



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและ การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช

Slope Stability Analysis of Landslide Risk Area and Landslide Risk Area Improvement Using Vegetation

นามผู้วิจัย นายศิวรุท สงสุทิต

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

(รองศาสตราจารย์กอบเกียรติ ผ่องพุฒิ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

(รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรชัย ลิปิวัฒนาการ, M.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วย
การปลูกพืช

Slope Stability Analysis of Landslide Risk Area and Landslide Risk Area Improvement
Using Vegetation

โดย

นายสิววุธ สงสุทริต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ.2552

ศิวุธ สงสุทธิต 2552: การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและ
การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์กอบเกียรติ ผ่องพุฒิ, Ph.D. 74 หน้า

การศึกษาพื้นที่ที่มีศักยภาพเกิดแผ่นดินถล่มบริเวณอำเภอเชียงกลาง จังหวัดน่าน โดยวิธี
ปัจจัยร่วมและการคำนวณเสถียรภาพความลาดชัน สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็นพื้นที่ที่ต้องการการ
แก้ไข และการปรับปรุง พื้นที่ที่มีศักยภาพการเกิดแผ่นดินถล่มสูงมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า
1.25 ต้องทำการแก้ไขเพื่อเพิ่มเสถียรภาพความลาดชันโดยอาศัยเทคโนโลยีด้านธรณีเทคนิค
เช่น การเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ การก่อสร้างกำแพงกันดิน การตัดแต่งปรับความลาดชัน
ส่วนพื้นที่ที่มีศักยภาพการเกิดแผ่นดินถล่มปานกลาง สามารถเลือกใช้การเสริมกำลังดินด้วยรากพืช
ซึ่งเป็นวิธีที่มีราคาถูก ทำได้ง่าย และยังช่วยปรับปรุงทัศนียภาพของพื้นที่อีกด้วย ในบทความนี้
แสดงผลการศึกษารูปแบบของการปลูกพืชเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน ในพื้นที่ที่ต้องการ
การปรับปรุง โดยแบ่งรูปแบบการปลูกพืชออกเป็น 2 รูปแบบคือ การปลูกพืชเชิงเดี่ยวและเชิงผสม
ในพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลการแผ่ขยายของรากพืชในแต่ละปีนำมาจัดรูปแบบ การปลูกพืชบนลาดดิน
และประมวลผลแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม KU-SLOPE 2.0 เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 5
ปี และพบว่า การขยายตัวของรากพืชช่วยเพิ่มค่าความเชื่อมั่นและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของ
ดินแตกต่างกันตามรูปแบบของการปลูก ผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนปลูกพืชเพื่อ
ป้องกันแผ่นดินถล่มได้

Siwawut Songsutthid 2009: Slope Stability Analysis of Landslide Risk Area and Landslide Risk Area Improvement Using Vegetation. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Kobkiat Pongput, Ph.D. 74 pages.

The results of landslide potential area at Chiangklang District, Nan Province, by weighted factor index method and slope stability analysis provided 2 types of potential area, maintenance and upgrading required areas. High potential of landslide area where factor of safety lower than 1.25 is the maintenance required area. This area need improvement of stability by geotechnical technology such as geosynthetics reinforcement, concrete retaining wall, and slope adjustment. For medium potential which is upgrading required area, the easilier and cheaper method such as root reinforcement are suitable. This results shows the pattern of vegetation for slope improvement at upgrading required area. Two pattern of vegetation; single and mixing patterns were used to calculate slope stability. Root growth data were simulated on KU-SLOPE 2.0 program to estimate for 5 years factor of safety. Root growth rate can predict increase cohesion and factor of safety of each vegetation pattern. This results can be used as a guideline for vegetation planning to protect landslide hazard.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากการสนับสนุนดียิ่งจากหลายท่านผู้วิจัยขอกราบขอบคุณประธานกรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร. กอบเกียรติ ผ่องบุผิ พร้อมกรรมการวิชาเอก รศ. ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ ภาควิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ที่ให้โอกาสในการทำการวิจัยให้คำแนะนำตลอดจนแก้ปัญหาต่างๆ และดร. ก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ ภาควิชา วิทยาศาสตร์ปฐพี คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับโอกาสที่ดีและคำปรึกษาทุกด้านซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บัณฑิตวิทยาลัยที่คอยให้ข้อมูลข่าวสารประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยแนะนำรูปแบบของรายงานและข้อมูลในการพิมพ์วิทยานิพนธ์ ทำให้การทำการงานมีความราบรื่นยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พ.จ.อ. โชติ สงสุทิต และนางชัตติญา สงสุทิต ซึ่งได้อบรมเลี้ยงดู รวมถึง นางสาวณิชา ศรีปานและนางสาวกิมิทา สงสุทิต ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในส่วนค่าใช้จ่ายในการศึกษาตลอดมา ผู้วิจัยขอมอบความดีให้กับทุกท่านมา ณ ที่นี้

สิวรุช สงสุทิต

มีนาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระบบการจำแนกการพิบัติของลาดดินของ Varnes (1978)	8
2	เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่ม	30
3	เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มจำแนกตามรอยถล่ม	31
4	เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มจำแนกตามปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่	32
5	การเลือกใช้ความแข็งแรงของดินในการวิเคราะห์ความมั่นคง ในสภาวะการก่อสร้างและใช้งานต่างๆ	35
6	แสดงค่าคุณสมบัติของดินในพื้นที่ศึกษา	47
7	แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบของ รากพืชแต่ละชนิด	48
8	แสดงรูปแบบการขยายตัวของรากพืชที่ใช้ในแต่ละปี	50
9	แสดงข้อมูลค่าคุณสมบัติดินที่ประสานกันกับรากพืช	52
10	แสดงค่าจุดพิบัติของลาดดินหน้าตัดที่ 18	53
11	แสดงผลค่า อัตราส่วนความปลอดภัย 25 หน้าตัด ของอำเภอ เชียงกลาง จังหวัดน่าน	59
12	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกหญ้าแฝก	61
13	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูก ยางหยวก	62
14	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพารา	63
15	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางหยวกผสมหญ้าแฝก	64
16	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพาราผสมหญ้าแฝก	65
17	แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพาราผสมยางหยวกผสมหญ้าแฝก	66
18	แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังการปลูกพืชเชิงเดี่ยว	67
19	แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังการปลูกพืชเชิงผสม	68

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพิบัติ	4
2	ลักษณะการพิบัติของลาดดินและหินแบบต่างๆ	6
3	ตัวอย่างลักษณะการพิบัติตามระบบของ Varnes	9
4	รูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะเป็นแผ่นบาง	12
5	การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Taylor	14
6	Stability chart สำหรับการวิเคราะห์ลาดดินเนื้อเดียวด้วยวิธีของ Taylor	15
7	Stability chart สำหรับดินกรณี $\phi = 0$ ด้วยวิธีของ Taylor	16
8	การวิเคราะห์ความมั่นคงด้วยวิธีโมเมนต์	17
9	การวิเคราะห์ความมั่นคงโดยวิธี Ordinary Method of Slices	20
10	แรงที่เกี่ยวข้องและรูปหลายเหลี่ยมของแรงกรณีที่มีแรงจากแผ่นดินไหวร่วมด้วย	22
11	หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Simplified Bishop Method	23
12	ค่าของ M_0 จากสมการที่ (26)	26
13	การพิบัติที่มวลดินเป็นรูปสามเหลี่ยม (Wedge Shape)	28
14	การวิเคราะห์ความมั่นคงโดยวิธี Wedge Method	29
15	ระบบรากพืชแบบ Tap Root System และ Fibrous System และรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช	37
16	การจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากพืชในแนวตั้งฉาก	39
17	กำลังของดินที่มีการเสริมด้วยรากพืช	40
18	การใช้ทรงกระบอกจำลองการแผ่ขยายของรากพืชโดยทั่วไป	41
19	รากต้นยางหยวก, ต้นจำปาทอง โดย และการจำลองโดยใช้แท่ง ทรงกระบอก	42
20	รากต้นยางหยวก, ต้นจำปาทอง, ยางพารา, ล่อใหญ่, หล้าแฝก และปอ โดย Nilaweera (1994) และการจำลองโดยใช้แท่งทรงกระบอก	43
21	แสดงลักษณะลาดดินตัวอย่าง	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงลักษณะการแบ่งชั้นดินตัวอย่างก่อนการปลูกพืช	55
23	แสดงตัวอย่างการใส่ข้อมูลคุณสมบัติทางพฤกษศาสตร์ของพืช	57
24	แสดงตัวอย่างการประมวลผลค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในโปรแกรม KU-Slope	
2.0		58

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงดินถล่มและการปรับปรุง เสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช

Slope Stability Analysis of Landslide Risk Area and Landslide Risk Area Improvement Using Vegetation

คำนำ

ดินถล่มหรือโคลนถล่ม คือ การเคลื่อนที่ของมวลดินและหินลงมาตามลาดเขาด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลกและมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องในการทำให้มวลดินและหินเคลื่อนตัวด้วยเสมอ ดินถล่มมักเกิดตามมาหลังจากน้ำป่าไหลหลาก ขณะที่เกิดพายุฝนตกหนักจนแรงต่อเนื่องหรือหลังการเกิดแผ่นดินไหว ลักษณะของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่อดินถล่ม เป็นพื้นที่ที่อยู่ตามลาดเชิงเขาและที่ลุ่มหรือใกล้เขาสูงที่มีการพังทลายของดินสูงในบริเวณที่ต้นน้ำลำห้วยที่มีสภาพป่าถูกทำลายไป คุณสมบัติของหินที่มีการรองรับอยู่มีการผุพังง่ายทำให้เกิดเป็นชั้นดินร่วนหนอยู่บริเวณหน้าผาหรือภูเขาสูงชัน ชั้นหินที่รองรับชั้นดินมีความลาดชันมากและเป็นชั้นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้สะดวก ซึ่งพบอยู่หลายพื้นที่ทั่วประเทศ จากการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล สำรวจเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาและสภาพแวดล้อมของพื้นที่เบื้องต้นรวมทั้งรวบรวมข้อมูลอื่นพบว่าจังหวัดที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มในประเทศไทยมีทั้งสิ้น 51 จังหวัด ซึ่งมีการตั้งถิ่นฐานอยู่ใกล้บริเวณลาดเชิงเขาและที่ลุ่มใกล้ภูเขา เนื่องจากบริเวณเหล่านี้เมื่อมีพายุฝนตกหนักต่อเนื่องจะทำให้เกิดน้ำท่วมฉับพลัน น้ำป่าไหลหลาก และดินถล่มตามมาได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว

เนื่องจากมนุษย์มีส่วนร่วมในการส่งผลต่อการการเกิดแผ่นดินถล่มย่อมต้องมีแนวทางการแก้ไขปรับปรุงและการเตือนภัยที่เกิดขึ้น การป้องกันนั้นมีหลายวิธี อาทิเช่น การใช้สิ่งก่อสร้างตามหลักวิศวกรรม, การพยากรณ์ฝนล่วงหน้าเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงในการเกิดธรณีพิบัติแล้วนำผลที่ได้มาทำแผนการอพยพ และ การปลูกพืชเพื่อคลุมลาดในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้เป็นการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการปลูกพืชในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มซึ่งสามารถทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อย โดยการประเมินผลค่าอัตราส่วนความมั่นคง (FS.) ในระยะเวลา 5 ปี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มในอำเภอเชิงกลางจังหวัดน่าน
2. เพื่อเสนอแนวทางในการป้องกันและการรักษาเสถียรภาพลาดชันดินในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มโดยการปลูกพืช
3. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความเชื่อมั่นของดิน โดยการปลูกพืช
4. เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของดินก่อนและหลังการปลูกพืช
5. เพื่อเสนอรูปแบบการปลูกพืชที่เหมาะสมที่สุดในการป้องกันและการรักษาเสถียรภาพลาดชันดินในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินถล่ม

ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษา บริเวณ อำเภอเชิงกลาง จังหวัดน่าน
2. ใช้ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน และลักษณะทางกายภาพของพื้นที่จากงานวิจัยของ ดร.ก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ เรื่อง การคาดการณ์และ การป้องกันพิบัติภัยแผ่นดินถล่มบริเวณลุ่มน้ำน่านตอนบน, สิงหาคม พ.ศ.2551 ซึ่งเป็น โครงการวิจัยย่อย ส่วนส่วนที่2 ของรายงานวิจัยระบบเตือนภัยและการมีส่วนร่วมของชุมชนเครือข่ายลุ่มน้ำน่านตอนบนเพื่อการป้องกันอุทกภัยและแผ่นดินถล่ม
3. ทำการวิเคราะห์พืชที่ใช้ปรับปรุงเสถียรภาพอย่างน้อย 2 ชนิด เพื่อเป็นตัวแทนของพืชคลุมดินกับพืชยืนต้นและทำการวิเคราะห์รูปแบบในการปลูกพืชไม่น้อยกว่า 2 ชนิดเพื่อเป็นตัวแทนของการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและการปลูกพืชผสม
4. สร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์เสถียรภาพของลาดดินในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มปลูกจนโตเต็มที่

การตรวจเอกสาร

1. การพิบัติของลาดดิน

นับแต่อดีตถึงปัจจุบันการพิบัติของลาดดินก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต และ ทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็น ภัยพิบัติ ที่ สามารถตรวจสอบได้ก่อน หรือ สามารถ คาดการณ์ได้ก่อน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงสาเหตุของการพิบัติ และทำความเข้าใจถึงสาเหตุเพื่อนำไปสู่การป้องกันการเตือนภัยโดยจะนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการแก้ไข หรือบรรเทาปัญหาที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องจากการพิบัติของลาดดิน

1.1 ปัจจัยของการเกิดภัยพิบัติของลาดดิน

รูปแบบหรือลักษณะของการพิบัติมีส่วนที่สำคัญมากที่จะนำมาพิจารณาในการใช้ทฤษฎีวิเคราะห์หรือการเคลื่อนพังของลาด ทั้งเป็นปัจจัยภายในที่ทำให้ค่าความแข็งแรง ของดินลดลง และปัจจัยภายนอกที่ทำให้ค่าหน่วยแรงในดินเพิ่มขึ้น (Terzaghi, 1950) ซึ่งได้มีการจัดทำเป็นรายละเอียดของแต่ละปัจจัย (Walker et al., 1980) ดังต่อไปนี้

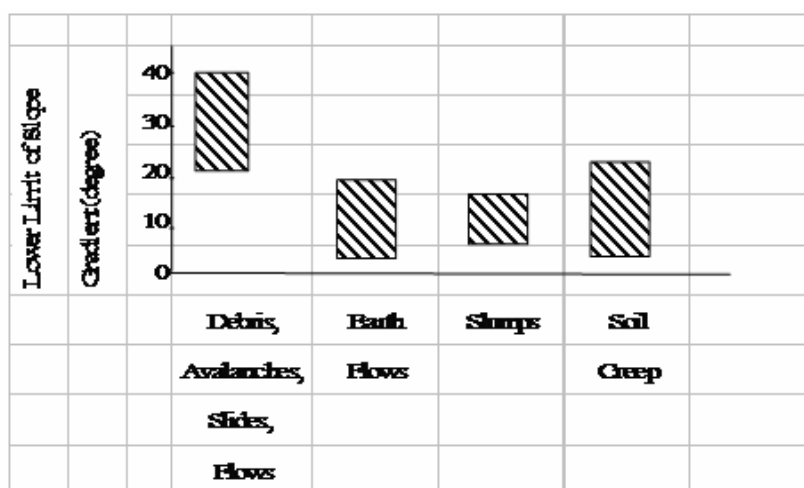
1.1.1 สภาพอากาศ

สภาพอากาศที่สำคัญที่สุดในการทำให้เกิดการเคลื่อนพังของลาด คือ สภาพฝนตก โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำฝนทั้งปริมาณของน้ำฝนที่สะสมในช่วงเวลานาน และปริมาณของน้ำฝนเวลาสั้น ที่ทำให้เกิดพายุหรือฝนตกหนักที่มีผลกระทบต่อความถี่ของการเกิดการพิบัติของลาด และการทำนายการเกิดการพิบัติของลาดจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งในการนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ Nelson and Turner (1975), Lumb (1975), Fukasaka (1978), Juhns (1978), Rogers and Selby (1980), Caine (1980), Crozier (1984), และ Johnson and Sitar (1990) ยกตัวอย่างเช่น Lamb (1975) ได้เสนอแนะกราฟแสดงระดับอันตรายของการพิบัติที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำฝน 1 วันกับปริมาณน้ำฝน 15 วันสำหรับใช้ในการทำนายการเกิดพิบัติในประเทศฮ่องกง, Juhns (1978) ได้เสนอแนะว่าขนาดพื้นที่การเคลื่อนพังของลาดในกรณีที่มีสภาพพื้นที่ที่มีความชื้นจากน้ำฝนในช่วงระยะเวลายาว จะมีความยาวและความลึกมากกว่าในกรณีที่เกิดพายุในช่วงเวลาสั้น นั่นคือเกิดเป็นการเคลื่อนพังแบบ Shallow Slide

1.1.2 สภาพความชันของลาด

โดยทั่วไป มักพบว่าลาดมีความชันมากขึ้น แนวโน้มที่จะเกิดการพังถล่มก็จะมีมากขึ้นได้แก่ Crozier et al. (1980) พบว่า การพังถล่มเริ่มเกิดขึ้นที่ London Clay เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 10 องศา ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์ เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 24 องศา, Pilgrim และ Conacher (1974) พบว่าการพังถล่มของลาดดินแบบ Flows เริ่มเกิดขึ้นใน Chittering Valley Conacher (1974) พบว่าในสภาพภูมิอากาศปกติ การพังถล่มเริ่มเกิดขึ้นในแถบเทือกเขาของ Southern California เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 38 องศา แต่จะเริ่มเกิดขึ้นที่ความชันเท่ากับ 31 องศา ในกรณีที่เกิดฝนตกหนัก จากสภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในปี ค. ศ. 1969 เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่สามารถกำหนดค่าต่ำสุดของลาดที่จะเกิดแต่ละรูปแบบของการพังถล่มของลาด ได้แก่ Sidle และคณะ (1985) ได้จัดทำกราฟแสดงค่าต่ำสุดของความชันของลาดที่จะเกิดรูปแบบการพังถล่มดังแสดงในภาพที่ 1, Blong (1974) พบว่า ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์ การพังถล่มแบบ Slide เกิดขึ้นเมื่อความชันมีค่าระหว่าง 17 องศา ถึงค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.8 องศา การพังถล่มแบบ Flows เกิดขึ้นเมื่อมีความชันมากขึ้น คือมีค่าอยู่ระหว่าง 25 องศาถึง มากกว่าหรือเท่ากับ 40 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 องศา



ภาพที่ 1 ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพังถล่ม

ที่มา: Sidle et al. (1985)

