



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการระบบผู้เชี่ยวชาญ
เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

โดย

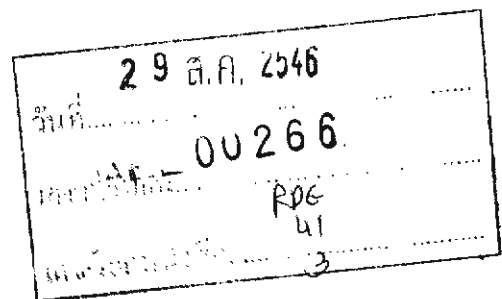
รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง และคณะ

ธันวาคม 2543

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

คณะผู้วิจัย



0003

รศ.ดร.วรากร	ไม้เรียง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.ก่อโชค	จันทรวงกูร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ศุภกิจ	นนทนันท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.อัสนีย์	ก่อตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ร.ต.หญิงดร.วรรณิ	สุขสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์
เลขที่ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10200
โทรศัพท์ : 02-2542476-8
โทรสาร : 02-2542476-8
e-mail : info@gsf.or.th



Abstract

Project Code : RDG3/03/2541

Project Title : Expert System for Slope Stability Analysis

Investigators

1. Assoc.Prof. Warakorn Mairaing, Ph.D. Civil Engineering, Kasetsart University.
2. Asst.Prof. Korchoke Chantawarangul, Ph.D. Civil Engineering, Kasetsart University.
3. Assoc.Prof.Supakij Nontananandh, Ph.D. Civil Engineering, Kasetsart University.
4. Assoc.Prof.Asanee Kawtrakul, Ph.D. Computer Engineering, Kasetsart University.
5. Asst.Prof. Plt.Off.Vanee Sooksatra, Ph.D. Civil Engineering, Rungsit University.

Email address : Assoc.Prof. Warakorn Mairaing, Ph.D. : fengwkm@ku.ac.th

Project Duration : January 1, 1998 – December 31, 2000

Soil slope failures can be effectively predicted and notified in advance if we have enough knowledges, experiences and previous case studies. At present due to the lack of experts, informations, and decision making process for slope stability problem lead us to research on the expert system called "KU-EXslope". This expert program with accompanying slope stability analysis program "KUslope" and soil slope failure database should help the practicing engineer to deal with stability problems as if they are advised by the expert engineer.

This research was carried out by gathering knowledges and informations into two knowledge bases. Failure patterns and levels of stability are grouping in "KB1" while soil strength and seismic intensity are in "KB2" These relevant knowledges came from; expert opinions, more than 100 cases of field observation, essential documents and more than 800 cases of stability analysis.

The results consisted of 1196 rules from the knowledge bases covering most of the investigated failures modes. The expert system can advise the users for suitable soil strength, possible failure mode and level of stability. The results are compared to the existing failure cases and evaluated by experienced engineer before distribution to the users. This expert program will guide the engineer for appropriate soil slope stability analyses and furthermore reduce the damages from loss of lifes and properties cause by slope failure.

Keywords: Expert System, Soil Slope Stability Analysis, Knowledge Base, Data Base

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG3/03/2541

ชื่อโครงการ : ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ชื่อนักวิจัย :

1. รศ.ดร.วรากร ไม่เรียง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ผศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนนท์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. รศ.ดร.อัศนีย์ ก่อตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. ผศ.ร.ด.หญิง ดร.วรรณิ์ สุขสาคร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต

Email address : รศ.ดร.วรากร ไม่เรียง : fengwkm@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 มกราคม 2541 – 31 ธันวาคม 2543

การพิบัติของลาดดินเป็นสิ่งที่สามารถคาดการณ์ และมีสิ่งบ่งชี้บอกเหตุเตือนล่วงหน้าได้หากมีความรู้ ประสบการณ์ และข้อมูลจากเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นในท้องถิ่นนั้นอย่างเพียงพอ แต่ปัจจุบันยังขาดวิศวกรผู้เชี่ยวชาญรวมทั้งข้อมูลของการพิบัติ และขบวนการที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) ชื่อ “KU-EXslope” เพื่อช่วยในการประเมินความมั่นคงของลาดดินแทนผู้เชี่ยวชาญ พร้อมกับโปรแกรมสนับสนุนการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน “KUSlope” และฐานข้อมูลการพิบัติของลาดดิน ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่ได้จากทฤษฎี ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ และกรณีพิบัติที่เคยเกิดขึ้น

การวิจัยดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลและความรู้จากหลายๆแหล่งมาจัดเข้าอยู่ในระบบของฐานความรู้สองส่วนคือ “KB1” เป็นขบวนการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและสถานภาพความมั่นคงของลาดดินและ “KB2” เป็นส่วนให้คำแนะนำการเลือกใช้ความแข็งแรงของดินและความเข้มของแผ่นดินไหวที่จะใช้ในการวิเคราะห์ โดยได้มาจากการคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกรณีพิบัติในสนามกว่า 100 แห่ง บันทึกและรายงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ความมั่นคงด้วยโปรแกรมกว่า 800 หน้าตัด

ผลของการวิจัยทำให้สร้างกฎจากฐานความรู้ได้ 1196 กฎ ครอบคลุมการพิบัติส่วนใหญ่ที่ตรวจพบแล้วนำเข้าสู่การจัดทำโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งสามารถให้คำแนะนำแก่ผู้ใช้ทั้งด้านกำลังของดินที่เกี่ยวข้อง รูปร่างการพิบัติที่อาจจะเกิดขึ้น และระดับความมั่นคงของลาดดิน โดยผ่านการประเมินความถูกต้องเทียบกับกรณีพิบัติจริงในสนาม และให้วิศวกรทดลองใช้ก่อนการเผยแพร่ โปรแกรมนี้นอกจากจะให้คำแนะนำที่ถูกต้องต่อวิศวกรแล้วยังนำไปสู่การลดโอกาสการเกิดการพิบัติซึ่งเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนต่อไป.

คำหลัก : ระบบผู้เชี่ยวชาญ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ฐานความรู้ ฐานข้อมูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญ	
สารบัญตาราง	
สารบัญรูป	
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1-3
บทที่ 2 การตรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 ระบบผู้เชี่ยวชาญ	2-1
2.2 การประยุกต์ระบบผู้เชี่ยวชาญในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค	2-6
2.3 สภาพธรณีวิทยา	2-9
2.4 ความเข้มของแผ่นดินไหวในประเทศไทย	2-11
2.5 สภาพดินเหนียวกรุงเทพในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง	2-13
2.6 ลักษณะการพิบัติของลาด	2-16
2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด	2-26
2.8 โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	2-38
2.9 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดของงานดิน	2-38
2.10 การสำรวจดินเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ	2-41
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	3-1
3.1 อุปกรณ์	3-1
3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย	3-2
3.3 วิธีการวิจัย	3-3
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 การสร้างฐานความรู้ KB1	4-1
4.2 การสร้างฐานความรู้ KB2	4-35
4.3 ผลการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ต้นแบบ, KU-EXslope	4-49
4.4 การทดสอบและประเมินสมรรถภาพของระบบ	4-55
4.5 การเผยแพร่และการประยุกต์ใช้	4-63

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5-1

สรุป

5-1

ข้อเสนอแนะ

5-5

เอกสารอ้างอิง

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	จำนวนผู้เสียชีวิตและความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดในญี่ปุ่น	1-2
2.1	ความเข้มของแผ่นดินไหวในมาตราเมอร์แคลลีปรับปรุงที่มีต่อความรู้สึกและความเสียหาย	2-12
2.2	อัตราส่วน D/L สำหรับแต่ละการพิบัติของลาด	2-20
2.3	การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาดโดยวิธีของ Varnes	2-21
2.4	ลักษณะของแต่ละวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด	2-27
2.5	ตัวอย่างของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดบนพื้นฐานขีดจำกัดสมมูล	2-29
2.6	ผลสรุปของการศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพ	2-39
2.7	อัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมให้สำหรับงานเขื่อนดินในประเทศไทย	2-40
2.8	อัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมให้สำหรับงานทางวิศวกรรมโยธา	2-40
2.9	ค่าคงที่ในสมการของ SHANSEP	2-48
2.10	สภาพของการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดินแต่ละชนิด	2-49
3.1	จำนวนจุดพิบัติที่พบในแต่ละประเภทของงาน	3-1
4.1	ข้อสรุปของข้อมูลกรณีพิบัติจากการออกสำรวจภาคสนาม	4-6
4.2	ข้อมูลสรุปสภาพพิบัติที่เคยเกิดขึ้นแล้วจากหน่วยงานและเอกสารอ้างอิง	4-14
4.3	ข้อสรุปของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด	4-18
4.4	ระดับเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในงานวิจัย	4-21
4.5	แนวคิดในการสร้างฐานความรู้ KB1	4-32
4.6	สภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย	4-41
4.7	Parameter ของคุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว	4-47
4.8	กรณีการพังทลายของคันทางของถนนในเขตหนองจอก	4-58
4.9	กรณีการพังทลายของริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่บ้านทรายมูล อ.ธาตุพนม จังหวัดนครพนม	4-59
4.10	กรณีการพังทลายของลาดคันถมริมทางรถไฟสายกรุงเทพ-มาตาบุดจว.ระยอง	4-60
4.11	กรณีการพังทลายของไหล่เขาเพื่อทำถนน Hue Hue ในประเทศออสเตรเลีย	4-61

4.12	ขอบเขตของความสามารถหรือศักยภาพของระบบ KU-EXslope สำหรับ การวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน	4-62
4.13	การเผยแพร่โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน “KUslope”	4-64
4.14	การเผยแพร่ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน “KU-Exslope”	4-66

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบในระบบผู้เชี่ยวชาญ	2-2
2.2	แผนภูมิแสดงข่ายงานแทนความหมาย	2-4
2.3	การแสดงความรู้โดยใช้เพรตดิเคตลอจิก	2-4
2.4	ตัวอย่างของรูปแบบของการอนุมานแบบเดินหน้า	2-5
2.5	ปริมาณงานในแต่ละงานเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่นำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้	2-8
2.6	แผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหว	2-13
2.7	พื้นที่ที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพปกคลุมอยู่ในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง	2-14
2.8	ความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพตามระดับความลึกที่ถนนร่วมพัฒนา เขตหนองจอก กรุงเทพฯ	2-15
2.9	ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพิบัติ	2-17
2.10	การจำแนกการเคลื่อนพังโดยพิจารณาจากขนาดของการเคลื่อนพังของ ลาด	2-20
2.11	การจำแนกการเคลื่อนพังโดยพิจารณาค่า D/L	2-21
2.12	ลักษณะการพิบัติของแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่จำแนกโดย Varnes (1978)	2-22
2.13	สภาพการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มดินเม็ดหยาบที่มีค่า ความยึดเหนี่ยว	2-24
2.14	สภาพการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มดินเม็ดหยาบที่ไม่มี ความยึดเหนี่ยว	2-24
2.15	สภาพการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มเม็ดละเอียดซึ่งวางบน ชั้นดินแข็ง	2-25
2.16	สภาพการเคลื่อนพังของลาดในดินหลายชั้น	2-25
2.17	ตำแหน่งของพื้นผิวของการเคลื่อนที่ของลาด	2-26
2.18	รูปแบบของผิวการเคลื่อนพัง, Free body และ Force diagram ในลักษณะ เป็นแผ่นบาง	2-30
2.19	Stability chart สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียวของ Taylor	2-32
2.20	การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Ordinary method	2-34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.21	การวิเคราะห์โดย Simplified Bishop method	2-35
2.22	วิธีวิเคราะห์ของ Janbu	2-37
2.23	การกระจายความน่าจะเป็นของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย	2-41
2.24	ผังแสดงกระบวนการในการสำรวจโครงการทางธรณีเทคนิคและธรณีวิทยา	2-43
2.25	สภาพการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในคันทางบน Soft clay ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง และหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้าง	2-46
2.26	สภาพการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของงาน Cut slope ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง และหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้าง	2-46
2.27	อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน	2-47
3.1	ตำแหน่งของจุดสำรวจในภาคสนาม	3-1
3.2	ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	3-4
3.3	แบบจำลองของลาดดินสำหรับใช้ในการวิเคราะห์	3-8
3.4	นิยามของค่า d ในลักษณะชั้นดิน Stratified soil กรณีดิน 2 ชั้น	3-10
4.1	ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของคันดินถมของถนนที่ทางสายรังสิต-นครนายก	4-2
4.2	ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของ (ก) คันดินถมข้างทางรถไฟ ที่จังหวัดระยอง, (ข) ดินถมในซอยอ่อนนุช กรุงเทพฯ, (ค) ริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่จังหวัดหนองคาย	4-3
4.3	ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาของถนนที่ (ก) ดอยตุง จังหวัดเชียงใหม่, (ข) ดอยแม่สลอง จังหวัดเชียงราย, และ (ค) จังหวัดภูเก็ต	4-4
4.4	ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของลาด เนื่องจากการตัดไหล่เขาของ (ก) เขื่อนแม่มาแข้ง จังหวัดลำปาง และ (ข) โรงงานปูนซิเมนต์ ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี	4-5
4.5	ตัวอย่างของรูปแบบการพังของคันดินถมของทางสายหมายเลข 3454	4-10

สารบัญรูป (ต่อ)

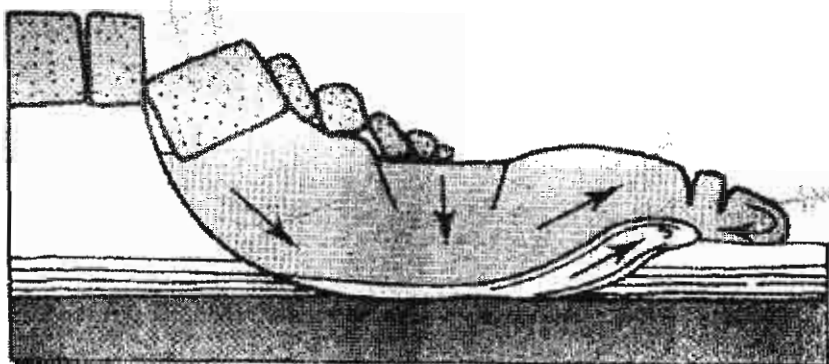
รูปที่		หน้า
4.6	ตัวอย่างของรูปแบบการพังของ (ก) ค้นดินถมของทางหลวงหมายเลข 305, (ข) งานดินถมที่หนองจุฬา จังหวัดกรุงเทพฯ, และ (ค) งานขุดดินที่หนองจุฬา จังหวัดกรุงเทพฯ	4-11
4.7	ตัวอย่างของรูปแบบการพังของ (ก) ลาดเขาตามธรรมชาติที่บ้านศิวิวงศ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช, และ (ข) ลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาของถนนในประเทศออสเตรเลีย	4-13
4.8	นิยามของตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพังแบบ Rotational slide	4-21
4.9	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 10 องศา	4-23
4.10	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 15 องศา	4-24
4.11	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 20 องศา	4-25
4.12	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 25 องศา	4-26
4.13	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 30 องศา	4-27
4.14	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 40 องศา	4-28
4.15	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 50 องศา	4-29
4.16	รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 60 องศา	4-30
4.17	Soil chart ของกลุ่มดิน CH และ CL	4-36
4.18	Soil chart ของกลุ่มดิน ML, SC, SM, SP-SM, และ GM	4-37
4.19	Soil chart ของกลุ่มดิน SW, SP, GW, และ GP	4-37
4.20	ความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพตามสมการของ SHANSEP และที่พบในเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4-40
4.21	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$	4-42
4.22	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อเป็น Cohesive soil มีค่า c และค่า ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์	4-43
4.23	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อเป็น Cohesionless soil มีค่า $c \approx 0$	4-44
4.24	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติและระดับเสถียรภาพของลาดดินใน Nonhomogeneous soil (strength varies with depth)	4-45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติของลาดดินใน Stratified soil ซึ่งประกอบด้วยชั้นดินมากกว่า 2 ชั้น และดินชั้นบนเป็น Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์	4-46
4.26	ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติของลาดดินใน Stratified soil เมื่อเป็นดิน 2 ชั้น และประกอบด้วยชั้นดิน Cohesive soil ที่มีค่า $\phi \approx 0$ วางบน Firm strata	4-47
4.27	ตัวอย่างของกฎแสดงลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ และสภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ในประเทศไทย	4-48
4.28	ตัวอย่างของกฎแสดงช่วงของค่าความแข็งแรงของดินแต่ละประเภท และสภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย	4-48
4.29	ผังของข้อมูลที่ป้อนเข้าและคำตอบของกฎในฐานความรู้ KB1	4-50
4.30	ผังของข้อมูลที่ป้อนเข้าและคำตอบของกฎในฐานความรู้ KB2	4-51
4.31	ผังของ File ของฐานความรู้ KB1 ในระบบ KU-EXslope	4-52
4.32	ผังของ File ของฐานความรู้ KB2 ในระบบ KU-EXslope	4-53
4.33	การเปิดใช้งานระบบ KU-EXslope	4-56
4.34	การป้อนข้อมูลเข้าในระบบ KU-EXslope	4-57
4.35	การแสดงผลคำตอบทางหน้าจอ	4-57



CHAPTER



1

บทนำ

ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย

Expert System for Slope Stability Analysis in Thailand

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

มนุษย์ต้องเผชิญกับภัยพิบัติหลายประเภททั้งที่เกิดโดยธรรมชาติ และมนุษย์ทำให้เกิดขึ้นเอง การเคลื่อนพังของลาดดินเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอในประเทศไทย แม้ว่าสภาพความเสียหายของภัยพิบัติจากการเคลื่อนพังของลาดดิน จะมีค่าความเสียหายน้อยกว่าภัยพิบัติประเภทอื่นๆ อาทิเช่น แผ่นดินไหว อุทกภัย เป็นต้น แต่ก็นับว่ายังเป็นภัยพิบัติที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินปีละมากมาย อาทิเช่น การเคลื่อนพังของตลิ่งแม่น้ำโขง ที่เกิดการสูญเสียแผ่นดินของประเทศไทยและงบประมาณจำนวนมากในการปรับปรุงแก้ไขลาดตลิ่ง และเมื่อเดือนมกราคม 2542 ได้เกิดการพังทลายของทางสายรังสิต-นครนายก กม.ที่ 47 ที่ก่อให้เกิดการสูญเสียเส้นทางในการขนส่งและงบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมแก้ไข, และการพังทลายของถนนเลียบคลองในเขตหนองจอก จำนวน 33 จุด ที่ทำให้มีผู้เสียชีวิต 1 คน และสูญเสียเส้นทางในการขนส่งตลอดจนงบประมาณในการซ่อมแซมแก้ไข

สำหรับในต่างประเทศ การพังทลายของลาดดิน ทำให้เกิดความเสียหายมาก และมีการรวบรวมข้อมูลไว้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถจะนำมาประเมินเป็นค่าความเสียหายได้ อาทิเช่น การเกิดลาดดินถล่ม เนื่องจากน้ำท่วมที่ La Guaire ในประเทศ Venezuela เมื่อวันที่ 15 ธ.ค. 2542 ทำให้มีผู้เสียชีวิตประมาณ 30,000 คน และบ้านพังประมาณ 23,000 หลัง เป็นต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกา การรวบรวมข้อมูลของความเสียหายจากดินถล่มถูกกระทำอย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถประเมินเป็นค่าความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อมประมาณปีละมากกว่า 1,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (Schuster, 1978), ในประเทศอิตาลี ค่าความสูญเสียเนื่องจากการพังทลายของลาดคิดได้ประมาณปีละ 1,140 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (Arnould และ Frey, 1978), ในประเทศญี่ปุ่น ระหว่างปี ค.ศ. 1969 ถึง 1972 ความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาด ซึ่งมีสาเหตุมาจากฝนตกหนักและแผ่นดินไหว มีแสดงเป็นข้อมูลในตารางที่ 1.1 เป็นต้น

การพิบัติของลาดเมื่อเปรียบเทียบกับภัยพิบัติอื่นๆแล้ว นับว่าเป็นเหตุการณ์ที่มีสิ่งบอกเหตุที่สามารถตรวจพบได้ก่อน หรือคาดการณ์ล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าภัยพิบัติอื่น ดังนั้น หากมีการเตรียมการตรวจหาวิเคราะห์สาเหตุ ออกแบบแก้ไขไว้ดีเพียงพอ จะทำให้ลดความสูญเสียจากภัยพิบัติประเภทนี้ได้มาก ดังที่มีการปรับปรุงแก้ไขเป็นข้อเสนอแนะในการออกแบบและก่อสร้างในมลรัฐ

แคลิฟอร์เนีย ทำให้ความเสียหายลดลงได้มากถึง 90% ของความเสียหายที่เคยเกิดขึ้น (Alfors และคณะ, 1973)

ตารางที่ 1.1 จำนวนผู้เสียชีวิตและความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดในญี่ปุ่น

ปี	จำนวนบ้านพัง	ผู้เสียชีวิต	
		จำนวน	เปอร์เซ็นต์*
1969	521	82	50
1970	38	27	26
1971	5,205	171	54
1972	1,564	234	44

* เปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้เสียชีวิตเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนผู้เสียชีวิตเนื่องจากภัยพิบัติอื่นๆ

สำหรับในประเทศไทยยังขาดการรวบรวมข้อมูลของการพิบัติของลาดดินไว้อย่างเป็นระบบ ถึงแม้ว่าจะมีวิศวกรและนักธรณีวิทยาทางวิศวกรรมที่มีความเชี่ยวชาญเข้าไปศึกษา วิเคราะห์เฉพาะกรณีๆ ไป แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีการออกแบบลาดดินชุดหรือดินถมตามประสบการณ์ เมื่อพิจารณาจากสภาพของการพิบัติ พบว่ามีสาเหตุเบื้องต้นบางประการเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการเลือกคุณสมบัติเฉพาะของดิน ตลอดจนการเลือกวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด ด้วยเหตุนี้ จึงมีความสำคัญที่ควรจะได้มีระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการวิจัย และพัฒนางานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย เพื่อให้เกิดเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะสามารถครอบคลุมงานวิเคราะห์ดังกล่าว และการที่อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ง่าย และสะดวกต่อการนำมาใช้สำหรับผู้ซึ่งเป็นวิศวกรโยธา และบุคคลที่เกี่ยวข้อง

1.2 วัตถุประสงค์

การดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เรื่อง “ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย” มีวัตถุประสงค์เพื่อจะทำการวิจัยเป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อรวบรวมข้อมูล ความรู้ และกรณีศึกษาของการพิบัติที่เกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของลาดดินจากเอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทางหลวง, กรมโยธา และบริษัทเอกชน

เป็นต้น และเอกสารที่มีการเผยแพร่ ตลอดจนข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดทำเป็นข้อมูลของการเคลื่อนพังของลาดดินในประเทศให้เป็นระบบ และถูกดำเนินการต่อไปเป็นฐานความรู้ของงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

2. เพื่อสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญซึ่งจะถูกพัฒนาต่อไปเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีชื่อว่า KU-EXslope และมีลักษณะพิเศษในการให้ความรู้เฉพาะสาขาวิศวกรรมปฐพี ที่มีความเข้าใจในรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดิน และระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน ตลอดจนยังให้ข้อเสนอแนะในการตัดสินใจเลือกช่วงค่าความแข็งแรงของดินที่ถูกจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) การบอกลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) และสภาพความชื้นของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย เพื่อให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

3. เพื่อทดสอบระบบผู้เชี่ยวชาญ KU-EXslope กับฐานข้อมูล ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่พบในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะต้องมีการเก็บรวบรวมและประมวลผลข้อมูลในประเทศไทย ที่แสดงถึงลักษณะของโครงการที่เกี่ยวข้อง, ศึกษาในทฤษฎีและหลักการที่จะใช้ในการวิเคราะห์และศึกษาการนำระบบคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าว โดยมีขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูลและความรู้ จากหลายแหล่งด้วยกันได้แก่ ทฤษฎี เอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง บทความทางวิชาการที่ตีพิมพ์และเผยแพร่แล้ว และสภาพการเคลื่อนพังของลาดที่พบจากการสำรวจภาคสนาม ซึ่งเป็นปัจจัยด้านวิศวกรรมปฐพี และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

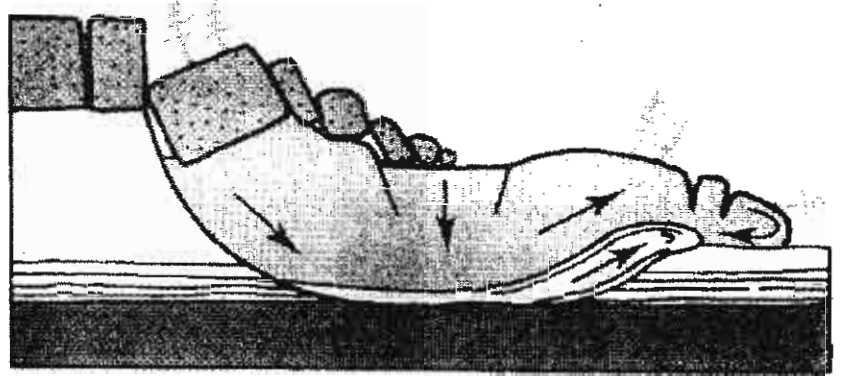
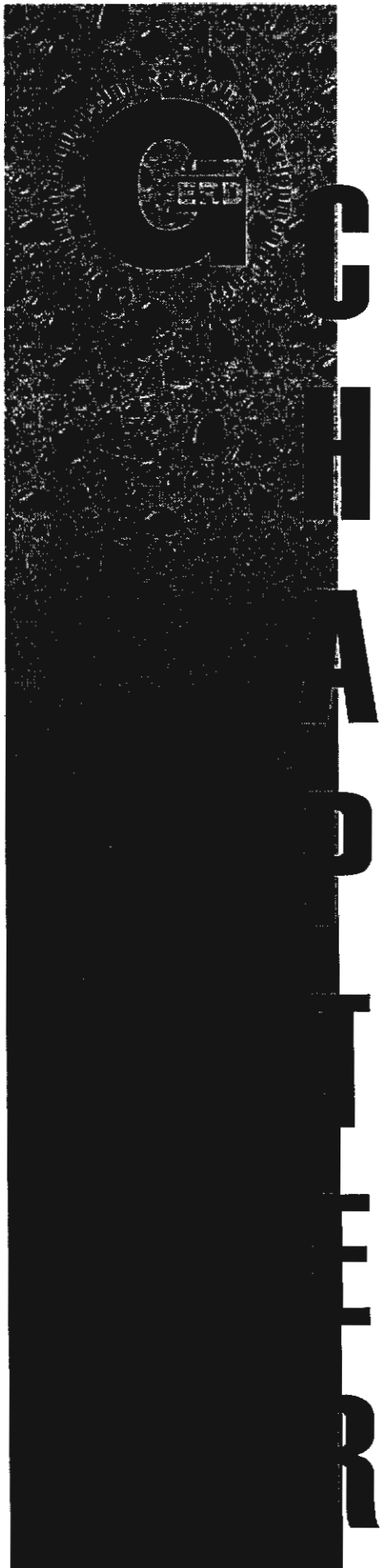
2. สำรวจสภาพการเคลื่อนพังของลาดที่พบในสนาม เพื่อมุ่งหวังเป็นกรณีศึกษา โดยเลือกเฉพาะพื้นที่ที่น่าสนใจ ได้แก่ กรณีพิบัติของคันทางของถนน เช่น การเคลื่อนพังของลาดคันทางทางสายรังสิต-นครนายก เป็นต้น, กรณีพิบัติของริมตลิ่งแม่น้ำ เช่น การพังของริมตลิ่งแม่น้ำโขง เป็นต้น

3. สร้างความรู้ในฐานความรู้ของระบบ สำหรับวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดิน และระดับเสถียรภาพของลาดดิน จากการพิจารณาในชั้นดิน 3 ลักษณะซึ่งได้แก่ Homogeneous soil, Nonhomogeneous soil (strength varies with depth), และ Stratified soil

4. สร้างความรู้ในฐานความรู้ของระบบด้านการจัดพื้นที่ในประเทศไทยตามสภาพความเข้มของแผ่นดินไหว โดยพิจารณาจาก Modified mercalli scale

5. สร้างความรู้ในฐานความรู้ของระบบ สำหรับตัดสินใจในการเลือกช่วงความแข็งแรงของดินที่ถูกจำแนกตามระบบ USCS (Unified Soil Classification System), บอกลักษณะของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ โดยพิจารณาจากกรณีศึกษาที่น่าสนใจ และชั้นดินเหนียวกรุงเทพบางพื้นที่

6. รูปแบบของระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน สร้างจากฐานความรู้เพื่อนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ KU-EXslope โดยระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system shell) ซึ่งในการนี้ระบบช่วยเขียนที่ใช้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ RAISON ที่ได้รับการคัดเลือกภายใต้งบประมาณจำกัด โดยที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ MS-WINDOWS และใช้สำหรับพิจารณากฎที่สร้างขึ้น.



2

**ກຳລັງຈາກສາຍແຂະ
ທຸບທີ່ຕື່ມຂ້ອນ**

การตรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System)

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เป็นแขนงวิชาที่กล่าวถึงการใช้เทคนิคที่ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้เช่นเดียวกับมนุษย์ คือทำให้คอมพิวเตอร์มีความรู้ และสามารถคิดได้ โดยอาศัยข้อมูลความรู้ และประสบการณ์ของมนุษย์ เทคนิคในปัญญาประดิษฐ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะด้านหลายเรื่อง สำหรับเรื่องที่มีการประยุกต์ใช้งานกันมากมี 2 เรื่องได้แก่ การประมวลผลภาษาธรรมชาติ เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจภาษามนุษย์ และระบบผู้เชี่ยวชาญ เพื่อทำหน้าที่เป็นผู้เชี่ยวชาญ และให้คำปรึกษาแก่ผู้ใช้ในสาขาต่างๆ เช่น ทางแพทย์ ใช้ในงานวินิจฉัย และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการตรวจรักษาโรคต่างๆ ทางวิศวกรรมโยธา ใช้ในงานวินิจฉัย ดัดสนใจ และตรวจสอบข้อมูลเพื่อช่วยเหลือในการวิเคราะห์ ออกแบบ และก่อสร้าง เป็นต้น โดยเฉพาะเรื่องการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งถูกพัฒนาสร้างขึ้นมาประมาณกลางทศวรรษ 1960 ด้วยการรวบรวมความรู้จากผู้เชี่ยวชาญที่เป็นมนุษย์ และเรียกว่าได้ว่าเป็นความสำเร็จทางด้านปัญญาประดิษฐ์

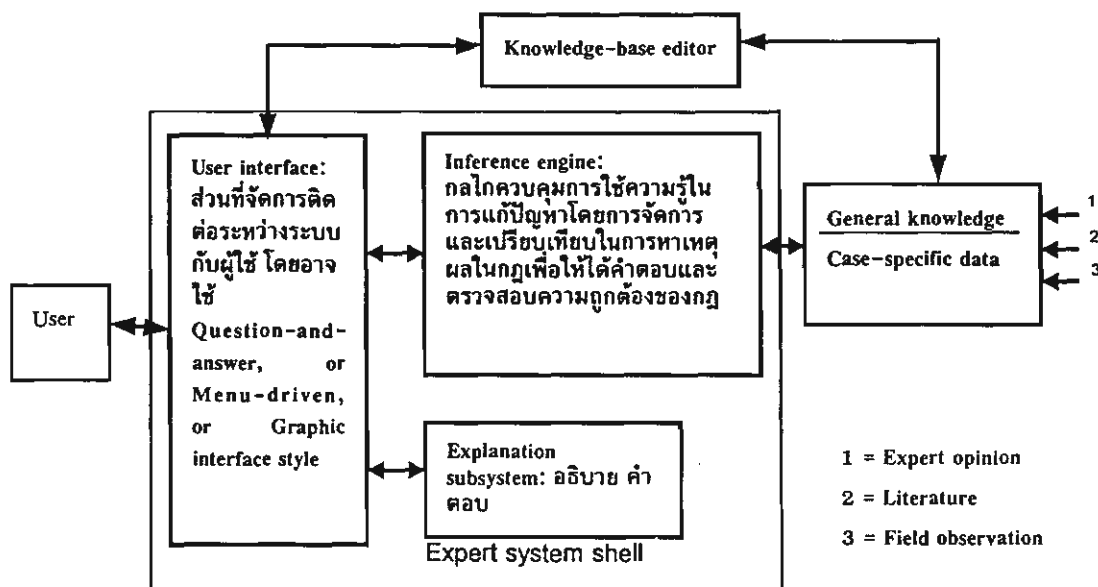
Hayes-Roth และคณะ (1983) ได้ให้นิยามของระบบผู้เชี่ยวชาญว่า เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการออกแบบ และสร้างขึ้นมาให้สามารถทำงานด้วยความมีประสิทธิภาพสูงในการแก้ไขปัญหาคณะเฉพาะด้านที่ต้องอาศัยความรู้, ความจริง, และการพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะสาขาวิชาความรู้ที่ผู้สร้างต้องการ โดยที่ระบบผู้เชี่ยวชาญมีลักษณะที่สำคัญอยู่ 3 ประการคือ

1. ต้องช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาคณะเฉพาะของงานที่ต้องการได้ด้วยความละเอียดและความมีประสิทธิภาพสูง
2. สามารถพิจารณาการแก้ไขในปัญหาคณะเฉพาะงานอย่างเป็นระบบ และให้คำตอบที่ชัดเจน
3. สามารถบันทึกกรณีการศึกษาต่างๆ เป็นแฟ้มข้อมูลในระบบ

ระบบผู้เชี่ยวชาญได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้กับการวินิจฉัย การวางแผน การออกแบบ การแปล การควบคุม และการคาดการณ์ โดยเฉพาะการทำงานที่ซับซ้อนมากๆ ซึ่งในอดีตงานประเภทนี้จะสามารถทำได้ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่เป็นมนุษย์เท่านั้น ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้งานด้านปัญญาประดิษฐ์ ระบบผู้เชี่ยวชาญจะเอาความรู้พื้นฐานซึ่งมนุษย์เป็นผู้ใส่ให้นำมาจัดเป็นระบบการตัดสินใจ และสามารถทำการประเมินผลเช่นเดียวกับการที่มนุษย์แก้ปัญหาที่ซับซ้อน ตัวอย่างที่สามารถเปรียบเทียบได้ คือการที่เราไปพบแพทย์เมื่อไม่สบาย แพทย์จะตั้งคำถามแล้วให้คนไข้ตอบ และอาจจะมีการตรวจเช็คร่างกายบ้าง ซึ่งเป็นข้อมูล ที่แพทย์จะนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับความรู้และความเชี่ยวชาญที่มีอยู่เพื่อวินิจฉัยว่าคนไข้เป็นโรคอะไร และควรให้การรักษาอย่างไร ในทำนองเดียวกัน ระบบผู้เชี่ยวชาญ จะมีการถามคำถามเพื่อให้ได้ข้อมูลจากผู้ไข้ จากนั้นจะนำข้อมูลนั้นมาจัดการค้นหา และประเมินเป็นคำตอบแสดงให้ผู้ไข้ทราบทางหน้าจอ

2.1.1 โครงสร้างของระบบผู้เชี่ยวชาญ

ระบบผู้เชี่ยวชาญจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ฐานความรู้ (Knowledge base) และระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system shell) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการแสดงส่วนประกอบของระบบผู้เชี่ยวชาญ และเส้นที่โยงถึงกันด้วยลูกศรแสดงถึงหน่วยที่ติดต่อกัน จากส่วนต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในระบบผู้เชี่ยวชาญ

1. ฐานความรู้ (Knowledge base) เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บรวบรวมความรู้และความจริง (Facts) ที่ได้มาจากความรู้ความเชี่ยวชาญในปัญหาที่น่าสนใจ

2. ระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system shell) ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User interface) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับการติดต่อระหว่างระบบกับผู้ใช้ ได้แก่การป้อนข้อมูลจากผู้ใช้ และการแสดงคำตอบจากการตัดสินใจของระบบ เป็นต้น

