 15.0 s = 1.0 A = 1.044 B = 0.692 T = -0.067	m = 17.0 s = 1.0 A = 1.086 B = 0.696 T = -0.059	m = 25.0 s = 1.0 A = 1.220 B = 0.705 T = -0.040
VERY GOOD QUALITY ROCK MASS <i>Tightly interlocking undisturbed rock with unweathered joints at ±3m.</i> CSIR rating 85 NGI rating 100	m = 3.5 s = 0.1 A = 0.651 B = 0.679 T = -0.028	m = 5.0 s = 0.1 A = 0.739 B = 0.692 T = -0.020	m = 7.5 s = 0.1 A = 0.848 B = 0.702 T = -0.013	m = 8.5 s = 0.1 A = 0.883 B = 0.705 T = -0.012	m = 12.5 s = 0.1 A = 0.998 B = 0.712 T = -0.008
GOOD QUALITY ROCK MASS <i>Fresh to slightly weathered rock, slightly disturbed with joints at 1 to 3m.</i> CSIR rating 65 NGI rating 10	m = 0.7 s = 0.004 A = 0.369 B = 0.669 T = -0.006	m = 1.0 s = 0.004 A = 0.427 B = 0.683 T = -0.004	m = 1.5 s = 0.004 A = 0.501 B = 0.695 T = -0.003	m = 1.7 s = 0.004 A = 0.525 B = 0.698 T = -0.002	m = 2.5 s = 0.004 A = 0.603 B = 0.707 T = -0.002
FAIR QUALITY ROCK MASS <i>Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1m.</i> CSIR rating 44 NGI rating 1.0	m = 0.14 s = 0.0001 A = 0.198 B = 0.662 T = -0.0007	m = 0.20 s = 0.0001 A = 0.234 B = 0.675 T = -0.0005	m = 0.30 s = 0.0001 A = 0.280 B = 0.688 T = -0.0003	m = 0.34 s = 0.0001 A = 0.295 B = 0.691 T = -0.0003	m = 0.50 s = 0.0001 A = 0.346 B = 0.700 T = -0.0002
POOR QUALITY ROCK MASS <i>Numerous weathered joints at 30 to 500mm with some gouge - clean waste rock.</i> CSIR rating 23 NGI rating 0.1	m = 0.04 s = 0.00001 A = 0.115 B = 0.646 T = -0.0002	m = 0.05 s = 0.00001 A = 0.129 B = 0.655 T = -0.0002	m = 0.08 s = 0.00001 A = 0.162 B = 0.672 T = -0.0001	m = 0.09 s = 0.00001 A = 0.172 B = 0.676 T = -0.0001	m = 0.13 s = 0.00001 A = 0.203 B = 0.686 T = -0.0001
VERY POOR QUALITY ROCK MASS <i>Numerous heavily weathered joints spaced < 50mm with gouge - waste with fines.</i> CSIR rating 3 NGI rating 0.01	m = 0.007 s = 0 A = 0.042 B = 0.534 T = 0	m = 0.010 s = 0 A = 0.050 B = 0.539 T = 0	m = 0.015 s = 0 A = 0.061 B = 0.546 T = 0	m = 0.017 s = 0 A = 0.065 B = 0.548 T = 0	m = 0.025 s = 0 A = 0.078 B = 0.556 T = 0

$$c'_i = A \sigma_c \left(\frac{\sigma'}{\sigma_c} - T \right)^B - \sigma' \tan \phi'_i \quad (90)$$

เงื่อนไขที่จำเป็นของแต่ละ slice นั้นคือ

กรณีแรก

$$\sigma' > 0 \quad \text{โดยที่ } \sigma' \text{ คำนวณจากวิธีของ Bishop} \quad (91)$$

ที่แสดงไว้ในสมการที่ 93 ข้างล่างนี้

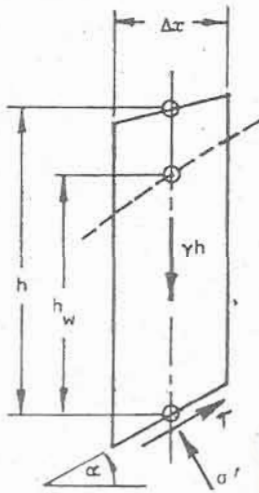
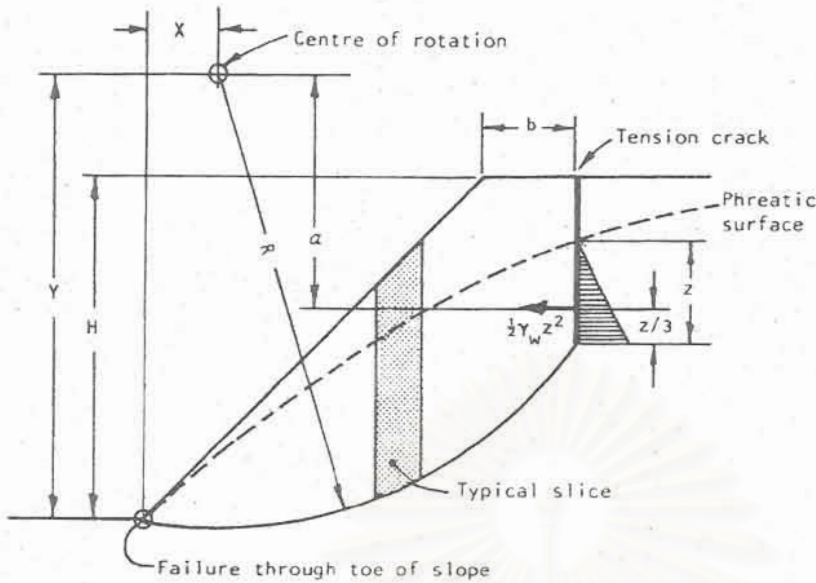
กรณีที่สอง

$$\cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'_i}{F} \right) > 0.2 \quad (92)$$

4. นำค่าตัวแปรจากหัวข้อ 3 ข้างบนมาคำนวณหาค่า factor of safety แทนการประมาณค่า factor of safety ในครั้งแรก (first estimate)
5. ใช้การประมาณค่า F ของหัวข้อที่ 4 ไปคำนวณค่า stress ใหม่ โดยใช้ Bishop solution

$$\sigma' = \frac{\gamma h - \gamma_w h_w - \frac{c'_i \tan \alpha}{F}}{1 + \frac{\tan \phi'_i \tan \alpha}{F}} \quad (93)$$

6. นำค่า σ' ใหม่ไปคำนวณหาค่า $\tan \phi'_i$ และ c'_i
7. ตรวจสอบเงื่อนไขทั้ง 2 กรณี (สมการที่ 91 และ 92) ว่าเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่ในแต่ละ slice
8. คำนวณหาค่า factor of safety ใหม่เป็นการประมาณค่าครั้งที่ 2 (second estimate) โดยใช้ค่าใหม่ของ $\tan \phi'_i$ และ c'_i
9. ถ้าค่า factor of safety ของครั้งแรกและครั้งที่ 2 ต่างกันมากกว่า 0.001 ให้กลับไปทำข้อ 5 และ คำนวณซ้ำ โดยใช้ค่า factor of safety ครั้งที่ 2 เป็นค่าเริ่มต้นของข้อมูลเข้า (input) ทำซ้ำจนกว่าผลต่างของค่า F ที่ต่อเนื่อง (successive factor of safety) น้อยกว่า 0.001



Note : Angle α is negative when sliding is uphill.

Factor of Safety :

$$F = \frac{\sum (c_z' + \sigma' \tan \phi_z') \cos \alpha}{\sum \gamma h \Delta x \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \cdot \frac{\Delta x}{R}}$$

where

$$\sigma' = \gamma h \cos^2 \alpha - \gamma_w h_w \quad (\text{Fellenius solution})$$

and

$$\sigma' = \frac{\gamma h - \gamma_w h_w - \frac{c_z' \tan \alpha}{F}}{1 + \frac{\tan \phi_z' \tan \alpha}{F}} \quad (\text{Bishop solution})$$

The instantaneous friction angle ϕ_z' and the instantaneous cohesion c_z' are given by :

$$\tan \phi_z' = AB (\sigma' / \sigma_c - T)^{B-1}$$

$$c_z' = A \sigma_c (\sigma' / \sigma_c - T)^B - \sigma' \tan \phi_z'$$

The conditions which must be satisfied for each slice are :

- 1) $\sigma' > 0$, where σ' is calculated by Bishop's method
- 2) $\cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi_z' / F) > 0.2$

รูปที่ 27 การหาเสถียรภาพของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ non-linear failure criterion โดยแบ่ง slice ตามวิธีของ Bishop

- a) รูปแบบเชิงเรขาคณิตของ slope ที่มีมวลสารมีพฤติกรรมแบบ non-linear
- b) ไดอะแกรมของแรงที่กระทำบน slice ตัวอย่าง

บทที่ 4

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายเป็นรูปลิ่ม

งานวิเคราะห์เสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดินของการพังทลายเป็นรูปลิ่มมี 3 รูปแบบที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์การพังทลายของ Sarma การวิเคราะห์การพังทลายของรูปลิ่มบนพื้นผิว การวิเคราะห์การพังทลายของรูปลิ่มใต้พื้นผิวดิน

4.1 การวิเคราะห์มวลดินที่พังทลายเป็นรูปลิ่มด้วยวิธี Sarma

การวิเคราะห์ตามวิธีของ Sarma (1979) ซึ่งถูกดัดแปลงโดย E. Hoek เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability) ซึ่งสามารถหาค่าความสมดุลของพื้นลาดเอียงที่มีรูปร่างต่างๆ กันได้ทั้งพื้นลาดเอียงที่เป็นวงกลม หรือไม่เป็นวงกลม หรือเป็นระนาบเทหรือประกอบกันหลายอย่างก็สามารถใช้วิธีการนี้วิเคราะห์ชนิดนี้ได้ นอกจากนี้แล้ว active-passive wedge failure ที่เกิดจากวัสดุสะสมเป็นกองขนาดใหญ่ หรือบนเขื่อนดินในส่วนที่เป็น embankment ก็สามารถคำนวณได้

การวิเคราะห์ยังสามารถชี้ความแตกต่างของ shear strengths ในแต่ละด้านของ slice และฐานของ slice รวมทั้งมีความอิสระในการเปลี่ยนความชันของพื้นลาดเอียง นอกจากนี้ยังสามารถระบุชนิดความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่อฐานราก เช่น รอยเลื่อน (fault) หรือ ระนาบชั้นหิน (bedding plane) หรือแรงภายนอกเช่นแรงดันน้ำบนแต่ละ slice ยังสามารถนำมาคิดรวมได้โดยอัตโนมัติรวมทั้งการจมใต้น้ำ (submergence) ของพื้นลาดเอียงก็สามารถนำมาคิดได้ด้วย

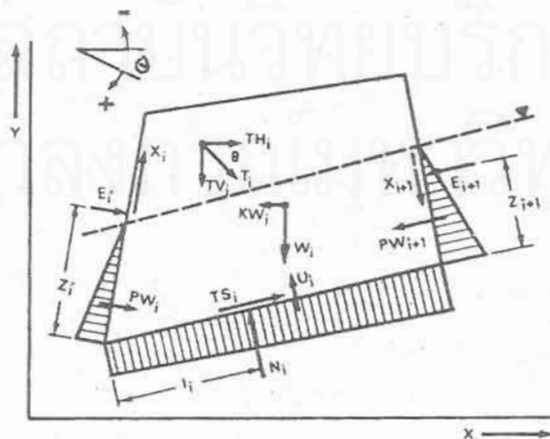
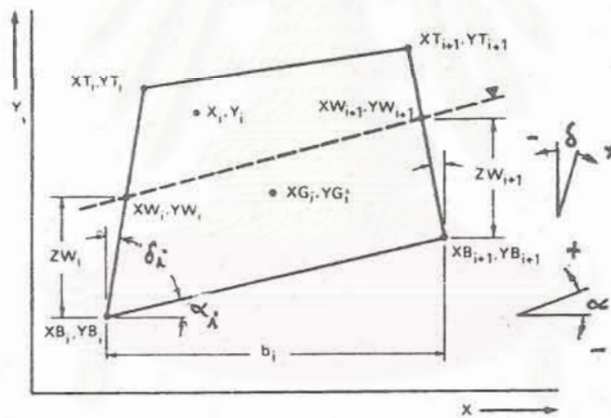
4.1.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตตามวิธี Sarma

รูปร่างเชิงเรขาคณิตของมวลที่ถล่ม (sliding mass) สามารถกำหนดจุดพิกัดเป็น $X_T, Y_T, X_B, Y_B, X_{T_{i+1}}, Y_{T_{i+1}}$ และ $X_{B_{i+1}}, Y_{B_{i+1}}$ ตามจำนวนของมุมของ three or four-sided elements ที่ถูกแบ่งตามรูปที่ 28 โดยแต่ละส่วนที่ถูกแบ่งออกนั้นยังสามารถกำหนดจุดพิกัด X_{W_i}, Y_{W_i} และ $X_{W_{i+1}}, Y_{W_{i+1}}$ ของจุดติดกับด้านของ slices การคำนวณหา closed form solution ของความเร่งระนาบวิกฤติ (critical horizontal acceleration, K_c) ต้องการที่จะนำสู่ขอบเขตสมดุลจำกัด (limiting equilibrium) ในส่วนของมวลถล่ม (sliding mass) โดยที่มีค่าคงที่ของความปลอดภัยเชิงสถิต (static factor of safety: F) ที่หาได้โดยลดค่ากำลังวัสดุเฉือน (shear strength), ค่า $\tan \phi$ และค่า c จนถึงค่า $\tan \phi/F$ และค่า c/F จนกระทั่งค่าความเร่งวิกฤติ K_c ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์

ในการคำนวณให้วิเคราะห์ค่าจนวนยอมรับได้ โดยใช้การตรวจสอบโดยให้ค่า effective normal stresses กระทำผ่านฐานและด้านข้างของ slices จนค่าความเค้นของ effective stresses มีค่าบวก (+) ถ้าค่า negative stresses มีค่าเป็นลบ (-) ก็ต้องเปลี่ยนรูปเรขาคณิตของ slice หรือสภาวะของระดับน้ำบาดาลจนกระทั่งค่าความเค้นของ effective stresses มีค่าเป็น (+) ส่วนการตรวจสอบแบบ moment equilibrium ก็สามารถอธิบายได้ แต่ไม่ได้ระบุไว้เพราะมันเกี่ยวข้องกับข้อมูลจำนวนมาก และนานๆ ครั้งจะนำมาใช้กับปัญหาของ normal slope stability

4.1.2 การคำนวณแรงกระทำบนรูปเรขาคณิต

ลักษณะเชิงเรขาคณิตของ i^{th} slice สามารถกำหนดได้ดังรูปที่ 28 โดยสังเกตว่าค่าของพิกัด x จะเพิ่มขึ้นจากจุดล่างสุด (toe) ของ slope เสมอ โดยสมมติ ZW_i , δ_i และ d_i สามารถหาได้จาก previous slide



รูปที่ 28 แสดงรูปเรขาคณิตเชิงคณิตและแรงที่กระทำบน slice ของ i^{th}

$$d_{i+1} = [(X_{T_{i+1}} - X_{B_{i+1}})^2 + (Y_{T_{i+1}} - Y_{B_{i+1}})^2]^{1/2} \quad (94)$$

$$\delta_{i+1} = \arcsin [(X_{T_{i+1}} - X_{B_{i+1}}) / d_{i+1}] \quad (95)$$

$$b_i = X_{B_{i+1}} - X_{B_i} \quad (96)$$

$$\alpha_i = \arctan [(Y_{B_{i+1}} - Y_{B_i}) / b_i] \quad (97)$$

$$W_i = \frac{1}{2} \gamma_r |(Y_{B_i} - Y_{T_{i+1}})(X_{T_i} - X_{B_{i+1}}) + (Y_{T_i} - Y_{B_{i+1}})(X_{T_{i+1}} - X_{B_i})| \quad (98)$$

$$ZW_{i+1} = (YW_{i+1} - Y_{B_{i+1}}) \quad (99)$$

โดยที่ γ_r คือ unit weight ของวัสดุที่ประกอบกันเป็นชั้น slice และ W_i คือค่าน้ำหนักของ i^{th} slice

4.1.3 การคำนวณค่าแรงดันจากน้ำ (Calculation of Water Forces)

ในกรณีที่จะครอบคลุมการคำนวณเนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นจากน้ำ รวมทั้งการจมตัวใต้น้ำ (submergence) ในส่วนหนึ่งส่วนใดของ slope การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณี พิจารณาจากรูปที่ 29 โดยในทุกกรณีค่าแรงยก U_i จะกระทำที่ฐานของ slice และถูกกำหนดเป็น

$$U_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_i - Y_{B_i} + YW_{i+1} - Y_{B_{i+1}}) b_i / \cos \alpha_i| \quad (100)$$

โดยที่ γ_w คือ ค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight) ของน้ำ

1) Case 1: no submergence of slice

$$Y_{T_i} > Y_{W_i} \quad \text{and} \quad Y_{T_{i+1}} > Y_{W_{i+1}}$$

$$PW_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_i - Y_{B_i})^2 / \cos \delta_i| \quad (101)$$

$$PW_{i+1} = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_{i+1} - Y_{B_{i+1}})^2 / \cos \delta_{i+1}| \quad (102)$$

2) Case 2: submergence of side i only

$$YT_i < YW_i \text{ and } YT_{i+1} > YW_{i+1}$$

$$PW_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(2YW_i - YT_i - YB_i)(YT_i - YB_i) / \cos \delta_i| \quad (103)$$

$$PW_{i+1} = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_{i+1} - YB_{i+1})^2 / \cos \delta_{i+1}| \quad (104)$$

$$WW_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_i - YT_i)^2 (XT_{i+1} - XT_i) / (YT_{i+1} - YT_i)| \quad (105)$$

$$WH_i = \frac{1}{2} \gamma_w (YW_i - YT_i)^2 \quad (106)$$

โดยที่ WW_i และ WH_i คือ แรงในแนวดิ่งและแรงในแนวราบ ที่กระทำต่อผิวหน้าของ slice ตามผลของส่วนที่จมใต้น้ำ (submergence) มีข้อสังเกตว่าแรงในแนวนอน WH_i กระทำในทิศที่มีค่าบวก (+) เมื่อ $YT_{i+1} > YT_i$ และจะกระทำในทิศที่มีค่าลบ (-) เมื่อ $YT_{i+1} < YT_i$

3) Case 3: submergence of side i+1 only

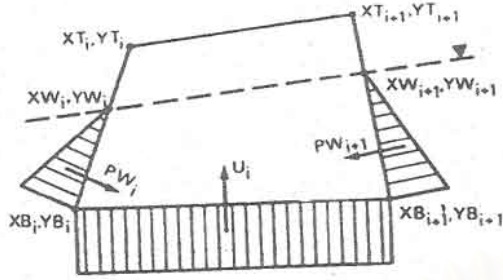
$$YT_i > YW_i \text{ and } YT_{i+1} < YW_{i+1}$$

$$PW_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_i - YB_i)^2 / \cos \delta_i| \quad (107)$$

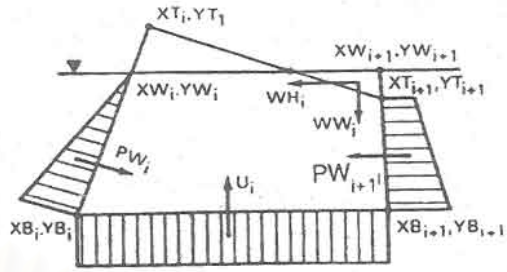
$$PW_{i+1} = \frac{1}{2} \gamma_w |(2YW_{i+1} - YT_{i+1} - YB_{i+1})(YT_{i+1} - YB_{i+1}) / \cos \delta_{i+1}| \quad (108)$$

$$WW_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_{i+1} - YT_{i+1})^2 (XT_{i+1} - XT_i) / (YT_i - YT_{i+1})| \quad (109)$$

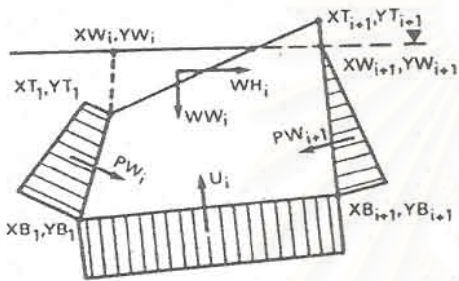
$$WH_i = \frac{1}{2} \gamma_w |(YW_{i+1} - YT_{i+1})^2 \quad (110)$$



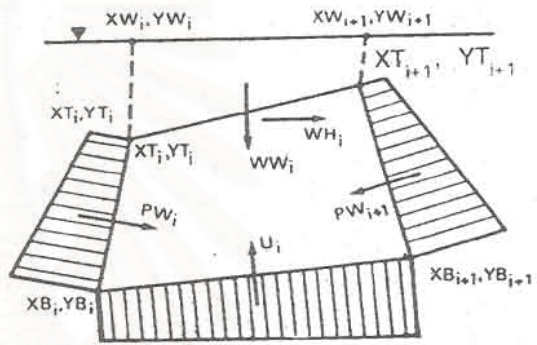
a) No Submergence



c) Submergence of side i+1



b) Submergence of side i



d) Complete submergence

รูปที่ 29 แสดงผลของแรงดันน้ำทั้ง 4 กรณี

4) Case 4: complete submergence of slice i

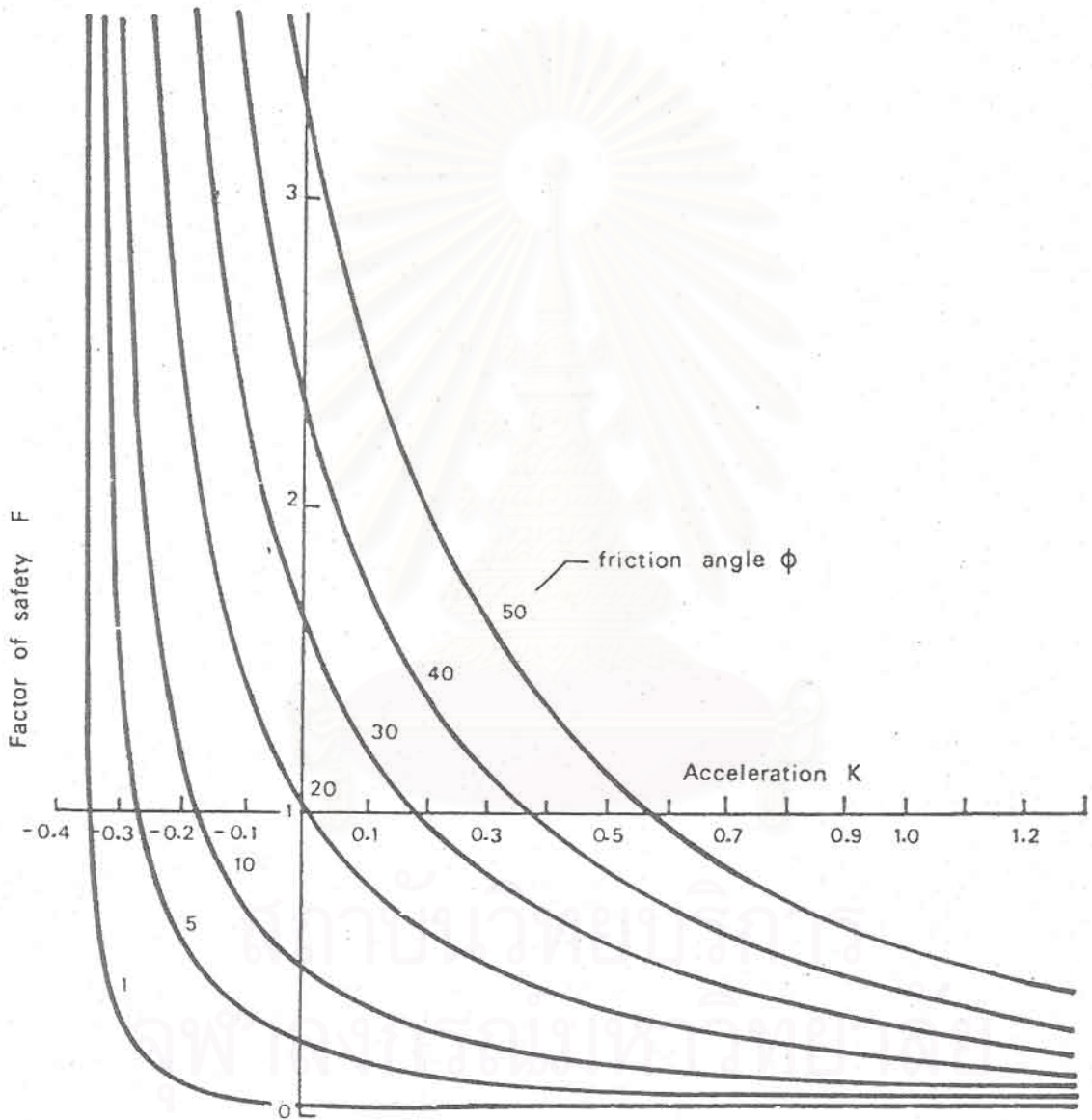
$$YT_i < YW_i \text{ and } YT_{i+1} < YW_{i+1}$$

$$P_{W_i} = \frac{1}{2} \gamma_w [(2YW_i - YT_i - YB_i)(YT_i - YB_i) / \cos \delta_i] \quad (111)$$

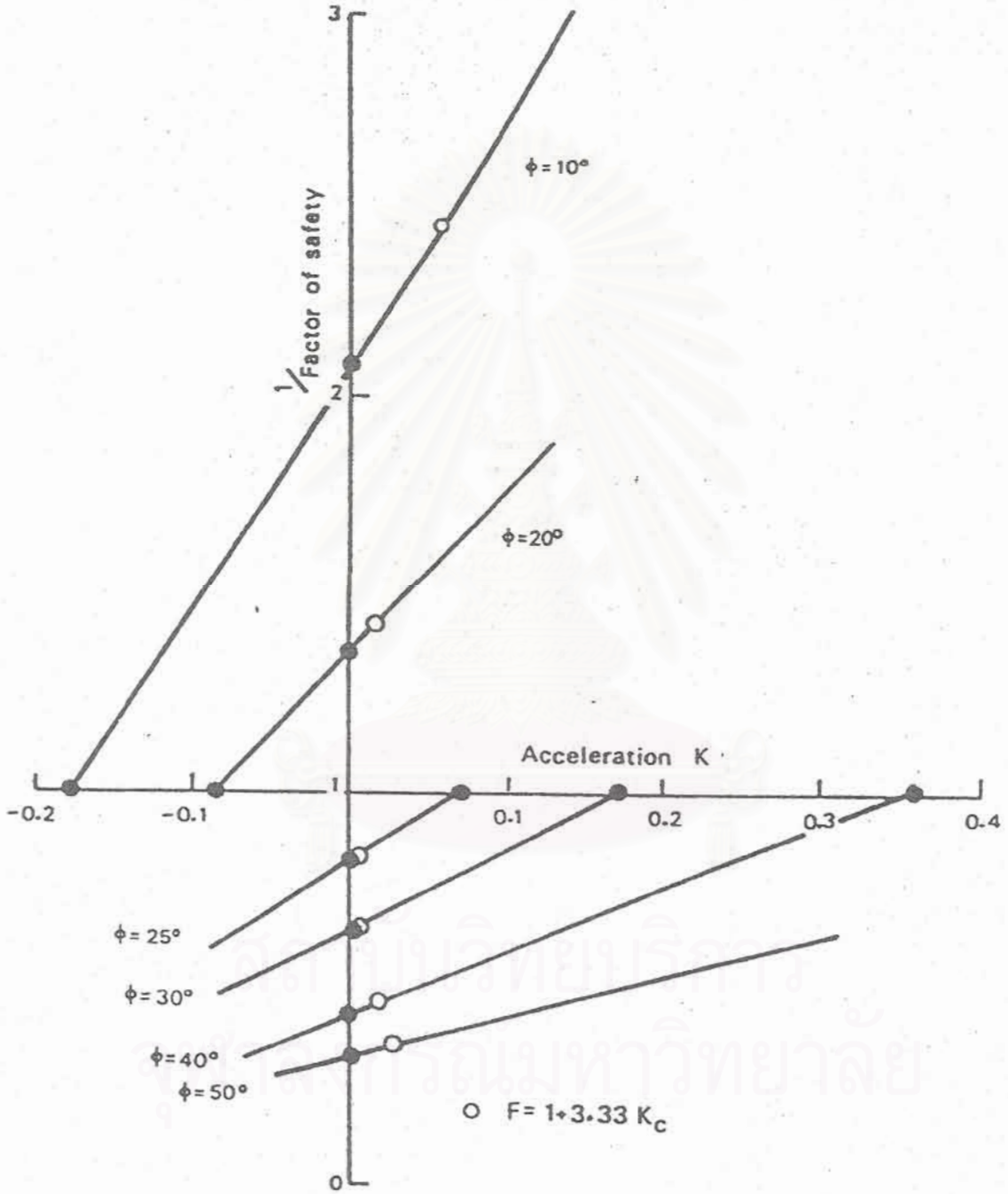
$$P_{W_{i+1}} = \frac{1}{2} \gamma_w [(2YW_{i+1} - YT_{i+1} - YB_{i+1})(YT_{i+1} - YB_{i+1}) / \cos \delta_{i+1}] \quad (112)$$

$$WW_i = \frac{1}{2} \gamma_w [(YW_i - YT_i + YW_{i+1} - YT_{i+1})(XT_{i+1} - XT_i)] \quad (113)$$

$$WH_i = \frac{1}{2} \gamma_w [(YW_i - YT_i + YW_{i+1} - YT_{i+1})(YT_{i+1} - YT_i)] \quad (114)$$



รูปที่ 30 ค่า factor of safety ที่แปรผันกับค่าความเร่ง
สำหรับ slope ทั่วไป



รูปที่ 31 การพลอตค่าส่วนกลับของ factor of safety ที่แปรผันกับค่าความเร่ง

4.1.4 แรงกระทำของน้ำกระทำต่อบนด้านของ Slice ด้านอันแรกและด้านอันสุดท้าย

ถึงแม้ว่าแรงดันน้ำ PW_i กระทำบนด้าน slice อันแรก และแรง PW_{n+1} กระทำบนด้านอันที่ $n+1$ (ซึ่งอาจเป็น tension crack) แรงดันเหล่านี้จะถูกคำนวณโดยสมการในหัวข้อ 4.1.3 แรงเหล่านี้ตามปกติแต่จะไม่ถูกใช้ในการคำนวณความเร่งวิกฤต (critical acceleration) แรงเหล่านี้จะสำคัญมาก เมื่อ slope toe นั้นจมน้ำ (submerged) หรือใน tension crack มีน้ำขังอยู่ และเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะคิดแรงเหล่านี้เสมือนแรงภายนอก โดยได้ความสัมพันธ์ของแรงในแนวดิ่งและแนวราบที่กระทำดังนี้

$$TV_1 = PW_1 \sin \delta_1 \quad (115)$$

$$TH_1 = PW_1 \cos \delta_1 \quad (116)$$

$$TV_n = PW_{n+1} \sin \delta_{n+1} \quad (117)$$

$$TH_n = PW_{n+1} \cos \delta_{n+1} \quad (118)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนทั้งหมดของ slices ที่ถูกใช้ในการคำนวณ

4.1.5 การคำนวณหาอัตราความเร่งวิกฤต K_c

ความเร่งวิกฤติของ K_c ที่ต้องการจะนำค่า slope เข้ามาอยู่ในสภาวะของ limiting equilibrium ซึ่งกำหนดค่า โดยให้

$$K_c = AE / PE \quad (119)$$

ส่วนค่าความสัมพันธ์อื่นๆ มีดังนี้

$$AE = a_n + a_{n-1}e_n + a_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + a_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2 \quad (120)$$

$$PE = p_n + p_{n-1}e_n + p_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + p_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2 \quad (121)$$

$$a_i = Q_i [(W_i + TV_i) \sin (\phi_{B_i} - \alpha_i) - TH_i \cos (\phi_{B_i} - \alpha_i) + R_i \cos \phi_{B_i} + S_{i+1} \sin (\phi_{B_i} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin (\phi_{B_i} - \alpha_i - \delta_i)] \quad (122)$$

$$p_i = Q_i W_i \cos (\phi_{B_i} - \alpha_i) \quad (123)$$

$$e_i = Q_i [(\cos (\phi_{B_i} - \alpha_i + \phi_{S_i} - \delta_i) / \cos \phi_{S_i}] \quad (124)$$

$$Q_i = \cos \phi_{S_{i+1}} / \cos (\phi_{B_i} - \alpha_i + \phi_{S_{i+1}} - \delta_{i+1}) \quad (125)$$

$$S_i = c_{S_i} d_i - P W_i \tan \phi_{S_i} \quad (126)$$

$$S_{i+1} = c_{S_{i+1}} d_{i+1} - P W_{i+1} \tan \phi_{S_{i+1}} \quad (127)$$

$$R_i = c_{B_i} b_i / \cos \alpha_i - U_i \tan \phi_{B_i} \quad (128)$$

4.1.6 การคำนวณค่า Factor of Safety

เมื่อค่าความเร่งวิกฤติ (critical acceleration, K_c) ของ slope ไม่เท่ากับศูนย์ จะคำนวณค่า static factor of safety โดยการลดค่ากำลังวัสดุเฉือน (shear strength) ทุกด้านของ sliding surfaces ทันทีทันใดจนกระทั่งได้ค่า K_c (หาได้จากสมการ 119) ที่มีการลดค่าจนเป็นศูนย์ และแทนค่าลงในสมการถัดมา (สมการที่ 122-128) โดยมีตัวแปรในเรื่องกำลังวัสดุเฉือน ดังนี้

$$c_{B_i} / F, \tan \phi_{B_i} / F, c_{S_i} / F, \tan \phi_{S_i} / F, c_{S_{i+1}} / F, \tan \phi_{S_{i+1}} / F$$

4.1.7 การทดสอบการยอมรับค่าของ Solution

เมื่อเราได้ทำการคำนวณค่า K สำหรับค่า factor of safety ที่กำหนดแล้ว แรงที่กระทำต่อด้านข้างและทางด้านฐานของแต่ละ slice สามารถสร้างโดยอาศัย progressive solution ของสมการดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากสภาวะที่รู้ค่าเริ่มต้นที่ $E_1 = 0$

$$E_{i+1} = a_i - p_i K + E_i e_i \quad (129)$$

$$X_i = (E_i - P W_i) \tan \phi_{S_i} + c_{S_i} d_i \quad (130)$$

$$N_i = [W_i + TV_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} + X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i + U_i \tan \phi_{B_i} \sin \alpha_i - c_{B_i} b_i \tan \alpha_i] \cos \phi_{B_i} / \cos (\phi_{B_i} - \alpha_i) \quad (131)$$

$$TS_i = (N_i - U_i) \tan \phi_{B_i} + c_{B_i} b_i / \cos \alpha_i \quad (132)$$

ผลของ effective normal stress ที่กระทำผ่านฐานและด้านข้างของ slice จะคำนวณได้ดังนี้

$$\sigma'_{B_i} = (N_i - U_i) \cos \alpha_i / b_i \quad (133)$$

$$\sigma'_{S_i} = (E_i - PW_i) / d_i \quad (134)$$

$$\sigma'_{S_{i+1}} = (E_{i+1} - PW_{i+1}) / d_{i+1} \quad (135)$$

และสำหรับการคำนวณ solution ที่ยอมรับได้ (acceptable) ค่า (effective normal stresses) ทั้งหมดที่ยอมรับได้จะต้องมีค่าบวก (+)

ในการตรวจสอบขั้นสุดท้ายที่จะคำนวณจากสภาพสมดุลเชิงโมเมนต์ (moment equilibrium conditions) ที่น่าพอใจในแต่ละ slice ได้ถูกกล่าวอ้างถึงโดย Sarma (1979) และแสดงไว้ในรูปที่ 28 และทำการ take moments รอบจุดมุมซ้ายด้านล่างของ slice จะได้

$$\begin{aligned} N_i l_i - X_{i+1} b_i \cos(\alpha_i + \delta_{i+1}) / \cos \alpha_i - E_i Z_i \\ + E_{i+1} [Z_{i+1} + b_i \sin(\alpha_i + \delta_{i+1}) / \cos \alpha_i] \\ - W_i (XG_i - X_{B_i}) + K_c W_i (YG_i - Y_{B_i}) - TV_i (X_i - XG_i) \\ + TH_i (Y_i - YG_i) = 0 \end{aligned} \quad (136)$$

เมื่อ XG_i , YG_i เป็นจุดพิกัดของจุดศูนย์กลางความถ่วง (center of gravity) ของ slice และค่า X_i , Y_i เป็นจุดพิกัดที่ถูกกำหนดด้วยแรงกระทำ T_i

การคำนวณเริ่มจาก slice ชั้นแรกนับจาก toe ของพื้นลาดเอียงหรือตำแหน่ง ที่ $Z_1 = 0$ โดยประมาณค่าของ I_p และแกนโมเมนต์ Z_{i+1} สามารถคำนวณได้ หรือกรณีอื่น ก็ใช้ได้ ค่าของ Z_i และ Z_{i+1} ควรจะอยู่ระหว่าง slice boundary โดยนิยมกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง middle third

4.1.8 การใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์โดยวิธีของ Sarma

ในตัวโปรแกรมวิเคราะห์ข้างต้นนั้น สามารถดูได้จาก source code ที่เขียนเป็น ภาษา C ตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักของตัวโปรแกรมคือ ค่าความปลอดภัยที่ถูกกำหนดลงใน สมการจนค่า shear strength ค่อยๆ ลด (หรือเพิ่มขึ้น) จนกระทั่งได้ค่า static factor of safety (สำหรับค่า $K = 0$) จากประสบการณ์ที่เกิดขึ้นในการแทนค่าซ้ำๆ แบบ iteration ลงในสมการเดิมบ่อยๆ เป็นกระบวนการที่น่าเบื่อหน่าย และก่อให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่ายหรือ เกิดมีเลขที่ใช้ในเรื่องไม่เสถียรภาพ (numerical instability) ถ้าเลือกค่า F ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงนำเทคนิคการแทนค่าซ้ำๆ ดังกล่าวมาลงในโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณหาค่า

รูปที่ 30 แสดงถึงค่าของ factor of safety, F เทียบกับค่าความเร่ง K สำหรับ ในช่วงของมุมแรงเสียดทานภายใน (internal friction angle) ในการวิเคราะห์ slope ในรูปที่ 30 แสดงให้เห็นว่า เส้นโค้งของ F เมื่อเทียบกับ K จะอยู่ในรูปที่ใกล้เคียงกับ rectangular hyperbola และระบุให้ทราบว่า การพลอตเส้นโค้ง $1/F$ เมื่อเทียบกับ K ควรจะต้องเป็น เส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 31 และจะเป็นสมมุติฐานที่ยอมรับได้ในช่วงหนึ่ง ตัวอย่างเช่น จาก ค่า $K = K_c$ ถึงค่า $K = 0$ ถึงแม้ว่าค่า K จะมากหรือน้อยจะได้เส้นโค้งที่ไม่ใช่เส้นตรง จากการสังเกตพบว่าเป็นความจริงสำหรับการวิเคราะห์ค่าในช่วงกว้างๆ

Sarma และ Bhave (1974) ได้ลองทำการพลอตค่าของความเร่งวิกฤต, K_c เทียบกับค่า static factor of safety, F พบว่าจะได้ความสัมพันธ์ประมาณใกล้เคียงกับสมการ เส้นตรง

$$F = 1 + 3.33 K_c \quad (137)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างบนนี้ จะไม่ค่อยถูกต้องแม่นยำสำหรับปัญหาที่ช่วงตัวเลขช่วงกว้าง แต่ก็มีประโยชน์ที่จะได้จุด (point) ที่ใกล้กับค่า $K = 0$ บนแกนที่ทำการพลอตระหว่าง $1/F$ กับ K (ดังรูปที่ 31)

จากการทำ linear interpolation หรือ ทำ extrapolation อาศัยจุดนี้และที่ค่าของ K_c (ที่ $F=1$) จะให้การประมาณที่ใกล้เคียงกับ static factor of safety วิธีการทำโดยใช้ เทคนิคแบบนี้ได้พิสูจน์แล้วว่าเร็วและมีประสิทธิภาพสำหรับการหากรณีวิกฤต (critical case) ของค่าความเร่ง

4.1.9 ขั้นตอนในการคำนวณเมื่อใช้โปรแกรม Sarma

ในการเขียนโปรแกรมภาษา C เพื่อวิธีการพังทลายรูปลิ้มของ Sarma มีขั้นตอนในการคำนวณซ้ำ โดยอาศัยค่า factor of safety (F หรือ source code ในโปรแกรมใช้ FOS) กับค่า acceleration (K) มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ factor of safety (F) มีค่าเท่ากับ 1
2. คำนวณค่าต่าง ๆ ตามสมการ เพื่อหาค่า K_1
3. หา F ใหม่จากความสัมพันธ์ $F = 1 + 3.33 K_1$
4. กลับมาคำนวณค่า K ใหม่ตามข้อ 2 กำหนดให้ K ตัวแรกเป็น K_1 ส่วนค่า K ใหม่เป็น K_2
5. คำนวณค่า $1/F_2$ จากสมการ

$$\frac{1}{F_2} = 1 - \frac{K_1 \left\{ 1 - \frac{1}{F_1} \right\}}{[K_1 - K_2]} \quad (138)$$

6. แล้วกลับส่วนหาค่าของ F_2 ถ้าหากความแตกต่างของ F_2 กับ F_1 น้อยกว่า 0.001 ก็ถือว่าค่า factor of safety ยอมรับได้

4.2 การวิเคราะห์ห่มวลหินรูปลิ้มที่พังทลายบนพื้นผิวเป็นรูปลิ้มด้วยวิธี

Hoek and Bray

การวิเคราะห์ surface wedge ด้วยวิธีของ Hoek and Bray (1977) นั้นใช้สมมุติฐานของรูป tetrahedral wedge ที่แก้ปัญหาเชิง analytical solution ที่มีวิธีการวิเคราะห์ โดยใช้เวกเตอร์ของแรง