2. ลักษณะของการพิบัติของลาดดินและลาดหิน

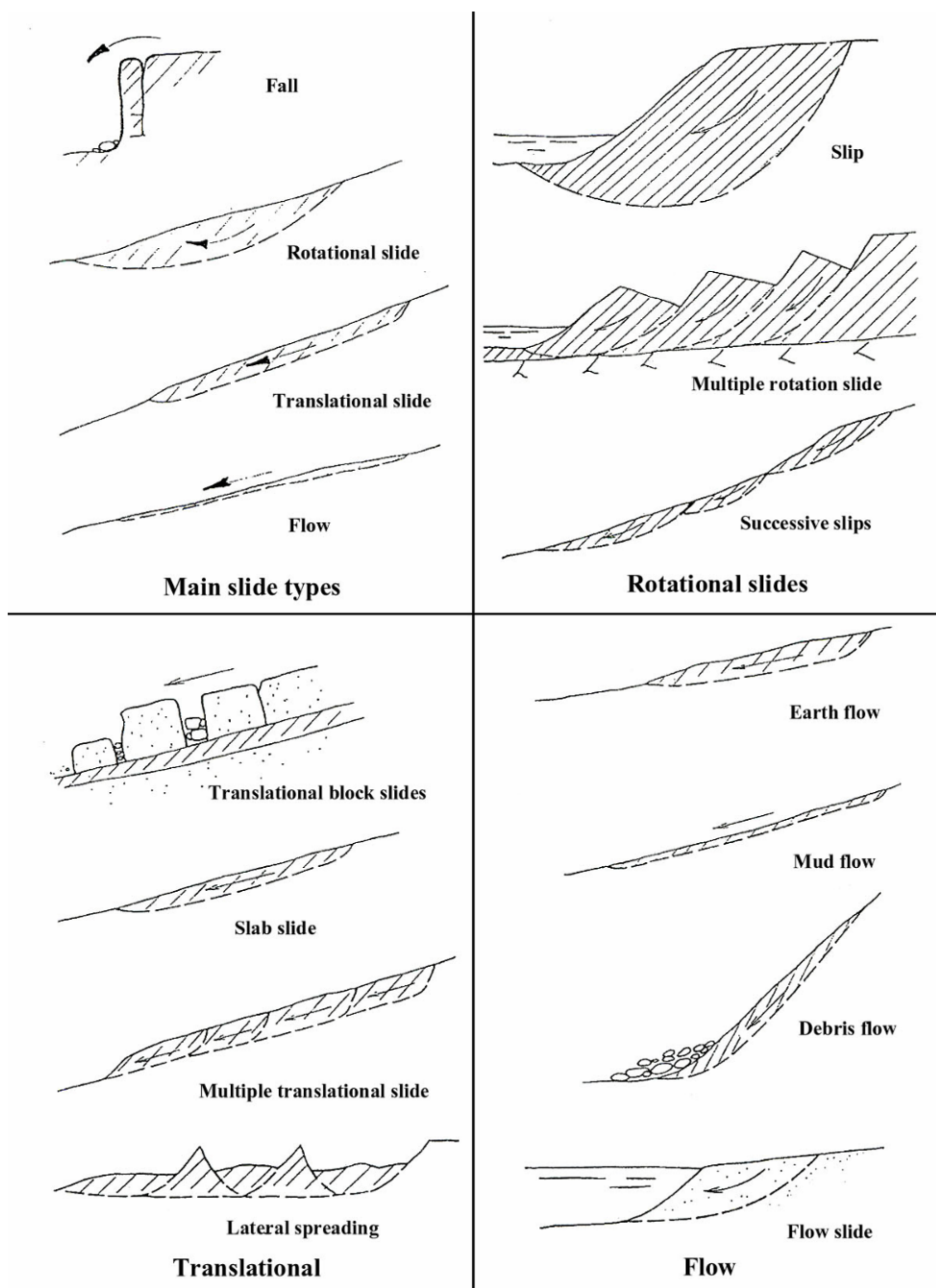
รูปแบบหรือลักษณะของการพิบัติมีส่วนสำคัญมากที่จะนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์เพื่อเลือก ใช้ทฤษฎีที่จะประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และหาวิธีที่จะแก้ไขปรับปรุงในบริเวณนั้นๆ มีความมั่นคง การจำแนกรูปแบบการพิบัติอย่างง่าย ๆ โดย Blong (1973) ชนิดของความพิบัติโดยการเคลื่อนพังได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังภาพที่ 2

2.1 การร่วงหล่น (Fall)

มักเกิดขึ้นในบริเวณหน้าผาหินที่สูงชันซึ่งมวลหินมีรอยแตกจากการกัดกร่อนผุพังตามธรรมชาติอยู่แล้วเสียสมดุลจากการกัดเซาะได้ฐานจะเคลื่อนตัว กลิ้งร่วงหล่นลงเบื้องล่างและอาจจะมีการกระเด็นกระดอนหรือกลิ้งตัวต่อไปเมื่อตกถึงพื้นเบื้องล่างแล้ว ลักษณะเช่นนี้ ไม่มีรูปแบบในการคำนวณวิเคราะห์ที่แน่นอนนอกจากการพิจารณาแรงสมดุลของแต่ละก้อนหรือมวลหินเป็นส่วนๆไป

2.2 การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides)

ซึ่งจะมีการเคลื่อนตัวของมวลดินภายในผิวเฉือนที่ใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลม และรูปร่างของมวลดินที่มีการเคลื่อนตัว อาจเป็นส่วนหนึ่งของรูปทรง กระบอกถ้าดูการเคลื่อนตัวใน 3 มิติ



ภาพที่ 2 ลักษณะการพังทลายของลาดดินและหินแบบต่างๆ

ที่มา: Blong (1973)

2.3 การเคลื่อนแนวระนาบ (Translational Slides)

การพิบัติในลักษณะนี้จะปรากฏผิวเคลื่อนเป็น Plane หรือพื้นระนาบซึ่งมักจะขนานกับผิวหน้าของมวลดิน หรือหินที่พิบัติ ลักษณะเช่นนี้มักจะเกิดเมื่อมีผิวระนาบที่ลื่น หรืออ่อนอยู่ชัดเจน เช่น ดินหรือหินที่คลุมปิดหน้าหินผุด หินทิ้งทับคลื่นบนลาดเขื่อน

2.4 การเลื่อนไหล (Flows)

มักเกิดขึ้นในลาดดินที่มีน้ำเข้าผสมจนดินอ่อนตัวเสียกำลัง และเริ่มอืดตัว จนเกิดการไหลของวัสดุชั้นเหลวที่มีความหนืด (Viscous flow) ดังเช่น กรณีการพังของไหลเขาในภาคใต้ เนื่องจากฝนตกหนัก (Wieland, 1989) หรือการเคลื่อนตัวของธารน้ำแข็ง ในบริเวณขั้วโลกลักษณะเช่นนี้ เป็นต้น

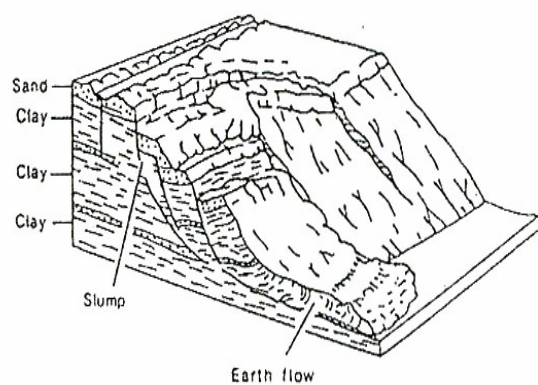
แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนพังในบางกรณี ไม่สามารถจำแนกได้ชัดเจนว่าเป็นลักษณะใด แต่อาจเป็นหลายๆ รูปแบบ ผสมกัน ซึ่งเรียกว่า "Complex Slides"

ในขณะที่ยุคต่อมา Varnes (1978) ได้รวบรวมการพิบัติจากงานทางและจำแนกอย่างละเอียดโดยมีภาพสเกตเป็นสามมิติประกอบดังแสดงในตารางที่ 1

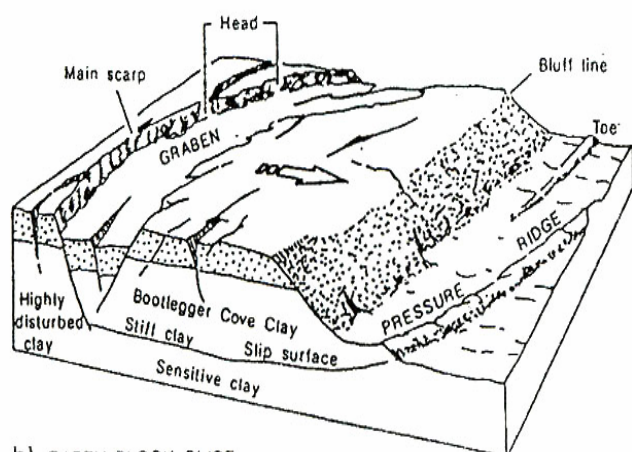
ตารางที่ 1 ระบบการจำแนกการพังทลายของลาดดินของ Varnes (1978)

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	DEBRIS (coarse soil and rocks)	EARTH (fine soil)
I	FALLS	rock fall	debris fall	earth fall
II	TOPPLES	rock topple	debris topple	earth topple
III	SLIDES	ROTATIONAL	rock slump	debris slump
		TRANSLATIONAL	a. rock block slide	earth slump
			b. rock slide	
IV	SPREADS	rock spread		earth lateral spread
V	FLOWS	bedrock flow	a. debris flow	a. wet sand flow
			b. debris avalanche	b. rapid earth flow
			c. block stream	c. earth flow
			d. solifluction	d. loess flow
			e. soil creep	e. dry sand flow
VI	COMPLEX	combination of above movements		

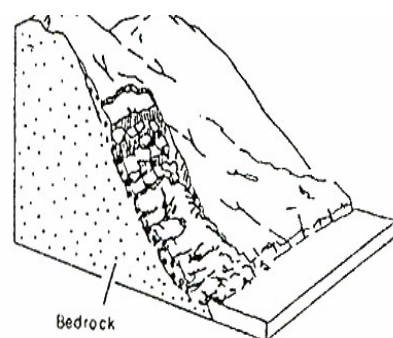
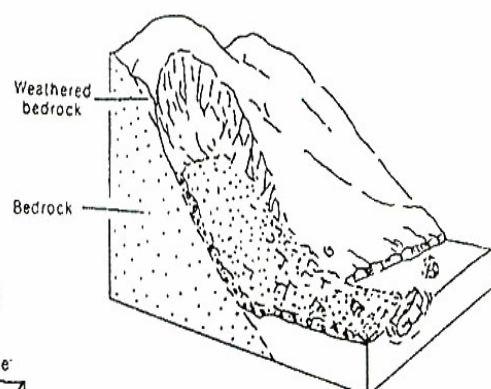
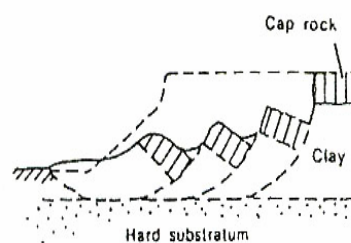
ที่มา: Varnes (1978)



a) SLUMP-EARTH FLOW



b) EARTH BLOCK SLIDE

Figure 1.4 Selected
landslides in Varnes'
classification systemc) DEBRIS SLIDE, very slow
to rapidd) DEBRIS AVALANCHE, very rapid
to extremely rapid

e) MULTIPLE

ภาพที่ 3 ตัวอย่างลักษณะการพิบัติตามระบบของ Varnes (1978)

ที่มา: Varnes (1978)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

สาเหตุของการทำให้เกิดการเคลื่อนพังหรือความไม่มั่นคงในลาดดินหรือหิน อาจเกิดจากปัจจัยต่อไปนี้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างประกอบกันกล่าวคือ 1) แรงดึงดูดของโลก หรือความต่างระดับของมวลดินหรือหิน 2) แรงกระทำจากภายนอกมวลดิน เช่น น้ำหนักบรรทุกทุก หรือแผ่นดินไหว 3) การสูญเสียกำลังของดินหรือหิน เนื่องจากแรงดันน้ำ การบวมตัว การอิ่มตัว การไหลซึมของน้ำ 4) การกัดกร่อนผุพังตามธรรมชาติ หรือการกัดเซาะ โดยเฉพาะที่ส่วนล่างของลาดดิน ดังนั้นในการวิเคราะห์และแก้ไข เราจึงต้องทราบสาเหตุที่แท้จริง เพื่อการแก้ปัญหาได้ตรงจุด ประหยัดและปลอดภัย

โดยปกติแล้วการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน จะใช้วิธีการพิจารณา “สมดุลย์จำกัดของมวลดิน” (Limit Equilibrium) คือ ขั้นตอนแรก จะต้องมีการสมมุติรูปลักษณะของผิวเคลื่อนที่น่าจะเกิดขึ้นสำหรับในกรณีที่จะทำการออกแบบ แต่ถ้าเป็นการวิเคราะห์เพื่อการแก้ไขลาดดินที่พังแล้วก็อาจทราบลักษณะการพังได้แน่นอน โดยการทำการศึกษาในสนามเพื่อหาตำแหน่งที่แท้จริงได้ เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว เปรียบเทียบกับแรงต้านทานที่เกิดจากกำลังของดินแล้ว จะสามารถคำนวณหา "อัตราส่วนปลอดภัย" (Factor of Safety, F.S.) ได้

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัย หรือดัชนีความปลอดภัย คือ อัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อน ต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ง่ายๆ ดังนี้

$$F.S. = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear Stress}} = \frac{\tau}{s} \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อ τ = กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของมวลดินหรือหินบนผิวเคลื่อนซึ่งตามทฤษฎีของ Mohr - Coulomb แล้วจะมีค่า $c + \sigma \tan \phi$
 s = หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเพียงพอทำให้มวลดินนั้นสมดุล

และสำหรับการพิบัติในลักษณะจำเพาะ เช่น ผิวเคลื่อนเป็นส่วนโค้งของวงกลม อัตราส่วนปลอดภัยอาจหมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง ก็ได้เช่น

$$\begin{aligned}
 F.S. &= \frac{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของดินต้านทานการพิบัติ}}{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักมวลดินที่จะทำให้พิบัติ}} \\
 &= \frac{M_R}{M_D} \quad \text{----- (2)}
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินอาจทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะวิธีที่ใช้เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์ ซึ่งนิยมใช้กันโดยทั่วไป คือ

3.1.1 วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite Slope)

เมื่อรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะเป็นแผ่นที่บางๆ เคลื่อนลงตามผิวลาด เช่นการทิ้งหินบนลาดเขื่อน การตกตะกอนของชั้นทรายริมฝั่ง หรือ การกองวัสดุใน Stockpile ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยที่ความหนาของดินที่เคลื่อนน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวของมวลดินที่เกิดเคลื่อนพัง ในกรณีเช่นนี้ผิวเคลื่อนจะถือว่าวางตัวขนานกับผิวลาดดิน และอาจเป็นดินแห้ง หรือผิวที่จมอยู่ใต้น้ำ หรือมีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดก็ได้ โดยแต่ละกรณีสามารถเขียน Free body และ Force diagrams ดังแสดงไว้ในภาพดังกล่าว

เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงที่ขนานกับผิวเคลื่อน เปรียบเทียบระหว่าง แรงต้านทาน (Strength) และแรงกดลง (Stress) จะสามารถหาอัตราส่วนปลอดภัยได้ดังนี้

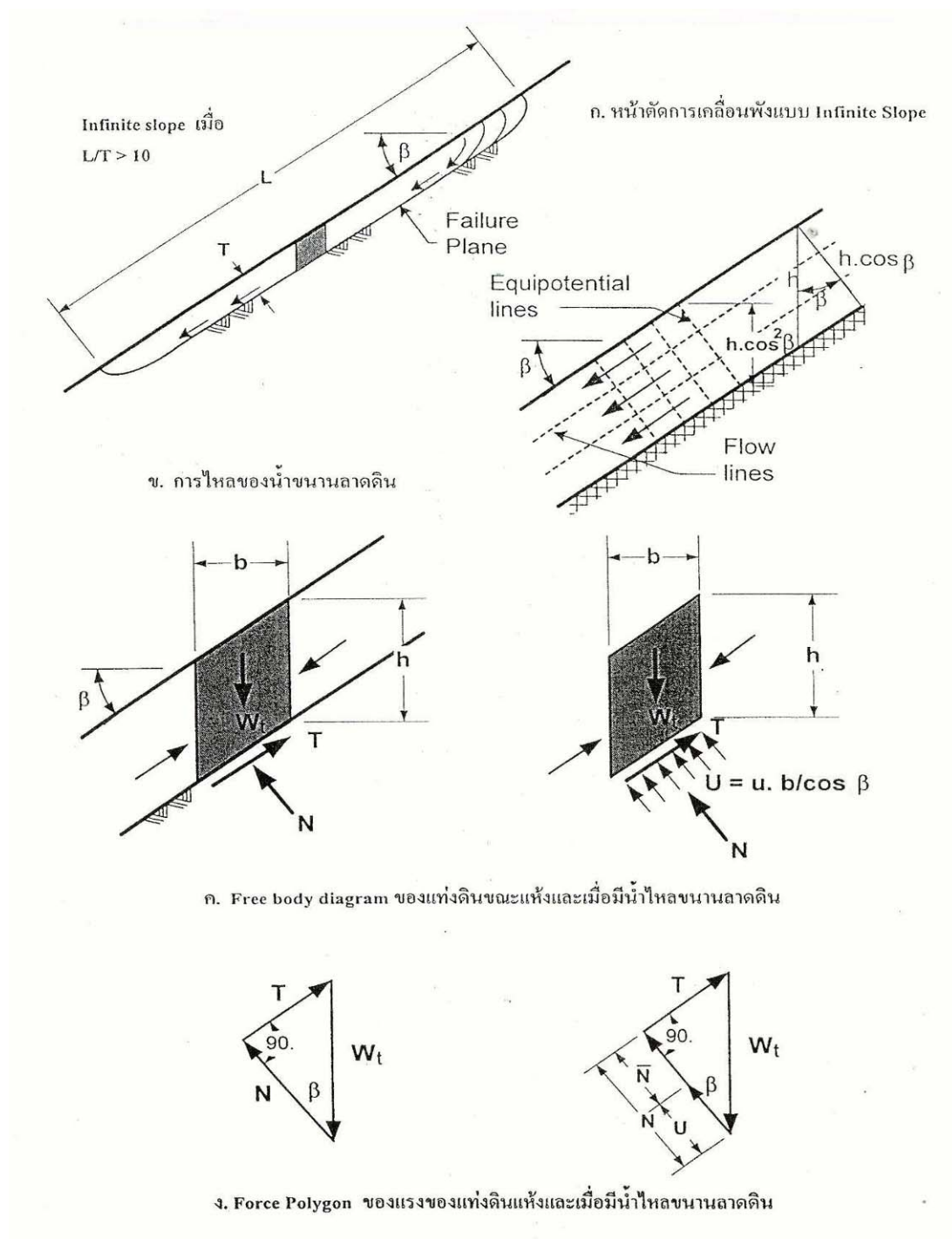
$$\text{สำหรับดินทราย เมื่อ} \quad \tau = \sigma \tan \phi \quad \text{และ} \quad \bar{\tau} = (\sigma - u) \tan \bar{\phi}$$

$$\text{บนลาดดินแห้ง} \quad F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad \text{----- (3)}$$

$$\text{บนลาดดินจมใต้น้ำ} \quad F.S. = \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad \text{----- (4)}$$