2.2 ส่วนของคำอธิบาย (Explanation subsystem) ทำหน้าที่อธิบายที่มาของคำตอบ รวมทั้งเหตุผลหรือ เทคนิคของคำตอบ ฉะนั้นส่วนนี้ของระบบจะต้องจำเส้นทางของการพิสูจน์หาคำตอบ รวมทั้งการนำเสนอเส้นทางนี้ด้วยรูปแบบที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังต้องอธิบายสำหรับกรณีที่ไม่คำตอบไม่ได้ด้วย

2.3 ส่วนอนุมาน (Inference engine) คือกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหาโดยการจัดการ และเปรียบเทียบในการหาเหตุผลระหว่างกฎต่าง ๆ เพื่อให้ได้คำตอบและตรวจสอบความถูกต้องของกฎ

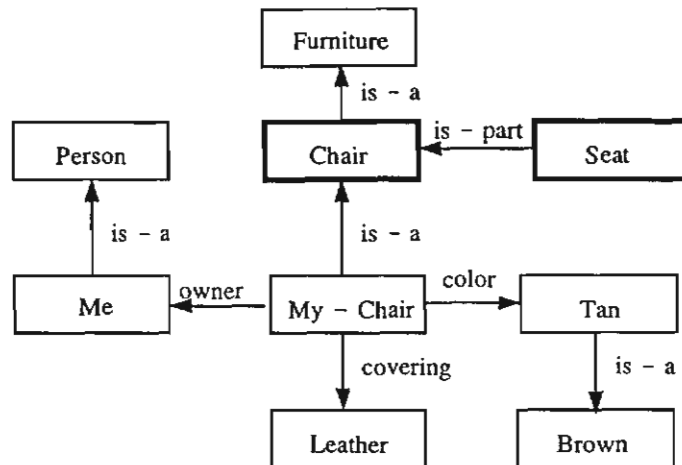
ปัจจุบันโปรแกรมช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system shell) มีด้วยกันหลายโปรแกรม ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อาทิเช่นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ MS-WINDOWS เช่น โปรแกรม RAISON เป็นต้น, บน DOS เช่น โปรแกรม VP-EXPERT เป็นต้น, บน UNIX เช่น โปรแกรม KEE เป็นต้น และ Inference engine สามารถหาเหตุผลได้ทั้งแบบลักษณะเชื่อมต่อไปข้างหน้าซึ่งเรียกว่า การอนุมานแบบเดินหน้า (Forward chaining) และ แบบลักษณะเชื่อมต่อไปข้างหลังซึ่งเรียกว่า การอนุมานแบบถอยหลัง (Backward Chaining)

ตัวอย่างของโปรแกรมช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ อาทิเช่น โปรแกรม RAISON เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ MS-WINDOWS และ Inference engine สามารถหาเหตุผลได้ในแบบ เชื่อมต่อไปข้างหน้า ในขณะที่โปรแกรม VP-EXPERT เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Dos และ Inference engine สามารถหาเหตุผลได้ทั้งแบบเชื่อมต่อไปข้างหน้า และถอยหลัง เป็นต้น

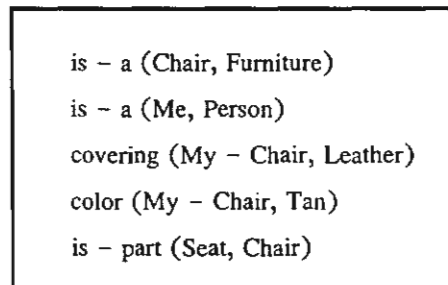
2.1.2 การแสดงความรู้

ความรู้ได้จากการสะสมข้อเท็จจริงกับข้อมูลที่พบ และความสัมพันธ์ของข้อเท็จจริง โดยมีแหล่งที่มาของความรู้หลายแห่งด้วยกัน อาทิเช่น จากข้อมูลที่สำรวจพบในสนาม, จากเอกสารที่เกี่ยวข้องของหน่วยงาน และบทความทางวิชาการ เป็นต้น ดังนั้นวิธีการที่จะแทนความรู้ หรือแสดงความรู้ เพื่อให้คอมพิวเตอร์นำไปประมวลผลได้นั้นจึงต้องเหมาะสมกับปัญหาที่ต้องการแก้ไข โดยที่วิธีการที่จะแสดงความรู้มีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้ในระบบผู้เชี่ยวชาญคือ การแสดงความรู้ด้วยข่ายงานแทนความหมาย (Semantic network) และกฎ (Production rule based type) รายละเอียดของแต่ละวิธีมีดังนี้

ข่ายงานแทนความหมาย (Semantic network) คือการแทนความรู้ในรูปแบบของแผนภูมิการสื่อความหมาย ทำได้โดยการแสดงในรูปของโหนด (Node) และลิงก์ (Link) โดยที่โหนดจะเป็นส่วนที่ใช้แสดงสิ่งต่างๆ เช่นกิจกรรม เหตุการณ์ ข้อมูล ข่าวสาร วัตถุ สี ชนิดของดิน อำเภอบนต้น และลิงก์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างโหนด ตัวอย่างความสัมพันธ์ที่ใช้ในข่ายงาน ดังแสดงเป็นแผนภูมิในรูปที่ 2.2 แต่การแสดงความรู้ในเครื่องคอมพิวเตอร์นั้น แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงข่ายงานแทนความหมาย (Rich, 1983)



รูปที่ 2.3 การแสดงความรู้โดยใช้เพรดิเคตลอจิก (Rich, 1983)

การแสดงความรู้ด้วยกฎ(Rule) มีหลักเกณฑ์พื้นฐานโดยใช้รูปประโยคของ IF THEN ประโยคตามหลัง IF คือการแสดงเงื่อนไข ประโยคที่ตามหลัง THEN คือการแสดงผลสรุปนั้นคือ

IF ตามด้วย เชตของเงื่อนไข (Condition)

THEN ตามด้วย ผลสรุปหรือการกระทำหรือเหตุการณ์ที่เกิดตามมา

ตัวอย่างเช่น

IF province = Bangkok

THEN soil layer = Bangkok Clay

จากตัวอย่างจะพบว่าจังหวัดกรุงเทพเป็นเงื่อนไข และชั้นดินเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok Clay) สำหรับกรณีที่มีกฎมากกว่าหนึ่งกฎ และสามารถรวมกันได้โดยใช้ and หรือ or ได้ ตัวอย่างเช่น

IF part = Central and province = Nonthaburi and Amphoe = Sainoi

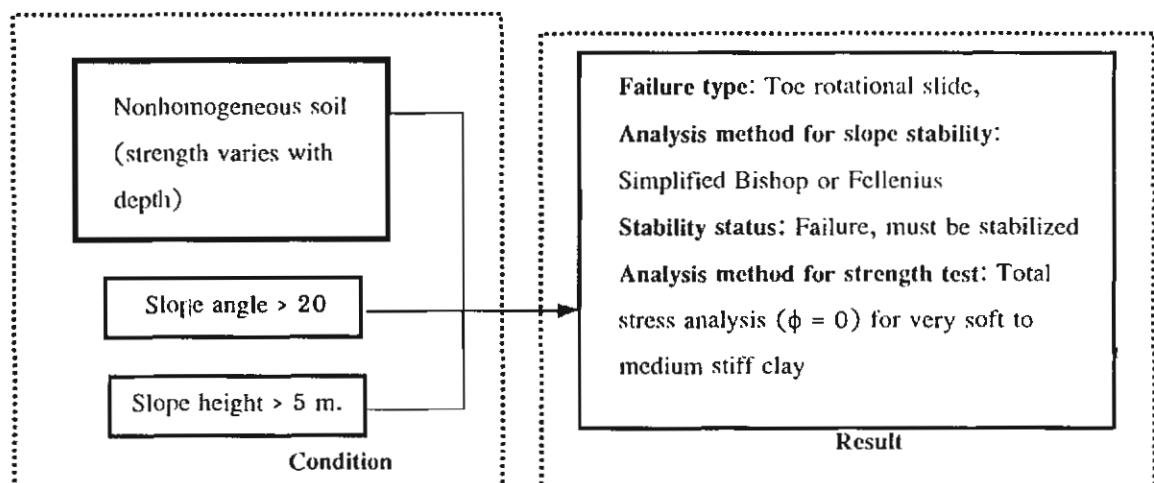
THEN result = Bangkok Clay

A = 0.025g to 0.050g

ในงานวิจัยนี้ การแสดงความรู้ในรูปของกฎ ซึ่งมีข้อดีดังนี้ คือ ระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ จะแสดงความรู้ด้วยกฎ และความหมายในการเปรียบเทียบระหว่างเหตุผลและคำตอบมีความชัดเจนมีความง่ายในการเขียนกฎและการแก้ไข

2.1.3 การอนุมานแบบเดินหน้า (Forward chaining)

การอนุมานแบบเดินหน้า (Forward chaining) เป็นกระบวนการสำหรับการพิจารณาเปรียบเทียบ และตรวจสอบกฎในลักษณะเชื่อมต่อไปข้างหน้าจากเงื่อนไขไปสู่ผลลัพธ์ หรือข้อสรุป ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของรูปแบบของการอนุมานแบบเดินหน้า

2.1.4 การอนุมานแบบดอยหลัง (Backward chaining)

การอนุมานแบบดอยหลัง (Backward chaining) เป็นกระบวนการหนึ่งของการควบคุมลักษณะการเชื่อมต่อของการพิจารณาเปรียบเทียบและตรวจสอบในกฎนั้น โดยที่จะเริ่มต้นที่การหาคำตอบ ซึ่งอยู่หลัง THEN ไปหาเหตุ ซึ่งอยู่หลัง IF

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้รูปแบบของการอนุมานแบบเดินหน้า เนื่องจากจุดประสงค์หลัก เป็นการช่วยเหลือในการวิเคราะห์และการออกแบบ โดยที่ข้อมูลที่เก็บรวบรวมเป็นข้อมูลเกี่ยวกับสาเหตุ แต่ในภายหลังหากมีการออกแบบแก้ไขและการวิเคราะห์ย้อนกลับจากกรณีพิบัติ อาจใช้รูปแบบการอนุมานแบบดอยหลัง

2.2 การประยุกต์ระบบผู้เชี่ยวชาญในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค

การนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคบนฐานความรู้ เพื่อเป็นตัวแทนความเชี่ยวชาญทางวิศวกรรมปฐพีสำหรับเป็นเครื่องมือในการตัดสินใจ และวินิจฉัยปัญหา เนื่องจากปัจจัยในการวินิจฉัยปัญหาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคมีหลายปัจจัย และมีความเสี่ยงสูง ซึ่งในการนี้ ได้มีผู้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้หลายคนด้วยกัน อาทิเช่น Thomas (1987), Moula และคณะ (1995), Toll (1996) เป็นต้น โดยที่บ่งบอกลักษณะของงานทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่ได้นำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ได้แก่

งานแปลผลข้อมูลดินจากการสำรวจ อาทิเช่น โปรแกรม SITECHAR พัฒนาโดย Norkin (1985) และ Rekhak และคณะ (1985), โปรแกรม SIGMA พัฒนาโดย Toll และคณะ (1992) เป็นต้น

งานจำแนกประเภทดินและประเมินค่าของพารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติของดิน อาทิเช่น โปรแกรม CONE พัฒนาโดย Mullarkey (1986) และ Mullarkey และ Fenves (1986) ซึ่งแปลผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Cone penetrometer เป็นต้น

งานฐานราก ซึ่งมุ่งเน้นในงานออกแบบ อาทิเช่น โปรแกรม FOUNDCON พัฒนาโดย Rashad และคณะ (1991) สำหรับวินิจฉัยรูปแบบเบื้องต้นของฐานรากที่เหมาะสม และรูปแบบเชิงรายละเอียดสำหรับงานออกแบบขั้นสุดท้าย, โปรแกรม GEOTECH พัฒนาโดย Parikh และ Kameswara (1991) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการออกแบบฐานรากดิน เป็นต้น

งานโครงสร้างป้องกันดินด้านข้าง อาทิเช่น โปรแกรม RETWALL พัฒนาโดย Hutchinson และคณะ (1987) สำหรับการเลือกและออกแบบเบื้องต้นของโครงสร้างป้องกันดินด้านข้าง เป็นต้น

งานลาดดิน อาทิเช่น โปรแกรม STABCON พัฒนาโดย Grivas และ Reagan (1988) สำหรับประเมินระดับไม่เสถียรภาพของลาด และให้ข้อเสนอแนะในรูปแบบที่เหมาะสมของการปรับปรุงลาดให้มีเสถียรภาพสูงขึ้น เป็นต้น

งานอุโมงค์ อาทิเช่น โปรแกรม SAGA พัฒนาโดย Ciesielski (1991) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการเลือกโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงสำหรับการออกแบบงานขุดดิน เป็นต้น

งานเหมืองแร่ อาทิเช่น โปรแกรม ESDAS พัฒนาโดย Yao และคณะ (1992) Reddish และคณะ (1994) และ Reddish และคณะ (1995) สำหรับการประเมินความเสียหายเนื่องจากการยุบตัวของเหมือง เป็นต้น

งานการพิจารณาสภาพของการเกิด Liquefaction อาทิเช่น โปรแกรม SOLES พัฒนาโดย Shyu และ Hryciw (1991) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการประเมินสภาพของความเป็นไปได้ในการเกิด Liquefaction ของดินเนื่องจากแผ่นดินไหว เป็นต้น

งานปรับปรุงสภาพดิน อาทิเช่น โปรแกรม IMPROVE พัฒนาโดย Chamean และ Santamarina (1989) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการเลือกวิธีการปรับปรุงดิน เป็นต้น

งานเสริมแผ่นใยสังเคราะห์ในดิน (Geotextiles) อาทิเช่น โปรแกรม EdxES พัฒนาโดย Dimmicke และคณะ (1991) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการออกแบบและการเขียนรายละเอียดประกอบแบบของการออกแบบส่วนประกอบที่เป็นแผ่นใยสังเคราะห์ในของระบายน้ำของถนน เป็นต้น

งานเขื่อน อาทิเช่น โปรแกรม GWX พัฒนาโดย Davey-Wilson และ May (1989) และ Davey-Wilson (1991b) สำหรับให้คำแนะนำในการเลือกวิธีที่เหมาะสมในการควบคุมน้ำใต้ดินสำหรับงานชุด เป็นต้น

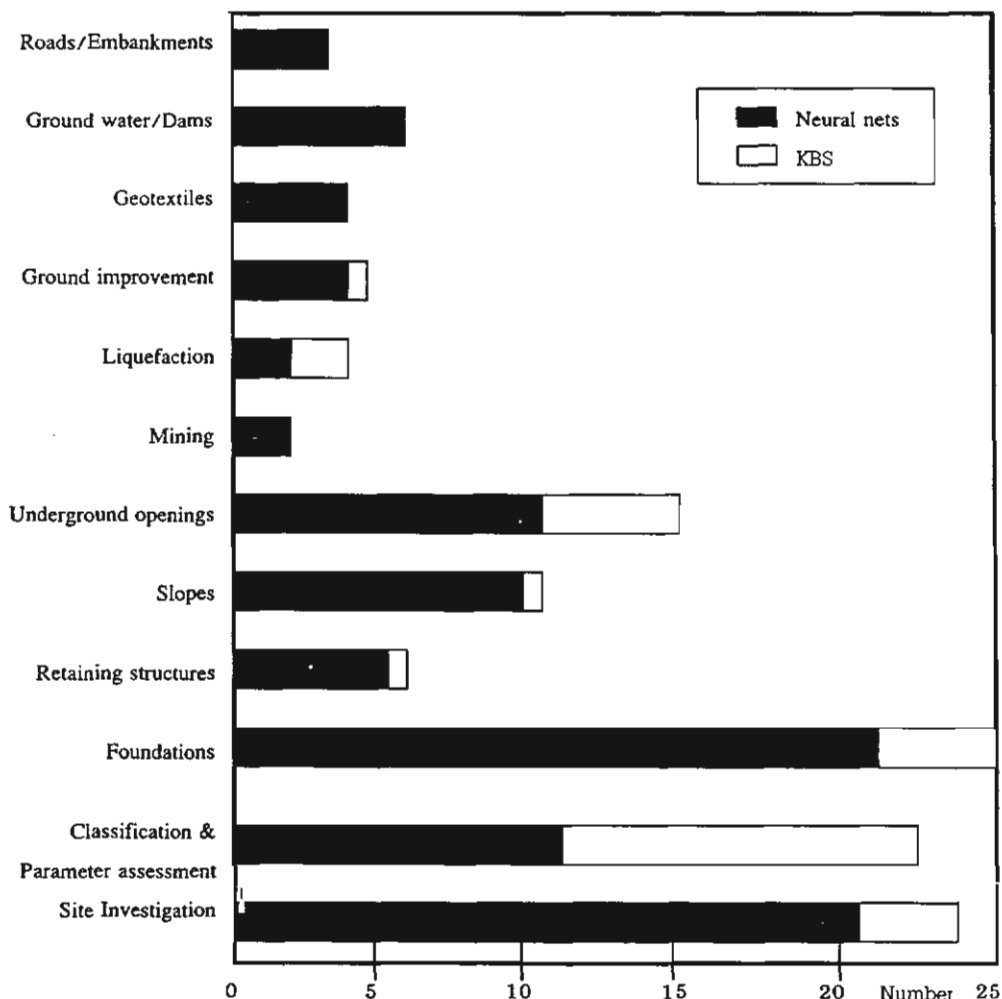
งานถนนและงานดิน อาทิเช่น โปรแกรม PACT พัฒนาโดย Kotdawala และ Hossain (1994) สำหรับให้ความช่วยเหลือในการบดอัดดินในสนาม เป็นต้น

ซึ่งในการนี้พบว่า กลุ่มของงานที่มีการนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ส่วนมากจะเป็นงานฐานราก การสำรวจดิน และการจำแนกกับการประเมินคุณสมบัติของดิน และที่ใช้รองลงมาเป็นกลุ่มของงาน Underground openings และงานลาดดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.2.1 การประยุกต์ระบบผู้เชี่ยวชาญในงานลาดดิน

ระบบผู้เชี่ยวชาญบนฐานความรู้ในการวินิจฉัย และตัดสินใจเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะของงานลาดดิน อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีหลายโปรแกรมด้วยกัน อาทิเช่น โปรแกรม XPENT, โปรแกรม SISYPHE เป็นต้น

โปรแกรม STABCON พัฒนาโดย Grivas และ Reagan (1988) เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการประเมินระดับไม่เสถียรภาพของลาด และให้ข้อเสนอแนะในรูปแบบที่เหมาะสมของการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน รวมทั้งยังมีการเชื่อมโยงกับวิธีการวิเคราะห์สำหรับคำนวณเสถียรภาพของลาด



รูปที่ 2.5 ปริมาณงานในแต่ละงานเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่นำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ (Toll, 1996)

Knowledge-Based Approach to Slope Stability Analysis พัฒนาโดย Ismail (1989) ในประเทศมาเลเซีย เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญที่รวบรวมการแก้ไขปัญหาของการเคลื่อนพัง ของลาดด้วยการลดแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนพัง หรือการเพิ่มแรงต้านทานการเคลื่อนพังของลาด โดยที่การตัดสินใจขึ้นอยู่กับผู้ใช้

โปรแกรม ESDS พัฒนาโดย Denky และ Kizil (1991) เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้ความช่วยเหลือในการประเมินระดับเสถียรภาพของลาดในเหมืองแร่ถ่านหิน ประเทศอังกฤษ โดยพิจารณาจากข้อมูลทางธรณีวิทยา รูปแบบของลาด และวิธีการก่อสร้าง

Wislocki และ Bently (1991) ได้กล่าวถึงการนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในข้อพิจารณาของการประยุกต์ในงานวางแผนสำหรับกำหนดที่ตั้งโครง โดยการพิจารณาข้อมูลแสดงสภาพอันตรายเนื่องจากการเคลื่อนพังใน South Wales ประเทศอังกฤษ

Hirokane และคณะ (1993) ได้กล่าวถึงระบบผู้เชี่ยวชาญ สำหรับการตัดสินใจเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการปรับปรุงแก้ไขลาดให้มีเสถียรภาพสูงขึ้น ซึ่งในระบบนี้จะมีอยู่ 44 รูปแบบที่ประกอบด้วย Slope protection

โปรแกรม SISYPHE พัฒนาโดย Aste (1992) เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับวินิจฉัยระดับไม่เสถียรภาพ และระดับอันตรายของลาด รวมทั้งยังสามารถสร้างรูปแบบสามมิติของพื้นดิน พื้นผิวน้ำ และพื้นผิวการเคลื่อนพัง และเชื่อมโยงกับโปรแกรม XPENT ซึ่งเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญถูกพัฒนาโดย Faure และคณะ (1988), Faure และคณะ (1991), Mascarelli และคณะ (1992) และ Faure และคณะ (1995) เพื่อให้ความช่วยเหลือในงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด ซึ่งประกอบด้วยการวินิจฉัยรูปแบบของการเคลื่อนพังของลาด และการให้ข้อแนะนำในวิธีการปรับปรุงให้ลาดมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากระหว่างการพัฒนาโปรแกรม XPENT ได้พบปัญหาของการขาดข้อมูลการเคลื่อนพังของลาดสำหรับทดสอบระบบ จึงได้เกิดโครงการ W.A.S.S.S ซึ่งย่อมาจาก Wide Area Slope Stability Server และเป็น Server สำหรับให้บริการด้านฐานข้อมูลสภาพการเคลื่อนพังของลาดแก่ผู้ใช้ โดยผ่านทาง Internet และยังมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ใช้และระบบด้วย

2.3 สภาพธรณีวิทยาในประเทศไทย

ความรู้ทางธรณีวิทยา เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานลาดดิน เพื่อบ่งบอกสภาพธรณีวิทยาที่ปรากฏบนผิวโลก และหินต้นกำเนิดซึ่งเป็นองค์ประกอบแสดงสภาพของดินภายในลาด ดังนั้นจึงได้กล่าวสรุปโดยย่อเป็นสภาพทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทยไว้ในงานวิจัย เพื่อนำไปพัฒนาเป็นความรู้ในระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในรูปแบบของ GIS (Geographical Information System) ต่อไปในอนาคต

ลักษณะทางธรณีวิทยาในประเทศไทย จากแผนที่ธรณีวิทยาของประเทศไทยของแต่ละพื้นที่ (กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 2530) ถูกแบ่งออกได้เป็นภาคต่าง ๆ 5 ภาค คือ

1. ภาคเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กำแพงเพชร ลำปาง ลำพูน แม่ฮ่องสอน นครสวรรค์ น่าน พะเยา เพชรบูรณ์ พิจิตร พิษณุโลก แพร่ สุโขทัย ตาก อุทัยธานี และอุตรดิตถ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 ส่วนคือ ภาคเหนือตอนบน มีสภาพเป็นเทือกเขา หุบเขาและแอ่งต่าง ๆ สลับกัน ที่มีสภาพการเคลื่อนพังของลาดเกิดในดินภูเขาเป็นส่วนใหญ่ ในลักษณะของงาน

Cut slope และภาคเหนือตอนล่าง มีสภาพเป็นที่ราบลุ่มน้ำ และที่ราบเชิงเขาด้านตะวันตกและตะวันออก ซึ่งเกิดจากการทับถมของตะกอนดินทรายที่พัดพามาโดยแม่น้ำสายต่าง ๆ

2. ภาคกลาง ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดกาญจนบุรี ชัยนาท นครนายก นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี ประจวบคีรีขันธ์ กรุงเทพฯ พระนครศรีอยุธยา เพชรบุรี ราชบุรี ลพบุรี สมุทรปราการ สมุทรสงคราม สมุทรสาคร สระบุรี สิงห์บุรี สุพรรณบุรี และอ่างทอง ซึ่งสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณที่เป็นที่ราบลุ่มน้ำตอนบนและตอนล่าง ที่เกิดจากการทับถมของตะกอนดินทรายที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำสายต่าง ๆ ทำให้บริเวณที่ราบตอนล่าง ซึ่งเคยเป็นบริเวณที่อยู่ใต้ระดับน้ำทะเลมาก่อน ดินชั้น หลังจากที่มีการสะสมตัวของตะกอนเป็นเวลานานนับล้านปี และบริเวณที่เป็นเทือกเขาด้านตะวันตกของภาค ประกอบด้วยภูเขาและทิวเขาสูง ไม่มีแอ่งหรือที่ราบขนาดกว้างระหว่างทิวเขา ที่ราบลุ่มน้ำ แดบ ๆ ของแม่น้ำแม่กลองและที่ราบลาดชันเชิงเขา ซึ่งอยู่ทางตะวันออกของบริเวณนี้ เช่น ทางตะวันออกของจังหวัดกาญจนบุรี และราชบุรี เป็นต้น และที่ราบชายฝั่งทะเลด้านอ่าวไทย เช่น ทางตะวันออกของจังหวัดเพชรบุรี และประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น

3. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดอำนาจเจริญ บุรีรัมย์ ชัยภูมิ กาฬสินธุ์ ขอนแก่น เลย มหาสารคาม มุกดาหาร นครพนม นครราชสีมา หนองบัวลำภู หนองคาย ร้อยเอ็ด สกลนคร ศรีสะเกษ สุรินทร์ อุบลราชธานี อุตรดิตถ์ และยโสธร มีสภาพพื้นที่เป็นภูเขาและที่ราบสูงทางตะวันออกและทิวเขาด้านใต้ที่มีสภาพการเคลื่อนพังเกิดในดินภูเขาเป็นส่วนใหญ่, บริเวณที่เป็นที่ราบสูงลุ่มแม่น้ำชี และแม่น้ำมูลหรือแอ่งโคราช, และที่ราบสูงลาดชันบนริมฝั่งแม่น้ำโขงหรือแอ่งสกลนคร ซึ่งเกิดจากการทับถมของดินตะกอน เช่นดินทราย เป็นต้น

4. ภาคตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดจันทบุรี ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ตราดปราจีนบุรี ระยอง และสระแก้ว มีสภาพพื้นที่เป็นที่ราบลอนคลื่นของเนินเขาเตี้ย โดยมีภูเขาสูงอยู่ส่วนกลาง ที่ราบแคบ ๆ ในพื้นที่ตอนบนและชายฝั่งทะเล สภาพดินในพื้นที่นี้มักเกิดจาก Weathered Granite เป็นส่วนใหญ่

5. ภาคใต้ ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดกระบี่ ชุมพร ตรัง นครศรีธรรมราช นราธิวาส ปัตตานี พังงา พัทลุง ภูเก็ต ยะลา ระนอง สงขลา สตูล และสุราษฎร์ธานี มีสภาพพื้นที่เป็นทิวเขาอยู่บริเวณแกนกลางของภาคที่มีสภาพการเคลื่อนพังเกิดในดินภูเขาเป็นส่วนใหญ่, และเป็นชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกกับด้านตะวันตก โดยที่ชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก มีที่ราบแคบ ๆ ตั้งแต่จังหวัดชุมพรลงไปจนถึงจังหวัดนราธิวาส ซึ่งเป็นการทับถมของตะกอนดินทรายที่ทะเลพัดพามา

สภาพทางธรณีวิทยาของแต่ละภาคดังกล่าวประกอบด้วยหินต้นกำเนิดที่พบว่ามีทั้งหินตะกอน หินแปร และหินอัคนี ซึ่งมีการแผ่กระจายของชั้นหินที่มีขอบเขตกว้างเพียงพอที่จะสามารถ

แบ่งเป็นหมู่หิน (Group) ตามยุคที่เกิด และหน่วยหิน (Formation) ซึ่งพบว่ามีครบทุกยุคตั้งแต่ยุคพรีแคมเบรียน (Precambrian) ช่วงอายุตั้งแต่ 4500 ล้านปี ถึง 570 ล้านปีมาแล้ว จนถึงอายุน้อยที่สุดคือยุค ควอเทอนารี (Quaternary) ช่วงอายุตั้งแต่ 1.18 ล้านปีเป็นต้นมา

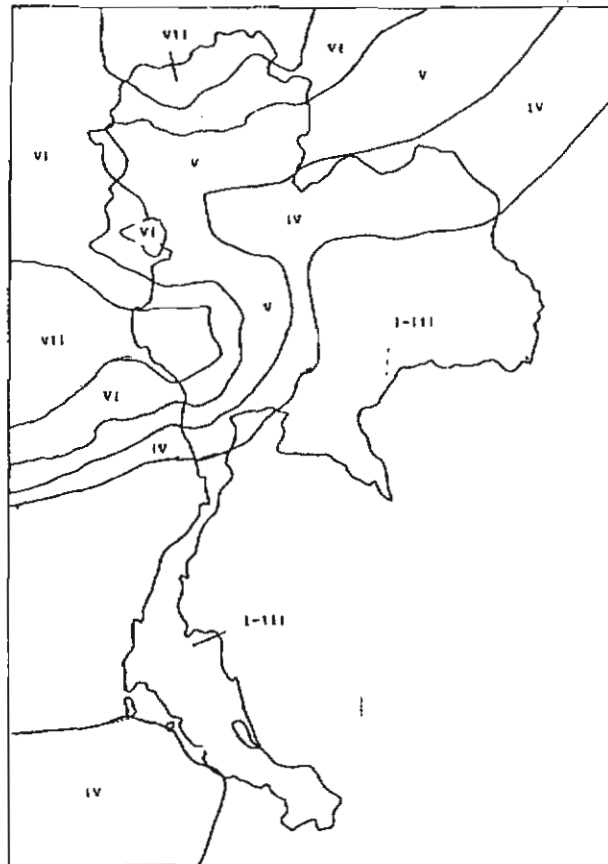
2.4 ความเข้มของแผ่นดินไหวในประเทศไทย

ในอดีตที่ผ่านมา แผ่นดินไหวในประเทศไทยไม่มีขนาดรุนแรงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง แต่ก็ทำให้โครงสร้างสั่นไหวจนรู้สึกได้ โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เชื้อขนขนาดใหญ่ อาคารสูง เป็นต้น เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งสำคัญที่เกิดขึ้น (ปณิธาน และ นภดล, 2536) ในประเทศไทย ได้แก่ แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 22 เม.ย. 2526 จุดศูนย์กลางอยู่ที่ อ.ศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งทำให้รู้สึกได้ค่อนข้างรุนแรงในกรุงเทพฯ และกาญจนบุรี แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 6 พ.ย. 2531 เกิดที่พรมแดนจีนและพม่า ซึ่งมีผลทำให้ประชาชนในอาคารสูงที่กรุงเทพฯ รู้สึกได้ เนื่องจากชั้นดินอ่อนมีผลขยายความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 29 ก.ย. และ วันที่ 1 ต.ค. 2532 เกิดที่พรมแดนไทยและพม่า ใกล้จังหวัดเชียงใหม่ ทำให้ประชาชนทั้งในอาคารเดี่ยวและอาคารสูงรู้สึกได้มาก ผนังก่ออิฐของอาคารสูงบางแห่งแตกร้าว ยอดฉัตรของพระธาตุดอยสุเทพหักลงมา จึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบโครงสร้างให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความเข้มของแผ่นดินไหวค่อนข้างสูง หรือในบริเวณที่มีความหนาแน่นของประชาชนและสิ่งก่อสร้างมาก จากความสัมพันธ์ของอัตราเร่งผิวดินสูงสุด และความเข้มในมาตราเมอร์แคลลีปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สามารถสร้างแผนที่ความเข้มของแผ่นดินไหว (Seismic intensity map) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยแปลงค่าความเข้มเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว (Coefficient of earthquake, K_s) เพื่อใช้ในการออกแบบลาดด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด ซึ่งในการนี้ได้นำค่าความเข้มของแผ่นดินไหวมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนและองค์ประกอบเขื่อนตามมาตรฐาน USSR (United States Bureau of Reclamation) โดยเฉพาะเขื่อนขนาดใหญ่

ตารางที่ 2.1 ความเข้มของแผ่นดินไหวในมาตราเมอร์แคลลีปรับปรุงที่มีต่อความรู้สึกและความเสียหาย (ปณิธาน, 2536)

Modified Mercalli Intensity Scale (1931, Wood and Neumann)	Acceleration or Coefficient of earthquake
I. Detected only sensitive instruments	0.01g
II. Felt by a few persons at rest, especially on upper floors, delicately suspended objects may swing	
III. Felt noticeably indoors but not always recognized as earthquake; standing autos rock slightly, vibration like passing a truck	
IV. Felt indoors by many, outdoors by few, at night some awaken, dishes, windows, doors disturbed, motor cars rock noticeably	
V. Felt by most people, some breakage of dishes, windows and plaster, disturbance of fall objects	0.05 g
VI. Felt by all, many frightened run outdoors, falling plaster and chimneys, damage small	
VII. Everybody runs outdoors, damage to building varies depending on quality of construction noticed by drivers of automobiles.	0.1 g
VIII. Panel walls thrown out of frames, fall of walls, monuments, chimneys, sand and mud ejected, drivers of autos disturbed	
IX. Buildings shifted off foundations, cracked, thrown out of plumb, ground cracked, underground pipes broken	0.5 g
X. Most masonry and frame structures destroyed, ground cracked, rails bent, landslides	
XI. Low structures remain standing bridge destroys, fissures in ground, pipes broken, landslides, rails bent	1.0 g
XII. Damage total, waves seen on ground surface, lines of sight and level destroyed, objects thrown into the air	

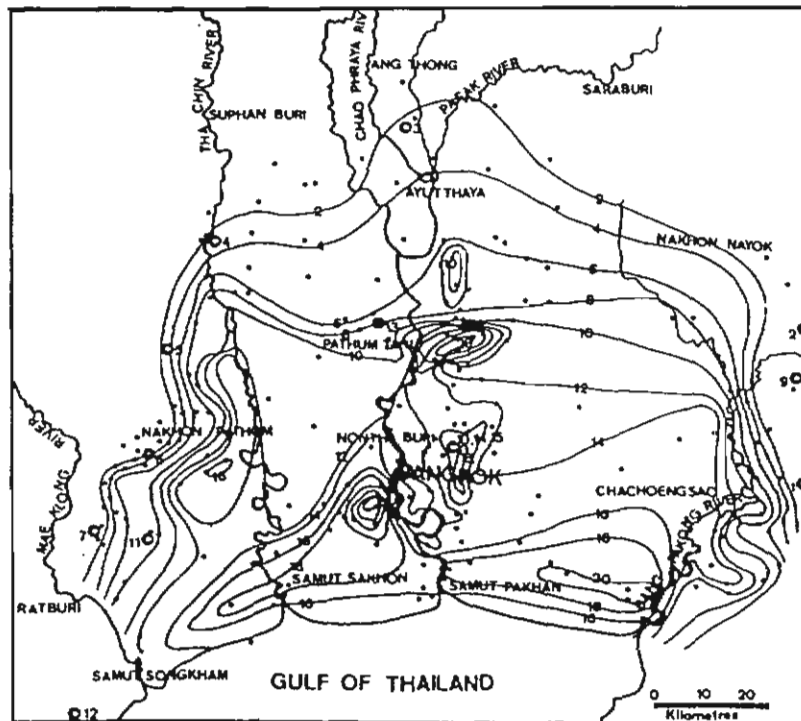
Approximate relationships earthquake intensity, and accelerations. (after Cimensky)



รูปที่ 2.6 แผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหว (Cimensky, 1931)