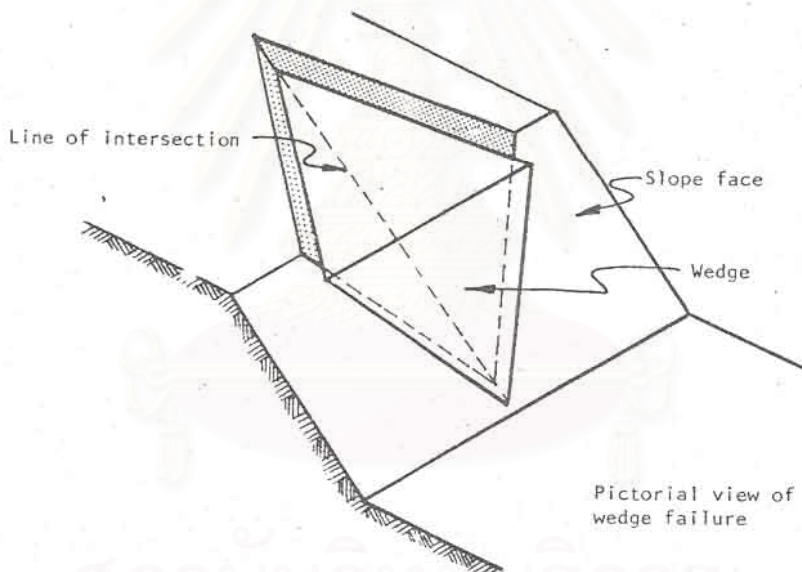
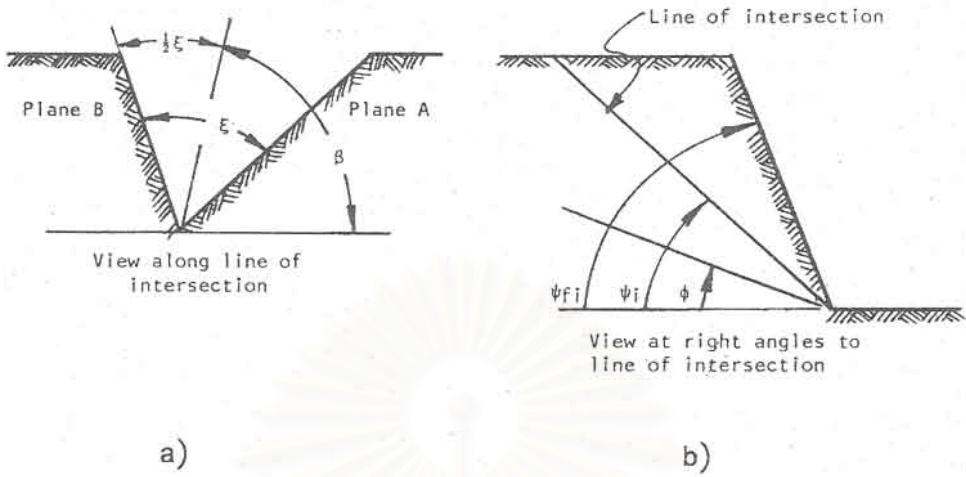
4.2.1 ขอบเขตและเงื่อนไขของการพังทลาย

เงื่อนไขของการพังทลายแบบรูปลิ้มนี้มีข้อจำกัด ดังนี้

1. มวลสารรูปลิ้ม (wedge mass) มีรูปร่างแบบ Tetrahedral Wedge
2. ระนาบของความไม่ต่อเนื่อง (เช่น joint, bedding plane) ต้องตัดกันเป็นมุมแหลม
3. มุมเอียงของ slope face จะต้องมากกว่ามุมเอียงของ line of intersection (ดูรูปที่ 32) และทั้งสองมุมนี้จะต้องมากกว่ามุมของความเสียดทานภายใน นั่นคือ

$$\psi_{ii} > \psi_i > \phi$$

4. ค่า Parameters ของระนาบที่สัมผัสกับรูปลิ้มไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันทั้ง 2 ระนาบ
5. การเลื่อนไถลเกิดในแนวของ line of intersection ระหว่าง 2 ระนาบเป็นแบบ การเลื่อนไถลตามแนวระนาบ (translation slip) เท่านั้น โดยมวลหินรูปลิ้มจะต้องสัมผัสกับพื้นผิวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง (ดูรูปที่ 33 หน้า 73)
6. การแก้ปัญหาวีธีนี้ สามารถหาค่ากำลังวัสดุและความดันน้ำที่แตกต่างกันของระนาบที่เปราะบางของทั้ง 2 ระนาบ
7. การแก้ปัญหาวีธีนี้ ไม่มีข้อจำกัดให้ระนาบทางด้านบนของรูปลิ้มต้องอยู่ในแนวระดับ (horizontal) นั่นคือ รูปลิ้มสามารถจะมีความลาดเอียงได้
8. อิทธิพลของแรงภายนอกที่จะใช้เพื่อเสริมเสถียรภาพ เช่น Cable Bolt ได้นำมาคิดด้วย เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเสริมเสถียรภาพให้น้อยที่สุด
9. อิทธิพลของ External Load อื่นๆ ถ้ารู้ทิศทางก็สามารถนำมาคำนวณรวมได้ เช่น Blast Acceleration
10. ในส่วนของ Input Data จะใช้ค่าเฉลี่ยจากภาคสนาม
11. ในระหว่างการคำนวณสามารถจะสลับระนาบ 1 กับระนาบ 2 ได้
12. ระนาบที่เปราะบางนี้อาจมีระนาบหนึ่งวางตัวซ้อน (overlying) ทับบนอีกระนาบหนึ่งได้
13. มีโอกาสที่ส่วนยอด (crest) ของรูปลิ้ม overhang ส่วนฐาน (base) ของพื้นลาดเอียง
14. มีโอกาสที่บางช่วงของระนาบอาจจะไม่สัมผัสกับมวลหินรูปลิ้ม
15. ในการแก้ปัญหานี้ ระนาบของรอยแยกแนวดึง (tension crack plane) จะตัดกับมวลหินรูปลิ้มมีผลทำให้เกิดการพังทลายของมวลหินรูปลิ้มได้ ดังแสดงในรูปที่ 34

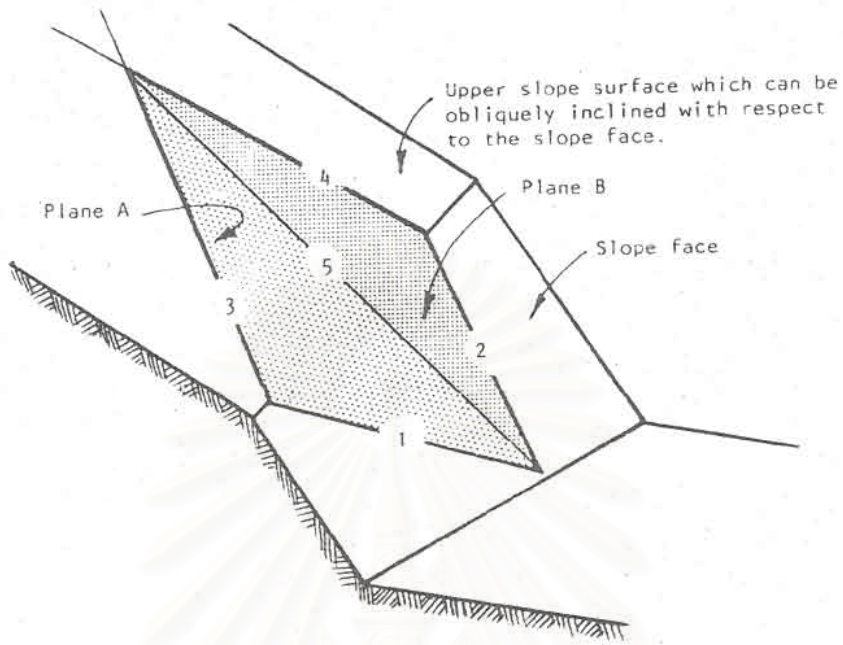


Note : The convention adopted in this analysis is that the plane with the flatter of the two dips is always referred to as Plane A

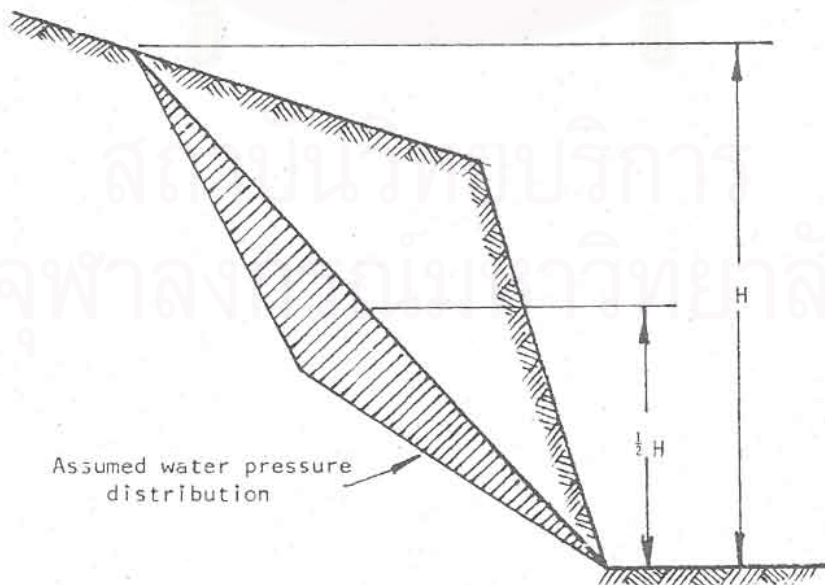
รูปที่ 32 รูปแบบเรขาคณิตของการพังทลายแบบรูปลิ่ม

- a) เป็นการมองตาม line of intersection
- b) เป็นการมองตั้งฉาก line of intersection
- c) รูปแบบ 3 มิติ

หมายเหตุ คำอธิบายสัญลักษณ์ต่างๆ ได้แสดงไว้แล้วในหน้าพิเศษ



รูปที่ 33 การมองแบบ pictorial view ของรูปลิ่ม
ที่แสดงระนาบและเส้นตัดต่างๆ



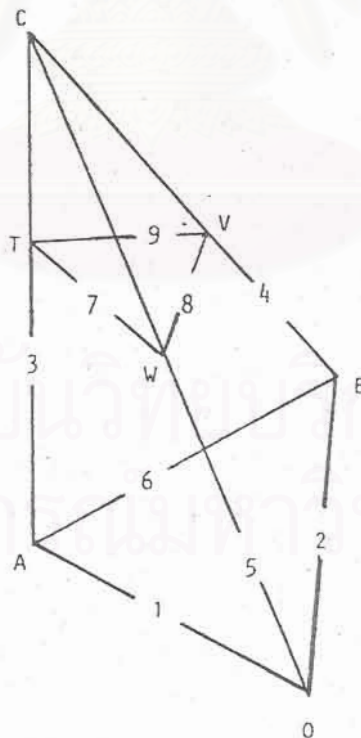
รูปที่ 34 การมองในแนวที่ตั้งฉาก line of intersection หมายเลข 5 (ของรูปที่ 33)
แสดงถึงความสูงของลิ่มและ water pressure distribution

4.2.2 การหาพื้นที่และปริมาตรของรูปลิ่ม

การตรวจสอบหาพื้นที่และปริมาตรรูปลิ่มที่เกิดจากกระนาบสองระนาบตัดกัน จะทำให้สามารถหาน้ำหนักของลิ่ม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลตามความโน้มถ่วงโลก

วิธีการคำนวณจะอาศัยจากความยาวของเส้นต่างๆ แสดงเป็นเลขอาระบิก ที่ประกอบเป็นรูปลิ่มแล้วคำนวณหาพื้นที่อีกครั้งหนึ่ง ไดอะแกรมของเส้นต่างๆได้แสดงไว้ในรูปที่ 35 ในรูปนี้ได้แสดงถึงกระนาบสองระนาบตัดกันเป็นรูปลิ่มและมีรอยแยกแนวตั้ง (vertical tension crack) ที่เกิดบนพื้นผิวลาดเอียงด้านบนบน (upper slope surface)

ความสัมพันธ์ของพื้นที่และปริมาตรรูปลิ่ม มีดังนี้



รูปที่ 35 ไดอะแกรมที่แสดงโดยใช้ความยาวของเส้นต่างๆ ที่ประกอบกันเป็นรูป wedge, tension crack และ slope face

พื้นที่ ATWO บนระนาบ A (รูปที่ 35)

$$A_A = \frac{1}{2} \cdot \left\{ AC^2 \cdot \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{15}} - TC^2 \cdot \frac{\sin \theta_{37}}{\sin \theta_{57}} \cdot \sin \theta_{35} \right\} \quad (139)$$

พื้นที่ BVWO บนระนาบ B (รูปที่ 35)

$$A_B = \frac{1}{2} \cdot \left\{ AC^2 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{13} \cdot \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \cdot \sin \theta_{24}} - TC^2 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{37} \cdot \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \cdot \sin \theta_{48}} \right\} \cdot \sin \theta_{45} \quad (140)$$

พื้นที่ TVW ของรอยแตกแนวตั้ง

$$A_T = \frac{1}{2} \cdot CT^2 \cdot \frac{\sin \theta_{34} \cdot \sin \theta_{35} \cdot \sin \theta_{79}}{\sin \theta_{49} \cdot \sin \theta_{57}} \quad (141)$$

น้ำหนักของลิ้ม = (หน่วยน้ำหนักของวัตถุ, γ) (ปริมาตร AOBVTW)

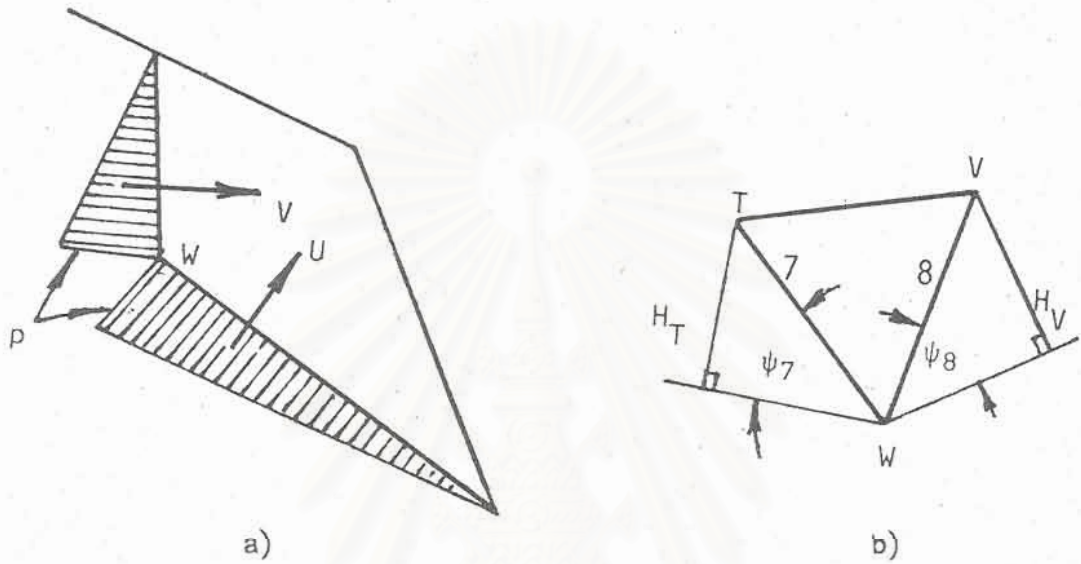
$$W = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot K \cdot \left\{ AC^3 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{13} \cdot \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \cdot \sin \theta_{24}} - TC^3 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{37} \cdot \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \cdot \sin \theta_{48}} \right\} \quad (142)$$

ซึ่งค่า K นี้กำหนดให้เท่ากับ

$$K = \left\{ 1 - \cos^2 \theta_{34} - \cos^2 \theta_{35} - \cos^2 \theta_{45} + 2 \cos \theta_{34} \cdot \cos \theta_{35} \cdot \cos \theta_{45} \right\}^{0.5} \quad (143)$$

4.2.3 แรงที่เกิดเนื่องจากความดันน้ำ

การวิเคราะห์ความดันน้ำได้แสดงไว้ในรูปที่ 36 จะเห็นว่าความดันน้ำจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลึก จนได้ความดันสูงสุด (p) ที่จุด W (ตามรูปที่ 35 นั้น W คือ จุดตัดของรอยแยกแนวตั้งกับ line of intersection - OC)

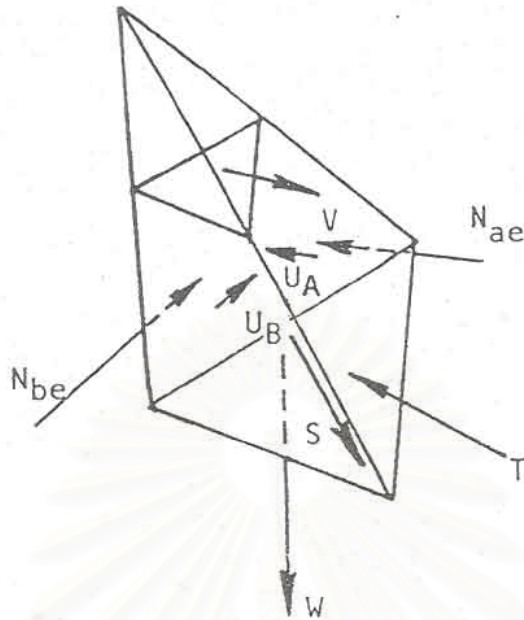


รูปที่ 36 ภาพสเกตช์ของความดันน้ำที่กระทำต่อระนาบ
ของ tension crack ในลักษณะของ free diagram
ของแรง (รูป a) กับค่ามุมต่างๆ (รูป b)

ดังนั้น ความดันน้ำ (\$p\$) จะได้ค่า

$$p = \gamma_w \cdot \frac{TC}{2} \cdot \frac{\sin \theta_{35}}{\sin \theta_{57}} \cdot \left\{ \sin \psi_7 + \frac{\sin \theta_{79}}{\sin \theta_{89}} \sin \psi_8 \right\} \quad (144)$$

การเพิ่มความดันน้ำและความดันอื่นๆ (ถ้าจะมี) จะมีผลทำให้ได้ค่า factor of safety เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 37 ไดอะแกรมของแรงที่กระทำต่อมวลสารรูปสามเหลี่ยม
ในรูปนี้เน้นเฉพาะแรงดันน้ำและแรงยกตัว

ในรูปที่ 36 แรง V ที่เกิดเนื่องจากความดันน้ำในรอยแยกแนวตั้งได้กำหนดให้มาจากปริมาตรของพีระมิดที่เกิดเนื่องจากความดัน P ทำที่จุด W (ความดันมีค่าศูนย์ที่จุด T และ V) บนพื้นที่ A_T ของบนพื้นผิวรอยแยกแนวตั้ง ดังนั้น

$$V = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_T \quad (145)$$

ถ้าหากสมมุติว่าความดันน้ำได้กระทำเต็มที่บนระนาบ A และ B (ซึ่งตัวลิ่มวางตัวอยู่) ดังนั้นจะเกิดแรงยกตัว U_A และ U_B (ดูรูปที่ 37)

แรงยกตัว U_A และ U_B นี้ได้มาจากปริมาตรที่แสดงในรูปที่ 35 โดยได้จากความดัน p กระทำที่จุด W บนพื้นที่ A_A และ A_B ความดันตามแนว free faces ต่างๆ ตามแนว AT, VB, AO และ OB (ของรูปที่ 35) มีค่าเป็นศูนย์

$$U_A = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_A \quad (146)$$

$$U_B = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_B \quad (147)$$

4.2.4 การแก้ไขปัญหาของแรงต่าง ๆ

แรงต่าง ๆ ที่กระทำบนมวลสารรูปลิ่มนี้สามารถจะทำการ resolution of forces ได้ตามสเก็ทซ์ของรูปที่ 37

เมื่อพิจารณาต่อรูปแบบเรขาคณิตของลิ่ม เพื่อหาแรงต่าง ๆ มุมเทของแรง และแนวเทของแรง ตามที่ได้จัดไว้ในตารางที่ 4 ในหน้าถัดไป

ตารางที่ 4 แรงต่าง ๆ และทิศทางที่กระทำบนมวลสารที่เป็นหินรูปลิ่ม

แรงต่าง ๆ	มุมเท	แนวมุมเท
1. น้ำหนักของลิ่ม, W	90°	หาไม่ได้
2. ปฏิกริยาของแรงตั้งฉากประสิทธิผล (effective normal reaction) บนระนาบ A, N _{ae}	(ψ _a - 90°)	α _a
3. ปฏิกริยาของแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบ B, N _{be}	(ψ _b - 90°)	α _b
4. แรงเนื่องจากน้ำแทรกในรอยแยกแนวตั้ง, V	(ψ _t - 90°)	α _t
5. แรงภายนอกเนื่องจาก cable anchor หรือ rock bolt, T	ψ _T	α _T
6. แรงที่กระทำในแนวเส้นของการเลื่อนไถล, S	ψ _s	α _s

4.2.5 การหาค่าปัจจัยของความปลอดภัย

ปัจจัยของความปลอดภัยของ slope สามารถหาได้จากอัตราส่วนของแรงต้านทาน/แรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล ดังนั้น

$$F = \frac{c_A A_A + c_B A_B + (qW + rV + sT - U_A) \cdot \tan \phi_A + (xW + yV + zT - U_B) \cdot \tan \phi_B}{m_{w,5} \cdot W + m_{v,5} \cdot V + m_{T,5} \cdot T}$$

4.2.6 หาค่าแรงภายนอกที่มาเสริมเสถียรภาพ

เมื่อต้องการหา load ต่ำสุดที่เป็นแรงกระทำภายนอกเพื่อมาเสริมเสถียรภาพ เช่น ใช้ cable

จัดเทอมต่างๆเพื่อหาค่าปัจจัยของความปลอดภัยในรูปแบบของ cable load, T:

$$T = \frac{c_A A_A + c_B A_B + (qW + rV - U_A) \cdot \tan \phi_A + (xW + yV - U_B) \tan \phi_B - F(W \cdot m_{w.5} + m_{v.5} \cdot V)}{F \cdot m_{T.5} - (s \tan \phi_A + z \tan \phi_B)} \quad (149)$$

เพื่อหามุมเอียง ψ_T (มุมที่จะติดตั้ง โดยที่ cable ψ_T มุมนี้ทำกับแนวราบ) จึงทำการ differentiate สำหรับ T ในเทอมของ ψ_T และ equate ให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\tan \psi_T = \frac{X \cdot \tan \psi_5 - Y \cdot \cot \psi_a - Z \cdot \cot \psi_b}{X \cdot \cos (\alpha_5 - \alpha_T) + Y \cdot \cos (\alpha_T - \alpha_a) + Z \cdot \cos (\alpha_T - \alpha_b)} \quad (150)$$

ทำการ differentiate เทอม $\tan \psi_T$ เมื่อเทียบกับ α_T แล้ว equate ให้ได้เท่ากับศูนย์ เพื่อหา optimum direction ของ cable จะได้ว่า

$$\tan \alpha_T = \frac{X \cdot \sin \alpha_5 + Y \cdot \sin \alpha_a + Z \cdot \sin \alpha_b}{X \cdot \cos \alpha_5 + Y \cdot \cos \alpha_a + Z \cdot \cos \alpha_b} \quad (151)$$

โดยที่

$$X = (1 - m_{na.nb}^2) F \cdot \cos \psi_5$$

$$Y = (\tan \phi_A - m_{na.nb} \cdot \tan \phi_B) \sin \psi_a$$

$$Z = (\tan \phi_B - m_{na.nb} \cdot \tan \phi_A) \sin \psi_b$$

ข้อสังเกต

ถ้าหากทำการแก้สมการ (150) และ (151) จะได้ค่าหลายค่าสำหรับ ψ_T และ α_T สำหรับค่า ψ_T และ α_T ที่ถูกต้องได้มาจากการตรวจสอบค่าที่ใกล้เคียงดังนี้ :

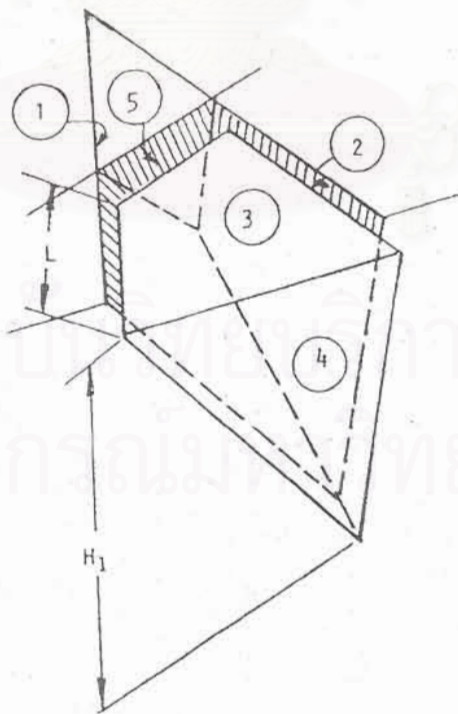
$$\psi_T \simeq \left\{ \psi_5 + 180^\circ - \frac{1}{2} (\phi_A + \phi_B) \right\} \quad (152)$$

และ

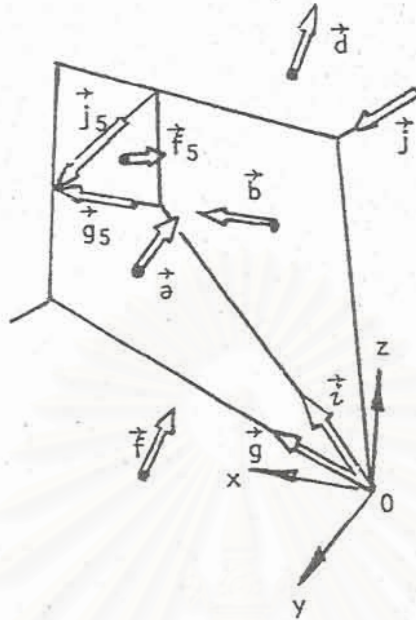
$$\alpha_T \simeq \alpha_5 \pm 180^\circ \quad (153)$$

4.2.7 การแก้ปัญหาโดยอาศัย Comprehensive Solution

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้สามารถหาได้จากระนาบที่มีค่า Parameters ต่างกัน หรือมีอิทธิพลของน้ำและแรงภายนอกที่เข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 38 รูปแบบเรขาคณิตของการพังหลายรูปลิมที่ใช้กับ Comprehensive Solution



รูปที่ 39 ไดอะแกรมที่แสดงภาพระนาบที่เปราะบางต่างๆ และเวกเตอร์ของแรงต่างๆที่เกี่ยวข้อง

1. สัญกรณ์ (Notation) ของ Comprehensive Solution

รูปแบบเรขาคณิตของการแก้ปัญหาสำหรับการพังทลายรูปลิ้ม ได้แสดงภาพสเก็ตซ์ของระนาบต่างๆ ไว้ในรูปที่ 38 และแสดงเวกเตอร์ของแรงต่างๆไว้ในรูปที่ 39

(ก) ระนาบที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 38 จะเห็นว่า ระนาบเปราะบาง (weakness plane) ที่จัดเป็นระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย (failure surfaces) ได้กำหนดให้เป็นระนาบหมายเลข 1 กับหมายเลข 2 ส่วนระนาบที่อยู่บนพื้นผิวด้านบน (upper ground surface) ได้แก่ ระนาบหมายเลข 3 สำหรับระนาบของพื้นลาดเอียง (slope face) ได้แก่ ระนาบหมายเลข 4 และระนาบของรอยแยกแนวตั้ง (tension crack plane) ได้แก่ ระนาบหมายเลข 5

(ข) ข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าไปในโปรแกรม (input data)

ข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าเพื่อเป็น input data สำหรับ Comprehensive Solution นี้ ได้แก่

- ψ, α = dip and dip direction of plane or plunge and trend of force
- H_1 = slope height referred to plane 1
- L = distance of tension crack from crest, measured along the trace of plane 1
- u = average water pressure on face of wedge
- c = cohesive strength of each failure plane
- ϕ = angle of friction of each failure plane
- γ = unit weight of rock (material)
- γ_w = unit weight of water
- T = cable of bolt tension
- E = external load
- η = -1 if slope is overhanging and
+1 if slope does not overhang

(ค) พจน์ (terms) อื่นที่ใช้ใน Solution

- F = factor of safety against sliding along the line of intersection or on plane 1 or on plane 2
- A = area of face of wedge
- W = weight of wedge
- V = water thrust on tension crack face
- N_a = total normal force on plane 1
(when contact is maintained on plane 1 only)

- S_a = shear force on plane 1
(when contact is maintained on plane 1 only)
- Q_a = shear resistance on plane 1
(when contact is maintained on plane 1 only)
- F_1 = factor of safety
(when contact is maintained on plane 1 only)
- N_b = total normal force on plane 2
(when contact is maintained on plane 2 only)
- S_b = shear force on plane 2
(when contact is maintained on plane 2 only)
- F_2 = factor of safety
(when contact is maintained on plane 2 only)
- N_1, N_2 = effective normal reactions
(when contact is maintained on both planes 1 and 2)
- S = total shear force on planes 1 and 2
(when contact is maintained on both planes 1 and 2)
- Q = total shear resistance on planes 1 and 2
(when contact is maintained on both planes 1 and 2)
- F_3 = factor of safety
(when contact is maintained on both planes 1 and 2)
- N_1', N_2' = values of N_1, N_2, S , etc. when $T = 0$
(similar to S' , etc.)
- N_1'', N_2'' = values of N_1, N_2, S , etc. when $T = 0$
(similar to S'' , etc.)

- \vec{a} = unit normal vector for plane 1
- \vec{b} = unit normal vector for plane 2
- \vec{d} = unit normal vector for plane 3
- \vec{f} = unit normal vector for plane 4
- \vec{f}_5 = unit normal vector for plane 5
- \vec{g} = vector in the direction of intersection line of 1, 4
- \vec{g}_5 = vector in the direction of intersection line of 1, 5
- \vec{i} = vector in the direction of intersection line of 1, 2
- \vec{j} = vector in the direction of intersection line of 3, 4
- \vec{j}_5 = vector in the direction of intersection line of 3, 5
- \vec{k} = vector in plane 2 normal to \vec{i}
- \vec{l} = vector in plane 1 normal to \vec{i}
- R = magnitude of vector \vec{i}
- G = square of magnitude of vector \vec{g}
- G_5 = square of magnitude of vector \vec{g}_5

Note

1) The computed value of V is negative when the tension crack dips away from the toe of the slope but this situation does not indicate a tensile force.

2) The expressions for α_1 , α_{e1} , α_{e2} , α_{e3} , α_{t1} , α_{t2} and α_{t3} in which occur later in the solution are normally evaluated by desk top calculators. For this reason, $-V$ should not be cancelled out in equation 200 for α_1 .

2. ขั้นตอนของการคำนวณ

ขั้นตอนของการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยแบ่งออกเป็น ขั้นตอนสำหรับหาค่าปัจจัยของความปลอดภัยทั่วไป ขั้นตอนสำหรับการหาค่าปัจจัยของความปลอดภัยที่ต่ำสุดเมื่อมีโหลดภายนอกกระทำ และขั้นตอนสำหรับการเพิ่มเสถียรภาพโดยใช้ tension ต่ำสุดเพื่อป้องกันการพังทลาย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) การคำนวณขั้นตอนที่ 1

ในขั้นตอนนี้จะหาค่าปัจจัยของความปลอดภัย (Factor of Safety : F) เมื่อมีแรงภายนอกกับแรงที่เสริมเสถียรภาพเป็นศูนย์ ($T = E = 0$) หรือสามารถกำหนดขนาดและทิศทางของ T และ E เฉพาะขั้นตอนที่ 1 นี้ได้แยกรายละเอียดไว้แต่ละหัวข้อตามลำดับตั้งแต่หัวข้อ a ถึงหัวข้อ m หรือตามสมการที่ 154 ถึงสมการที่ 233

a) Components of unit vectors in directions of normals to planes 1 to 5, and of forces T and E.

$$(a_x, a_y, a_z) = (\sin \psi_1 \cdot \sin \alpha_1, \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1, \cos \psi_1) \quad (154)$$

$$(b_x, b_y, b_z) = (\sin \psi_2 \cdot \sin \alpha_2, \sin \psi_2 \cdot \cos \alpha_2, \cos \psi_2) \quad (155)$$

$$(d_x, d_y, d_z) = (\sin \psi_3 \cdot \sin \alpha_3, \sin \psi_3 \cdot \cos \alpha_3, \cos \psi_3) \quad (156)$$

$$(f_x, f_y, f_z) = (\sin \psi_4 \cdot \sin \alpha_4, \sin \psi_4 \cdot \cos \alpha_4, \cos \psi_4) \quad (157)$$

$$(f_{5x}, f_{5y}, f_{5z}) = (\sin \psi_5 \cdot \sin \alpha_5, \sin \psi_5 \cdot \cos \alpha_5, \cos \psi_5) \quad (158)$$

$$(t_x, t_y, t_z) = (\cos \psi_t \cdot \sin \alpha_t, \cos \psi_t \cdot \cos \alpha_t, -\sin \psi_t) \quad (159)$$

$$(e_x, e_y, e_z) = (\cos \psi_e \cdot \sin \alpha_e, \cos \psi_e \cdot \cos \alpha_e, -\sin \psi_e) \quad (160)$$

b) Components of vectors in the direction of the lines of intersection of various planes.

$$(g_x, g_y, g_z) = (f_y a_z - f_z a_y), (f_z a_x - f_x a_z), (f_x a_y - f_y a_x) \quad (161)$$

$$(g_{5x}, g_{5y}, g_{5z}) = (f_{5y}a_z - f_{5z}a_y), (f_{5z}a_x - f_{5x}a_z), (f_{5x}a_{5y} - f_{5y}a_x) \quad (162)$$

$$(i_x, i_y, i_z) = (b_y a_z - b_z a_y), (b_z a_x - b_x a_z), (b_x a_y - b_y a_x) \quad (163)$$

$$(j_x, j_y, j_z) = (f_y d_z - f_z d_y), (f_z d_x - f_x d_z), (f_x d_y - f_y d_x) \quad (164)$$

$$(j_{5x}, j_{5y}, j_{5z}) = (f_{5y} d_z - f_{5z} d_y), (f_{5z} d_x - f_{5x} d_z), (f_{5x} d_y - f_{5y} d_x) \quad (165)$$

$$(k_x, k_y, k_z) = (l_y b_z - l_z b_y), (l_z b_x - l_x b_z), (l_x b_y - l_y b_x) \quad (166)$$

$$(l_x, l_y, l_z) = (a_y l_z - a_z l_y), (a_z l_x - a_x l_z), (a_x l_y - a_y l_x) \quad (167)$$

c) Numbers proportional to cosines of various angles:

$$m = g_x d_x + g_y d_y + g_z d_z \quad (168)$$

$$m_5 = g_{5x} d_x + g_{5y} d_y + g_{5z} d_z \quad (169)$$

$$n = b_x j_x + b_y j_y + b_z j_z \quad (170)$$

$$n_5 = b_x j_{5x} + b_y j_{5y} + b_z j_{5z} \quad (171)$$

$$p = i_x d_x + i_y d_y + i_z d_z \quad (172)$$

$$q = b_x g_x + b_y g_y + b_z g_z \quad (173)$$

$$q_5 = b_x g_{5x} + b_y g_{5y} + b_z g_{5z} \quad (174)$$

$$r = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (175)$$

$$s = a_x t_x + a_y t_y + a_z t_z \quad (176)$$

$$v = b_x t_x + b_y t_y + b_z t_z \quad (177)$$

$$w = i_x t_x + i_y t_y + i_z t_z \quad (178)$$

$$s_e = a_x e_x + a_y e_y + a_z e_z \quad (179)$$

$$v_e = b_x e_x + b_y e_y + b_z e_z \quad (180)$$

$$w_e = i_x e_x + i_y e_y + i_z e_z \quad (181)$$

$$s_5 = a_x f_{5x} + a_y f_{5y} + a_z f_{5z} \quad (182)$$

$$v_5 = b_x f_{5x} + b_y f_{5y} + b_z f_{5z} \quad (183)$$

$$w_5 = i_x f_{5x} + i_y f_{5y} + i_z f_{5z} \quad (184)$$

$$\lambda = i_x g_x + i_y g_y + i_z g_z \quad (185)$$

$$\lambda_5 = i_x g_{5x} + i_y g_{5y} + i_z g_{5z} \quad (186)$$

$$\varepsilon = f_x f_{5x} + f_y f_{5y} + f_z f_{5z} \quad (187)$$

d) Miscellaneous factors.

$$R = (1 - r^2)^{0.5} \quad (188)$$

$$\rho = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{nq}{|nq|} \quad (189)$$

$$\mu = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{mq}{|mq|} \quad (190)$$

$$v = \frac{1}{R} \cdot \frac{p}{|p|} \quad (191)$$

$$G = g_x^2 + g_y^2 + g_z^2 \quad (192)$$

$$G_5 = g_{5x}^2 + g_{5y}^2 + g_{5z}^2 \quad (193)$$

$$M = (G_p^2 - 2 |mp| \lambda + m^2 R^2)^{0.5} \quad (194)$$

$$M_5 = \left(G_{5p}^2 - 2 |m_5 p| \lambda_5 + m_5^2 R^2 \right)^{0.5} \quad (195)$$

$$h = H_1 / |g_2| \quad (196)$$

$$h_5 = (Mh - |p| L) / M_5 \quad (197)$$

$$B = (\tan^2 \phi_1 + \tan^2 \phi_2 - 2(\mu r / \rho) \tan \phi_1 \tan \phi_2) / R^2 \quad (198)$$

e) Plunge and trend of line of intersection of planes 1 and 2.

$$\psi_i = \arcsin (v_i)_z \quad (199)$$

$$\alpha_i = \arctan (-v_i)_x / (-v_i)_y \quad (200)$$

f) Check on wedge geometry.

No wedge is formed,
terminate computation. $\begin{cases} \text{if } p_i z < 0, \text{ or} \\ \text{if } \eta q_i z < 0 \end{cases} \quad (201)$

$$\begin{cases} \text{if } \varepsilon \eta q_5 i_z < 0, \text{ or} \\ \text{if } h_5 < 0, \text{ or} \end{cases} \quad (203)$$

$$\begin{cases} \text{if } \frac{|m_5 h_5|}{mh} > 1, \text{ or} \end{cases} \quad (204)$$

Tension crack invalid,
terminate computation. $\begin{cases} \text{if } \frac{|n q_5 m_5 h_5|}{n_5 q m h} > 1 \end{cases} \quad (205)$

$$\begin{cases} \text{if } \frac{|n q_5 m_5 h_5|}{n_5 q m h} > 1 \end{cases} \quad (206)$$

g) Areas of faces and weight of wedge.

$$A_1 = (|mq| h^2 - |m_5 q_5| h_5^2) / 2 |p| \quad (207)$$

$$A_2 = (|q/n| m^2 h^2 - |q_5/n_5| m_5^2 h_5^2) / 2 |p| \quad (208)$$

$$A_5 = |m_5 q_5| h_5^2 / 2 |n_5| \quad (209)$$

$$W = \gamma (q^2 m^2 h^3 / |n| - q_5^2 m_5^2 h_5^3 / |n_5|) / 6 |p| \quad (210)$$

h) Water pressures.

(1) With no tension crack.

$$u_1 = u_2 = \gamma_w h |m_i| / 6 |p| \quad (211)$$

(2) With tension crack.

$$u_1 = u_1 = u_5 = \gamma_w h_5 |m_5| / 3d_z \quad (212)$$

$$V = u_5 A_5 n \varepsilon / |\varepsilon| \quad (213)$$

i) Effective normal reactions on planes 1 and 2 assuming contact on both planes.

$$N_1 = \rho \{ Wk_z + T(rv - s) + E(rv_e - s_e) + V(rv_5 - s_5) \} - u_1 A_1 \quad (214)$$

$$N_2 = \mu \{ Wl_z + T(rs - v) + E(rs_e - v_e) + V(rs_5 - v_5) \} - u_2 A_2 \quad (215)$$

j) Factor of safety when $N_1 < 0$ and $N_2 < 0$ (contact is lost on both planes).

$$F = 0 \quad (216)$$

k) If $N_1 > 0$ and $N_2 < 0$, contact is maintained on plane 1 only and the factor of safety is calculated as follows:

$$N_a = Wa_z - Ts - Es_e - Vs_5 - u_2 A_2 r \quad (217)$$

$$S_x = - (Tt_x + Ee_x + N_a a_x + Vf_{5x} + u_2 A_2 b_x) \quad (218)$$

$$S_y = - (Tt_y + Ee_y + N_a a_y + Vf_{5y} + u_2 A_2 b_y) \quad (219)$$

$$S_z = -(Tt_z + Ee_z + N_a a_z + Vf_{5z} + u_2 A_2 b_z) + W \quad (220)$$

$$S_a = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{0.5} \quad (221)$$

$$Q_a = (N_a - u_1 A_1) \tan \phi_1 + c_1 A_1 \quad (222)$$

$$F_1 = Q_a / S_a \quad (223)$$

l) If $N_1 < 0$ and $N_2 > 0$, contact is maintained on plane 2 only and the factor of safety is calculated as follows:

$$N_b = Wb_z - Tv - EV_e - Vv_5 - u_1 A_1 r \quad (224)$$

$$S_x = -(Tt_x + Ee_x + N_b b_x + Vf_{5x} + u_1 A_1 a_x) \quad (225)$$

$$S_y = -(Tt_y + Ee_y + N_b b_y + Vf_{5y} + u_1 A_1 a_y) \quad (226)$$

$$S_z = -(Tt_z + Ee_z + N_b b_z + Vf_{5z} + u_1 A_1 a_z) + W \quad (227)$$

$$S_b = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{0.5} \quad (228)$$

$$Q_b = (N_b - u_2 A_2) \tan \phi_2 + c_2 A_2 \quad (229)$$

$$F_2 = Q_b / S_b \quad (230)$$

m) if $N_1 > 0$ and $N_2 > 0$, contact is maintained on both plane and the factor of safety is calculated as follows:

$$S = V(Wi_z - Tw - Ew_e - Vw_5) \quad (231)$$

$$Q = N_1 \tan \phi_1 + N_2 \tan \phi_2 + c_1 A_1 + c_2 A_2 \quad (232)$$

$$F_3 = Q / S \quad (233)$$

ข) การคำนวณขั้นตอนที่ 2

การคำนวณในช่วงนี้จะหาค่าปัจจัยของความปลอดภัยต่ำสุดเมื่อโหลดภายนอก (E) ที่ทราบค่าขนาด (magnitude) ได้ถูกกระทำในทิศทางที่มีภาวะเลวที่สุด (worst condition) ลำดับขั้นตอนตั้งแต่หัวข้อ a ถึงหัวข้อ f หรือตามสมการที่ 234 ถึงสมการที่ 251

a) Evaluate N_1'' , N_2'' , S'' , Q'' , F_3'' by use of equations 214, 215, 231, 232, 233 with $E = 0$.

b) If $N_1'' < 0$ and $N_2'' < 0$, even before E is applied, then $F = 0$, terminate computation.

$$c) D = \left\{ (N_1'')^2 + (N_2'')^2 + 2 \cdot \frac{mn}{|mn|} \cdot N_1'' N_2'' r \right\}^{0.5} \quad (234)$$

$$\Psi_e = \arcsin \left\{ -\frac{1}{D} \cdot \left(\frac{m}{|m|} \cdot N_1'' a_z + \frac{n}{|n|} \cdot N_2'' b_z \right) \right\} \quad (235)$$

$$\alpha_e = \arctan \left\{ \frac{\frac{m}{|m|} \cdot N_1'' a_x + \frac{n}{|n|} \cdot N_2'' b_x}{\frac{m}{|m|} \cdot N_1'' a_y + \frac{n}{|n|} \cdot N_2'' b_y} \right\} \quad (236)$$

If $E > D$, and E is applied in the direction Ψ_e , α_e , or within a certain range encompassing this direction, then contact is lost on both planes and $F = 0$. Terminate computation.

d) If $N_1'' > 0$ and $N_2'' < 0$, assume contact on plane 1 only after application of E. Determine S_x'' , S_y'' , S_z'' , S_a'' , Q_a'' , F_1'' from equations 218 to 223 with $E = 0$.

If $F_1'' < 1$, terminate computation.

If $F_1'' > 1$:

$$F_1 = \frac{S_a'' Q_a'' - E \left\{ (Q_a'')^2 + \left((S_a'')^2 - E^2 \right) \tan^2 \phi_1 \right\}^{0.5}}{(S_a'')^2 - E^2} \quad (237)$$

$$\Psi_{e1} = \arcsin (S_z'' / S_a'') - \arctan (\tan \phi_1 / F_1) \quad (238)$$

$$\alpha_{e1} = \arctan (S_x'' / S_y'') + 180^\circ \quad (239)$$

e) If $N_1'' < 0$ and $N_2'' > 0$, assume contact on plane 2 only after application of E. Determine S_x'' , S_y'' , S_z'' , S_b'' , Q_b'' and F_2'' from equations 225 to 230 with $E = 0$.