บนลาดดินที่มีน้ำไหลขนานกับผิวลาด

$$F.S. = \frac{\gamma_b}{\gamma_{sat}} \cdot \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad \text{----- (5)}$$



ภาพที่ 4 รูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะเป็นแผ่นบาง

ที่มา: (Winterkorn and Fang, 1980)

สำหรับดินเหนียว เมื่อ $\tau = c + \sigma \tan \phi$ และ $\bar{\tau} = \bar{c} + (\sigma - u) \tan \bar{\phi}$

$$\text{บนลาดดินแห้ง} \quad \text{F.S.} = \frac{\bar{c}}{\gamma_b h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad \text{----- (6)}$$

$$\text{บนลาดดินจมใต้น้ำ} \quad \text{F.S.} = \frac{\bar{c}}{\gamma_b h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad \text{----- (7)}$$

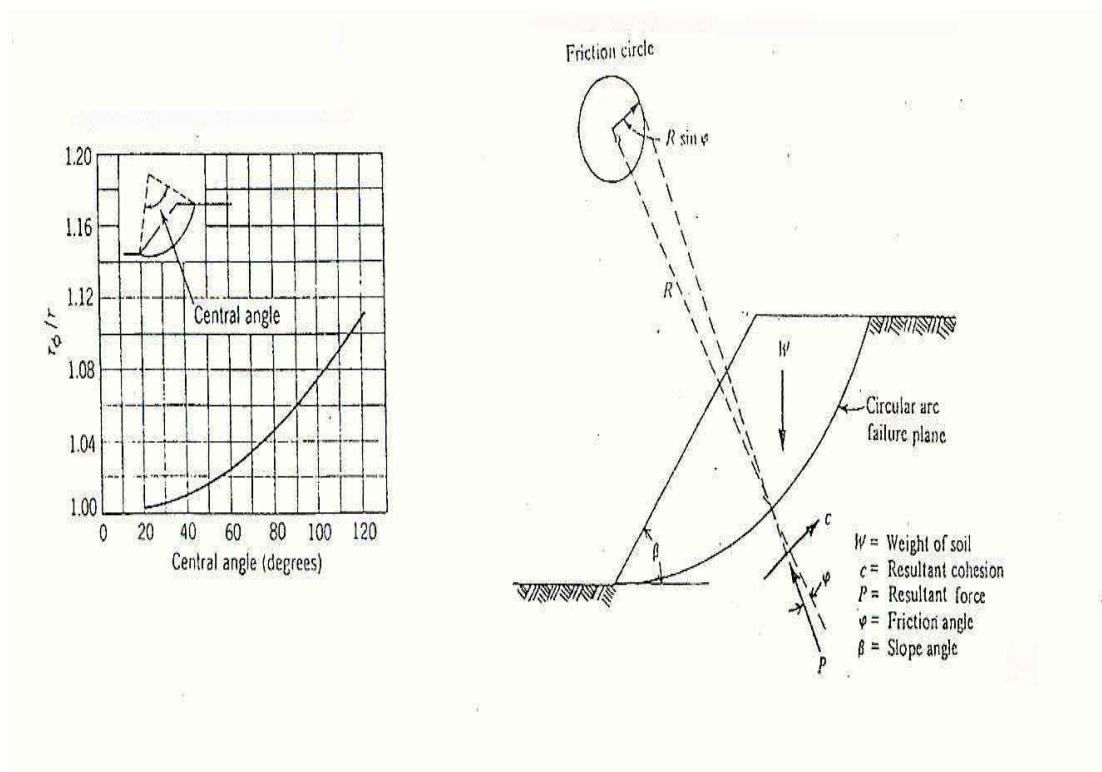
บนลาดดินที่มีน้ำไหลขนานกับผิวลาด

$$\text{F.S.} = \frac{\bar{c}}{\gamma_b h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma_b \tan \bar{\phi}}{\gamma_{\text{sat}} \tan \beta} \quad \text{----- (8)}$$

3.1.2 Taylor Method

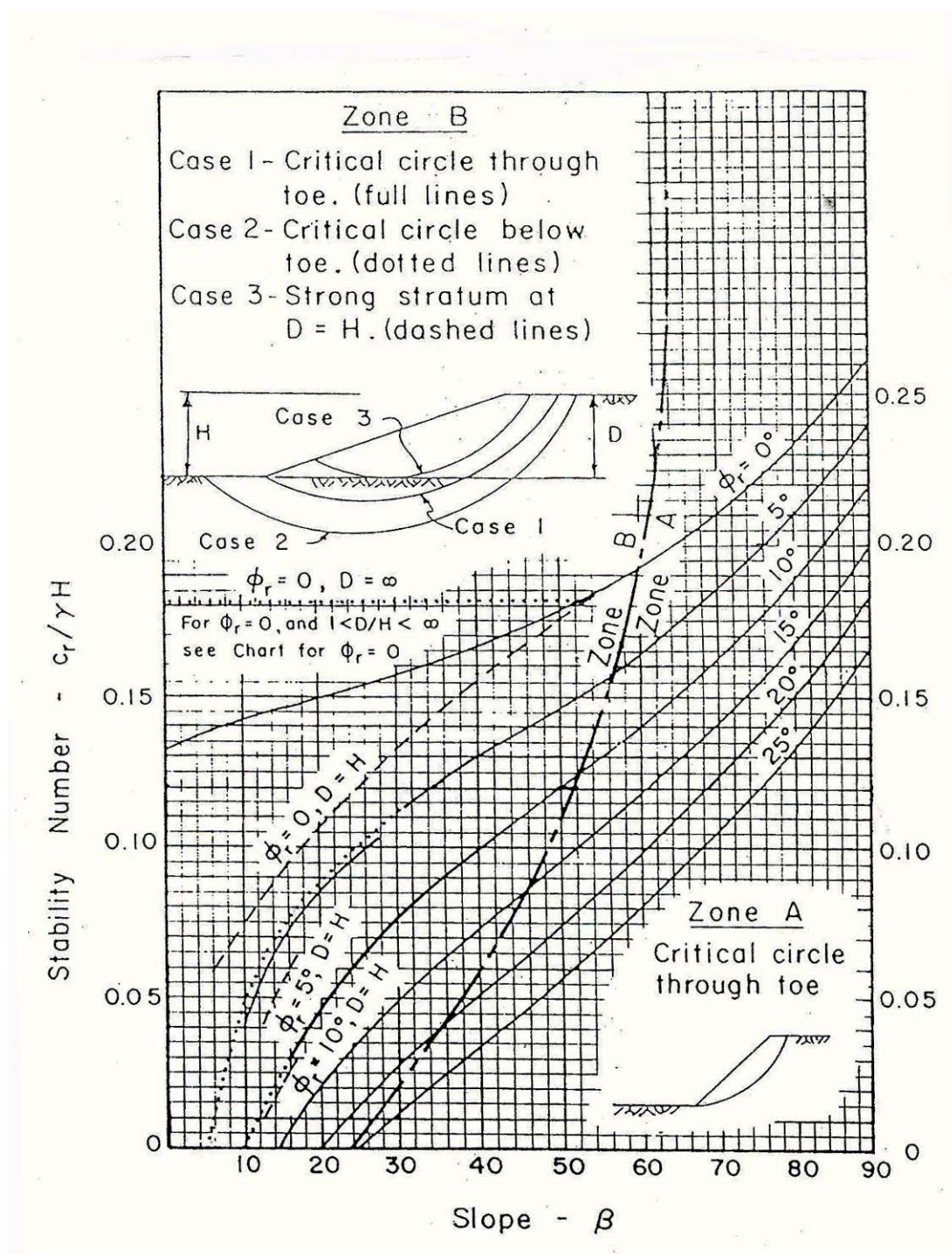
วิธีนี้ใช้ในกรณีของผิวเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเสนอโดย Prof. Taylor (1943) โดย ณ.จุดใดๆแรงลัพธ์ระหว่างแรงตั้งฉากผิวเคลื่อนและแรงฝืด (P) จะกระทำมุม ϕ กับแนวตั้งฉาก ดังนั้นจึงสัมผัสวงกลมเล็กๆ ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่ตัดผิวเคลื่อน ซึ่งเรียกว่า "Friction circle" การวิเคราะห์โดยวิธีนี้เป็นการเขียนแนวแรงที่เกิดขึ้น (Force polygon) แต่มีข้อจำกัดที่จะใช้ได้เฉพาะลาดดินที่มีเนื้อดินชนิดเดียวและหน้าตัดไม่ยุ่งยาก (Homogeneous simple slope)

Taylor ได้สร้างเป็น Stability Chart ไว้เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 6 สำหรับกรณีทั่วไป และภาพที่ 7 สำหรับดินเหนียวที่ความลึกของผิวเคลื่อนพังอยู่ลึกกว่าระดับดินของลาด (Toe)



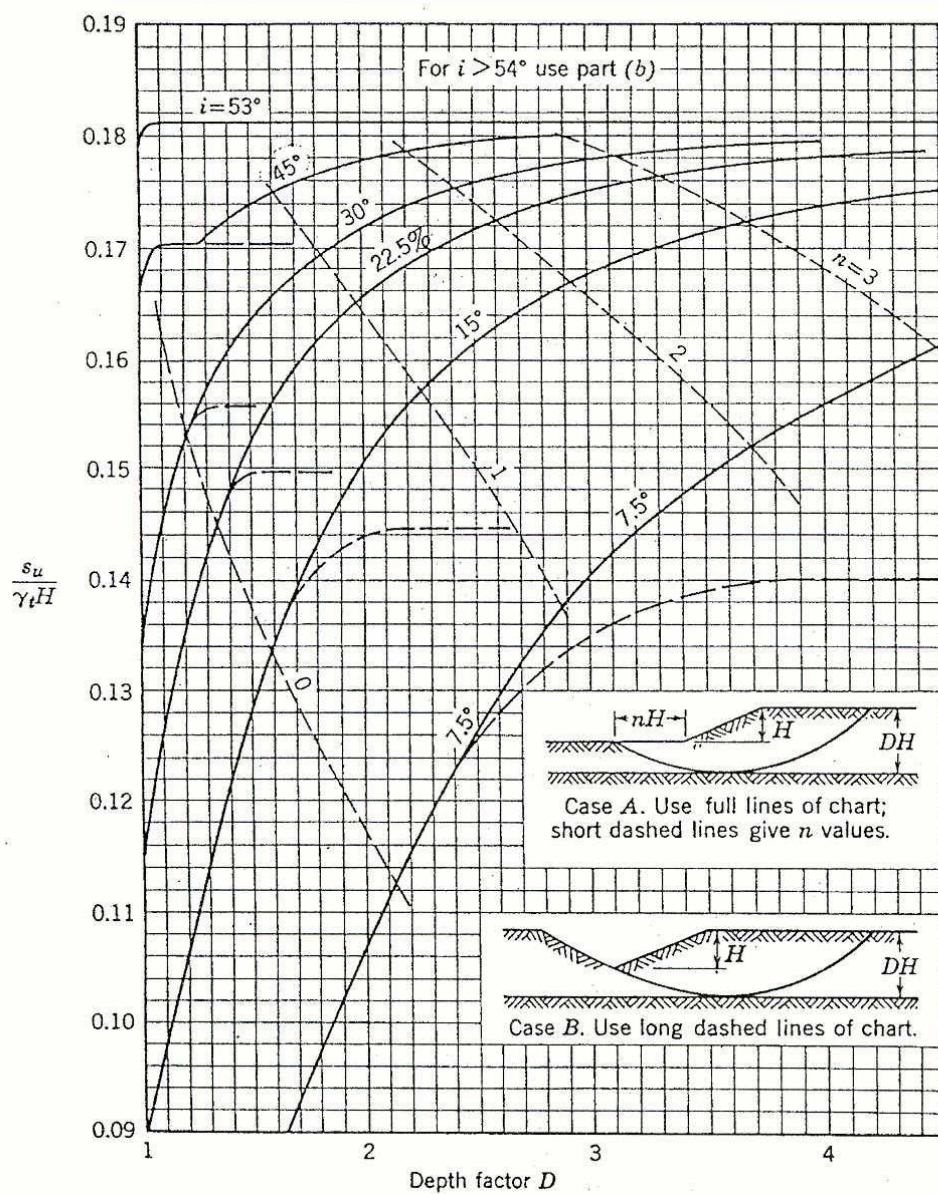
ภาพที่ 5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Taylor

ที่มา: Taylor (1943)



ภาพที่ 6 Stability chart สำหรับการวิเคราะห์ลาดดินเนื้อเดียวด้วยวิธีของ Taylor

ที่มา: Taylor (1943)



ภาพที่ 7 Stability chart สำหรับดินกรณี $\phi = 0$ ด้วยวิธีของ Taylor

ที่มา: Taylor (1943)

3.1.3 วิธีโมเมนต์

กรณีที่ผิวเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลมในชั้นดินเหนียวที่มีการก่อสร้างโดยรวดเร็ว (Untrained Strength Analysis ,Su) วิธีนี้สามารถคำนวณได้ง่ายแต่จะค่า F.S. ที่น้อยกว่าวิธีมาตรฐานอื่นๆ โดยการพิจารณาสมมูลย์ของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของวงกลมที่แสดงในภาพที่ 8

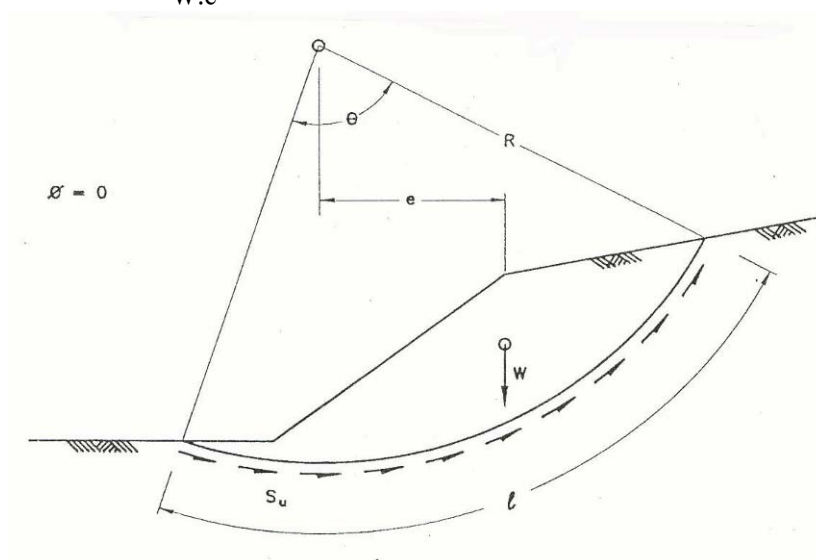
$$F.S. = \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Driving Moment}} = \frac{M_R}{M_D} \quad \text{----- (9)}$$

$$\text{เมื่อ } M_R = Su \cdot l \cdot R \quad \text{----- (10)}$$

$$M_D = W \cdot e \quad \text{----- (11)}$$

$$l = \frac{\theta}{360} (2 \pi R) \quad \text{----- (12)}$$

$$\text{ดังนั้น } F.S. = \frac{Su \cdot l \cdot R}{W \cdot e} \quad \text{----- (13)}$$



ภาพที่ 8 การวิเคราะห์ความมั่นคงด้วยวิธีโมเมนต์

ที่มา: Taylor (1943)

สำหรับกรณีที่ดินมีหลายชั้น การคำนวณน้ำหนักดิน (W) และ แรงต้านที่ผิวเคลื่อน (Su_i) จะต้องแบ่งย่อยออกเป็นส่วนตัวเล็กตามผิวเคลื่อนที่ตัดผ่านชั้นดินต่างๆ ให้สอดคล้องกัน

3.1.4 วิธี Ordinary Method of Slices (Fellenius Method)

วิธีวิเคราะห์ดั้งเดิมที่ใช้มากกว่า 50 ปี มีความถูกต้องพอสมควร และการคำนวณไม่ยุ่งยาก และใช้ได้กับลักษณะผิวเคลื่อนได้หลายลักษณะ ทำได้โดยการแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพัง (Sliding mass) ออกเป็นชั้นๆ ตามแนวดิ่ง จากผิวดินจนถึงผิวเคลื่อนด้านล่าง โดยการนำเอาแรงที่กระทำต่อดินในแต่ละชั้นซึ่งอยู่ในสภาพสมดุลมาพิจารณา จากการเขียน free body diagram และ force polygon ของมวลดินดังแสดงในภาพที่ 9 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{Normal force; } \bar{N}_i = W_i \cdot \cos \theta_i - U_i \quad \text{----- (14)}$$

$$\text{Sliding force; } T_i = W_i \cdot \sin \theta_i \quad \text{----- (15)}$$

$$\text{Resisting force; } R_i = \bar{c} \cdot \Delta l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - U_i) \cdot \tan \bar{\phi} \quad \text{----- (16)}$$

ดังนั้นอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ของแต่ละชั้นของมวลดิน(ชั้นที่ i ใดๆ)จะเท่ากับ

$$F.S._i = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Sliding force}} = \frac{\bar{c} \cdot \Delta l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - U_i) \tan \bar{\phi}}{W_i \cdot \sin \theta_i} \quad \text{----- (17)}$$

เมื่อรวมแรงต้านทานการพังและแรงจุดของทุกๆชั้น ของมวลดินที่จะเกิดการเคลื่อนพัง จะได้ อัตราส่วนปลอดภัยรวมเป็น

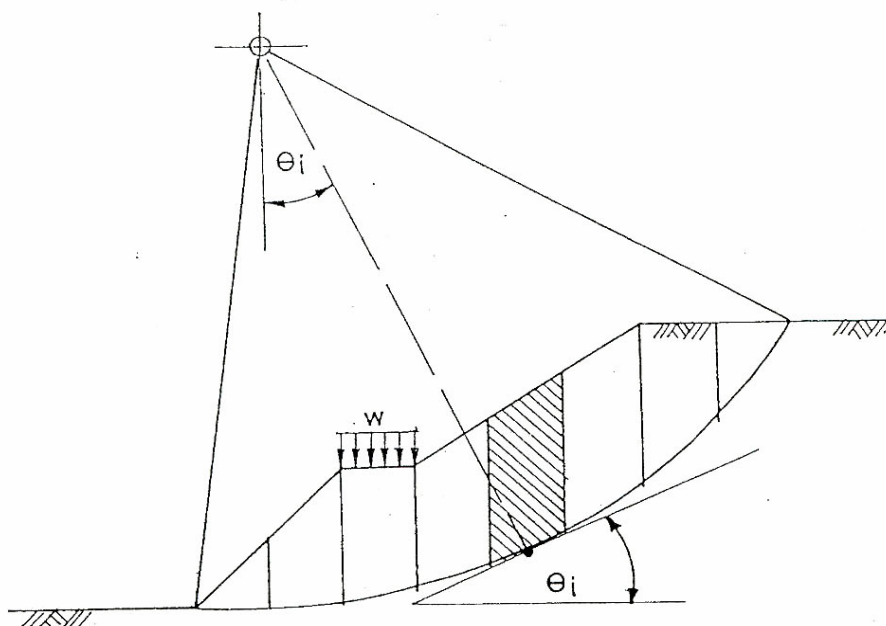
$$F.S = \frac{\sum_{i=1}^n [\bar{c} \cdot \Delta l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - U_i) \cdot \tan \bar{\phi}]}{\sum_{i=1}^n [W_i \cdot \sin \theta_i]} \quad \text{----- (18)}$$