2.5 สภาพดินเหนียวกรุงเทพในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง

การพิบัติของถนน คันคลอง และบ่อขุดในภาคกลางส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของชั้นดินอ่อน ที่เรียกว่า “ดินเหนียวกรุงเทพ” ซึ่งเป็นชื่อที่ตั้งขึ้นโดย ชัย มุกตพันธ์ (Piencharoen และคณะ, 1976) ชั้นตะกอนดินเหนียวช่วงบนที่มีสีเทาหรือสีเทาเขียวกระจายอยู่ส่วนบนของที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างในพื้นที่หลายจังหวัดได้แก่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นครนายก ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา กรุงเทพฯ นนทบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร และสมุทรสงคราม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีอิทธิพลจากแม่น้ำสายใหญ่หลายสายคือ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำบางปะกง ดินเหนียวกรุงเทพเป็นดินตะกอนที่เกิดขึ้นในน้ำทะเลปากน้ำ (Marine Clay) มีความหนาของชั้นดินที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (สุวัฒน์ ดิยะไพรัช และคณะ, 2538; วิชาญ และคณะ, 2520) แต่เมื่อคิดเป็นความหนาโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 15 – 25 เมตร ตะกอนดินเหนียวกรุงเทพวางทับอยู่บนชั้นดินเหนียวเนื้อแข็ง ททราย และกรวด เป็นชั้นแยกกัน และปนกันอยู่บ้างเรื่อยลงไป เหนือชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพเป็นชั้นดินอยู่ในช่วงที่เรียกว่า Weathered zone หรือ Crustal zone ที่ได้รับอิทธิพลจากสภาพอากาศข้างบนตามธรรมชาติ มีความหนาประมาณ 3-5 เมตร ยกเว้นบริเวณใกล้ปากอ่าวไทยที่มีการตกตะกอนสะสมต่อเนื่องตลอดเวลา

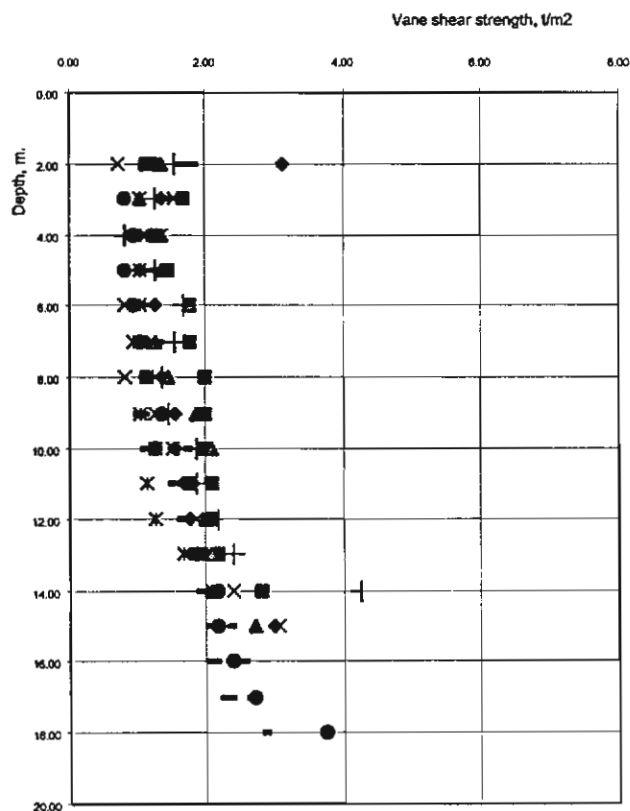


รูปที่ 2.7 พื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพปกคลุมอยู่ในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง (Nutalaya และ Rau, 1981)

การเกิดของชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพ คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล นั่นคือ ในขณะที่ระดับน้ำทะเลขึ้นสูง เกิดการตกตะกอนของเม็ดดินขนาดเล็ก คือ ขนาด Clay และ Silt และเมื่อน้ำทะเลลดลงรวมทั้งกระแสน้ำมีความเร็วมากขึ้น ก็จะกัดเซาะชั้นดินเหนียวที่ตกตะกอนแล้วให้หลุดออก และถูกพัดพาไปตกตะกอนแถบบริเวณปากอ่าว นอกจากนี้ ยังมีการตกตะกอนเนื่องจากน้ำพัดพามาจากบนพื้นดินปะปนอยู่ด้วย (Cox, 2511) ตะกอนดินเหนียวกรุงเทพถูกจัดในช่วงอายุไพลสโตซีน (Pleistocene) ตอนปลาย

ดินเหนียวกรุงเทพประกอบด้วยแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ได้แก่ แร่ Illite แร่ Montmorillonite และแร่ Kaolinite มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5.5 มีค่าความเหนียวนากระแสปิไฟฟ้างสูงมาก (สุวัฒน์ ดิยะไพรัช และคณะ, 2538) และปริมาณเกลือมีอยู่ประมาณ 10 – 20 กรัม/ลิตร ซึ่งมากกว่าในชั้นดินช่วง Weathered zone ที่มีเกลืออยู่ประมาณ 0 – 10 กรัม/ลิตร เนื่องจากการชะล้างออกไปโดยธรรมชาติแล้ว (วิชาญ และคณะ, 2520) จากการพิจารณาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพ พบว่า ความแข็งแรงมีค่าต่ำและเพิ่มสูงขึ้นตามความลึก มีสภาพเป็น Normally consolidated clay ที่มีค่า Overconsolidated ratio ใกล้เคียงหนึ่ง ค่า Undrained shear strength น้อยที่สุดประมาณ 0.6 t/m^2 และค่า Sensitivity อยู่ระหว่าง 8 ถึง 10 ตลอดจนถึงพบว่า ค่าของ Water content ประมาณ 70 – 150% และค่าของ Atterberg's limit, Plasticity index และ Liquidity index ในดินเหนียวกรุงเทพสูงกว่าในชั้น Weathered zone หรือ Crustal zone จึงทำให้ค่า

ความแข็งแรงของดินจะสูงสุดที่ผิวดิน และลดลงมาเรื่อยๆ จนถึงชั้นดินเหนียวกรุงเทพ (Marine soft Bangkok clay หรือ Bangkok clay) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดินส่วนนี้เป็นดินมีเปลือกบน ซึ่งเกิดการแข็งและหดตัวเนื่องจากความร้อนจากดวงอาทิตย์ และยังถูกชะล้างถูกรบกวนจากแรงภายนอกมากกว่าดินในระดับลึกลงไป จึงทำให้มีสภาพเป็นดินเหนียวที่มีค่า Overconsolidation ratio สูงกว่าของดินเหนียวกรุงเทพ



รูปที่ 2.8 ความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพตามระดับความลึก ที่ถนนร่วมพัฒนา เขตหนองจอก กรุงเทพฯ (กรุงเทพมหานคร, 2540)

2.6 ลักษณะการพิบัติของลาด

รูปแบบหรือลักษณะของการพิบัติมีส่วนที่สำคัญมากที่จะนำมาพิจารณาในการใช้ทฤษฎีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด สำหรับการคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย โดยมีปัจจัยทำให้เกิดการพิบัติ หรือการเคลื่อนพังของลาด ทั้งเป็นปัจจัยภายในที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของดินลดลง และปัจจัยภายนอกที่ทำให้ค่าหน่วยแรงในดินเพิ่มขึ้น (Terzaghi, 1950) ซึ่งได้มีการจัดทำเป็นรายละเอียดของแต่ละปัจจัย (Walker และคณะ, 1987) ดังต่อไปนี้

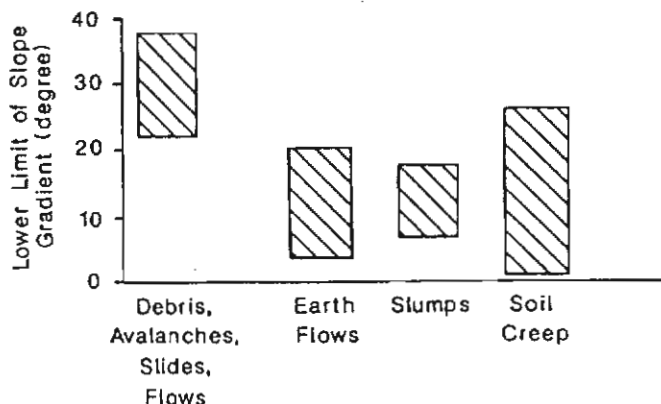
1. สภาพอากาศ

สภาพอากาศที่สำคัญที่สุดในการทำให้เกิดการเคลื่อนพังของลาด คือ สภาพฝนตก โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำฝนทั้งปริมาณของน้ำฝนที่สะสมในช่วงเวลานาน และปริมาณของน้ำฝนในช่วงเวลาสั้นที่ทำให้เกิดพายุหรือฝนตกหนักที่มีผลกระทบต่อความถี่ของการเกิดการพิบัติของลาด และการทำนายการเกิดการพิบัติของลาดจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งในการนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ Nilsen และ Turner(1975), Lumb (1975), Fukaska (1978), Jahns (1978), Rogers และ Selby (1980), Caine (1980), Crozier (1984), และ Johnson และ Sitar (1990) ยกตัวอย่างเช่น Lumb (1975) ได้เสนอแนะกราฟแสดงระดับอันตรายของการพิบัติที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำฝน 1 วันกับปริมาณน้ำฝน 15 วัน สำหรับใช้ในการทำนายการเกิดการพิบัติในประเทศอังกฤษ, Jahns (1978) ได้เสนอแนะว่าขนาดพื้นที่การเคลื่อนพังของลาดในกรณีที่เกิดในพื้นที่ที่มีความชื้นจากน้ำฝนในช่วงระยะเวลายาว จะมีความยาวและความลึกมากกว่าในกรณีที่เกิดพายุในช่วงเวลาสั้น นั่นคือเกิดเป็นการเคลื่อนพังแบบ Shallow slide

2. สภาพความชื้นของลาด

โดยทั่วไป มักพบว่าลาดมีความชื้นมากขึ้น แนวโน้มที่จะเกิดการพิบัติก็จะมีความชื้นได้แก่ Crozier และคณะ (1980) พบว่า การพิบัติเริ่มเกิดขึ้นใน London clay เมื่อความชื้นมีค่าเท่ากับ 10 องศา ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์ เมื่อความชื้นมีค่าเท่ากับ 17 องศา, Pilgrim และ Conacher (1974) พบว่าการพิบัติของลาดดินแบบ Flows เริ่มเกิดขึ้นใน Chittering Vallery ของ Western Australia เมื่อความชื้นมีค่ามากกว่า 15 องศา, Rice และคณะ (1969) พบว่า ในสภาพภูมิอากาศปกติ การพิบัติเริ่มเกิดขึ้นในแถบเทือกเขาของ Southern California เมื่อความชื้นมีค่าเท่ากับ 38 องศา แต่จะเริ่มเกิดขึ้นที่ความชื้นเท่ากับ 31 องศา ในกรณีที่เกิดฝนตกหนัก จากสภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในปีค.ศ. 1969 เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่สามารถกำหนดค่าต่ำสุดของความชื้นของลาดที่จะเกิดแต่ละรูปแบบของการพิบัติของลาด ได้แก่ Sidle และคณะ (1985) ได้จัดทำกราฟแสดงค่าต่ำสุดของความชื้นของลาดที่จะเกิดรูปแบบการพิบัติดังแสดงในรูปที่ 2.9, Blong (1974) พบว่า ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์ การพิบัติแบบ Slides เกิดขึ้นเมื่อความชื้นมีค่าระหว่าง 17 องศา ถึงค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.8 องศา การพิบัติแบบ Flows เกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นมากขึ้น คือมีค่าอยู่ระหว่าง 25 องศา ถึง มากกว่าหรือเท่ากับ 40 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 องศา



รูปที่ 2.9 ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพังถล่ม (Sidle และคณะ, 1985)

3. สภาพพืชปกคลุมลาด

O' Loughlin (1974), Gray และ Leiser (1982), Sidle และคณะ (1985), และ Greenway (1987) ได้เสนอผลกระทบต่อนิเวศวิทยาของลาดจากสภาพพืชปกคลุมลาด ทั้งในด้านชลศาสตร์ และด้านกลศาสตร์ในการยึดเหนี่ยวดินให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

4. ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว สามารถทำให้เกิดการพังถล่มของลาดได้ในสามแนวทางคือ

ก. ทำให้เกิดแรงในแนวราบและแนวตั้งในมวลดิน โดยเฉพาะแรงในแนวราบที่อาจจะมีค่ามากเท่ากับ $0.5g$ (ค่า g เป็นอัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง) จะเป็นการกระจายของแรงในลาดเขาที่ทำให้ลาดดินมีความชันมาก

ข. กรณีที่เป็นมีสภาพการสั่นสะเทือนเป็นแบบ Rapid repeated loading ทำให้เพิ่มแรงดันของเหลวในช่องว่างของมวลดิน ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของดินลดลง โดยเฉพาะจะเกิดขบวนการ Liquefaction เป็นผลต่อเนื่องต่อไป

ค. ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว อาจจะทำให้ลดค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

นอกจากนี้ ยังมีการพิจารณารูปแบบของการพังถล่มของลาดจากขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ตามที่ Keefer (1984) และ Sidle และคณะ (1985) ได้สรุปรูปแบบตามขนาดน้อยที่สุดถึงมากที่สุดไว้ว่า

ก. รูปแบบ Rock falls, Rock slides, Soil falls, Soil slides เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่าน้อยที่สุด

ข. รูปแบบ Slumps, Earthflows เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่ามากขึ้น

ค. รูปแบบ Lateral spreads, Debris flows เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่ามากที่สุด

5. ลักษณะทางธรณีวิทยา และธรณีเทคนิค

ลักษณะทางธรณีวิทยาและธรณีเทคนิคของแต่ละพื้นที่ มีอิทธิพลสำคัญมากต่อการเกิดพิบัติของลาด (Moser และ Hohensinn, 1983; Popescu, 1996; Vaunat และคณะ, 1996) ซึ่งได้แก่

ก. ชนิดของดินที่เกิดจากการกัฏกร่อนของหิน (Weathered rocks) อาทิเช่น ดินเหนียว ซึ่งเกิดจาก Claystones, Mudstones, Shales, และ Basalts จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดินได้มากกว่าดินชนิด Sandy soils ซึ่งเกิดจาก Sandstones; ดินเกิดจากการกัฏกร่อนของหิน Granite เป็นกลุ่ม Silty sand, Clayey sand soils จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดิน

ข. ขนาดความแตกต่างของความชื้นได้ของน้ำในดินที่เกิดจากการกัฏกร่อนของหิน และในดินที่เป็น Residual soils ซึ่งเป็นชั้นดินด้านล่าง นั่นคือเมื่อพบว่า Residual soils มีความชื้นได้ของน้ำต่ำกว่าดินที่เกิดจากการกัฏกร่อนของหิน แรงดันน้ำจากการไหลของน้ำในดินอาจจะเกิดขึ้นและทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดิน อาทิเช่น Residual soil ของหินแกรนิต มีลักษณะอุ้มน้ำได้ดี ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดการพิบัติได้ โดยเฉพาะในช่วงฝนตกชุก (Brand และคณะ, 1984) เป็นต้น

ค. สภาพโครงสร้างทางธรณีวิทยา แบบ Fold และ Foliation ทำให้ค่าความแข็งแรงต่ำ การเฉือนระหว่างชั้นดินหรือหินจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะระหว่างชั้น Claystones และ Sandstones จะเกิดการเฉือนขึ้นในชั้น Claystones

ง. ในลาดดิน ลักษณะทางธรณีเทคนิคมีอิทธิพลที่สำคัญต่อการเกิดการพิบัติ อาทิเช่น กรณีใน Granitic soil พบว่า สภาพ Fissures ในดิน ค่าสัมประสิทธิ์ของการบวมตัว และสัมประสิทธิ์ของความชื้นได้ของน้ำในดิน เป็นปัจจัยภายในดินที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด โดยมีปัจจัยภายนอก คือปริมาณน้ำฝนกระตุ้นให้เกิดการพิบัติ (Brand และคณะ, 1984), กรณีของ Clayey soil ค่า Liquidity index ในดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบของการเคลื่อนพังของลาดดิน (Leroueil และคณะ, 1983b) เป็นต้น

จ. สภาพของการเคลื่อนพังของลาดที่เคยเกิดขึ้นและยังมีอยู่ อาจเป็นสาเหตุใหญ่ในการเกิดการพิบัติของลาดที่ยังมีสภาพเลื่อนไถลอยู่

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่สามารถทำให้เกิดการพิบัติของลาด คือการกระทำของมนุษย์ (Rib และ Liang, 1978) อาทิเช่น การขุดดิน การตัดไหล่เขา เป็นต้น และมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาดได้แก่ Barisone และ Bottino (1990) ได้ศึกษาการพิบัติของลาด โดยเฉพาะในลักษณะของ Debris flow เนื่องจากอิทธิพลจากลักษณะทางธรณีเทคนิคของดิน ประกอบกับสภาพอากาศและสภาพทางชลศาสตร์, Liener และคณะ (1996) ได้จัดทำระดับความเสี่ยงต่อการพิบัติของลาดของแต่ละพื้นที่เป็นแผนที่ โดยพิจารณาอิทธิพลจากลักษณะทางธรณีเทคนิคของดิน และความชันของลาด, และ Popa และ Fetea (1996) ได้จัดทำความน่าจะเป็น

ของการพิบัติของลาด โดยพิจารณาอิทธิพลจากประเภทของดิน สภาพของการกัดเซาะและระดับน้ำใต้ดิน ประกอบกับการกระตุ้นจากความสั่นสะเทือน เป็นต้น

การจำแนกลักษณะของการพิบัติของลาดที่จะกล่าวในที่นี้ยังไม่รวมถึงลักษณะการพิบัติแบบ Creep องค์ประกอบที่ใช้ในการจำแนกมีด้วยกันหลายอย่าง อาทิเช่น ประเภทของดินหรือหิน ความชันของลาด รูปร่างของพื้นผิวของการเคลื่อนพัง เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการจำแนกด้วยกันหลายวิธี โดยที่แต่ละวิธีมีองค์ประกอบที่ใช้ในการจำแนกแตกต่างกัน

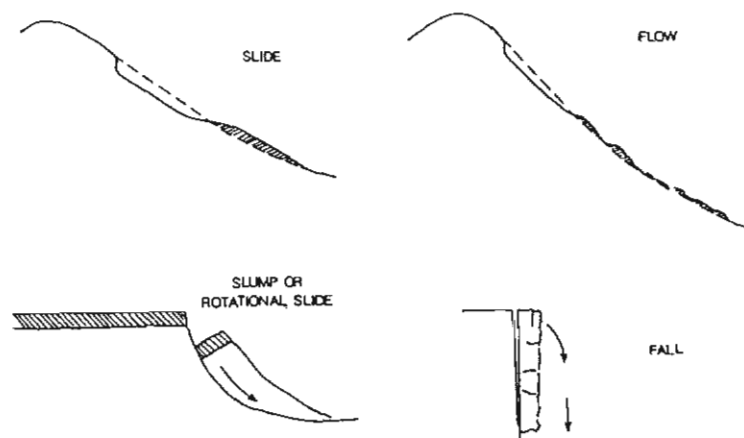
การจำแนกชนิดของการพิบัติของลาดดินอย่างง่าย ๆ โดย Blong (1973) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ Slides, Slumps, Flows และ Falls โดยพิจารณาจากรูปร่างของการพิบัติ ซึ่งได้นำมาพัฒนาต่อโดย Jahns (1978) ด้วยการแสดงค่าความเร็วของการเคลื่อนตัวของมวลดินในลาดของแต่ละลักษณะของการพิบัติของลาด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 คือ

1. Slides เมื่อผิวเคลื่อนพังมีลักษณะเป็นพื้นระนาบขนานกับผิวหน้าลาดดิน อัตราการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วง 0.06 เมตร/ปี ถึง 0.3 เมตร/นาทีก

2. Slumps หรือ Rotational Slides เมื่อผิวเคลื่อนพังเป็นรูปโค้งหงายขึ้นคล้ายตกด้วยซ้อน ความลึกของผิวเคลื่อนมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของการเคลื่อนพัง ลักษณะของการพิบัตินี้เกิดขึ้นในงานขุดดินและงานถมดินบนชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นส่วนใหญ่และเกิดในลาดเขาตามธรรมชาติ โดยมีอัตราการเคลื่อนตัวช้ากว่าประเภทแรกอยู่ในช่วงระหว่าง 0.06 เมตร /ปี ถึง 1.5 เมตร/วัน

3. Flows เกิดในลักษณะผิวเคลื่อนบางและตื้น เป็นผิวขนานกับผิวหน้าของลาดดิน มีการเคลื่อนตัวเป็นทางยาวและวัสดุชุ่มน้ำหรือมีความชื้นสูงจึงเคลื่อนตัวในลักษณะการไหลลงตามลาดเขาอย่างรวดเร็วในอัตราการเคลื่อนตัวเป็น 0.3 เมตร/นาทีกถึงมากกว่า 3 เมตร/นาทีก

4. Falls เกิดขึ้นในลักษณะชิ้นส่วนของมวลดินหรือหินแตกแยกออกจากชิ้นส่วนหลักแล้วร่วงหล่นหรือกลิ้งลงตามหน้าผาหรือไหล่เขา โดยมีอัตราการเคลื่อนตัวเร็วมากในช่วง 1.0 เมตร/วินาทีถึงมากกว่า 100 เมตร/วินาที

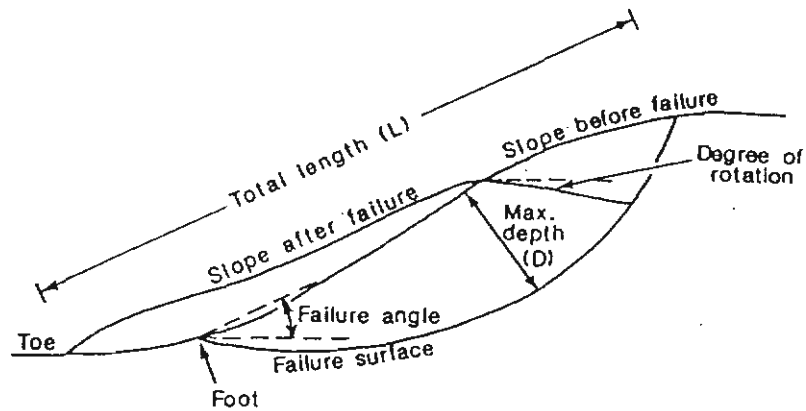


รูปที่ 2.10 การจำแนกการเคลื่อนพังโดยพิจารณาจากขนาดของการเคลื่อนพังของลาด (Blong, 1973)

การจำแนกโดยวิธีของ Skempton, 1953; Croszier, 1973; Selby, 1967; East, 1978 (Walker และ Fell, 1987) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ Slides Flows และ Slumps โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างระยะความลึกของพื้นผิวการเคลื่อนที่ (D) และระยะความยาวของการเคลื่อนที่ (L) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.11

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วน D/L สำหรับแต่ละการพังทลายของลาด (Skempton, 1953; Selby, 1967; Croszier, 1973; และ East, 1978)

ลักษณะการพังทลายของลาด	D/L (%)
Slides	5 - 10
Flows	0.5 - 3.0
Slumps	15 - 30



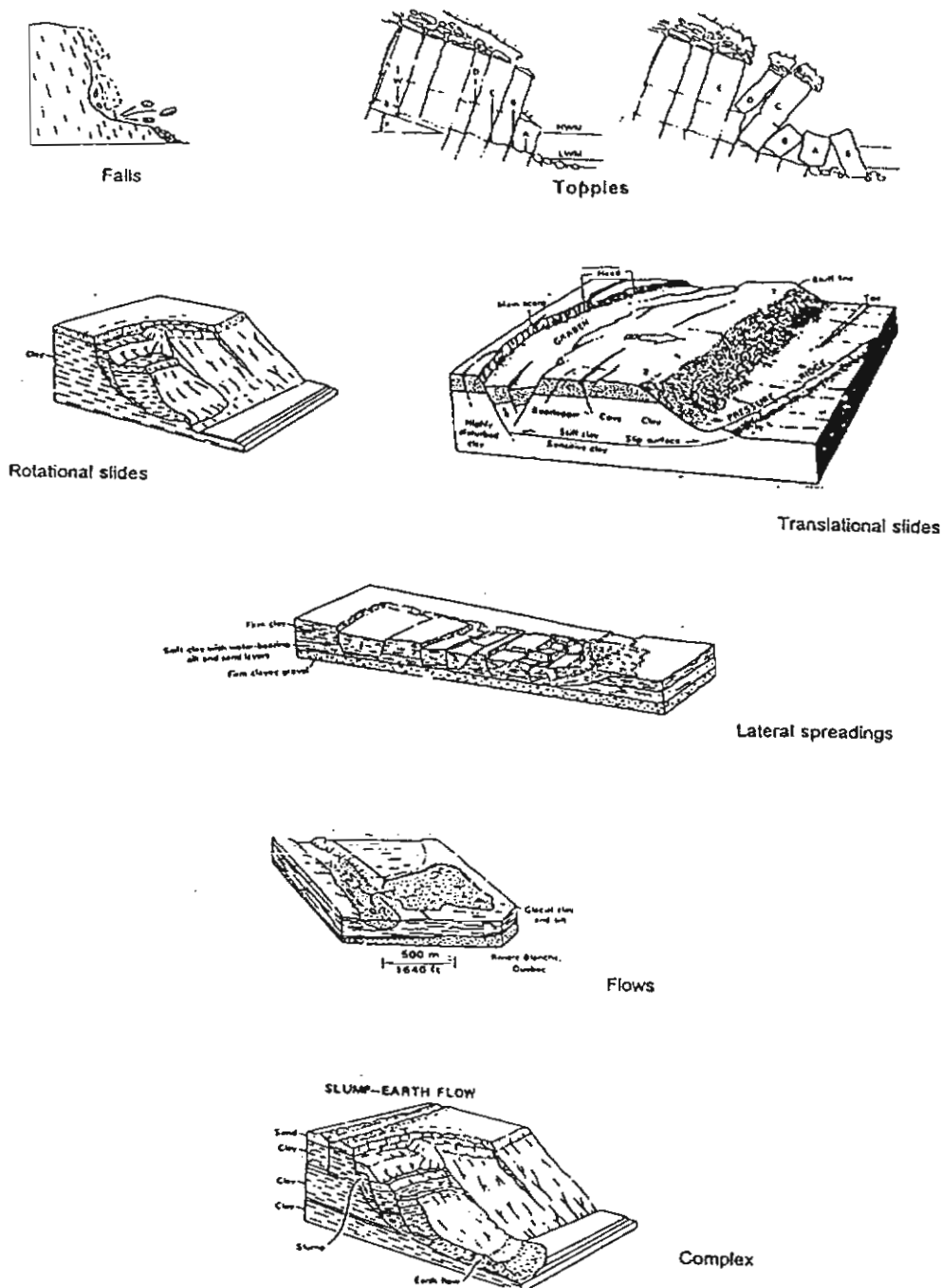
รูปที่ 2.11 การจำแนกการเคลื่อนพังโดยพิจารณาค่า D/L (Hansen, 1984)

การจำแนกโดยวิธีของ Varnes ซึ่งอธิบายในรายงานของ Transportation Research Board, Special Report 176 "Landslides; Analysis and Control" (Varnes, 1978) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เป็นที่นิยมค่อนข้างกว้างขวางเนื่องจากมีรูปในลักษณะสามมิติที่สามารถประกอบคำอธิบายให้เข้าใจได้ง่าย ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทั้งยังแบ่งชนิดของวัสดุที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ประเภทคือ ดิน ดินปนหินและหิน Varnes ได้จำแนกประเภทของการพิบัติออกเป็น 6 ประเภท คือ

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาด โดยวิธีของ Varnes (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	ROTATIONAL	rock slump	debris slump	earth slump
	SLIDES	a. rock block slide	debris slide	earth slide
		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		

1. การร่วงหล่น (Falls) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุที่เป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นก้อนหินร่วงหล่นลงมาจากหน้าผา มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 3×10^{-3} m./sec.



รูปที่ 2.12 ลักษณะการพังทลายของแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ จำแนกโดย Varnes (Varnes, 1978)

2. แบบกลิ้งไปข้างหน้า (Topples) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (Falls) หรือแบบเลื่อนไถล (Slides) ได้ต่อไป

3. แบบเลื่อนไถล (Slides) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนพังของมวลวัสดุในรูปแบบของการเลื่อน ซึ่งยังถูกจำแนกย่อยเป็นอีก 2 รูปแบบคือ

3.1 แบบ Rotational Slides มีลักษณะพื้นผิวของการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้ง โดยทั่วไปมักเกิดในสภาพชั้นดินเนื้อเดียว (Homogeneous soil) และในสภาพของงานคันดินหรือดินถมบนชั้นดินอ่อน

3.2 แบบ Translational Slides มีลักษณะพื้นผิวของการเคลื่อนพังเป็นผิวระนาบ โดยทั่วไปทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกจำกัดไปตามระนาบของผิวดินอ่อนหรือผิวระนาบที่เป็น Fault หรือเป็น Joint เป็นต้น

4. แบบเคลื่อนตัวขยายตัวไปด้านข้าง (Lateral spreads) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวเป็นการขยายตัวด้านข้างของมวลวัสดุ การเคลื่อนที่แบบนี้มักพบในดินประเภท Sensitive Silt and Clay ที่มีการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง 3×10^{-5} m./sec. แต่ถ้าพบในชั้นหิน อัตราการเคลื่อนที่จะน้อยกว่า 3×10^{-9} m./sec.

5. แบบไหล (Flows) การเคลื่อนตัวแบบไหล มักพบในวัสดุที่ไม่มีการยุบอัดตัว มีลักษณะการเคลื่อนตัวในรูปแบบของการไหลของของเหลวที่มีความหนืดชานกับแนวลาดเดิม

6. แบบ Complex มีลักษณะของการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกัน ตัวอย่างเช่น กรณีเกิดการพังทลายของลาดเขาในบริเวณ Rugged Mountain ที่ Elm ในประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ที่มีรูปแบบของการเคลื่อนพังเป็นแบบ Complex ที่ประกอบด้วย Rock Slide, Rock fall และ Debris Flow ก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิตคนประมาณ 115 คน เป็นต้น

การจำแนกที่มุ่งเน้นถึงการพิจารณาจากลักษณะทางธรณีเทคนิคของดินภายในลาด มีอยู่ 2 ระบบ คือ

1. การจำแนกโดยวิธีของ Hutchinson (1978) จำแนกลักษณะของการพิบัติของลาดโดยพิจารณาจากประวัติของการเคลื่อนพังของลาด และระยะเวลาของการเกิดการเคลื่อนพัง

2. การจำแนกโดยวิธีของ Sassa (1985) จำแนกลักษณะของการพิบัติของลาดโดยพิจารณาจากลักษณะทางธรณีเทคนิคของวัสดุภายในลาดนั้นคือ ขนาดของเม็ดดิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ Fresh bedrock Fractured rock Sandy soil และ Clayey soil, และรูปแบบการเคลื่อนที่เกิดขึ้นภายในลาด ซึ่งแบ่งออกเป็น Peak slides Residual slides Liquefactions และ Creep

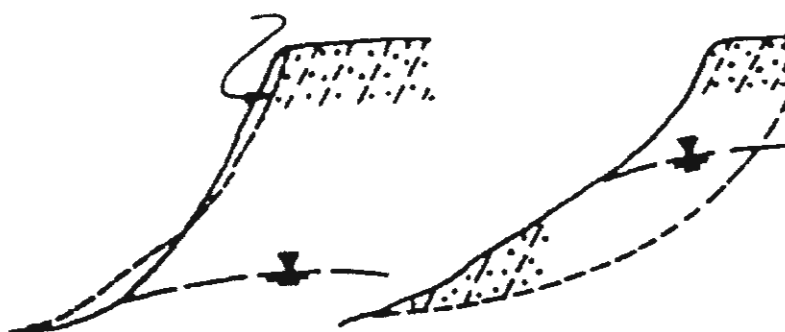
นอกจากนี้ DM-7.1 (1982) ยังได้แสดงตัวอย่างของลักษณะของการพิบัติของลาดดินธรรมชาติในแต่ละชนิดของดินและลักษณะของชั้นดินภายในลาดดังนี้คือ

1. Homogeneous soil slopes ของดินแต่ละกลุ่มที่แบ่งออกได้เป็น

1.1 กลุ่มดินเหนียว ที่มีค่าความยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) ไม่เป็นศูนย์ มีลักษณะของพื้นผิวการเคลื่อนพังใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลม มีความลึกของพื้นผิวดันและมีรอยแตกที่เรียกว่า Tension cracks เกิดขึ้นที่ระดับผิวดิน ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินต่ำมาก ความลึกของพื้นผิวมีค่าน้อยมาก และลักษณะของพื้นผิวเกือบเป็นเส้นตรงหรือมีความโค้งน้อย และในกรณีที่ระดับน้ำสูง ความลึกของพื้นผิวมีค่ามากขึ้นและลักษณะของพื้นผิวใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลม โดยมีตำแหน่งของพื้นผิวอยู่ในระดับลึกประมาณที่เชิงของลาด (Toe slope) ดังแสดงในรูปที่ 2.13

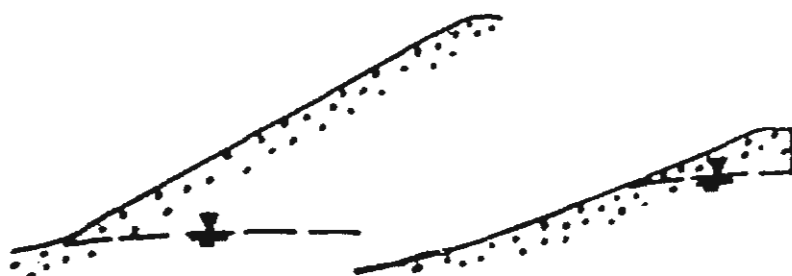
(ก) ระดับน้ำใต้ดินต่ำ

(ข) ระดับน้ำใต้ดินสูง



รูปที่ 2.13 สภาพการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มดินเหนียวที่มีค่าความยึดเหนี่ยว (DM-7.1,1982)

1.2 กลุ่มดินเหนียว ที่ไม่มีค่าความยึดเหนี่ยว ระดับเสถียรภาพ มักจะได้รับอิทธิพลจากระดับน้ำใต้ดิน และมุมเสียดทานภายในดิน นั่นคือ ในกรณีที่ระดับน้ำต่ำ การพิบัติของลาดเกิดขึ้นในลักษณะของการเลื่อนไถลตามพื้นผิวของลาดจนมุมชันของลาดมีค่าเท่ากับมุมเสียดทานภายในดิน และในกรณีที่ระดับน้ำสูง การเลื่อนไถลตามพื้นผิวของลาดจะหยุดเมื่อมุมชันของลาดมีค่าโดยประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของมุมเสียดทานภายในดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



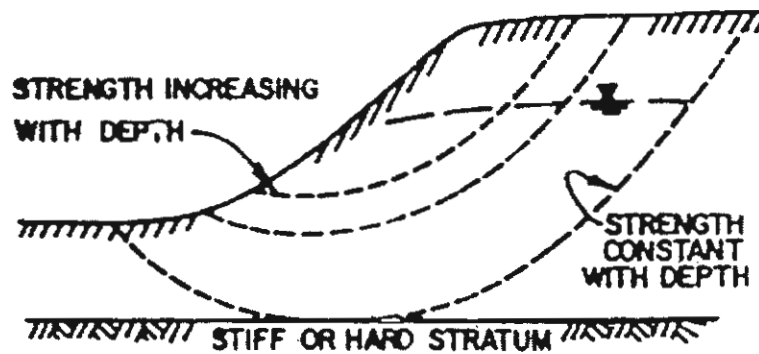
(ก) ระดับน้ำต่ำ

(ข) ระดับน้ำสูง

รูปที่ 2.14 สภาพการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มดินเหนียวที่ไม่มีค่าความยึดเหนี่ยว (DM-7.1,1982)