If $F_2'' < 1$, terminate computation.

If $F_2'' > 1$:

$$F_2 = \frac{S_b'' Q_b'' - E \left\{ (Q_b'')^2 + \left((S_b'')^2 - E^2 \right) \tan^2 \phi_2 \right\}^{0.5}}{(S_b'')^2 - E^2} \quad (240)$$

$$\Psi_{e2} = \arcsin (S_z'' / S_b'') - \arctan (\tan \phi_2 / F_2) \quad (241)$$

$$\alpha_{e2} = \arctan (S_x'' / S_y'') + 180^\circ \quad (242)$$

f) If $N_1'' > 0$ and $N_2'' > 0$, assume contact on both planes after application of E.

If $F_3'' < 1$, terminate computation.

If $F_3'' > 1$:

$$F_3 = \frac{S'' Q'' - E \left\{ (Q'')^2 + B \left((S'')^2 - E^2 \right) \right\}^{0.5}}{(S'')^2 - E^2} \quad (243)$$

$$\chi = \sqrt{B + F_3^2} \quad (244)$$

$$e_x = -(F_3 v i_x - \rho k_x \tan \phi_1 - \mu i_x \tan \phi_2) / \chi \quad (245)$$

$$e_y = -(F_3 v i_y - \rho k_y \tan \phi_1 - \mu i_y \tan \phi_2) / \chi \quad (246)$$

$$e_z = -(F_3 v i_z - \rho k_z \tan \phi_1 - \mu i_z \tan \phi_2) / \chi \quad (247)$$

$$\Psi_{e3} = \arcsin(-e_z) \quad (248)$$

$$\alpha_{e3} = \arctan(e_x/e_y) \quad (249)$$

Compute s_e and v_e using equations 179 and 180.

$$N_1 = N_1'' + E\rho(rv_e - s_e) \quad (250)$$

$$N_2 = N_2'' + E\mu(rs_e - v_e) \quad (251)$$

Check that $N_1 \geq 0$ and $N_2 \geq 0$

ค) การคำนวณขั้นตอนที่ 3

เป็นการคำนวณขั้นตอนสุดท้ายเพื่อหาโหลดที่ต่ำสุดมาเสริมเสถียรภาพ ได้แก่ การหาค่า cable or bolt tension, T_{min} ที่ต้องการ เพื่อเพิ่มค่าปัจจัยของความปลอดภัยให้สูงขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสม (หรือค่าที่เลือก) ลำดับขั้นตอนตั้งแต่หัวข้อ a ถึงหัวข้อ d

a) Evaluate N_1' , N_2' , S' , Q' by means of equations 214, 215, 231, 232 with $T = 0$.

b) If $N_2' < 0$, contact is lost on plane 2 when $T = 0$. Assume contact on plane 1 only, after application of T . Evaluate S_x' , S_y' , S_z' , S_a' , and Q_a' using equations 218 to 222 with $T = 0$.

$$T_1 = (FS_a' - Q_a') / \sqrt{F^2 + \tan^2 \phi_1} \quad (252)$$

$$\Psi_{t1} = \arctan(\tan \phi_1 / F) - \arcsin(S_z' / S_a') \quad (253)$$

$$\alpha_{t1} = \arctan (S_x' / S_y') \quad (254)$$

c) If $N_1' < 0$, contact is lost on plane 1 when $T = 0$. Assume contact on plane 2 only, after application of T . Evaluate S_x' , S_y' , S_z' , S_b' , and Q_b' using equations 225 to 229 with $T = 0$.

$$T_2 = (FS_b' - Q_b') / \sqrt{F^2 + \tan^2 \phi_2} \quad (255)$$

$$\psi_{t2} = \arctan (\tan \phi_2 / F) - \arcsin (S_z' / S_b') \quad (256)$$

$$\alpha_{t2} = \arctan (S_x' / S_y') \quad (257)$$

d) All cases. No restriction on values of N_1' and N_2' . Assume contact on both planes after application of T .

$$\chi = (F^2 + B)^{0.5} \quad (258)$$

$$T_3 = (FS' - Q') / \chi \quad (259)$$

$$t_x = -(FV i_x - \rho k_x \tan \phi_1 - \mu i_x \tan \phi_2) / \chi \quad (260)$$

$$t_y = -(FV i_y - \rho k_y \tan \phi_1 - \mu i_y \tan \phi_2) / \chi \quad (261)$$

$$t_z = -(FV i_z - \rho k_z \tan \phi_1 - \mu i_z \tan \phi_2) / \chi \quad (262)$$

$$\psi_{t3} = \arcsin (-t_z) \quad (263)$$

$$\alpha_{t3} = \arctan (t_x / t_y) \quad (264)$$

Compute s and v using equations 176 and 177.

$$N_1 = N_1' + T_3 \rho (rv - s) \quad (265)$$

$$N_2 = N_2' + T_3 \mu (rs - v) \quad (266)$$

If $N_1 < 0$ or $N_2 < 0$, ignore the results of this section.

$$\text{If } N_1' > 0 \text{ or } N_2' > 0, \quad T_{\min} = T_3$$

$$\text{If } N_1' > 0 \text{ or } N_2' < 0, \quad T_{\min} = \text{smallest of } T_1, T_3$$

$$\text{If } N_1' < 0 \text{ or } N_2' > 0, \quad T_{\min} = \text{smallest of } T_2, T_3$$

$$\text{If } N_1' < 0 \text{ or } N_2' < 0, \quad T_{\min} = \text{smallest of } T_1, T_2, T_3$$

4.2.8 ตัวอย่างการคำนวณการพังทลายรูปลิ้มด้วยวิธี Comprehensive Solution

1. ปัญหา

จงหาค่า Factor of Safety ของมวลหินรูปลิ้ม จากข้อมูลต่อไปนี้

Plane	1	2	3	4	5
ψ	45	70	12	65	70
α	105	235	195	185	165

$$H_1 = 100 \text{ ft}, \quad L = 40 \text{ ft}, \quad c_1 = 500 \text{ lb/ft}^2, \quad c_2 = 1,000 \text{ lb/ft}^2$$

$$\phi_1 = 20^\circ, \quad \phi_2 = 30^\circ, \quad \gamma = 160 \text{ lb/ft}^3, \quad \eta = +1$$

2. Solution

$$1a) \quad T = 0, \quad E = 0, \quad u_1 = u_2 = u_5 \text{ จากสมการ 212}$$

$$(a_x, a_y, a_z) = (0.68301, -0.18301, 0.70711)$$

$$(b_x, b_y, b_z) = (-0.76975, -0.53899, 0.34202)$$

$$(d_x, d_y, d_z) = (-0.05381, -0.20083, 0.97815)$$

$$(f_x, f_y, f_z) = (-0.07899, -0.90286, 0.42262)$$

$$(f_{5x}, f_{5y}, f_{5z}) = (0.24321, -0.90767, 0.34202)$$

$$(g_x, g_y, g_z) = (-0.56107, 0.34451, 0.63112)$$

$$(g_{5x}, g_{5y}, g_{5z}) = (-0.57923, 0.061627, 0.57544)$$

$$(i_x, i_y, i_z) = (-0.31853, 0.77790, 0.50901)$$

$$(j_x, j_y, j_z) = (-0.79826, 0.05452, -0.03272)$$

$$(j_{5x}, j_{5y}, j_{5z}) = (-0.81915, -0.25630, -0.09769)$$

$$(k_x, k_y, k_z) = (0.54041, -0.28287, 0.77047)$$

$$(l_x, l_y, l_z) = (-0.64321, -0.57289, 0.47302)$$

$$m = 0.57833$$

$$m_5 = 0.58166$$

$$n = 0.57388$$

$$n_5 = 0.73527$$

$$p = 0.35880$$

$$q = 0.46206$$

$$q_5 = 0.60945$$

$$r = -0.18526$$

$$s_5 = 0.57407$$

$$v_5 = 0.41899$$

$$w_5 = -0.60945$$

$$\lambda = 0.76796$$

$$\lambda_5 = 0.52535$$

$$\varepsilon = 0.65574$$

$$R = 0.98269$$

$$\rho = 1.03554$$

$$\mu = 1.03554$$

$$V = 1.01762$$

$$G = 0.83180$$

$$G_5 = 0.67044$$

$$M = 0.33371$$

$$M_5 = 0.44017$$

$$h = 158.45$$

$$h_5 = 87.521$$

$$B = 0.56299$$

$$\psi_i = 31.20^\circ$$

$$\alpha_i = 157.73^\circ$$

$$\left. \begin{aligned}
 p_{i_z} &> 0 \\
 \eta q_{i_z} &> 0 \\
 \varepsilon \eta q_{5i_z} &> 0 \\
 h_5 &> 0
 \end{aligned} \right\} \text{Wedge is formed}$$

$$\left. \begin{aligned}
 |m_5 h_5| / |mh| &= 0.55554 < 1 \\
 |n q_5 m_5 h_5| / |n_5 q m h| &= 0.57191 < 1
 \end{aligned} \right\} \text{Tension crack valid}$$

$$A_1 = 5,565.0 \text{ ft}^2$$

$$A_2 = 6,428.1 \text{ ft}^2$$

$$A_5 = 1,846.6 \text{ ft}^2$$

$$W = 2.8272 \times 10^7 \text{ lb}$$

$$u_1 = u_2 = u_5 = 1084.3 \text{ lb/ft}^2; V = 2.0023 \times 10^6 \text{ lb}$$

$$\left. \begin{aligned}
 N_1 &= 1.5171 \times 10^7 \text{ lb} \\
 N_2 &= 5.7892 \times 10^6 \text{ lb}
 \end{aligned} \right\} \text{Both positive therefore contact on planes 1 and 2.}$$

$$S = 1.5886 \times 10^7 \text{ lb}$$

$$Q = 1.8075 \times 10^7 \text{ lb}$$

$$F = 1.1378 \text{ - Factor of safety}$$

This value can be compared with the value of 1.10 obtained in the case that slope surface is flooded with water entering the tension crack. Note that small differences in calculated areas and water pressures account for the difference in the factors of safety.

1b) $T = 0, E = 0, \text{ dry slope, } u_1 = u_2 = u_5 = 0.$

As in 1a) except as follows:

$$V = 0$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= 2.2565 \times 10^7 \text{ lb} \\ N_2 &= 1.3853 \times 10^7 \text{ lb} \end{aligned} \right\} \text{Both positive therefore contact} \\ \text{on both planes 1 and 2.}$$

$$S = 1.4644 \times 10^7 \text{ lb}$$

$$Q = 2.5422 \times 10^7 \text{ lb}$$

$$F = 1.7360 \text{ - Factor of safety.}$$

Compare this value with the value of 1.73 obtained the case of a dry slope with tension crack present.

2) As is 1b) except $E = 8 \times 10^6 \text{ lb}$. Find the value of F_{\min} .

Values of N_1'' , N_2'' , S'' , Q'' , F'' as given in 1b).

$N_1'' > 0$, $N_2'' > 0$, $F_3'' > 1$ continue calculation.

$$B = 0.56299$$

$$F_3 = 1.04 \text{ - } F_{\min} \text{ (Minimum factor of safety)}$$

$$\chi = 1.2798$$

$$e_x = 0.12128$$

$$e_y = -0.99226$$

$$e_z = 0.028243$$

$$\psi_{e3} = -1.62^\circ \text{ - Plunge of force (upwards)}$$

$$\alpha_{e3} = 173.03^\circ \text{ - Trend of force}$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= 1.9517 \times 10^7 \text{ lb} \\ N_2 &= 9.6793 \times 10^6 \text{ lb} \end{aligned} \right\} \text{Both positive therefore contact} \\ \text{maintained on both planes.}$$

3) As in 1a) except that the minimum cable tension T_{\min} required to increase the factor of safety to 1.5 is to be determined.

N_1' , N_2' , S' and Q' - as given in 1a)

$$\chi = 1.6772$$

$$T_3 = 3.4307 \times 10^6 \text{ lb} - T_{\min} \text{ (Minimum cable tension)}$$

$$t_x = -0.18205$$

$$t_y = 0.97574$$

$$t_z = 0.12148$$

$$\psi_{13} = -6.98^\circ - \text{Plunge of cable (upwards)}$$

$$\alpha_{13} = 349.43^\circ - \text{Trend of cable}$$

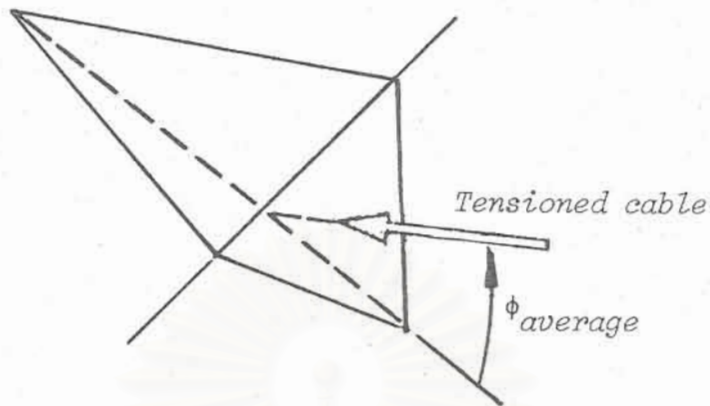
Note that the optimum plunge and trend of the cable are approximately :

$$\begin{aligned} \psi_{13} &\cong \psi_i + 180^\circ - \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2) = 31.2 + 180 - 25 \\ &= -6.2^\circ \text{ (upwards)} \end{aligned}$$

$$\text{and } \alpha_{13} \cong \alpha_i \pm 180^\circ = 157.73 + 180 = 337.73^\circ$$

In other words, a practical rule of thumb for the best direction in which to install the cables to reinforce a wedge is :

The cable should be aligned with the line of intersection of the two planes, viewed from the bottom of the slope, and it should be inclined at the average friction angle to the line of intersection.



รูปที่ 40 แนวทิศทางที่เหมาะสมที่สุด (optimum direction) เมื่อทำการเสริมเสถียรภาพด้วย tensioned cable

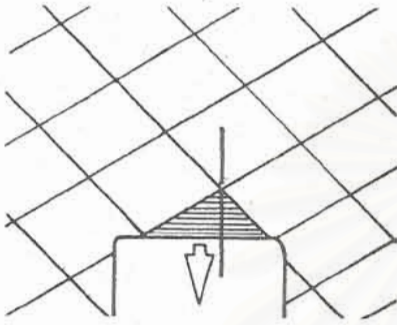
4.3 การวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินรูปลิ้มที่พังทลายภายใต้พื้นผิวดินด้วยวิธีของ Hoek and Brown

การแก้ปัญหาการพังทลายมวลสารหินที่เป็นรูปลิ้มตามแนวอุโมงค์ของ underground wedge ตามวิธี Hoek and Brown (1980) ได้มีการเสนอแนววิเคราะห์การปัญหาเชิง analytical solutions ใช้คำนวณแรงที่กระทำในรูปเวกเตอร์

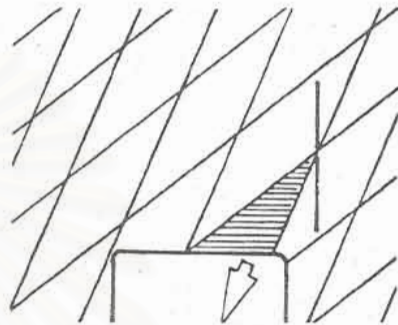
4.3.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของรูปลิ้มใต้พื้นผิวดิน

ปัญหาของเสถียรภาพของการขุดเจาะอุโมงค์ที่พบบ่อยสิ่งหนึ่งก็คือ เมื่อมวลสารที่เป็นหินมีการแตกหักตามแนวที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ซึ่งพบมากใน jointed rock โอกาสที่บล็อกของมวลหินภายในอุโมงค์จะหล่นลงมาภายใต้แรงโน้มถ่วงมีความเป็นไปได้สูง รูปที่ 41 เป็นภาพไดอะแกรมที่มองบน plan view ของแนว rock discontinuities 3 แนวที่ทำให้เกิดรูปลิ้มบน roof หรือ sidewalls ของอุโมงค์

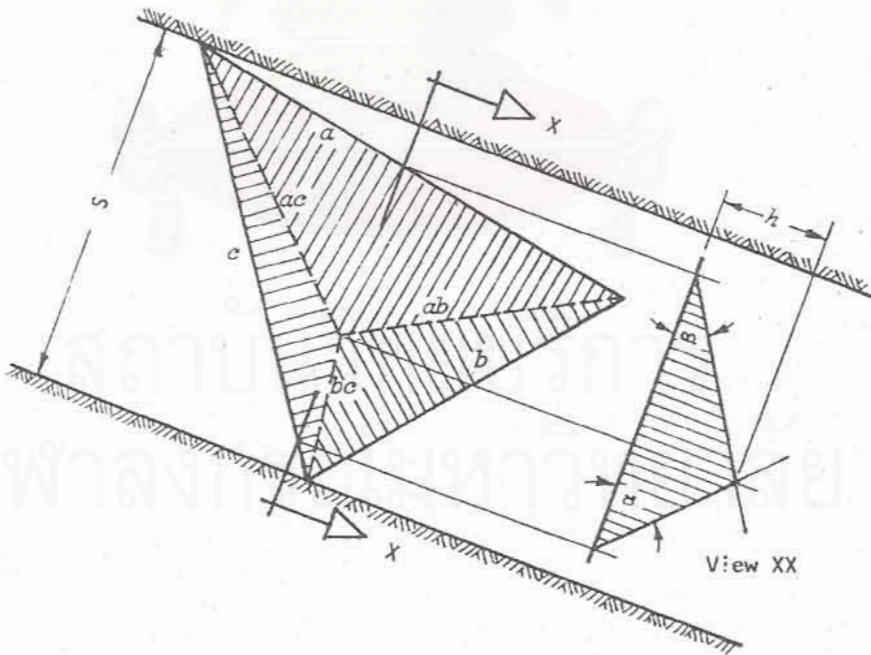
ในรูปที่ 41a เป็นสภาวะที่เกิดการพังทลายแบบ gravity fall ของ roof wedge แนวหัวลูกศรแสดงทิศทางที่บล็อกรูปลิ้มจะหล่นลงมาโดยแรงโน้มถ่วง ตามทิศทางที่ขนานกับเส้นในแนวตั้งที่ลากผ่านยอดของลิ้ม ในรูปที่ 41b เป็นสภาวะที่เกิด sliding failure สำหรับบล็อกรูปลิ้มทิศทางที่เกิดการไหลเลื่อนจะไม่อยู่ในแนวเดียวกับเส้นในแนวตั้งที่ลากผ่านยอดของลิ้ม



a) สภาวะที่เกิด gravity fall



b) สภาวะที่เกิด sliding failure



c) ตัวอย่างมวลหินรูปสี่เหลี่ยมที่มองแบบ plan view กับรูปหน้าตัดแนว XX

รูปที่ 41 ลักษณะรูปแบบเชิงเรขาคณิตของสภาวะที่เกิด
การพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยมใต้พื้นผิวดิน

สำหรับ plan view ของรูปที่ 41c ส่วนยอดปลายแหลม (apex) ของรูปปลีเกิดจากจุดตัดกันของเส้น ab, ac และ bc ที่ได้ทำการ project จากจุดมุมของฐานสามเหลี่ยมรูปปลี กำหนดให้ h เป็นระยะความสูงจากระยะในแนวราบของ tunnel roof (ซึ่งได้จากรูปหน้าตัดผ่านส่วนยอดปลายแหลมของปลีและตั้งฉากกับ tunnel axis) เมื่อพิจารณาค่ามุมเอียงปรากฏ (apparent dip) ตามแนวรูปตัดของระนาบ C และระนาบ A จะได้ค่าเป็นมุม α และ β ส่วนค่าปริมาตรของมวลหินรูปปลี มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{3} \cdot h \cdot (\text{base area of wedge})$ ที่มองจาก plan view

4.3.2 เงื่อนไขของการคำนวณการพังทลายด้วย Solution ของ Hoek and Brown

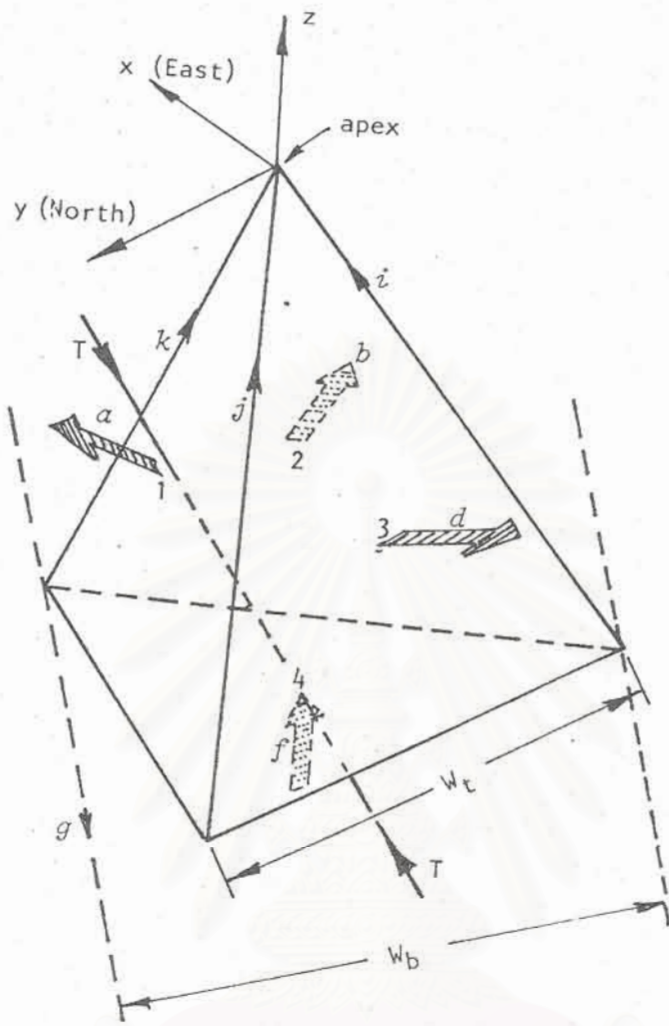
รูปปลีที่ก่อให้เกิดการพังทลายนั้นจะกำหนดให้มีแนวของ rock discontinuities ทั้งหมด 3 แนว ไม่ว่าจะเป็น sidewalls หรือ roof ของการขุดเจาะใต้พื้นผิวดินจึงได้รูปแบบของ tetrahedral wedge (ดูรูปที่ 42) ที่มีการไหลเลื่อนตามระนาบ

การวิเคราะห์มีแนวทางเพื่อหาว่า มวลรูปปลีจะอยู่ในสถานภาพใด ดังต่อไปนี้

1. ในระหว่างการพังทลายมวลรูปปลีลอยตัวออก (float) หรือ มวลรูปปลีตกลงมา (fall)
2. มวลรูปปลีที่อยู่ในสถานภาพที่มีเสถียรภาพในตัวของมันเอง (inherently stable) เนื่องจากมีผลรวมของแรงผลักรวมเข้าไปในมวลสารหิน
3. มวลรูปปลีมีโอกาที่จะไหลเลื่อนออกจากระนาบ 2 ระนาบภายในเวลาเดียวกัน
4. มวลรูปปลีมีโอกาที่จะไหลเลื่อนออกจากระนาบเดียว
5. สำหรับสถานภาพในกรณีของข้อ 3 และข้อ 4 ค่า factor of safety คำนวณจากค่าที่ได้จากการทดสอบของ cohesion (c) กับค่า angle of friction (ϕ)
6. การพังทลายแบบหมุนตัว (rotation) ไม่ได้นำมาพิจารณา

4.3.3 การคำนวณแรงที่กระทำบนรูปปลีใต้พื้นผิวดิน

ตามรูปที่ 42 มวลหินรูปปลีอาจเกิดได้ตามแนวผนังของการขุดเจาะใต้พื้นผิวดิน กำหนดให้ระนาบหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ไม่ขนานกัน และแนวรอยแตกรอยแยกของ rock discontinuities จะอยู่ตรงไหนก็ได้ ซึ่งสมมุติฐานของ underground wedge นี้จะแตกต่างกับสมมุติฐานของ surface wedge ที่รูปปลีต้องเกิดมาก่อน



รูปที่ 42 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลหินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าผืนผืนดิน และแรงที่มากกระทำ

กระบวนการคำนวณจะออกแบบพิเศษโดยเฉพาะว่า ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่เพียงพียงกับแรง normal ที่กระทำตั้งฉากกับทั้ง 4 หน้าที่พุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากลิ้ม (\vec{a} , \vec{b} , \vec{c} และ \vec{f} ในไดอะแกรมของรูปที่ 42) และผลลัพธ์ก็จะได้เพียงพียงกับการจัดลำดับของระนาบหมายเลข 1, 2 และ 3 ที่ล้อมรอบรูปสี่เหลี่ยม

ในเรื่องของขนาดของมวลหินรูปสี่เหลี่ยม (ดูรูปที่ 42) มีการใช้ solutions 2 ข้อ คือ

- a) ขนาดของลิ้มที่ใหญ่ที่สุด (largest wedge) ที่เกิดได้บนผนังของอุโมงค์หรือด้านข้างของอุโมงค์ ได้แก่ ขนาดเท่ากับ W_b
- b) มวลรูปสี่เหลี่ยม ที่กำหนดระยะความยาว W_t เกิดจากแนวตัดกันของระนาบความไม่ต่อเนื่อง (ระนาบ 3) กับระนาบของ free face (ระนาบ 4)

4.3.4 สัญลักษณ์และสัญกรณ์ (Symbol and Notation)

1, 2, 3	=	discontinuities in the rock mass
4	=	free face (roof or sidewall)
W_b	=	span of free face between boundary edges
W_t	=	length of trace of plane 3 on free face
ψ, α	=	dip and dip direction of plane
ψ_5, α_5	=	plunge and trend of boundary edges of free face
ψ_6, α_6	=	plunge and trend of bolt force T. Note that plunge ψ_6 is defined as <i>negative</i> when bolt acts <i>upwards</i> .
$\left. \begin{matrix} p_x, p_y, p_z \\ q_x, q_y, q_z \\ t_x, t_y, t_z \end{matrix} \right\}$	=	$\left\{ \begin{matrix} \text{coordinates of vertices of wedge on free face} \\ \text{using coordinate system : y axis pointing north,} \\ \text{z axis pointing upwards, origin at internal vertex} \end{matrix} \right.$
A_1, A_2, A_3	=	areas of faces
W	=	weight of wedge
T	=	bolt force
γ_r	=	unit weight of rock
u	=	average water pressure on discontinuities
N, S	=	normal and shear reactions on plane carried by rock contacts
c, ϕ	=	cohesion and angle of friction
F	=	factor of safety

4.3.5 ขั้นตอนของการคำนวณค่าปัจจัยของความปลอดภัย และการเสริมเสถียรภาพสำหรับ W_b

ในกรณีของมวลสารที่เป็นหินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้พื้นผิวดินได้มีการกำหนดรูปเรขาคณิต โดยใช้ span or sidewall height (W_b) มีขั้นตอนในการคำนวณแบ่งเป็นลำดับขั้น (step) ตามสภาวะต่างๆ มีทั้งหมด เท่ากับ 62 ขั้นตอน ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ 267 ถึงสมการที่

a) ขั้นตอนเพื่อหาค่า components of vectors and factors มีทั้งหมด 20 ขั้นตอน ตามสมการที่แสดงข้างล่างนี้

$$\text{Step 1. } (a_x, a_y, a_z) = \sin \psi_1 \sin \alpha_1, \sin \psi_1 \cos \alpha_1, \cos \psi_1 \quad (267)$$

$$\text{Step 2. } (b_x, b_y, b_z) = \sin \psi_2 \sin \alpha_2, \sin \psi_2 \cos \alpha_2, \cos \psi_2 \quad (268)$$

$$\text{Step 3. } (d_x, d_y, d_z) = \sin \psi_3 \sin \alpha_3, \sin \psi_3 \cos \alpha_3, \cos \psi_3 \quad (269)$$

Step 4. *For overhanging faces (note for vertical faces assume a slight overhang in order to make the dip direction determinate)*

$$(f_x, f_y, f_z) = \sin \psi_4 \sin \alpha_4, \sin \psi_4 \cos \alpha_4, \cos \psi_4 \quad (270)$$

For faces with no overhang

$$(f_x, f_y, f_z) = -\sin \psi_4 \sin \alpha_4, -\sin \psi_4 \cos \alpha_4, -\cos \psi_4 \quad (271)$$

$$\text{Step 5. } (g_x, g_y, g_z) = \cos \psi_5 \sin \alpha_5, \cos \psi_5 \cos \alpha_5, -\sin \psi_5 \quad (272)$$

$$\text{Step 6. } (c_x, c_y, c_z) = \cos \psi_6 \sin \alpha_6, \cos \psi_6 \cos \alpha_6, -\sin \psi_6 \quad (273)$$

$$\text{Step 7. } (h_x, h_y, h_z) = (f_y g_z - f_z g_y), (f_z g_x - f_x g_z), (f_x g_y - f_y g_x) \quad (274)$$

$$\text{Step 8. } (i_x, i_y, i_z) = (d_y b_z - d_z b_y), (d_z b_x - d_x b_z), (d_x b_y - d_y b_x) \quad (275)$$

$$\text{Step 9. } (j_x, j_y, j_z) = (a_y d_z - a_z d_y), (a_z d_x - a_x d_z), (a_x d_y - a_y d_x) \quad (276)$$

$$\text{Step 10. } (k_x, k_y, k_z) = (b_y a_z - b_z a_y), (b_z a_x - b_x a_z), (b_x a_y - b_y a_x) \quad (277)$$

$$\text{Step 11. } l = -(a_x i_x + a_y i_y + a_z i_z) \quad (278)$$

$$\text{Step 12. } l_1 = f_{xx}^j + f_{yy}^j + f_{zz}^j \quad (279)$$

$$\text{Step 13. } l_2 = f_{xx}^j + f_{yy}^j + f_{zz}^j \quad (280)$$

$$\text{Step 14. } l_3 = f_{xx}^k + f_{yy}^k + f_{zz}^k \quad (281)$$

$$\text{Step 15. } m_1 = (h_{xx}^j + h_{yy}^j + h_{zz}^j) / l_1 \quad (282)$$

$$\text{Step 16. } m_2 = (h_{xx}^j + h_{yy}^j + h_{zz}^j) / l_2 \quad (283)$$

$$\text{Step 17. } m_3 = (h_{xx}^k + h_{yy}^k + h_{zz}^k) / l_3 \quad (284)$$

$$\text{Step 18. } e_1 = W_b / |m_1 - m_2|, e_2 = W_b / |m_2 - m_3|, e_3 = W_b / |m_3 - m_1| \quad (285)$$

$$\text{Step 19. } e = \text{least of } e_1, e_2, e_3 \quad (286)$$

$$\text{Step 20. } k_1 = -e/l_1, k_2 = -e/l_2, k_3 = -e/l_3 \quad (287)$$

b) ขั้นตอนสำหรับการหาค่า areas of faces, weight of wedge, bolt force, normal and shear reactions มีทั้งหมด 15 ขั้นตอน ตามสมการที่แสดงข้างล่างนี้

$$\text{Step 21. } A_1 = l.k_2.k_3/2, A_2 = k_1.A_1/k_2, A_3 = k_1.A_1/k_3 \quad (288 \text{ a, b, c})$$

$$\text{Step 22. } W = -\gamma_r A_1 k_1 / 3 \quad (289)$$

$$\text{Step 23. } \text{Areas of faces} = |A_1|, |A_2|, |A_3| \quad (290)$$

$$\text{Step 24. } \text{Weight of wedge} = |W| \quad (291)$$

$$\text{Step 25. } U_1 = u_1 A_1, U_2 = u_2 A_2, U_3 = u_3 A_3 \quad (292 \text{ a, b, c})$$

$$\text{Step 26. } r_1 = d_x b_x + d_y b_y + d_z b_z, \quad t_1 = 1 - r_1^2 \quad (293 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 27. } r_2 = a_x d_x + a_y d_y + a_z d_z, \quad t_2 = 1 - r_2^2 \quad (294 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 28. } r_3 = b_x a_x + b_y a_y + b_z a_z, \quad t_3 = 1 - r_3^2 \quad (295 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 29. } T_x, T_y, T_z = T.c_x, T.c_y, T.c_z \quad (296)$$

$$\text{Step 30. } R_x = -U_1 a_x - U_2 b_x - U_3 d_x - T_x \cdot W/|W| \quad (297)$$

$$\text{Step 31. } R_y = -U_1 a_y - U_2 b_y - U_3 d_y - T_y \cdot W/|W| \quad (298)$$

$$\text{Step 32. } R_z = -U_1 a_z - U_2 b_z - U_3 d_z + W - T_z \cdot W/|W| \quad (299)$$

$$\text{Step 33. } g_1 = R_x a_x + R_y a_y + R_z a_z, \quad h_1 = R_x i_x + R_y i_y + R_z i_z \quad (300 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 34. } g_2 = R_x b_x + R_y b_y + R_z b_z, \quad h_2 = R_x j_x + R_y j_y + R_z j_z \quad (301 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 35. } g_3 = R_x d_x + R_y d_y + R_z d_z, \quad h_3 = R_x k_x + R_y k_y + R_z k_z \quad (302 \text{ a, b})$$

$$N_1 = (g_1 - r_3 g_2) A_1 / t_3 |A_1|, \quad N_2 = (g_2 - r_3 g_1) A_2 / t_3 |A_2| \quad (303 \text{ a, b})$$

$$S = h_3 |I_1| / |I_1| \sqrt{t_3} \quad (304)$$

c) ขั้นตอนสำหรับการหาค่า factor of safety ตามสภาวะต่างๆ มีทั้งหมด 25 ขั้นตอน ตามสมการและสภาวะที่กำหนดให้ ดังต่อไปนี้

Step 38. if $N_1 > 0$, $N_2 > 0$ and $S < 0$, the active forces drive the wedge into the rock mass and there is no tendency to fall or slide. The factor of safety has no meaning and the wedge is stable. Terminate computation.

Step 39. if $N_1 > 0$, $N_2 > 0$ and $S > 0$, contact occurs on planes 1 and 2 with separation on plane 3.

$$\text{Factor of safety } F = (N_1 \tan \phi_1 + c_1 |A_1| + N_2 \tan \phi_2 + c_2 |A_2|) / S$$

Terminate computation. (305)

$$\text{Step 40. } N_2 = (g_2 - r_1 g_3) A_2 / t_1 |A_2|, N_3 = (g_3 - r_1 g_2) A_3 / t_1 |A_3| \quad (306 \text{ a, b})$$

$$\text{Step 41. } S = h_1 |l_2| / |l_2| \sqrt{t_1} \quad (307)$$

Step 42. if $N_2 > 0$, $N_3 > 0$ and $S < 0$, same conditions apply as for step 38, wedge is stable. Terminate computation.

Step 43. if $N_2 > 0$, $N_3 > 0$ and $S > 0$, contact occurs on planes 2 and 3 with separation on plane 1.

$$\text{Factor of safety } F = (N_2 \tan \phi_2 + c_2 |A_2| + N_3 \tan \phi_3 + c_3 |A_3|) / S$$

Terminate computation. (308)

$$\text{Step 44. } N_3 = (g_3 - r_2 g_1) A_3 / t_2 |A_3|, N_1 = (g_1 - r_2 g_3) A_1 / t_2 |A_1| \quad (309 \text{ a, b})$$

Step 45. $S = h_2 |l_3| / |l_3| \sqrt{t_2}$ (310)

Step 46. if $N_3 > 0$, $N_1 > 0$ and $S < 0$, same conditions apply as for step 38, wedge is stable. Terminate computation.

Step 47. if $N_3 > 0$, $N_1 > 0$ and $S > 0$, contact occurs on planes 3 and 1 with separation on plane 2.

$$\text{Factor of safety } F = (N_3 \tan \phi_3 + c_3 |A_3| + N_1 \tan \phi_1 + c_1 |A_1|) / S$$

Terminate computation. (311)

Step 48. $N_1 = g_1 A_1 / |A_1|$ (312)

Step 49. if $N_1 < 0$, separation on plane 1, continue with step 53.

Step 50. $S_x = R_x - g_1 a_x$, $S_y = R_y - g_1 a_y$, $S_z = R_z - g_1 a_z$ (313 a, b, c)

Step 51. $S = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{1/2}$ (314)

Step 52. contact on planes 2 and 3,

$$\text{Factor of safety } F = (N_1 \tan \phi_1 + c_1 |A_1|) / S$$
 (315)

Terminate computation.

Step 53. $N_2 = g_2 A_2 / |A_2|$ (316)

Step 54. if $N_2 < 0$, separation on plane 2, continue with step 58.

Step 55. $S_x = R_x - g_2 b_x$, $S_y = R_y - g_2 b_y$, $S_z = R_z - g_2 b_z$ (317 a, b, c)

Step 56. $S = \left(S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (318)$

Step 57. contact on planes 2, separation on planes 3 and 1,

Factor of safety $F = (N_2 \tan \phi_2 + c_2 |A_2|) / S \quad (319)$

Terminate computation.

Step 58. $N_3 = g_3 A_3 / |A_3| \quad (320)$

Step 59. if $N_3 < 0$, separation on plane 3, wedge is unstable since it falls out, floats out or is forced out by water pressure. Terminate computation.