จากสมการที่ (18) เมื่อมีแรงด้านข้างที่เพิ่มขึ้นจากแผ่นดินไหวมาเพิ่มขึ้นจะทำให้ F.S. ลดลง โดยพิจารณาสมมูลของแรงจากภาพที่ 10 ซึ่งมีแรง W_{ei} จากแผ่นดินไหวซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับ น้ำหนักของดินในชั้นของมวลดิน คือเท่ากับ $K_s \cdot W_i$ จะทำให้ได้สมการของ F.S. ของลาดดิน เปลี่ยนเป็น

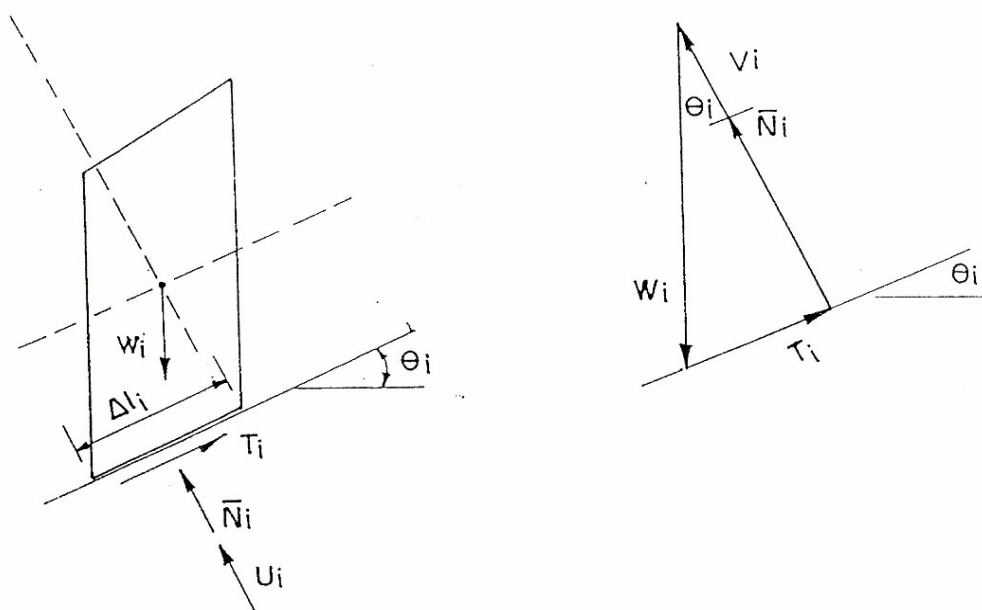
$$F.S = \frac{\sum_{i=1}^n [\bar{c} \cdot \Delta l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - K_s \cdot W_i \cdot \sin \theta_i - U_i) \cdot \tan \bar{\phi}]}{\sum_{i=1}^n [W_i \cdot \sin \theta_i + K_s \cdot W_i \cdot \cos \theta_i]} \quad \text{----- (19)}$$

เมื่อเทอมต่างๆ ในสมการที่ (18) และ (19) คือ

- $\bar{c}, \bar{\phi}$ = effective soil strength parameters
- Δl_i = ความยาวของส่วนโค้งบนผิวเคลื่อนพังของแต่ละชั้นดิน
- W_i = น้ำหนักดินทั้งหมดของแต่ละชั้นดิน
- θ_i = มุมเอียงของเส้นสัมผัสเคลื่อนพัง ณ. แนว centroid ของชั้นดิน
- U_i = แรงยกตัวของความดันน้ำบนผิวเคลื่อนพังของแต่ละชั้นดิน
- K_s = สัมประสิทธิ์ของความสั่นสะเทือน พิจารณาจาก Seismic Zone Map



ก. รูปตัดการเคลื่อนพังของลาดดินและการตัดแบ่งมวลดิน



ข. แรงที่เกี่ยวข้องในมวลดิน และรูปหลายเหลี่ยมของแรง

ภาพที่ 9 การวิเคราะห์ความมั่นคงโดยวิธี Ordinary Method of Slices

ที่มา: (Fellenius)

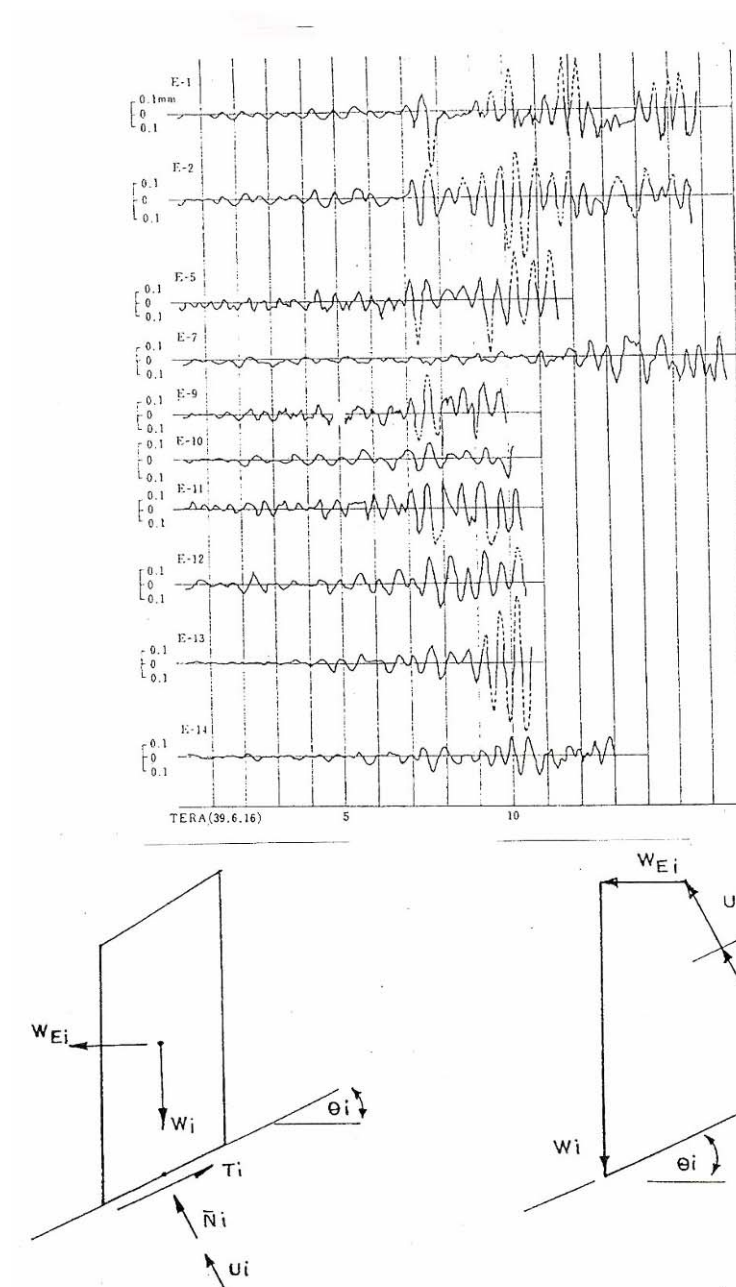
การคำนวณโดยวิธีนี้ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกรณีลักษณะหน่วยแรงแบบ " Su-analysis ", " Total stress analysis " หรือ " Effective stress analysis " โดยการปรับเปลี่ยนค่า soil strength parameters (c, ϕ) และ ความดันน้ำ (u) ให้เหมาะสมกับสภาพต่างๆ และสำหรับกรณีที่มีแรงภายนอก หรือ น้ำหนักที่ผิวดินมาเพิ่ม ก็สามารถเปลี่ยนแรงเหล่านั้นให้เป็นมวลดินที่มีน้ำหนักเทียบเท่าแรงนั้นๆได้ แล้วรวมเข้ากับน้ำหนักดินเดิม

ในบางกรณีดินเหนียวหรือทรายบดอัดแน่นอาจเกิดรอยแตกที่ผิวดินเนื่องจากการแห้ง (Desiccation crack) หรือการเคลื่อนตัวเล็กน้อยทำให้เกิดแรงดึงบริเวณผิวดินของลาด Tension crack) ซึ่งจะทำให้เกิดความมั่นคงของลาดดินลดลงไปด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

1 ดินบริเวณที่เกิดรอยแตกไม่มีการสัมผัส จึงไม่สามารถมีแรงต้านทานการเคลื่อนพังได้ ผิวดินจึงมักเริ่มต้นที่ก้นของรอยแตกใดๆก็ได้

2 หากมีฝนตกแล้วน้ำฝนก็จะไหลลงระหว่างรอยแตก ทำให้เกิดแรงดันน้ำเสริมทำให้เกิดการเคลื่อนพังง่ายขึ้นอีกด้วย

ความลึกของรอยแตกไม่สามารถบอกได้แน่นอน เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของดิน ความชื้นในอากาศ และการเคลื่อนตัวก่อนการพัง เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติที่พบในสนามจะอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 เมตร

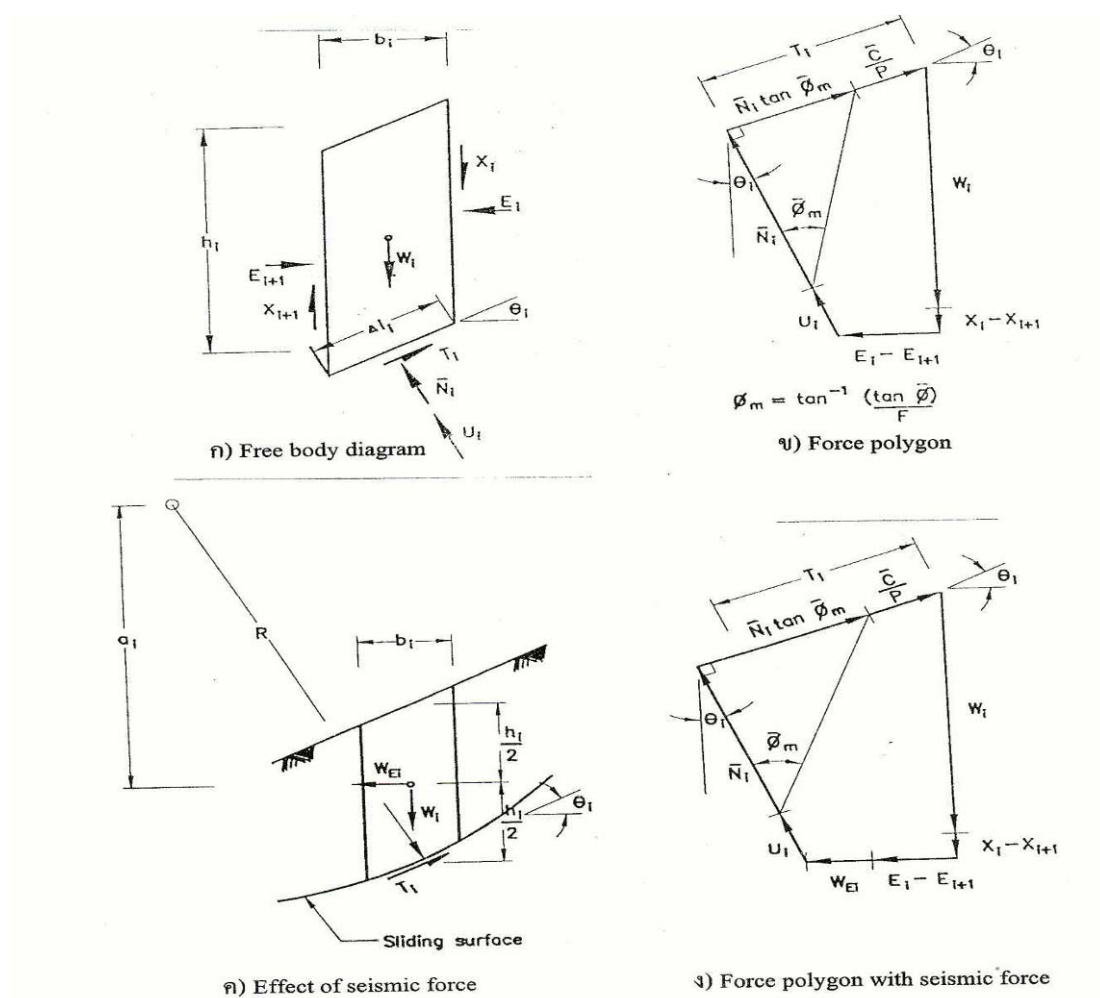


ภาพที่ 10 แรงที่เกี่ยวข้องและรูปหลายเหลี่ยมของแรงกรณีที่มีแรงจากแผ่นดินไหวร่วมด้วย

ที่มา: (Fellenius Method)

3.1.5 วิธี Simplified Bishop

ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธี Simplified Bishop ในการวิเคราะห์ความมั่นคง โดยมี การแบ่งมวลดินออกเป็นชั้น หรือแท่งเช่นเดียวกับ Slices Method แต่ได้พิจารณาแรงและสมมูลของ แรงละเอียดขึ้น คือ คิดสมมูลของ Moment ของแท่งดินแต่ละแท่งด้วยแทนที่จะคิดเฉพาะแรงของ มวลดินทั้งหมดแต่เพียงอย่างเดียว แล้วยังนำเอาแรงที่กระทำด้านข้างของแท่งดินมาพิจารณาด้วย ซึ่ง เป็นวิธีที่เสนอโดย Prof. Bishop (1955) ซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณได้น่าเชื่อถือและ ถูกต้องมากขึ้น วิธีนี้ภายหลังมีการปรับให้ง่ายขึ้นโดย Janbu (1956)



ภาพที่ 11 หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Simplified Bishop Method

ที่มา: Bishop (1955)

จากภาพที่ 11 แสดงถึงแรงที่กระทำบนแท่งดินที่ตัดแบ่งแท่งหนึ่ง โดยแรงกระทำด้านข้างของแท่งดินประกอบด้วย

แรงดันในแนวราบ	$E_i - E_{i+1}$	=	ΔE
แรงเฉือนในแนวดิ่ง	$X_i - X_{i+1}$	=	ΔX
น้ำหนักรวมของแท่งดิน		=	W_i
แรงดันน้ำที่ตั้งฉากกับผิวเคลื่อน		=	U_i
แรงประสิทธิผลที่กระทำตั้งฉากกับผิวเคลื่อน		=	$\bar{N}_i$
แรงต้านทานการเคลื่อนที่ฐานของแท่งดินเพียงพอที่จะให้เกิดการสมดุล		=	T_i
ความเหนียว และมุมเสียดทานภายในของมวลดินที่ผิวเคลื่อน		=	$\bar{c}_i$ และ ϕ_i
มุมเอียงของเส้นสัมผัสผิวเคลื่อน ณ. จุดที่น้ำหนักดินตัดผ่าน		=	θ_i
อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety)		=	F

ดังนั้น

$$T_i = \frac{\bar{c}_i \cdot \Delta \cdot \ell_i}{F} + \frac{\bar{N}_i \cdot \tan \phi_i}{F} \quad \text{----- (20)}$$

จาก Force Polygon ในภาพที่ 11 เมื่อแท่งดินอยู่ในสมดุล แรงรวมในแนวดิ่งจะต้องเท่ากับศูนย์ ($\sum F_v = 0$)

$$\sum F_v = (\bar{N}_i + U_i) \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i - W_i - (X_i - X_{i+1}) = 0 \quad \text{----- (21)}$$

สำหรับวิธี Simplified Bishop Method จะถือว่าผลรวมของแรงเฉือนในแนวดิ่งด้านข้างของแท่งดิน $\Delta X = (X_i - X_{i+1}) = 0$ ดังนั้นสมการที่ (21) จะเขียนในเทอมของ T_i ได้ดังนี้

$$T_i = \frac{W_i - (\bar{N}_i + U_i) \cos \theta_i}{\sin \theta_i} \quad \text{----- (22)}$$

เมื่อนำด้านขวาของสมการที่(21) มาเท่ากับด้านขวาของสมการที่ (22) และแทนค่า $W_i = \gamma \cdot b_i \cdot h_i$

และ $U_i = \frac{\gamma_w b_i h_{wi}}{\cos \theta_i}$ ลงไปจะได้

$$\bar{N}_i = \frac{b_i (\gamma \cdot h_i - \gamma_w h_{wi}) - (\bar{c}_i h_i \tan \theta_i) / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \cdot \tan \phi_i / F} \quad \text{----- (23)}$$

เมื่อพิจารณาสมดุลของโมเมนต์ รอบจุดศูนย์กลางของ Sliding circle ($\sum M = 0$) ของแท่งดินทั้งหมดในมวลดินที่เคลื่อนพังจะได้

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot R \cdot \sin \theta_i = \sum_{i=1}^n T_i \cdot R \quad \text{----- (24)}$$

เมื่อ T_i เท่ากับสมการที่ (22) ดังนั้น

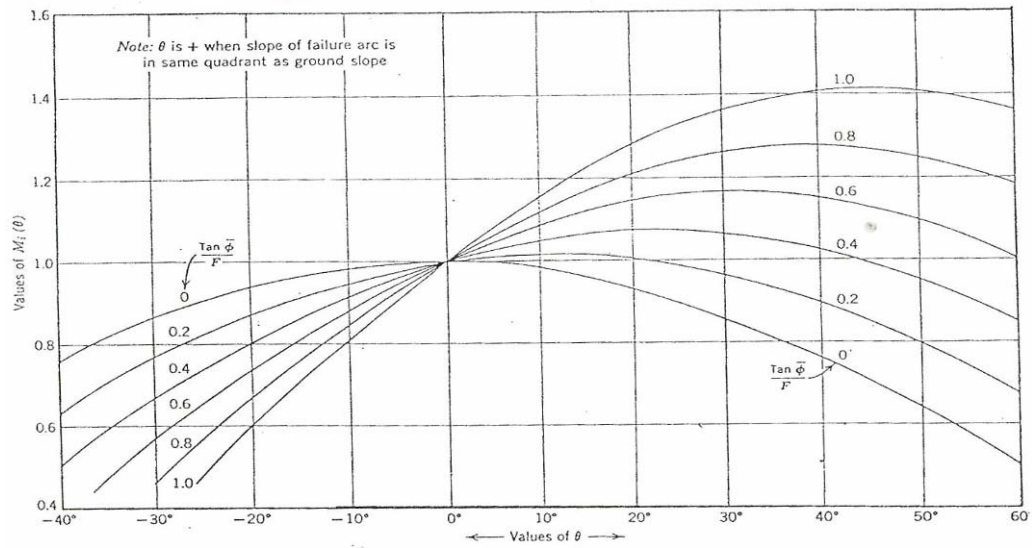
$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [\bar{c}_i \cdot \Delta l_i + \bar{N}_i \tan \phi_i]}{\sum_{i=1}^n [W_i \sin \theta_i]} \quad \text{----- (25)}$$