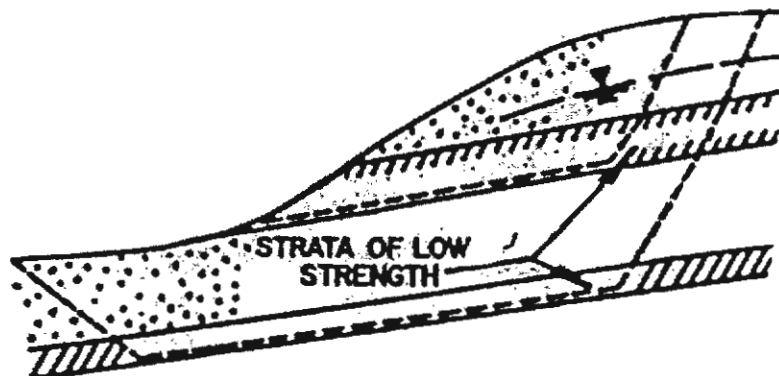
1.3 กลุ่มดินเม็ดละเอียดคือ ดินเหนียวมีสภาพประวัติการยุบอัดตัวเป็น Normally to Slightly consolidated clay วางอยู่บนดินแข็งมาก (Firm soil or Hard stratum) มีลักษณะของพื้นผิว

การเคลื่อนที่ใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลมที่ลึก โดยมีตำแหน่งของพื้นผิวขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของลาดและค่าความยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



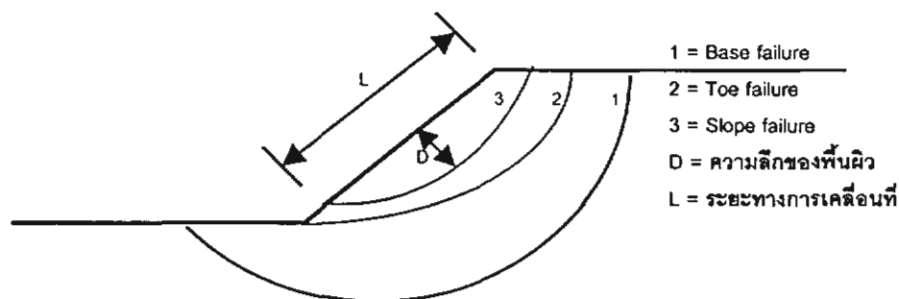
รูปที่ 2.15 สภาพการเคลื่อนที่ของลาดดินเนื้อเดียวในกลุ่มเม็ดละเอียดซึ่งวางบนชั้นดินแข็ง (DM-7.1,1982)

2. Stratified soil slopes ลักษณะของพื้นผิวการเคลื่อนที่ประกอบด้วยส่วนของที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมจากระดับผิวดินลงมา แล้วต่อด้วยพื้นผิวระนาบในชั้นดินอ่อน หรือประกอบด้วยพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นลิ้นคคือลิ้นส่วนที่เป็น Active blocks, ส่วนที่เป็น Passive blocks, และส่วนที่อยู่ระหว่าง Active กับ Passive ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยที่ตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับขนาดความแตกต่างของความแข็งแรงของดินแต่ละชั้น และตำแหน่งของชั้นดินอ่อน



รูปที่ 2.16 สภาพการเคลื่อนที่ของลาดในดินหลายชั้น (DM-7.1,1982)

ตำแหน่งของพื้นผิวของการเคลื่อนที่ของลาดมีด้วยกัน 3 ตำแหน่งได้แก่ Base Failure Surface, Toe Failure Surface และ Slope Failure Surface ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะเกิดขึ้นอยู่ในตำแหน่งใดขึ้นกับสภาพของดิน ขนาดหน้าตัดของลาด และระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของพื้นผิวของการเคลื่อนที่ของลาด (Fellenius, 1936)

การวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินในฐานความรู้ของระบบ พิจารณาจากระบบหรือวิธีการจำแนกโดย Varnes (1978) โดยมีการบ่งบอกตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพัง ดังแสดงนิยามในรูปที่ 2.17

2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด

เทคนิคที่นิยมใช้มานานหลายสิบปีในแต่ละวิธีของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด มาจากพื้นฐานของขีดจำกัดสมดุล (Limit equilibrium) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สำหรับแต่ละรูปร่าง พื้นผิวของการเคลื่อนพัง ได้แก่ พื้นผิวระนาบ พื้นผิวเป็นส่วนโค้งของวงกลม เป็นต้น ดังแสดงลักษณะของแต่ละวิธีในตารางที่ 2.4 ซึ่งวิธีของ Culmann (1866) เป็นวิธีที่มีมานานแล้ว เมื่อสมมุติพื้นผิวของการเคลื่อนพังของลาดเป็นพื้นผิวระนาบ และต่อมาประมาณต้นปีค.ศ. 1920 เริ่มต้นศึกษากรณีการพังทลายของทางรถไฟที่เกิดขึ้นเป็นหลายกรณีในประเทศสวีเดน ซึ่งเป็นการพังทลายเนื่องจากงานตัด (Cuts) ในดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีสภาพการอัดตัวแบบ Normally Consolidated และ Slightly Overconsolidated และสรุปผลของการศึกษาในปีค.ศ. 1927 โดย Fellenius ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหของการพังทลายของลาดสภาพที่ไม่มีการไหลผ่านของน้ำด้วยการวิเคราะห์บนพื้นผิวการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม ซึ่งเป็นเทคนิคถูกนำมาใช้ต่อเนื่องและพัฒนาเป็นวิธีการวิเคราะห์วิธีอื่นๆ ได้แก่ Friction circle method, Taylor chart, Simplified Bishop method, Wedges เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของแต่ละวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Hunt, 1986)

Method	Basis	Application	Reference
Planar failure: Infinite slopes			
Infinite slope		Homogeneous sands soil over rock, weathered clay sheles	Taylor (1948) Lambe and Whitman
Circular failure: Effective stress			
Friction circle	Graphical Charts	Simple homogeneous	Taylor (1973),
Friction circle	Mathematical Charts	slopes	(1948)
Ordinary slices	Calculators	Simple homogeneous	Cousins (1978)
	Mathematical (Programable calculator,PC's)	slopes	Fellenius (1936)
Modified Bishop		Non homogeneous slopes	
			Bishop (1955)
		Non homogeneous slopes	(preferred method)
Circular failure: Total stress			
Friction circle	Charts	Simple homogeneous	Taylor (1973),
		slopes $c_u, \phi_u; \phi = 0$	(1948)
Ordinary slices	Mathematical	Non homogeneous slopes	Janbu (1954)
Modified Bishop	Mathematical	Non homogeneous slopes	Fellenius (1936)
			Bishop (1955)
Planar failure : Wedges and Blocks			
Simple Wedge	Mathematical	Homogeneous clay slopes	Culmann (1866)
Tuu blocks	Graphical	Sloping core earth dam	Seed and Sultan
Tuu or three blocks	Mathematical	Soilor rock slopes	(1967)
	Graphical		Huang (1983)
Multiple blocks	Mathematical	Non homogeneous slopes	
Multiple blocks	Mathematical	Non homogeneous slopes	NAVFAC (1982)
			Janbu (1973)
Irregular failure surfaces			
Slice method	Mathematical (needs large computer)	Non homogeneous slopes	Morgenstern and Price (1965)
	Mathematical (Programable calculators,PC's)		
Slice method		Non homogeneous slopes	Janbu (1973)

ปัจจุบันวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน มักพิจารณาจากหลักการของขีดจำกัดสมดุล กล่าวคือ พิจารณาจากสมดุลแรง (Force equilibrium) และสมดุลโมเมนต์ (Moment equilibrium) โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการเป็นการสมมุติลักษณะของพื้นผิวการเคลื่อนพัง (Failure surface) ในมวลดิน และคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงถึงระดับเสถียรภาพของแนวลาดเอียงจนพบค่าต่ำสุดของส่วนปลอดภัย โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพังไปเรื่อย โดยที่วิธีการคำนวณค่าส่วนปลอดภัยมีด้วยกันหลายวิธีตามวิธีการวิเคราะห์ซึ่งมีอยู่หลายวิธี แต่วิธี Method of slices เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด และเนื่องจากในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดต้องพบกับสภาพของ Statically indeterminate จึงมีการกำหนดข้อสมมุติฐานเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี ดังแสดงในตารางที่ 2.5

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัย คืออัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้

$$F.S. = \tau_r / \tau \quad (2.1)$$

เมื่อ F.S. = ค่าอัตราส่วนปลอดภัย

τ_r = กำลังความแข็งแรงของมวลดินบนผิวเคลื่อน

τ = หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งเพียงพอทำให้มวลดินนั้นสมดุล

2.7.1 วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite slope)

วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ เป็นวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้กับรูปร่างของพื้นผิวการเคลื่อนพังที่มีความลึกของพื้นผิวการพังน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของพื้นผิวการพัง คือมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ ผิวการเคลื่อนพังมักจะวางตัวขนานกับผิวลาด โดยที่สามารถเขียน Free body และ Force diagram ของแต่ละสภาพของลาดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และเมื่อพิจารณาสมดุลของแรงระหว่างแรงต้านทานกับแรงจุดลง จะสามารถคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยได้ดังนี้

1. กรณีเป็น Cohesionless soil ($c = 0$) เช่น clean sand เป็นต้น
เมื่อเป็นลาดดินแห้ง

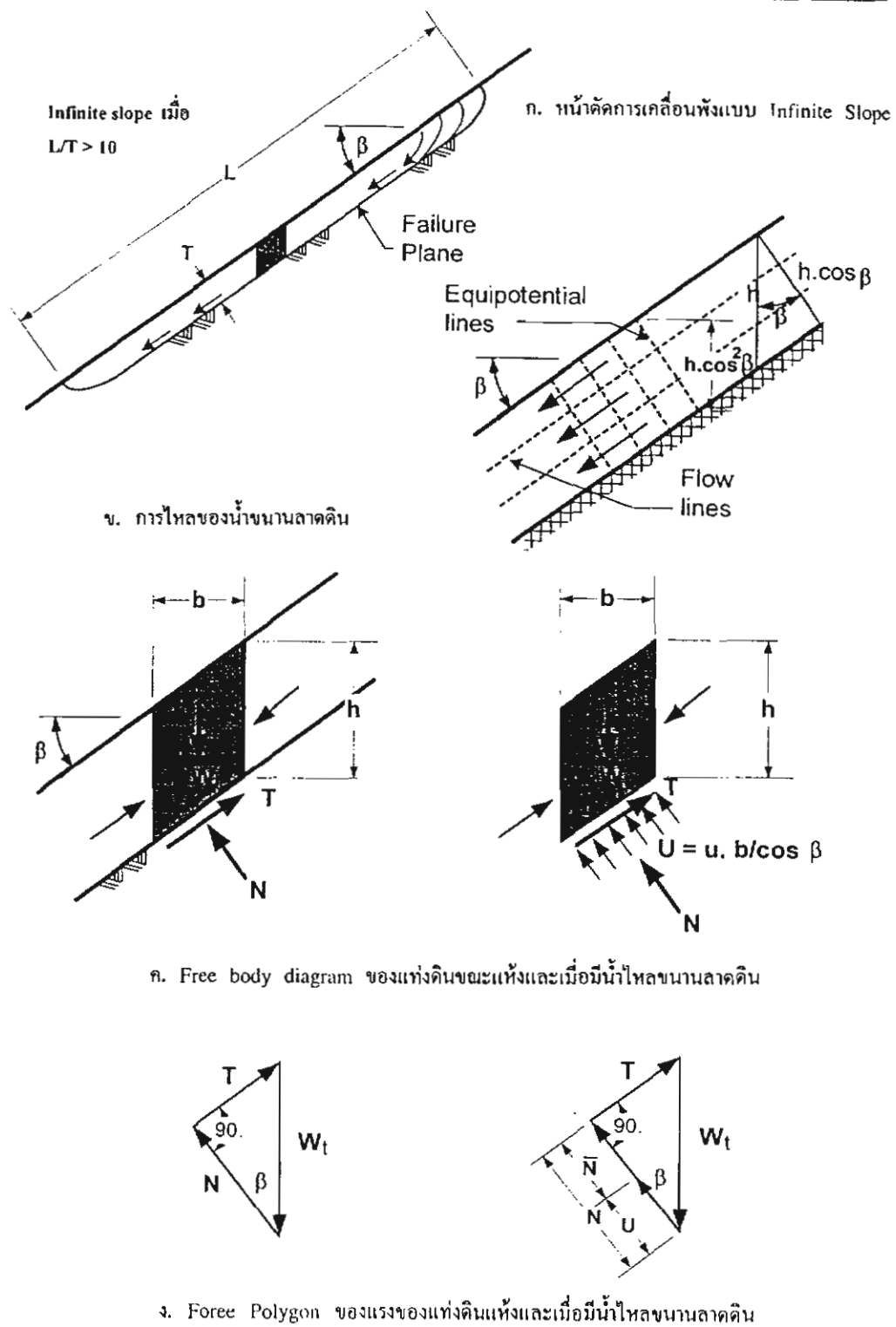
$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (2.2)$$

เมื่อเป็นลาดดินจมใต้น้ำ

$$F.S. = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพื้นฐานที่จำกัดสมมติ (Hunt, 1986)

Failure Surface	Method	Assumptions	Geologic conditions
Straight line	Infinite slope (Resal, 1910)	Constant slopes with unlimited extent small compared to length of failure surface	- Cohesionless soils - Residual or colluvial soils over shallow rock - Stiff fissured clay sand marine shells in the highly weathered zone
	Wedge (Hock and Bray, 1977)	Limited slope: Sliding block or blocks with lateral forces	- Sliding block - Interbedded dipping rock or soil - Faulted or slickensided material
	(Seed and Sultan, 1967)		- Stiff to hard, intact cohesive soil, vertical to very steep slope - Slidehill fills - Stratified natural soils and zoned earth dams
Circular arc	Slices (Fellenius, 1936)	Lateral forces on each side of slice are equal	- Thick residual or colluvial soil - Soft marine of clay shales - Soft to firm cohesive soil
	Simplified Bishop (Bishop, 1955)	Total force system acting on sides of slices considered	- Stratified soils: natural or on dam - Embankments over soft ground - Slidehill fills
	Friction circle (Taylor, 1948)	Resultant acting on rupture are tangential to a concentric circle of radius $R \sin \phi$	- Homogeneous, isotropic slopes and embankment



รูปที่ 2.18 รูปแบบของผิวการเคลื่อนที่, Free body และ Force diagram ในลักษณะเป็นแผ่นบาง (วรากร,2542)

เมื่อเป็นลาดดินที่มีน้ำไหลขนานกับผิวลาด

$$F.S. = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w) \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (2.4)$$

2. กรณีเป็นดินที่มีทั้งค่า cohesion c และ Angle of internal friction (ϕ)
เมื่อเป็นลาดดินแห้ง

$$F.S. = \frac{c}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (2.5)$$

เมื่อเป็นลาดดินจมน้ำ

$$F.S. = \frac{c'}{(\gamma_{sat} - \gamma_w) h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.6)$$

เมื่อเป็นลาดดินที่มีน้ำไหลขนานกับผิวลาด

$$F.S. = \frac{c'}{(\gamma_{sat} - \gamma_w) h \sin \beta \cos \beta} + \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w) \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (2.7)$$

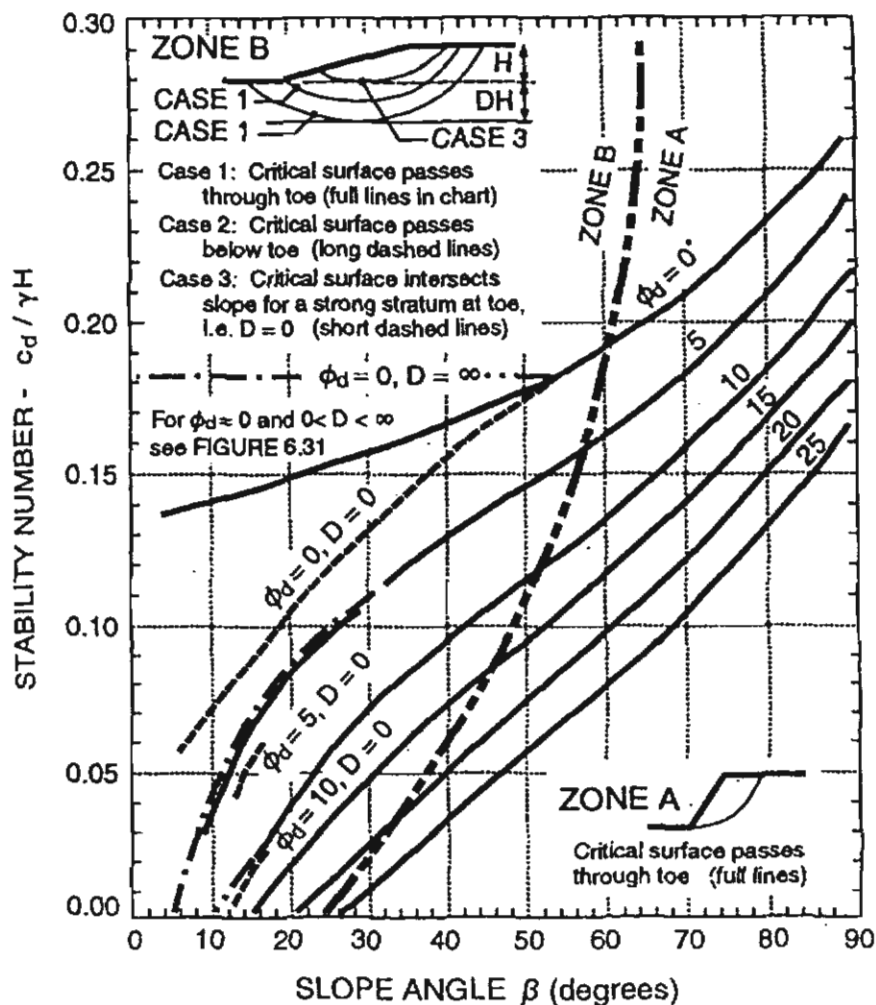
- โดย β = มุมเอียงของความของลาด
 ϕ' = มุมเสียดทานภายในของดินประสิทธิผล
 c' = แรงยึดเกาะของมวลดินประสิทธิผล
 γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ
 γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

2.7.2 แผนภูมิเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Slope Stability Chart)

กรณีของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียว มีลักษณะลาดดินไม่ยุ่งยากนัก และเพื่อนำผลของการวิเคราะห์เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบเบื้องต้น วิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือการใช้แผนภูมิเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Slope stability chart) ซึ่งง่ายต่อการใช้งานมากกว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพอย่างเต็มรูปแบบ

แผนภูมิของ Taylor (1948) ซึ่งพัฒนาจากวิธี Friction circle ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stability Number, N_s เป็นค่าแสดงระดับของเสถียรภาพของลาดที่แต่ละความชันของลาด จากค่า Stability Number ที่ได้จะทำให้คำนวณได้ว่า สำหรับค่าความสูงของลาดที่ความชันของลาดหนึ่งๆ ของดินเหนียวที่มีค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์ ควรมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเป็นเท่าใด อนึ่งค่า Stability Number ซึ่งใช้ความยึดเหนี่ยวเป็นหลักเพียงอย่างเดียว จะนำไปใช้

สำหรับดินที่มีทั้งค่าความยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายใน ($c - \phi$ soil) ได้ด้วย อย่างไรก็ตามแผนภูมิดังกล่าวเหมาะสมสำหรับกรณีลาดดินเป็นลาดดินเนื้อเดียว (Homogeneous soil slope) และสภาพของหน่วยแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสภาพหน่วยแรงรวม (Total stress analysis) จากแผนภูมิของ Taylor พบว่า เมื่อดินมีค่าความยึดเหนี่ยวเป็นหลัก พื้นผิวของการพังทลายของลาดมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ลึกลงไปต่ำกว่าเชิงของลาดดิน และหากพบชั้นดินแข็งในช่วงล่างของชั้นดิน แนวโค้งของพื้นผิวของการเคลื่อนพังก็มีแนวโน้มที่จะสัมผัสผิวบนของชั้นดินแข็ง กรณีที่ดินมีค่ามุมเสียดทานภายในเกี่ยวข้องด้วย สภาพของความลึกของพื้นผิวของการเคลื่อนพังก็จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดินแข็งเท่านั้น



รูปที่ 2.19 Stability chart สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียวของ Taylor (Taylor, 1948)

นอกจากแผนภูมิของ Taylor แล้ว ก็ยังมีอีกหลายแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้นมาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด อาทิเช่น ของ Spencer (1967) ซึ่งเป็นแผนภูมิสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่นำค่าแรงดันน้ำมาวิเคราะห์ด้วย โดยพิจารณาจากค่าของ Pore Water Pressure Ratio , r_u สามค่าเท่านั้น คือที่ r_u เท่ากับศูนย์, 0.25, และ 0.50 ของ Janbu (1967) ซึ่งเป็นแผนภูมิสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียวด้วยสภาพของหน่วยแรงในดินเป็นสภาพหน่วยแรงรวมของดินคงที่ตามความลึกของชั้นดิน, ของ Gibson และ Morgenstern (1962) ซึ่งเป็นแผนภูมิสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยสภาพของหน่วยแรงในดินเป็นสภาพหน่วยแรงรวมของดินเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นดิน เป็นต้น ถึงอย่างไรก็ตาม แผนภูมิของ Taylor ก็ยังเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างกว้างขวาง

2.7.3 วิธี Ordinary method of slices หรือ Fellenius method

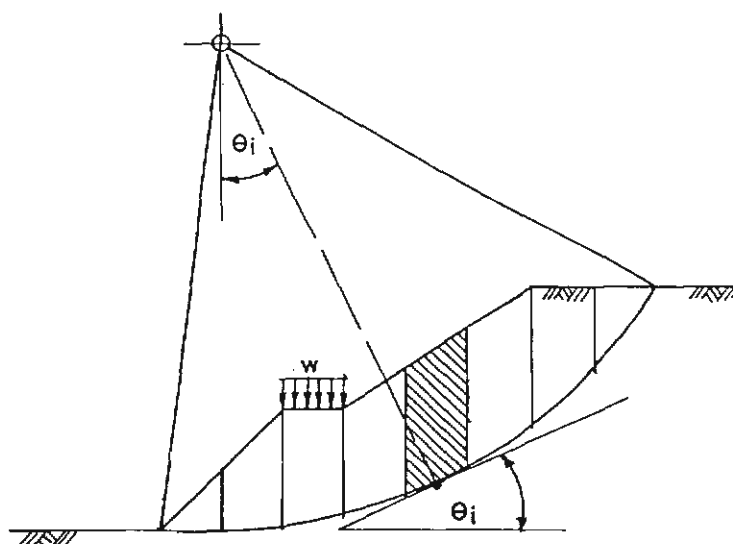
วิธีนี้วิเคราะห์ได้โดยแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพังออกเป็นชิ้นส่วน (Slices) ตามแนวตั้งเมื่อกำหนดข้อสมมุติฐานให้รูปร่างของพื้นผิวการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม และแรงกระทำระหว่างชิ้นส่วนเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งมี W_i เป็นน้ำหนักของชิ้นส่วน, N เป็นแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของชิ้นส่วน (Normal force), U เป็นแรงจากแรงดันน้ำ, และ T เป็นแรงต้านทานด้วยสมดุลย์ของแรงรวมในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว และจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย, F.S. มีค่าเท่ากับ

$$F.S. = \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Driving Moment}} \quad (2.8)$$

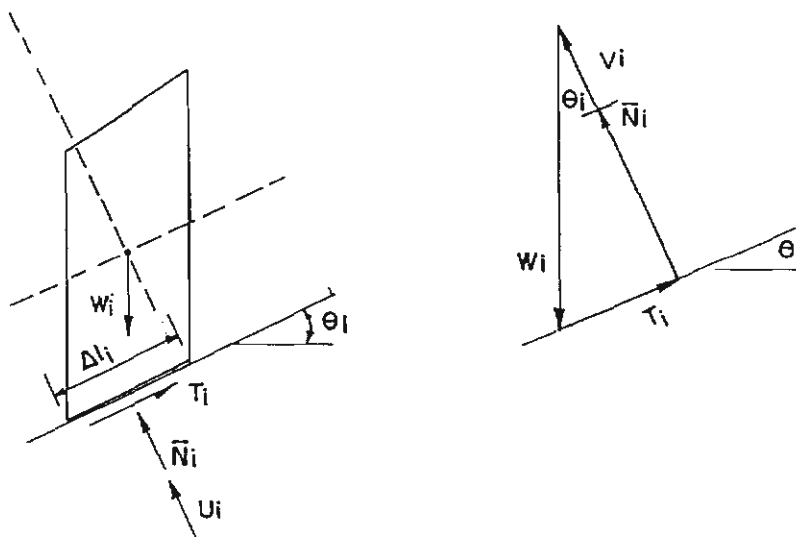
$$\text{จะได้ } F.S. = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i \Delta L_i + (W_i \cos \theta_i + U_i) \tan \phi'_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (2.9)$$

- เมื่อ c'_i, ϕ'_i = Effective strength parameters of soil
 ΔL_i = ความยาวของส่วนโค้งบนพื้นผิวการเคลื่อนพังของแต่ละชิ้นส่วน
 W_i = น้ำหนักดินของแต่ละชิ้นส่วน
 θ_i = มุมเอียงของเส้นสัมผัสผิวเคลื่อนพังที่แนว Centroid ของชิ้นส่วน
 U_i = แรงจากแรงดันน้ำ

วิธี Ordinary method ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและปลอดภัยพอสมควร เมื่อเป็นดินที่มีค่า ϕ ต่ำและความชันของลาดไม่ชันมาก แต่เมื่อค่า ϕ สูงและลาดมีความชันมาก ผลของการวิเคราะห์อาจให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็นมากถึง 60% (Johnson, 1974) แต่มีข้อดีคือการวิเคราะห์ไม่ยุ่งยาก และใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย



ก. รูปตัดการเคลื่อนพังของลาดดินและการตัดแบ่งมวลดิน

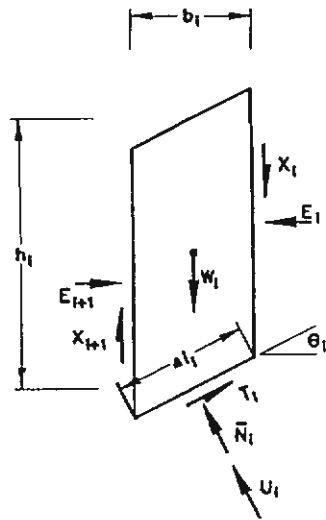


ข. แรงที่เกี่ยวข้องในมวลดิน และรูปหลายเหลี่ยมของแรง

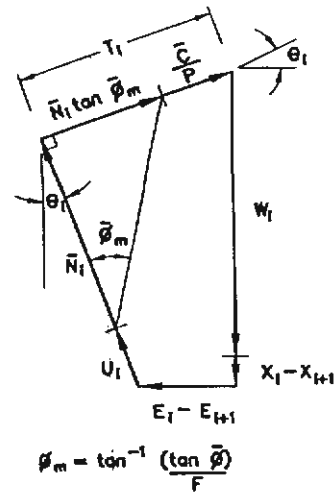
รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Ordinary method (วรากร, 2542)

2.7.4 วิธี Simplified Bishop method

วิธีนี้วิเคราะห์โดยการแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพังออกเป็นชั้นส่วน เช่นเดียวกับ Ordinary method ด้วยการสมมติให้รูปร่างพื้นผิวการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม แต่แรงที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ มีความละเอียดมากขึ้นนั่นคือ นำแรงกระทำระหว่างชั้นส่วนมาพิจารณาในการวิเคราะห์ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.21



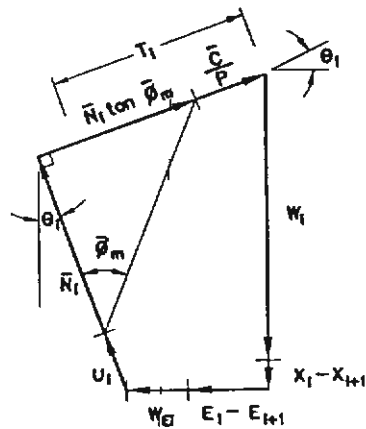
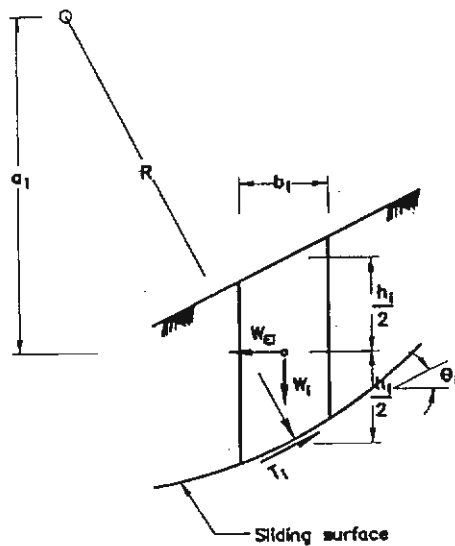
n) Free body diagram



v) Force polygon

ก) Effect of seismic force

จ) Force polygon with seismic force



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์โดย Simplified Bishop method (วรากร, 2542)

วิธีนี้ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเท่ากับ

$$F.S. = \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Driving Moment}} \quad (2.10)$$

$$\text{จะได้ } F.S. = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i + (W_i - U_i b_i) \tan \phi'_i] \frac{1}{M_i(\theta)}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } M_i(\theta) = \cos \theta_i \left(\frac{1 + \tan \phi'_i \tan \theta_i}{F.S.} \right)$$

U_i = แรงดันน้ำกระทำบนผิวเคลื่อนพังของแต่ละชั้นส่วน

b_i = ความกว้างของชั้นส่วน

วิธี Simplified Bishop ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ และมีค่ายุ่งยากจากการที่ต้องสมมุติค่า F.S. แล้วแทนค่าขึ้นจนได้ค่า F.S. จากทั้ง 2 ข้างของสมการที่ 2.11 ไม่เปลี่ยนแปลง จึงควรใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์

2.7.5 วิธี Janbu's method

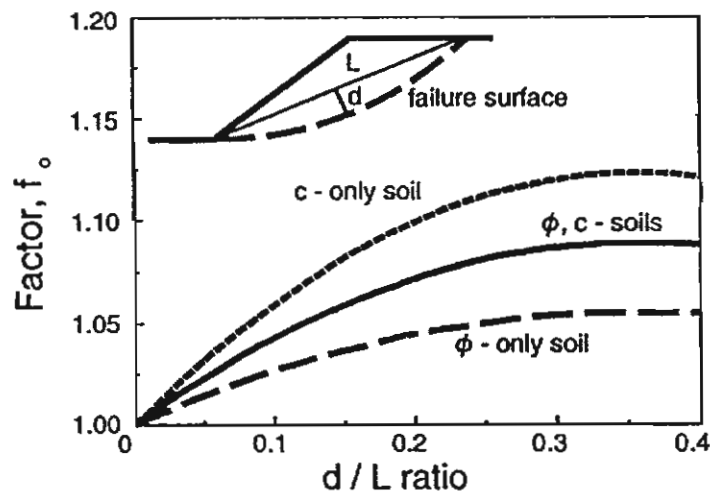
Janbu ได้พัฒนาวิธีนี้จากพื้นฐานของวิธีของ Simplified Bishop ทำให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของพื้นผิวการเคลื่อนพังที่มีรูปร่างใดๆ (Janbu และคณะ, 1956) โดยมีการนำค่า Correction factor, f_o ใช้ในสมการคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย ซึ่งเป็นค่าปรับแก้ในแรงกระทำระหว่างชั้นส่วน และสามารถพิจารณาหาค่า f_o ได้จากรูปที่ 2.22

เมื่อสมการคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย, F.S. เป็น

$$F.S. = f_o \frac{\left(\sum \left\{ [(c' b + (w - ub) \tan \phi')] \frac{1}{\cos \theta M(\theta)} \right\} \right)}{\sum W \tan \theta + V} \quad (2.12)$$

โดยที่ $M(\theta)$ = เป็นค่าเดียวกันที่ใช้ในวิธีของ Simplified Bishop

V = เป็นแรงจากแรงดันน้ำใน Tension cracks



รูปที่ 2.22 วิธีวิเคราะห์ของ Janbu (Hunt, 1986)

Whitman และ Bailey (1967) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ โดย Ordinary Method, และ Simplified Bishop's Method เปรียบเทียบกับวิธีของ Morgenstern and price ซึ่งเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือมากที่สุด พบว่าจากผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Simplified Bishop ปรากฏว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีความผิดพลาดประมาณ 7% หรือน้อยกว่า และจากผลการวิเคราะห์ของ Ordinary Method ปรากฏว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณได้มีความผิดพลาดมาก แม้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในด้านปลอดภัย

โดยทั่วไปพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินโดยทั่วไปมักจะใกล้เคียงกันส่วนโค้งของวงกลม เพราะจะทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำที่สุด หากแต่เมื่อใดมีอิทธิพลของสิ่งต่อไปนี้มาเกี่ยวข้อง อาจทำให้ผิวการพิบัติหรือเคลื่อนพังแตกต่างไปจากส่วนโค้งของวงกลมคือ

1. ลักษณะชั้นดินเป็น Nonhomogeneous slopes และมีชั้นดินอ่อนบางๆ แทรกอยู่ หรือชั้นดินแข็ง เป็นแนวบังคับการเคลื่อนที่ของผิวพิบัติ
2. กลุ่มของชั้นดินเป็นดินทรายที่ไม่มีความยึดเกาะตัวหรือความเชื่อมแน่นบนลาดดินที่มีความยาวมาก
3. สภาพงานดินที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งมีแนวดินอ่อนวางตัวสอดคล้องกับการเคลื่อนพัง อาทิเช่น กรณีเขื่อนแกนดินเหนียวเอียง (Sloping clay core dam)
4. สภาพงานดินที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งมีแนวดินอ่อนวางตัวสอดคล้องกับการเคลื่อนพัง อาทิเช่น กรณีเขื่อนแกนดินเหนียวเอียง (Sloping clay core dam)
5. สภาพที่พบเป็นภาพรอยแตกในชั้นหิน ซึ่งมีการวางตัวของชั้นหินเอียงลงในแนวลาดที่ตัดทำให้เกิดการเคลื่อนพังได้ง่าย

2.8 โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

โดยทั่วไป นิยมใช้วิธีของ Simplified Bishop แต่ก็ยังใช้เวลานานเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ดังนั้นจึงนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีส่วนช่วยอย่างมาก ปัจจุบันโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์มีอยู่มาก โดยที่ขณะนี้โปรแกรมดังกล่าวนี้ใช้ในประเทศไทยอย่างมากได้แก่โปรแกรม SLOPE/W, 8B-SLOPE, XSTABL, และ KU-Slope ซึ่งแต่ละโปรแกรมจะมีข้อดีข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.9 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดของงานดิน

ปัจจุบัน ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและการออกแบบลาดดิน มีการพิจารณาเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์คือ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้ กับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดที่ยอมให้สำหรับการออกแบบ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ถึงตารางที่ 2.8 เพื่อเป็นการวินิจฉัยระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน นั่นคือกรณีที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการวิเคราะห์ต่ำกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมให้ โดยที่เกณฑ์ในการกำหนดค่าต่ำสุดของอัตราส่วนความปลอดภัยในงานดิน เพื่อพิจารณาความปลอดภัยของงาน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน อาทิเช่น ความแปรปรวนในค่าความแข็งแรงของดินในลาด , รูปหน้าตัดของลาด, การระบายน้ำในดิน, ผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสภาพต่างๆของงานดิน เป็นต้น ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้นำสถิติมาใช้ในการช่วยกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยดังกล่าว ในรูปของความน่าจะเป็นเมื่อกำหนดให้การกระจายของข้อมูลต่างๆ เป็นการกระจายความน่าจะเป็นแบบมาตรฐาน ดังนี้

Morgenstern (1995) ได้สรุปที่มาของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของความมั่นคงของลาด มีอยู่ด้วยกัน 3 แหล่งคือ ความไม่แน่นอนในความถูกต้องของค่าต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์, ความไม่ถูกต้องในการเลือกวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์, และ ความไม่แน่นอนในแรงกระทำต่างๆที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ แต่เมื่อไม่นำการกระทำของมนุษย์มาพิจารณาแล้ว อาจจะสรุปได้ว่าความไม่แน่นอนจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแปรปรวนขององค์ประกอบภายในลาดและสภาพแวดล้อม, และความแปรปรวนในองค์ประกอบภายนอกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลาด อาทิเช่น การกัดเซาะ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น ตัวอย่างของการพิจารณาค่าอัตราส่วนต่ำสุดจากการพิจารณาค่าต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดย Lacasse และ Nadin (1994) ซึ่งได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเป็น 1.79 เมื่อมีความไม่แน่นอนในค่าที่ใช้วิเคราะห์มาก และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเป็น 1.40 เมื่อมีความไม่แน่นอนในค่าที่ใช้วิเคราะห์น้อย