Step 60. $S_x = R_x - g_3 d_x, S_y = R_y - g_3 d_y, S_z = R_z - g_3 d_z \quad (321 \text{ a, b, c})$

Step 61. $S = \left(S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (322)$

Step 62. Contact on plane 3, separation on planes 1 and 2,

Factor of Safety $F = (N_3 \tan \phi_3 + c_3 |A_3|) / S \quad (323)$

4.3.6 ขั้นตอนของการคำนวณค่าปัจจัยของความปลอดภัยและการเสริมเสถียรภาพสำหรับ W_t

ในกรณีของมวลสารที่เป็นหินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้พื้นผิวดินได้มีการกำหนดรูปเรขาคณิตโดยใช้ length of trace of plane 3 on free face

วิธีการคำนวณมีขั้นตอนที่เหมือนกับในเรื่อง Wedge defined by W_b โดยที่ในหัวข้อของ Wedge defined by W_t นี้จะมีการคำนวณโดยใช้ขั้นตอนและสมการแบบเดียวกันแต่มีข้อยกเว้นและข้อแตกต่างกับหัวข้อ 4.3.5 ดังนี้

a) ขั้นตอนและสมการที่ไม่ใช้

ในเรื่องของ Wedge defined by W_t ไม่ต้องใช้ขั้นตอนที่ 5, 17, 18 หรือ
ไม่ต้องใช้สมการที่ 272, 284, 285 ของหัวข้อ 4.3.5

b) ขั้นตอนที่ต้องใช้สมการใหม่

ขั้นตอนที่ต้องใช้สมการคำนวณใหม่ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 7 และขั้นตอนที่ 19

Step 7. $(h'_x, h'_y, h'_z) = (f_y d_z - f_z d_y), (f_z d_x - f_x d_z), (f_x d_y - f_y d_x)$ (324)

$$s = (h'^2_x + h'^2_y + h'^2_z)^{\frac{1}{2}} \quad (325)$$

$$(h_x, h_y, h_z) = h'_x / s, h'_y / s, h'_z / s \quad (326)$$

Step 19. $e = W_t / |m_1 - m_2|$ (327)

บทที่ 5

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการพังทลายแบบทอปเปิล

พื้นลาดเอียงที่มีมวลสารเป็นหินแข็ง และมีแนวเปราะบางที่เกิดจาก steeply dipping discontinuities ของคอลัมน์หรือบล็อกหิน จะมีโอกาสที่เกิดการพังทลายเนื่องจากการหมุน (rotation) ของคอลัมน์หรือบล็อกของมวลสารเป็นแบบ toppling failure

ต้นเหตุของ failure modes ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาในเรื่อง plane failure จะเกี่ยวกับการ slide ของมวลดิน/หิน ตามแนวของ failure surface ส่วน toppling failure จะเกี่ยวข้องกับการหมุน (rotation) ของ columns หรือ blocks ของมวลสาร

5.1 ประเภทของการพังทลายแบบทอปเปิล

ลักษณะของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบ toppling failure mode คือ



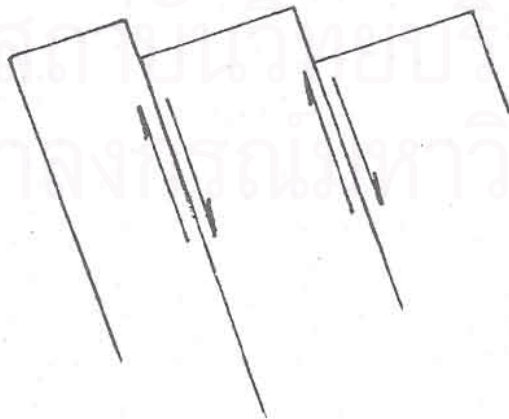
รูปที่ 43 ลักษณะของ flexural toppling ที่เกิดขึ้นใน hard rock slope ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น steeply dipping discontinuities

5.1.1 Flexural Toppling

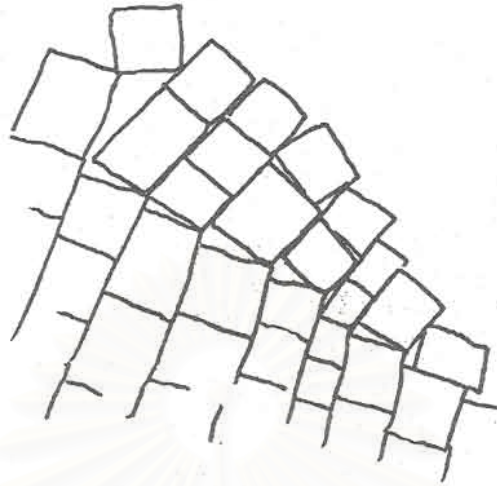
จากรูป 43 แสดงให้เห็นคอลัมน์ที่ต่อเนื่อง (continuous column) ที่ถูกทำให้แยกออกจากกัน เนื่องจาก steeply dipping discontinuities และการแตกของหินที่โค้งงอ (bend) ไปด้านหน้า toppling จะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำเหมืองหรือ erosion บริเวณ toe ของ slope และการ sliding ที่เกิดทำให้เกิด tension cracks เป็นบริเวณกว้าง ส่วนล่างของ slope ที่ปกคลุมด้วย block ของหินที่แตกกระจาย บางครั้งทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็น toppling failure ที่ส่วนล่างของ slope ได้ และการเคลื่อนตัวไปทางด้านหน้าของแต่ละ column ทำให้เกิดการ slip ระหว่าง column ดังรูปที่ 44

5.1.2 Block Toppling

จากรูปที่ 45 block toppling จะเกิดขึ้นเมื่อคอลัมน์ของชั้นหินแข็ง (hard rock) แยกออกจากกัน โดยเกิดบริเวณที่เป็นระยะห่างกว้างใน orthogonal joints โดยที่ short columns บริเวณ toe ของ slope จะถูกดันไปข้างหน้า เนื่องจากไหลโดยน้ำหนักของ overturning columns ทางด้านหลังของ slope และการไหลเลื่อนของ toe ก่อให้เกิด toppling บริเวณตำแหน่งที่สูงขึ้นของ slope ส่วนด้านฐานของ failure มักจะนิยามได้ดีกว่าว่าเป็น flexural topple หรือเรียกว่าการเกิด failure เป็นผลมาจากของ cross joints ที่ต่อเนื่องกัน



รูปที่ 44 แสดงผลการ slide ระหว่าง layers ใน toppling columns



รูปที่ 45 Block toppling ที่เกิดในมวลหินแบบ hard rock โดยที่คอลัมน์ด้านหลังมี widely space orthogonal joints และการ sliding ที่ toe จะก่อให้เกิด toppling ที่สูงขึ้นไปตาม slope



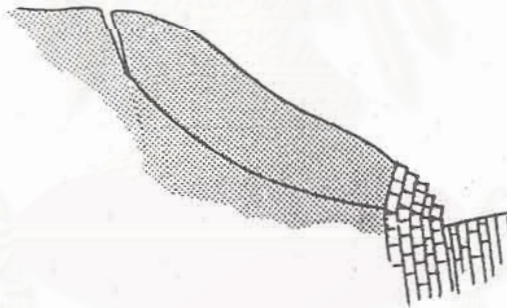
รูปที่ 46 Block flexure toppling ที่มีลักษณะเป็น column ยาว และมี cross joints จำนวนมาก

5.1.3 Block-Flexure Toppling

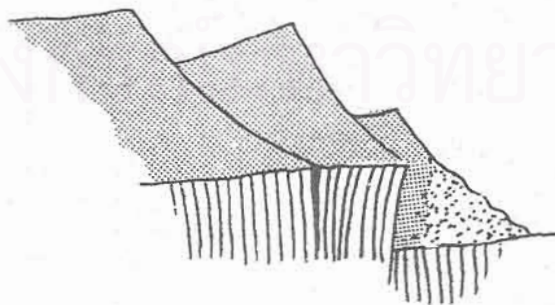
จากรูปที่ 46 แสดงการเกิด toppling failure ที่เกิดกับ long columns ของ pseudo-continuous flexure ที่มี cross joints เป็นจำนวนมากตลอด columns การพังทลายของ columns ในกรณีที่เกิดจากการสะสมค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) บน cross joints เนื่องจากมีการเคลื่อนที่เล็กน้อยสำหรับ topple ชนิดนี้ทำให้ block-flexure toppling มี tension cracks น้อยกว่า flexure toppling และมีขอบสัมผัสระหว่าง edge กับ face และช่องว่างน้อยกว่า ของ block toppling

5.1.4 Secondary Toppling Modes

จากรูปที่ 47a-47e อธิบายถึงกลไกในการเกิด secondary toppling ที่อาจเกิดขึ้นได้ (Goodman and Bray, 1976) โดยทั่วไป failure ที่เกิดขึ้น เริ่มจากการทำ undercut ที่ toe ของ slope หรือจากการผูกพันกีดขวางตามธรรมชาติ

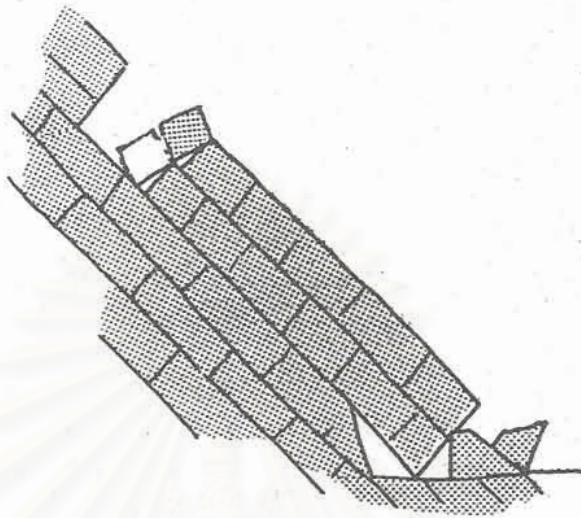


- a) Toppling ที่เกิดกับ steeply dipping beds ของหินแข็งโดยเป็นลักษณะของ slide toe toppling เนื่องจากน้ำหนักของส่วนบน slope ที่ไม่มีเสถียรภาพ

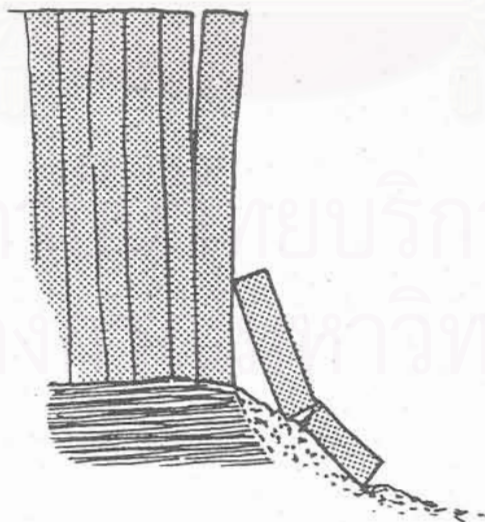


- b) Toppling ที่เกิดกับ steeply dipping beds เรียกว่า slide base toppling เนื่องจากแรงลาก (dragging force) ของกอง material ที่วางทับบน slope ที่ไม่มีเสถียรภาพ

รูปที่ 47 กลไกของการเกิด secondary toppling

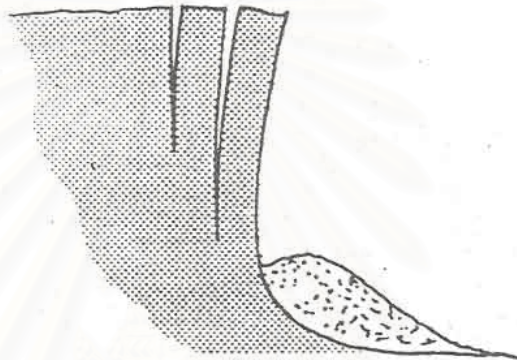


- c) Toppling ที่เกิดขึ้นเนื่องจากไม่มี block ที่ส่วนล่างของ slope เป็นลักษณะที่เรียก slide head toppling



- d) Toppling และ slumping ของหินที่เป็นคอลัมน์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการสึกกร่อนของวัสดุส่วนล่าง

รูปที่ 47 (ต่อ) กลไกของการเกิด secondary toppling



e) Toppling ที่เกิดขึ้น cohesive materials เรียกว่า tension crack toppling

รูปที่ 47 (ต่อ) กลไกของการเกิด secondary toppling

5.2 การวิเคราะห์แบบ Limit Equilibrium ของการพังทลายแบบทอปเปิล

ให้เริ่มต้นพิจารณา regular system ของ blocks ในรูปที่ 48 ซึ่งมี slope angle θ และมี layers dipping เท่ากับ $(90-\alpha)$ มุม base จะ step ขึ้นไปเป็นมุมเอียงทั้งหมดเท่ากับ β ค่าคงที่ a_1 , a_2 และ b ของรูปที่ 48 มีค่าที่กำหนดคือ

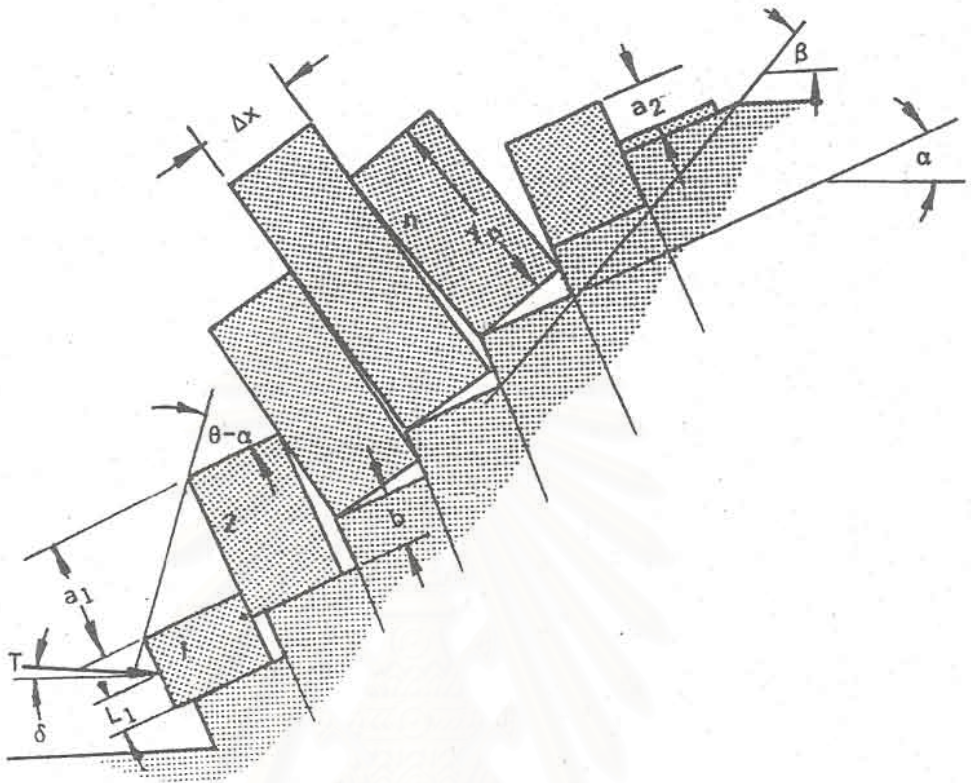
$$a_1 = \Delta x \tan (\theta-\alpha) \quad (328)$$

$$a_2 = \Delta x \tan (\alpha-\theta_u) \quad (329)$$

$$b = \Delta x \tan (\beta-\alpha) \quad (330)$$

กำหนดให้ Δx = ความกว้างของแต่ละ block

θ_u = ความลาดเอียงของ upper ground surface



รูปที่ 48 แบบจำลองสำหรับ limit equilibrium analysis ของ toppling ในลักษณะเป็นแบบ stepped base

จากแบบจำลองที่สมมุติขึ้น กำหนดให้ความสูงของ block ที่ n (n^{th} block) ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า crest ของ slope คือ

$$y_n = n(a_1 - b) \quad (331)$$

ขณะที่ความสูงเหนือ crest

$$y_n = y_{n-1} - a_2 - b \quad (332)$$

ในกรณีที่ blocks เมื่อเริ่มพังทลายจะแบ่งพฤติกรรมออกได้ 3 ขั้นตอน

- 1) เกิด a set of sliding blocks บริเวณ toe ของ slope
- 2) เกิด a set of stable blocks ที่ top ของ slope
- 3) มี an intermediate set ของ toppling blocks

รูปที่ 49a แสดง block ที่ n ที่ถูกแรงกระทำบนฐานของ block (R_n, S_n) และระหว่างรอยต่อบนพื้นผิวของ adjacent blocks ($P_n, Q_n, P_{n-1}, Q_{n-1}$)

เมื่อพิจารณา block ที่อยู่ในเขตของทอปเปิลและรู้แรงที่กระทำดังรูปที่ 49b ถ้า block ที่ n ที่ต่ำกว่า slope crest

$$M_n = y_n \quad (333)$$

$$L_n = y_n - a_1 \quad (334)$$

ถ้า block ที่ n คือ ส่วนที่เป็น (ในระดับเดียวกัน) crest block

$$M_n = y_n - a_2 \quad (335)$$

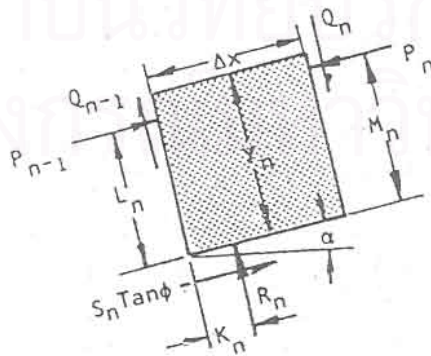
$$L_n = y_n - a_1 \quad (336)$$

ถ้า block ที่ n คือ ส่วนที่อยู่เหนือ slope crest

$$M_n = y_n - a_2 \quad (337)$$

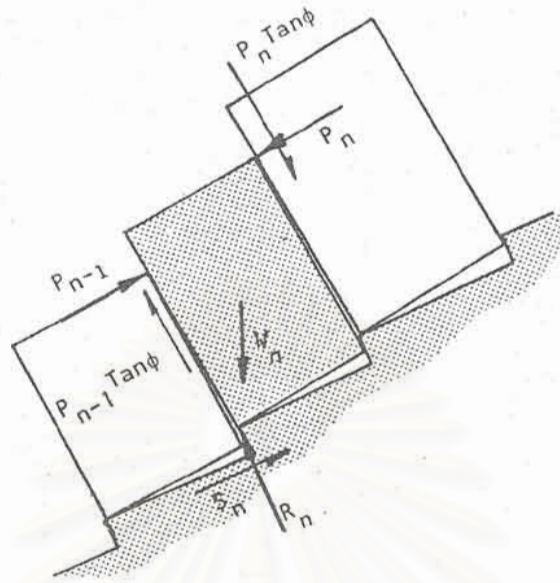
$$L_n = y_n \quad (338)$$

ในทุกกรณี $K_n = 0 \quad (339)$



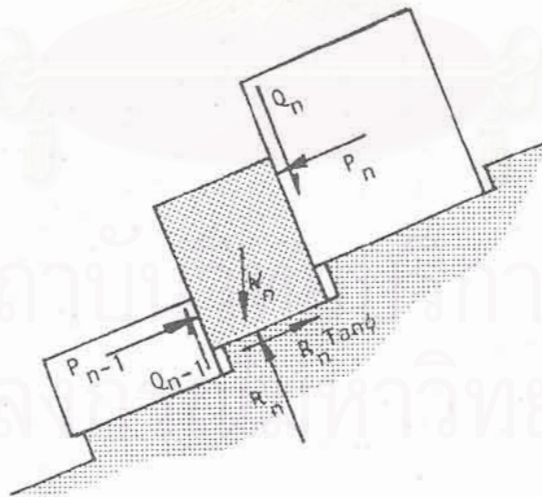
a) แรงต่างๆ ที่กระทำบน block ที่ n

รูปที่ 49 สภาวะ limit equilibrium สำหรับการเกิด toppling และ sliding ของ block ที่ n



b) การเกิด toppling ของ block ที่ n ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$P_{n-1} = \frac{P_n (M_n - \Delta x \tan \phi) + (W_n / 2)(y_n \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha)}{L_n}$$



c) การเกิด sliding ของ block ที่ n ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$P_{n-1} = P_n - \frac{W_n (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \phi}$$

รูปที่ 49 (ต่อ) สภาวะ limit equilibrium สำหรับการเกิด toppling และ sliding ของ block ที่ n

สำหรับกรณีของ irregular array of blocks, y_n , L_n และ M_n สามารถหาได้จากวิธีทางกราฟฟิก

สำหรับ limiting friction บนด้านข้างของ block

$$Q_n = P_n \tan \phi \quad (340)$$

$$Q_{n-1} = P_{n-1} \tan \phi \quad (341)$$

โดยการหาจากแนวที่ตั้งฉากและขนานกับฐาน

$$R_n = W_n \cos \alpha + (P_n - P_{n-1}) \tan \phi \quad (342)$$

$$S_n = W_n \sin \alpha + (P_n - P_{n-1}) \quad (343)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลการหมุน (rotational equilibrium) ของแรง P_{n-1} ที่สามารถป้องกัน toppling ในระดับพอดีสมดุลจะได้

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n (M_n - \Delta x \tan \phi) + (W_n / 2)(y_n \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha)}{L_n} \quad (344)$$

เมื่อ block ที่พิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของ sliding set

$$S_n = R_n \tan \phi \quad (345)$$

อย่างไรก็ตาม ขนาดและจุดที่แรงทั้งหมดที่กระทำต่อด้านข้างและฐานของ block จะไม่ทราบค่า กระบวนการของ limit equilibrium บน side faces จึงสามารถใช้สมการที่ 342 และสมการที่ 343 ประยุกต์ได้

จากสมการที่ 345 แรง P_{n-1} ที่พอป้องกันการ slide ได้พอดี มีค่า

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{W_n (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \phi} \quad (346)$$

5.3 กระบวนการคำนวณของ Limit Equilibrium for Toppling

กำหนดให้ n_1 = หมายเลขของ block ที่อยู่ในส่วนบนสุดของ toppling set

n_2 = หมายเลขของ block ที่อยู่ในส่วนบนสุดของ sliding set

a) เพื่อหาค่า ϕ สำหรับ limit equilibrium

1. สมมติ ค่า ϕ ที่เหมาะสม เช่น ให้ $\phi > \alpha$

2. กำหนด n_1 โดยหาจาก uppermost block ของทั้งกลุ่มที่ได้ความ

สัมพันธ์ของ

$$\frac{y_n}{\Delta X} > \cot \alpha$$

3. จาก block ในข้อ 2 คำนวณ lateral forces ของค่า $P_{n-1, t}$ เพื่อป้องกัน toppling กับค่า $P_{n-1, s}$ เพื่อป้องกัน sliding

ถ้า $P_{n-1, t} > P_{n-1, s}$ ตำแหน่ง block จะอยู่บนจุดของ toppling และ P_{n-1} จะถูกกำหนดให้เท่ากับ $P_{n-1, t}$

ถ้า $P_{n-1, s} > P_{n-1, t}$ ตำแหน่ง block จะอยู่บนจุดของ sliding และ P_{n-1} จะถูกกำหนดให้เท่ากับ $P_{n-1, s}$

สำหรับกรณีที่มี particular block และ blocks ที่มีขนาดสูงอื่นๆ ในระบบ การที่จะตรวจสอบได้ว่า toppling mode ที่เกิดวิกฤต จำเป็นต้องหา n_2 ซึ่งเป็น upper limit ของ sliding section

นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบว่า

$$R_n > 0$$

$$|S_n| < R_n \tan \phi$$

4. block ที่อยู่ถัดไปคือ block ที่ $(n-1)$ และ blocks ด้านล่างทั้งหมด จะมีกระบวนการคำนวณในแบบเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้ว

5. ดังนั้นเมื่อ block หนึ่งถูกกระทำด้วยแรงซึ่ง $P_{n-1, s} > P_{n-1, t}$ แสดงว่าเกิด block n_2 และ blocks ที่อยู่ต่ำกว่า จะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการ slide

แต่ถ้า $P_{n-1,t} > P_{n-1,s}$ ไม่พบ blocks ใดที่จะเกิด sliding แต่ toppling จะเกิดและขยายไปเรื่อยจนถึง block 1

6. พิจารณาที่ toe ของ block 1

- ถ้า $P_0 > 0$, slope ไม่ stable สำหรับค่า ϕ ที่สมมุติขึ้นมา ดังนั้นในการคำนวณซ้ำจึงจำเป็นต้องเพิ่มค่า ϕ ให้สูงขึ้น
- ถ้า $P_0 < 0$ ทำการคำนวณซ้ำอีกโดยลดค่า ϕ
- ถ้า P_0 มีค่าเล็กน้อย ค่าของ ϕ นี้จะนำมาใช้เหมาะสมสำหรับสภาวะของ limit equilibrium

b) การหา cable force เพื่อให้ slope มีเสถียรภาพ

กำหนดให้ cable ติดตั้งผ่าน block 1 ที่ระยะทาง L_1 เหนือฐานของ block และ cable เอียงทำมุม δ ต่ำจากแนวระดับ นอกจากนี้ cable ผังลงไปยังจุดที่เหมาะสมต่ำกว่าด้านฐาน

ค่า tension ใน cable ที่ต้องการป้องกัน toppling ของ block 1 คือ

$$T_t = \frac{(W_1 / 2)(y_1 \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha) + P_1(Y_1 - \Delta x \tan \phi)}{L_1 \cos (\alpha + \delta)} \quad (347)$$

ขณะที่ tension ใน cable ที่ป้องกัน sliding มีค่าเท่ากับ

$$T_s = \frac{P_1(1 - \tan^2 \phi) - W_n(\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)}{\tan \phi \sin (\alpha + \delta) + \cos (\alpha + \delta)} \quad (348)$$

แรงที่กระทำของ normal force และ shear force บนฐานของ block คือ

$$R_1 = P_1 \tan \phi + T \sin (\alpha + \delta) + W_1 \cos \alpha \quad (349)$$

$$S_1 = P_1 - T \cos (\alpha + \delta) + W_1 \sin \alpha \quad (350)$$

กระบวนการคำนวณ block อื่น จะเท่ากับที่คำนวณ block 1 สำหรับการหา tension ที่ต้องการจะมีค่ามากกว่า T_t และ T_s ได้แสดงไว้ในสมการ 347 และ สมการ 348

c) ตัวอย่างของการวิเคราะห์ที่เรื่อง Toppling Failure

ตัวอย่างในอุดมคติตั้งรูปที่ 50 วัดได้ rock slope สูง 92.5 เมตร ถูกตัด slope ทำมุมเอียง 56.6° มุม dip ของ layered rock มีค่า 60° เอียงเข้าในเนินเขา จากรูปที่ 50 ได้แบ่งออกเป็น 16 blocks ในลักษณะเป็น base stepped { มุม $(\beta - \alpha) = 5.8^\circ$ } ค่าคงที่ต่างๆ มีดังนี้ $a_1 = 5.0$ เมตร, $a_2 = 5.0$ เมตร, $b = 1.0$ เมตร, $\Delta x = 10.0$ เมตร และ $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ ปรากฏว่า block 10 เป็นตำแหน่ง crest ของ slope มีมุมเงยเท่ากับ 4° เนื่องจาก $\cot \alpha = 1.78$ ดังนั้น block ที่ 14, 15, 16 เป็น stable zone ในทุกกรณีที่ $\phi > 30^\circ$ ($\tan \phi > 0.577$)

ในตัวอย่างกำหนดให้ $\tan \phi$ นี้ ให้ค่าเท่ากับ 0.7855 ค่า P_{13} จะมีค่าเท่าศูนย์ ส่วนค่า P_{12} ได้จากค่าที่มากกว่าระหว่าง $P_{12,t}$ และ $P_{12,s}$ ที่หาได้จากสมการ 344 และ 346 ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 หน้า 126 เมื่อ $n = 3$ เป็นตำแหน่งสุดท้ายที่ $P_{n-1,s}$ มากกว่า $P_{n-1,t}$ [นั่นคือ เมื่อ $n = 4 - 13$ ค่า $P_{n,t}$ มากกว่า $P_{n,s}$] ดังนั้น block ที่ 1-3 เป็น sliding zone และ block ที่ 4-13 เป็น toppling zone แรงที่ใช้ป้องกันการ slide ของ block 1 มีแนวโน้มเป็นศูนย์ ดังนั้น slope จะใกล้เคียงกับสภาวะ limit equilibrium ค่า tension ที่ต้องเสริมเข้าไปเพื่อทำให้เกิดเสถียรภาพของ block 1 เท่ากับ 0.5 kN/meter of slope crest length ในขณะที่เดียวกันก็จะคำนวณค่าสูงสุดของ P ที่เสริมเสถียรภาพของ block 6 เท่ากับ 4,837 kN/m

ถ้าค่า $\tan \phi$ ถูกลดลงเป็น 0.650 จะพบว่า block ที่ 1-4 ในบริเวณ toe จะเริ่ม slide ในขณะที่ block ที่ 5-13 จะเริ่ม topple ค่าของแรงเสริมเสถียรภาพของ bolt หรือ cable ที่ถูกติดตั้งในแนวราบผ่าน block 1 เพื่อให้เกิดสมดุลงามีค่า tension เท่ากับ 2,013 kN/meter of length crest สำหรับแรงที่ต้องเสริมเพื่อให้เกิดการสมดุล เมื่อ first "n" toe block ถูกขุดหรือย้ายออกไป จะคำนวณได้จากสมการที่ 347 และ 348 โดยการแทนค่า P_{n+1} ด้วย P_1

อนึ่งมีข้อสังเกตว่า การเกิด force distributions ของ P forces ได้แสดงไว้ในบริเวณที่เกิด toppling ค่าแรง R_n และ S_n บนฐานของคอลัมน์สามารถคำนวณได้จากสมการ 342 และ 343 โดยสมมติให้ $Q_{n-1} = P_{n-1} \tan \phi$ ในทำนองเดียวกันค่า R_n และ S_n ก็สามารถคำนวณได้ในกรณีของบริเวณที่เกิด sliding รูปที่ 50 แสดง force distributions ตลอดทั้ง slope โดยกำหนดให้มีสภาวะของ $R_n > 0$ และ $|S_n| < R_n \tan \phi$ จะ satisfy ทุกตำแหน่งบน slope

ตารางที่ 5 การคำนวณค่าแรงต่างๆ ที่กระทำบน block ต่างๆ ตามตัวอย่าง และรูปที่ 50

n	y_n	$\Delta y/\Delta x$	M_n	L_n	$P_{n,t}$	$P_{n,s}$	P_n	R_n	S_n	S_n/R_n	
16	4.0	0.4			0	0	0	866.0	500.0	0.577	Mode
15	10.0	1.0			0	0	0	2165.0	1250.0	0.577	
14	16.0	1.6			0	0	0	3463.0	2000.0	0.577	STABLE
13	22.0	2.2	17	22	0	0	0	4533.4	2457.5	0.542	-----
12	28.0	2.8	23	28	292.5	-2588.7	292.5	5643.3	2966.8	0.526	
11	34.0	3.4	29	34	825.7	-3003.2	825.7	6787.6	3520.0	0.519	T
10	40.0	4.0	35	35	1556.0	-3175.0	1556.0	7662.1	3729.3	0.487	O
9	36.0	3.6	36	31	2826.7	-3150.8	2826.7	6933.8	3404.6	0.491	P
8	32.0	3.2	32	27	3922.1	-1409.4	3922.1	6399.8	3327.3	0.520	P
7	28.0	2.8	28	23	4594.8	156.8	4594.8	5872.0	3257.8	0.555	L
6	24.0	2.4	24	19	4837.0	1300.1	4837.0	5352.9	3199.5	0.598	I
5	20.0	2.0	20	15	4637.5	2013.0	4637.5	4848.1	3159.4	0.652	N
4	16.0	1.6	16	11	3978.1	2284.1	3978.1	4369.4	3152.5	0.722	G
3	12.0	1.2	12	7	2825.6	2095.4	2825.6	3707.3	2912.1	0.7855	-----
2	8.0	0.8	8	3	1103.1	1413.5	1413.5	2471.4	1941.3	0.7855	SLIDING
1	4.0	0.4	4	-	-1485.1	472.2	472.2	1237.1	971.8	0.7855	



5.4 ค่าปัจจัยความปลอดภัยสำหรับการวิเคราะห์ Limit Equilibrium

ค่าปัจจัยของความปลอดภัยของ toppling failure หากจากค่าอัตราส่วนที่เป็น tangent ของ friction angle ที่เชื่อว่าจะเกิดกับ rock layers ($\tan \phi_{\text{available}}$) หารด้วยค่า tangent ของ friction angle ($\tan \phi_{\text{required}}$) ที่ต้องการเพื่อจะให้เกิดสภาวะสมดุลเมื่อมีแรงเสริมเสถียรภาพ T กระทำ

$$F = \frac{\tan \phi_{\text{available}}}{\tan \phi_{\text{required}}} \quad (351)$$

จากตัวอย่างในหัวข้อ 5.3 c ถ้าค่าประมาณของ $\tan \phi = 0.800$ สำหรับการเกิด surface sliding ซึ่งกันและกันของหิน จะได้ค่า factor of safety ในตัวอย่างนี้ เมื่อ $\tan \phi_{\text{required}} = 0.7855$ (ค่า support force ใน block ที่ 1 มีค่า = 0.5 kN) ได้ค่า factor of safety มีค่าเท่ากับ $0.800/0.7855 = 1.02$ แต่ค่า $\tan \phi_{\text{required}} = 0.650$, support force = 2,013 kN จะได้ factor of safety = $0.800/0.650 = 1.23$

ในกรณีที่ columns เหล่านี้เกิด overturn เพียงเล็กน้อย ค่าความเสียดทานที่ป้องกันการเกิด rotation จะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในสภาพจริง slope ของการวิเคราะห์แบบ limit equilibrium เป็นเพียงอยู่ในสภาวะ กึ่งสมดุล (meta-stable) อย่างไรก็ตาม rotation = $2(\beta - \alpha)$ จะกลับส่วนของ edge กับ face ที่สัมผัสตามด้านข้างของคอลัมน์เป็นสัมผัสแบบ continuous face และค่ามุมเสียดทาน ($\phi_{\text{available}}$) ที่ป้องกันไม่ให้เกิด rotation จะลดลงอย่างรวดเร็ว บางทีน้อยกว่าตำแหน่งที่เกิดสมดุลครั้งแรกเสียอีก ดังนั้นการเลือกค่า factor of safety จึงขึ้นอยู่กับขอบเขตของพฤติกรรม rock deformation ของหินที่สามารถรับได้ของหินแต่ละชนิดด้วย

บทที่ 6

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

การวิเคราะห์โดยอาศัยโปรแกรมภาษา C ที่ผู้วิจัยได้จัดทำเป็น package ซึ่งมีชื่อ โปรแกรมใหญ่ว่า Stabil.exe มีวิธีการใช้ให้ป้อนข้อมูลในแบบ menu ตัวอย่างของการป้อนข้อมูล ขั้นตอนของการคำนวณ และการแสดงผลทั้งรูปแบบตารางกับผลของค่า factor of safety กับภาพกราฟฟิคที่ปรากฏบนจอ (ในบางโปรแกรม) ได้แสดงไว้ตั้งแต่หน้า 131-215

จากภาพบนจอที่ปรากฏเป็น menu ชื่อย่อของ โปรแกรมย่อย ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของ slopes หลายรูปแบบ

1) Plane Failure Analysis

ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายมวลดิน/หิน แบบเป็นระนาบที่เกิดแบบ translational failure ได้แสดงไว้ตั้งแต่หน้า 131-143

2) Circular (Slip) Failure Analysis

แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แบบ

ก) Bishop Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายมวลดินรูป circular arc ตามวิธีของ Bishop ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้า 144-149

ข) Janbu Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลดิน รูป circular arc ตามวิธีของ Janbu ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้า 150-152

ค) Non - Linear Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายมวลดินรูป circular arc ตามวิธี Bishop สำหรับ non-linear failure material ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้า 153-154

3) Wedge Failure Analysis

แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แบบ

ก) Sarma Method Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลดินรูป wedge (หรือรูปแบบอื่น) ที่มีการพังทลายบน slope ตามวิธีของ Sarma ตัวอย่างได้แสดงไว้ตั้งแต่หน้า 155-187

ข) Surface Wedge Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินรูป wedge ที่อยู่บน slope ตามวิธีของ Hoek and Bray ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้าที่ 188-202

ค) Underground Wedge Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินรูป wedge ที่มีการพังทลายใน tunnel ตามวิธีของ Hoek and Brown ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้าที่ 203-206

4) Toppling Failure Analysis

เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินรูป topple สำหรับ slope ที่มีแนว discontinuities สูงชัน ตามวิธีของ Goodman and Bray ตัวอย่างได้แสดงไว้ในหน้าที่ 207-215

6.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ของ Plane failure

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	20.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	50.00
COHESION,kN/sq.m =	30.00
FRICTION ANGLE,degree =	30.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <40.00>=	40.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	.
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	6.00
REINFORCING FORCE,kN =	500.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	15.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	50.00
COHESION,kN/sq.m =	30.00
FRICTION ANGLE,degree =	30.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <40.00>=	40.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	.
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	6.00
REINFORCING FORCE,kN =	500.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	15.00
FACTOR OF SAFETY =	2.854

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	70.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	20.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	22.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <45.00>=	45.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
REINFORCING FORCE,kN =	100.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART (Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	70.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	20.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	22.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <45.00>=	45.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
REINFORCING FORCE,kN =	100.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	0.777

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	34.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.00>=	47.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	15.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	34.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.00>=	47.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	15.00
FACTOR OF SAFETY =	1.396

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	60.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	100.00
FRICTION ANGLE,degree =	15.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	24.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <37.50>=	37.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

COHESION,kN/sq.m =	100.00
FRICTION ANGLE,degree =	15.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	24.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <37.50>=	37.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	0.698

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	60.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	100.00
FRICTION ANGLE,degree =	15.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <37.50>=	37.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	34.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

COHESION,kN/sq.m =	100.00
FRICTION ANGLE,degree =	15.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <37.50>=	37.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	34.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	0.819

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
HEIGHT OF WATER PRESSURE FORCE,m =	15.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N) ?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
HEIGHT OF WATER PRESSURE FORCE,m =	15.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY = 1.373	
PRESS ANY KEY TO CONTINUE	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	5.30
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	5.30
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	0.826

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	25.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	25.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	1.565

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	40.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	S
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY = 1.083	

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	35.00
SLOPE STATUS ?	T
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
PLEASE CHECK INPUT DATA;DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Calculate Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	20.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	35.00
SLOPE STATUS ?	T
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
HEIGHT OF WATER PRESSURE IN TENSION CRACK,m =	5.00
REINFORCING FORCE,kN =	1000.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
FACTOR OF SAFETY =	1.995

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Raise of Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
HEIGHT OF WATER PRESSURE FORCE,m =	15.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	1.79
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Raise of Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICTION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	47.50
SLOPE STATUS ?	B
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	N
HEIGHT OF WATER PRESSURE FORCE,m =	15.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	1.79
REINFORCING FORCE =	1176.30 kN

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

— Raise of Factor of Safety —

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	35.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	3.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

— Raise of Factor of Safety —

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	35.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	U
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	15.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	3.00
REINFORCING FORCE =	2662.15 kN

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Raise of Factor of Safety

HEIGHT OF SLOPE,m. =	30.00
ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	40.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	25.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	3.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Plane

Raise of Factor of Safety

ANGLE OF SLOPE FACE,degree =	60.00
COHESION,kN/sq.m =	50.00
FRICITION ANGLE,degree =	35.00
DENSITY OF ROCK,kN/cu.m =	25.00
ANGLE OF FAILURE PLANE,degree <47.50>=	40.00
SLOPE STATUS ?	D
HAVE TENSION CRACK <Y/N>	Y
'U' FOR TENSION CRACK ON UPPER SLOPE SURFACE OR	
'S' FOR TENSION CRACK ON SLOPE FACE =	S
DEPTH OF TENSION CRACK FROM CREST,m =	25.00
DIP ANGLE OF REINFORCING FORCE,degree =	30.00
REQUIRED FACTOR OF SAFETY =	3.00
REINFORCING FORCE =	96.64 kN

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

6.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Bishop

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:

	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	0.00	60.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	40.00	60.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	100.00	0.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	150.00	0.00

NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.

	X(m)	Y(m)
1st coordinate	0.00	0.00
2nd coordinate	20.00	0.00
3rd coordinate	80.00	0.00
4th coordinate	120.00	0.00

cohesion (kN/m²) = 100.00
friction angle (degree) = 25.00
unit weight of rock (kN/cu.m) = 25.00

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 75.0 Y(m) = 65.0 R(m) = 50.0

intermediate check first = 18 intermediate check last = 56
intermediate check convfs = 1.340 intermediate check denom = 14081.0
intermediate check finit = 1.441 intermediate check fnext = 1.441

CENTER X = 75.0 m CENTER Y = 65.0 m RADIUS = 50.0 m
FS BY CONVENTIONAL METHOD = 1.34 BY BISHOP'S METHOD = 1.44
OVERTURNING MOMENT = 704050.8 kN-m
NUMBER OF ITERATIONS = 4

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	0.00	0.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	5.00	0.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	18.86	8.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	22.00	8.00
NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE		
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.	X(m)	Y(m)
1st coordinate	0.00	0.00
2nd coordinate	5.00	0.00
3rd coordinate	18.86	0.00
4th coordinate	22.00	0.00
cohesion (kN/m ²)	=	14.50
friction angle (degree)	=	15.00
unit weight of rock (kN/cu.m)	=	18.62

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 6.0 Y(m) = 14.9 R(m) = 15.0

intermediate check first =	20	intermediate check last =	88
intermediate check convfs =	-1.588	intermediate check denom =	-246.7
intermediate check finit =	-1.628	intermediate check fnext =	-1.628

CENTER X = 6.0 m CENTER Y = 14.9 m RADIUS = 15.0 m

FS BY CONVENTIONAL METHOD = -1.59 BY BISHOP'S METHOD = -1.63

OVERTURNING MOMENT = -3701.0 kN-m

NUMBER OF ITERATIONS = 4

[N.B. MINUS MEANS MOVING IN - X DIRECTION]

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N) ?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	0.00	5.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	3.00	5.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	10.00	0.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	15.00	0.00
NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE		
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.	X(m)	Y(m)
1st coordinate	0.00	3.00
2nd coordinate	3.00	2.00
3rd coordinate	10.00	-1.00
4th coordinate	15.00	-1.50
cohesion (kN/m ²)	100.00	
friction angle (degree)	=	25.00
unit weight of rock (kN/cu.m)	=	26.00

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 7.0 Y(m) = 6.5 R(m) = 5.0

intermediate check first =	16	intermediate check last =	52
intermediate check convfs=	9.439	intermediate check denom=	82.1
intermediate check finit =	9.497	intermediate check fnext=	9.497

CENTER X = 7.0 m CENTER Y = 6.5 m RADIUS = 5.0 m

FS BY CONVENTIONAL METHOD = 9.44 BY BISHOP'S METHOD = 9.50

OVERTURNING MOMENT = 410.6 kN-m

NUMBER OF ITERATIONS = 4

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE(Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	0.00	0.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	5.00	0.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	12.00	5.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	15.00	5.00

NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.

	X(m)	Y(m)
1st coordinate	0.00	-1.50
2nd coordinate	5.00	-1.00
3rd coordinate	12.00	2.00
4th coordinate	15.00	3.00

cohesion (kN/m²) = 100.00
friction angle (degree) = 25.00
unit weight of rock (kN/cu.m) = 26.00

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) =	8.0	Y(m) =	6.5	R(m) =	5.0
--------	-----	--------	-----	--------	-----

intermediate check first =	49	intermediate check last =	85
intermediate check convfs =	-9.439	intermediate check denom =	-82.1
intermediate check finit =	-9.497	intermediate check fnext =	-9.497

CENTER X =	8.0 m	CENTER Y =	6.5 m	RADIUS =	5.0 m
FS BY CONVENTIONAL METHOD =	-9.44	BY BISHOP'S METHOD =	-9.50		
OVERTURNING MOMENT =	-410.6 kN-m				
NUMBER OF ITERATIONS =	4				

[N.B. MINUS MEANS MOVING IN - X DIRECTION]

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	0.00	50.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	30.00	50.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	100.00	0.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	150.00	0.00

NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.

	X(m)	Y(m)
1st coordinate	0.00	0.00
2nd coordinate	30.00	0.00
3rd coordinate	100.00	0.00
4th coordinate	150.00	0.00

cohesion (kN/m²) = 100.00
friction angle (degree) = 25.00
unit weight of rock (kN/cu.m) = 25.00

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 75.0 Y(m) = 65.0 R(m) = 50.0

intermediate check first =	19	intermediate check last =	53
intermediate check convfs =	1.856	intermediate check denom =	6314.8
intermediate check finit =	1.924	intermediate check fnext =	1.924

CENTER X = 75.0 m CENTER Y = 65.0 m RADIUS = 50.0 m
FS BY CONVENTIONAL METHOD = 1.86 BY BISHOP'S METHOD = 1.92
OVERTURNING MOMENT = 315737.7 kN-m
NUMBER OF ITERATIONS = 4

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 70.0 Y(m) = 65.0 R(m) = 20.0

CIRCLE DOESN'T CUT SLOPE

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY BISHOP'S METHOD

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 75.0 Y(m) = 65.0 R(m) = 80.0

Too wide circle!

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

6.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Janbu

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY JANBU'S METHOD

INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:	X(m)	Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION	1.00	4.00
CREST OF SLOPE, OR TOE	3.00	4.00
TOE OF SLOPE, OR CREST	8.00	1.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION	10.00	1.00

NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.

	X(m)	Y(m)
1st coordinate	1.00	0.00
2nd coordinate	3.00	0.00
3rd coordinate	8.00	0.00
4th coordinate	10.00	0.00

cohesion (kN/m²) = 100.00
friction angle(degree) = 25.00
unit weight of rock(kN/cu.m) = 25.00

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY JANBU'S METHOD

INPUT COORDINATE FOR THE MIDDLE TWO POINTS OF THE SLIP SURFACE (m)

1st coordination	3.00	3.00
2nd coordination	8.00	0.00

intermediate check convf = 16.99
intermediate check denom = 64.83
intermediate check denom = 75.60
intermediate check finit = 16.886 intermediate check fnext = 16.885
d/L RATIO = 0.167 CORRECTION FACTOR = 1.065
FS BY CONVENTIONAL METHOD= 16.989
BY JANBU'S METHOD = 17.977
NUMBER OF ITERATIONS = 3

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE(Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY JANBU'S METHOD

INPUT COORDINATE FOR THE MIDDLE TWO POINTS OF THE SLIP SURFACE (m)

1st coordination	2.00	3.00
2nd coordination	9.00	-0.50

intermediate check convf = 13.14
intermediate check denom = 91.48
intermediate check denom = 94.37
intermediate check finit = 16.503 intermediate check fnext = 16.503
d/L RATIO = 0.183 CORRECTION FACTOR = 1.068
FS BY CONVENTIONAL METHOD= 13.136
BY JANBU'S METHOD = 17.631
NUMBER OF ITERATIONS = 3

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N) ?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Circular

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY JANBU'S METHOD

INPUT COORDINATE FOR THE MIDDLE TWO POINTS OF THE SLIP SURFACE (m)

1st coordination	3.00	0.00
2nd coordination	8.00	5.00

SLIP SURFACE TOO HIGH

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N) ?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

— Circular —

SLOPE STABILITY ANALYSIS BY JANBU'S METHOD

INPUT COORDINATE FOR THE MIDDLE TWO POINTS OF THE SLIP SURFACE (m)

1st coordination	1.00	4.00
2nd coordination	5.00	5.00

Coordinates incorrect!