และแทนค่า $\bar{N}_i$ จากสมการที่ (23) ลงใน (24) จะได้

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{c}_i b_i + b_i (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \cdot \tan \phi_i}{M_\theta}}{\sum_{i=1}^n \gamma b_i \cdot h_i \cdot \sin \theta_i} \quad \text{----- (26)}$$

เมื่อ M_θ เป็นเทอมย่อ ของ $M_\theta = \cos \theta_i + (\sin \theta_i \cdot \tan \phi) / F$

ในสมการที่ (26) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยปรากฏขึ้นทั้งสองข้างของสมการ จึงต้องแก้สมการโดยวิธี Iterative โดยการสมมุติค่า F แล้วแทนค่าซ้ำจนได้ค่า F ที่ไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการคำนวณด้วยมือ ค่า M_θ อ่านค่าได้สะดวกจากกราฟที่แสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ค่าของ M_θ จากสมการที่ (26)

ที่มา: (Janbu 1956)

สำหรับในกรณีที่มีแรงจากแผ่นดินไหวเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นแรงในแนวราบที่เป็น สัมพันธ์กับน้ำหนักดิน กระทำที่จุดศูนย์กลาง (Centroid) ของมวลดิน แล้วทำให้รูปหลายเหลี่ยมของ แรงเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในภาพที่ 11 ค) และ 11 ง) โดยวิธีการของ Simplified Bishop Method แรงด้านข้าง W_{Ei} จะไม่ส่งผลทำให้ Normal force เปลี่ยนแปลง (Untrained Condition) แต่จะมีผล ทำให้ Sliding Moment เพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$\Delta M = W_{Ei} \cdot a_i = K_S \gamma b_i h_i a_i \quad \text{----- (27)}$$

ดังนั้นสมการที่ (27) จึงเปลี่ยนแปลงไปเป็น

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\bar{c}_i b_i + b_i (\gamma \cdot h_i - \gamma_w h_{wi}) \cdot \tan \phi_i}{M_\theta} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\gamma \cdot h_i b_i \sin \theta_i + \frac{K_S}{R} \cdot \gamma h_i b_i a_i \right]} \quad \text{----- (28)}$$

เมื่อ	K_s	=	สัมประสิทธิ์ของแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว
	R	=	รัศมีของ Sliding Circle
	a_i	=	moment arm หรือระยะในแนวดิ่งจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์ถ่วงแท่งดิน

3.1.6 Wedge Method

ในบางกรณีผิวการเคลื่อนพังอาจเกิดในลักษณะของเส้นตรงเส้นเดียวหรือหลายเส้นประกอบกัน โดยมีมวลดินที่เคลื่อนตัว มีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมประกอบกัน มากกว่าหนึ่งชิ้นขึ้นไป เช่นกรณีที่มีชั้นของดินอ่อนบังคับแนวเคลื่อนพัง ดังแสดงในภาพที่ 13ก. สำหรับเงื่อนไขที่มีแกนดินเหนียวเอียงไปทางด้านเหนือหน้า หรือ 13 ข. ลาดดินหรือลาดหินธรรมชาติที่มีแนวชั้นดินอ่อนหรือรอยแตกของชั้นหินลาดลง หรือ 13 ค. ชั้นดินที่วางตัวอยู่บนชั้นดินหรือหินแข็งข้างใต้

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ ให้เขียนเส้นตรงผ่านแนวที่คาดว่าจะเกิดผิวเคลื่อนขึ้น แล้วแบ่งมวลดินเหนือผิวเคลื่อนนั้นออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมูตรงจุดที่เหมาะสม ดังเช่นในภาพที่ 14 ก. แล้วแยกชิ้นส่วนของมวลดินออกมาเขียน แรงกระทำต่อมวลดินแต่ละส่วน ดังภาพที่ 14 ข. จะเห็นได้ว่ากรณีนี้ เมื่ออยู่ในสมดุลจะเป็นกรณีของ Statically Indeterminate คือ

มีสิ่งซึ่งไม่ทราบค่า 5 จำนวน คือ แรง 3 แรง; $P, \bar{N}_1, \bar{N}_2$

มุม 1 มุม ; α

และอัตราส่วนปกติค้ำ 1 ค่า ; F

จำนวนสมการได้จาก Equilibrium 4 สมการ ของมวลดิน 2 ส่วน คือ

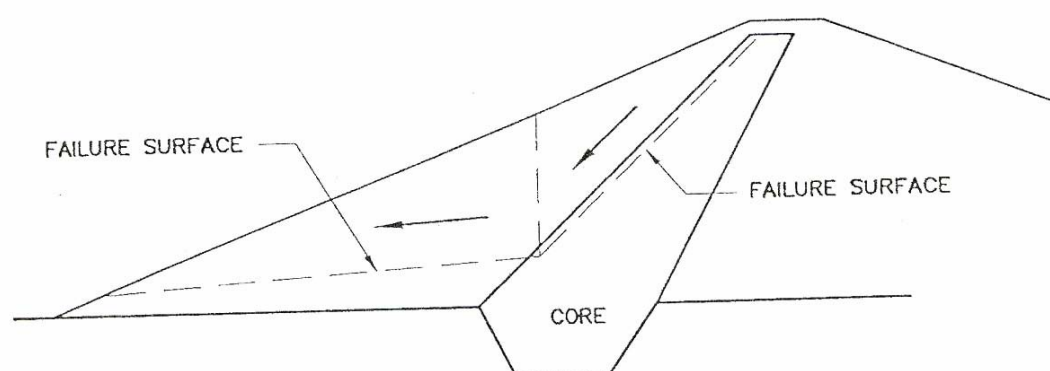
$$\sum F_v = 0 \quad ; \quad 2 \text{ สมการ}$$

$$\sum F_H = 0 \quad ; \quad 2 \text{ สมการ}$$

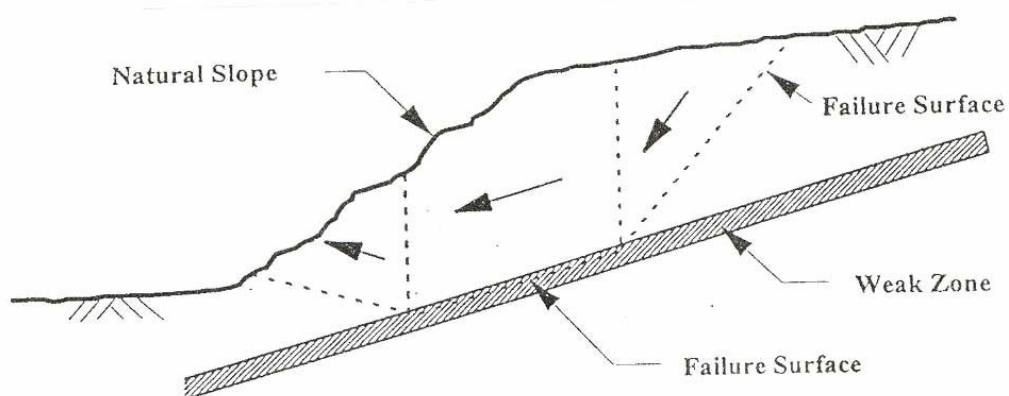
ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตั้งสมมุติฐานของมุมที่แรง P ส่งผ่าน (α) ให้ทราบค่าจึงสามารถคำนวณหาอัตราส่วนปกติค้ำของทั้งสองชิ้นส่วนได้ โดยมุม α สามารถให้ค่าเท่ากับ

$$1. \quad \alpha = \bar{\phi}_m = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \bar{\phi}}{F} \right) \quad \text{คือมุมเสียดทานที่เกิดขึ้น (mobilized friction angle)}$$

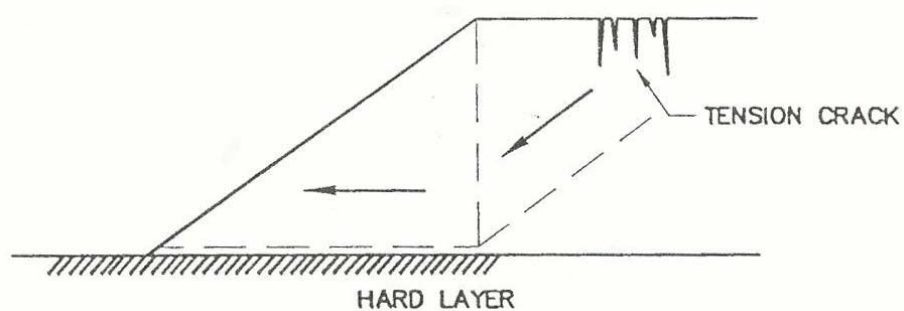
$$2. \quad \alpha = \text{มุมลาดของผิวลาดเขื่อน}$$



ก. เชื้อแกนดินเหนียวเอียง (Inclinometer Core)



ข. ลาดดินหรือหินธรรมชาติที่มีแนวดินอ่อนบังคับกับแนวพิคัด



ค. ลาดดินที่มีชั้นดินหรือหินแข็งบังคับด้านล่าง

ภาพที่ 13 การพิบัติที่มวลดินเป็นรูปลิ้ม

ที่มา: (Wedge Shape)

3.1.7 เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัย

การแบ่งพื้นที่เสี่ยงภัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ 1) แบ่งโดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS.) ดังตารางที่ 3 2) แบ่งโดยจำนวนรอยถล่มดังตารางที่ 4 3) แบ่งโดยปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 2 เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่ม (Quantitative Hazard Rating of Landslides)

Stability Criterion	Hazard rating
$F > 1.5$	Stable slope
$1.25 > F < 1.5$	Low Hazard
$1.00 > F < 1.25$	Medium Hazard
$0 > F < 1.00$	High Hazard

ที่มา: Miles et al. (1999)

ตารางที่ 3 เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มจำแนกตามรอยถล่ม

ระดับความรุนแรง	ลักษณะทั่วไป	พื้นที่ที่เกิด (ตร.กม.)	จำนวนเสียชีวิต (คน)	พื้นที่ปกครอง
1-L	-ความรุนแรง ระดับน้อยมาก -มีรอยถล่มน้อยกว่า 5 แห่ง	-น้อยกว่า 5	-	- 1 อำเภอ
1	-ความรุนแรง ระดับน้อย -มีรอยถล่มน้อยกว่า 5-50 แห่ง	- อยู่ในช่วง 5-30	อยู่ในช่วง 1-5	- 1 อำเภอ
2	-ความรุนแรง ระดับปานกลาง -มีรอยถล่มน้อยกว่า 5-50 แห่ง	- อยู่ในช่วง 30-100	อยู่ในช่วง 5-35	มากกว่า 1 อำเภอ
3	-ความรุนแรง ระดับมาก -มีรอยถล่มน้อยกว่า 5-50 แห่ง	- อยู่ในช่วง มากกว่า 100	อยู่ในช่วงมากกว่า 35	มากกว่า 1 จังหวัด

ที่มา: บุญชัย เชิญประดับ และ วรากรไม้เรียง (2545)

ตารางที่ 4 เกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินถล่มจำแนกตามปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่

ระดับความ รุนแรง	ลักษณะทั่วไป	พื้นที่ที่เกิด (ตร.กม.)	จำนวนเสียชีวิต (คน)	พื้นที่ปกครอง
พื้นที่ที่มีโอกาส เกิดแผ่นดินถล่ม 1	-ดินมีโอกาสดล่ม เมื่อมีปริมาณน้ำฝน 100 mm/ day	-	-	-
	-หน้าดินขาดรากไม้ ยึดเหนี่ยวความลาด เอียงน้อยกว่า 30 องศา			
	-ดินมีโอกาสดล่ม เมื่อมีปริมาณน้ำฝน 200 mm/ day	-	-	-
พื้นที่ที่มีโอกาส เกิดแผ่นดินถล่ม 2	-หน้าดินขาดรากไม้ ยึดเหนี่ยวความลาด เอียงน้อยกว่า 30 องศา			
	-ดินมีโอกาสดล่ม เมื่อมีปริมาณน้ำฝน 300 mm/ day	-	-	-
	-หน้าดินขาดรากไม้ ยึดเหนี่ยวความลาด เอียงน้อยกว่า 30 องศา			

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี

3.2 ความแข็งแรงของดินและหินที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคง

การเลือกใช้คุณสมบัติความแข็งแรงของชั้นดิน และหิน ในการวิเคราะห์ความมั่นคงเป็นสิ่งสับสน และมักก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์อยู่เสมอ เนื่องจากวัสดุทางธรณี (ดินและหิน) มีหลักการระบุความแข็งแรงและลักษณะการวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ วิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และ วิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงประสิทธิภาพ (Effective Stress Analysis) ทั้งนี้เนื่องจากดินหรือหินมักจะมีน้ำหรือความชื้นหรือน้ำอยู่ภายในมวลดิน ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงขึ้นในมวลดินก็อาจจะทำให้การเพิ่มหรือลดแรงดันน้ำในมวลดินเกิดขึ้นได้ ซึ่งมีผลต่อกำลังของมวลดินตามสมการของ Mohr - Coulomb ด้วย

$$\bar{\tau} = \bar{c} + (\sigma - u)\tan \bar{\phi} \quad \text{----- (29)}$$

เมื่อ $\bar{\tau}$ = ความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงเฉือนของดินประสิทธิภาพ

$\bar{c}$ = ความเหนียว หรือแรงยึดเกาะของมวลดินประสิทธิภาพ

σ = หน่วยแรงรวมที่กระทำตั้งฉากกับผิวเคลื่อน

u = ความดันน้ำ ณ จุดที่กำลังพิจารณา

$\bar{\phi}$ = มุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำความเข้าใจระหว่างหลักการของหน่วยแรงประสิทธิภาพ และหน่วยแรงรวมเสียก่อน ทางปฐพีกลศาสตร์ ถ้าการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในมวลดินเกิดขึ้นแล้วมีแรงดันน้ำ (pore pressure, u) เกิดขึ้นในมวลดินด้วยและถ้าสามารถวัดค่าหรือคาดการณ์ค่าของความดันน้ำได้แน่นอน เรามักจะแยกหน่วยแรงที่เกิดจากความดันน้ำออกไปเสียก่อน คงเหลือหน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินหรือเนื้อดินเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิภาพ (effective stress, $\bar{\sigma}$) ทั้งนี้เพราะแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังแต่อย่างใดเพราะแรงยึดเหนี่ยวมุมเสียดทานของน้ำเป็นศูนย์ ดังนั้น จึงมีเฉพาะหน่วยแรงประสิทธิภาพเท่านั้นที่ทำให้เกิดกำลังหรือหน่วยแรงต้านทานได้ แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าความดันน้ำ (u) ให้ถูกต้อง ดังนั้นในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำได้ชัดเจน เช่น การบรรจุทุกน้ำหนักโดยเร็ว มวลดินไม่อิ่มตัว ความดันน้ำเกิดจากการบดอัดเป็นต้น เรามักจะผนวกความดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินเลย ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (total stress, σ) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบให้มวลดินมีสภาพความชื้น อัตราการบรรจุทุกน้ำหนัก และสภาพอื่นๆ ให้เหมือนกับที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างจริง และคาดว่าความดันน้ำก็ควรจะเกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบใกล้เคียงกับสภาพ

ที่จะเกิดขึ้นจริงในสนามซึ่งจะไปลดหน่วยแรงประสิทธิภาพไปโดยอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่อย่างใด

3.2.1 สภาวะต่างๆ ของความแข็งแรงของดิน

การเลือกใช้ค่าความแข็งแรงของดินในการวิเคราะห์ความมั่นคง จึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องทราบปัจจัย ดังต่อไปนี้คือ ช่วงเวลาการบรรทุกน้ำหนัก หรือเกิดการเพิ่มหน่วยแรงในมวลดิน ความอิ่มตัว และสภาพความดันน้ำ

สำหรับดินเหนียวอิ่มตัว (อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน) และสภาพการบรรทุกน้ำหนักเกิดขึ้นรวดเร็วเมื่อเทียบกับการระบายออกของน้ำจากมวลดิน เราอาจถือว่าแรงภายนอกทำให้เกิดความดันน้ำทั้งหมด และให้ถือว่ามุมเสียดทานภายในเป็นศูนย์ได้ ซึ่งเรียกว่า " $\phi = 0$ condition" และเป็นกรณีพิเศษที่ความแข็งแรงของมวลดิน $= S_u$ หรือ "Untrained Shear Strength"

การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลดินในลักษณะนี้จะเรียกว่า " S_u -Analysis" ดังนั้นค่าความแข็งแรงของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคงจะแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. " S_u " หรือ untrained shear strength สำหรับกรณีดินเหนียวอิ่มตัวและมี การก่อสร้างโดยเร็ว ($\phi = 0$)
2. " c_u, ϕ_u " หรือ total strength สำหรับดินชั้นไม่อิ่มตัว และไม่ทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ดินบดอัดในขณะก่อสร้างเขื่อน หรือคันดิน
3. " $\bar{c}, \bar{\phi}$ " หรือ effective strength สำหรับดินอิ่มตัว และสามารถทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ก่อสร้างเสร็จนานแล้วกำลังใช้งาน และมีความดันน้ำเข้าสู่สภาพสมดุล หรือมีน้ำไหลผ่านคงที่

ตารางที่ 5 เป็นคำแนะนำในการเลือกใช้ความแข็งแรงของมวลดินในสภาพต่างๆ ให้เหมาะสมสอดคล้องกับสถานะของการก่อสร้าง และใช้งานของเขื่อนและคันดิน

ตารางที่ 5 การเลือกใช้ความแข็งแรงของดินในการวิเคราะห์ความมั่นคง ในสถานะการก่อสร้างและใช้งานต่างๆ

สภาพการก่อสร้าง	วิธีที่ควรเลือกใช้	ข้อแนะนำ
1. ขณะสิ้นสุดงานก่อสร้างบน ชั้นดินเหนียวอิ่มตัวระยะเวลา ก่อสร้างสั้นเทียบกับอัตรา การอัดตัวคายน้ำ	- ใช้ S_u -analysis โดยให้ $\phi = 0$ และ $c = S_u$	- ใช้ $\bar{c}, \bar{\phi}$ -analysis ในการ ตรวจสอบระหว่างการก่อสร้างเมื่อทราบค่าความดัน น้ำ จริงในสนาม
2. ความมั่นคงในระยะยาว เมื่อ มีการไหลของน้ำผ่านคงที่ หรือระดับน้ำได้ดินปกติ	- ใช้ $\bar{c}, \bar{\phi}$ -analysis โดยใช้ ความดันน้ำจาก Flownet หรือ F.E.M.	
3. ขณะสิ้นสุดงานก่อสร้าง ของคันดินเป็นดินไม่อิ่มตัว (บดอัด) โดยระยะเวลา ก่อสร้างสั้น เทียบกับอัตรา การระบายน้ำ	- ใช้ C_u, ϕ_u -analysis จาก UU Test หรือ $\bar{c}, \bar{\phi}$ โดยการ ประมาณค่าความดันน้ำที่เกิด ขึ้น	- ใช้ $\bar{c}, \bar{\phi}$ - analysis ในการ ตรวจสอบระหว่างการ ก่อสร้าง เมื่อทราบค่าความดัน น้ำจริงในสนาม
4. ความมั่นคงในระยะกลาง (Intermediate time)	- ใช้ $\bar{c}, \bar{\phi}$ - analysis โดยการ ประมาณค่าความดันน้ำ	- ต้องมีการตรวจสอบความดัน น้ำจริงในสนาม
4. ลาดดินธรรมชาติที่มี หลักฐานการเคลื่อนตัวใน อดีต	- ใช้ $\bar{c}_r, \bar{\phi}_r$ จากการทดสอบ Residual strength	- ต้องมีการวินิจฉัยการเคลื่อน ตัวในอดีตและตรวจสอบ ความดันน้ำในสนาม