ตารางที่ 2.6 ผลสรุปของการศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพ
(วรากร และชูเลิศ, 2543)

ข้อเปรียบเทียบ	SLOP/W	SB-SLOPE	XSTABL	KUslope
รูปแบบการติดต่อกับผู้ใช้ (User interface)				
- ความง่ายต่อการเรียนรู้การใช้งาน	3	5	4	4
- การป้อนข้อมูล (Input)	4	3.5	3.5	4
- การเพิ่มเติมข้อมูล (Insert geometry)	4.5	2	4	4
- รูปแบบในการสร้าง Geometry	3.5	3	4	4
ความสามารถในการคำนวณ				
- ความสามารถในการแบ่งชิ้นส่วนของมวลดิน	4	2	NA	5
- ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย		มากที่สุด		ต่ำสุด
ความเร็ว (Speed)				
- ความเร็วในการคำนวณ	3	2	2.5	5
- ความเร็วในการ Input ข้อมูล	3.5	3	4	4
ประสิทธิภาพของการแสดงผล	5	3.5	3	3
ความสามารถในการค้นหา F.S ที่ต่ำที่สุด	4	3	3.5	5
ความสามารถพิเศษอื่น ๆ				
-ความสามารถในการตรวจสอบข้อผิดพลาดจากการสร้าง Geometry	มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
- Tension crack	มี	มี	มี	ไม่มี
- Phreatic line	มี	มี	มี	มี
- Anisotropic	มี	ไม่มี	มี	ไม่มี
- Reinforcement	มี	ไม่มี	มี	ไม่มี
- Grid of pore pressure	มี	ไม่มี	มี	ไม่มี
- Point load	มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ราคา (Price)	3495 \$	625 \$	540 \$	-

หมายเหตุ: นิยามของระดับคะแนน

5 = ดีมาก, 4 = ดี, 3 = ปานกลาง, 2 = พอใช้, 1 = ใช้ไม่ได้

ตารางที่ 2.7 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมให้สำหรับเขื่อนดินในประเทศไทย (วรากร, 2542)

CASE	DESIGN	CONDITION	เขื่อนใหญ่	เขื่อนเล็ก
1	เพื่อก่อสร้างเสร็จ (End of construction)	Static	1.3	1.5
		Earthquake	1.1	-
2	ระดับน้ำสูงสุด (Maximum water level)	Static	1.5	1.5
		Earthquake	1.1	-
3	ระดับเก็บกักปกติ (Normal water level)	Static	1.5	1.5
		Earthquake	1.2	-
4	ระดับน้ำลดอย่างรวดเร็ว (Rapid drawdown)	Static	1.3	1.3
		Earthquake	1.1	-
5	ระดับน้ำปานกลาง (Intermediate water level)	Static	1.5	-
		Earthquake	1.2	-

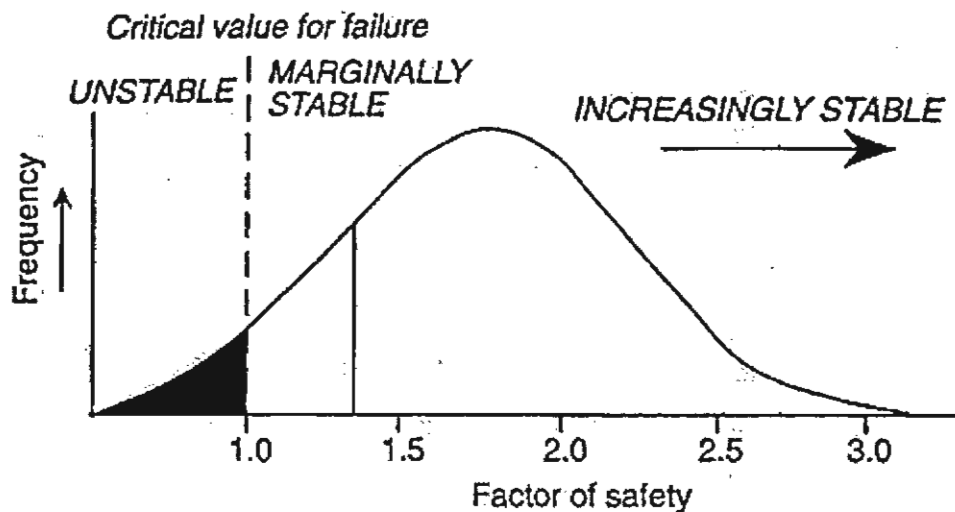
ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมให้สำหรับงานทางวิศวกรรมโยธา (DM7.1, 1982)

ลักษณะของงาน	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ต่ำสุดที่ยอมให้
งานโครงสร้างถาวร	1.50
งานโครงสร้างฐานราก	2.00
งานโครงสร้างชั่วคราว และมีการควบคุมดูแลงานระหว่างก่อสร้าง	1.25 ถึง 1.30
กรณีเหตุการณ์กรณีพิเศษเกิดขึ้น ได้แก่ - การเกิดแผ่นดินไหว, การลดระดับน้ำทันที เป็นต้น	1.15 ถึง 1.20

Janbu, N. (1996) ได้กำหนดให้การกระจายความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของดิน เป็นการกระจายแบบมาตรฐาน (Standard normal distribution) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (V) ในค่าความแข็งแรงของดินแปรเปลี่ยนตามประเภทของดินและรูปแบบของการทดสอบหาความแข็งแรง

Wu, T.H. และคณะ (1996) ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation) ในค่าของความแข็งแรงของดิน รูปหน้าตัดของลาด และการระบายน้ำในดิน อยู่ระหว่าง 0.17 ถึง 0.42

Meyerhof, G.G. (1970) ได้เสนอค่าความน่าจะเป็นของการเคลื่อนพังของลาด อยู่ระหว่าง 0.10 ถึง 10 % โดยที่ Fell, R. และคณะ (1996) ได้สรุปว่าการเคลื่อนพังของลาดเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังที่ Popescu, M.E. (1996) ได้กำหนดสถานภาพของความมั่นคงของลาดไว้ 3 สถานภาพคือ Stable slopes ที่เป็นลาดดินที่มีความมั่นคงสูง, Marginally stable slopes เป็นลาดดินที่ยังมีความมั่นคง แต่อาจจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ เมื่อเกิดแรงภายนอกกระทำในระดับหนึ่งของแรงดังกล่าว, Unstable slopes เป็นลาดที่เกิดการเคลื่อนพัง ดังแสดงในภาพที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกระจายความน่าจะเป็นของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (DOE, 1994)

2.10 การสำรวจดินเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การสำรวจดิน มีความสำคัญต่อการศึกษาการเคลื่อนพังของลาดในการวินิจฉัยความน่าจะเป็นของการเกิดการเคลื่อนพังและรูปแบบของการเคลื่อนพังของลาดดินในพื้นที่ที่เป็นที่ตั้งของโครงการ, ปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนพัง, และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนพังที่เกิดขึ้น ซึ่งจะนำไปใช้ในการปรับปรุงแก้ไขลาดดินให้มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลทางธรณีเทคนิคที่จะต้องมีความเพียงพอและมีคุณภาพเพื่อนำมาประเมินสรุปเป็นข้อมูลดินสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่นับว่าเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญสำหรับงานออกแบบ และงานก่อสร้างของงานดิน (Earth works) ตลอดจนงานปรับปรุงแก้ไขลาดดินให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้น การสำรวจดินเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน จึงมีความจำเป็นสำหรับงานวิจัยในการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยการนำมาเป็นหลักการในการดำเนินการตรวจสอบสภาพการเคลื่อนพังของลาดที่พบในสนาม และเป็นส่วนหนึ่งของฐานความรู้ของระบบสำหรับการให้คำแนะนำในการพิจารณารูปแบบของความแข็งแรงของดินให้เหมาะสมตามองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการ

วิเคราะห์เสถียรภาพให้ได้ผลของการวิเคราะห์ที่ปลอดภัยต่องานดิน

2.10.1 การสำรวจที่ผิวดิน

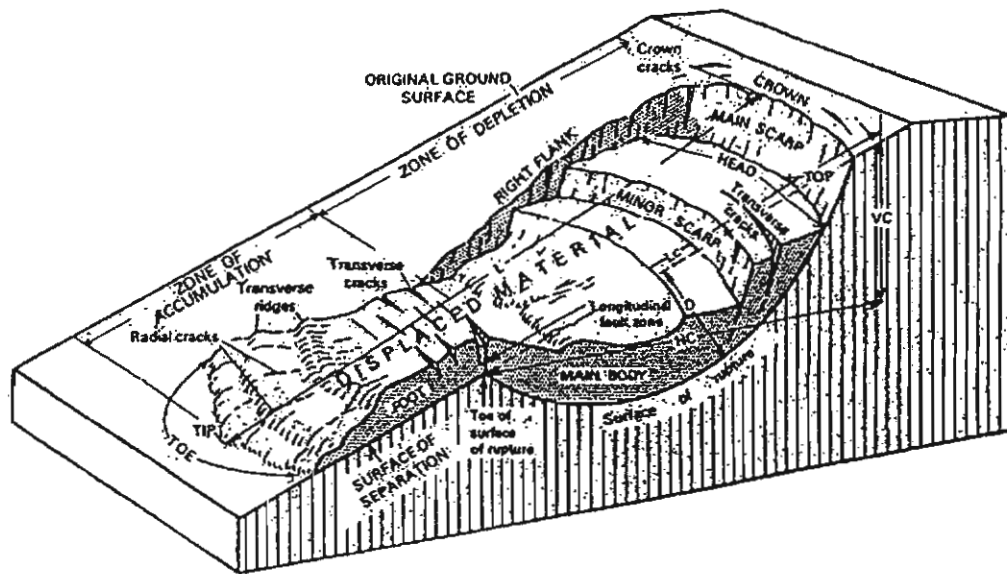
การสำรวจที่ผิวดินสำหรับงานลาดดิน มีขึ้นเพื่อทราบข้อมูลของสภาพทั่วไปของปัจจัย และสภาพพื้นผิวดินที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ขั้นตอนของการดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาข้อมูลในสำนักงาน (Desk study) จากหลายแหล่งความรู้ด้วยกัน และการออกสำรวจในสนาม ที่เรียกว่า Site reconnaissance ด้วยการจดบันทึกข้อมูลของสภาพพื้นผิวที่พบในสนาม และพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในสำนักงาน การสำรวจที่ผิวดินในงานวิจัย ใช้สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนพังของลาดดินในสนาม เพื่อทราบลักษณะการเคลื่อนพังที่เกิดขึ้น ซึ่งจะให้ข้อมูลเป็นแนวทางในการแสดงรูปแบบและสาเหตุของการเคลื่อนพัง โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนในการดำเนินงาน (Rib และ Liang, 1978) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาและประเมินสภาพพื้นที่ทางภูมิประเทศจากแผนที่ธรณีวิทยา เอกสารแสดงสภาพพื้นที่ทางธรณีวิทยา และธรณีเทคนิค รวมถึงประวัติของการเกิดการเคลื่อนพัง, สภาพธรณีสัณฐานของพื้นที่ จากภาพถ่ายทางอากาศ, สภาพพื้นที่ทางธรณีเทคนิค จากรายงานเดิมของการสำรวจดินทางธรณีเทคนิค เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการออกสำรวจในภาคสนาม ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด สำหรับการประเมินลักษณะการเคลื่อนพังและสาเหตุในเบื้องต้นได้ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับลักษณะการเคลื่อนพังและสาเหตุที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 สิ่งที่รวบรวมได้จากการออกสำรวจในภาคสนาม ซึ่งรวมถึงข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์บุคคลที่เกี่ยวข้อง โดยมีนิยามของส่วนประกอบในสภาพการเคลื่อนพังของลาดดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.10.2 การสำรวจใต้ดิน

การสำรวจใต้ดินสำหรับงานลาดดิน เป็นกระบวนการในการให้ข้อมูลทางธรณีเทคนิคของดินในระดับลึกจากผิวดิน ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน เพื่องานออกแบบและงานก่อสร้าง ตลอดจนเพื่อการประเมินระดับหรือลักษณะของการเคลื่อนพัง และตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพัง (Failure surface) ในทางปฏิบัติ การสำรวจใต้ดินประกอบด้วยการทำหลุมเจาะ (Boring), การเก็บตัวอย่างดิน (Sampling) สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ, การทดสอบในสนาม, และการติดตั้งเครื่องมือเพื่อพิจารณาดำเนินการของพื้นผิวการเคลื่อนพัง (Failure surface) ในกรณีที่เกิดการเคลื่อนพังเกิดขึ้นในพื้นที่ ความรู้ของการสำรวจและทดสอบเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ที่ถูกนำมารวบรวมไว้ในระบบของงานวิจัย มุ่งเน้นที่การวินิจฉัยรูปแบบหรือลักษณะของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของดิน ซึ่งถูกพิจารณาแตกต่างกันไปตามประเภทของดินที่ถูกจำแนกตามระบบ USCS และสภาพงานก่อสร้าง



รูปที่ 2.24 นิยามของส่วนประกอบในสภาพการเคลื่อนพังของลาด (Varnes, 1978)

นิยาม

- 1) Main scarp = พื้นผิวลาดบนพื้นที่ที่คงสภาพรอบๆ พื้นผิวเลื่อนไถล
- 2) Minor scarp = พื้นผิวลาดของมวลวัสดุเลื่อนไถล
- 3) Head = ส่วนบนสุดของมวลวัสดุเลื่อนไถล
- 4) Top = ตำแหน่งสูงสุดที่แนวสัมผัสระหว่าง Main scarp และมวลวัสดุเลื่อนไถล
- 5) Toe = บริเวณในพื้นที่ผิวการเลื่อนไถลอยู่ไกลสุดจาก Main scarp
- 6) Toe of surface rupture = ตำแหน่งที่จุดตัดกันระหว่างส่วนล่างของพื้นผิวการเคลื่อนพังและพื้นผิวดินเดิม
- 7) Tip = ตำแหน่งบน Toe อยู่ไกลสุดจาก Top
- 8) Foot = บริเวณในพื้นที่ผิวการเลื่อนไถล ซึ่งวางตัวในแนวลาดลงจาก Toe of surface rupture
- 9) Main body = บริเวณพื้นที่ผิวการเคลื่อนพังอยู่ระหว่าง Main scarp และ Toe of surface rupture
- 10) Flank = ด้านข้างของการเคลื่อนพังของลาด
- 11) Crown = บริเวณใกล้กับส่วนบนสุดของ Main scarp ไม่มีการเคลื่อนตัวของวัสดุ
- 12) Surface of separation = ผิวลาดที่เป็นรอยแยกของมวลวัสดุเลื่อนไถลจากมวลวัสดุเดิม
- 13) Displaced material = มวลวัสดุเลื่อนไถลบนลาด
- 14) Zone of depletion = พื้นที่ภายในมวลวัสดุเลื่อนไถล อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวดินเดิม
- 15) Zone of accumulation = พื้นที่ภายในมวลวัสดุเลื่อนไถล อยู่รวมกันเป็นกองวัสดุสูงกว่าพื้นผิวดินเดิม

2.11 การพิจารณาความแข็งแรงของดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ต้องการความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของค่าความแข็งแรงของดินภายในลาด ที่เกิดขึ้นจริงในสนามและจำลองได้โดยการทดสอบ ซึ่งในการนี้ ได้นำความรู้ในการพิจารณาและวินิจฉัยค่าความแข็งแรงของดินที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด มาสร้างเป็นฐานความรู้ในระบบเพื่อเป็นแนวทางในการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกค่าความแข็งแรงในลักษณะที่เหมาะสม

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของดินสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินมีด้วยกันหลายปัจจัย ซึ่งสามารถจัดแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1. ปัจจัยภายในดิน ประกอบด้วย

1.1 ชนิดของดิน

Granular soils เช่น Gravel Sand Nonplastic silt เป็นต้น ซึ่งเป็นกลุ่มที่เรียกว่า Cohesionless soil แสดงค่าความแข็งแรงในรูปของค่า ϕ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความหยาบของการคละกัณของขนาดเม็ดดิน (Gradation coarseness), ความเหลี่ยมของรูปร่างเม็ดดิน (Angular shape), และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (Relative density) รวมถึงส่วนประกอบของแร่ภายในดิน เช่น หินที่ประกอบด้วย Quartz จะมีค่า ϕ มากกว่าทรายประเภท Calcareous sand (Hunt, 1986; Wu และ Sangrey, 1978)

Cohesive soils ซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียดและมีความชื้นได้ของน้ำต่ำ ความแข็งแรงของ Cohesive soils พิจารณาได้จากสภาพความชื้นเหลวในดิน (Consistency) คือสภาพเนื้ออ่อน จนถึง แข็งมาก

1.2 คุณสมบัติอื่นๆของดิน

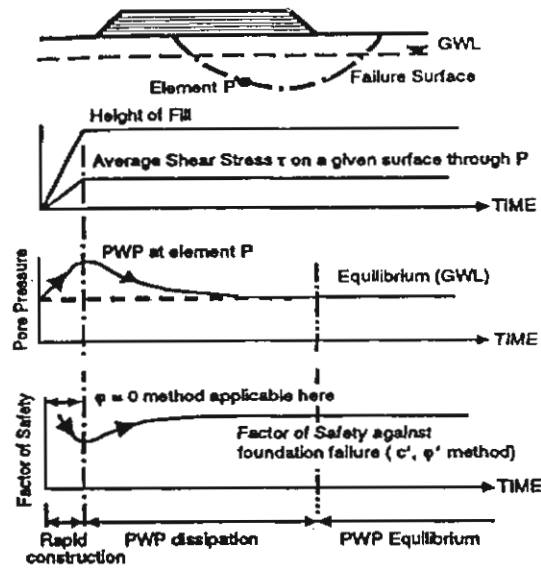
คุณสมบัติอื่นของดินที่สำคัญและมีผลกระทบต่อความแข็งแรงดิน ได้แก่ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และสภาพการระบายน้ำออกจากดิน เป็นต้น เมื่อความอิ่มตัวมีค่ามากขึ้น ความแข็งแรงของดินก็จะลดลง แต่หากพบว่าดินมีคุณสมบัติที่ทำให้น้ำระบายออกจากดินได้เร็วภายในน้ำหนักที่กระทำ ความแข็งแรงก็จะสูงกว่าดินที่มีคุณสมบัติในการให้น้ำระบายออกจากดินได้ช้า

2. วิธีการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดิน มีผลต่อความแข็งแรงของดิน โดยที่การวัดค่าความแข็งแรงของดินที่นำมาใช้มี 2 ลักษณะของหน่วยแรงที่นำมาวิเคราะห์ในการทดสอบคือ ลักษณะของการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total strength analysis) หรือ การทดสอบในสภาพ Undrained condition และลักษณะของการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective strength analysis) หรือการทดสอบในสภาพ Drained condition ซึ่งในแต่ละลักษณะ ค่าความแข็งแรงของดินที่วัดได้และนำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 2 ช่วง คือช่วงที่ค่ากำลังความแข็งแรงของดินสูงสุด (Peak strength) และช่วงที่ค่ากำลังความแข็งแรงของดินลดลงมาจาก Peak strength ที่เรียกว่า Residual strength

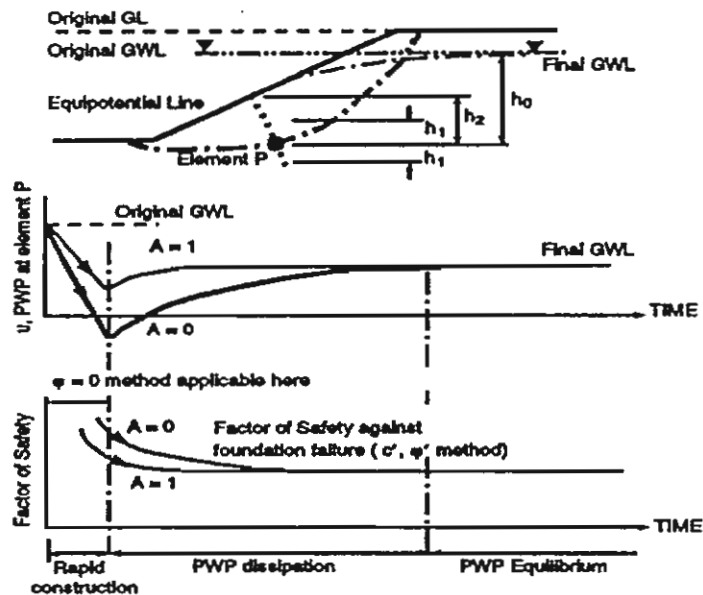
3. ปัจจัยภายนอกอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของดิน ได้แก่

ประวัติการอัดตัวของดิน บอกถึงสภาพของดินในรูปของ Normally consolidated soil) ซึ่งในสภาพนี้ Normally consolidated soil ใน Cohesive soils มักจะมีสภาพความชื้นเหลวเป็นดินเนื้ออ่อน ,และในรูปของ Over consolidated soil ซึ่งในสภาพนี้ Over consolidated soil ใน Cohesive soils มักจะมีสภาพความชื้นเหลวเป็นดินเนื้อแข็ง

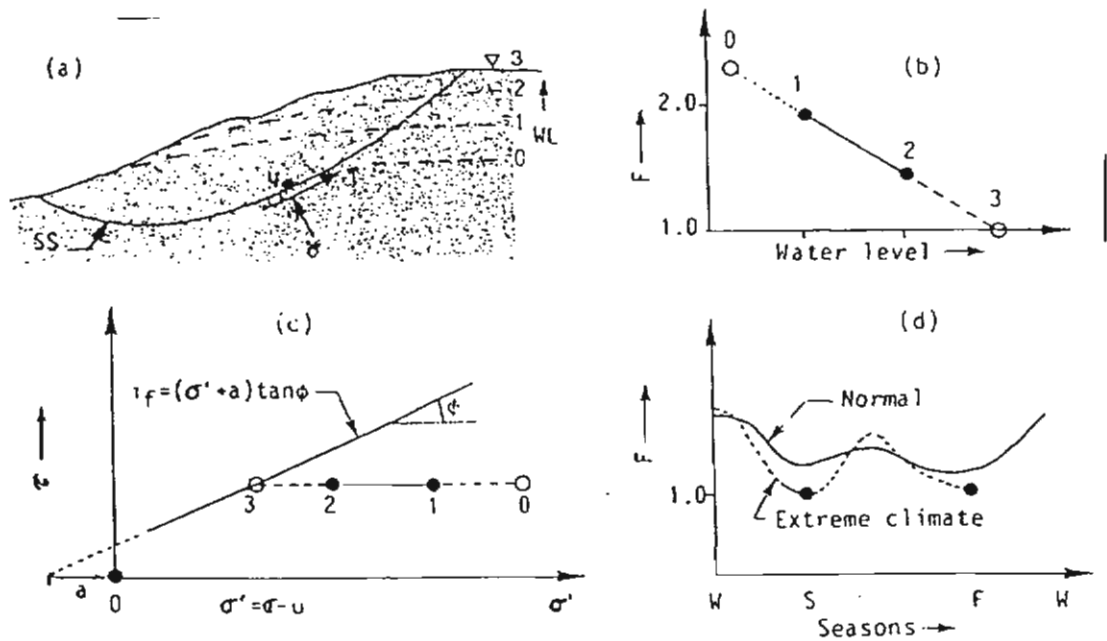
สภาพของงานและแรงกระทำ ความแข็งแรงของดินแปรเปลี่ยนตามสภาพของแรงที่กระทำ คือ ช่วงเวลาของการให้น้ำหนักกระทำในดินแต่ละชนิด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า กรณีที่ช่วงเวลาในการก่อสร้างสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดิน ความแข็งแรงของดินในสภาพของหน่วยแรงรวมหรือ Undrained condition มักมีค่าต่ำ อาทิเช่นการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งพบว่าช่วงวิกฤติของเวลางานก่อสร้างที่ใช้ในการพิจารณาค่าความแข็งแรงของดินคือ ขณะสิ้นสุดงานก่อสร้าง (End of construction) และในกรณีที่ช่วงเวลางานก่อสร้างในสภาพที่มีการระบายน้ำออกจากดิน ความแข็งแรงของดินในสภาพของหน่วยแรงประสิทธิผล หรือ Drained condition มีค่าต่ำ อาทิเช่น งาน Cut slope ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งพบว่าช่วงวิกฤติของเวลางานก่อสร้างที่ใช้ในการพิจารณาค่าความแข็งแรงของดินคือ Long term condition และกรณีที่เป็นลาดดินธรรมชาติ (Natural slopes) ลาดเขาที่มีการตัดถนนผ่าน และลาดบ่อที่มีการขุดเพื่อเก็บน้ำ (วรกร และคณะ, 2542) อาจไม่เกิดการเคลื่อนพังในระหว่างเวลาที่มีการก่อสร้างหรือในช่วงที่มีความชื้นในมวลดินต่ำ ทั้งนี้เพราะเมื่อมวลดินยังไม่อิ่มตัวความชื้นในมวลดินจะเกิดแรงตึงผิวที่ส่งผลให้เกิดแรงตึง (Suction) ที่ช่วยยึดเกาะให้มวลดินแข็งแรงขึ้น หรือเกิด Negative pore pressure ซึ่งทำให้ค่ากำลังความแข็งแรงประสิทธิผลของดินสูงขึ้น เมื่อลาดดินได้รับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เช่นในฤดูที่มีฝนตกชุกทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ทำให้แรงตึงผิวในดินถูกทำลาย และค่าแรงดันน้ำในดินเป็นค่าบวก กำลังความแข็งแรงประสิทธิผลของดินก็จะลดลงจนถึงจุดวิกฤติ ที่เกิดการเคลื่อนพังของลาดดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินตามฤดูกาลต่างๆ ในช่วงปีหนึ่งตามสภาพความชื้นที่มีในดิน (Janbu, 1983) การเคลื่อนพังในลักษณะนี้ได้เคยปรากฏแล้วในประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศไทย เช่น การพังทลายของลาดธรรมชาติที่อ.พิปูนและอ.ลานสกา จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อพ.ศ. 2531 (Wieland, 1989), การพังทลายของไหล่เขาบนสายทาง 4233 ระหว่างหาดกมลา และหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต (ศูนย์วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2542) เป็นต้น



รูปที่ 2.25 สภาพการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในคันทางบน Soft clay ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง และหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้าง (Bishop และ Bjerrum, 1960)



รูปที่ 2.26 สภาพการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของงาน Cut slope ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง และหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้าง (Bishop และ Bjerrum, 1960)



รูปที่ 2.27 อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน (Janbu, 1983)

การเลือกใช้ค่ากำลังความแข็งแรงของดินจากการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของดิน ต้องพิจารณาถึงลักษณะของหน่วยแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) และหน่วยแรงรวม (Total stress) ซึ่งควรเป็นลักษณะที่สอดคล้องกับสภาพวิกฤติของงานก่อสร้าง เพื่อความปลอดภัยของลาดดิน ลักษณะของหน่วยแรงสำหรับหาค่าความแข็งแรงของดินในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน สามารถสรุปได้เป็น

1. การวิเคราะห์ในลักษณะของหน่วยแรงรวม (Total strength analysis) จะให้ค่าความแข็งแรงของดินเป็น Undrained shear strength (S_u) เมื่อ ϕ เป็นศูนย์ หรือ Total strength (c_u, ϕ_u)
2. การวิเคราะห์ในลักษณะของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective strength analysis) จะให้ค่าความแข็งแรงของดินเป็น Effective strength (c', ϕ')

เมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยของลาดดินเป็นประเด็นหลัก ควรจะได้มีการเลือกขนาดของค่ากำลังความแข็งแรงของดินสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่เหมาะสม คือความเหมาะสมของค่าความแข็งแรงของดินแต่ละชนิดจากการทดสอบในแต่ละลักษณะของหน่วยแรง นั่นคือ การใช้ค่า Undrained strength เมื่อ ϕ เป็นศูนย์ ในดินเหนียวอ่อนอิ่มตัว ซึ่งเป็น Normally to lightly consolidated clay และมีค่าความชื้นได้ของน้ำต่ำมาก (Hunt, 1986) แต่ในลักษณะเช่นนี้ไม่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวประเภท Over consolidated clay ที่มีค่า Overconsolidation ratio มากกว่า 4.0 (Terzaghi and Peck, 1967) เนื่องจากค่า Undrained strength จะมีค่ามากกว่าที่เป็นจริง

อันมีผลมาจากการเกิด Negative pore water pressure ในมวลดินในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ จากข้อแนะนำของ Hunt (1986) และ Lowe (1969) สรุปไว้สำหรับลักษณะของการวิเคราะห์หน่วยแรงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของ Granular soil ซึ่งมีค่าความชื้นได้ในดินสูง ควรเป็น Effective strength analysis โดยที่มักจะได้อาณาความแข็งแรงในสภาพ Undrained strength สูงกว่าในสภาพ Drained strength (Chowdhury, 1978; Hunt, 1986)

ดินเหนียวอ่อนที่มีค่า Overconsolidation ratio ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าหน่วยแรงในการยุบอัดตัวที่แตกต่างกัน (Consolidation stress) ซึ่งเป็นความจริงที่ถูกนำมาพัฒนาโดย Stress History and Normalized Soil Engineering Properties (SHANSEP) ให้เป็นสมการในการคำนวณค่า Undrained shear strength โดยให้มีความสัมพันธ์กับค่า Effective overburden pressure คือ

$$S_u = (S)(\sigma'_{vo})(O.C.R.)^m$$

เมื่อ S_u = Undrained shear strength
 σ'_{vo} = Effective overburden pressure
 O.C.R. = Overconsolidation ratio
 S, m = ค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าคงที่ในสมการของ SHANSEP (Ladd, 1991)

Soil type	Strength ratio, S	Strength exponential, m
- Sensitive marine clays, $PI < 30\%$, $LI > 1$	0.20	1.0
- Homogeneous CL, CH sedimentary clays of low to moderate sensitivity, $PI = 20 - 80\%$	0.22	0.8
- Northeastern U.S. varved clays		
- Sedimentary deposits of silts and Organic soils	0.16	0.75
(Atterberg limits plot below A-line, but excluding peats and clays with shells)	0.25	0.80

สรุปสภาพของการทดสอบสำหรับดินแต่ละชนิด ตามแต่ละสภาพการก่อสร้างดังแสดงในตารางที่ 2.10 โดยที่ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดกลุ่มของดินสำหรับนำมาใช้ในการเป็นปัจจัยของฐานความรู้ในระบบเป็น 3 กลุ่ม ตามสภาพความเชื่อมโยงในมวลดิน โดยที่แต่ละกลุ่มประกอบด้วยดินแต่ละประเภทที่ถูกจำแนกตามระบบ USCS ดังนี้คือ

ตารางที่ 2.10 สภาพของการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดินแต่ละชนิด (Bishop และ Bjerrum, 1960; Terzaghi และ Peck, 1967; Lambe และ Whitman, 1969; Chowdhury, 1978; Hunt, 1986, และ Abramson และคณะ, 1996)

ชนิดของดิน	สภาพการก่อสร้าง	สภาพการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	สภาพการทดสอบในสนาม
Cohesive soils มีสภาพ Consistency เป็นดินอ่อน ถึงแข็งปานกลาง และเป็น Normally to lightly consolidated clay หรือมีค่า O.C.R. < 4.0	เสถียรภาพขณะสิ้นสุดงานก่อสร้างของคันทาง บนดินเหนียวอ่อน (Embankment on soft clay) เสถียรภาพขณะสิ้นสุดงานก่อสร้างของคันทาง หรืองานดินถม (Fill works) ที่มีระยะเวลาดมดินสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดิน และช่วงแรกของการขุดดินในงาน Cut slope	S_u analysis หรือ Total strength analysis ($\phi = 0$) S_u analysis หรือ Total strength analysis ($\phi = 0$)	Field vane shear test Field vane shear test
	เสถียรภาพช่วงระหว่างงานก่อสร้างคันทาง หรืองานดินถมที่มีระยะเวลาดมดินนาน เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดิน และงานขุดดินในงาน Cut slope	S_u analysis หรือ Total strength analysis ($\phi = 0$) Effective strength analysis	Field vane shear test

เสถียรภาพระยะยาวของงานคันทางหรืองานดินถม งาน Cut slope งานเขื่อนดิน และลาดดินธรรมชาติในช่วงเวลาที่มีฝนตกหนัก

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

ชนิดของดิน	สภาพการก่อสร้าง	สภาพการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	สภาพการทดสอบในสนาม
Cohesive soils มีสภาพ Consistency เป็นดินแข็ง และเป็น Overconsolidated clay ที่มีค่า $O.C.R > 4$ รวมถึงดิน Plastic soil ชนิดอื่นที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์ หรือดิน $c-\phi$ soil	เสถียรภาพขณะสิ้นสุดงานก่อสร้างของคันทางหรืองานดินถม (Fill works) ที่มีระยะเวลาดินสั่นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดินและช่วงแรกของการขุดดินในงาน Cut slope	Total strength analysis ($\phi \neq 0$)	
โคลี่เคียวศูนย์ หรือดิน $c-\phi$ soil	เสถียรภาพช่วงระหว่างงานก่อสร้างคันทางหรืองานดินถมที่มีระยะเวลาถมดินนาน เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดิน และงานขุดดินในงาน Cut slope	Total strength analysis ($\phi \neq 0$)	
	เสถียรภาพระยะยาวของงานคันทางหรืองานดินถม งาน Cut slope งานเชื่อมดิน และลาดดินธรรมชาติในช่วงเวลาที่มีฝนตกหนัก	Effective strength analysis	
Cohesionless soil	เสถียรภาพขณะสิ้นสุดงานก่อสร้างของคันทางหรืองานดินถม (Fill works) ที่มีระยะเวลาดินสั่นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาใน	Effective strength analysis	

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

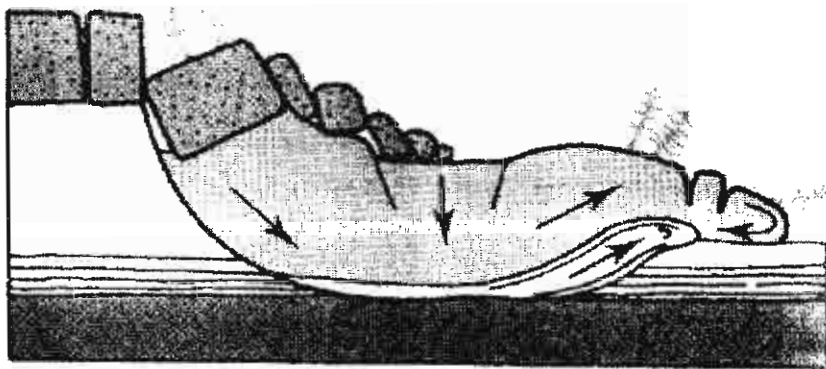
ชนิดของดิน	สภาพการก่อสร้าง	สภาพการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	สภาพการทดสอบในสนาม
	การระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดิน และช่วงแรกของการขุดดินในงาน Cut slope		
	เสถียรภาพช่วงระหว่างงานก่อสร้างด้านทางหรืองานดินถมที่มีระยะเวลาลมดินนาน เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการระบายน้ำออกจากดินหรือการยุบอัดตัวในดิน และงานขุดดินในงาน Cut slope	Effective strength analysis	
	เสถียรภาพระยะยาวของงานคันทางหรืองานดินถม งาน Cut slope งานเขื่อนดิน และลาดดินตามธรรมชาติ ในช่วงเวลาที่มีฝนตกชุก	Effective strength analysis	