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE(Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์สำหรับ Non-linear Criterion Material

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

```
      Circular
SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR NON-LINEAR CRITERION
INPUT PAIRS OF COORDINATES AS FOLLOWS:      X(m)      Y(m)
LEFT HAND EDGE OF SECTION      1.00      4.00
CREST OF SLOPE, OR TOE      3.00      4.00
TOE OF SLOPE, OR CREST      8.00      1.00
RIGHT HAND EDGE OF SECTION      10.00     1.00
NOW FOUR PAIRS OF COODS TO DEFINE THE PIEZO LINE
IN EXACTLY THE SAME FORM AS FOR G. L.      X(m)      Y(m)
1st coordinate      1.00      0.00
2nd coordinate      3.00      0.00
3rd coordinate      8.00      0.00
4th coordinate      10.00     0.00
a = 0.042  b = 0.543  t = 0.000
unit weight of rock(kN/cu.m) =      25.00
uniaxial compressive strength of the intact rock pieces=      75.00 kN/sq.m

PRESS ANY KEY TO CONTINUE
```

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

```
      Circular
SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR NON-LINEAR CRITERION
INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE
      X(m) =      7.5      Y(m) =      6.5      R(m) =      5.0

intermediate check first =      26      intermediate check last =      68
intermediate check finit =      0.480      intermediate check fos =      0.480
CENTER X =      7.5 m      CENTER Y =      6.5 m      RADIUS =      5.0 m
FS BY NON-LINEAR CRITERION METHOD =      0.480
NUMBER OF ITERATIONS      =      3

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE(Y/N)?
```

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

— Circular —

SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR NON-LINEAR CRITERION

INPUT COORDINATE OF CENTER AND RADIUS FOR THE SLIP CIRCLE

X(m) = 7.0 Y(m) = 4.0 R(m) = 3.0

Too low center

DO YOU WANT INPUT NEW CIRCLE (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ตามวิธี Sarma

Analysis no. Analysis of the stability of a spoil pile on a weak, inclined...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3
coordinate xt (m)	0.0	83.0	111.4
coordinate yt (m)	0.0	57.0	76.5
coordinate xw (m)	0.0	83.0	128.0
coordinate yw (m)	0.0	57.0	67.0
coordinate xb (m)	0.0	108.0	128.0
coordinate yb (m)	0.0	6.4	67.0
friction (degree)	0.0	42.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	100.0	0.0

Slice number	1	2
unit wt (kN/cu.m)	15.7	15.7
friction (degree)	6.0	42.0
cohesion (kN/m ²)	10.0	100.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of a spoil pile on a weak, inclined...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3
coordinate xt (m)	0.0	83.0	111.4
coordinate yt (m)	0.0	57.0	76.5
coordinate xw (m)	0.0	83.0	128.0
coordinate yw (m)	0.0	57.0	67.0
coordinate xb (m)	0.0	108.0	128.0
coordinate yb (m)	0.0	6.4	67.0
friction (degree)	0.0	42.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	100.0	0.0

Slice number	1	2
unit wt (kN/cu.m)	15.7	15.7
friction (degree)	6.0	42.0
cohesion (kN/m ²)	10.0	100.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

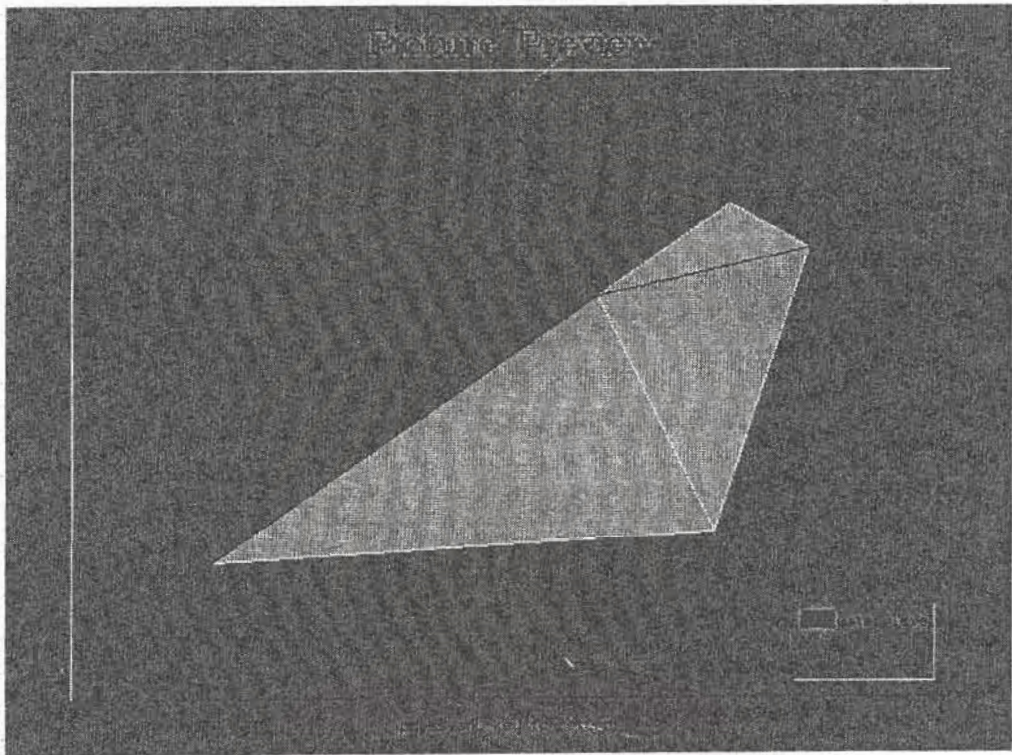
Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	147.2	-14.1
σ (side) kN/m ²	0.0	-130.6

Acceleration Kc = -0.2087 Factor of safety = 0.26

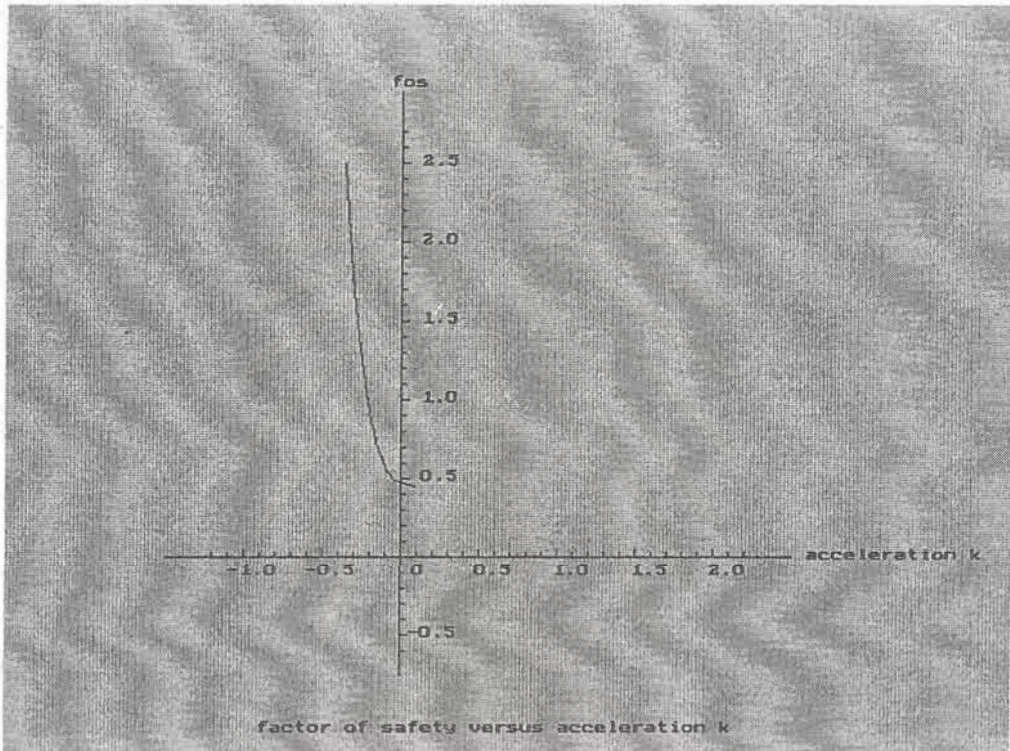
Negative effective normal stresses - solution unacceptable

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 51 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ spoil pile with water
ที่กองบนฐานรากที่ลาดเอียงและไม่แข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ spoil pile with water

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
0.2639	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no. Analysis of the stability of a soil pile on a weak, inclined...

f.o.s	acc. K	1/fos
0.2600	0.0038	3.8462
0.2670	-0.0030	3.7453
2.6500	-0.3631	0.3774
0.2630	0.0009	3.8023
0.2640	-0.0001	3.7879
0.2635	0.0004	3.7951
0.2634	0.0005	3.7965
0.2633	0.0006	3.7979
0.2638	0.0001	3.7908
0.2639	0.0000	3.7893

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no. Analysis of the stability of ex1. when drained (xw,yw = 0) ...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3
coordinate xt (m)	0.0	83.0	111.4
coordinate yt (m)	0.0	57.0	76.5
coordinate xw (m)	0.0	0.0	0.0
coordinate yw (m)	0.0	0.0	0.0
coordinate xb (m)	0.0	108.0	128.0
coordinate yb (m)	0.0	6.4	67.0
friction (degree)	0.0	42.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	100.0	0.0

Slice number	1	2
unit wt (kN/cu.m)	15.7	15.7
friction (degree)	6.0	42.0
cohesion (kN/m ²)	10.0	100.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of ex1 when drained (xw,yw = 0) ...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3
coordinate xt (m)	0.0	83.0	111.4
coordinate yt (m)	0.0	57.0	76.5
coordinate xw (m)	0.0	108.0	128.0
coordinate yw (m)	0.0	6.4	67.0
coordinate xb (m)	0.0	108.0	128.0
coordinate yb (m)	0.0	6.4	67.0
friction (degree)	0.0	42.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	100.0	0.0

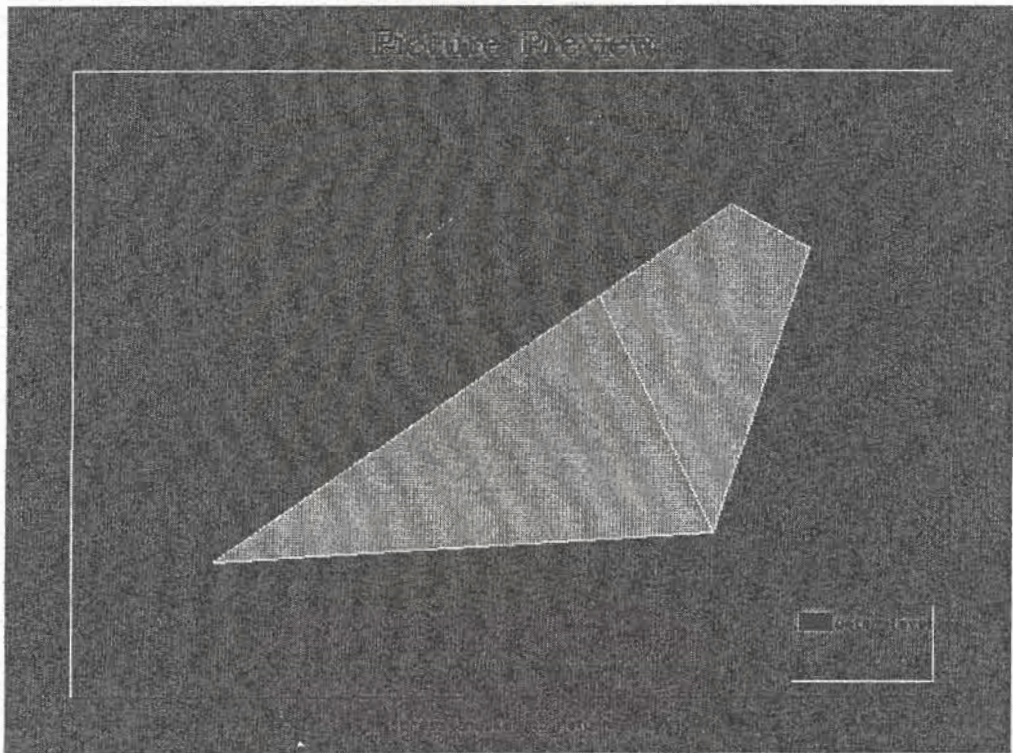
Slice number	1	2
unit wt (kN/cu.m)	15.7	15.7
friction (degree)	6.0	42.0
cohesion (kN/m ²)	10.0	100.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	529.5	92.5
σ (side) kN/m ²	0.0	145.3

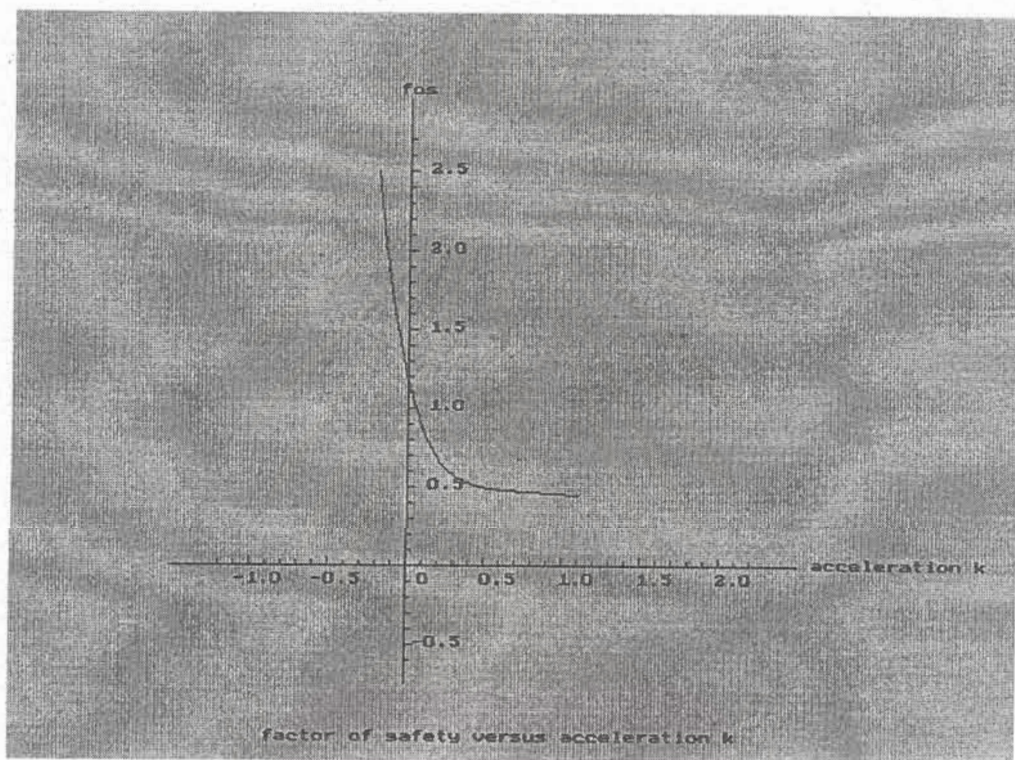
Acceleration Kc = 0.0539 Factor of safety = 1.20

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 53 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ
spoil pile with water อีกรูปแบบหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ spoil pile with water อีกรูปแบบหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
1.1974	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no. Analysis of the stability of exl.
when drained (xw,yw = 0)...

f.o.s	acc. K	1/fos
1.1500	0.0117	0.8696
1.1900	0.0018	0.8403
1.3000	-0.0234	0.7692
1.2500	-0.0123	0.8000
1.2000	-0.0006	0.8333
1.1960	0.0003	0.8361
1.1990	-0.0004	0.8340
1.1968	0.0002	0.8356
1.1969	0.0001	0.8355
1.1970	0.0001	0.8354
1.1980	-0.0001	0.8347
1.1972	0.0001	0.8353
1.1975	-0.0000	0.8351
1.1974	0.0000	0.8351

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no. Analysis of the stability of a partially submerged rockfill...
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt(m)	2.0	6.6	11.3	15.0	19.0	19.0
coordinate xw(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw(m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
coordinate xb(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb(m)	2.0	0.5	1.0	3.2	6.7	10.5
friction(degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt(kN/cu.m)	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7
friction(degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of a partially submerged rockfill...
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt(m)	17.0	17.0	17.0
coordinate xw(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw(m)	15.0	16.2	17.0
coordinate xb(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb(m)	15.0	16.2	17.0
friction(degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0

Slice number	7	8
unit wt(kN/cu.m)	19.7	19.7
friction(degree)	40.0	33.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of a partially submerged rockfill...
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

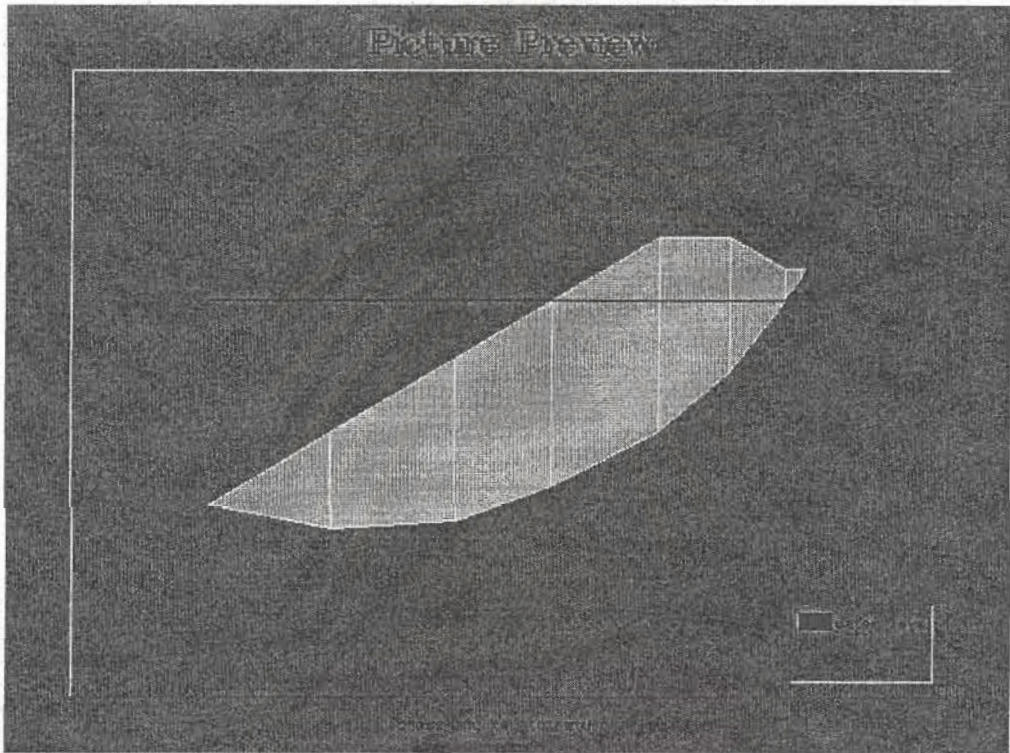
Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt(m)	2.0	6.6	11.3	15.0	19.0	19.0
coordinate xw(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw(m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
coordinate xb(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb(m)	2.0	0.5	1.0	3.2	6.7	10.5
friction(degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7
friction(degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Effective normal stresses						
σ (base) kN/m ²	41.0	92.0	97.0	110.2	91.7	42.0
σ (side) kN/m ²	0.0	27.6	36.1	30.7	24.8	16.2
Acceleration Kc =	0.2106					
Factor of safety =				1.91		

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of a partially submerged rockfill...
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

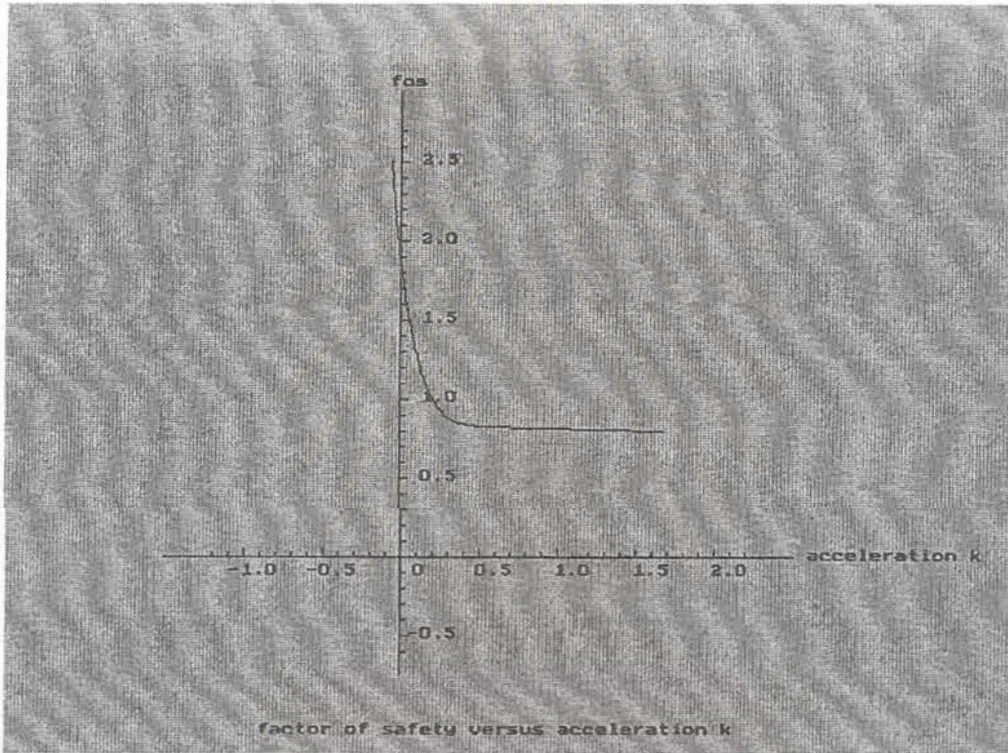
Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt(m)	17.0	17.0	17.0
coordinate xw(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw(m)	15.0	16.2	17.0
coordinate xb(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb(m)	15.0	16.2	17.0
friction(degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0
Slice number	7	8	
unit wt (kN/cu.m)	19.7	19.7	
friction(degree)	40.0	33.0	
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	
force T (kN)	0.0	0.0	
theta (degree)	0.0	0.0	
Effective normal stresses			
σ (base) kN/m ²	14.7	3.5	
σ (side) kN/m ²	6.8	2.9	
Acceleration Kc =	0.2106		
Factor of safety =			1.91

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 55 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ partially submerged rockfill slope บนฐานรากที่เป็น sand

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ partially submerged rockfill slope

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
1.9126	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no. Analysis of the stability of a partially submerged rockfill...

f.o.s	acc. K	1/fos
1.9130	-0.0000	0.5227
1.9126	0.0000	0.5228

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no. Analysis of the stability of an open pit coal mine slope...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	68.0
coordinate yt (m)	17.0	26.0	26.0	24.0	25.0	37.0
coordinate xw (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	80.0
coordinate yw (m)	17.0	12.0	10.0	10.0	8.0	11.0
coordinate xb (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	80.0
coordinate yb (m)	17.0	12.0	10.0	10.0	8.0	11.0
friction (degree)	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	18.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
friction (degree)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
cohesion (kN/m ²)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of an open pit coal mine slope...
Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	7	8	9	10
coordinate xt (m)	140.0	165.0	178.0	204.0
coordinate yt (m)	88.0	90.0	99.0	103.0
coordinate xw (m)	155.0	173.0	186.0	204.0
coordinate yw (m)	65.0	80.0	89.0	103.0
coordinate xb (m)	155.0	173.0	186.0	204.0
coordinate yb (m)	65.0	80.0	89.0	103.0
friction (degree)	18.0	18.0	18.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	7	8	9
unit wt (kN/cu.m)	2.1	2.1	2.1
friction (degree)	30.0	30.0	30.0
cohesion (kN/m ²)	2.0	2.0	2.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of an open pit coal mine slope...
 Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	68.0
coordinate yt (m)	17.0	26.0	26.0	24.0	25.0	37.0
coordinate xw (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	80.0
coordinate yw (m)	17.0	12.0	10.0	10.0	8.0	11.0
coordinate xb (m)	4.0	17.0	29.0	30.0	50.0	80.0
coordinate yb (m)	17.0	12.0	10.0	10.0	8.0	11.0
friction (degree)	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0	18.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
friction (degree)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
cohesion (kN/m ²)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	23.4	94.8	175.3	38.5	64.7	48.3
σ (side) kN/m ²	0.0	15.6	64.2	81.8	86.4	77.7

Acceleration Kc = 0.4979 Factor of safety = 2.04

Large extrapolation - plot of fos vs K suggested to check fos

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Analysis of the stability of an open pit coal mine slope...
 Unit weight of water = 10.00 kN/cu.m

Side number	7	8	9	10
coordinate xt (m)	140.0	165.0	178.0	204.0
coordinate yt (m)	88.0	90.0	99.0	103.0
coordinate xw (m)	155.0	173.0	186.0	204.0
coordinate yw (m)	65.0	80.0	89.0	103.0
coordinate xb (m)	155.0	173.0	186.0	204.0
coordinate yb (m)	65.0	80.0	89.0	103.0
friction (degree)	18.0	18.0	18.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	7	8	9
unit wt (kN/cu.m)	2.1	2.1	2.1
friction (degree)	30.0	30.0	30.0
cohesion (kN/m ²)	2.0	2.0	2.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0

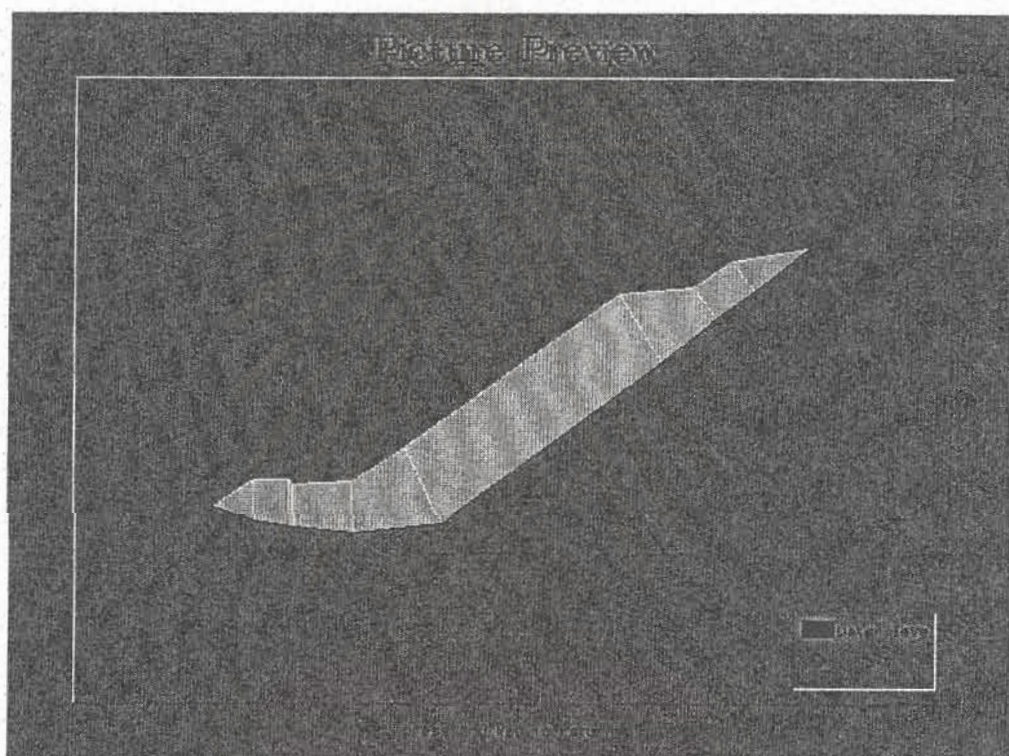
Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	31.9	20.4	10.0
σ (side) kN/m ²	21.3	17.9	7.7

Acceleration Kc = 0.4979 Factor of safety = 2.04

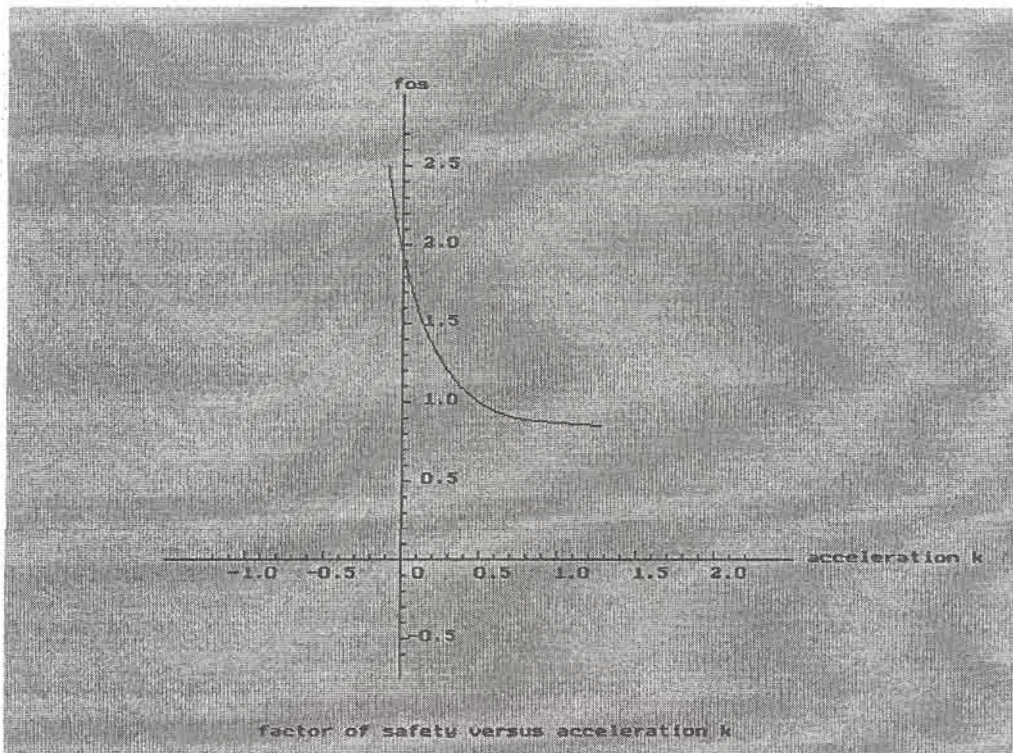
Large extrapolation - plot of fos vs K suggested to check fos

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 57 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ slope
สำหรับ open pit mine

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ open pit mine slope

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
1.9690	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no. Analysis of the stability of an
open pit coal mine slope...

f.o.s	acc. K	1/fos
1.9500	0.0042	0.5128
1.9900	-0.0045	0.5025
1.9600	0.0020	0.5102
1.9700	-0.0002	0.5076
1.9680	0.0003	0.5081
1.9690	0.0000	0.5079

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no. Example for Sarma analysis for fully submerged
 Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt(m)	2.0	6.6	11.3	15.0	15.0	15.0
coordinate xw(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw(m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
coordinate xb(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb(m)	2.0	0.5	1.0	3.2	6.7	10.5
friction(degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
friction(degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
 To edit title or data array, use direction keys to move
 cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
 or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Example for Sarma analysis for fully submerged
 Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt(m)	15.0	15.0	15.0
coordinate xw(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw(m)	15.0	15.0	15.0
coordinate xb(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb(m)	15.0	15.0	15.0
friction(degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0

Slice number	7	8
unit wt (kN/cu.m)	21.0	21.0
friction(degree)	40.0	33.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
 To edit title or data array, use direction keys to move
 cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
 or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Example for Sarma analysis for fully submerged
 Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt (m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt (m)	2.0	6.6	11.3	15.0	15.0	15.0
coordinate xw (m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw (m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
coordinate xb (m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb (m)	2.0	0.5	1.0	3.2	6.7	10.5
friction (degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
friction (degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	42.3	98.6	109.7	90.6	48.5	14.0
σ (side) kN/m ²	0.0	24.9	30.6	21.8	18.6	10.3

Acceleration Kc = 0.2438 Factor of safety = 2.35

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no. Example for Sarma analysis for fully submerged
 Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt (m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt (m)	15.0	15.0	15.0
coordinate xw (m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw (m)	15.0	15.0	15.0
coordinate xb (m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb (m)	15.0	15.0	15.0
friction (degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0

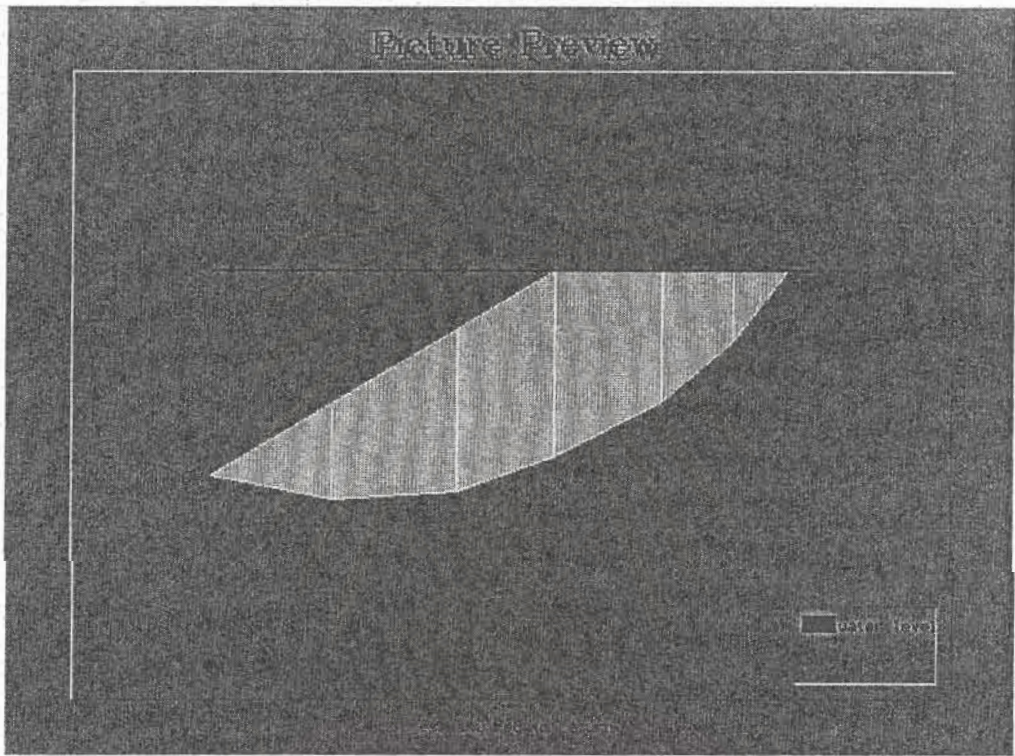
Slice number	7	8
unit wt (kN/cu.m)	21.0	21.0
friction (degree)	40.0	33.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Effective normal stresses

σ (base) kN/m ²	0.0	0.0
σ (side) kN/m ²	0.0	0.0

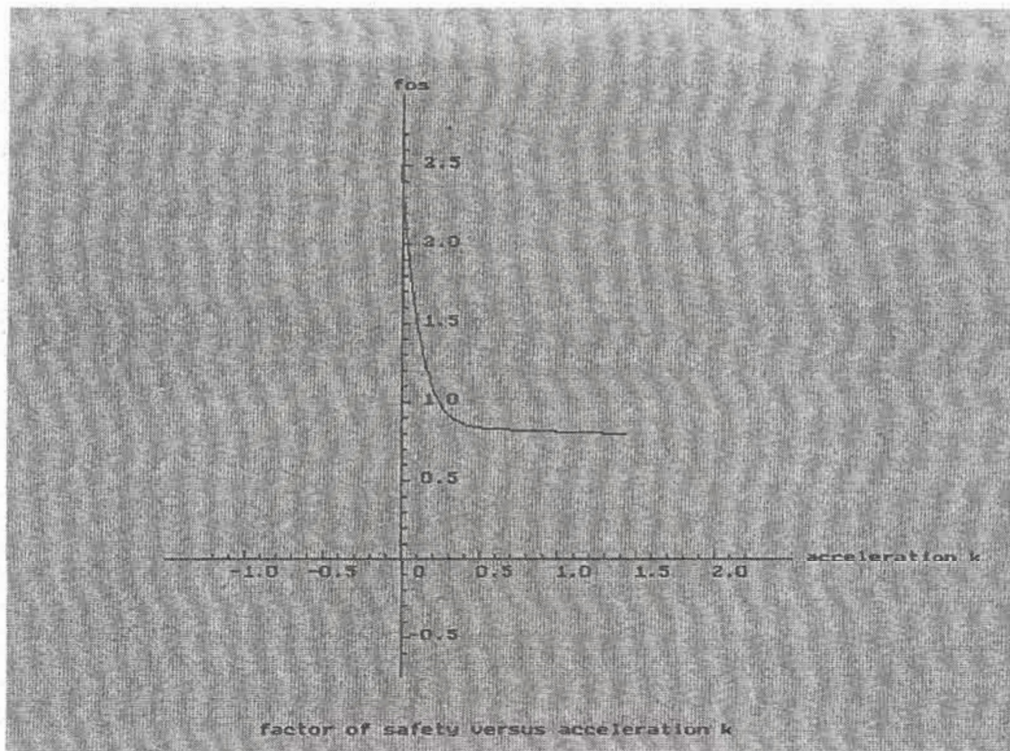
Acceleration Kc = 0.2438 Factor of safety = 2.35

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 59 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิต
ของ total submerged slope

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ total submerged slope

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
2.3994	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no.Example for Sarma analysis for fully submerged

f.o.s	acc. K	1/fos
2.3000	0.0073	0.4348
2.3500	0.0036	0.4255
2.4000	-0.0000	0.4167
2.3990	0.0001	0.4168
2.3994	0.0000	0.4168

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no.
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt(m)	2.0	6.6	11.3	15.0	19.0	19.0
coordinate xw(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw(m)	2.0	3.7	5.4	7.1	8.8	10.5
coordinate xb(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb(m)	2.0	3.7	5.4	7.1	8.8	10.5
friction(degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt(kN/cu.m)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
friction(degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no.
Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt(m)	19.0	19.0	19.7
coordinate xw(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw(m)	15.0	16.2	17.0
coordinate xb(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb(m)	15.0	16.2	17.0
friction(degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0

Slice number	7	8
unit wt(kN/cu.m)	25.0	25.0
friction(degree)	40.0	33.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no.

Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yt(m)	2.0	6.6	11.3	15.0	19.0	19.0
coordinate xw(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yw(m)	2.0	3.7	5.4	7.1	8.8	10.5
coordinate xb(m)	2.3	10.0	18.0	24.2	31.0	35.5
coordinate yb(m)	2.0	3.7	5.4	7.1	8.8	10.5
friction(degree)	0.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
friction(degree)	33.0	33.0	33.0	40.0	40.0	40.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Effective normal stresses						
σ (base) kN/m ²	34.6	172.8	180.3	213.8	205.6	92.1
σ (side) kN/m ²	0.0	1.9	54.7	44.6	43.3	44.7
Acceleration Kc =	0.4613					
Factor of safety =				2.72		

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

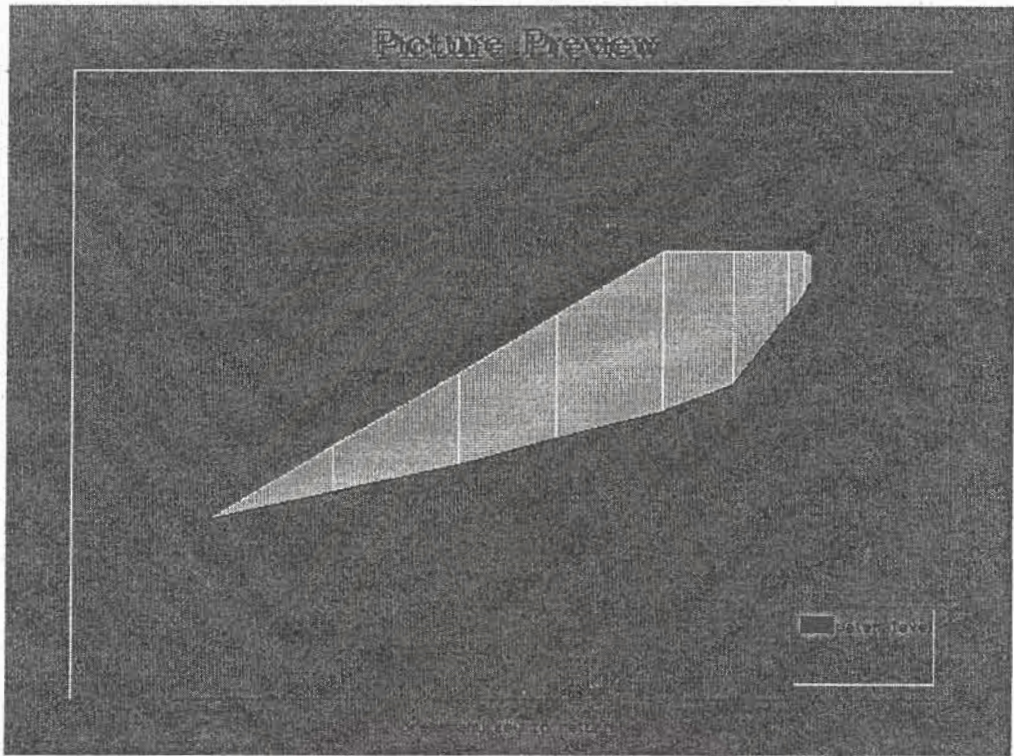
Analysis no.

Unit weight of water = 9.80 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yt(m)	19.0	19.0	18.7
coordinate xw(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yw(m)	15.0	16.2	17.0
coordinate xb(m)	39.0	40.0	40.4
coordinate yb(m)	15.0	16.2	17.0
friction(degree)	40.0	33.0	0.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0

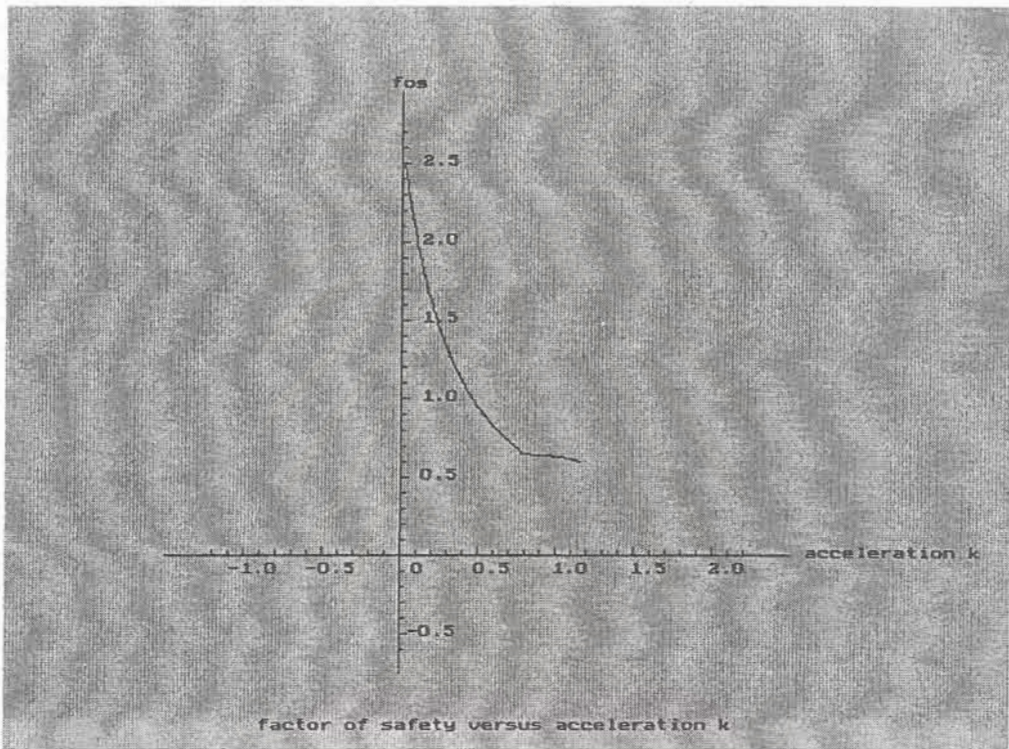
Slice number	7	8
unit wt (kN/cu.m)	25.0	25.0
friction(degree)	40.0	33.0
cohesion (kN/m ²)	0.0	0.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0
Effective normal stresses		
σ (base) kN/m ²	50.9	29.7
σ (side) kN/m ²	16.5	7.4
Acceleration Kc =	0.4613	
Factor of safety =		2.72

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 61 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ slope
สำหรับ open pit mine อีกรูปแบบหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ open pit mine slope อีกรูปแบบหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
2.6990	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no.

f.o.s	acc. K	1/fos
2.5300	0.0207	0.3953
2.5500	0.0181	0.3922
2.6000	0.0118	0.3846
2.7000	-0.0001	0.3704
2.6800	0.0022	0.3731
2.6900	0.0011	0.3717
2.6950	0.0005	0.3711
2.6960	0.0004	0.3709
2.6970	0.0003	0.3708
2.6990	0.0000	0.3705

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Analysis no.
Unit weight of water = 9.81 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	0.0	4.2	8.4	12.9	16.8	21.0
coordinate yt(m)	0.0	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0
coordinate xw(m)	0.0	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0
coordinate yw(m)	0.0	1.4	3.2	5.4	7.4	9.0
coordinate xb(m)	0.0	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0
coordinate yb(m)	0.0	-1.8	-2.2	-1.8	-0.7	1.2
friction(degree)	0.0	24.0	24.0	24.0	22.0	19.3
cohesion (kN/m ²)	0.0	34.0	34.0	34.0	32.8	31.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt(kN/cu.m)	19.1	19.1	19.1	18.9	18.6	18.5
friction(degree)	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
cohesion (kN/m ²)	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no.
Unit weight of water = 9.81 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yt(m)	14.0	14.0	14.0
coordinate xw(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yw(m)	10.0	10.6	11.0
coordinate xb(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yb(m)	4.2	9.0	14.0
friction(degree)	18.4	14.7	0.0
cohesion (kN/m ²)	30.4	28.0	0.0

Slice number	7	8
unit wt(kN/cu.m)	18.1	17.6
friction(degree)	24.0	24.0
cohesion (kN/m ²)	34.0	34.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

Note: coordinates must increase from slope toe to crest
To edit title or data array, use direction keys to move
cursor and press F1. Use PgUp, PgDn button to open prevent
or next page.