ในหลักการแล้วไม่ว่าการทดสอบความแข็งแรงในมวลดินจะทำโดยวิธีใดก็ตาม ผู้ออกแบบหรือผู้ที่นำผลไปใช้งานจะต้องให้แน่ใจเสมอว่าการทดสอบนั้นสามารถแทนสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ โดยเฉพาะในช่วงวิกฤตที่ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงนั้น

3.3 การจำลองลักษณะของรากพืชเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

แนวทางปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีทางชีวภาพโดยการเสริมกำลังด้วยรากพืช เป็นวิธีที่ใช้เทคโนโลยีพื้นฐานในการก่อสร้าง รากค่าก่อสร้างถูก และยังเป็น การปรับปรุงสภาพแวดล้อมอีกด้วย บทความนี้เป็น การนำเสนอวิธีการจำลองลักษณะของรากพืช เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นหลัก โดยแบ่งออกเป็น การจำลองลักษณะการแผ่ขยายของรากพืช และการจำลองการกระจายตำแหน่งของรากพืชบนลาดดิน

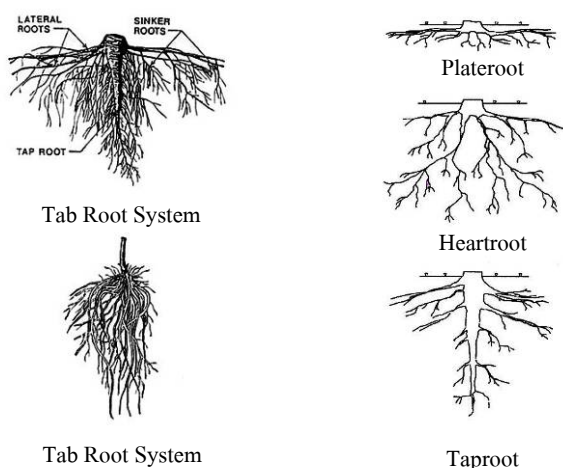
การจำลองลักษณะการแผ่ขยายของรากพืช จำลองโดยการแทนที่ดินประสานกับรากพืชด้วยทรงกระบอกที่มีความหนาแน่นวางเรียงซ้อนกัน โดยเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีให้มีค่าใกล้เคียงกับการแผ่ขยายของรากพืชจริง ส่วนการจำลองการกระจายตำแหน่งของรากพืช จำลองโดยแบ่งพื้นที่เป้าหมายออกเป็นช่องๆ พร้อมกับหาค่ากำลังเฉลี่ยในแต่ละช่อง แล้วนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการพังทลายมากที่สุด เพื่อจำลองลักษณะชั้นดินและวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

การแผ่ขยายของรากพืชในดินมีส่วนช่วยทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากการประสาน (Root Reinforcement) การยึดเกาะ (Root Anchorage) ระหว่างรากพืชกับดิน นอกจากนั้นผลจากการดูดน้ำของพืชยังช่วยลดแรงดันน้ำภายในดินอีกด้วย ดังนั้นในการประเมินความปลอดภัยของลาดดินทั้งในสภาพป่าธรรมชาติและลาดดินที่ก่อสร้างหรือดัดแปลงแก้ไขโดยมนุษย์จึงควรคำนึงถึงการเสริมกำลังของรากพืชด้วย เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการประเมินนั้นๆ

รูปแบบการแผ่ขยายของรากพืชที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อการเสริมกำลังของดินที่แตกต่างกันด้วยโดยการจำลองนี้เป็นการเลียนแบบลักษณะการแผ่ขยายของรากพืช โดยมีสมมติฐานคือ 1) รากพืชประสานกับดินอย่างสม่ำเสมอ ทุกความลึก 2) รัศมีการแผ่ขยายของรากเป็นวงกลมออกจากศูนย์กลางลำต้น 3) การเปลี่ยนแปลงกำลังของดินที่เสริมด้วยรากพืชจะมีผลกับค่า Cohesion เท่านั้น 4) ลักษณะการพังทลายของลาดดินหลังการจำลองรากพืช จะเป็นแบบ Shallow – Seated Instability และ Deep – Seated Instability ไม่คำนึงถึง Surface Erosion

3.3.1 ระบบรากพืชแบบต่างๆ

Wang (1994) ระบบของรากพืชแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ Tap Root System และ Fibrous System ดังภาพที่ 15 โดย Tap Root System จะเป็นระบบรากที่พบในไม้ยืนต้นทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ รากแก้ว (Tap roots) ซึ่งเป็นศูนย์กลางที่ก่อให้เกิดการประสานของดินชั้นล่าง (ศูนย์วิจัยป่าไม้ ร่วมกับสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (2537) รากแขนง (Lateral roots) เป็นรากที่แผ่ออกจากศูนย์กลางลำต้น ก่อให้เกิดการประสานของดินชั้นบนโดยปกติรากแขนงจะมีมากที่สุดที่ระดับความลึก 30-50 เซนติเมตรจากผิวดิน รากฝอย (Sinker roots) เป็นส่วนของรากที่แผ่ขยายจากรากแก้ว หรือรากแขนง Gray and Sotir (1996) แบ่งรูปแบบหรือลักษณะการแผ่ขยายของรากพืชออกเป็น 3 แบบ คือ Taproot , Heart root และ Plate root ดังภาพที่ 15 นอกจากนั้นยังพบว่าลักษณะของรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก



ภาพที่ 15 ระบบรากพืชแบบ Tap Root System and Fibrous System (Wang 1994) และรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช

ที่มา: (Gray and Sotir 1996)

3.3.2 ทฤษฎีการจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากพืช

Wu (1976) ศึกษาและพัฒนาทฤษฎีการจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากพืช โดยสมมติว่ารากเป็นวัสดุยืดหยุ่น ในระยะที่เกิดแรงเฉือน ทุกๆรากรับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอ และอยู่ในแนวตั้งกับระนาบการเกิดแรงเฉือน ดังรูปที่ 2 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยราก หาได้จากสมการที่ 30, 31 และ 32

$$S_R = S + \Delta S_R \quad \text{----- (30)}$$

$$t_R = T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad \text{----- (31)}$$

$$\Delta S_R = t_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) \quad \text{----- (32)}$$

เมื่อ S_R = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีการเสริมด้วยราก

S = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมด้วยราก

ΔS_R = กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมราก

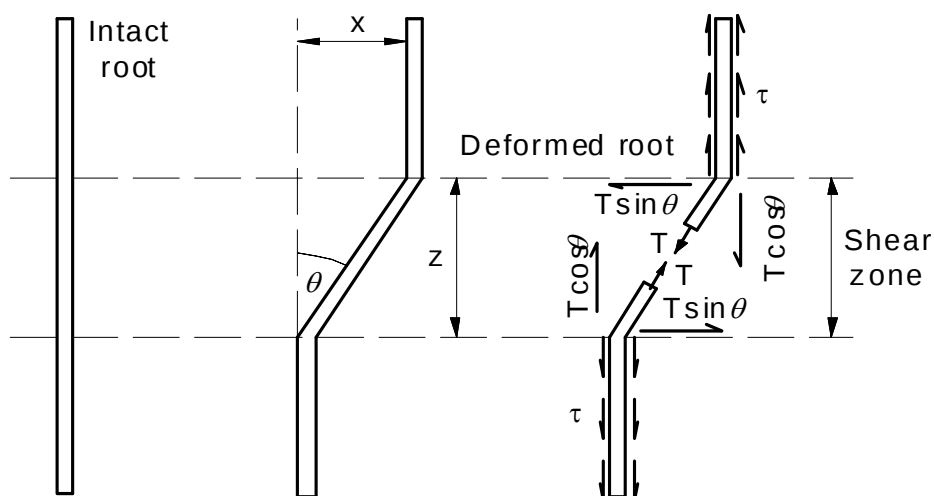
t_R = กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

T_R = กำลังรับแรงดึงของราก

A_R = พื้นที่หน้าตัดของรากที่อยู่ในพื้นที่หน้าตัดดิน

A = พื้นที่หน้าตัดของดิน

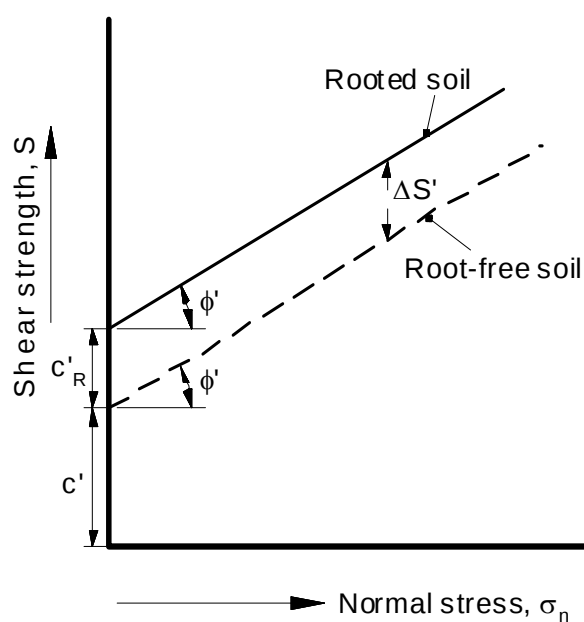
θ = มุมของแรงเฉือนที่บิดไปของราก หรือเท่ากับ $\tan^{-1}(x/z)$



ภาพที่ 16 การจำลองรูปแบบการเสริมกำลังของดินด้วยรากพืชในแนวตั้งฉาก

ที่มา: Wu (1976)

กำลังของดินที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสริมด้วยรากพืชจะแปรผันกับปัจจัย 6 อย่างคือ ความหนาแน่น, กำลังรับแรงดึง, Tensile Modulus, อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความขรุขระของพื้นผิว และการวางตัวของรากพืช (Coppin and Richards, 1990) โดยทั่วไปกำลังของดินที่มีการเสริมด้วยรากพืชสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 17 ซึ่ง C'_R เป็นค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น และโดยทั่วไป ϕ มีค่าเท่ากับดินที่ไม่มีการเสริมด้วยรากพืช

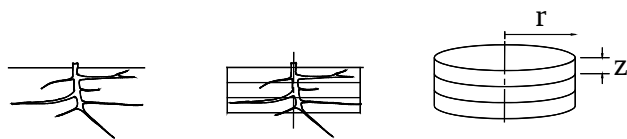


ภาพที่ 17 กำลังของดินที่มีการเสริมด้วยรากพืช

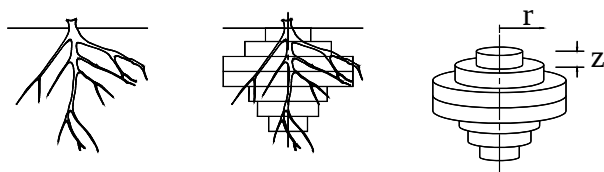
ที่มา: (Coppin and Richards, 1990)

3.3.3 การจำลองลักษณะการแผ่ขยายของรากพืช

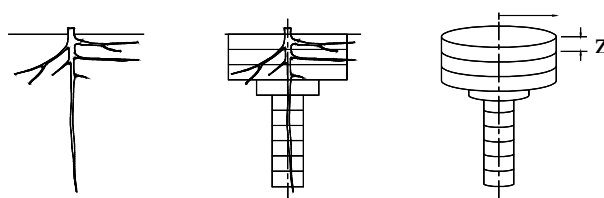
เมื่อทำการศึกษาลักษณะการแผ่ขยายของรากพืชอย่างชัดเจนแล้ว การจำลองทำได้โดยแทนดินที่ประสานกับรากพืชด้วยทรงกระบอกที่มีความหนา z และรัศมี r วางเรียงซ้อนกันจากบนลงล่าง ค่ารัศมีจะเปลี่ยนแปลงตามความลึกเพื่อให้การจำลองใกล้เคียงกับลักษณะการแผ่ขยายจริงของรากพืช ดังภาพที่ 18



(ก) รากส่วนใหญ่แผ่ขยายในแนวระดับ



(ข) รากส่วนใหญ่แผ่ขยายในแนวเฉียง



(ค) รากแผ่ขยายในแนวราบและมีรากแก้ว

ภาพที่ 18 การใช้ทรงกระบอกจำลองการแผ่ขยายของรากพืชโดยทั่วไป

ที่มา: Gray, D.H. and Sotir, R.B. (1996)

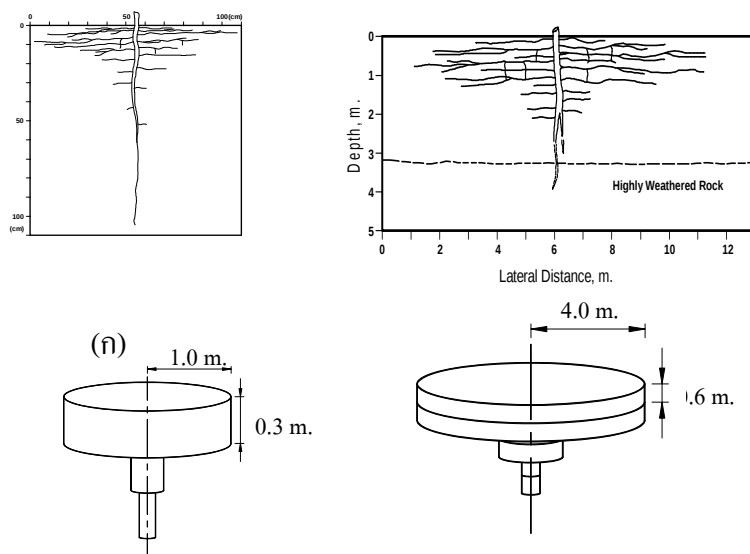
เมื่อ

r = รัศมีการแผ่ขยายของรากพืชจากศูนย์กลางลำต้น มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึก

z = ความหนาของดินที่ประสานกับรากพืชในช่วงการแผ่ขยายของรากพืชที่มีรัศมีใกล้เคียงกัน
จำลองโดยแท่งทรงกระบอก มีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 1.0 เมตร ขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดินและชนิดของพืช

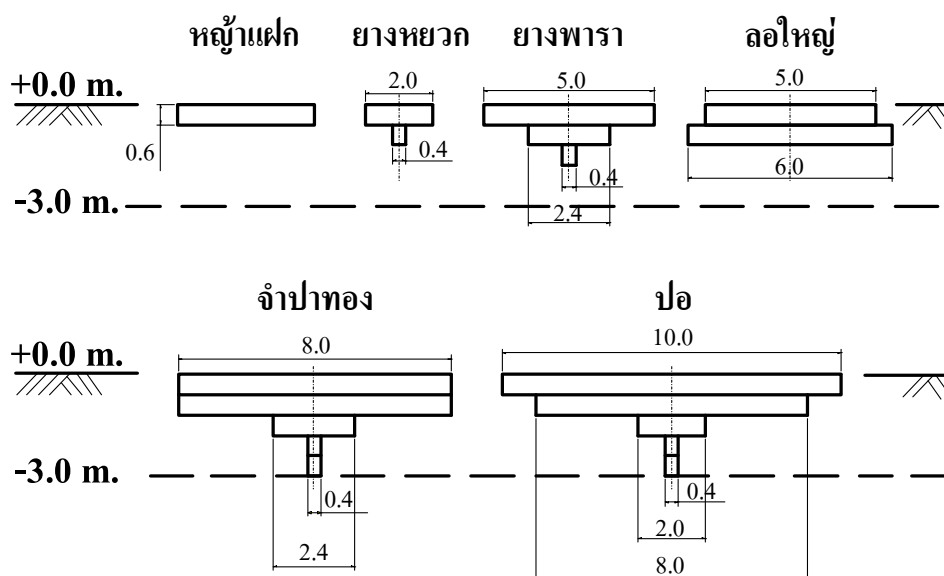
3.3.4 ตัวอย่างการจำลองรากพืช

Nilaweera ทำการศึกษาหาชนิดของต้นไม้ที่เหมาะสมกับเสถียรภาพความลาดของพื้นที่ภูเขา โดยตัวอย่างการแผ่ขยายของรากพืช แสดงดังภาพที่ 19(ก) ซึ่งเป็นรากของ ต้นยางหยวก (*Dipterocarpus alatus*) และต้นจำปาทอง (*Languid kurzii*) สำหรับการจำลองรากพืชโดยใช้แท่งทรงกระบอกของพืชชนิดอื่น แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 19 รากต้นยางหยวก, ต้นจำปาทองและการจำลองโดยใช้แท่งทรงกระบอก

ที่มา: Nilaweera (1994)



ภาพที่ 20 รากต้นยางหยวก, ต้นจำปาทอง, ยางพารา, ลอใหญ่, หล้าแฝก และปอและการจำลองโดยใช้แท่งทรงกระบอก

ที่มา: Nilaweera (1994)

ในสภาพป่าธรรมชาติการกระจายของต้นไม้ไม่มีระเบียบและไม่มีระยะที่แน่นอน ดังนั้นการวิเคราะห์การพิบัติของลาดดินจึงต้องหาแนวทางการกระจายตำแหน่งของรากพืชที่เป็นตัวแทนการพิบัติ (แนวที่มีโอกาสให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่ถูกต้องสำหรับขั้นตอนการจำลองการกระจายตำแหน่งของรากพืชทำได้ดังนี้

1) กำหนดขนาดพื้นที่เป้าหมาย (กว้าง x ยาว) ดังภาพที่ ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวต้องมีชนิดของพืชพันธุ์ การกระจายของพืชพันธุ์ ลักษณะของชั้นดิน และความชันของลาดดิน ที่สามารถเป็นตัวแทนของสภาพภูมิประเทศบริเวณนั้นๆได้

2) แบ่งดินออกเป็นชั้นๆ ให้ความหนาแต่ละชั้นเท่ากับ z (หนาเท่ากับความหนาของแท่งทรงกระบอก) พร้อมทั้งระบุตำแหน่ง รัศมีการแผ่ขยายของรากพืช และกำลังของดินประสานรากพืช ในแต่ละชั้นของความลึก บนพื้นที่เป้าหมาย

3) แบ่งพื้นที่เป้าหมายออกเป็นช่อง (Grid) ตามแนวดิ่งและแนวนอน โดยความกว้างของช่องควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 5.0 เมตร เนื่องจากขนาดที่เล็กกว่า 1.0 เมตร การเก็บข้อมูลในสนามจะทำได้ยาก แต่ถ้าขนาดใหญ่กว่า 5.0 เมตร ผลที่ได้จากการจำลองจะขาดความแม่นยำ ทั้งนี้ขนาดช่องอาจปรับเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ที่ศึกษา ชนิด และการกระจายตำแหน่งของพืชพันธุ์ สำหรับการหาค่า c_{avg} ของแต่ละช่องโดยสมการที่ 33

$$c_{avg} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i A_i}{A_T} \quad \text{----- (33)}$$