1. กลุ่ม Cohesive soil ที่มีค่า ϕ ใกล้เคียงศูนย์ เป็นกลุ่มดินเหนียวและ Silt ประเภท CH, CL, และ MH ที่มีสภาพความชื้นเหลวเป็นดินอ่อนถึงแข็งปานกลาง ซึ่งมักจะมีสภาพการอัดตัวเป็น Normally consolidated to lightly overconsolidated soil การที่เป็นดินเม็ดละเอียดและมีความชื้นได้ของน้ำต่ำ และขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกระทำในสนาม ทำให้เกิดแรงดันในช่องว่างส่วนเกินเป็น Positive excess pore pressure และค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในขณะที่มีการระบายน้ำออกจากดิน ซึ่งทำให้เสถียรภาพของลาดดินเพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่าความแข็งแรงของดินกลุ่มนี้ที่ควรนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอยู่ในลักษณะของหน่วยแรงรวม หรือ Undrained strength ที่ค่าวิกฤติเมื่อค่า ϕ ใกล้เคียงศูนย์ โดยมีช่วงวิกฤติของงานก่อสร้างเป็นขณะสิ้นสุดงานก่อสร้าง

2. กลุ่ม Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์ เป็น กลุ่มดินเหนียวและ Silt ที่มีสภาพความชื้นเหลวเป็นดินแข็งประเภท CL, CH, MH ซึ่งมักจะมีสภาพการอัดตัวเป็น Overconsolidated soil และกลุ่ม Plastic soil ประเภท ML, SC, SM, SP-SM, SW-SM, GC, GM, GP-GM, GW-GM ลักษณะของหน่วยแรงที่นำมาใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงอาจเป็นหน่วยแรงรวม หรือ Undrained strength เมื่อค่า ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์, หรืออาจเป็นหน่วยแรงประสิทธิผล หรือ Drained strength เนื่องจากเกิดแรงดันในช่องว่างส่วนเกินเป็น Negative excess pore pressure ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกระทำในสนาม โดยเฉพาะใน Over consolidated soil ที่มีค่า O.C.R ≥ 4 และค่าความแข็งแรงจะลดลงตามระยะเวลา ในขณะที่มีการดึงน้ำในช่องว่างเพิ่มขึ้น

3. กลุ่ม Cohesionless soil ที่มีค่า c ใกล้เคียงศูนย์ มักเป็นดินประเภท SP, SW, GP, GW, และ Nonplastic silt คือ ML ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของหน่วยแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงของดินกลุ่มนี้จะเป็นหน่วยแรงประสิทธิผล หรือ Drained strength เนื่องจากเป็นดินกลุ่มที่มีค่าความชื้นได้ของน้ำสูง ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้อย่างรวดเร็ว และไม่มีแรงดันในช่องว่างส่วนเกินสะสมอยู่ในมวลดิน ภายใต้น้ำหนักกระทำ สำหรับใน Nonplastic silt ซึ่งมีความชื้นได้ของน้ำต่ำ ค่าแรงดันในช่องว่างส่วนเกินยังคงมีอยู่ในระหว่างก่อสร้าง ดังนั้น จึงต้องมีการวัดแรงดันในช่องว่างหรือประมาณค่าที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ เพื่อคำนวณค่ากำลังความแข็งแรงในลักษณะของหน่วยแรงประสิทธิผล

CHAPTER 3



3

หน้า ๕๕

3.3.11 การแก้ไขปรับปรุงให้เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญชั้นสมบูรณ์

การแก้ไขปรับปรุงระบบ จะมีการดำเนินการแก้ไขฐานความรู้ในระบบให้สอดคล้องกับผลของการทดสอบและการประเมินสมรรถภาพของระบบ ซึ่งจะเป็นการทำให้ผลหรือคำตอบจากการทำงานของระบบอยู่ในสภาพที่ควรเกิดขึ้น ตามข้อเท็จจริงที่เคยเกิดขึ้นแล้ว

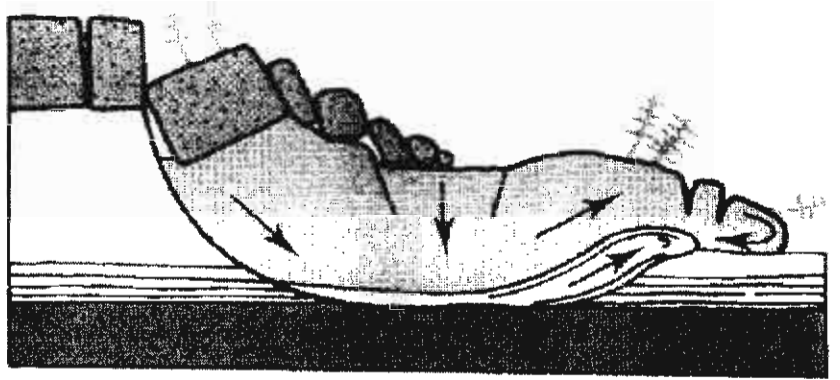
3.3.12 การพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การดำเนินการในขั้นตอนนี้ เป็นการปรับปรุงโครงสร้างของโปรแกรมที่มีอยู่แล้วคือ โปรแกรม RE5 ซึ่งเป็นโปรแกรมเดิมที่เขียนด้วยภาษา “C” โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ของ Simplified Bishop สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีพื้นผิวของการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม ในการปรับปรุงโปรแกรมหังกล่าว ได้เปลี่ยนจากการทำงานของโปรแกรมบน DOS เป็นการทำงานบน WINDOWS เนื่องจากง่ายต่อการใช้งานมากกว่า ลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่ปรับปรุงมีอยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนของการนำเข้าข้อมูล (Data Entry)
2. ส่วนของการคำนวณวิเคราะห์
3. ส่วนของการแสดงผลและส่งผล

3.3.13 การเผยแพร่และประยุกต์ใช้งาน

การเผยแพร่ มีขึ้นเพื่อการทราบถึงผลของความสามารถในการใช้งานของระบบได้อย่างกว้างขวางจากบุคคลภายนอก และเพื่อสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในขั้นตอนสมบูรณ์ในการที่ต้องการให้สามารถนำระบบมาประยุกต์ใช้งานได้ในหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การนำเสนอบทความทางวิชาการ การนำเสนอผลงานที่หน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง การเผยแพร่ผลงานทาง Internet เป็นต้น



พลาสมา 5 จั๊ย

ผลการวิจัย

ผลของการวิจัยจากการดำเนินงานเป็นขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการสร้างฐานความรู้ KB1, ส่วนที่ 2 เป็นการสร้างฐานความรู้ KB2, ส่วนที่ 3 เป็นการนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในการวิเคราะห์, ส่วนที่ 4 เป็นการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญต้นแบบ, และส่วนที่ 5 เป็นการทดสอบและประเมินสมรรถภาพของระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การสร้างฐานความรู้ KB1

ฐานความรู้ KB1 มีขึ้นเพื่อวินิจฉัยรูปแบบของการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน ประกอบด้วยความรู้และความจริงจากการประเมินสภาพพิบัติที่เกิดขึ้น บนพื้นฐานทางข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกรณีพิบัติที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในประเทศไทยและภูมิภาคใกล้เคียง ตลอดจนจากทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ และสภาพพิบัติที่ประมวลแล้ว

การประเมินสภาพพิบัติจากภาคสนาม

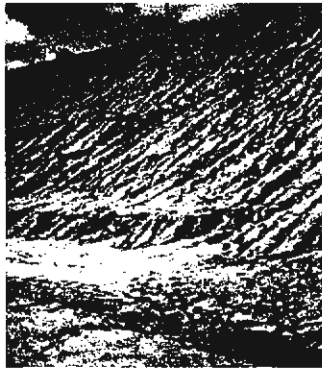
การสำรวจภาคสนามประกอบด้วยกรณีศึกษาการพังของลาดดินลักษณะต่างๆ เช่น คั่นดินถมของถนน, คั่นดินถมข้างทางรถไฟ, งานถมดินปรับปรุงพื้นที่, ริมตลิ่งแม่น้ำ, การตัดไหล่เขาของถนน, ของเหมือง, และลาดธรรมชาติ เป็นต้น เป็นข้อมูลกรณีพิบัติที่พบในภาคกลางจำนวน 20 ตัวอย่าง, ภาคตะวันออกจำนวน 3 ตัวอย่าง, ภาคเหนือจำนวน 32 ตัวอย่าง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 11 ตัวอย่าง, และภาคใต้จำนวน 39 ตัวอย่าง

ตัวอย่างการพิบัติและจำแนกรูปแบบของการเคลื่อนพังของลาดดินของแต่ละกรณีศึกษาโดยใช้ระบบการจำแนกของ Varnes (1978) ดังแสดงรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 ซึ่งมีข้อสรุปของสภาพพิบัติดังแสดงในตารางที่ 4.1



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	debris slide
			b. rock slide	earth 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		

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของคันดินถมของถนนที่ทาง
สายรังสิต-นครนายก



(ก)

TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide



(ข)

TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide
LATERAL SPREAD		earth lateral spread



(ค)

TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของ (ก) ค้นดินถมข้างทางรถไฟ ที่จังหวัดระยอง, (ข) ดินถมในซอยอ่อนนุช กรุงเทพฯ, (ค) ริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่จังหวัดหนองคาย



(ก)

Type of movement		Type of material		
		Bedrock	Debris	Earth
Falls		rock fall	debris fall	earth fall
Slides	Rotational	rock slump	debris slump	earth slump
	Translational	a.rock block slide	debris slide	earth slide
		b.rock slide		
Flows		bedrock flow	debris flow	earth flow



(ข)

Type of movement		Type of material		
		Bedrock	Debris	Earth
Falls		rock fall	debris fall	earth fall
Slides	Rotational	rock slump	debris slump	earth slump
	Translational	a.rock block slide	debris slide	earth slide
		b.rock slide		
Flows		bedrock flow	debris flow	earth flow



(ค)

Type of movement		Type of material		
		Bedrock	Debris	Earth
Falls		rock fall	debris fall	earth fall
Slides	Rotational	rock slump	debris slump	earth slump
	Translational	a.rock block slide	debris slide	earth slide
		b.rock slide		
Flows		bedrock flow	debris flow	earth flow

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาของถนน ที่ (ก) ดอยตุง จังหวัดเชียงใหม่, (ข) ดอยแม่สลอง จังหวัดเชียงราย, และ (ค) จังหวัดภูเก็ต

(ก)



Type of movement		Type of material		
		Bedrock	Debris	Earth
Falls		rock fall	debris fall	earth fall
Slides	Rotational	rock slump	debris slump	earth slump
	Translational	a.rock block slide	debris slide	earth slide
		b.rock slide		
Flows		bedrock flow	debris flow	earth flow

(ข)



Type of movement		Type of material		
		Bedrock	Debris	Earth
Falls		rock fall	debris fall	earth fall
Slides	Rotational	rock slump	debris slump	earth slump
	Translational	a.rock block slide	debris slide	earth slide
		b.rock slide		
Flows		bedrock flow	debris flow	earth flow

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของรูปแบบการเคลื่อนพังของกรณีศึกษาการพังของลาด เนื่องจากการตัดไหล่เขาของ (ก) เมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และ (ข) โรงงานปูนซิเมนต์ ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ตารางที่ 4.1 ข้อสรุปของข้อมูลกรณีศึกษาการออกสำรวจภาคสนาม

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ
1. กรณีศึกษาการพังของคันดินถนนของถนนซึ่งขนานกับคลองชลประทาน	<p>พื้นที่ในจังหวัดกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งเป็นที่ราบลุ่มภาคกลาง:</p> <p>1) สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพฯ หรือที่เรียกว่า ดินกรุงเทพฯ มีความหนาแตกต่างกันตามตำแหน่งของพื้นที่คือประมาณ 9 ถึง 17 เมตร ได้ลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทราย ค่า Sensitivity ประมาณ 4 ถึง 8</p> <p>2) สภาพดินตาม Geological formation จัดเป็น Alluvial soil</p>	<p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide และพบ Tension cracks เกิดขึ้นบนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง</p> <p>- การพังสามารถเกิดขึ้นในช่วงเวลาแตกต่างกันคือ</p> <p>1. ช่วงเวลาห่างจากก่อสร้างถนน: สาเหตุของการพังคาดว่าเกิดจากความสั่นสะเทือนจากการบดอัดวัสดุบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่ไม่สามารถรองรับได้ และมีประวัติของการทรุด</p> <p>2. ช่วงเวลาใช้งาน และเกิดเหตุการณ์ Rapid drawdown: สาเหตุของการพังคาดว่าเกิดจากการที่มีน้ำในดิน ทำให้ค่าความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนลดลง และแรงดันจากแรงน้ำในคลองลดลง ทำให้ไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนที่ของมวลดินที่เกิดจากแรงกระทำ</p> <p>3. ช่วงเวลาใช้งาน มีสาเหตุการพังคาดว่าเกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากสิ่งก่อสร้างที่ใกล้เคียงเกิดการโยกไถ่เคียง และจากขบวนการพาหนะ ซึ่งสภาพความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนไม่สามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนดังกล่าวได้</p>
2. กรณีศึกษาการพังของงานถมดิน	<p>พื้นที่ในจังหวัดกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง:</p> <p>1. สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นชั้นตะกอนดินเหนียวอ่อน หรือที่เรียกว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความหนาประมาณ 15 ถึง 17 เมตร ได้ลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นทราย แต่ในชั้นดินของชอยอ่อนพบชั้นดินเหนียวอ่อนมากที่มีค่า Undrained shear strength น้อยกว่า</p>	<p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide และพบ Tension Cracks เกิดขึ้นบนผิวดิน แต่ในชอยอ่อนพบเป็น Lateral spreading ซึ่งเคลื่อนตัวแบบ Rotational slide จากผิวดินลึกลงไปแล้วขยายออกไปด้านข้างในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก</p> <p>- การพังเกิดในช่วงเวลาใช้งาน มีสาเหตุคาดว่าเกิดจากชั้นดินเหนียวอ่อนข้างใต้มีความแข็งแรงน้อยกว่าจึงน้อยมาก ไม่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกจากวัสดุถมดินได้</p>

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ
3. กรณีศึกษาการพังของคันดินขังทางรถไฟ	1 ดัชนีคร.ม. และค่า Water Content มากกว่าค่า Liquid limit แทรกอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีความลึกของพังพื้นผิวไม่มากนักน้อยกว่า 10% ของความยาวของระยะทางการเคลื่อนตัวของมวลดิน ซึ่งอาจจัดได้ว่าเป็น Surface sliding - การพังเกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังสิ้นสุดงานก่อสร้าง มีสาเหตุคาดว่าเกิดจากความสามารถในการระบายน้ำออกจากคันดินไม่ดีพอ ทำให้มีน้ำขังภายในคันดินและดินถม อันเป็นผลทำให้คันดินมีความแข็งแรงลดลง รวมทั้งมีการชะล้างดินให้เคลื่อนตัวลงมากในช่วงฤดูฝน
	2. สภาพดินตาม Geological formation จัดเป็น Alluvial soil	
	พื้นที่ที่บ้านกิโลเมตร 18 จังหวัดระยอง	
4. กรณีศึกษาการพังของริมตลิ่งแม่น้ำโขง	1. สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นชั้นดิน Sandy soil ที่ถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็น SM มีความหนาประมาณ 14 เมตร	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งพื้นผิวอยู่ในลาด และพบ Tension cracks เกิดขึ้นบนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังคาดว่าสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการกัดเซาะเนื่องจากสภาพดินเป็นกลุ่มดินที่ง่ายต่อการถูกกัดเซาะ โดยเฉพาะในหน้าน้ำหลาก หรือช่วงฤดูฝน ประกอบกับเกิดเหตุการณ์ Rapid drawdown หรือลดระดับน้ำในแม่น้ำโขงทันที แต่ระดับน้ำได้ดินลดลงช้ามาก ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง ประกอบกับแรงดันจากแรงน้ำในแม่น้ำลดลง ทำให้อาคารดินไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของลาดริมตลิ่ง
	2. สภาพดินตาม Geological formation เป็น Residual soil ของ Granite	
	พื้นที่บนตลิ่งริมแม่น้ำโขง	
5. กรณีศึกษาการพังของลาดเนื่องจากกรด	1. สภาพดินเดิมส่วนใหญ่เป็น Clayey sand, Clayey silt, และ Silty clay ซึ่งถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็น SC, ML, และ CL โดยมีค่าความยึดเหนี่ยวน้อย และค่า ϕ ประมาณ 25 ถึง 30 องศา	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งพื้นผิวอยู่ในลาด และพบ Tension cracks เกิดขึ้นบนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังคาดว่าสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการกัดเซาะเนื่องจากสภาพดินเป็นกลุ่มดินที่ง่ายต่อการถูกกัดเซาะ โดยเฉพาะในหน้าน้ำหลาก หรือช่วงฤดูฝน ประกอบกับเกิดเหตุการณ์ Rapid drawdown หรือลดระดับน้ำในแม่น้ำโขงทันที แต่ระดับน้ำได้ดินลดลงช้ามาก ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง ประกอบกับแรงดันจากแรงน้ำในแม่น้ำลดลง ทำให้อาคารดินไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของลาดริมตลิ่ง
	2. สภาพดินตาม Geological formation จัดเป็น Old alluvial deposit และ Residual soil ของหินพวก Sandstone, Siltstone, และ Shale	
	ก) พื้นที่ในจังหวัดของภาคเหนือ ได้แก่ คอยดงและคอยแม่สลอง	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ
ไหลเขาของถนน ความสูงของลาดมีค่ามากกว่า 10 เมตร	<p>จว. เชียงราย, ดอยอ่างขาง จว. เชียงใหม่, ทางสายเด่นชัย แพร่, และทางสายร้องกวาง พะเยา</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินต้นกำเนิดแตกต่างกันตามตำแหน่งของพื้นที่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวก Sandstone, Shale, และ Quartzite และมีบางส่วนพบ Granite, Phyllite, Greywacke, และ Laminated shale ซึ่งจัดว่ามีค่าความยึดเหนี่ยวน้อย</p> <p>ข) พื้นที่ในจังหวัดทางภาคใต้ คือ จว. สุราษฎร์ธานี, จว. พังงา, จว. นครศรีธรรมราช, และ จว. ภูเก็ต</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินต้นกำเนิดพวก Sandstone, Siltstone และ Granite ซึ่งมีค่าความยึดเหนี่ยวน้อย</p>	<p>1. Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งของพื้นผิวอยู่ภายในลาด</p> <p>2. Falls</p> <p>3. Debris flows ในช่วงที่มีฝนตกหนัก สำหรับดินที่อุ้มน้ำมาก</p> <p>- การพังคาดว่าสาเหตุมาจากการตัดไหล่เขาที่มีความชันมากกว่าค่า ϕ ของดินและหิน ประกอบกับมีการกัดเซาะที่เชิงของลาด ซึ่งได้รับอิทธิพลจากน้ำฝนในช่วงฤดูฝน ตลอดจนดินอุ้มน้ำได้มาก จนเกิดการพังแบบ Debris flows</p> <p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งของพื้นผิวอยู่ในลาด และยังพบรูปแบบ Debris flow ในพื้นที่ของจังหวัดภูเก็ต เมื่อเป็นช่วงฤดูฝนตกหนัก</p> <p>- สาเหตุของการพังคาดว่าเกิดจากการตัดไหล่เขาในบริเวณที่มีความชันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ϕ ตลอดจนไม่มีการคำนึงแนวการวางตัวของหินในระหว่างการตัดไหล่เขา</p>
6. กรณีศึกษาการพังของลาดเนื่องจาก การตัดไหล่เขาของเหมือง	<p>ก) พื้นที่ในบริเวณเหมืองแม่เมาะ จว. ลำปาง</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation จัดเป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินพวก Claystone และ Lignite</p> <p>ข) พื้นที่ในบริเวณโรงงานผลิตซิเมนต์ จว. สุราษฎร์ธานี</p>	<p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังสามารถเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งของพื้นผิวอยู่ในลาด หรือ Planar slide ตามแนว Fault plane</p> <p>- การพังมีสาเหตุคาดว่าเกิดจากการตัดไหล่เขาในบริเวณที่มีความชันสูงและค่า ϕ และการตัดไหล่เขาไม่ได้คำนึงถึงแนวการวางตัวของหิน</p> <p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังสามารถเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งของ</p>

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพดิน	สภาพการพังและสาเหตุ
7. กรณีศึกษาการพังของลาดธรรมชาติ	<p>สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินพวก Laminated slate</p> <p>ก) พื้นที่ในดอยแม่สลอง จว. เชียงราย และในบริเวณของเขื่อนแม่สลอง จว.แพร่</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation จัดเป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินอัคนี, Sandstone, Shale, Phyllite, และ Quartzite ที่มีความยึดเหนี่ยวน้อย</p> <p>ข) พื้นที่ในจว. สุราษฎร์ธานี, จว. นครศรีธรรมราช, จว. กระบี่, และ จว.ภูเก็ต</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหิน Granite และ Sandstone เป็นส่วนใหญ่</p>	<p>พื้นผิวอยู่ในลาด หรือ Planar slide ตามแนว Fault plane</p> <ul style="list-style-type: none"> - การพังมีสาเหตุคาดว่าเกิดจากการตัดไหล่เขา ไม่มีการค้ำึงถึงแนวการวางตัวของชั้นดินและชั้นหิน โดยเฉพาะแนวการวางตัวที่ยังคงมีการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องอยู่ - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Shallow seated rotational slide ที่มีตำแหน่งพื้นผิวอยู่ในลาด หรือ Planar slide ตามแนว Fault plane - การพังคาดว่าเกิดจากในช่วงฤดูฝนตกหนัก มีการกัดเซาะที่เชิงของลาด ประกอบกับชั้นดินและหินข้างใต้มีความแข็งแรงต่ำ โดยเฉพาะมีความยึดเหนี่ยวน้อยมาก - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Debris flow - การพังเกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนัก คาดว่าเกิดจากอิทธิพลของน้ำฝน ทำให้ดินมีความชื้นมากจนถึงค่าปริมาตรหนึ่งทำให้ดินมีสภาพเป็นโคลนและสามารถไหลได้
8. กรณีศึกษาการพังของเขื่อนดิน	<p>พื้นที่ในเขื่อนแม่แหลงหลวง จว. เชียงใหม่</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินต้นกำเนิดที่แตกต่างกันตามตำแหน่งของพื้นที่คือหิน Granite, และหิน Basalt,</p>	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Planar slide ตามแนว Fault plane, หรือ Shallow seated rotational slide - การพังคาดว่าเกิดจากการตัดไหล่เขามานชั้นดินและหินที่มีความยึดเหนี่ยวน้อยมาก และยังได้รับอิทธิพลจากน้ำฝนในช่วงฝนตกหนัก ที่ทำให้ความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนแอลง และมีการกัดเซาะที่เชิงของลาดด้วย

การประเมินสภาพพิบัติจากข้อมูลของหน่วยงานและเอกสารอ้างอิง

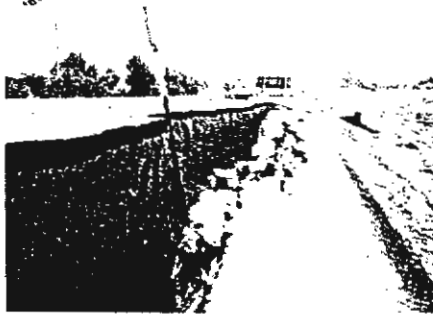
ข้อมูลจากหน่วยงานของรัฐบาลและเอกชนซึ่งมีเอกสารอ้างอิง แสดงสภาพพิบัติของโครงการที่เกิดขึ้นแล้วประกอบด้วยกรณีศึกษาการพังของลาดทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เป็นข้อมูลกรณีพิบัติที่พบในต่างประเทศจำนวนทั้งหมด 4 ตัวอย่าง และในประเทศไทยจำนวนทั้งหมด 49 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย ในภาคกลาง จำนวน 26 ตัวอย่าง, ภาคตะวันออก 3 ตัวอย่าง, ภาคเหนือ จำนวน 2 ตัวอย่าง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 16 ตัวอย่าง, และภาคใต้จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถจัดข้อมูลได้เป็น 4 กลุ่มดังได้กล่าวแล้วข้างต้น ข้อมูลส่วนใหญ่ได้มาจากหน่วยงานราชการ คือ กรมทางหลวง และกรมโยธาธิการ

ในการนี้ ได้จำแนกรูปแบบของการเคลื่อนพังตามระบบของ Varnes (1978) ของแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 โดยมีข้อสรุปของสภาพพิบัติดังแสดงในตารางที่ 4.2



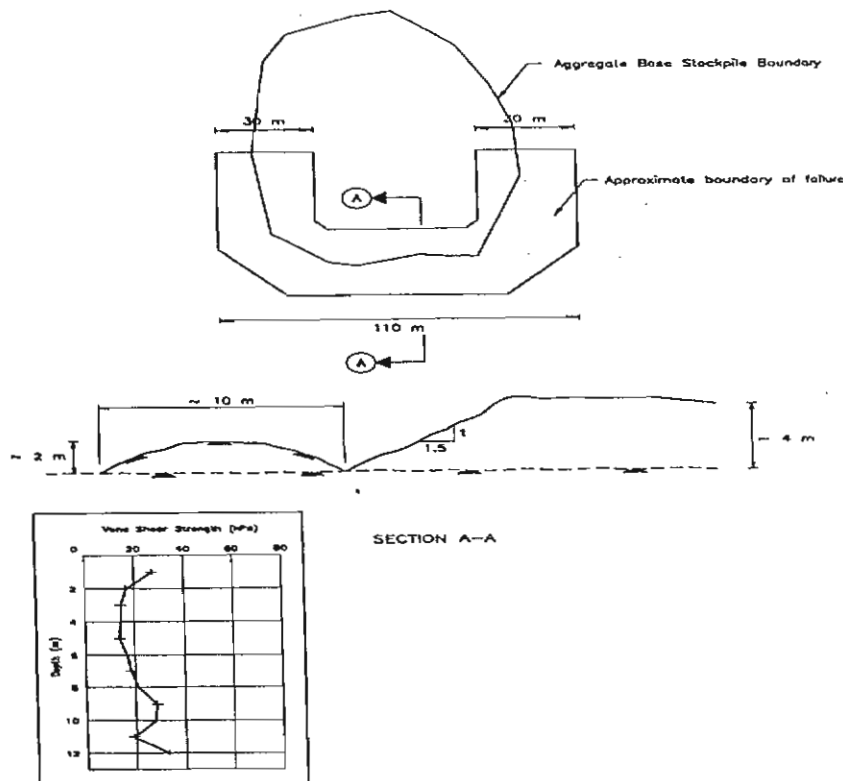
TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของรูปแบบการพังของคันดินถมของทางสายหมายเลข 3454



(ก)

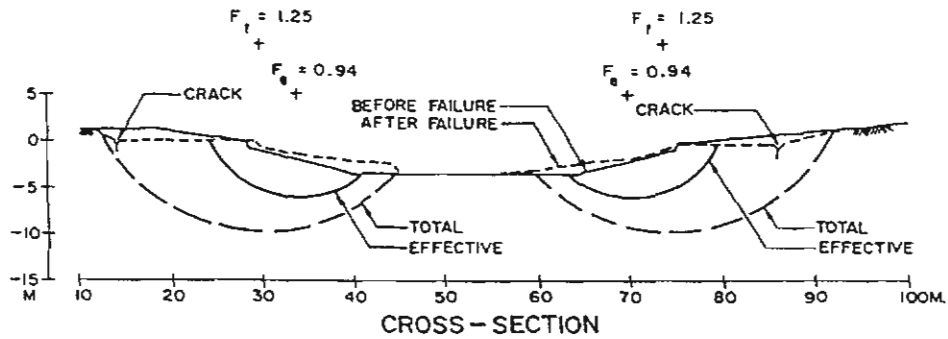
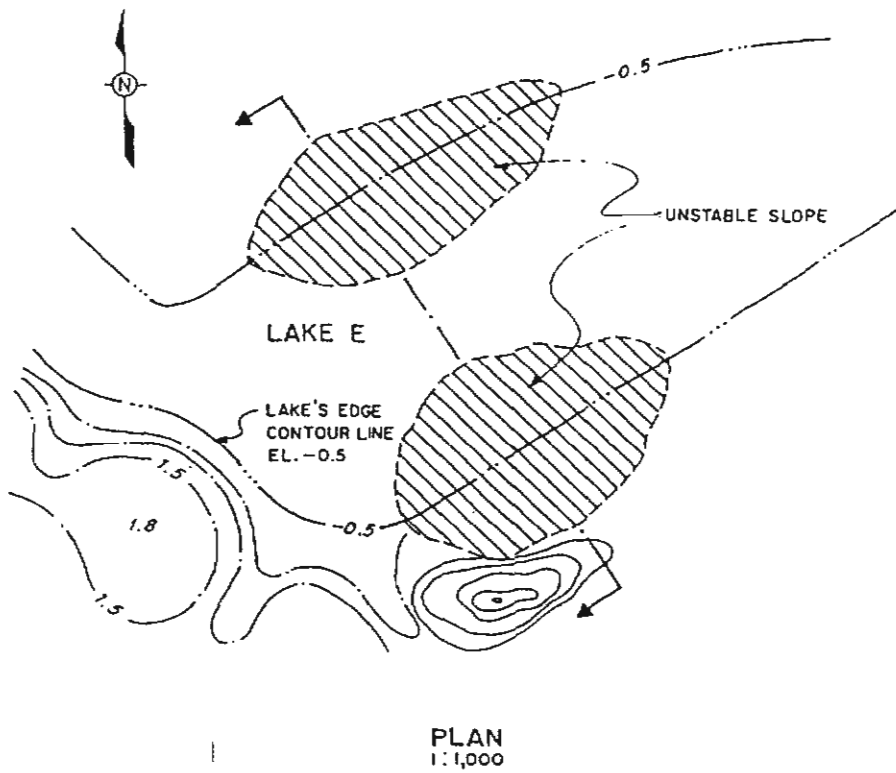
TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide



TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide

(ข)

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของรูปแบบการพังของ (ก) ค้นดินถมของทางหลวงหมายเลข 305, (ข) งานดินถมที่หนองงูเห่า จังหวัดกรุงเทพฯ, และ (ค) งานขุดดินที่หนองงูเห่า จังหวัด กรุงเทพฯ



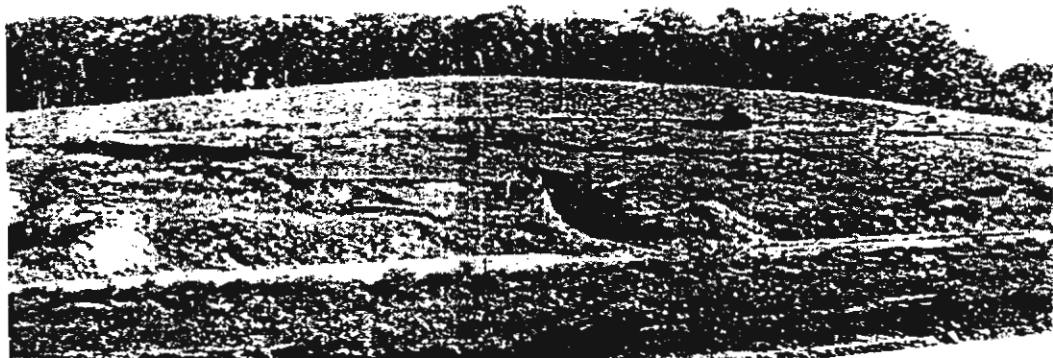
TYPE OF MOVEMENT		EARTH (fine soil)
FALLS		earth fall
TOPPLES		earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	earth slump
	TRANSLATIONAL	earth slide

(ค)

รูปที่ 4.6 (ต่อ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างของรูปแบบการพังของ (ก) ลาดเขาตามธรรมชาติที่บ้านคิรีวงศ์ จังหวัด นครศรีธรรมราช, และ (ข) ลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาของถนน ในประเทศ ออสเตรเลีย

การจัดจำแนกประเภทการพิบัติและการศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการพิบัติ

ระบบการจำแนกที่นำมาใช้งานวิจัย คือระบบของ Varnes เนื่องจากมีความชัดเจนในการ แสดงรูปร่างและลักษณะของพื้นผิวการพิบัติของแต่ละประเภทโดยแสดงในภาพสามมิติ ทำให้ง่ายต่อ การจำแนกประเภทของการพิบัติของลาดที่พบและยังมีความละเอียดในการจำแนกประเภทตาม ลักษณะของวัสดุภายในลาด ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมในการนำมาเป็นหลักการของการสร้างความรู้ เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังของลาด

ในงานวิจัย ได้ดำเนินการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด จากที่พบในการ สัมภาษณ์ภาคสนาม เอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอ้างอิง พบว่า มีหลายปัจจัย ซึ่งเป็นทั้ง ปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก ดังแสดงเป็นข้อสรุปในตารางที่ 4.3 ซึ่งสรุปได้ว่า

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลสรุปสภาพพิบัติที่เคยเกิดขึ้นแล้วจากหน่วยงานและเอกสารอ้างอิง

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ	Reference
1. กรณีศึกษาการพังของคันดิน ถมของถนน ซึ่งขนานกับคลอง ชลประทาน, ถนนในนิคม อุตสาหกรรม	พื้นที่ในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง 1. สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นชั้นตะกอนดินเหนียวอ่อน หรือที่ เรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความหนาประมาณ 9 ถึง 15 ม. ลึกลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งและ ชั้นทราย 2. สภาพดินตาม Geological formation จัดเป็น Alluvial soil	- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide และพบ Tension cracks บนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาแตกต่างกันคือ 1. ช่วงระหว่างก่อสร้าง สาเหตุคาดว่าเกิดจากน้ำหนักของวัสดุก่อสร้างกระทำบน คันดินชั่วคราว ซึ่งดินเหนียวอ่อนไม่สามารถรองรับได้ 2. ช่วงเวลาใช้งานและเกิดเหตุการณ์ Rapid drawdown สาเหตุของการพังคาดว่า เกิดจากการที่มีน้ำในดินทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง และแรงต้านทานการเคลื่อน ที่ของลาดจากแรงน้ำลดน้อยลงไปด้วย 3. ช่วงเวลาใช้งาน มีสาเหตุของการพังคาดว่าเกิดจากแรงสั่นสะเทือน จากปริมาณการ จราจรที่มากขึ้น	1. รายงานจากศูนย์วิจัยและ พัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2. Paochaiyanguyen, 1993 3. กักร, 2541 4. ประเสริฐ และคณะ, 2529 5. ประพจน์, 2529
2. กรณีศึกษาการพังของงาน ถมดิน	ก) พื้นที่ในโครงการสนามบินนานาชาติแห่งที่ 2 ที่หนอง งูเห่า กรุงเทพฯ 1. สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นดินเหนียวอ่อน หรือที่เรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความหนาประมาณ 9 ถึง 15 เมตร และมีชั้น Weathered zone มีความหนาประมาณ 4 เมตร 2. สภาพดินตาม Geological formation จัดเป็น Alluvial soil	- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide และมี Tension cracks บนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังคาดว่าเกิดขึ้นระหว่างก่อสร้าง ในช่วงงานของการถมวัสดุบนคันดินจนเกิด การเคลื่อนพังเมื่อถมดินได้สูงประมาณ 4 เมตร เนื่องจากดินเหนียวอ่อนไม่ สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ด้วย	ประพจน์, 2538