F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

Analysis no.
Unit weight of water = 9.81 kN/cu.m

Side number	1	2	3	4	5	6
coordinate xt(m)	0.0	4.2	8.4	12.9	16.8	21.0
coordinate yt(m)	0.0	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0
coordinate xw(m)	0.0	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0
coordinate yw(m)	0.0	1.4	3.2	5.4	7.4	9.0
coordinate xb(m)	0.0	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0
coordinate yb(m)	0.0	-1.8	-2.2	-1.8	-0.7	1.2
friction(degree)	0.0	24.0	24.0	24.0	22.0	19.3
cohesion (kN/m ²)	0.0	34.0	34.0	34.0	32.8	31.0

Slice number	1	2	3	4	5	6
unit wt (kN/cu.m)	19.1	19.1	19.1	18.9	18.6	18.5
friction(degree)	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
cohesion (kN/m ²)	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
force T (kN)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Effective normal stresses
 σ (base) kN/m² 80.6 102.8 116.8 117.2 121.7 92.8
 σ (side) kN/m² 0.0 61.4 55.2 42.8 30.7 16.7

Acceleration Kc = 0.3631 Factor of safety = 1.85
 Negative effective normal stresses - solution unacceptable
 F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu

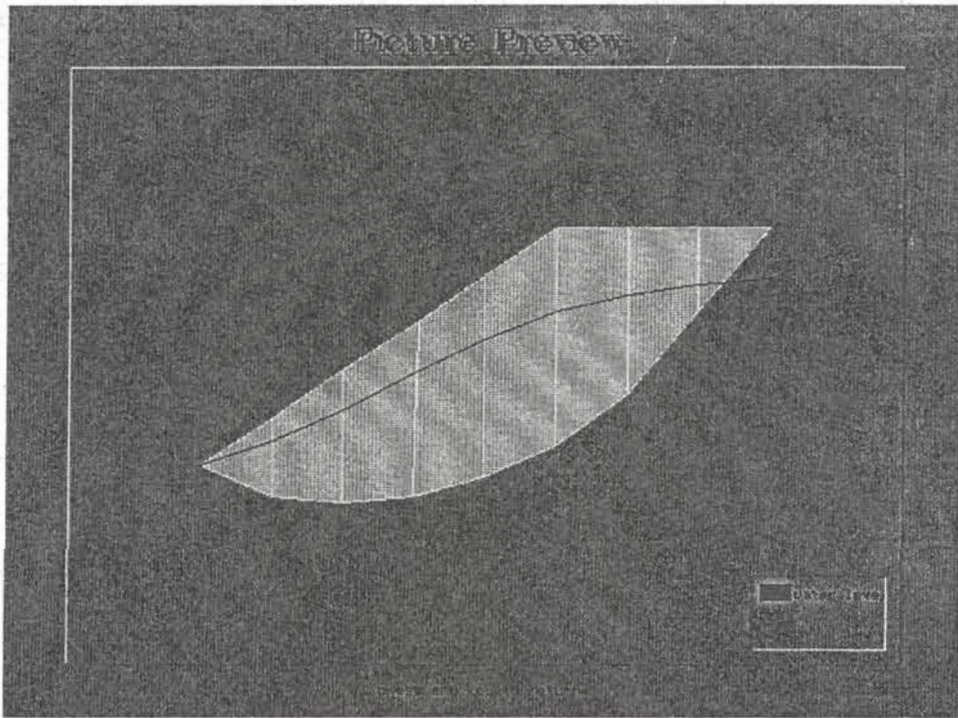
Analysis no.
Unit weight of water = 9.81 kN/cu.m

Side number	7	8	9
coordinate xt(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yt(m)	14.0	14.0	14.0
coordinate xw(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yw(m)	10.0	10.6	14.0
coordinate xb(m)	25.2	29.4	33.6
coordinate yb(m)	4.2	9.0	14.0
friction(degree)	18.4	14.7	0.0
cohesion (kN/m ²)	30.4	28.0	0.0

Slice number	7	8
unit wt (kN/cu.m)	18.1	17.6
friction(degree)	24.0	24.0
cohesion (kN/m ²)	34.0	34.0
force T (kN)	0.0	0.0
theta (degree)	0.0	0.0

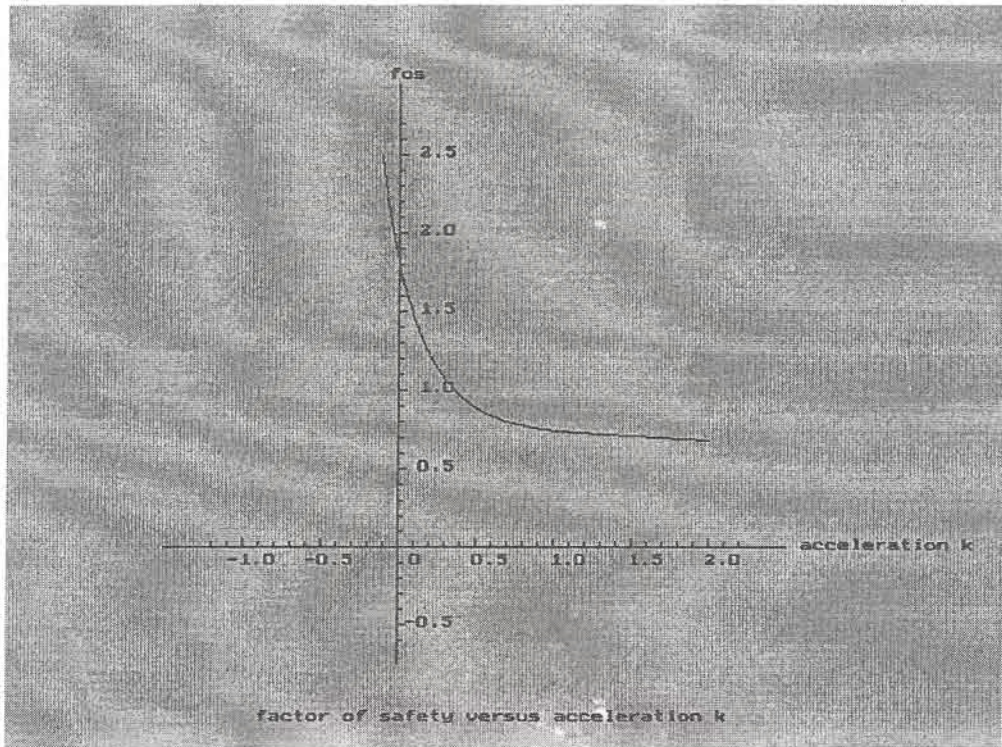
Effective normal stresses
 σ (base) kN/m² 41.3 -1.4
 σ (side) kN/m² 4.3 -11.3

Acceleration Kc = 0.3631 Factor of safety = 1.85
 Negative effective normal stresses - solution unacceptable
 F1 Input F2 Calculate F3 View F4 Plot F5 Drain F6 Save F7 Menu



รูปที่ 63 ภาพกราฟฟิกแสดงรูปเรขาคณิตของ partially submerged slope ที่มีระดับน้ำบาดาลเป็นแบบ hyperbola

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of safety (fos) กับค่า acceleration (k) สำหรับ partially submerged slope ที่มีระดับน้ำบาดาลแบบ hyperbola

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

factor of safety versus acceleration K

ENTER f.o.s. =

f.o.s.	acc. K
1.8342	0.0000

to terminate calculation press [ENTER]

analysis no.

f.o.s	acc. K	1/fos
1.8500	-0.0034	0.5405
1.8400	-0.0013	0.5435
1.8300	0.0009	0.5464
1.8450	-0.0023	0.5420
1.8420	-0.0017	0.5429
1.8400	-0.0013	0.5435
1.8390	-0.0010	0.5438
1.8380	-0.0008	0.5441
1.8330	0.0003	0.5456
1.8330	0.0003	0.5456
1.8350	-0.0002	0.5450
1.8340	0.0001	0.5453
1.8345	-0.0001	0.5451
1.8342	0.0000	0.5452

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

6.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ Surface Wedge Failure ตามวิธี Hoek and Bray

WEDGE ANALYSIS													
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 	<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <p>Failure surface Plane A Failure surface Plane B Upper ground surface Slope face Tension Crack Intersection Plane A, B</p> <hr/> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <p>Cable/Bolt Tension External Loading</p>												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">—FACTOR—</th> <th style="text-align: left;">—WORST DIR—</th> <th style="text-align: left;">—OPT BOLT/CABLE—</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NORM x.xxx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x,xxxex</td> </tr> </tbody> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE—	NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x,xxxex	<p>Cable/Bolt Tension External Loading Slope</p>
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE—											
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx											
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx											
OPT x.xxx		LOAD x,xxxex											
<p>Select:</p>													

WEDGE ANALYSIS													
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 	<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <p>Failure surface Plane A Failure surface Plane B Upper ground surface Slope face Tension Crack Intersection Plane A, B</p> <hr/> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <p>Cable/Bolt Tension External Loading</p>												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">—FACTOR—</th> <th style="text-align: left;">—WORST DIR—</th> <th style="text-align: left;">—OPT BOLT/CABLE—</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NORM x.xxx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x,xxxex</td> </tr> </tbody> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE—	NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x,xxxex	<p>Cable/Bolt Tension External Loading Slope</p>
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE—											
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx											
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx											
OPT x.xxx		LOAD x,xxxex											
<p>[W]et or [D]ry slope</p>													

WEDGE ANALYSIS																								
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 	<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0,105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0,235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0,195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0,185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td></td></tr> <tr><td>Intersection Plane A,B</td><td></td></tr> </table> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td></td></tr> <tr><td>External Loading</td><td></td></tr> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td></td></tr> <tr><td>External Loading</td><td></td></tr> <tr><td>Slope</td><td style="text-align: right;">WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK</td></tr> </table>		Failure surface Plane A	45.0,105.0	Failure surface Plane B	70.0,235.0	Upper ground surface	12.0,195.0	Slope face	65.0,185.0	Tension Crack		Intersection Plane A,B		Cable/Bolt Tension		External Loading		Cable/Bolt Tension		External Loading		Slope	WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK
Failure surface Plane A	45.0,105.0																							
Failure surface Plane B	70.0,235.0																							
Upper ground surface	12.0,195.0																							
Slope face	65.0,185.0																							
Tension Crack																								
Intersection Plane A,B																								
Cable/Bolt Tension																								
External Loading																								
Cable/Bolt Tension																								
External Loading																								
Slope	WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK																							
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—FACTOR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—WORST DIR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—OPT BOLT/CABLE</td> </tr> <tr> <td>NORM x.xxx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE	NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	<p>Tension Crack</p> <p>Dip 70</p> <p>Dip direction 165</p>											
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE																						
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																						
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																						
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																						

WEDGE ANALYSIS																								
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 	<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0,105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0,235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0,195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0,185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td style="text-align: right;">70.0,165.0</td></tr> <tr><td>Intersection Plane A,B</td><td></td></tr> </table> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td></td></tr> <tr><td>External Loading</td><td></td></tr> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td></td></tr> <tr><td>External Loading</td><td></td></tr> <tr><td>Slope</td><td style="text-align: right;">WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK</td></tr> </table>		Failure surface Plane A	45.0,105.0	Failure surface Plane B	70.0,235.0	Upper ground surface	12.0,195.0	Slope face	65.0,185.0	Tension Crack	70.0,165.0	Intersection Plane A,B		Cable/Bolt Tension		External Loading		Cable/Bolt Tension		External Loading		Slope	WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK
Failure surface Plane A	45.0,105.0																							
Failure surface Plane B	70.0,235.0																							
Upper ground surface	12.0,195.0																							
Slope face	65.0,185.0																							
Tension Crack	70.0,165.0																							
Intersection Plane A,B																								
Cable/Bolt Tension																								
External Loading																								
Cable/Bolt Tension																								
External Loading																								
Slope	WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK																							
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—FACTOR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—WORST DIR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—OPT BOLT/CABLE</td> </tr> <tr> <td>NORM x.xxx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE	NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	<p>Select:</p>											
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE																						
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																						
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																						
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																						

Error: Must select prior item

WEDGE ANALYSIS

<p>Elevation <A> 100.00 Tension crack distance <A> 40.00 Cohesive strength <A> 500.00 Cohesive strength 1000.00 Friction angle <A> 20.00 Friction angle 30.00 Specific weight rock 160.00 Specific weight water</p>			<p>—DIP,DIP DIRECTION (°)— Failure surface Plane A 45.0,105.0 Failure surface Plane B 70.0,235.0 Upper ground surface 12.0,195.0 Slope face 65.0,185.0 Tension Crack 70.0,165.0 Intersection Plane A,B</p>	
<p>—FACTOR— WORST DIR— OPT BOLT/CABLE NORM x.xxx PLUNGE xxx.xx PLUNGE xxx.xx MIN x.xxx TREND xxx.xx TREND xxx.xx OPT x.xxx LOAD x.xxxex</p>			<p>—PLUNGE,TREND (°)— Cable/Bolt Tension External Loading</p>	
<p>Specific weight water [62.5 lb/in³,9.81 kN/m³]</p>			<p>Cable/Bolt Tension External Loading Slope WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK</p>	

WEDGE ANALYSIS

<p>=== MAIN MENU === 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT</p>			<p>—DIP,DIP DIRECTION (°)— Failure surface Plane A 45.0,105.0 Failure surface Plane B 70.0,235.0 Upper ground surface 12.0,195.0 Slope face 65.0,185.0 Tension Crack 70.0,165.0 Intersection Plane A,B</p>	
<p>—FACTOR— WORST DIR— OPT BOLT/CABLE NORM x.xxx PLUNGE xxx.xx PLUNGE xxx.xx MIN x.xxx TREND xxx.xx TREND xxx.xx OPT x.xxx LOAD x.xxxex</p>			<p>—PLUNGE,TREND (°)— Cable/Bolt Tension -NA- -NA- External Loading</p>	
<p>External Loading Load 0</p>			<p>Cable/Bolt Tension 0.000 External Loading Slope WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK</p>	

WEDGE ANALYSIS																						
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 	<p style="text-align: center;">DIP, DIP DIRECTION (°)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0, 105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0, 235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0, 195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0, 185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td style="text-align: right;">70.0, 165.0</td></tr> <tr><td>Intersection Plane A, B</td><td style="text-align: right;">31.2, 157.7</td></tr> </table> <hr/> <p style="text-align: center;">PLUNGE, TREND (°)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> </table> <hr/> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> </table> <p>Slope WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK Contact is maintained on both planes</p>		Failure surface Plane A	45.0, 105.0	Failure surface Plane B	70.0, 235.0	Upper ground surface	12.0, 195.0	Slope face	65.0, 185.0	Tension Crack	70.0, 165.0	Intersection Plane A, B	31.2, 157.7	Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-	External Loading	-NA- -NA-	Cable/Bolt Tension	0.000	External Loading	0.000
Failure surface Plane A	45.0, 105.0																					
Failure surface Plane B	70.0, 235.0																					
Upper ground surface	12.0, 195.0																					
Slope face	65.0, 185.0																					
Tension Crack	70.0, 165.0																					
Intersection Plane A, B	31.2, 157.7																					
Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-																					
External Loading	-NA- -NA-																					
Cable/Bolt Tension	0.000																					
External Loading	0.000																					
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">FACTOR</th> <th style="text-align: left;">WORST DIR</th> <th style="text-align: left;">OPT BOLT/CABLE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NORM 1.138</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </tbody> </table>	FACTOR	WORST DIR	OPT BOLT/CABLE	NORM 1.138	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	<p>Select:</p> <p style="text-align: right;">Wedge is formed. Tension Crack Valid.</p>									
FACTOR	WORST DIR	OPT BOLT/CABLE																				
NORM 1.138	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																				
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																				
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																				

Press any to continue

WEDGE ANALYSIS																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Area <A></td><td style="text-align: right;">5.565e3</td></tr> <tr><td>Area </td><td style="text-align: right;">6.428e3</td></tr> <tr><td>Area <Crack></td><td style="text-align: right;">1.847e3</td></tr> <tr><td>Wedge weight</td><td style="text-align: right;">2.827e7</td></tr> <tr><td>Water pressure <A></td><td style="text-align: right;">1.084e3</td></tr> <tr><td>Water pressure </td><td style="text-align: right;">1.084e3</td></tr> <tr><td>Water pressure <Crack></td><td style="text-align: right;">2.002e6</td></tr> <tr><td>Normal reaction <A></td><td style="text-align: right;">1.517e7</td></tr> <tr><td>Normal reaction </td><td style="text-align: right;">5.790e6</td></tr> </table>	Area <A>	5.565e3	Area 	6.428e3	Area <Crack>	1.847e3	Wedge weight	2.827e7	Water pressure <A>	1.084e3	Water pressure 	1.084e3	Water pressure <Crack>	2.002e6	Normal reaction <A>	1.517e7	Normal reaction 	5.790e6	<p style="text-align: center;">DIP, DIP DIRECTION (°)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0, 105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0, 235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0, 195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0, 185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td style="text-align: right;">70.0, 165.0</td></tr> <tr><td>Intersection Plane A, B</td><td style="text-align: right;">31.2, 157.7</td></tr> </table> <hr/> <p style="text-align: center;">PLUNGE, TREND (°)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> </table> <hr/> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> </table> <p>Slope WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK Contact is maintained on both planes</p>		Failure surface Plane A	45.0, 105.0	Failure surface Plane B	70.0, 235.0	Upper ground surface	12.0, 195.0	Slope face	65.0, 185.0	Tension Crack	70.0, 165.0	Intersection Plane A, B	31.2, 157.7	Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-	External Loading	-NA- -NA-	Cable/Bolt Tension	0.000	External Loading	0.000
Area <A>	5.565e3																																							
Area 	6.428e3																																							
Area <Crack>	1.847e3																																							
Wedge weight	2.827e7																																							
Water pressure <A>	1.084e3																																							
Water pressure 	1.084e3																																							
Water pressure <Crack>	2.002e6																																							
Normal reaction <A>	1.517e7																																							
Normal reaction 	5.790e6																																							
Failure surface Plane A	45.0, 105.0																																							
Failure surface Plane B	70.0, 235.0																																							
Upper ground surface	12.0, 195.0																																							
Slope face	65.0, 185.0																																							
Tension Crack	70.0, 165.0																																							
Intersection Plane A, B	31.2, 157.7																																							
Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-																																							
External Loading	-NA- -NA-																																							
Cable/Bolt Tension	0.000																																							
External Loading	0.000																																							
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">FACTOR</th> <th style="text-align: left;">WORST DIR</th> <th style="text-align: left;">OPT BOLT/CABLE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NORM 1.138</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </tbody> </table>	FACTOR	WORST DIR	OPT BOLT/CABLE	NORM 1.138	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	<p>Select:</p> <p style="text-align: right;">Factor of Safety is 1.1378229234E+00</p>																											
FACTOR	WORST DIR	OPT BOLT/CABLE																																						
NORM 1.138	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																																						
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																																						
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																																						

Press any to continue

WEDGE ANALYSIS																									
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 		<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0,105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0,235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0,195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0,185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td style="text-align: right;">70.0,165.0</td></tr> <tr><td>Intersection Plane A,B</td><td style="text-align: right;">31.2,157.7</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> </table>		Failure surface Plane A	45.0,105.0	Failure surface Plane B	70.0,235.0	Upper ground surface	12.0,195.0	Slope face	65.0,185.0	Tension Crack	70.0,165.0	Intersection Plane A,B	31.2,157.7	Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-	External Loading	-NA- -NA-						
Failure surface Plane A	45.0,105.0																								
Failure surface Plane B	70.0,235.0																								
Upper ground surface	12.0,195.0																								
Slope face	65.0,185.0																								
Tension Crack	70.0,165.0																								
Intersection Plane A,B	31.2,157.7																								
Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-																								
External Loading	-NA- -NA-																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—FACTOR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—WORST DIR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—OPT BOLT/CABLE</td> </tr> <tr> <td>NORM 1.736</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE	NORM 1.736	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>Slope</td><td style="text-align: right;">DRY NOT OVERHANGING</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: right;">WITH TENSION CRACK</td></tr> <tr><td>Contact is maintained on both planes</td><td></td></tr> </table>	Cable/Bolt Tension	0.000	External Loading	0.000	Slope	DRY NOT OVERHANGING		WITH TENSION CRACK	Contact is maintained on both planes	
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE																							
NORM 1.736	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																							
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																							
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																							
Cable/Bolt Tension	0.000																								
External Loading	0.000																								
Slope	DRY NOT OVERHANGING																								
	WITH TENSION CRACK																								
Contact is maintained on both planes																									
<p>Select:</p>		<p>Factor of Safety is 1.7355767467E+00</p>																							

WEDGE ANALYSIS																									
<p style="text-align: center;">=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 		<p style="text-align: center;">—DIP, DIP DIRECTION (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Failure surface Plane A</td><td style="text-align: right;">45.0,105.0</td></tr> <tr><td>Failure surface Plane B</td><td style="text-align: right;">70.0,235.0</td></tr> <tr><td>Upper ground surface</td><td style="text-align: right;">12.0,195.0</td></tr> <tr><td>Slope face</td><td style="text-align: right;">65.0,185.0</td></tr> <tr><td>Tension Crack</td><td style="text-align: right;">70.0,165.0</td></tr> <tr><td>Intersection Plane A,B</td><td style="text-align: right;">31.2,157.7</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">—PLUNGE, TREND (°)—</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">-NA- -NA-</td></tr> </table>		Failure surface Plane A	45.0,105.0	Failure surface Plane B	70.0,235.0	Upper ground surface	12.0,195.0	Slope face	65.0,185.0	Tension Crack	70.0,165.0	Intersection Plane A,B	31.2,157.7	Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-	External Loading	-NA- -NA-						
Failure surface Plane A	45.0,105.0																								
Failure surface Plane B	70.0,235.0																								
Upper ground surface	12.0,195.0																								
Slope face	65.0,185.0																								
Tension Crack	70.0,165.0																								
Intersection Plane A,B	31.2,157.7																								
Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-																								
External Loading	-NA- -NA-																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—FACTOR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—WORST DIR—</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">—OPT BOLT/CABLE</td> </tr> <tr> <td>NORM x.xxx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> <td>PLUNGE xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>MIN x.xxx</td> <td>TREND xxx.xx</td> <td>TREND xxx.xx</td> </tr> <tr> <td>OPT x.xxx</td> <td></td> <td>LOAD x.xxxex</td> </tr> </table>	—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE	NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	OPT x.xxx		LOAD x.xxxex			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Cable/Bolt Tension</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>External Loading</td><td style="text-align: right;">0.000</td></tr> <tr><td>Slope</td><td style="text-align: right;">DRY NOT OVERHANGING</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: right;">WITH TENSION CRACK</td></tr> <tr><td>Contact is maintained on both planes</td><td></td></tr> </table>	Cable/Bolt Tension	0.000	External Loading	0.000	Slope	DRY NOT OVERHANGING		WITH TENSION CRACK	Contact is maintained on both planes	
—FACTOR—	—WORST DIR—	—OPT BOLT/CABLE																							
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx																							
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx																							
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex																							
Cable/Bolt Tension	0.000																								
External Loading	0.000																								
Slope	DRY NOT OVERHANGING																								
	WITH TENSION CRACK																								
Contact is maintained on both planes																									
<p>External Loading Load 8e6</p>		<p>Factor of Safety is 1.7355767467E+00</p>																							

WEDGE ANALYSIS		
=== MAIN MENU ===		
<ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 		
DIP, DIP DIRECTION (°)		
Failure surface Plane A 45.0,105.0 Failure surface Plane B 70.0,235.0 Upper ground surface 12.0,195.0 Slope face 65.0,185.0 Tension Crack 70.0,165.0 Intersection Plane A,B 31.2,157.7		
PLUNGE, TREND (°)		
Cable/Bolt Tension -NA- -NA- External Loading 0.0, 0.0		
Cable/Bolt Tension 0.000 External Loading 8.000e6 Slope DRY NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK Contact is maintained on both planes		
---FACTOR---	---WORST DIR---	---OPT BOLT/CABLE---
NORM 3.490	PLUNGE -1.63	PLUNGE xxx.xx
MIN 1.037	TREND 173.04	TREND xxx.xx
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex
Select:		
Both normal reaction positive therefore contact maintained on both planes.		

WEDGE ANALYSIS		
=== MAIN MENU ===		
<ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CALCULATION DISPLAY FALSE 9. QUIT 		
DIP, DIP DIRECTION (°)		
Failure surface Plane A 45.0,105.0 Failure surface Plane B 70.0,235.0 Upper ground surface 12.0,195.0 Slope face 65.0,185.0 Tension Crack 70.0,165.0 Intersection Plane A,B 31.2,157.7		
PLUNGE, TREND (°)		
Cable/Bolt Tension -NA- -NA- External Loading -NA- -NA-		
Cable/Bolt Tension 0.000 External Loading 0.000 Slope WET NOT OVERHANGING WITH TENSION CRACK Contact is maintained on both planes		
---FACTOR---	---WORST DIR---	---OPT BOLT/CABLE---
NORM 1.138	PLUNGE 0.68	PLUNGE -6.98
MIN 1.138	TREND 172.07	TREND 349.43
OPT 1.500		LOAD 3.430e6
Select:		
Contact on both planes after application of Tension.		

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

=== MAIN MENU ===			DIP, DIP DIRECTION (°)	
1. INPUT CONDITION			Failure surface Plane A	
2. INPUT DIP AND DIRECTION			Failure surface Plane B	
3. INPUT VALUE			Upper ground surface	
4. INPUT LOADING			Slope face	
5. NORMAL FACTOR OF SAFETY			Tension Crack	
6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY			Intersection Plane A,B	
7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY			PLUNGE, TREND (°)	
8. CUT SLOPE ANGLE			Cable/Bolt Tension	
9. QUIT			External Loading	
=FACTOR=			Cable/Bolt Tension	
=WORST DIR=			External Loading	
=OPT BOLT/CABLE=			Slope	
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx		
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx		
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex		
Select:				

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

=== MAIN MENU ===			DIP, DIP DIRECTION (°)	
1. INPUT CONDITION			Failure surface Plane A	
2. INPUT DIP AND DIRECTION			Failure surface Plane B	
3. INPUT VALUE			Upper ground surface	
4. INPUT LOADING			Slope face	
5. NORMAL FACTOR OF SAFETY			Tension Crack	
6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY			Intersection Plane A,B	
7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY			PLUNGE, TREND (°)	
8. CUT SLOPE ANGLE			Cable/Bolt Tension	
9. QUIT			External Loading	
=FACTOR=			Cable/Bolt Tension	
=WORST DIR=			External Loading	
=OPT BOLT/CABLE=			Slope	
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx		
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx		
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex		
[W]et or [D]ry slope				

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>DIP, DIP DIRECTION (°)</p> <p>Failure surface Plane A 47.0, 52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0, 18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0, 45.0</p> <p>Slope face</p> <p>Tension Crack</p> <p>Intersection Plane A, B</p> <hr/> <p>PLUNGE, TREND (°)</p> <p>Cable/Bolt Tension</p> <p>External Loading</p> <hr/> <p>Cable/Bolt Tension</p> <p>External Loading</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p>
<p>FACTOR</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>WORST DIR</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>OPT BOLT/CABLE</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	
<p>Slope face</p> <p>Dip 65</p> <p>Dip direction 45</p>			

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>Elevation <A> 20.00</p> <p>Tension crack distance <A></p> <p>Cohesive strength <A> 25.00</p> <p>Cohesive strength 0.00</p> <p>Friction angle <A> 30.00</p> <p>Friction angle 35.00</p> <p>Specific weight rock 25.00</p> <p>Specific weight water</p>			<p>DIP, DIP DIRECTION (°)</p> <p>Failure surface Plane A 47.0, 52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0, 18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0, 45.0</p> <p>Slope face 65.0, 45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A, B</p> <hr/> <p>PLUNGE, TREND (°)</p> <p>Cable/Bolt Tension</p> <p>External Loading</p> <hr/> <p>Cable/Bolt Tension</p> <p>External Loading</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p>
<p>FACTOR</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>WORST DIR</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>OPT BOLT/CABLE</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	
<p>Specific weight water</p> <p>[62.5 lb/ft3, 9.81 kN/m3]</p> <p>9.81</p>			

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading</p>
<p>-----FACTOR-----</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>-----WORST DIR-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>-----OPT BOLT/CABLE-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p>
<p>External Loading</p> <p>Load</p>			

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>-----FACTOR-----</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>-----WORST DIR-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>-----OPT BOLT/CABLE-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p>
<p>Select:</p>			<p>Wedge is formed.</p>

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

			DIP, DIP DIRECTION (°)	
Area 	2.022e+02		Failure surface Plane A	47.0, 52.0
Area <Crack>	0.000e+00		Failure surface Plane B	70.0, 18.0
Wedge weight	5.376e+04		Upper ground surface	10.0, 45.0
Water pressure <A>	0.000e+00		Slope face	65.0, 45.0
Water pressure 	0.000e+00		Tension Crack	-NA- -NA-
Water pressure <Crack>	0.000e+00		Intersection Plane A, B	0.0, 91.7
Normal reaction <A>	6.493e+04		PLUNGE, TREND (°)	
Normal reaction 	-3.250e+04		Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-
			External Loading	-NA- -NA-
			Cable/Bolt Tension	0.000e+00
==FACTOR==	==WORST DIR==	==OPT BOLT/CABLE==	External Loading	0.000e+00
NORM x.xxx	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	Slope DRY NOT OVERHANGING	
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	WITH NO TENSION CRACK	
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	Contact is maintained on plane A	
Select:			Factor of Safety is 1.197	

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

			DIP, DIP DIRECTION (°)	
=== MAIN MENU ===			Failure surface Plane A	47.0, 52.0
1. INPUT CONDITION			Failure surface Plane B	70.0, 18.0
2. INPUT DIP AND DIRECTION			Upper ground surface	10.0, 45.0
3. INPUT VALUE			Slope face	65.0, 45.0
4. INPUT LOADING			Tension Crack	-NA- -NA-
5. NORMAL FACTOR OF SAFETY			Intersection Plane A, B	0.0, 91.7
6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY			PLUNGE, TREND (°)	
7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY			Cable/Bolt Tension	-NA- -NA-
8. CUT SLOPE ANGLE			External Loading	-NA- -NA-
9. QUIT			Cable/Bolt Tension	0.000e+00
==FACTOR==	==WORST DIR==	==OPT BOLT/CABLE==	External Loading	0.000e+00
NORM 1.197	PLUNGE xxx.xx	PLUNGE xxx.xx	Slope DRY NOT OVERHANGING	
MIN x.xxx	TREND xxx.xx	TREND xxx.xx	WITH NO TENSION CRACK	
OPT x.xxx		LOAD x.xxxex	Contact is maintained on plane A	
Select:			Factor of Safety is 1.197	

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 1.197</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Input the Factor of Safety to Calculate</p>			<p>Factor of Safety is 1.197</p>
<p>the minimum cable tension 2.0</p>			

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 1.197</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT 2.000</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Input the Factor of Safety to Calculate</p>			<p>Contact is lost on plane B</p>
<p>the minimum cable tension 2.0</p>			<p>when uninstal cable or tension bolt.</p>

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>	
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 1.197</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT 2.000</p>	<p>-----WORST DIR-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>-----OPT BOLT/CABLE-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>	
<p>Input the Factor of Safety to Calculate</p> <p>the minimum cable tension 2.0</p>			<p>Assume contact on plane A only after</p> <p>application of cable or tension bolt.</p>	

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>	
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 1.197</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT 2.000</p>	<p>-----WORST DIR-----</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>-----OPT BOLT/CABLE-----</p> <p>PLUNGE -31.00</p> <p>TREND 232.00</p> <p>LOAD 1.469e+04</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope DRY NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>	
<p>Select:</p>			<p>Assume contact on plane A only after</p> <p>application of cable or tension bolt.</p>	

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <p>1. INPUT CONDITION</p> <p>2. INPUT DIP AND DIRECTION</p> <p>3. INPUT VALUE</p> <p>4. INPUT LOADING</p> <p>5. NORMAL FACTOR OF SAFETY</p> <p>6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY</p> <p>7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY</p> <p>8. CUT SLOPE ANGLE</p> <p>9. QUIT</p>			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope WET NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Select:</p>			<p>Wedge is formed.</p>

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>Area 2.022e+02</p> <p>Area <Crack> 0.000e+00</p> <p>Wedge weight 5.376e+04</p> <p>Water pressure <A> 3.514e+01</p> <p>Water pressure 0.000e+00</p> <p>Water pressure <Crack> 0.000e+00</p> <p>Normal reaction <A> 3.034e+04</p> <p>Normal reaction -3.250e+04</p>			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM x.xxx</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope WET NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Select:</p>			<p>Factor of Safety is 0.699</p>

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 0.699</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT x.xxx</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope WET NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Input the Factor of Safety to Calculate</p>			<p>Factor of Safety is 0.699</p>
<p>the minimum cable tension 2.0</p>			

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. INPUT CONDITION 2. INPUT DIP AND DIRECTION 3. INPUT VALUE 4. INPUT LOADING 5. NORMAL FACTOR OF SAFETY 6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY 7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY 8. CUT SLOPE ANGLE 9. QUIT 			<p>-----DIP,DIP DIRECTION (°)-----</p> <p>Failure surface Plane A 47.0,52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0,18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0,45.0</p> <p>Slope face 65.0,45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A,B 0.0,91.7</p> <p>-----PLUNGE,TREND (°)-----</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>
<p>==FACTOR==</p> <p>NORM 0.699</p> <p>MIN x.xxx</p> <p>OPT 2.000</p>	<p>==WORST DIR==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>==OPT BOLT/CABLE==</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p> <p>LOAD x.xxxex</p>	<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope WET NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>
<p>Input the Factor of Safety to Calculate</p>			<p>Contact is lost on plane B</p> <p>when uninstal cable or tension bolt.</p>
<p>the minimum cable tension 2.0</p>			

Press any key to continue

WEDGE ANALYSIS version 1.3 (12 Aug 94)

<p>=== MAIN MENU ===</p> <p>1. INPUT CONDITION</p> <p>2. INPUT DIP AND DIRECTION</p> <p>3. INPUT VALUE</p> <p>4. INPUT LOADING</p> <p>5. NORMAL FACTOR OF SAFETY</p> <p>6. MINIMUM FACTOR OF SAFETY</p> <p>7. OPTIMUM FACTOR OF SAFETY</p> <p>8. CUT SLOPE ANGLE</p> <p>9. QUIT</p>			<p>DIP, DIP DIRECTION (°)</p> <p>Failure surface Plane A 47.0, 52.0</p> <p>Failure surface Plane B 70.0, 18.0</p> <p>Upper ground surface 10.0, 45.0</p> <p>Slope face 65.0, 45.0</p> <p>Tension Crack -NA- -NA-</p> <p>Intersection Plane A, B 0.0, 91.7</p>
<p>PLUNGE, TREND (°)</p> <p>Cable/Bolt Tension -NA- -NA-</p> <p>External Loading -NA- -NA-</p>			
<p>FACTOR</p> <p>NORM 0.699</p> <p>MIN x.xxxx</p> <p>OPT 2.000</p>	<p>WORST DIR</p> <p>PLUNGE xxx.xx</p> <p>TREND xxx.xx</p>	<p>OPT BOLT/CABLE</p> <p>PLUNGE -31.00</p> <p>TREND 232.00</p> <p>LOAD 2.380e+04</p>	
<p>Cable/Bolt Tension 0.000e+00</p> <p>External Loading 0.000e+00</p> <p>Slope WET NOT OVERHANGING</p> <p>WITH NO TENSION CRACK</p> <p>Contact is maintained on plane A</p>			
<p>Select:</p>		<p>Assume contact on plane A only after application of cable or tension bolt.</p>	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ Underground Wedge Failure ตามวิธี Hoek and Brown

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
Wedge analysis					
UNDERGROUNDWEDGE ANALYSIS					
Dip angle of plane 1:	45.00°		Dip direction of plane 1:	240.00°	
Dip angle of plane 2:	45.00°		Dip direction of plane 2:	120.00°	
Dip angle of plane 3:	45.00°		Dip direction of plane 3:	0.00°	
Dip angle of free face:	90.00°		Dip direction of free face:	180.00°	
Plunge angle of boundary edges of free face:	45.00°				
Trend of boundary edges of free face:	90.00°				
Plunge angle of bolt force T:	0.00°				
Trend of bolt force T:	0.00°				
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 1:	30.00°	
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 2:	30.00°	
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 3:	30.00°	
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m				
Water pressure :	0.0 kN/sq.m		overhang :	N	
Bolt force :	0.00 kN		Wb =	10.00 m	
PRESS ANYKEY TO CONTINUE					

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
Wedge analysis					
FOR FACES WITH NO OVERHANG					
Dip angle of plane 1:	45.00°		Dip direction of plane 1:	240.00°	
Dip angle of plane 2:	45.00°		Dip direction of plane 2:	120.00°	
Dip angle of plane 3:	45.00°		Dip direction of plane 3:	0.00°	
Dip angle of free face:	90.00°		Dip direction of free face:	180.00°	
Plunge angle of boundary edges of free face:	45.00°				
Trend of boundary edges of free face:	90.00°				
Plunge angle of bolt force T:	0.00°		Trend of bolt force T:	0.00°	
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 1:	30.00°	
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 2:	30.00°	
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m		Friction angle on plane 3:	30.00°	
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m		Water pressure :	0.0 kN/sq.m	
Bolt force :	0.00 kN		Wb =	10.00 m	
A1 =	20.4 sq.m	A2 =	20.4 sq.m	A3 =	40.8 sq.m
wedge wt. =	1591.0 kN				
N1 =	900.0 kN	N2 =	900.0 kN		
Shear reaction =	711.5 kN	Factor of safety =	1.461		
PRESS ANY KEY TO CONTINUE					

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis

UNDERGROUNDWEDGE ANALYSIS

Dip angle of plane 1:	45.00°	Dip direction of plane 1:	240.00°
Dip angle of plane 2:	45.00°	Dip direction of plane 2:	120.00°
Dip angle of plane 3:	45.00°	Dip direction of plane 3:	0.00°
Dip angle of free face:	90.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:	45.00°		
Trend of boundary edges of free face:	90.00°		
Plunge angle of bolt force T:	0.00°		
Trend of bolt force T:	0.00°		
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m		
Water pressure :	0.0 kN/sq.m	overhang :	Y
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	10.00 m

PRESS ANYKEY TO CONTINUE

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis

FOR OVERHANGING FACES

Dip angle of plane 1:	45.00°	Dip direction of plane 1:	240.00°
Dip angle of plane 2:	45.00°	Dip direction of plane 2:	120.00°
Dip angle of plane 3:	45.00°	Dip direction of plane 3:	0.00°
Dip angle of free face:	90.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:	45.00°		
Trend of boundary edges of free face:	90.00°		
Plunge angle of bolt force T:	0.00°	Trend of bolt force T:	0.00°
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m	Water pressure :	0.0 kN/sq.m
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	10.00 m
A1 =	20.4 sq.m	A2 =	20.4 sq.m
A3 =	40.8 sq.m		
wedge wt. =	1591.0 kN		
N3 =	1125.0 kN		
Shear reaction =	1125.0 kN	Factor of safety =	0.577

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis

UNDERGROUNDWEDGE ANALYSIS

Dip angle of plane 1:	50.00°	Dip direction of plane 1:	290.00°
Dip angle of plane 2:	60.00°	Dip direction of plane 2:	345.00°
Dip angle of plane 3:	35.00°	Dip direction of plane 3:	140.00°
Dip angle of free face:	0.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:	0.00°		
Trend of boundary edges of free face:		353.00°	
Plunge angle of bolt force T:		0.00°	
Trend of bolt force T:		0.00°	
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m		
Water pressure :	0.0 kN/sq.m	overhang :	Y
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	4.00 m

PRESS ANYKEY TO CONTINUE

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis

FOR OVERHANGING FACES

Dip angle of plane 1:	50.00°	Dip direction of plane 1:	290.00°
Dip angle of plane 2:	60.00°	Dip direction of plane 2:	345.00°
Dip angle of plane 3:	35.00°	Dip direction of plane 3:	140.00°
Dip angle of free face:	0.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:		0.00°	
Trend of boundary edges of free face:		353.00°	
Plunge angle of bolt force T:	0.00°	Trend of bolt force T:	0.00°
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m	Water pressure :	0.0 kN/sq.m
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	4.00 m
A1 =	0.9 sq.m	A2 =	0.9 sq.m
A3 =		A3 =	2.3 sq.m
wedge wt. =	14.7 kN		
The wedge is unstable since it falls out floats out or is forced out by water pressure.			

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis
 UNDERGROUND WEDGE ANALYSIS

Dip angle of plane 1:	50.00°	Dip direction of plane 1:	290.00°
Dip angle of plane 2:	60.00°	Dip direction of plane 2:	345.00°
Dip angle of plane 3:	35.00°	Dip direction of plane 3:	140.00°
Dip angle of free face:	0.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:	0.00°		
Trend of boundary edges of free face:	353.00°		
Plunge angle of bolt force T:	0.00°		
Trend of bolt force T:	0.00°		
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m		
Water pressure :	0.0 kN/sq.m	overhang :	N
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	4.00 m

PRESS ANYKEY TO CONTINUE

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Wedge analysis
 FOR FACES WITH NO OVERHANG

Dip angle of plane 1:	50.00°	Dip direction of plane 1:	290.00°
Dip angle of plane 2:	60.00°	Dip direction of plane 2:	345.00°
Dip angle of plane 3:	35.00°	Dip direction of plane 3:	140.00°
Dip angle of free face:	0.00°	Dip direction of free face:	180.00°
Plunge angle of boundary edges of free face:	0.00°		
Trend of boundary edges of free face:	353.00°		
Plunge angle of bolt force T:	0.00°	Trend of bolt force T:	0.00°
Cohesion on plane 1:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 1:	30.00°
Cohesion on plane 2:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 2:	30.00°
Cohesion on plane 3:	0.0 kN/sq.m	Friction angle on plane 3:	30.00°
Unit weight of rock:	27.0 kN/cu.m	Water pressure :	0.0 kN/sq.m
Bolt force :	0.00 kN	Wb =	4.00 m
A1 =	0.9 sq.m	A2 =	0.9 sq.m
A3 =	2.3 sq.m	wedge wt. =	14.7 kN
N1 =	8.4 kN	N2 =	1.4 kN
N3 =	-12.0 kN	The factor of safety has no meaning and wedge is stable	

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

6.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์ Toppling Failure ตามวิธี Goodman and Bray

	Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit			
Find friction angle for limiting equilibrium									
10	42.7	42.7	34.7	1760.2	-22733.5	1760.2	7845.7	1751.2	1
9	38.4	38.4	30.4	2219.0	-19994.1	2219.0	7114.7	1637.2	1
8	34.2	34.2	26.2	2570.9	-17359.8	2570.9	6386.2	1526.0	1
7	29.9	29.9	21.9	2813.0	-14832.5	2813.0	5661.8	1419.5	1
6	25.6	25.6	17.6	2940.6	-12415.0	2940.6	4944.7	1321.3	1
5	21.3	21.3	13.3	2945.3	-10112.0	2945.3	4242.5	1240.1	1
4	17.1	17.1	9.1	2810.3	-7931.9	2810.3	3577.7	1201.5	1
3	12.8	12.8	4.8	2492.7	-5891.5	2492.7	3057.7	1328.1	1
2	8.5	8.5	0.5	1827.7	-4033.5	1827.7	5465.2	4792.9	2
1	4.3	4.3	-3.7	-3575.2	-2523.2	-2523.2	2732.6	2396.4	2
Negative Rn, Analysis not acceptable!									
Too large magnitude of Sn/Rn, Analysis not acceptable!									
FACTOR OF SAFETY = 0.99									
FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.									
DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ?									