เมื่อ C_{avg} = Cohesion เฉลี่ยของดินแต่ละช่อง
 C_i = Cohesion ของดินหรือดินประสานรากพืช
 A_i = พื้นที่ในขอบเขตของรากพืชหรือดินเดิม
 A_T = พื้นที่ของช่องสี่เหลี่ยมใดๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ไมโครคอมพิวเตอร์พร้อมเครื่องพิมพ์ 1 ชุด
2. Program KUSLOPE Version 2.0
3. ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ลักษณะและคุณสมบัติชั้นดิน
4. ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของพืชประเภท หญ้าแฝก, ขางหยวก, และ ขางพารา

วิธีการ

พื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบนมีลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงชัน สภาพป่าในปัจจุบันไม้ที่หนาแน่นสมบูรณ์ถูกเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำและการยึดมวลดินของรากไม้ลดลง ทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยและแผ่นดินถล่มในพื้นที่ อีกทั้งบางหมู่บ้านเข้าไปตั้งที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยงภัยดังกล่าวโดยไม่รู้ตัว เนื่องจากขาดความรู้ความเข้าใจในการเลือกพื้นที่เพื่อทำการเกษตรกรรม สร้างที่อยู่อาศัย ที่ปลอดภัยจากอุทกภัยและแผ่นดินถล่ม

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงภัย ดินถล่มเพื่อเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช ในพื้นที่ อำเภอ เชียงกลาง จังหวัดน่าน โดยมีวิธีการศึกษาและเสนอวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินดังต่อไปนี้

1. ทำการศึกษาโปรแกรม KU-SLOPE 2.0

KU-Slope 2.0 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินสามารถวิเคราะห์ ออกแบบได้อย่างเหมาะสม สะดวก รวดเร็ว และถูกต้อง เพื่อลดความเสี่ยงในการพังทลายของลาดดิน ใช้งานง่าย สามารถใช้ได้ทั้งใน Windows 95, 98, NT, ME, 2000

1.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม KU-Slope

ในการใช้โปรแกรม KU-Slope 2.0 นั้นจำเป็นต้องรู้ถึงความต้องการของข้อมูลที่นำเข้าสู่ โปรแกรมโดยมีขั้นตอนดังนี้ 1. ป้อนข้อมูลชื่อโครงการ สถานที่ตั้ง 2. ป้อนคุณสมบัติดิน พิกัด ของชั้นดิน และขอบเขตการพังทลาย 3. ป้อนความละเอียดในการค้นหาค่า อัตราส่วนความปลอดภัย ที่ต่ำที่สุด 4. เลือกสภาวะการไหลซึมของน้ำ 5. เลือกวิธีการค้นหาค่า อัตราส่วนความปลอดภัยในการ ศึกษาได้ใช้วิธีในการคำนวณแบบ Simplified Bishop 6. ป้อนปัจจัยภายนอกอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง กับการพังทลาย 7. ป้อนข้อมูลคุณสมบัติทางพฤกษศาสตร์ของพืชเพื่อใช้ในการคำนวณหาความเชื่อม แน่นของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพืช 8. คำนวณ และเลือกค่า อัตราส่วนความปลอดภัย ที่เหมาะสมกับ การออกแบบ

2. การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดิน

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินซึ่งได้จากรายงานผลการสำรวจ เก็บตัวอย่าง และทดสอบ ในบริเวณพื้นที่ศึกษา จังหวัดน่าน (ดร. ก้องเกียรติ, 2551) ซึ่ง ประกอบด้วย หน่วยน้ำหนัก, g (KN/m³) ความเชื่อมแน่น, C (KN/m²) มุมเสียดทานภายใน, ϕ (Degree) แสดง ข้อมูลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าคุณสมบัติของดินในพื้นที่ศึกษา

หน้าตัดที่	Cohesion	Friction Angle (ϕ)	Unit Weight (γ)
1	2.93	23.0	1.83
2	2.92	23.1	1.83
3	2.90	23.2	1.82
4	2.94	23.5	1.84
5	2.92	23.0	1.84
6	2.89	24.1	1.84
7	2.90	23.2	1.83
8	2.93	23.0	1.83
9	2.68	23.5	1.88
10	2.80	23.0	1.80
11	2.93	23.0	1.83
12	1.85	25.5	1.85
13	2.90	24.0	1.88
14	2.90	24.0	1.88
15	2.70	17.2	1.85
16	2.90	23.0	1.83
17	2.94	24.1	1.85
18	2.7	23.5	1.88
19	2.68	25.5	1.88
20	1.85	25.5	1.85
21	2.68	25.5	1.84
22	2.94	23.1	1.84
23	2.89	24.1	1.84
24	2.00	23.8	1.83
25	2.00	23.8	1.83

จากตารางที่ 6 เป็นข้อมูลที่ได้จากการสำรวจคุณสมบัติของพื้นที่ อำเภอ เชียงกลาง จังหวัด น่าน จำนวน 25 หน้าตัด พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินและหินแบบคงสภาพและไม่คงสภาพในช่วงความ ลึก 6 เมตร ซึ่ง ได้ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (Soil Cohesion) อยู่ในช่วง 1.85-2.94 ค่ามุมเสียดทาน ภายใน (ϕ) อยู่ในช่วง 23.0-25.5 และค่า หน่วยน้ำหนักจมน้ำ (γ) อยู่ในช่วง 1.83-1.88 ตามลำดับ เพื่อใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำเข้าโปรแกรม KU- Slope 2.0 ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพของลาดดิน

3. การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติทางพฤกษศาสตร์ของพืช

การพัฒนาเสถียรภาพของลาดดินโดยการปลูกพืชนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาและหาข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลรัศมีการแผ่ขยายของรากพืช, r (m.) และความหนาผิวดินที่ประสานกับราก พืช, z (m.) และคุณสมบัติดินที่ประสานกันกับรากพืชดังตารางที่ 7

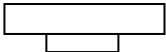
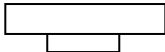
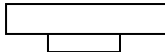
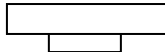
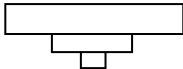
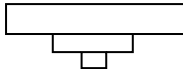
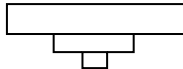
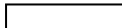
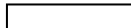
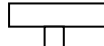
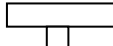
ตารางที่ 7 แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความหยั่งลึกของ รากพืชแต่ละชนิด

ชนิดพืชที่ปลูก	การขยายตัวของราก (เมตร)									
	ปีที่1		ปีที่2		ปีที่3		ปีที่4		ปีที่5	
	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z
ยางหยวก	0.20	0.30	0.40	0.60	0.60	0.80	0.80	1.00	1.00	1.20
ยางพารา	1.00	0.60	2.00	1.20	3.00	1.80	4.00	2.40	5.00	2.50
หญ้าแฝกหอม	0.15	0.80	0.30	0.80	0.45	3.00	0.50	3.00	0.50	3.00

ที่มา: พืชไร่เศรษฐกิจ. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรมวิชาการเกษตร
2551

จากตารางที่ 7 เป็นข้อมูลที่แสดงการขยายตัวของรากพืชซึ่งประกอบด้วยค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการขยายตัวของรากพืช (D) และ ค่าความหยั่งลึกของราก (Z) ในแต่ละปีซึ่งมีอัตราการขยายตัวของรากที่ระดับความลึกแตกต่างกันออกไป ตามชนิดของพืช โดยมีรูปแบบการขยายตัวของรากพืชที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงรูปแบบการขยายตัวของรากพืชในแต่ละปี

ประเภทพืชที่ใช้ปลูก	ระดับชั้นดิน	ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
ยางพารา	0-0.6					
	0.6-1.2					
	1.2-2.4					
	2.4-3.0					
ยางหยวก	0-0.6					
	0.6-1.2					

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ประเภทพืชที่ใช้ปลูก	ระดับชั้นดิน	ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
หญ้าแฝก	0-0.6					
	0.6-1.2					
	1.2-2.4					
	2.4-3.0					

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าพีชแต่ละชนิดมีลักษณะการขยายตัวของรากที่ระดับความลึกแตกต่างกันไปในแต่ละปีซึ่งค่าที่ได้จะเป็นข้อมูลในการนำเข้าสู่โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเชื่อมั่นของดินที่ประสานกันกับรากพืชตามสมการที่ 33 โดยมีค่าคุณสมบัติของดินที่ประสานกันกับรากพืชดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงข้อมูลค่าคุณสมบัติดินที่ประสานกันกับรากพืช

ประเภทพืชที่ใช้เสริมกำลัง	C'_R	Friction Angle (degree)	Unit Weight (t/m^3)
ดินที่ไม่มีการปลูกพืช	0.3	23.5	1.88
ดิน+ยางหยวก	6	23.5	1.88
หญ้าแฝก+ยางพารา+ดิน	4	23.5	1.88
ดิน+หญ้าแฝก	4	23.5	1.88
ดิน+ยางพารา	3	23.5	1.88

ที่มา: รัฐธรรม และ วรากร (2545)

2.การสร้างแบบจำลอง

การศึกษานี้ได้เลือกโปรแกรม KUSLOPE 2.0 สำหรับการจำลองพื้นที่และชั้นดินเนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับขอบเขตการศึกษาโดยขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

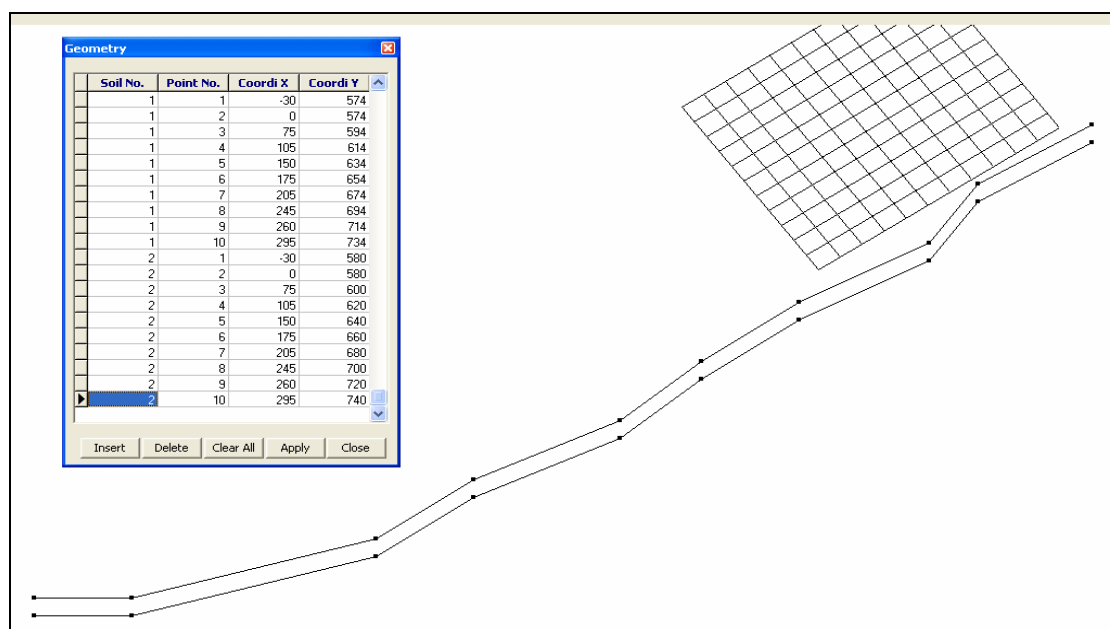
2.1 การจำลองพื้นที่

การจำลองพื้นที่ในกรณีศึกษานี้ได้นำตัวอย่างของหน้าตัดที่ 18 มาเป็นตัวอย่างในการจำลองซึ่งมีรายละเอียดค่าอุ้งนดับของพื้นที่ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าจุดพิกัดของลาดดินหน้าตัดที่ 18

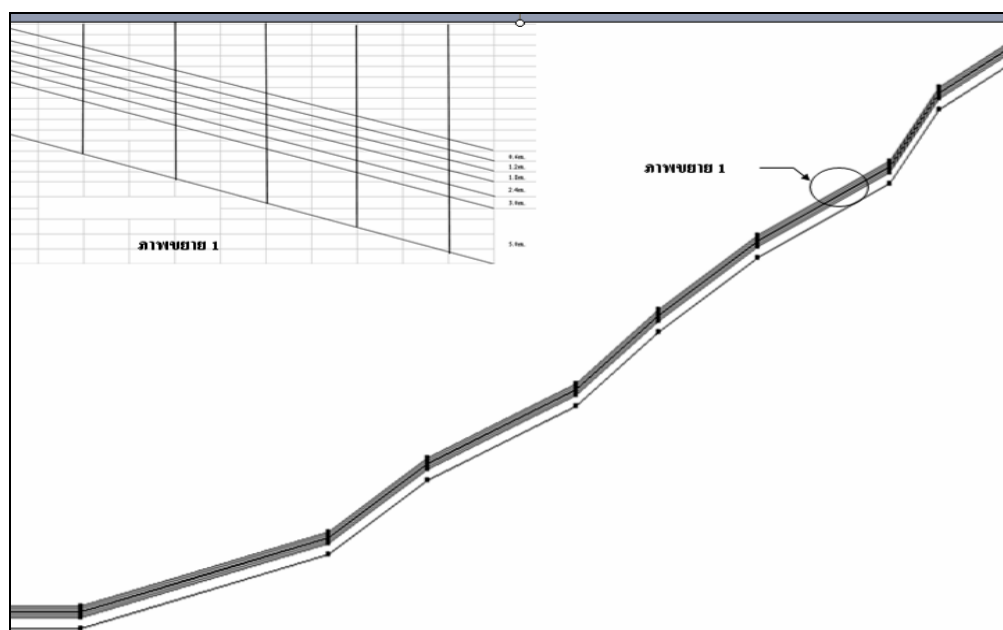
Soil Number	Point Number	Coordinate X	Coordinate Y
1	1	-30	574
1	2	0	574
1	3	75	594
1	4	105	614
1	5	150	634
1	6	175	654
1	7	205	674
1	8	245	694
1	9	260	714
1	10	295	734
2	1	-30	580
2	2	0	580
2	3	75	600
2	4	105	620
2	5	150	640
2	6	175	660
2	7	205	680
2	8	245	700
2	9	260	720
2	10	295	740

จากข้อมูลตารางที่ 6 และ 10 สามารถนำเข้าสู่แบบจำลองโปรแกรม KU-Slope 2.0 ซึ่งมีการแสดงผลหลังจากการนำเข้าสู่โปรแกรมได้ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แสดงลักษณะลาดดินตัวอย่าง

จากภาพที่ 21 จะได้รูปแบบของหน้าตัดที่ 18 ที่นำมาพิจารณา จากนั้นเพื่อสะดวกต่อการคำนวณค่าความเชื่อมั่นของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการปลูกพืชในแต่ละปีแต่ละช่วงความลึกการจำลองชั้นดินเป็นการแบ่งชั้นดินออกเป็นส่วนย่อยๆตามลักษณะการจำลองของรากพืช(เพื่อใช้อ้างอิงในโปรแกรม)โดยการใช้คู่ของตัวเลข(ลำดับชั้นดิน, ลำดับช่อง) ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงลักษณะการแบ่งชั้นดินตัวอย่างก่อนการปลูกพืช

จากภาพที่ 22 เป็นการแสดงการจำลองลักษณะชั้นดินโดยแบ่งชั้นดินออกเป็นชั้น ชั้นระดับความลึกละ 0.6 เมตร หลังจากที่มีการจำลองชั้นดินแล้วต่อไปเป็นการจำลองรูปแบบการปลูกพืชตามหัวข้อที่ 2.2

2.2 การสร้างแบบจำลองการปลูกพืช

รูปแบบการปลูกพืชที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุดในแต่ละพื้นที่ ได้มีการเสนอแนวทางการปลูกพืช 2 รูปแบบ กล่าวคือการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและการปลูกพืชผสม ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มปลูกจนโตเต็มที่เวลา 5 ปี โดยการจัดรูปแบบการปลูกพืชในที่นี้กำหนดให้มีการปลูกตามมาตรฐาน การปลูกพืชของ กรมวิชาการเกษตร เพื่อให้ต้นพืชสามารถเจริญเติบโตได้ประกอบด้วย

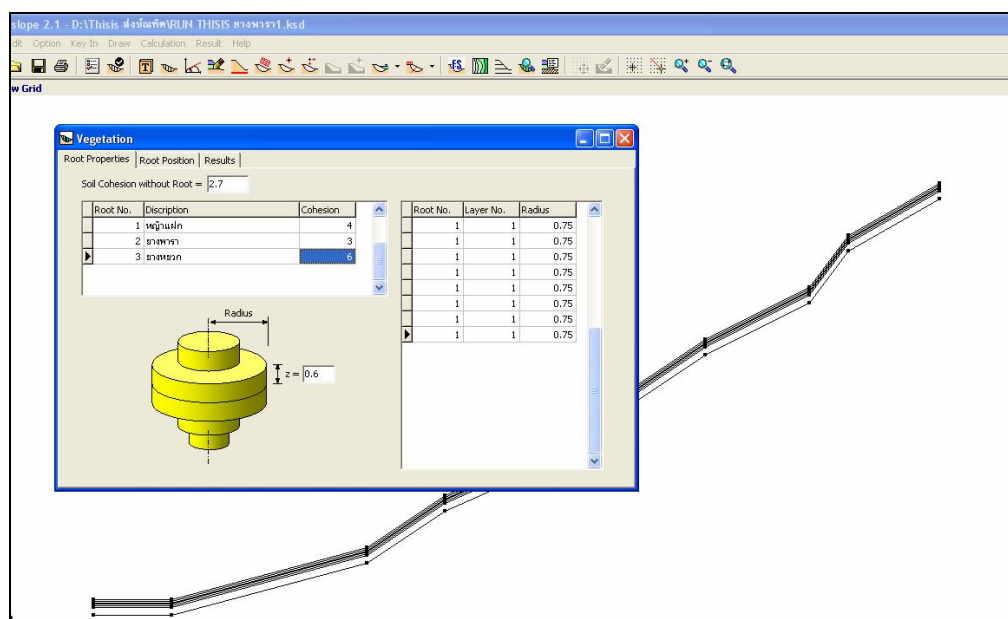
1. พืชเชิงเดี่ยว 3 รูปแบบ

- 1.1 ขางพารา ระยะห่าง 3x8 เมตร
- 1.2 ขางหยวก ระยะห่าง 4x4 เมตร
- 1.3 หญ้าแฝก ระยะห่าง 0.5x1 เมตร