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ	Reference
3. กรณีศึกษาการพังของงานขุดดิน	ข) พื้นที่บน New Castle Harbour ในรัฐ New South Wales ออสเตรเลีย	- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide - การพังคาดว่าเกิดจากดินเหนียวอ่อนไม่สามารถรองรับน้ำหนักของดินถมได้ จึงเกิดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวไปบนดินชั้นทางของถนนใกล้เคียง ทำให้คันดินถนนดังกล่าวเกิดการเคลื่อนพัง	Weisner และ Carr, 1987
	สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นดินเหนียวอ่อนมาก ค่าความแข็งแรงของดินสามารถคำนวณได้ด้วยสมการของ Skempton		
	พื้นที่ในจังหวัดกรุงเทพฯ และอ้างทอง	- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide และมี Tension crack บนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังสามารถเกิดขึ้นได้ในแต่ละช่วงเวลาดังนี้ 1. ช่วงเวลาระหว่างก่อสร้าง มีสาเหตุคาดว่าเกิดจากผลกระทบของการรบกวนดินด้วยเครื่องจักรก่อสร้าง ทำให้ความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนลดลง จนไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดิน ประกอบกับแรงดันจากน้ำในข้อชุดลดลง ทำให้แรงต้านดังกล่าวลดน้อยลง หรืออาจมีสาเหตุจากความแข็งแรงของดินเหนียวลดลงเนื่องจากมีการเพิ่มความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีน้ำจากบริเวณใกล้เคียงซึมเข้าไป ชั้นดินเหนียวอ่อนจึงไม่สามารถรองรับน้ำหนักที่มากขึ้นได้ 2. ช่วงเวลาใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมของดินในลักษณะของงานชุดความแข็งแรงของดินจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาหลังจากสิ้นสุดงานก่อสร้าง ทำให้ไม่สามารถรองรับน้ำหนักได้ จึงควรใช้หน่วยแรงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์	1. ประพจน์, 2538 2. นกมล, 2538 3. รายงานจากบริษัทเอกชน
4. กรณีศึกษาการพังของลาดเนื่อง	พื้นที่ในจังหวัดขอนแก่น และหนองบัวลำภู		
	ก) พื้นที่ในจังหวัดขอนแก่น และหนองบัวลำภู	- รูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Surface sliding ในลักษณะของ Slope erosion	1. รายงานจากศูนย์วิจัยและ

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ	Reference
จากการตัดไหล่เขาของถนน	สภาพดินและหินตาม Geological formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินพวก Granite ซึ่งมีความยึดเหนี่ยวน้อย ข) พื้นที่ใน Hue Hue Road ระหว่างเมือง Sydney และ New Castle รัฐ New South Wales ออสเตเลีย สภาพดินและหินตาม Geological formation จัดเป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินพวก Claystone, Siltstone และ Sandstone	<ul style="list-style-type: none"> - การพังคาดว่าจะเกิดในช่วงฝนตกหนัก ซึ่งน้ำฝนได้ซึมผ่านเข้าไปในชั้นดินมาก ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง จนลาดดินถูกกักเกาะตามผิวของลาดดิน เคลื่อนตัวลงมาที่เชิงของลาดสะสมตัวกันมากขึ้น - รูปแบบการเคลื่อนพังประกอบด้วยเริ่มจาก Rotational slide แล้วตามด้วย Planar slide ในชั้นดิน หรือชั้นหินที่อ่อน และพบ Tension crack บนผิวดินในพื้นที่ที่มีการพัง - การพังคาดว่าจะเกิดในช่วงฝนตกหนัก และมีน้ำขังในลาดเนื่องจากกระบวนการระบายน้ำออกจากลาดไม่ดี ทำให้ค่าความแข็งแรงของดินลดลง และน้อยกว่าค่าที่ควรใช้ในการออกแบบ 	
5. กรณีศึกษาการพังของลาด เนื่องจาก การตัดไหล่เขาของบ่อ	พื้นที่ใน Lanceley Place เมือง Artarnian รัฐ New South Wales ออสเตเลีย สภาพดินและหินตาม Geological formation จัดเป็น Residual soil และ Weathered rock ของหิน Laminated shale, Siltstone, และ Sandstone	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Planar sliding - การพังคาดว่าจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้าง มีสาเหตุมาจากการขาดการระมัดระวังในการตัดไหล่เขา และการตัดไหล่เขามีความชันมากกว่าค่า ϕ ของชั้นดินและชั้นหิน 	
6. กรณีศึกษาการพังของคันดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อน	พื้นที่ใน Hunter Valley รัฐ New South Wales ออสเตเลีย สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นดินเหนียวอ่อน ค่าความแข็งแรงในรูปของ Undrained shear strength ประมาณ 0.35 ของ	<ul style="list-style-type: none"> - รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide - การพังคาดว่าจะเกิดในช่วงระหว่างการก่อสร้าง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนไม่สามารถรองรับน้ำหนักที่กระทำบนคันดินได้ 	

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กรณีศึกษาการพัง	สภาพชั้นดิน	สภาพการพังและสาเหตุ
<p>ค่า Effective overburden pressure เมื่อค่า O.C.R ของดิน</p> <p>เหนียวมีค่าเท่ากับ 1.30</p>		
7. กรณีศึกษาการพังของริมตลิ่งแนว้	<p>ก) พื้นที่บนตลิ่งริมแม่น้ำโขง</p> <p>เช่นเดียวกับที่ได้จากการสำรวจออกภาคสนาม</p> <p>ข) พื้นที่บนตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำบางปะกง</p> <p>สภาพดินเดิมช่วงบนเป็นตะกอนดินเหนียวอ่อน หรือที่เรียกว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ</p>	<p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide</p> <p>- การพังคาดว่าเกิดจากการมีเหตุการณ์ Rapid drawdown ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง และแรงต้านจากแรงน้ำในแม่น้ำลดลง ทำให้ไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อมีน้ำหนักกระทำ</p> <p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Deep seated หรือ Base rotational slide</p> <p>- การพังคาดว่าเกิดจากสภาพ Rapid drawdown เกิดขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง และแรงต้านจากแรงน้ำในแม่น้ำลดลง ทำให้ไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อมีน้ำหนักกระทำ</p>
8. กรณีศึกษาการพังของลาดเขาดามธรรมชาติ	<p>พื้นที่บริเวณภูเขาในบ้านนาสาร บ้านพิปูน</p> <p>บ้านคีรีวงค์</p> <p>สภาพดินและหินตาม Geological formation</p> <p>เป็น Residual soil และ Weathered Rock ของหินดานกำเนิด</p> <p>ส่วนใหญ่เป็น Granite และ Sandstone</p>	<p>- รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Debris flow</p> <p>- การพังเกิดขึ้นในขณะที่ย่นตกหนักมากในเดือน พ.ย.1988 ทำให้ดินมีความชื้นมากจนถึงค่าปริมาณหนึ่งที่ทำให้ดินสามารถไหลได้</p>

ตารางที่ 4.3 ข้อสรุปของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด

ปัจจัย	เอกสารอ้างอิง	ข้อมูลที่รวบรวมได้ในประเทศไทย
1. สภาพทางธรณีเทคนิคของดิน	<ol style="list-style-type: none"> 1. Caine (1980) 2. Jahns (1978) 3. Vaunat และคณะ (1996) 4. Varnes (1978) 5. Hutchinson (1988) 6. Janbu (1996) 7. Leroi (1996) 8. Leroueil และคณะ (1983b) 9. Brand และคณะ (1984) 10. Terzaghi (1950) 11. Popescu (1996) 12. Moser และ Hohensinn (1983) 13. Barisone และ Bottine (1990) 14. Romana (1993) 15. Liener และคณะ (1996) 16. Popa และ Fetea (1996) 17. Walker และคณะ (1987) 	ข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรวบรวมได้ คือ 149 ตำแหน่ง
2. ปริมาณน้ำฝน	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nilsen และ Turner (1975) 2. Crozier (1984) และ Lumb (1975) 3. Rober และ Selby (1980) 4. Fukuska (1978) 5. Leroi (1996) 6. Brand และคณะ (1984) 7. Terzaghi (1950) 8. Johnson และ Sitar (1990) 9. Barisone และ Bottino (1990) 10. Romana (1993) 11. Terzaghi (1950) 12. Popescu (1996) 	มักพบในการตัดไหล่เขา ในภาคเหนือ และภาคใต้

3. สภาพความชื้นของลาด	1. Barisone และ Bottino (1990) 2. Romana (1993) 3. Liener และคณะ (1996) 4. Sidle และคณะ (1985) 5. Terzaghi (1950) 6. Popescu (1996)	มักพบในการตัดไหล่เขาในภาคเหนือ และภาคใต้
4. สภาพพืชปกคลุม	1. Greenway (1987) 2. O'Loughlin (1974) 3. Gray และ Leiser (1982) 4. Sidle และคณะ (1985) 5. Popescu (1996)	6. Greenway (1987) 7. O'Loughlin (1974) 8. Gray และ Leiser (1982) 9. Sidle และคณะ (1985) 10. Popescu (1996)
5. น้ำหนักบรรทุก	1. Terzaghi (1950) 2. Popescu (1996)	คันดินถมของถนน และดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อน
6. ความสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว	1. Keefer (1984) 2. Sidle และคณะ (1985)	ไม่พบ

1. ปัจจัยหลัก คือลักษณะทางธรณีเทคนิคของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยภายใน และปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนพังของลาด

2. ปัจจัยรอง ส่วนใหญ่เป็นปัจจัยที่กระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนพังของลาด คือ สภาพความชื้นของแผ่นดินไหว ซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในพื้นที่ที่มีความชื้นของแผ่นดินไหวสูง อาทิเช่น จังหวัดเชียงรายและจังหวัดกาญจนบุรี ในประเทศไทย เป็นต้น โดยเฉพาะในแหล่งชุมชนและบริเวณโครงสร้างขนาดใหญ่, สภาพพืชปกคลุม, และการกระทำของมนุษย์ และสภาพความชื้นของลาด ซึ่งจัดว่าเป็นปัจจัยภายในลาดและปัจจัยทางธรรมชาติ

3. ปัจจัยที่เกิดจากสหสัมพันธ์ของสองปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ดังตัวอย่างที่พบได้ชัดเจนได้แก่ระหว่างลักษณะทางธรณีเทคนิคของวัสดุ และปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักทั้งคู่ โดยเฉพาะความชื้นในดิน และต่อเนื่องถึงการจัดระดับความเสี่ยงของการพังถล่มของลาด ตามปริมาณของน้ำฝนในช่วงเวลานั้น, และระหว่างปริมาณน้ำฝน และสภาพพืชปกคลุมซึ่งเป็นปัจจัยหลักและปัจจัยรอง ตามลำดับ นั่นคือ บริเวณที่มีพืชปกคลุมอย่างหนาแน่น จะทำให้ลดการไหลชะจากน้ำฝน (Sower และ Royster, 1978) และ การดูดซึมของน้ำในใบไม้ จะทำให้ลดการไหลซึมเข้าไปในดิน ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของดินลดลง (Greenway, 1987)

ซึ่งพบว่า บางครั้งกรณีพิบัติของลาด ประกอบด้วยรูปแบบของการพิบัติตั้งแต่สองรูปแบบขึ้นไป ที่ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่นอนในลำดับเกิดก่อนหรือเกิดหลังระหว่างแต่ละรูปแบบของการพิบัติ อาทิเช่น

3.1 กรณีพิบัติของลาดริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่จังหวัดหนองคาย อาจมีการเคลื่อนพังเริ่มจากการเกิด Scoring ในบริเวณเชิงของลาดในน้ำ แล้วต่อเนื่องด้วยการเลื่อนไถลจากส่วนบนของลาดลงมาเป็นรูปแบบที่เรียกว่า Earth slump หรือ Shallow seated Rotational slide ซึ่งมีตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพังไม่ลึกกว่าเชิงของลาด

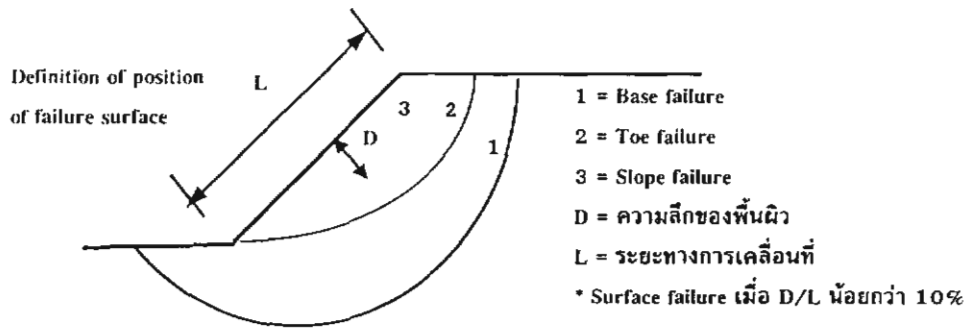
3.2 กรณีพิบัติของลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาได้องค์พระธาตุแม่สลอง จังหวัดเชียงราย อาจมีการเคลื่อนพังเริ่มจากการเกิด Shallow seated rotational slide และ Falls แล้วต่อเนื่องด้วยการไหลลงมาของมวลดินเป็นรูปแบบ Debris flow เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากน้ำฝน ทำให้ดินมีความชุ่มน้ำจนถึงปริมาณหนึ่งที่ดินมีสภาพเป็นของเหลว

ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะปัจจัยภายในลาดเท่านั้น คือ ลักษณะของชั้นดินรวมถึงชนิดของดินและความแข็งแรงของดิน, ระดับน้ำใต้ดิน ได้แก่ ดินอิ่มตัว และดินแห้ง, และ ปัจจัยภายนอก คือ ขนาดหน้าตัดของลาด ได้แก่สภาพความชันและความสูงของลาด เนื่องจากปัจจัยภายนอกที่กระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนพังของลาดส่วนใหญ่ มักจะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลา ได้แก่อิทธิพลของปริมาณน้ำฝนแปรเปลี่ยนตามฤดูกาล, อิทธิพลของพืชปกคลุมแปรเปลี่ยนตามลักษณะของพืชในแต่ละช่วงเวลา และชนิดของพืช, อิทธิพลของปริมาณการจราจร ซึ่งเป็นการกระทำของมนุษย์ แปรเปลี่ยนในแต่ละช่วงเวลาของการใช้ถนน เป็นต้น ซึ่งในการนี้ มีความจำเป็นต้องศึกษาเชิงรายละเอียดของแต่ละปัจจัยในแต่ละพื้นที่ที่ยังมีความแตกต่างกันทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค อาทิเช่น การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมแสดงสภาพความชื้นในดิน การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินไม่อิ่มตัว เป็นต้น ซึ่งไม่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

ผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการออกสำรวจภาคสนาม และเอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิงก็ยังมีจำนวนไม่เพียงพอที่จะกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนพังให้ครอบคลุมได้อย่างครบถ้วน จึงต้องเสริมด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสองลักษณะชั้นดิน ได้แก่ Homogeneous soil และ Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) บนรูปแบบจำลองหน้าตัดของลาดดังแสดงในรูปที่ 3.3 จำนวนมากกว่า 800 หน้าตัด ด้วยรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินในลักษณะชั้นดินดังกล่าวเป็น Rotational slide ตามที่พบจากการออกสำรวจในภาคสนาม เอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง และสภาพการพิบัติที่ประมวลแล้วจากเอกสารอ้างอิง

ผลของการวิเคราะห์จะบ่งบอกตำแหน่งพื้นผิวของการเคลื่อนพัง ว่าเป็น Base rotational slide, Toe rotational slide, Slope rotational slide, หรือ Surface rotational slide ดังแสดงเป็นนิยามในภาพที่ 4.8 และระดับเสถียรภาพของลาดดิน เมื่อกำหนดให้เป็น 3 ระดับตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งได้มาจากแนวความคิด 3 ข้อ คือ



รูปที่ 4.8 นิยามของตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพังแบบ Rotational slide

1. ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่จุดเกิดการเคลื่อนพังน้อยกว่า 1.0 (Janbu, 1996; Fell และคณะ, 1996; Popescu, 1996)
2. ความถี่ของอัตราส่วนความปลอดภัยกระจาย เป็นแบบ Normal distribution curve และระดับที่มีเสถียรภาพสูง จะอยู่ที่ค่าเฉลี่ยของ Curve (Janbu, 1996; Popescu, 1996; Wu และคณะ, 1996)
3. ความน่าจะเป็นของการเกิดการเคลื่อนพังคิดเป็นพื้นที่ 10 % ของพื้นที่ทั้งหมดใน Normal standard distribution curve (Myerhof, 1970; Janbu, 1996)

ตารางที่ 4.4 ระดับเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด	ระดับเสถียรภาพของลาดดิน
$F.S. < 1.0$	ระดับไม่เสถียรภาพ (Unstable or Failure, F)
$1.00 < F.S. < 2.50$	ระดับเสถียรภาพมีความเสี่ยง (Marginally stable) ควรมีการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope stability analysis, A)
$F.S. > 2.50$	ระดับเสถียรภาพสูง (Stable or Unfailure, U)

ซึ่งในการนี้ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้ในงานวิจัย ไม่ได้มาจากค่าอัตราส่วนที่ยอมให้
 สำหรับใช้ในการออกแบบ และงานที่มีการสำรวจที่ชัดเจน แต่ค่าดังกล่าวที่ใช้ในงานวิจัยมีความเสี่ยง
 น้อย แม้ว่าในการสำรวจดินบางกรณีจะให้ข้อมูลที่เชื่อถือได้น้อยก็ตาม

ผลของการวิเคราะห์ สรุปแยกในแต่ละลักษณะของชั้นดิน คือ

1. Homogeneous soil ตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน
 มีความแตกต่างกันตามประเภทของดิน รูปหน้าตัดของลาด และระดับน้ำใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.9
 ถึงรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาสรุปความแตกต่างกันในแต่ละประเภทของดิน มีรายละเอียดดังนี้

1.1 กลุ่ม Cohesive soil ที่มีค่า ϕ ใกล้เคียงศูนย์ พบว่า ตำแหน่งของพื้นผิวอาจเป็น
 Toe หรือ Base rotational slide

1.2 กลุ่มดินที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์ พบว่า ตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพัง
 เป็น Slope หรือ Toe หรือ Base rotational slide

1.3 กลุ่ม Cohesionless soil ที่มีค่า c ใกล้เคียงศูนย์ พบว่า ความลึกของพื้นผิว (D) อาจ
 จะน้อยกว่า 10 % ของระยะความยาวของการเคลื่อนที่ของมวลดิน (L) ลักษณะเช่นนี้จัดได้ว่าเป็น
 Surface sliding แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของลาด

2. Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) ซึ่งเป็นลักษณะของดินเหนียว
 กรุงเทพฯ ที่มีสภาพเนื้อดินเป็นดินอ่อน มีค่ากำลังความแข็งแรงของดินสูงขึ้นตามความลึกและสอดคล้อง
 คล้องกับสมการของ SHANSEP (Ladd และ Foott, 1974) คือ

$$S_u = f(\sigma'_{vo})(O.C.R.)^m$$

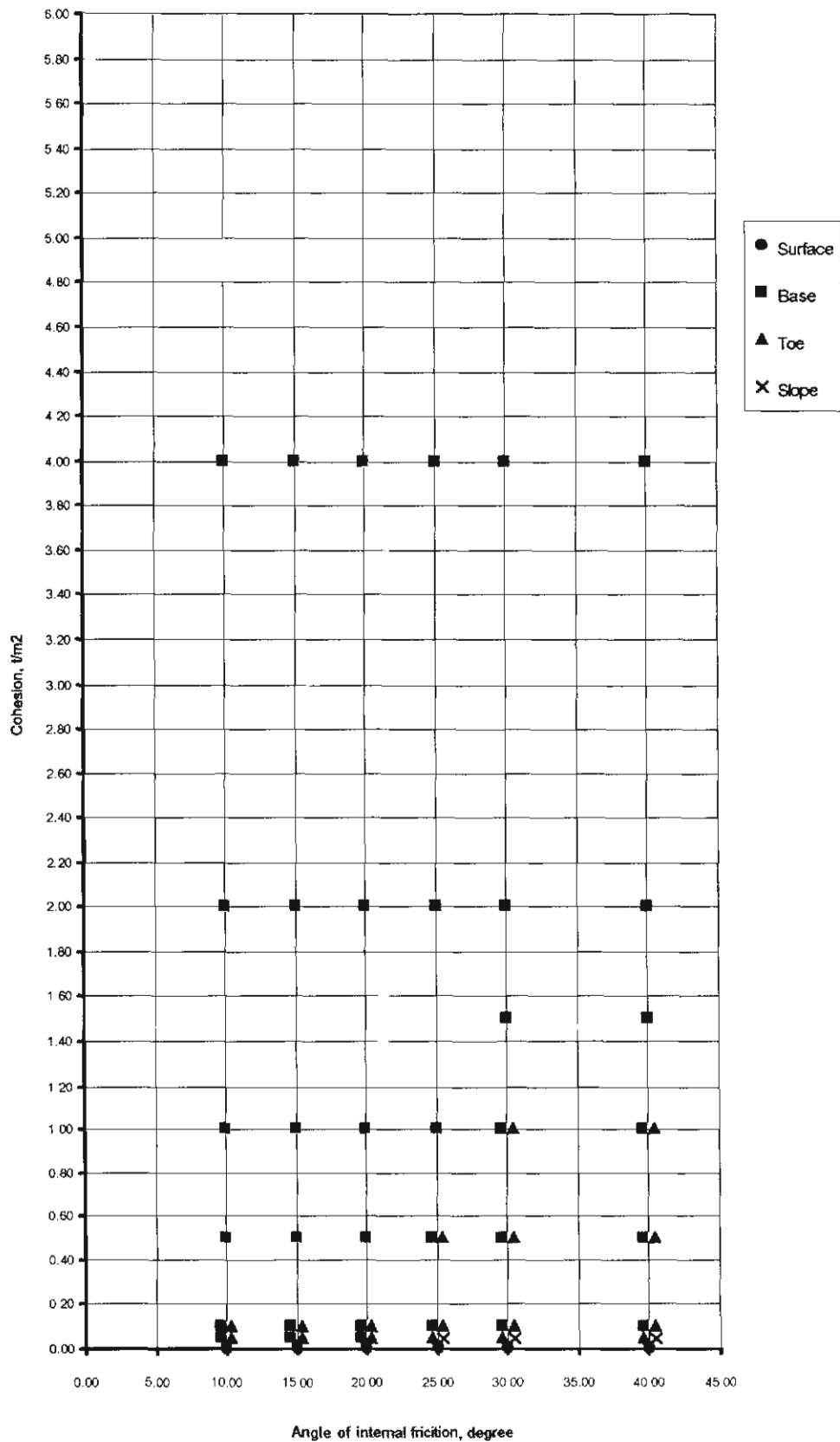
ซึ่งใช้คุณสมบัติของดินจากที่พบบริเวณถนนร่วมพัฒนา เขตหนองจอก จังหวัดกรุงเทพฯ ในการ
 วิเคราะห์ เมื่อ

S_u = Undrained shear strength

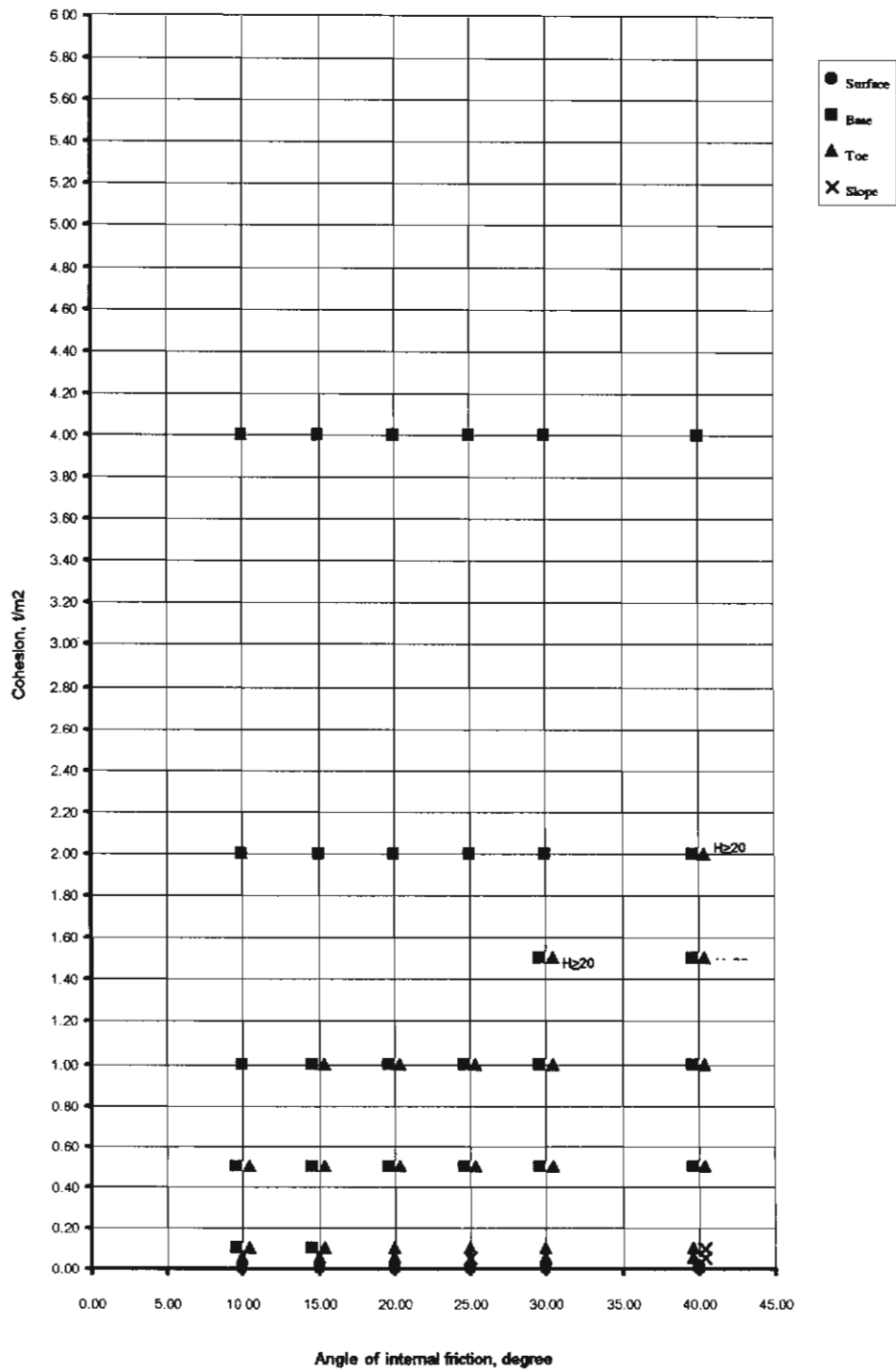
σ'_{vo} = Effective overburden pressure

O.C.R. = Over Consolidation Ratio มีค่า ≈ 1.0

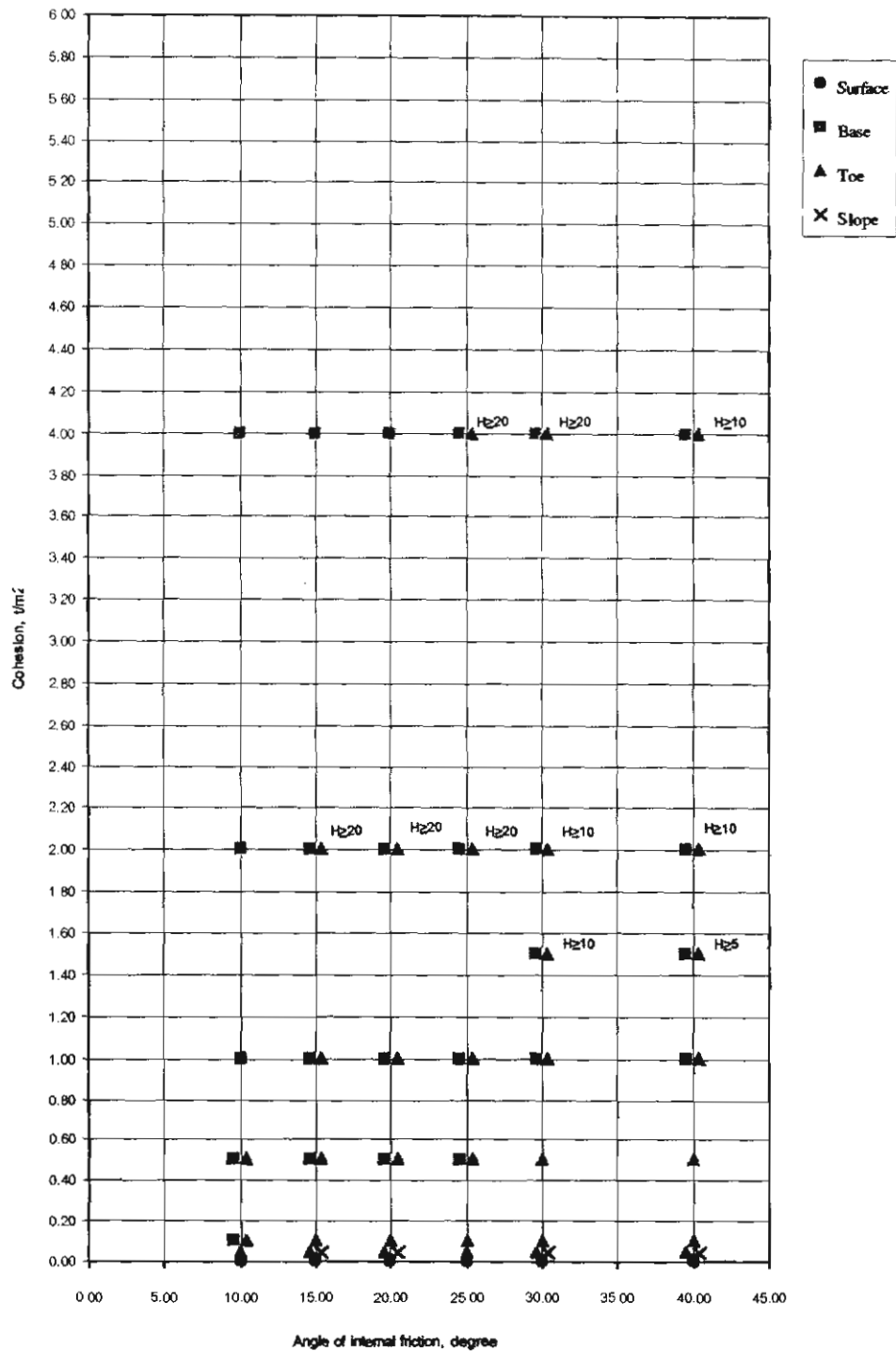
ค่าของ f ประมาณ 0.24



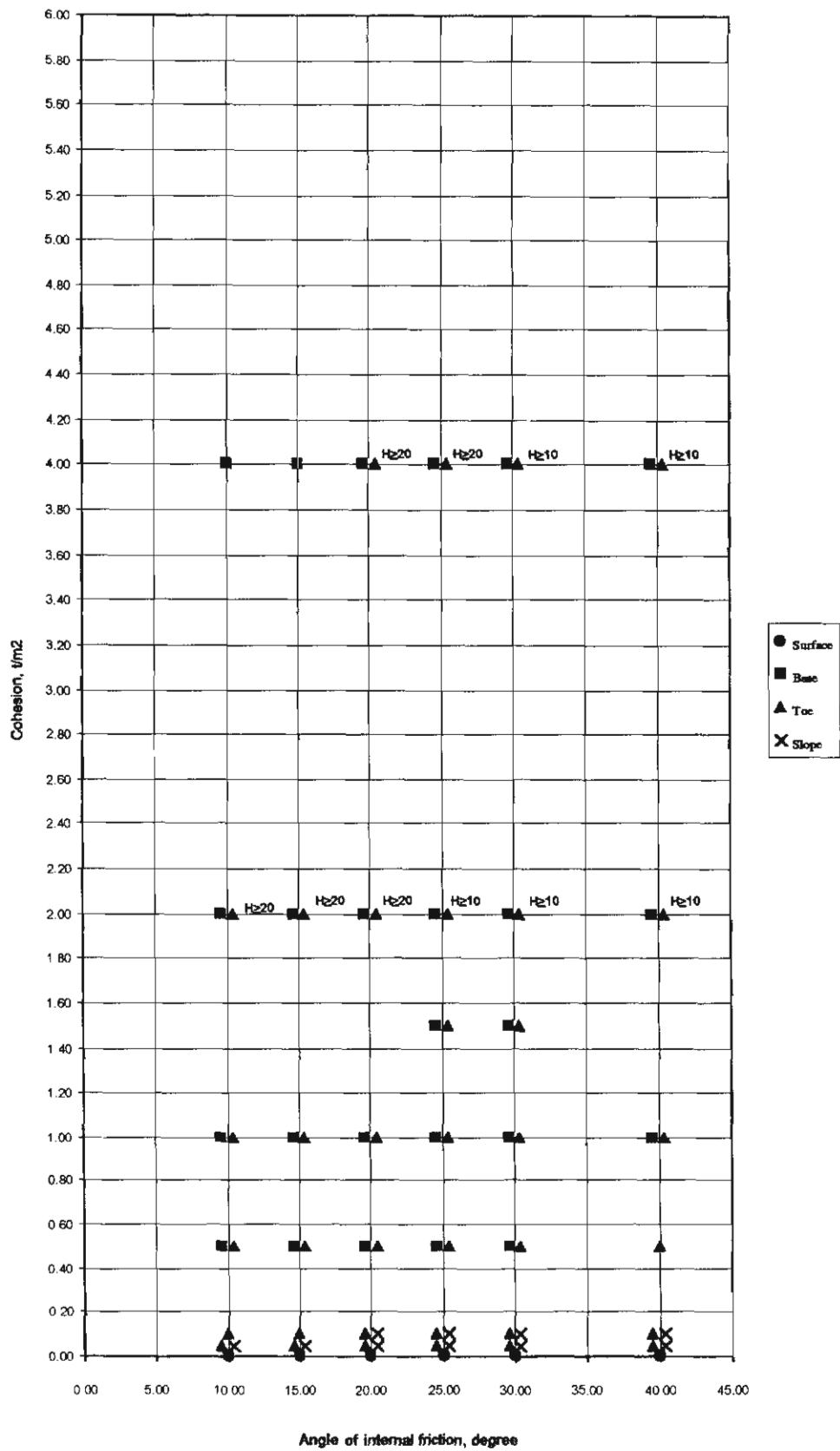
รูปที่ 4.9 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเหนียว เมื่อมุมชันเป็น 10 องศา



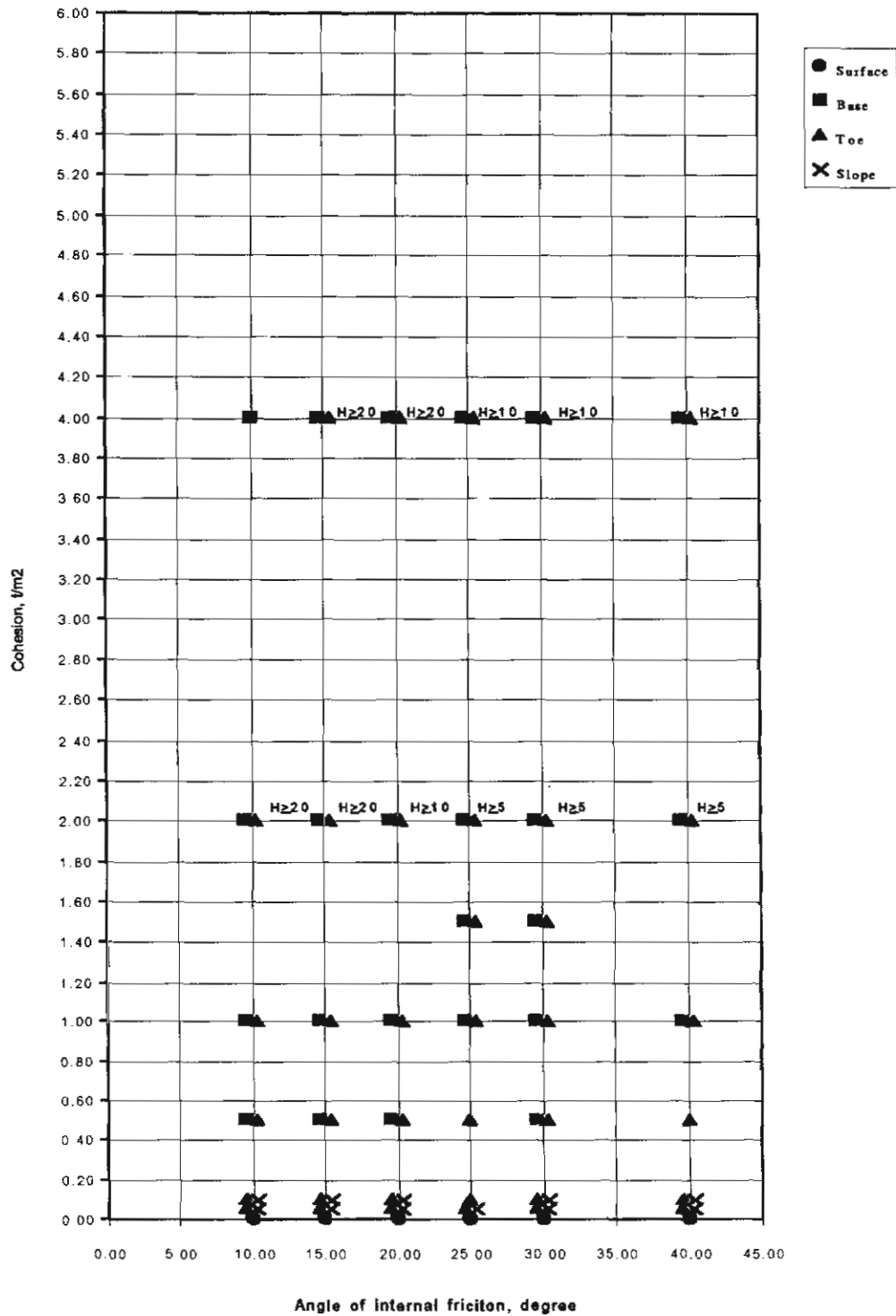
รูปที่ 4.10 รูปแบบการเคลื่อนตัวของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 15 องศา