PRESS ARROW KEY TO SELECT

	Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit			
Find friction angle for limiting equilibrium									
7	29.9	29.9	21.9	2813.0	-14832.5	2813.0	5661.8	1419.5	1
6	25.6	25.6	17.6	2940.6	-12415.0	2940.6	4944.7	1321.3	1
5	21.3	21.3	13.3	2945.3	-10112.0	2945.3	4242.5	1240.1	1
4	17.1	17.1	9.1	2810.3	-7931.9	2810.3	3577.7	1201.5	1
3	12.8	12.8	4.8	2492.7	-5891.5	2492.7	3057.7	1328.1	1
2	8.5	8.5	0.5	1827.7	-4033.5	1827.7	5465.2	4792.9	2
1	4.3	4.3	-3.7	-3575.2	-2523.2	-2523.2	2732.6	2396.4	2
Negative Rn, Analysis not acceptable!									
Too large magnitude of Sn/Rn, Analysis not acceptable!									
FACTOR OF SAFETY = 0.99									
FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.									
DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ? y									
FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM = 40.2529									
PRESS ANY KEY TO CONTINUE									

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

SLOPE ANGLE,degree =	60.00
DIP OF LAYER PLANE,degree =	75.00
OVERALL INCLINATION OF FAILURE,degree =	40.00
DIP OF UPPER FACE,degree =	5.00
ESTIMATED FRICTION ANGLE,degree =	41.25
THICKNESS OF BLOCK,m =	8.00
TOTAL NUMBER OF BLOCK =	20.00
NUMBER OF BLOCK AT CREST =	12.00
UNIT WEIGHT OF ROCK, kN/cu.m. =	25.00
AVAILABLE FRICTION ANGLE,degree =	41.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
20	-1.9	-4.8	-1.9	0.0	0.0	0.0	-367.7	-98.5	0
19	4.7	1.8	4.7	0.0	0.0	0.0	915.5	245.3	0
18	11.4	8.5	11.4	0.0	0.0	0.0	2198.7	589.1	0
17	18.0	15.1	18.0	0.0	0.0	0.0	3481.8	933.0	0
16	24.7	21.8	24.7	0.0	0.0	0.0	4765.0	1276.8	0
15	31.3	28.4	31.3	0.0	0.0	0.0	6015.3	1583.0	1
14	38.0	35.0	38.0	37.6	-15952.1	37.6	7156.3	1764.8	1
13	44.6	41.7	44.6	237.2	-19298.9	237.2	8326.4	1979.7	1
12	51.2	48.3	43.2	565.8	-22483.6	565.8	9344.8	2021.6	1
11	47.0	47.0	39.0	1196.3	-25539.4	1196.3	8578.4	1867.2	1

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

	Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit			
Find friction angle for limiting equilibrium									
10	42.7	42.7	34.7	1772.4	-17340.1	1772.4	7848.8	1738.5	1
9	38.4	38.4	30.4	2244.0	-15083.0	2244.0	7109.5	1618.5	1
8	34.2	34.2	26.2	2614.6	-12925.9	2614.6	6371.6	1500.1	1
7	29.9	29.9	21.9	2882.5	-10869.8	2882.5	5636.0	1384.4	1
6	25.6	25.6	17.6	3045.2	-8916.3	3045.2	4904.4	1273.5	1
5	21.3	21.3	13.3	3097.7	-7068.1	3097.7	4181.2	1172.5	1
4	17.1	17.1	9.1	3030.2	-5330.0	3030.2	3479.3	1096.7	1
3	12.8	12.8	4.8	2817.5	-3712.0	2817.5	2860.9	1119.5	1
2	8.5	8.5	0.5	2361.0	-2239.1	2361.0	4499.8	3808.5	1
1	4.3	4.3	-3.7	-1005.4	-1010.1	-1005.4	-96.8	-867.6	2

Negative Rn, Analysis not acceptable!
Too large magnitude of Sn/Rn, Analysis not acceptable!

FACTOR OF SAFETY = 1.03
FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.
DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

	Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit			
Find friction angle for limiting equilibrium									
7	29.9	29.9	21.9	2882.5	-10869.8	2882.5	5636.0	1384.4	1
6	25.6	25.6	17.6	3045.2	-8916.3	3045.2	4904.4	1273.5	1
5	21.3	21.3	13.3	3097.7	-7068.1	3097.7	4181.2	1172.5	1
4	17.1	17.1	9.1	3030.2	-5330.0	3030.2	3479.3	1096.7	1
3	12.8	12.8	4.8	2817.5	-3712.0	2817.5	2860.9	1119.5	1
2	8.5	8.5	0.5	2361.0	-2239.1	2361.0	4499.8	3808.5	1
1	4.3	4.3	-3.7	-1005.4	-1010.1	-1005.4	-96.8	-867.6	2

Negative Rn, Analysis not acceptable!
Too large magnitude of Sn/Rn, Analysis not acceptable!

FACTOR OF SAFETY = 1.03
FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.
DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ? y
FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM = 40.2586

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

SLOPE ANGLE,degree =	60.00
DIP OF LAYER PLANE,degree =	75.00
OVERALL INCLINATION OF FAILURE,degree =	40.00
DIP OF UPPER FACE,degree =	5.00
ESTIMATED FRICTION ANGLE,degree =	40.25
THICKNESS OF BLOCK,m =	8.00
TOTAL NUMBER OF BLOCK =	20.00
NUMBER OF BLOCK AT CREST =	12.00
UNIT WEIGHT OF ROCK, kN/cu.m. =	25.00
AVAILABLE FRICTION ANGLE,degree =	41.00
PLEASE CHECK INPUT DATA,DO YOU WANT TO RESTART(Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
20	-1.9	-4.8	-1.9	0.0	0.0	0.0	-367.7	-98.5	0
19	4.7	1.8	4.7	0.0	0.0	0.0	915.5	245.3	0
18	11.4	8.5	11.4	0.0	0.0	0.0	2198.7	589.1	0
17	18.0	15.1	18.0	0.0	0.0	0.0	3481.8	933.0	0
16	24.7	21.8	24.7	0.0	0.0	0.0	4765.0	1276.8	0
15	31.3	28.4	31.3	0.0	0.0	0.0	6016.4	1583.0	1
14	38.0	35.0	38.0	37.6	-12359.8	37.6	7162.1	1764.5	1
13	44.6	41.7	44.6	237.5	-14944.4	237.5	8335.3	1978.4	1
12	51.2	48.3	43.2	567.3	-17366.8	567.3	9361.3	2018.5	1
11	47.0	47.0	39.0	1200.9	-19659.2	1200.9	8589.0	1859.6	1

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

	Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit			
					Toppling				
	Find friction angle for limiting equilibrium								
	(m)	(m)	(m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
10	42.7	42.7	34.7	1775.4	-16310.0	1775.4	7849.7	1735.3	1
9	38.4	38.4	30.4	2250.2	-14144.6	2250.2	7108.4	1613.8	1
8	34.2	34.2	26.2	2625.5	-12077.8	2625.5	6368.1	1493.5	1
7	29.9	29.9	21.9	2900.1	-10110.5	2900.1	5629.7	1375.4	1
6	25.6	25.6	17.6	3071.7	-8244.0	3071.7	4894.4	1261.2	1
5	21.3	21.3	13.3	3136.6	-6480.3	3136.6	4165.8	1154.8	1
4	17.1	17.1	9.1	3086.8	-4823.4	3086.8	3454.0	1068.5	1
3	12.8	12.8	4.8	2902.4	-3281.2	2902.4	2808.7	1061.4	1
2	8.5	8.5	0.5	2504.0	-1873.6	2504.0	3966.0	3202.5	1
1	4.3	4.3	-3.7	-256.5	-680.0	-256.5	114.6	-625.4	0
	Too large magnitude of Sn/Rn, Analysis not acceptable!								
	FACTOR OF SAFETY = 1.04								
	FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.								
	DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ?								

PRESS ARROW KEY TO SELECT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

SLOPE ANGLE, degree =	60.00
DIP OF LAYER PLANE, degree =	75.00
OVERALL INCLINATION OF FAILURE, degree =	40.00
DIP OF UPPER FACE, degree =	5.00
ESTIMATED FRICTION ANGLE, degree =	40.00
THICKNESS OF BLOCK, m =	8.00
TOTAL NUMBER OF BLOCK =	20.00
NUMBER OF BLOCK AT CREST =	12.00
UNIT WEIGHT OF ROCK, kN/cu.m. =	25.00
AVAILABLE FRICTION ANGLE, degree =	41.00
PLEASE CHECK INPUT DATA, DO YOU WANT TO RESTART (Y/N)?	

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
20	-1.9	-4.8	-1.9	0.0	0.0	0.0	-367.7	-98.5	0
19	4.7	1.8	4.7	0.0	0.0	0.0	915.5	245.3	0
18	11.4	8.5	11.4	0.0	0.0	0.0	2198.7	589.1	0
17	18.0	15.1	18.0	0.0	0.0	0.0	3481.8	933.0	0
16	24.7	21.8	24.7	0.0	0.0	0.0	4765.0	1276.8	0
15	31.3	28.4	31.3	0.0	0.0	0.0	6016.7	1583.0	1
14	38.0	35.0	38.0	37.6	-11673.9	37.6	7163.6	1764.5	1
13	44.6	41.7	44.6	237.5	-14113.0	237.5	8337.6	1978.1	1
12	51.2	48.3	43.2	567.6	-16389.8	567.6	9365.5	2017.7	1
11	47.0	47.0	39.0	1202.0	-18536.4	1202.0	8591.8	1857.7	1

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
2	4.0	4.0	1.5	663.9	893.1	893.1	956.0	843.3	2
1	2.0	2.0	-0.5	-642.8	299.3	299.3	478.0	421.7	2

FACTOR OF SAFETY = 1.00
FOR THIS FRICTION ANGLE, THE SLOPE IS UNSTABLE.
DO YOU WANT TO FIND FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM<Y/N> ? y
FRICTION ANGLE FOR LIMITING EQUILIBRIUM = 41.4229

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
22	33.9	31.4	33.9	1776.8	-3199.6	1776.8	3293.4	1692.3	1
21	36.9	34.4	36.9	2203.0	-3265.4	2203.0	3580.7	1836.7	1
20	39.9	37.4	37.4	2672.9	-3287.3	2672.9	3679.9	1767.8	1
19	37.9	37.9	35.4	3400.0	-3265.3	3400.0	3403.0	1574.1	1
18	35.9	35.9	33.4	4196.1	-2241.3	4196.1	3292.4	1568.9	1
17	33.9	33.9	31.4	4872.6	-1148.4	4872.6	3181.8	1563.7	1
16	31.9	31.9	29.4	5429.5	-174.9	5429.5	3071.2	1558.5	1
15	29.9	29.9	27.4	5866.9	678.9	5866.9	2960.6	1553.3	1
14	27.9	27.9	25.4	6184.8	1413.3	6184.8	2850.0	1548.2	1
13	25.9	25.9	23.4	6383.1	2028.0	6383.1	2739.4	1543.0	1

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
12	24.0	24.0	21.4	6461.8	2523.2	6461.8	2628.9	1537.9	1
11	22.0	22.0	19.5	6420.9	2898.8	6420.9	2518.3	1532.7	1
10	20.0	20.0	17.5	6260.3	3154.8	6260.3	2407.8	1527.6	1
9	18.0	18.0	15.5	5980.2	3291.2	5980.2	2297.3	1522.6	1
8	16.0	16.0	13.5	5580.3	3307.9	5580.3	2186.9	1517.5	1
7	14.0	14.0	11.5	5060.7	3205.0	5060.7	2076.4	1512.5	1
6	12.0	12.0	9.5	4421.4	2982.4	4421.4	1966.1	1507.6	1
5	10.0	10.0	7.5	3662.2	2639.9	3662.2	1855.9	1502.9	1
4	8.0	8.0	5.5	2783.1	2177.7	2783.1	1745.8	1498.3	1
3	6.0	6.0	3.5	1783.8	1595.5	1783.8	1434.0	1265.0	2

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

SLOPE ANGLE, degree = 56.60
 DIP OF LAYER PLANE, degree = 60.00
 OVERALL INCLINATION OF FAILURE, degree = 35.80
 DIP OF UPPER FACE, degree = -3.40
 ESTIMATED FRICTION ANGLE, degree = 41.42
 THICKNESS OF BLOCK, m = 5.00
 TOTAL NUMBER OF BLOCK = 32.00
 NUMBER OF BLOCK AT CREST = 20.00
 UNIT WEIGHT OF ROCK, kN/cu.m. = 25.00
 AVAILABLE FRICTION ANGLE, degree = 41.42
 PLEASE CHECK INPUT DATA, DO YOU WANT TO RESTART (Y/N)?

PRESS ARROW KEY TO SELECT

Plane	Circu	Wedge	Sarma	Toppl	Quit
-------	-------	-------	-------	-------	------

Toppling

Find friction angle for limiting equilibrium

n	yn (m)	Mn (m)	Ln (m)	Pn.t (kN)	Pn.s (kN)	Pn (kN)	Rn (kN)	Sn (kN)	mode
32	3.8	1.3	3.8	0.0	0.0	0.0	409.0	236.1	0
31	6.8	4.3	6.8	0.0	0.0	0.0	735.0	424.4	0
30	9.8	7.3	9.8	0.0	0.0	0.0	1029.6	576.9	1
29	12.8	10.3	12.8	35.7	-1458.1	35.7	1289.6	690.3	1
28	15.8	13.3	15.8	146.2	-1870.4	146.2	1572.0	829.0	1
27	18.8	16.3	18.8	306.2	-2207.9	306.2	1857.8	971.7	1
26	21.8	19.3	21.8	511.8	-2495.9	511.8	2144.5	1115.4	1
25	24.9	22.4	24.9	762.0	-2738.3	762.0	2431.6	1259.4	1
24	27.9	25.4	27.9	1056.3	-2936.2	1056.3	2718.8	1403.7	1
23	30.9	28.4	30.9	1394.6	-3089.9	1394.6	3006.1	1548.0	1

PRESS ANY KEY TO CONTINUE

PRESS ARROW KEY TO SELECT

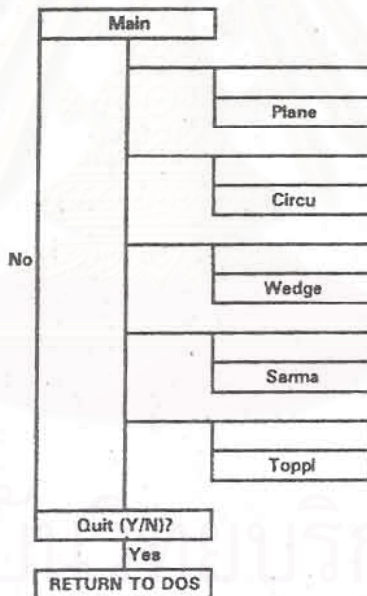
บทที่ 7

บทสรุปและ FLOW CHARTS

การพัฒนางานวิจัยสิ่งประดิษฐ์สำหรับโปรแกรมงานวิเคราะห์เสถียรภาพของเหมืองเปิด และอุโมงค์ใต้ดิน มีความแตกต่างของงานวิเคราะห์ที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการพังทลาย ในบทนี้จึงได้ทำบทสรุปการทำงานของโปรแกรมและแสดงไดอะแกรมของ Flow Charts

7.1 เมนูของโปรแกรม STABIL.EXE

โปรแกรมใหญ่ของการวิเคราะห์เสถียรภาพมีชื่อไฟล์ว่า StabiLexe มีวิธีการทำงานแบบตรงไปตรงมา ก็จะมีการให้เลือกเมนูในโปรแกรม Main จากนั้นก็จะแบ่งเป็นโปรแกรมย่อยให้เลือก 5 โปรแกรม ดังแสดงไดอะแกรมของ flow Chart การเลือกโปรแกรมในรูปที่ 65 ข้างล่าง



รูปที่ 65 เมนูของทางเลือกโปรแกรม Stabil.exe

7.2 ข้อแนะนำในการอ่าน FLOW CHARTS

ผู้เขียน flow charts ได้ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจากบนลงมาล่างเหมือนกับ flow charts ปกติทั่วไป แต่ถ้าหากมีช่องว่างในช่วงใดช่วงหนึ่งก็แสดงว่ายังมีรายละเอียดปลีกย่อยอีก ซึ่งอาจจะอ่านจาก flow chart ที่ปรากฏในหน้าถัดไป



7.3 โปรแกรมงานวิเคราะห์การพังทลายเป็นแนวระนาบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลดิน/หินแบบง่าย จะเริ่มต้นที่งานวิเคราะห์ของการพังทลายแนวระนาบ ซึ่งอาจนำผลของความดันน้ำที่ได้จากน้ำไหลจากบริเวณลาดเอียงเข้าไปในรอยแยกรอยแตกของดิน/หิน หรือเกิดจากอิทธิพลของน้ำใต้ดิน รวมทั้งงานเสริมเสถียรภาพในลักษณะของการใส่ bolt หรือ cable เข้าไปในมวลสาร

7.3.1 โครงสร้างหลักโปรแกรม Plane

ในรูปที่ 66 หน้า 218 เป็นโครงสร้างหลักของโปรแกรม Plane ซึ่งได้ลำดับขั้นตอนไว้ 3 แนวทางใหญ่ คือ การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายแนวระนาบ การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย และการออกจากโปรแกรม

วิธีการทำงานของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามปกติ และการคำนวณการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย จะมีวิธีการทำงานแบบเดียวกัน

7.3.2 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของโปรแกรม Plane

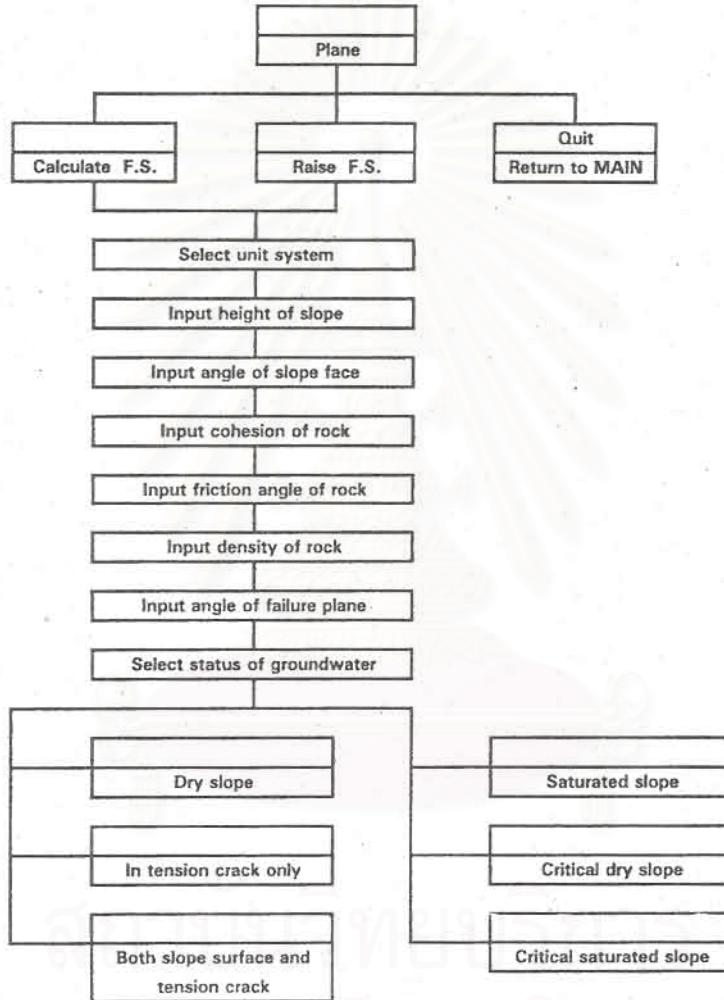
รูปที่ 67 - 71 (หน้าที่ 219 - 221) แสดงไดอะแกรมของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยในชั้นรายละเอียด ดังนี้

1. การคำนวณค่า F.S. เมื่อพื้นลาดเอียงแห้ง (ดูรูปที่ 67)
2. การคำนวณค่า F.S. เมื่อมี tension crack อย่างเดียว (ดูรูปที่ 68)
3. การคำนวณค่า F.S. ของทั้ง slope surface และ tension crack (ดูรูปที่ 69)
4. การคำนวณค่า F.S. ของพื้นลาดเอียงอิ่มตัวด้วยน้ำ (ดูรูปที่ 70)
5. การคำนวณค่า F.S. ของ critical slope ทั้งแบบที่เป็นพื้นลาดเอียงแห้งและพื้นลาดเอียงที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ดูรูปที่ 71) และยังมี การเพิ่มเสถียรภาพโดยการใส่ bolt หรือ cable ที่เป็น reinforced force เข้าไปด้วย

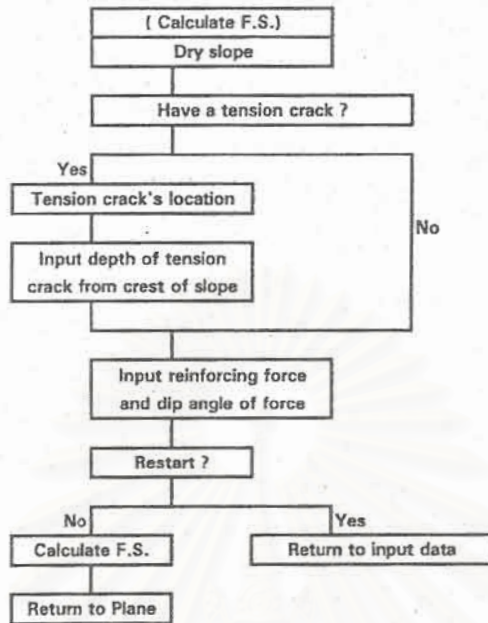
7.3.3 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของโปรแกรม Plane

รูปที่ 72 - 76 (หน้าที่ 222 - 224) แสดงการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยโดยอาศัยแรงภายนอกที่กำหนดมาเพิ่มเสถียรภาพของพื้นลาดเอียงหรือหน้าเหมืองเปิด

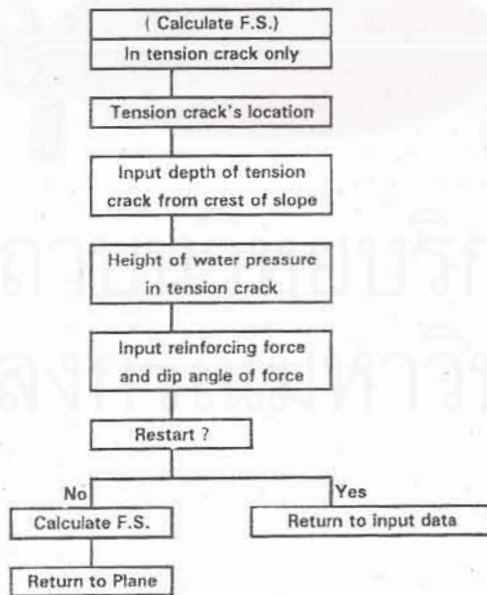
รายละเอียดของไดอะแกรมจะซ้ำกับในเรื่องการคำนวณค่า F.S. ตามปกติ จึงไม่อธิบายซ้ำ



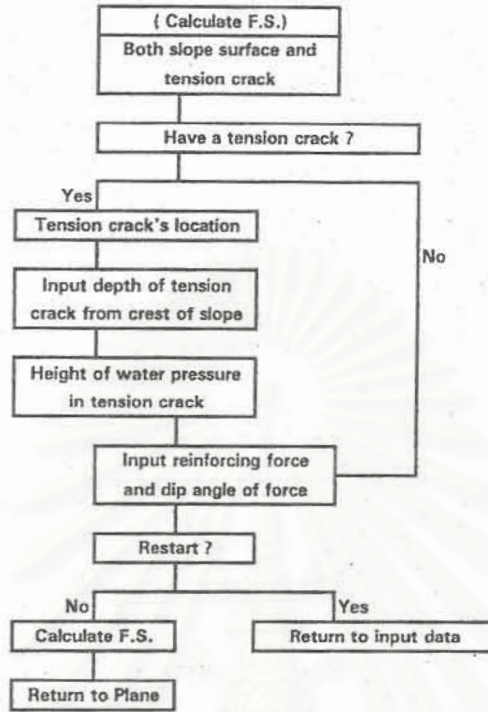
รูปที่ 66 โครงสร้างหลักของโปรแกรม Plane



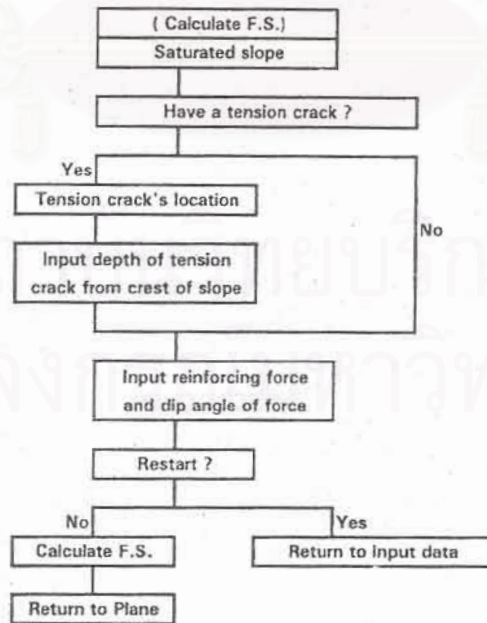
รูปที่ 67 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย
เมื่อพื้นลาดเอียงแห้ง



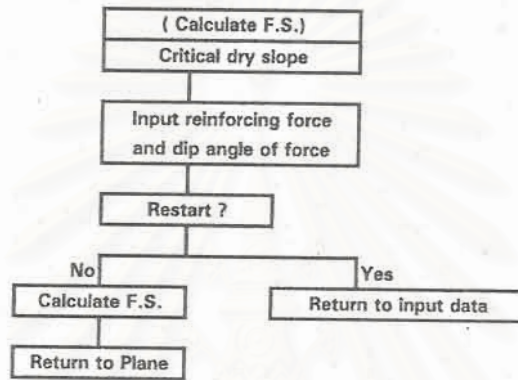
รูปที่ 68 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย
ในกรณีของ tension crack อย่างเดียว



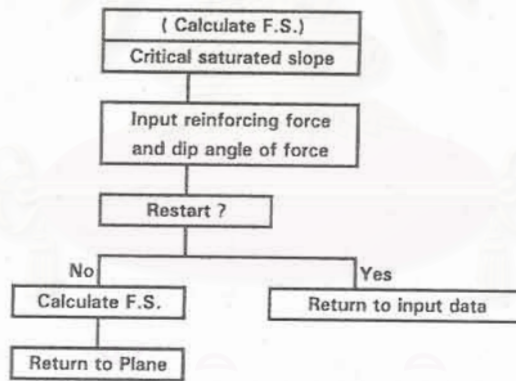
รูปที่ 69 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย ทั้งของ slope surface และของ tension crack



รูปที่ 70 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย ของพื้นลาดเอียงที่อิ่มตัวด้วยน้ำ



a)



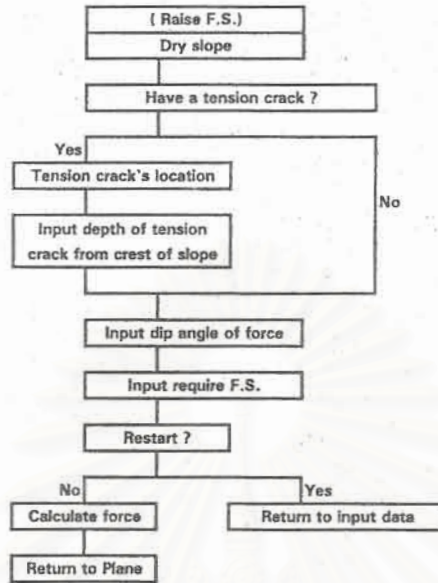
b)

รูปที่ 71 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย สำหรับกรณีที่ดิน

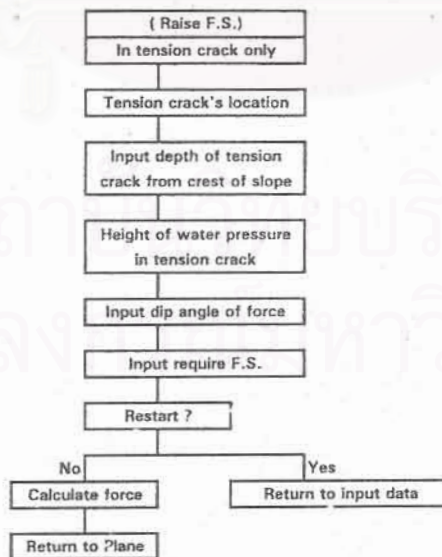
ลาดเอียงวิกฤตและต้องเสริมเสถียรภาพ

a) กรณีของพื้นลาดเอียงแห้งวิกฤต

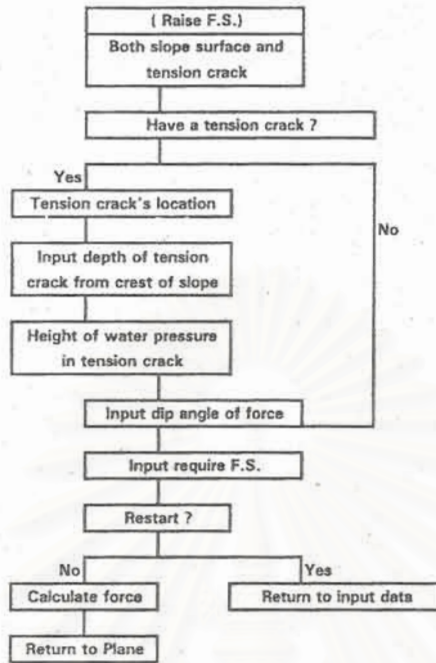
b) กรณีของพื้นลาดเอียงอิ่มตัวด้วยน้ำวิกฤต



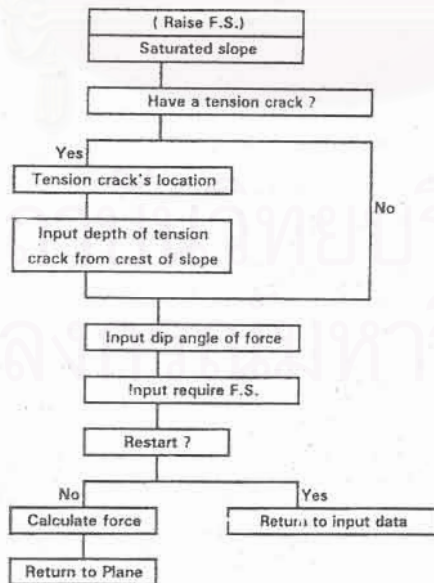
รูปที่ 72 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย
เมื่อพื้นลาดเอียงแห้ง



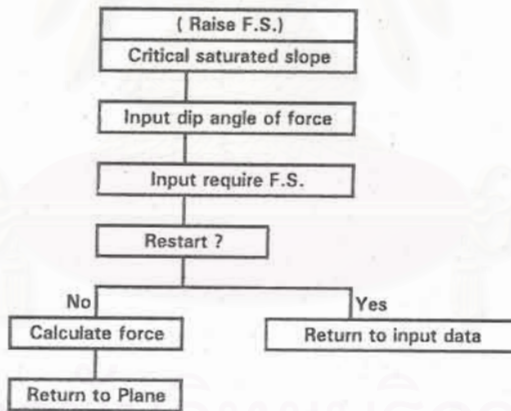
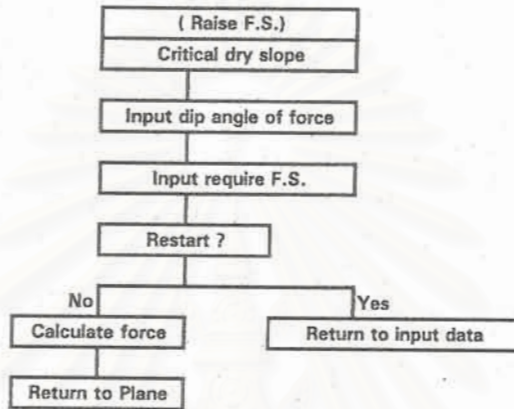
รูปที่ 73 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย
ในกรณีของ tension crack อย่างเดียว



รูปที่ 74 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย ทั้งของ slope surface และของ tension crack



รูปที่ 75 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย ของพื้นลาดเอียงที่อิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 76 การเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัย

สำหรับกรณีที่ดินลาดเอียงวิกฤตและต้องเสริมเสถียรภาพ

- a). กรณีของพื้นลาดเอียงแห้งวิกฤต
- b). กรณีของพื้นลาดเอียงอิ่มตัวด้วยน้ำวิกฤต

7.4 โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายเป็นวงกลม

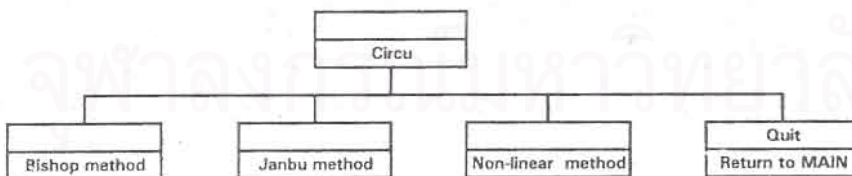
งานวิเคราะห์ที่ยุ่งยากจะเป็นงานวิเคราะห์ในเรื่อง circular failure ที่มีพื้นฐานมาจากการวิจัยของมวลที่เป็นดิน ที่มีการวิเคราะห์หลายขั้นตอน มีรายละเอียดปลีกย่อยมากมีโอกาสที่จะผิดพลาดได้ง่าย จุดเด่นในการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์คือ

- การวิเคราะห์ circular failure ด้วยวิธีของ Bishop ใช้ได้ดีสำหรับกรณี failure surface ที่อยู่ลึกไปจากผิวของ slope ไม่มากนักและมีค่า friction angle ต่ำ ส่วนวิธีของ Janbu ใช้ได้ดีสำหรับกรณี failure surface ที่อยู่ไม่ลึก และมีค่า friction angle สูง (มากกว่า 30°)
- งานวิเคราะห์ circular failure ของ Bishop ยังใช้ได้ดีกับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ non-linear criterion โดยการประยุกต์ใช้ค่า instantaneous friction angle กับ instantaneous cohesion ให้เข้าได้กับสถานะที่กำหนด
- วิธีการวิเคราะห์ของ Sarma นำมาคำนวณในเรื่อง circular failure ได้แต่จะจัดไปอยู่ในหมวดของ wedge failure

7.4.1 โครงสร้างหลักโปรแกรม Circu

ในรูปที่ 77 เป็นโครงสร้างหลักของโปรแกรม Circu ซึ่งได้แยกออกเป็นวิธีการคำนวณ 3 แบบ และการออกจากโปรแกรม

การคำนวณทั้ง 3 วิธีจะไม่เหมือนกันผู้ใช้ต้องเลือกเองว่าปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียงหรือเหมืองเปิดเหมาะสมกับการคำนวณด้วยวิธีใด



รูปที่ 77 โครงสร้างหลักของโปรแกรม Circu

7.4.2 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของโปรแกรม Circu

รูปที่ 78 - 80 (หน้าที่ 227 - 230) แสดงวิธีการคำนวณ 3 แบบ ที่มีการคำนวณเสถียรภาพไม่เหมือนกัน รายละเอียดมีดังนี้

1. การคำนวณเสถียรภาพตามวิธีของ Bishop (ดูรูปที่ 78) จะแบ่งทางเลือกไว้ 4 แนวทาง ได้แก่ งานวิเคราะห์ใหม่ งานวิเคราะห์เก่าโดยใช้ข้อมูลดิบไฟล์เดิม การ save file และการออกจากโปรแกรม

ในการวิเคราะห์ไฟล์ใหม่นั้น ผู้ใช้ต้องเลือกหน่วยที่ใช้ ใส่ข้อมูลเข้าของเหมืองเปิดหรือพื้นลาดเอียงตลอดจนค่าของ slip circle ถ้าได้ข้อมูลเพียงพอโปรแกรมจะคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยออกมา ถ้าหากยังไม่พอใจก็อาจป้อนข้อมูลเข้าแล้วคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยใหม่อีกครั้ง

2. การคำนวณเสถียรภาพตามวิธีของ Janbu (ดูรูปที่ 79) จะมีการแบ่งทางเลือก การป้อนข้อมูลเข้า ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์แบบเดียวกับวิธีของ Bishop เพียงแต่สมการการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยแตกต่างกันเท่านั้นเอง

3. การคำนวณเสถียรภาพตามวิธีของ non-linear จะคล้ายคลึงกับวิธีของ Bishop และ Janbu มีแตกต่างในการรับข้อมูลเข้าเพียงเล็กน้อย

7.5 โปรแกรมวิเคราะห์การพังทลายเป็นรูปลิ้ม

ในกรณีที่มีมวลสารมีโครงสร้างของความไม่ต่อเนื่องในดิน/หิน (discontinuities) หลายแนว เมื่อแนวรอยแตกรอยแยกเหล่านี้มาตัดกันจะเกิดการเลื่อนไถลของมวลสารรูปลิ้มไปตามแนวตัดกันของระนาบ 2 ระนาบ

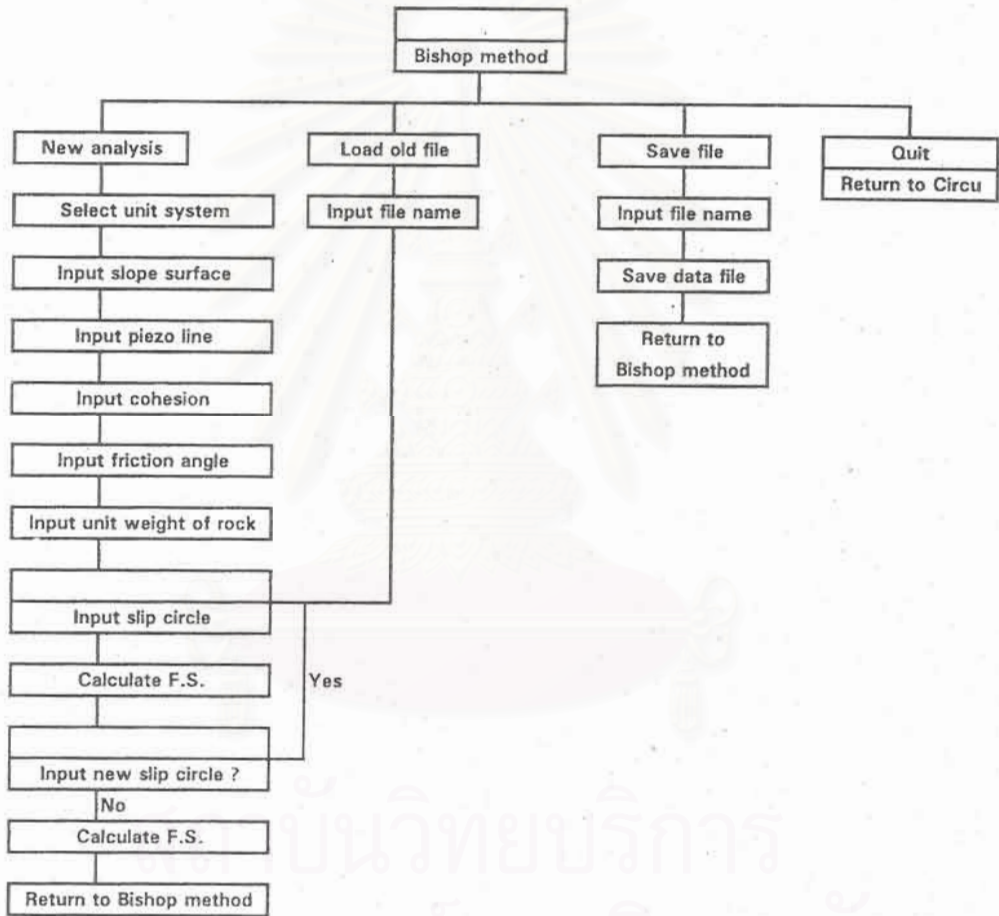
งานการวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มจะแบ่งตามชนิดของมวลสารออกเป็น

- การพังทลายรูปลิ้มของมวลดินจะใช้วิธีการวิเคราะห์ของ Sarma ซึ่งวิธีนี้จะใช้กับการพังทลายแบบวงกลมได้ด้วย

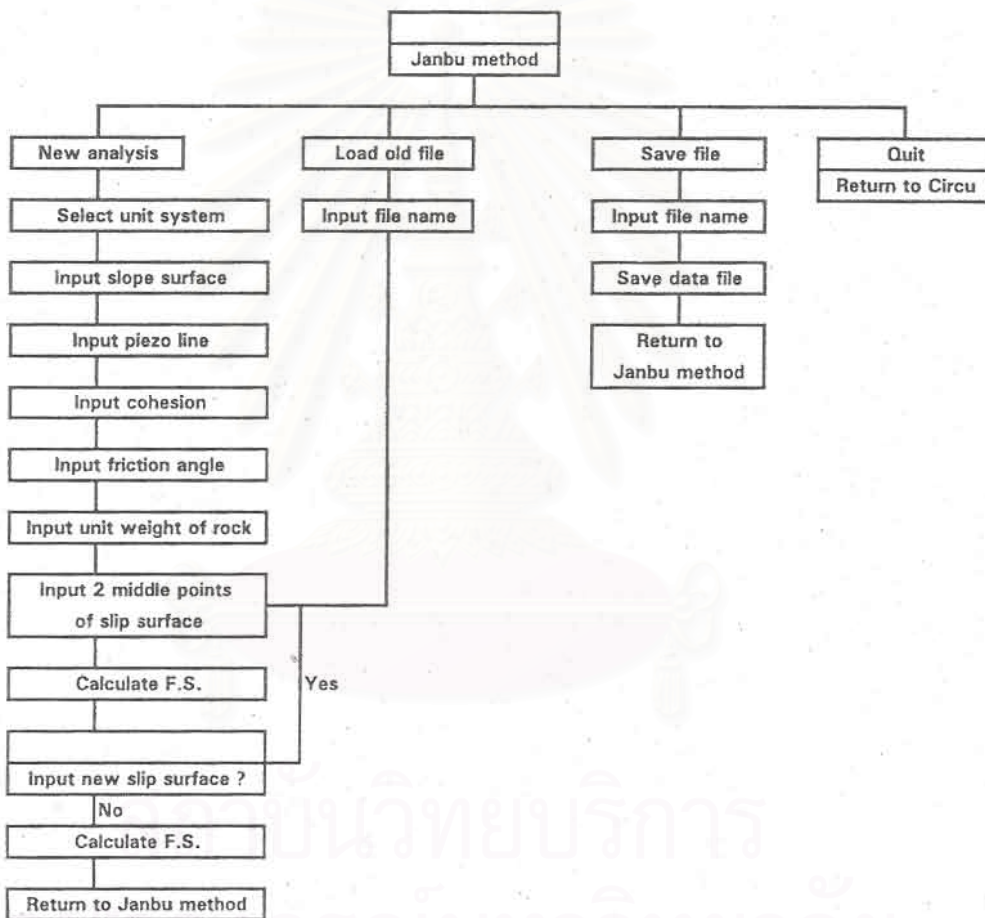
- การพังทลายรูปลิ้มของมวลหินจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบ คือ