2. พืชผสม 3 รูปแบบ

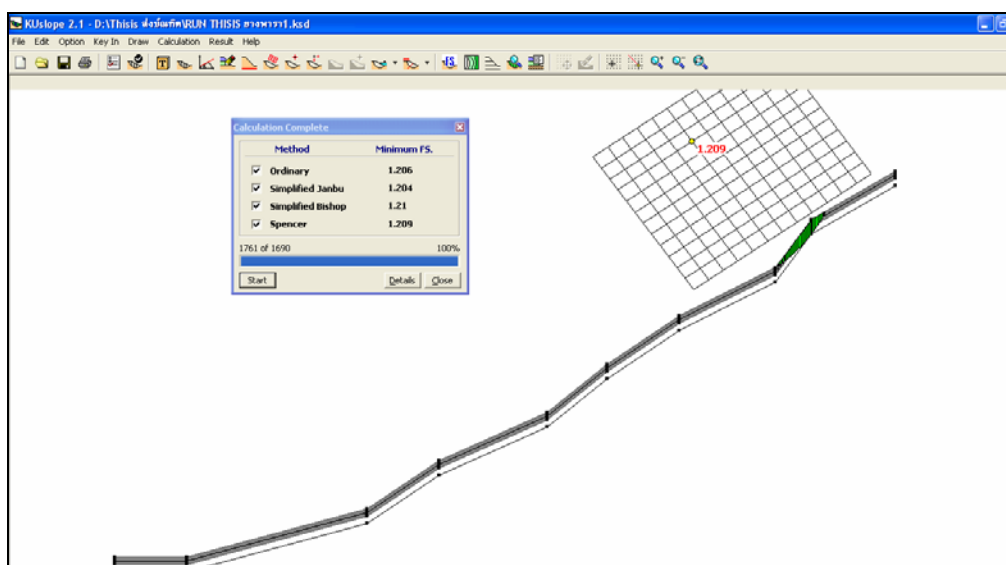
- 2.1 ขางพาราผสมหญ้าแฝก
- 2.2 ขางหยวกผสมหญ้าแฝก
- 2.3 ขางพาราผสมขางหยวกผสมหญ้าแฝก

หลังจากจัดรูปแบบการปลูกพืชแล้วให้ทำการใส่ข้อมูลเข้าจำลองรูปแบบการปลูกพืชซึ่งปรากฏรูปแบบดังภาพที่ 23 โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 9 ใช้ในช่องค่าความเชื่อมั่นของดินแสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แสดงตัวอย่างการใส่ข้อมูลคุณสมบัติทางพฤกษศาสตร์ของพืช

หลังจากการใส่ข้อมูลทั้งหมดตามที่กล่าวมาแล้วให้ทำการคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยก่อนและหลังการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินต่อไปแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงตัวอย่างการประมวลผลค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในโปรแกรม KU-Slope 2.0

จากภาพที่ 24 เป็นวิธีการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินโดยใช้โปรแกรม KU-Slope 2.0 โดยขั้นตอนนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ก่อนมีการปลูกพืชเพื่อพัฒนาเสถียรภาพลาดดินและหลังการพัฒนาเสถียรภาพลาดดินโดยการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและเชิงผสมต่อไป

ผลและวิจารณ์

1. ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

จากการคัดเลือกพื้นที่เสี่ยงภัย ใน อำเภอ เชียงกลาง จังหวัดน่าน ทั้งหมด 25 หน้าตัดได้ค่า อัตราส่วนความปลอดภัยดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงผลค่า อัตราส่วนความปลอดภัย 25 หน้าตัด ของอำเภอ เชียงกลาง จังหวัดน่าน

ลำดับ	ค่า C	ϕ	ความชัน(องศา)	FS.ดินเดิม
1	2.93	23.00	39	1.41
2	2.92	23.10	56	1.50
3	2.90	23.20	44	1.61
4	2.94	23.50	65	1.39
5	2.92	23.00	53	1.39
6	2.89	24.10	55	1.59
7	2.90	23.20	44	1.42
8	2.93	23.00	44	1.51
9	2.68	23.50	41	1.31
10	2.80	23.00	45	1.34
11	2.93	23.00	33	1.45

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ลำดับ	ค่า C	ϕ	ความชัน(องศา)	FS.ดินเดิม
12	1.85	25.50	48	0.84
13	2.90	24.00	32	1.95
14	2.90	24.00	29	1.57
15	2.70	17.20	48	1.74
16	2.90	23.00	56	1.51
17	2.94	24.10	65	1.34
18	2.70	23.50	53	1.17
19	2.68	25.50	44	1.40
20	1.85	25.50	37	0.78
21	2.68	23.50	44	1.40
22	2.94	23.10	55	1.63
23	2.89	24.10	37	1.33
24	2.00	23.80	31	1.04
25	2.00	23.70	38	1.04

จากตารางที่ 11 จะเป็นการแสดงผลค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังจากใส่ข้อมูลเข้าแบบจำลองโดยปรากฏค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละหน้าตัดอยู่ในช่วง 0.78-1.95 ส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดภัยพิบัติแผ่นดินถล่ม

2. ผลการวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่นของดินหลังการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและเชิงผสม

จากผลการวิเคราะห์การปลูกพืชเชิงเดี่ยวและเชิงผสมกล่าวคือ รัศมีรากกับความลึกรากในแต่ละปี ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นของดินที่ประสานกันกับรากพืชและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้น โดยแสดงผลดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงค่าความเชื่อมั่นของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกหญ้าแฝก

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก (m ²)	C _{ดิน} (t/m ³)	C _{ดิน+รากหญ้าแฝก} (t/m ³)
1	0-0.6	6.75	2.70	3.05
2	0-0.6	13.50	2.70	3.40
	0.6-1.2	13.50	2.70	3.40
3	0-0.6	20.25	2.70	3.75
	0.6-1.2	20.25	2.70	3.75
	1.2-1.8	20.25	2.70	3.75
4-5	0-0.6	22.50	2.70	3.87
	0.6-1.2	22.50	2.70	3.87
	1.2-1.8	22.50	2.70	3.87
	1.8-2.4	22.50	2.70	3.87
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.87

จากตารางที่ 12 เป็นการแสดงผลค่าความเชื่อมั่นของดินที่ทำการปลูกหญ้าแฝกโดยหญ้าแฝกเป็นพืชที่มีรากยังลึกและมีการเจริญเติบโตได้เร็วทำให้มีค่าความเชื่อมั่นของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละปีโดย ในปีที่ 4-5 จะมีค่าความเชื่อมั่นสูงถึง 3.87

ตารางที่ 13 แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูก ยางหยวก

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก	$C_{ดิน}$ (t/m^2)	$C_{ดิน+ยางหยวก}$ (t/m^2)
1	0-0.6	0.20	2.70	2.73
2	0-0.6	3.14	2.70	3.13
3	0-0.6	7.07	2.70	3.67
	0.6-1.2	0.44	2.70	2.76
4	0-0.6	12.56	2.70	4.43
	0.6-1.2	0.79	2.70	2.81
5	0-0.6	19.63	2.70	5.40
	0.6-1.2	0.79	2.70	2.81

จากตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำ ดิน ยางหยวก มาปลูกในพื้นที่ซึ่งดินยางหยวกเป็น ดินที่ต้องอาศัยระยะเวลาในการเจริญเติบโตโดยจะเริ่มเจริญเติบโตเต็มที่ในช่วงปีที่ 4-5 และมีค่า การประสานกันกับรากพืช (C'_R) ตามตารางที่ 9 สูงกว่าหญ้าแฝกและยางพาราจึง ส่งผลให้มีค่าความ เชื่อมแน่นของดินที่เพิ่มขึ้นจากการปลูก ดินยางหยวกมีค่าสูงกว่า ยางพาราและหญ้าแฝก

ตารางที่14 แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพารา

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก	C _{ดิน} (t/m ²)	C _{ดิน+ยางพารา} (t/m ²)
1	0-0.6	0.78	2.70	2.74
2	0-0.6	3.14	2.70	2.87
	0.6-1.2	3.14	2.70	2.87
3	0-0.6	7.06	2.70	3.08
	0.6-1.2	0.44	2.70	2.72
	1.2-1.8	0.44	2.70	2.72
4	0-0.6	12.56	2.70	3.38
	0.6-1.2	0.78	2.70	2.74
	1.2-1.8	0.78	2.70	2.74
	1.8-2.4	0.125	2.70	2.71
	0-0.6	19.62	2.70	3.76
5	0.6-1.2	0.78	2.70	2.74
	1.2-1.8	0.78	2.70	2.74
	1.8-2.4	0.125	2.70	2.71

เนื่องจากยางพารามีระยะเวลาในการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าแต่มีพื้นที่การขยายตัวของรากสูงกว่า ต้นยางหยวกและหญ้าแฝก จึงส่งผลให้ค่าความเชื่อมแน่นของดินมีค่าสูงขึ้นในปีที่ 4-5 ตามลำดับ

จากการปลูกพืชเชิงเดี่ยวที่กล่าวมาเมื่อทำการปลูกในรูปแบบผสม 3 รูปแบบ จะส่งผลให้มีความชื้นของรากเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงความลึกแสดงผลดังตารางที่ 15, 16, 17 ตามลำดับ

ตารางที่15 แสดงค่าความชื้นของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางหยวกผสมหญ้าแฝก

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก	C _{ดิน} (t/m ²)	C _{ยางหยวก+หญ้าแฝก} (t/m ²)
1	0-0.6	6.95	2.70	3.08
2	0-0.6	14.29	2.70	3.47
	0.6-1.2	6.75	2.70	3.40
3	0-0.6	22.02	2.70	3.89
	0.6-1.2	20.36	2.70	3.80
	1.2-1.8	20.25	2.70	3.75
4	0-0.6	25.64	2.70	4.09
	0.6-1.2	22.70	2.70	3.93
	1.2-1.8	22.50	2.70	3.87
	1.8-2.4	22.50	2.70	3.87
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.87
5	0-0.6	27.41	2.70	4.18
	0.6-1.2	22.70	2.70	3.93
	1.2-1.8	22.50	2.70	3.87
	1.8-2.4	22.50	2.70	3.87
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.87

ตารางที่16 แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพาราผสมหญ้าแฝก

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก	C _{ดิน} (t/m ²)	C _{ยางพารา+หญ้าแฝก} (t/m ²)
1	0-0.6	7.54	2.70	3.11
2	0-0.6	16.64	2.70	3.60
	0.6-1.2	16.64	2.70	3.60
3	0-0.6	27.32	2.70	4.18
	0.6-1.2	20.69	2.70	3.82
	1.2-1.8	20.69	2.70	3.82
4	0-0.6	35.06	2.70	4.60
	0.6-1.2	23.29	2.70	3.96
	1.2-1.8	23.29	2.70	3.96
	1.8-2.4	22.62	2.70	3.93
	2.4-3.0	20.25	2.70	3.93
5	0-0.6	42.12	2.70	4.98
	0.6-1.2	23.28	2.70	3.96
	1.2-1.8	23.28	2.70	3.96
	1.8-2.4	22.62	2.70	3.93
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.93

ตารางที่ 17 แสดงค่าความเชื่อมของดินที่เพิ่มขึ้นหลังการปลูกยางพาราผสมยางหยวกผสมหญ้าแฝก

ปีที่	ระดับ	พื้นที่ของราก	C _{ดิน} (t/m ²)	C _{ยางพารา+หญ้าแฝก+ยางหยวก} (t/m ²)
1	0-0.6	7.74	2.70	3.12
2	0-0.6	19.78	2.70	3.77
	0.6-1.2	19.78	2.70	3.77
3	0-0.6	34.39	2.70	4.56
	0.6-1.2	21.13	2.70	3.84
	1.2-1.8	20.69	2.70	3.82
4	0-0.6	47.62	2.70	5.28
	0.6-1.2	24.08	2.70	4.00
	1.2-1.8	23.29	2.70	3.96
	1.8-2.4	22.63	2.70	3.93
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.93
5	0-0.6	61.76	2.70	6.05
	0.6-1.2	24.08	2.70	4.00
	1.2-1.8	23.29	2.70	3.96
	1.8-2.4	22.63	2.70	3.93
	2.4-3.0	22.50	2.70	3.93

จากผลที่ได้ตามตารางที่ 15, 16, 17 การปลูกแบบผสมรูปแบบที่ 3 ให้ค่าความเชื่อมแน่นของดินที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและเชิงผสมแบบที่ 1, 2 โดย ค่าความเชื่อมแน่นของดินที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผล ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้นแตกต่างกันออกไปแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังการปลูกพืชเชิงเดี่ยว

รูปแบบ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
1.หญ้าแฝก	1.216	1.238	1.274	1.308	1.308
2.ยางหยวก	1.210	1.218	1.230	1.246	1.265
3.ยางพารา	1.210	1.213	1.214	1.217	1.218

จากตารางที่ 18 เป็นการประมาณผลค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยโปรแกรม KU-Slope 2.0 ตามขั้นตอนศึกษาที่กล่าวมา สำหรับการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยรูปแบบการปลูกพืชเชิงเดี่ยว รูปแบบที่ 1 จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้นในช่วงปีที่ 2 และจะคงที่ในปีที่ 4-5 รูปแบบที่ 2 จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้นในช่วงปีที่ 3 และรูปแบบที่ 3 จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มสูงขึ้นในปีที่ 4-5

ตารางที่ 19 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังการปลูกพืชเชิงผสม

รูปแบบ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
1.ยางพารา+หญ้าแฝก	1.218	1.247	1.286	1.357	1.365
2.ยางหยวก+หญ้าแฝก	1.218	1.239	1.278	1.342	1.344
3.ยางหยวก+หญ้าแฝก+ยางพารา	1.218	1.253	1.294	1.371	1.386

จากตารางที่ 19 แสดงผลของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการปลูกพืชในรูปแบบผสม
ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการปลูกพืชเชิงผสมรูปแบบที่ 3 มีค่าสูงสุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาเสถียรภาพของพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช ในอำเภอเชิงกลางจังหวัดน่านจำนวน 25 พื้นที่ พบว่าสามารถสรุปได้ดังนี้

1 การแบ่งระดับความเสี่ยงภัยของแผ่นดินถล่มสามารถแบ่งได้ 4 ระดับคือ

- 1) $FS. < 1$ เสี่ยงมาก มีทั้งหมด 2 พื้นที่
- 2) $1 < FS. < 1.25$ เสี่ยงปานกลาง มีทั้งหมด 3 พื้นที่
- 3) $1.25 < FS. < 1.5$ เสี่ยงน้อย มีทั้งหมด 12 พื้นที่
- 4) $FS. > 1.5$ ปลอดภัย มีทั้งหมด 8 พื้นที่

2 แนวทางในการป้องกันและการรักษาเสถียรภาพโดยการปลูกพืชสรุปได้ว่าหญ้าแฝกเป็นพืชล้มลุกและมีการเจริญเติบโตเร็วซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงในระยะเวลาดสั้น ในขณะที่ไม้ยืนต้นมีการเจริญเติบโตต้องอาศัยระยะเวลาที่ยาวนานกว่า

3 ค่าความเชื่อมั่นของดินโดยการปลูกพืชสามารถสรุปได้ว่าค่าความเชื่อมั่นของดินแปรผันตามพื้นที่รากในแต่ละช่วงความลึก

4 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของดินหลังจากปลูกพืชสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยแปรผันตามค่าความเชื่อมั่นของดินที่เพิ่มขึ้นของดินประสานกันกับรากพืช

5 รูปแบบการปลูกพืชที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุดในแต่ละพื้นที่ที่สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดคือรูปแบบที่ 3 ซึ่งให้พื้นที่รากมากที่สุดในแต่ละช่วงความลึก ทำให้มีค่าความเชื่อมั่นของดินเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นดินในแต่ละปีสูงที่สุด และมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุด

ข้อเสนอแนะ

ในพื้นที่ที่มีแนวโน้มเสี่ยงภัยสูงแนะนำให้ปลูกพืชเชิงผสมเนื่องจากหญ้าแฝกสามารถเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยในปีแรกได้ดีในระหว่างที่รอพืชยืนต้นเจริญเติบโตเมื่อพืชยืนต้นเจริญเติบโตแล้วจะสามารถป้องกันเสถียรภาพได้อย่างมั่นคงยิ่งขึ้น โดยลักษณะของพืชที่เลือกปลูกควรเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่ทำการปลูกความคงทนต่อสภาพพื้นที่ที่ปลูก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติพงศ์ เศรษฐสุนทรี. 2526. ความมั่นคงของลาดเขื่อนโดยประยุกต์ใช้วิธีของ BISHOP ใช้กับคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชูเลิศ จิตเจื้อจุน. 2544. การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Simplified Bishop. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มณเฑียร กังคศิเทียม. 2537. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์.

นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. 2546. เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญชัย เชิญประดับ และวรากร ไม้เรียง. 2545. การประเมินการแก้ไขการพิบัติของลาดดิน: กรณีศึกษาริมตลิ่งแม่น้ำบางปะกงและลุ่มน้ำก้อ, น. 172-177. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยขอนแก่นร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, ขอนแก่น.

รัฐธรรม อิศโรพาร และวรากร ไม้เรียง. 2545. การจำลองลักษณะของรากพืชเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน, น. 178-183. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยขอนแก่นร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, กรุงเทพฯ.

รัฐธรรม อิศโรพาร. 2547. การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Generalized Limit Equilibrium. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรากร ไม้เรียง และชูเลิศ จิตเจื้อจุน. 2544. การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินสำหรับประเทศไทย. การสัมมนาวิศวกรรมการทาง ครั้งที่ 1, กรมทางหลวง. น. 269-287.

ศูนย์วิจัยป่าไม้ ร่วมกับสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. 2537. การศึกษาเพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดอุทกภัยและภัยธรรมชาติในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้. รายงานฉบับสุดท้าย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M. (1996). Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons: New York, N.Y.

Bishop, A.W. 1995. **The Use of The Slip Circle in The Stability Analysis of Slopes.** **Geotechnique** Vol.5 (1): 1-17.

Bjerrum, L. 1972. Embankments on soft ground, Vol.2: 1-54. **Conference on Performance of Earth-Supported Structures.** ASCE.

Blong, R.J., 1973. **A numerical classification of selected landslide of the debris slide avalanche-Flow Type.** **Engineering Geology** Vol.7: 99-144.

Coppin NJ, Richards IG. 1990. **Use of Vegetation in Civil Engineering.** Butterworths: London.

Gray, D.H. and Sotir, R.B. 1996. **Biotechnical and bioengineering slope stabilisation. A Practical Guide For Erosion Control.** John Wiley & Son. U.S.A. 53-60.

Geo-slope International Ltd. 1998. **User's Guide SLOPE/W.** Geo-slope international Ltd. Alberta, Canada.

Huang, Y.H. 1982. **Stability Analysis of Earth Slopes.** Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Nilaweera, N.S., Effects of tree root on slope stability: **The case of Khao Luang mountain area,** **Doctoral of technical science thesis,** Asian Institute of Technology, 67-437, 1994.

- Sassa, K. 1985. The geotechnical classification of landslides, pp. 31-40. **Proceeding 4 th international Conference and Field Workshop on Landslides.** Tokyo.
- Wang, In Nilaweera, N.S. (eds.), Effects of tree root on slope stability: **The case of Khao Luang mountain area : 70-73, Doctoral of technical science thesis**, Asian Institute of Technology, 1994.
- Wu, T.H., Investigation of landslides on Prince of Wales Island, **Geotechnical Engineering Report**, Columbus, Ohio, 1976.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายศิวุธ สงสุทธิต
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	ต.สัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียน รัตนธิเบศร์ จังหวัด นนทบุรี ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต (วิศวกรรม ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร โครงการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท EMS Consultants Co.ltd.
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-