ก. การพังทลายของรูปลิ้มบนพื้นผิวดิน (surface wedge failure) ใช้แนวทางวิเคราะห์ของ Hoek and Bray

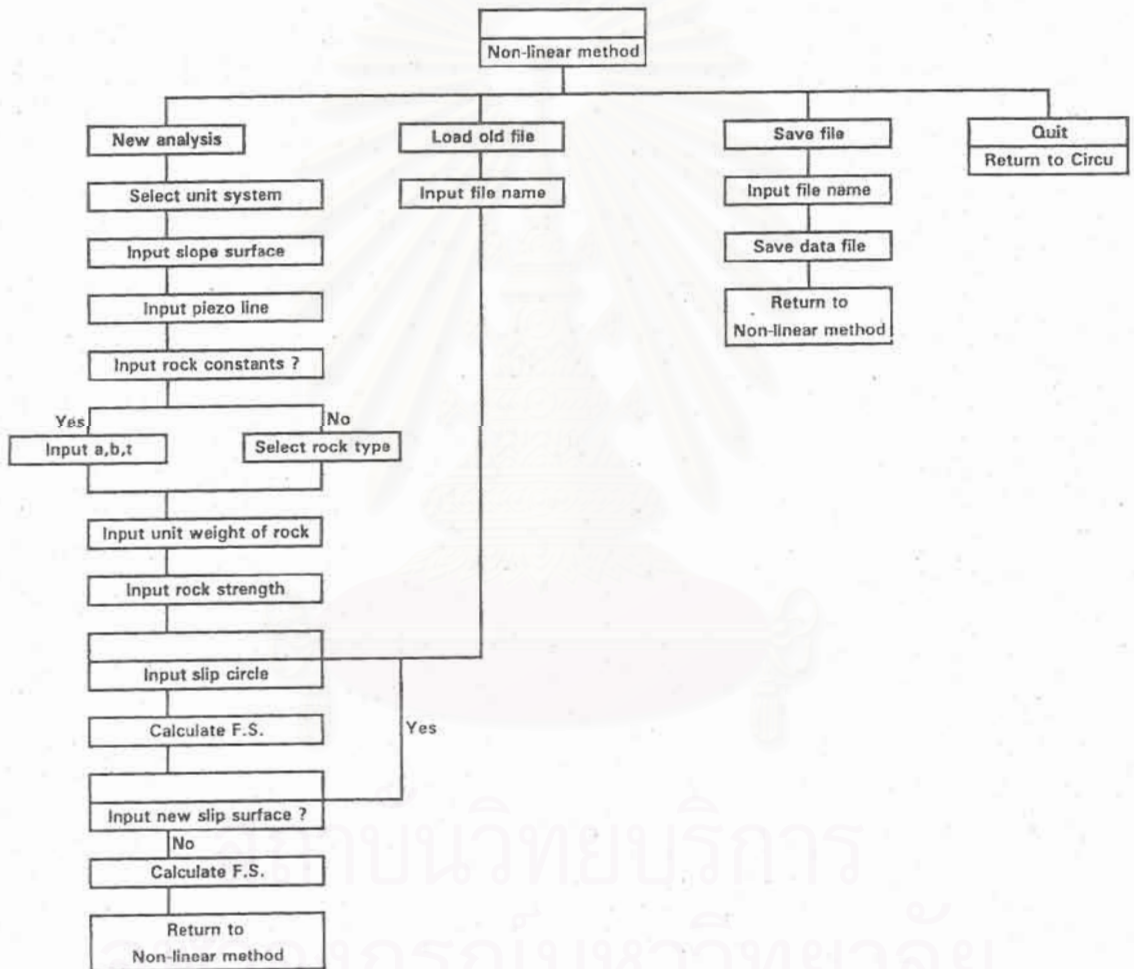
ข. การพังทลายของรูปลิ้มใต้พื้นผิวดิน (underground wedge failure) ใช้แนวทางวิเคราะห์ของ Hoek and Brown



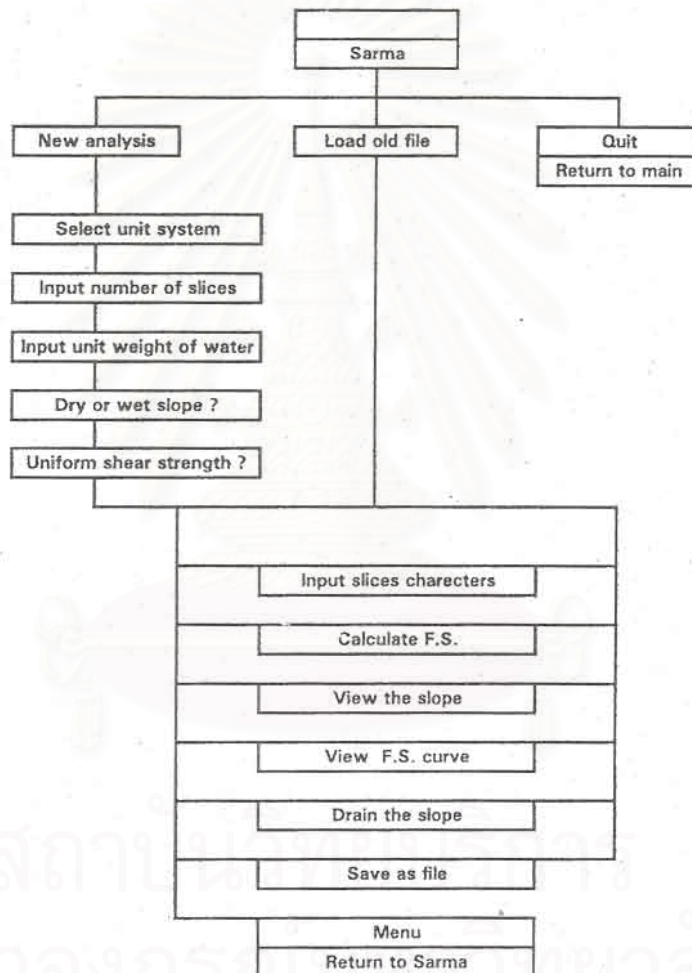
รูปที่ 78 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Bishop แสดงโครงสร้างของโปรแกรมการรับข้อมูลเข้า และการคำนวณในเรื่องเสถียรภาพ



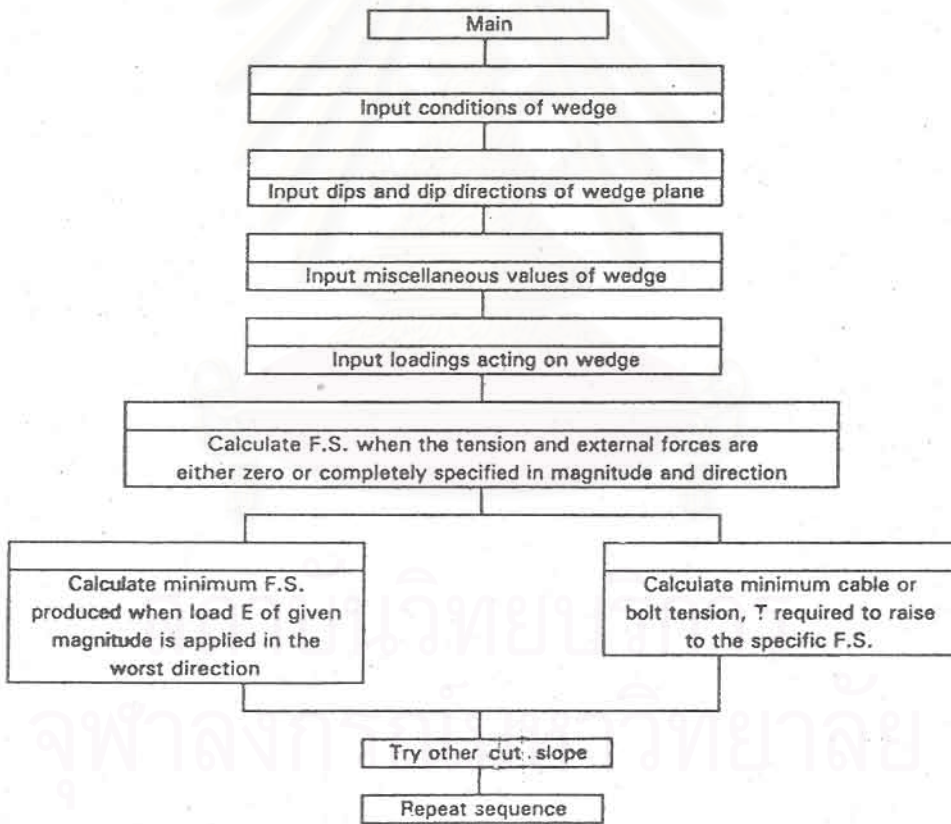
รูปที่ 79 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Janbu แสดงโครงสร้างของโปรแกรมการป้อนข้อมูลเข้า และการคำนวณค่าในเรื่องเสถียรภาพ



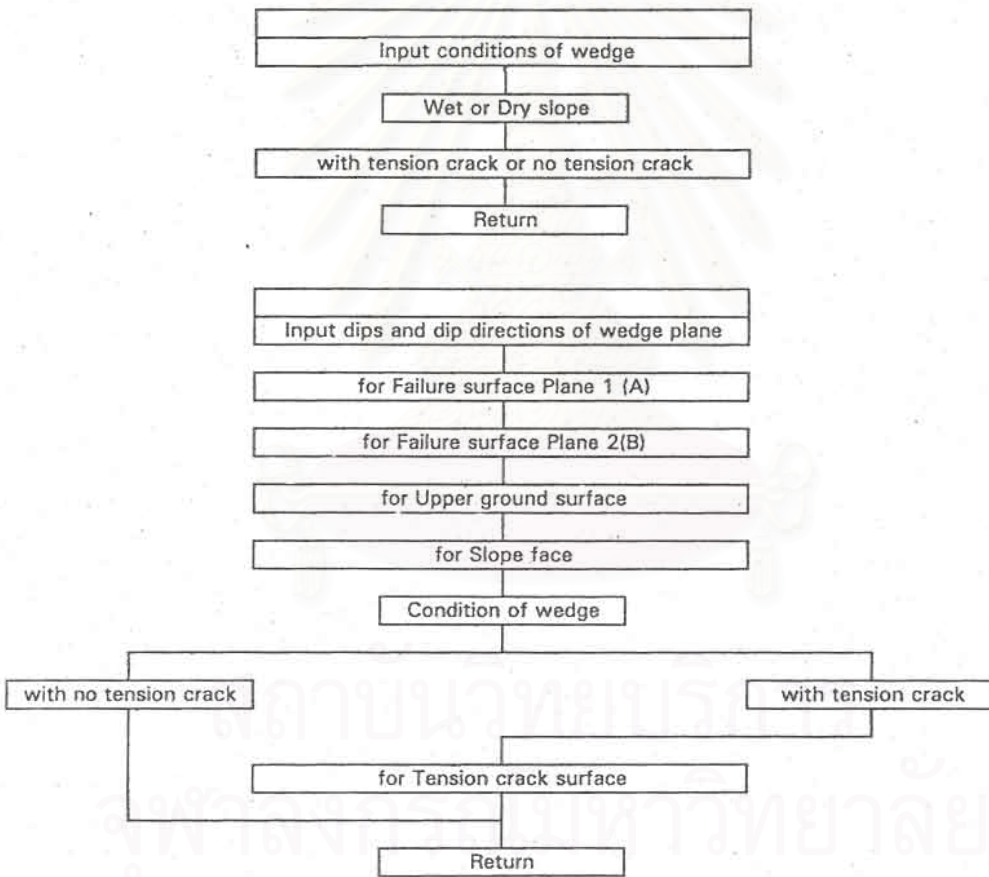
รูปที่ 80 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธี Non-Linear แสดงโครงสร้างของโปรแกรมการรับข้อมูลเข้า และการคำนวณค่าในเรื่องเสถียรภาพ



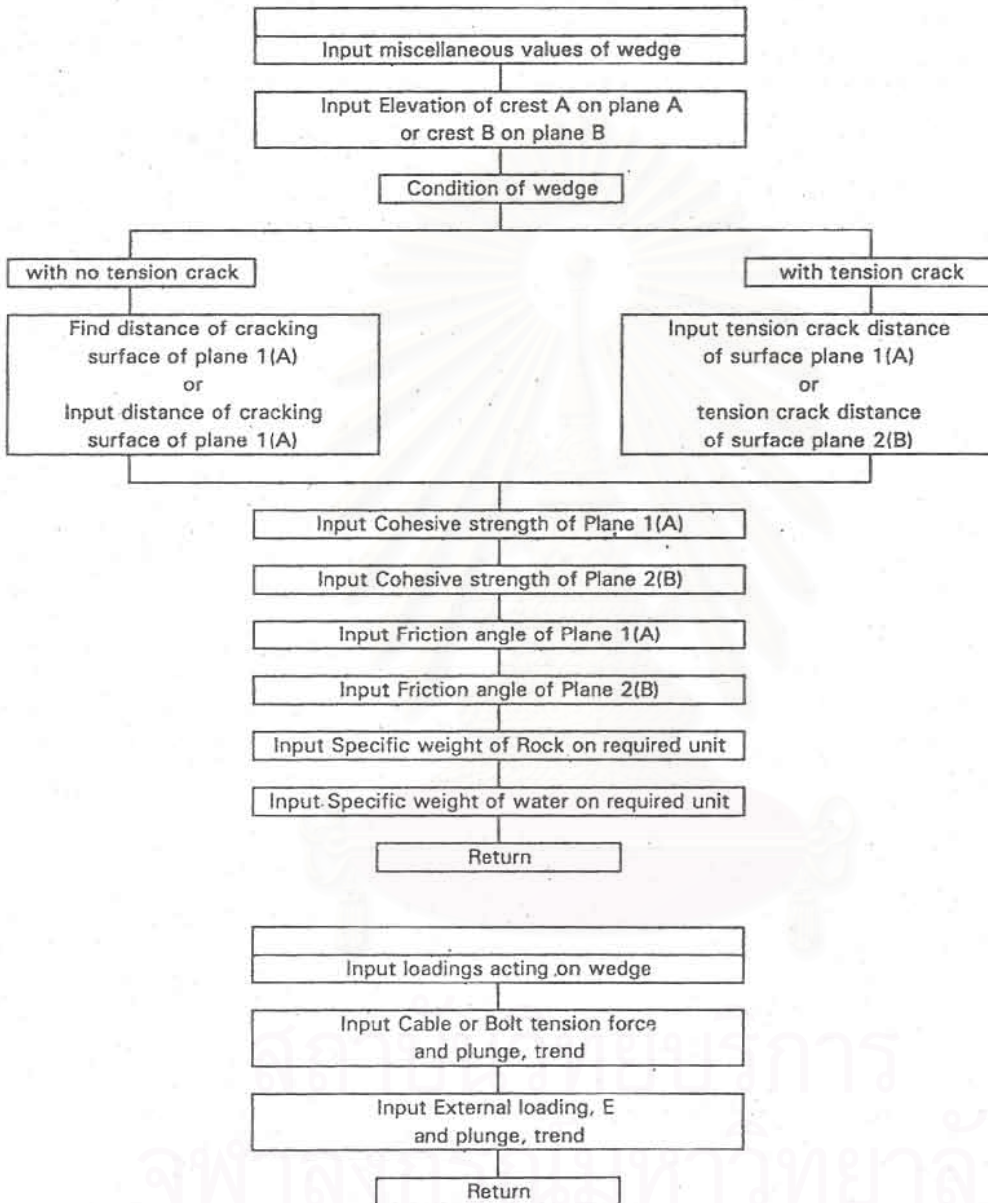
รูปที่ 81 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีของ Sarma แสดงโครงสร้างของโปรแกรมการรับข้อมูลเข้า การคำนวณค่าในเครื่องเสถียรภาพ และการแสดงภาพกราฟฟิก



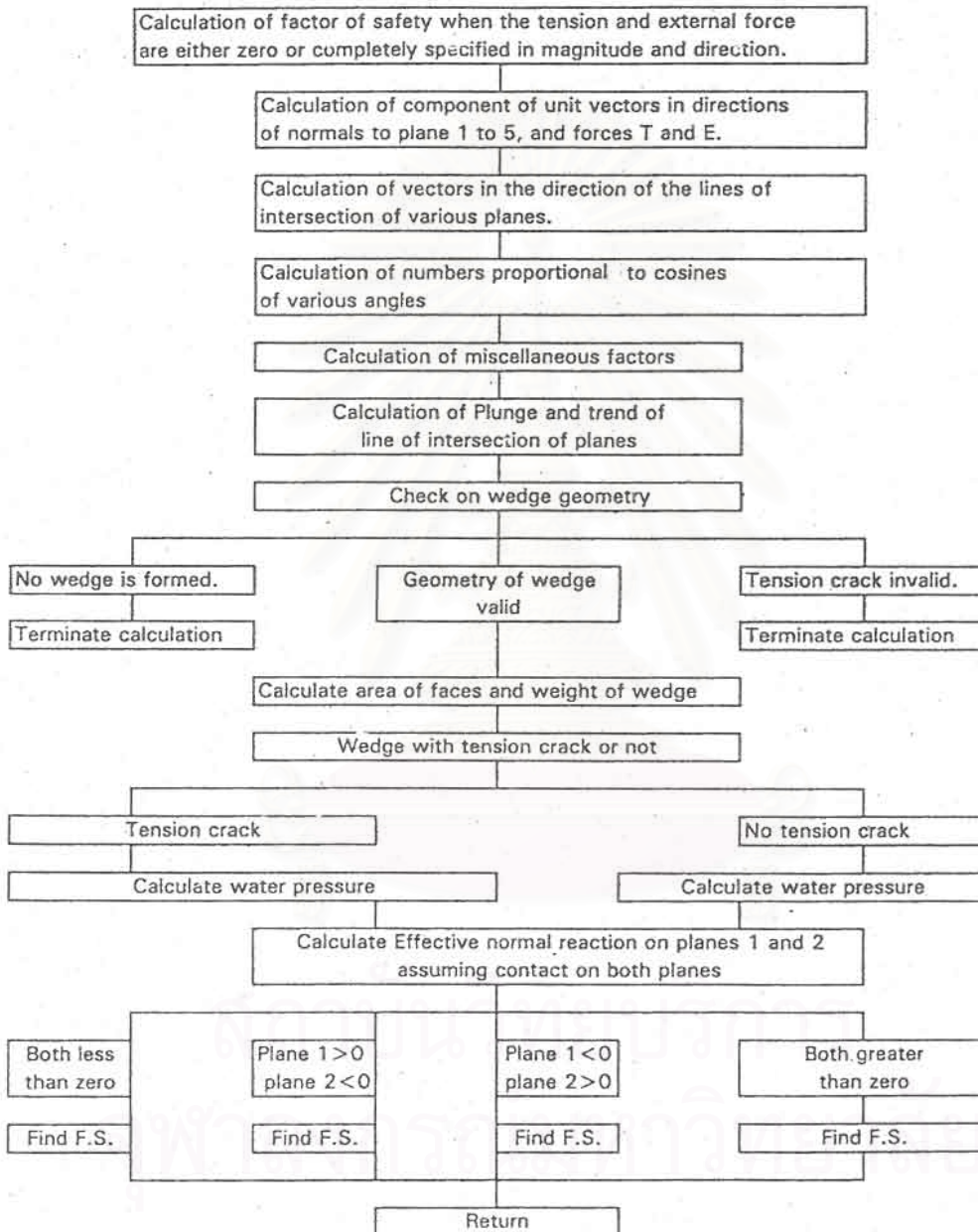
รูปที่ 82 โครงสร้างหลักของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน



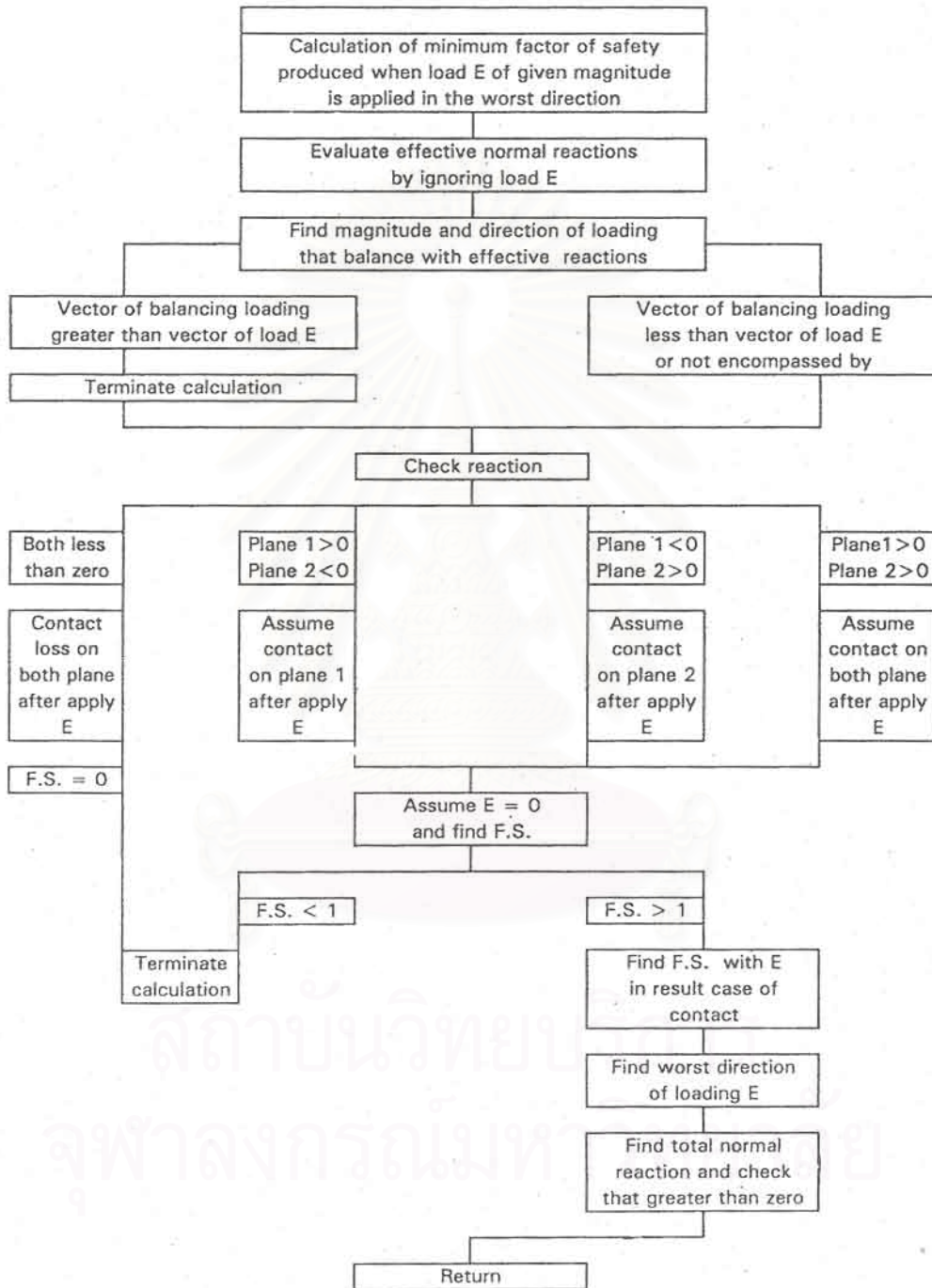
รูปที่ 83 รายละเอียดของการป้อนข้อมูลเข้าสำหรับการวิเคราะห์ การพังทลายรูปลิ้มบนพื้นผิวดิน แบ่งข้อมูลเข้าออกเป็น ข้อมูลสถานะของพื้นลาดเอียง ข้อมูลแนวไม้ต่อนื่องในหิน ข้อมูลของแนว tension crack



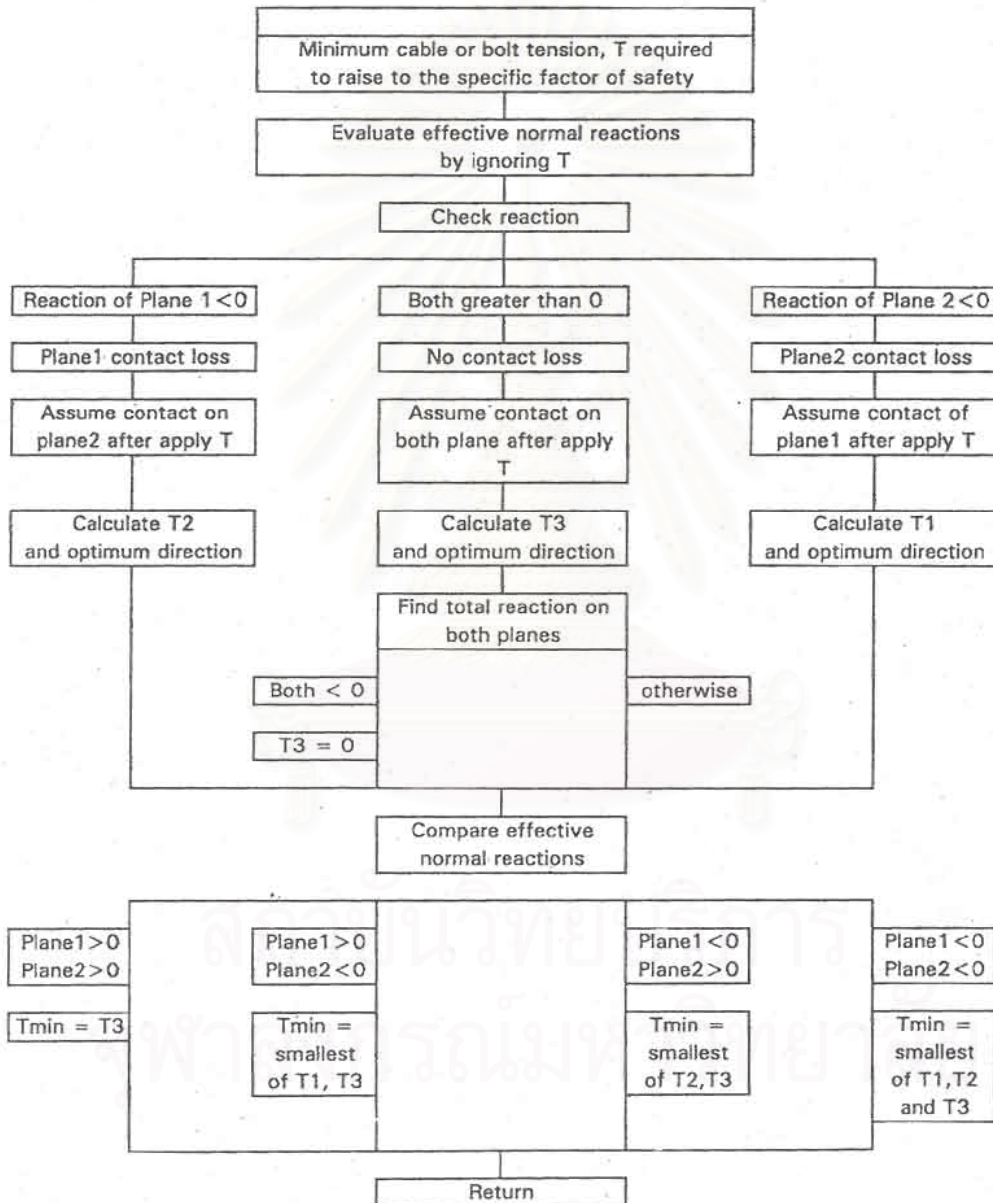
รูปที่ 84 รายละเอียดของข้อมูลเข้าสำหรับการพังทลายรูปลิ้นบนพื้นผิวดิน แสดงรายละเอียดที่ต้องการของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของลิ้น ตำแหน่งที่เกิดรอยแตก คุณสมบัติของหินตลอดจนแรงภายนอกที่มากระทำ



รูปที่ 85 โดอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบสถานะของมวลสารรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวดิน ซึ่งเป็นรายละเอียดของข้อมูลเข้าที่ต้องการ



รูปที่ 86 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบสถานะของมวลสารรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวดิน ในรูปนี้เป็นขั้นตอนที่ต่อจากรูปที่ 85 ซึ่งเป็นการคำนวณต่างๆ เพื่อหาค่าปัจจัยความปลอดภัย



รูปที่ 87 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนของการคำนวณและการตรวจสอบสถานะของมวลสารรูปสี่มุมบนพื้นผิวดิน ในรูปนี้เป็นขั้นตอนที่ต่อจากรูปที่ 86 ซึ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้สูงขึ้น

7.5.1 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธี Sarma

รูปที่ 81 (หน้า 230) เป็นไดอะแกรมสำหรับ flow chart คำนวณเสถียรภาพของมวลดินตามวิธีของ Sarma มีการแบ่งทางเลือกไว้ 3 ทาง ได้แก่ งานวิเคราะห์ใหม่ งานวิเคราะห์ไฟล์เก่า และการออกจากโปรแกรม

โปรแกรม Sarma นี้ยังสามารถแสดงภาพสเก็ทซ์ของหน้าเหมืองเปิดหรือพื้นลาดเอียง และยังแสดงระดับน้ำบาดาลประกอบรูปไว้ด้วย ผู้ใช้โปรแกรมสามารถจะ save file เพื่อนำมา print ได้ในภายหลัง

7.5.2 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ้มบนพื้นผิวดิน

รูปที่ 82 - 87 (หน้า 231 - 236) เป็น flow chart ของโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของ surface wedge เนื่องจากมีหลายขั้นตอนการคำนวณจึงแบ่ง flow chart ออกเป็นช่วงๆ

1. รูปที่ 82 เป็นโครงสร้างหลักของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ้มบนพื้นผิวดินตามวิธีของ Hoek and Bray

2. รูปที่ 83 - 87 เป็นรายละเอียดของการป้อนข้อมูลเข้า ขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ตลอดจนการเพิ่มเสถียรภาพเมื่อต้องการ

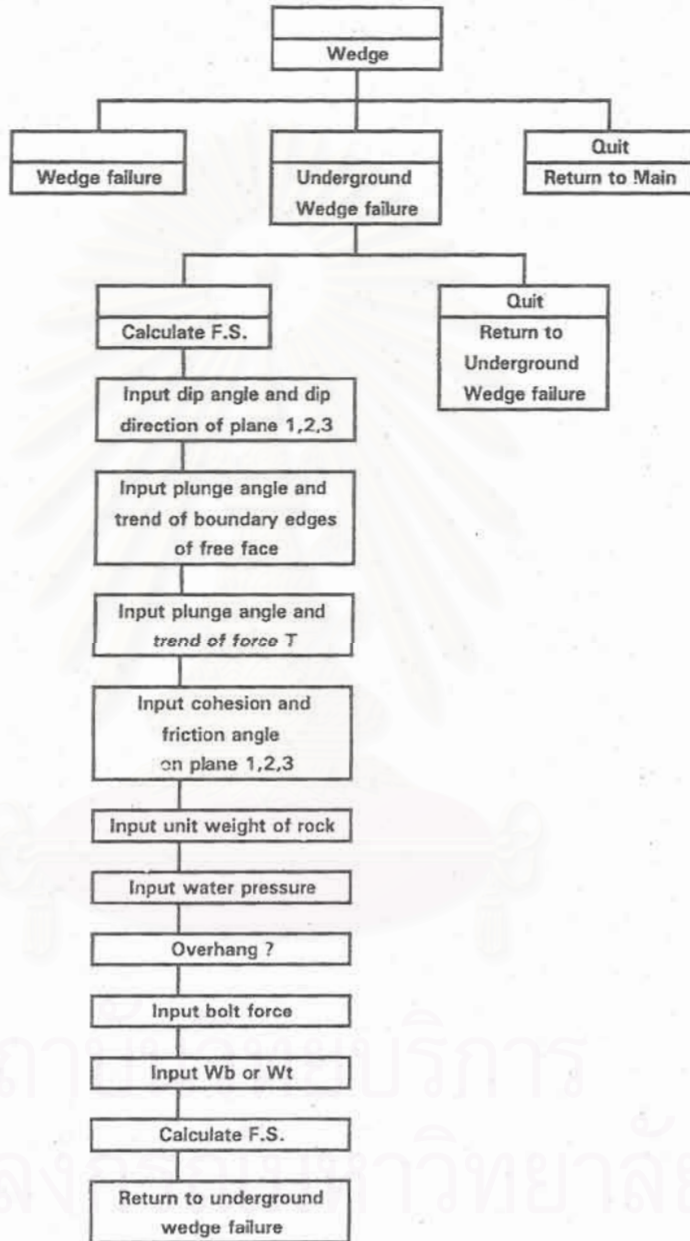
7.5.3 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ้มใต้ผิวดิน

รูปที่ 88 หน้า 238 เป็น flow chart ของการเข้าโปรแกรมการพังทลายของ underground wedge โดยจะแสดงการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามข้อมูลเข้าและสถานะของรูปลิ้ม ตลอดจนการคำนวณค่าใหม่เมื่อมีแรงภายนอกมาเสริมเสถียรภาพ

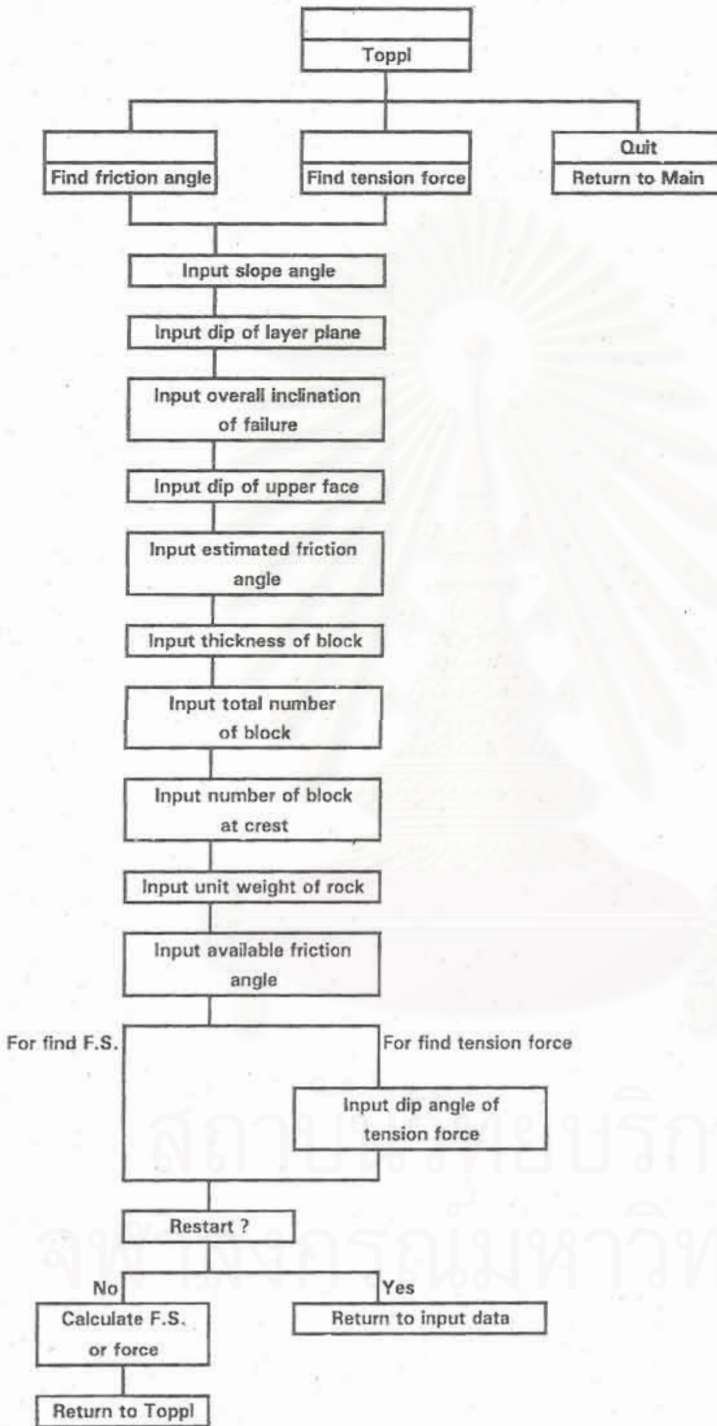
7.6 โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิล

รูปที่ 89 หน้า 239 เป็น flow chart ของการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิลตามวิธีของ Goodman and Bray โดยมีลำดับการคำนวณช่วงแรกเพื่อหาค่าของ friction angle กับหาค่าของ tension force

เมื่อได้ค่าทั้งสองแล้วก็ใส่ข้อมูลเข้ารูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบทอปเปิล เช่น มุมลาดเอียง จำนวนของบล็อก ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของบล็อกหิน เป็นต้น จากนั้นโปรแกรมก็จะคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย ถ้าหากได้ค่าต่ำไปก็จะมี การเพิ่มเสถียรภาพโดยแรง tension force ภายนอกที่เสริมเข้ามา เพื่อปรับค่าปัจจัยความปลอดภัยตามต้องการ



รูปที่ ๘๘ การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายรูปลิ้มได้พื้นผิวดินแสดงโครงสร้างของโปรแกรม การรับข้อมูลเข้า และการคำนวณค่าในเรืองเสถียรภาพ



รูปที่ 89 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของการพังทลายแบบทอปเปิล แสดงโครงสร้างของโปรแกรม การรับข้อมูลเข้า และการคำนวณค่าในเรื่องเสถียรภาพ

7.7 ข้อสรุปของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ

โปรแกรม Stabil.Exe นี้เป็นโปรแกรมที่มีทางเลือกสำหรับการพังทลายของมวลสารแบบต่างๆ ทั้งของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดินที่เป็นดินหรือหิน

ก่อนจะใช้โปรแกรม ผู้ใช้ควรตรวจสอบลักษณะของการพังทลายที่พบเห็นในภาคสนามเสียก่อน ตลอดจนบันทึกข้อมูลรูปแบบเชิงเรขาคณิตเสียก่อนที่จะนำ run ในโปรแกรม

การเพิ่มเสถียรภาพของมวลสารสามารถทำได้ โดยคุณสมบัติแรงภายนอกที่เกิดจากการใส่ cable bolt หรือ rock bolt เข้าไปทำให้มวลสารมีเสถียรภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในเชิงปฏิบัติการจริงในภาคสนาม จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มขึ้น และผลดีผลเสียในเรื่องต่างๆ ประกอบด้วย



บรรณานุกรม

1. Barton, N.R. (1971)
"A Relationship between Joint Roughness and Joint Shear Strength,"
Proceedings International Symposium on Rock Fracture," Nancy, France, Paper 1-8.
2. Bieniawski, Z.T. (1984)
"Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling," A.A. Balkema, 272 pp.
3. Bishop, A.W. (1955)
"The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes,"
Geotechnique, Vol. 5, pp. 7-17.
4. Bishop, A.W. and N. Morgenstern (1960)
"Stability Coefficients for Earth Slope," Geotechnique, Vol. 10, pp.
129-150.
5. Bromhead, E.N. (1992)
"The Stability of Slopes," Blackie Academic & Professional, an Imprint of
Chapman & Hall, 411 pp.
6. Cousins, B.F. (1978)
"Stability Charts for Simple Earth Slopes," Journal of the Geotechnical
Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT2, pp. 267-279.
7. Farmer, I. W. (1983)
"Engineering Behavior of Rocks: Second Edition," Chapman and Hall,
208 pp.
8. Fellenius, W. (1936)
"Calculation of the Stability of Earth Dams," Transaction 2nd Congress on
Large Dams, Washington, Vol. 4, pp. 445-465.

9. Giani, Gian Paolo (1992)

"Rock Slope Stability Analysis, A.A. Balkema, 374 pp.

10. Gibson, R.E. and N.R. Morgenstern (1962)

"A Note on the Stability of Cuttings in Normally Consolidated Clays,"
Geotechnique, Vol. 12, p. 212.

11. Goodman, R.E. and J.W. Bray (1976)

"Toppling of Rock Slopes," Proceedings Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder, Colorado, ASCE, Vol. 2.

12. Goodman, R.E. and Gen - Hua Shi (1985)

"Block Theory and Its Application to Rock Engineering," Prentice - Hall, Inc., 338 pp.

13. Harr, M.E. (1962)

"Groundwater and Seepage," McGraw - Hill Book Company, 314 pp.

14. Hoek, E., J.W. Bray, and J.M. Boyd (1973)

"The Stability of a Rock Containing a Wedge Resting on Two Intersecting Discontinuities," Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.6, No.1, pp. 1-15.

15. Hoek, E. and J.W. Bray (1977)

"Rock Slope Engineering: Revised Second Edition," The Institute of Mining and Metallurgy, London, 402 pp.

16. Hoek, E. and J.W. Bray (1981)

"Rock Slope Engineering: Revised Third Edition," The Institute of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.

17. Hoek, E. and E. T. Brown (1980)
"Underground Excavations in Rock," The Institute of Mining and Metallurgy, London, 527 pp.
18. Hoek, E. (1987)
"General Two-Dimensional Slope Stability Analysis," in Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics (Editor E.T. Brown), Allen & Unwin, pp. 95-128.
19. Janbu, N. (1954)
"Application of Composite Slip Circles for Stability Analysis," Proceedings European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, Vol. 3, pp. 43-49.
20. Janbu, N. (1967)
"Discussion: Dimensionless Parameters for Homogeneous Earth Slopes," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp. 367-374.
21. Lee, J.K., W. Whites and O.G. Ingles (1983)
"Geotechnical Engineering," Pitman Publishing Inc., Boston, 508 pp.
22. Lo, K.Y. (1965)
"Stability of Slopes in Anisotropic Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM4, pp. 85-106.
23. Morgenstern, N.R. and V.E. Price (1967)
"A Numerical Method for Solving the Equations of Stability of General Slip Surface," Computer Journal, London, Vol. 9, pp. 388-393.
24. O'Connor, M.J., and R.J. Mitchell (1977)
"An Extension of the Bishop and Morgenstern Slope Stability Charts," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 144-151.

25. Sarma, S.K. (1979)

"Stability Analysis of Embankments and Slopes," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT12, pp. 1511-1524.

26. Sarma, S.K. and M.V. Bhave (1974)

"Critical Acceleration versus Static Factor of Safety in Stability Analysis of Earth Dams and Embankments," Geotechnique, Vol. 24, No. 4, pp. 661-665.

27. Spencer, E.E. (1967)

"A Method of the Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces," Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 11-26.

28. Spencer, E.E. (1968)

"Effect of Tension on Stability of Embankments," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM5, pp. 1161-1173.

29. Taylor, D.W. (1937)

"Stability of Earth Slopes," Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 197-246.

30. Taylor, D.W. (1948)

"Fundamentals of Soil Mechanics," John Wiley and Sons.

31. Whitman, R.V. and W.A. Bailey (1967)

"Use of Computers for Slope Stability Analysis," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM4, pp. 475-498.