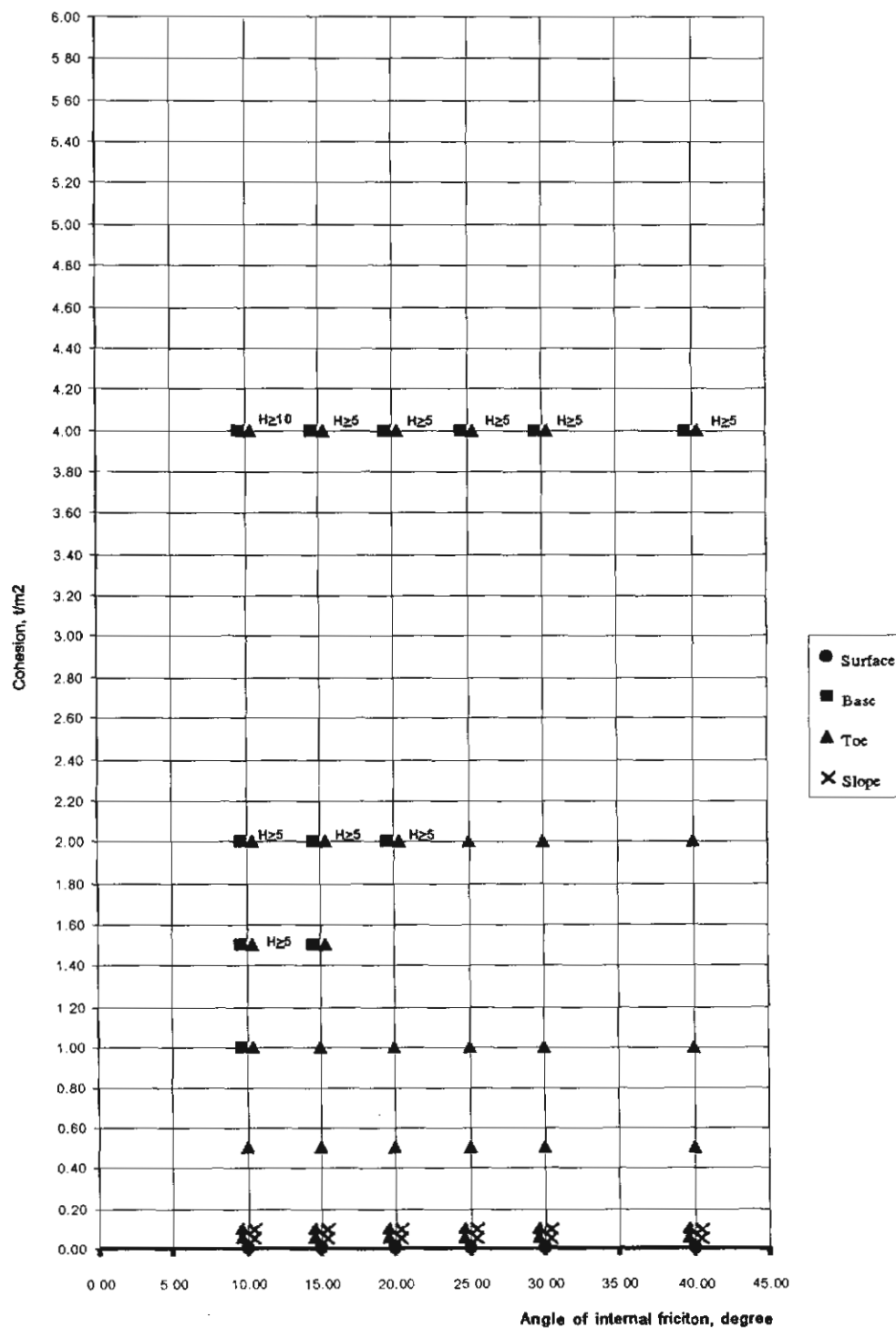
รูปที่ 4.11 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 20 องศา



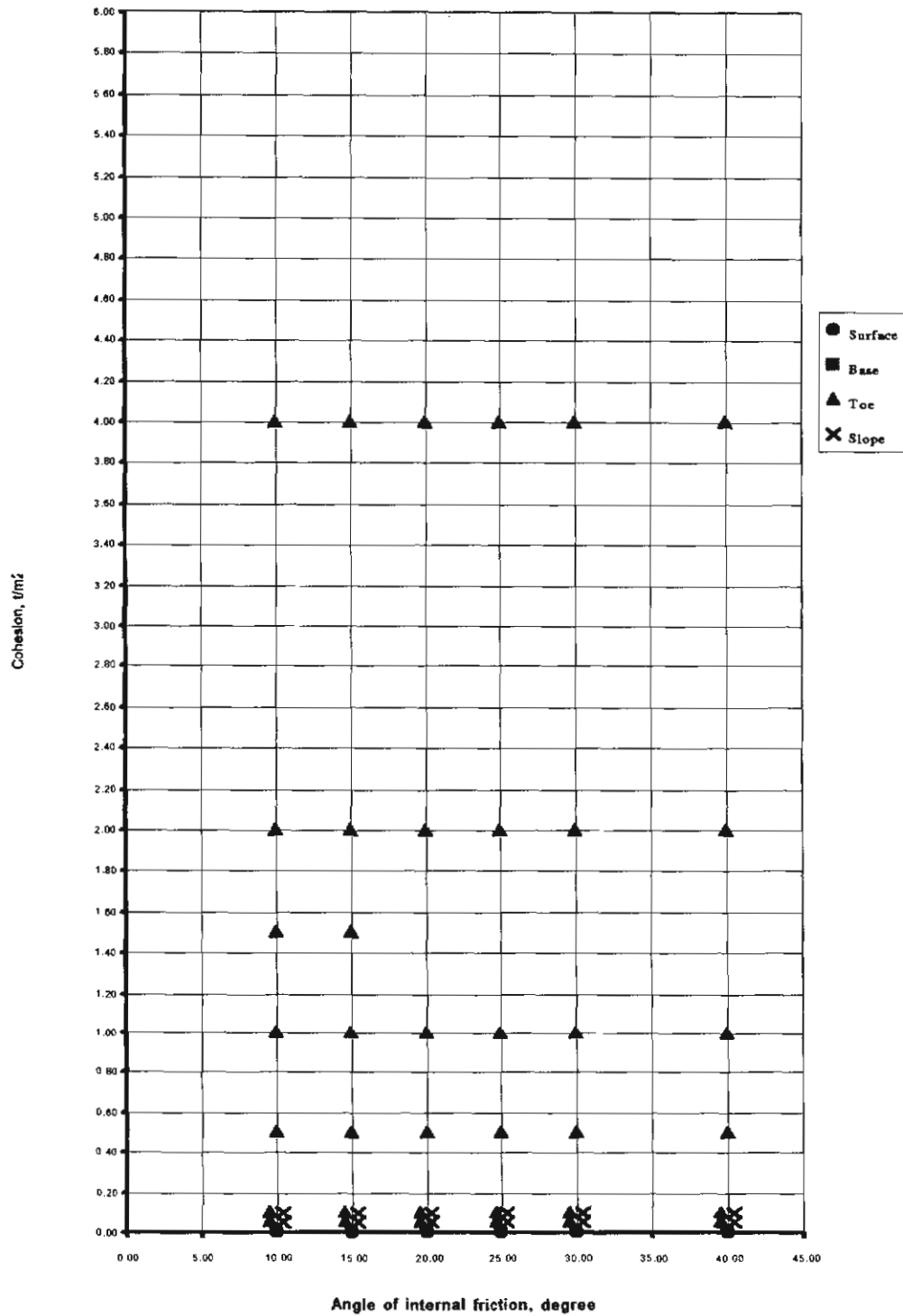
รูปที่ 4.12 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 25 องศา



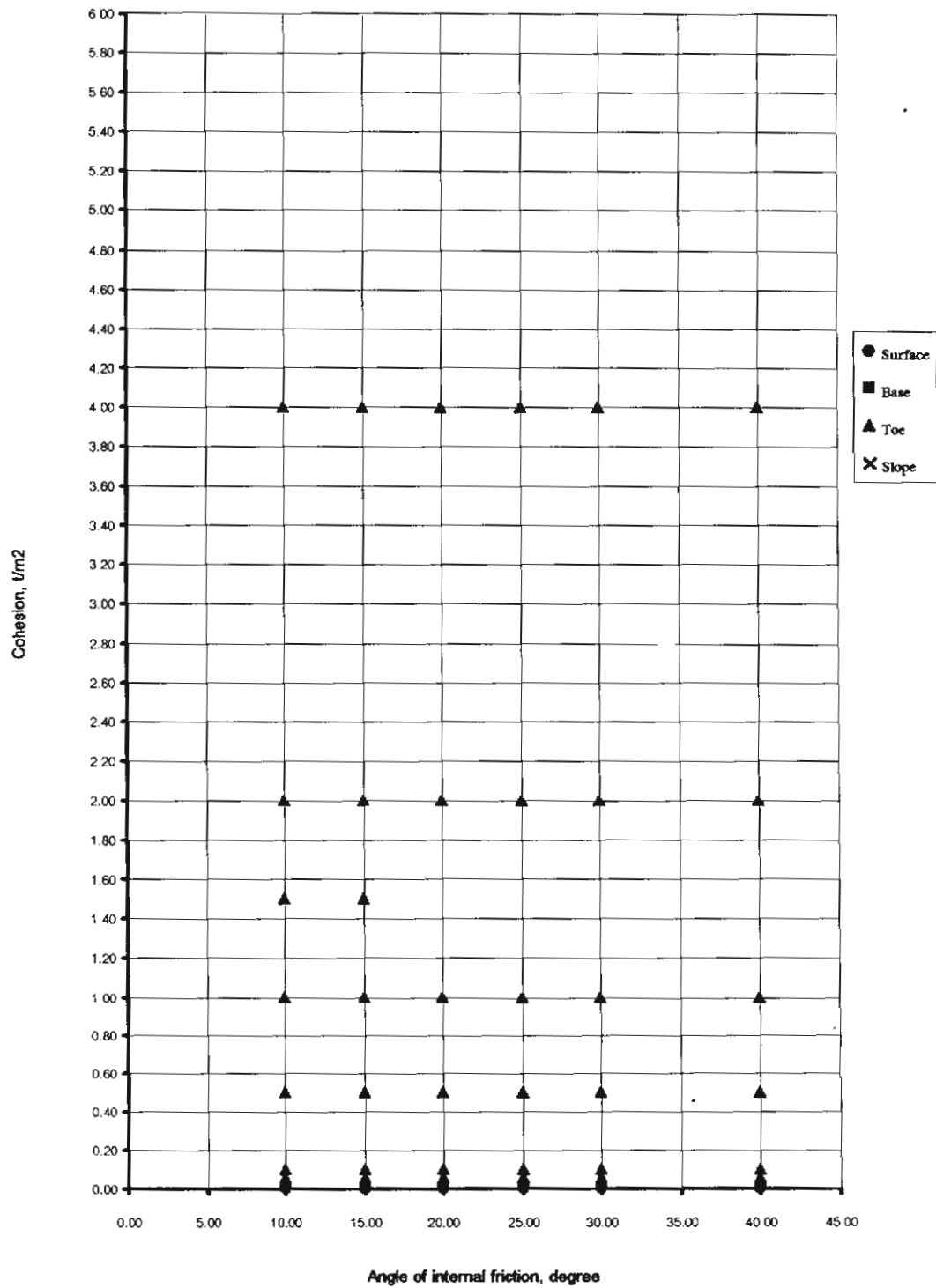
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 30 องศา



รูปที่ 4.14 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเตียว เมื่อมุมชันเป็น 40 องศา



รูปที่ 4.15 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 50 องศา



รูปที่ 4.16 รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อมุมชันเป็น 60 องศา

รูปแบบการเคลื่อนพัง ซึ่งมี Crustal zone อยู่ในชั้นบนของดินเหนียวกรุงเทพฯ มักจะพบตำแหน่งของพื้นผิวการเคลื่อนพังเป็น Toe หรือ Base rotational slide จากความแข็งแรงของดินได้มาจากสภาพที่เป็น Undrained shear strength ($\phi = 0$)

ความรู้ในฐานความรู้ KB1: รูปแบบการพิบัติของลาดดิน

ฐานความรู้ KB1 ประกอบด้วยความรู้ที่ได้จากการประเมิน และวิเคราะห์สิ่งที่เก็บรวบรวมจากแหล่งความรู้ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเป็นการพิจารณารูปแบบของการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดินในแต่ละลักษณะของชั้นดิน คือ Homogeneous soil, Nonhomogeneous soil (strength varies with depth), และ Stratified soil ดังแสดงแนวคิดในตารางที่ 4.5

รายละเอียดของความรู้ในการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังของลาด ในแต่ละกลุ่มของลักษณะชั้นดิน มีดังนี้

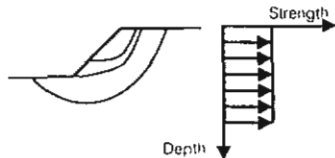
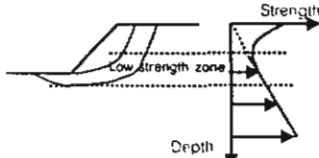
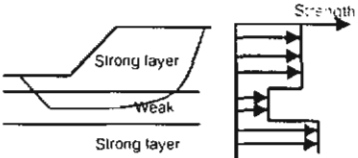
1. Homogeneous soil

รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดินส่วนใหญ่ มีพื้นผิวการเคลื่อนพังใกล้เคียงส่วนโค้ง ของวงกลมที่เรียกว่า Rotational slide ซึ่งมีตำแหน่งของพื้นผิวดังแสดงนิยามในรูปที่ 4.8 และมีความแตกต่างกันตามประเภทของดินดังนี้

1.1 Cohesive soil ที่อิมตัวมีค่า $\phi \approx 0$ พบว่าตำแหน่งของพื้นผิวการพิบัติจะเป็น Toe failure เกิดขึ้นเมื่อมุมเอียงของลาดมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 54 องศา วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพที่ควรนำมาใช้เป็น Simplified Bishop หรือ Fellenius method หรือใช้ Stability chart อาทิเช่น Taylor chart เป็นต้น และรูปแบบของหน่วยแรงในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดินเป็น Total strength analysis ($\phi \approx 0$)

1.2 Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ มากกว่า 0 พบว่าตำแหน่งของพื้นผิวเป็น Slope, Toe, หรือ Base failure ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัด และความชันของลาด, และ Strength parameter ของดิน วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพที่ควรนำมาใช้เป็น Simplified Bishop หรือ Fellenius method และรูปแบบของหน่วยแรงสำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดิน ควรเป็น Total strength analysis ($\phi \neq 0$) หรือ Effective strength analysis สำหรับดินเหนียวแข็ง และ Effective strength analysis สำหรับ Coarse grained soil และ Silt

ตารางที่ 4.5 แนวคิดในการสร้างฐานความรู้ KB1

ลักษณะของชั้นดิน		
Homogeneous soil	Nonhomogeneous soil(strength varies with depth)	Stratified soil
 <p>ลักษณะงาน : Embankment, Uniform soil layer, Weathered granitic soil รูปแบบการพัง: Rotational slide ตำแหน่งของพื้นผิวเคลื่อน: o ใน Soft to medium stiff clay และ Plastic silt ($\phi \approx 0$) พบเป็น Base หรือ Toe failure ขึ้นอยู่กับความชันของลาด o ใน Cohesionless soil ($c \approx 0$) พบเป็น Slope surface failure o ใน Stiff clay, Nonplastic silt, Coarse grained soil พบเป็น Base, Toe, หรือ Slope surface failure ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของลาด และค่า Cohesion ในดิน</p>	 <p>ลักษณะงาน: ดินเหนียวกรุงเทพ, ชั้นดินตะกอนแม่น้ำเจ้าพระยา รูปแบบการพัง: Rotational slide ตำแหน่งของพื้นผิวเคลื่อน: พบเป็น Base, หรือ Toe failure ขึ้นอยู่กับความสูงของลาด</p>	 <p>ลักษณะงาน: Nonuniform soil layer, Slope underlain by thin layer of very soft clay, Old alluvial deposit, Weathered sedimentary rock รูปแบบการพัง: o เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesionless soil ($\phi \approx 0$) ในลักษณะชั้นดินสองชั้นหรือมากกว่า พบเป็น Surface slide หรือ Infinite slope o เมื่อดินชั้นบนเป็น Soft to medium stiff clay ($\phi \approx 0$) วางบนชั้นแข็งมาก พบเป็น Rotational slide o เมื่อดินชั้นบนเป็น Soft to medium stiff clay ($\phi \approx 0$) วางบนชั้นดินอ่อนหรือแข็งกว่า พบเป็น Rotational slide o เมื่อดินชั้นบนเป็น ดินที่มี c และ ϕ ไม่เป็นศูนย์ ในดินสองชั้น พบเป็น Rotational slide หรือ Translational slide และต้องทำการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบการพัง โดยใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำกว่า o เมื่อดินชั้นบนเป็นดินที่มีค่า c และ ϕ ไม่เป็นศูนย์ ในชั้นดินมากกว่าสองชั้น พบเป็น Translational slide หรือ Complex ซึ่งประกอบด้วย Rotational slide และ Translational slide และต้องทำการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบการพัง โดยใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำกว่า 1</p>

1.3 Cohesionless soil ที่มีค่า $c \approx 0$ พบว่าความลึกของพื้นผิว (D) อาจจะน้อยกว่า 10% ของระยะความยาวของการเคลื่อนพังของมวลดิน (L) ลักษณะเช่นนี้จัดได้ว่าเป็น Surface sliding ดังแสดงเป็นนิยามในรูปที่ 4.8 แต่ในบางรูปหน้าตัดของลาดดินจะพบเป็น Slope หรือ Toe failure ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของลาดดิน วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ควรนำมาใช้เป็น Simplified Bishop, Fellenius method หรือ Infinite slope method และรูปแบบของหน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดินควรเป็น Effective strength analysis

2. Nonhomogeneous soil (strength varies with depth)

ลักษณะของชั้นดินแบบนี้มักพบในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) หรือที่เรียกว่า Soft marine clay ที่มีสภาพความแข็งแรงเป็นดินอ่อน ค่ากำลังความแข็งแรงของดินเหนียวสอดคล้องกับสมการของ SHANSEP ตำแหน่งของพื้นผิวเป็น Toe หรือ Base failure ขึ้นอยู่กับความสูงของลาด โดยไม่มีผลกระทบจากน้ำใต้ดิน วิธีวิเคราะห์ที่ควรนำมาใช้เป็น Simplified Bishop หรือ Fellenius method รูปแบบของหน่วยแรงสำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดิน ควรเป็น Total strength analysis

3. Stratified soil

การพิจารณารูปแบบการเคลื่อนพังของลาด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

3.1 กรณีชั้นดินประกอบด้วยดิน 2 ชั้น มีรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดแตกต่างกันตามประเภทของดินดังนี้

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ และดินชั้นล่างเป็นดินแข็งมาก (Firm strata) พบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide และตำแหน่งของพื้นผิวเป็น Toe หรือ Base failure และจะสัมผัสกับดินชั้นล่าง

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ และดินชั้นล่างเป็นดินอ่อนกว่า พบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide ที่มีการเคลื่อนพังเป็นพื้นผิวโค้งลึกเพียงวงกลมจากผิวดิน และลึกลงไปในชั้นดินอ่อนชั้นล่างเป็นส่วนใหญ่

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ และดินชั้นล่างเป็นดินแข็งกว่า พบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide ที่มีการเคลื่อนพังเป็นพื้นผิววงกลม 2 ลักษณะคือ เคลื่อนจากผิวดิน และลึกลงมาสัมผัสกับผิวล่างของชั้นดินบนที่อ่อนกว่า หรือลึกลงไปในชั้นดินแข็ง จึงควรมี

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากทั้งสองลักษณะ และพิจารณาเปรียบเทียบใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า c และ ϕ มากกว่าศูนย์ พบว่าการเคลื่อนพังของลาดอาจเป็นสองรูปแบบคือ Rotational slide หรือ Translational slide จึงควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดจากทั้งสองรูปแบบ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับรูปแบบการเคลื่อนพัง อาทิเช่น Janbu method สำหรับ Rotational slide และ Translational slide, Simplified Bishop และ Fellenius method สำหรับ Rotational slide เป็นต้น

เมื่อดินชั้นบนมีค่า $c \approx 0$ มักพบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Surface sliding คือมีความลึกของพื้นผิวไม่มากกว่า 10% ของระยะความยาวของการเคลื่อนพังของลาดดิน

3.2 กรณีชั้นดินประกอบด้วยดินมากกว่า 2 ชั้น มีรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดแตกต่างกันตามประเภทของดินดังนี้

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ และดินชั้นล่างเป็นดินอ่อนกว่า พบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide ที่มีการเคลื่อนพังเป็นพื้นผิวโค้งเดียววงกลมจากผิวดิน และลึกลงมาสัมผัสกับผิวล่างของชั้นดินอ่อน

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ และดินชั้นล่างเป็นดินแข็งกว่า พบรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดเป็นพื้นผิววงกลม 2 ลักษณะ คือเคลื่อนจากผิวดิน และลึกลงมาสัมผัสกับผิวล่างของชั้นดินบนที่อ่อนกว่า หรือสัมผัสกับผิวล่างของชั้นดินชั้นล่างที่แข็งกว่า จึงควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากทั้งสองลักษณะ และพิจารณาเปรียบเทียบใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า

เมื่อดินชั้นบนเป็น Cohesive soil มีค่า c และ ϕ มากกว่าศูนย์ พบว่าพื้นผิวการเคลื่อนพังเป็นพื้นระนาบ หรือมีทั้งส่วนที่เป็นส่วนโค้งของวงกลม และพื้นระนาบ ซึ่งจัดได้ว่ารูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Translational slide หรือ Complex ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Rotational slide และ Translational slide โดยที่ตำแหน่งของพื้นผิวขึ้นอยู่กับความแตกต่างในความแข็งแรงของดินแต่ละชั้น และตำแหน่งของชั้นดินที่อ่อนกว่า หรือชั้นดินที่แข็งกว่า จึงควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีที่เหมาะสมในแต่ละลักษณะของพื้นผิวการเคลื่อนพัง อาทิเช่น Janbu method สำหรับพื้นผิวเป็นพื้นระนาบ, Simplified Bishop สำหรับพื้นผิวเป็นส่วนโค้งของวงกลม เป็นต้น และพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำกว่า

ฐานความรู้ KB2 สำหรับช่วยตัดสินใจในการเลือกช่วงค่าความแข็งแรงของดิน, ลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพฯ, และสภาพความชื้นของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย ประกอบด้วยความรู้ที่ได้จากการประเมินข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ จากเอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอ้างอิง

การจำแนกช่วงความแข็งแรงของดินโดยทั่วไป

ความแข็งแรงของดินเป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ดังนั้นความถูกต้อง และความปลอดภัยของผลการวิเคราะห์ จำเป็นต้องอาศัยค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมซึ่งในงานวิจัยนี้ ค่าความแข็งแรงของดินในระบบ เป็นเพียงข้อเสนอแนะช่วงความแข็งแรงของดินที่ควรเป็นในแต่ละประเภทของดินเท่านั้น และการสำรวจดินยังเป็นสิ่งจำเป็นต้องทำเพื่อวิเคราะห์สภาพดินอย่างละเอียด การจำแนกช่วงความแข็งแรงของดิน เป็นผลจากการประเมินข้อมูลเกี่ยวกับสภาพความแข็งแรงของดินแต่ละประเภท ที่จำแนกดินตามระบบ USCS โดยมีข้อมูลดินทั้งหมด จากโครงการสำรวจดินในประเทศไทยจำนวน 12 โครงการ โดยที่ตามธรรมชาติ Strength parameters ของดินเหนียว และดินทราย อยู่ในรูปแบบที่พบว่า ในกลุ่มดินเหนียวมีค่า c สูง ค่า ϕ จะต่ำ, ในกลุ่มดินทรายค่า c ต่ำ ค่า ϕ จะสูง ด้วยเหตุนี้ การแนะนำช่วงความแข็งแรงของดินทั้งสองกลุ่ม จึงแสดงเป็นรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า c และค่า ϕ ในขณะที่สำหรับ Cohesionless soil พารามิเตอร์ที่ควรนำมาพิจารณาความแข็งแรงเป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Relative density และค่า ϕ

ในงานวิจัยนี้ ได้ประมวลผลออกมาเป็นช่วงความแข็งแรงของดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. กลุ่มดิน CH, CL

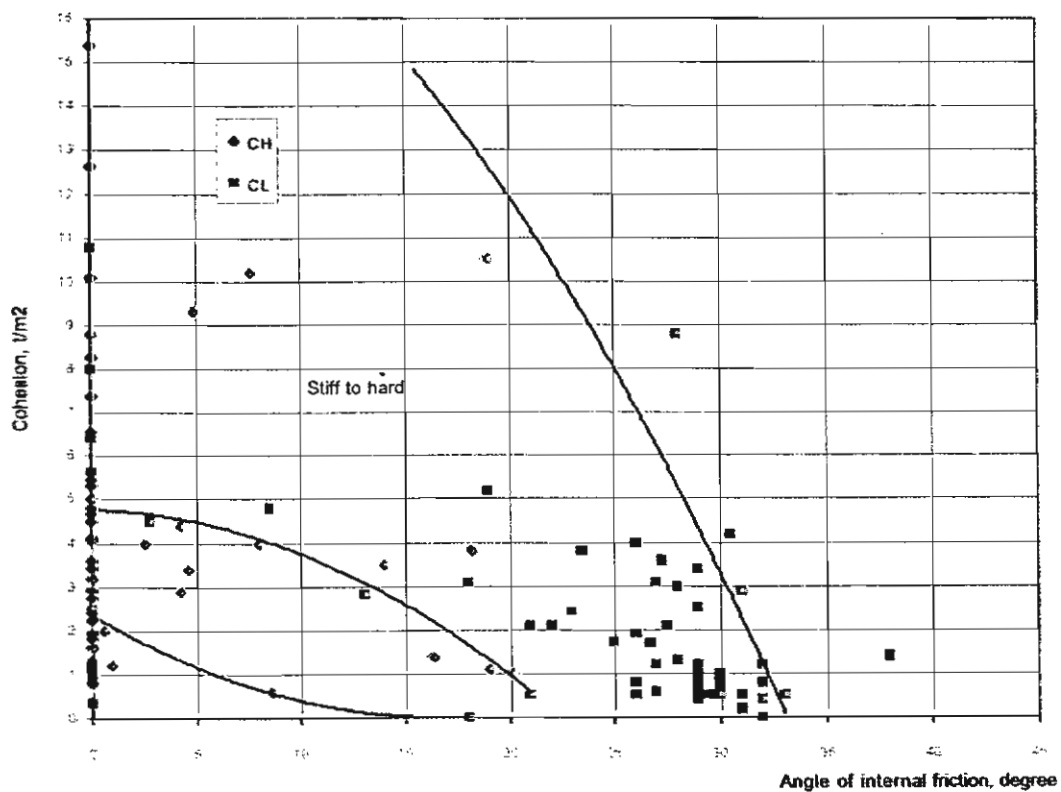
ช่วงความแข็งแรงของดินกลุ่มนี้ มีการจำแนกออกเป็น 3 สภาพความแข็งแรง คือ Very soft to soft, Medium stiff, และ Stiff to Hard ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการนี้ได้มีขอบเขตค่าความแข็งแรงของดินจากการพิจารณาค่าความแข็งแรงของดินที่แตกต่างกันตามรูปแบบของหน่วยแรงที่ใช้ในการพิจารณาค่าความแข็งแรง

2. กลุ่มดิน ML, SC, SM, SP-SM, และ GP

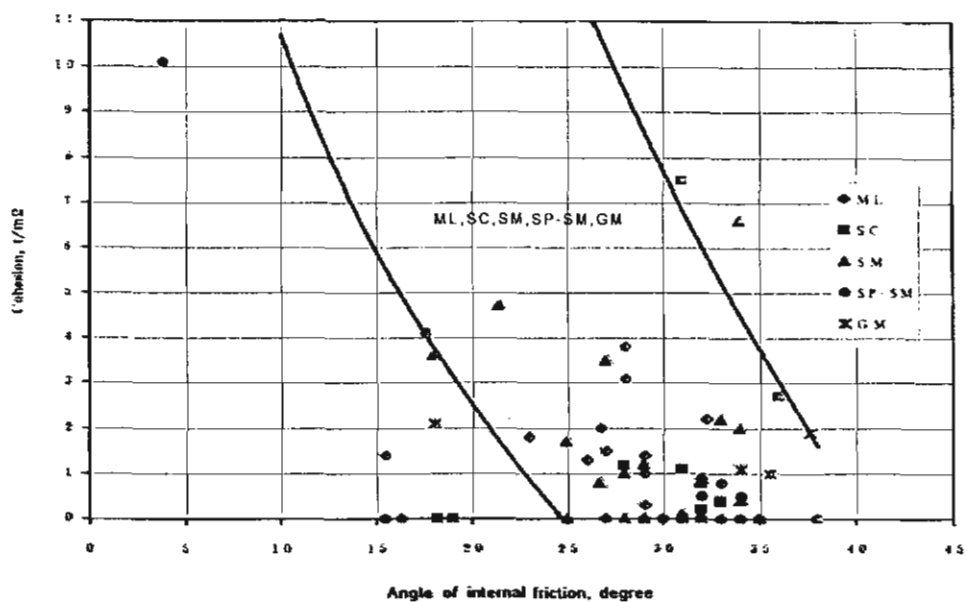
ช่วงความแข็งแรงของดินกลุ่มนี้ จัดอยู่ในสภาพของค่า c และ ค่า ϕ ที่ควรนำมาใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.18

3. กลุ่มดิน GW, GP, SW, และ SP

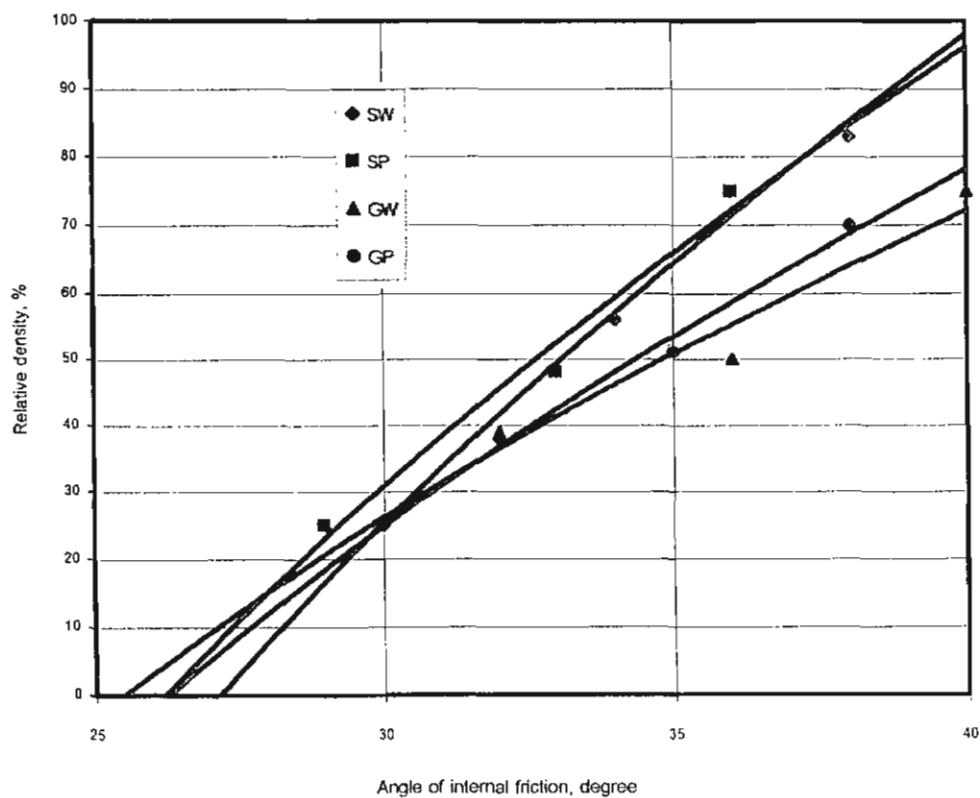
กลุ่มดินนี้จัดได้ว่าเป็น Cohesionless soil ที่มีค่า c ใกล้เคียงศูนย์ ช่วงของค่าความแข็งแรงของดิน จึงจำแนกออกตามสภาพของค่าความหนาแน่นของดินในค่าของ Relative density ที่มีความสัมพันธ์กับค่า ϕ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยที่ดินที่มีความหนาแน่นน้อยลง หรือค่า Relative density น้อยลง ค่า ϕ ของดินจะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.17 Soil chart ของกลุ่มดิน CH และ CL



รูปที่ 4.18 Soil chart ของดินกลุ่ม ML, SC, SM, SP-SM, GM



รูปที่ 4.9 Soil chart ของกลุ่มดิน SW, SP, GW, และ GP

การประเมินลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ

การพิบัติของถนน คันคลอง และบ่อขุด ในแถบภาคกลางตอนล่าง ที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน มักเป็นสาเหตุของการพิบัติส่วนใหญ่ของลาดดิน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของชั้นดินอ่อน ซึ่งเรียกว่าดินเหนียวกรุงเทพ ด้วยการรวบรวมข้อมูล แสดงสภาพของดินชนิดนั้น จากเอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอ้างอิง รวมถึงกราฟแสดงค่า Field vane shear strength ตามความลึกของดินของแต่ละพื้นที่เพื่อนำมาประเมินและประมวลผล แสดงเป็นสมการของค่าความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพ และนำผลดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน Nonhomogeneous soil (strength varies with depth)

การแนะนำในการบอกลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ สำหรับวิศวกรโยธาและผู้ที่เกี่ยวข้องจะได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพปกคลุมอยู่จากข้อมูลที่ได้รวบรวมได้ และพบว่า

1. สภาพของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ เป็นตะกอนดินเหนียวอ่อน ความหนาของชั้นดินมากกว่า 10 เมตร มีค่าความแข็งแรงของดินแปรเปลี่ยนตามความลึก ค่า Water content ประมาณ 70 - 150 % และค่า Unit weight ประมาณ 1.5 - 1.7 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตลอดจนสภาพประวัติของการยุบอัดตัวของดินเหนียวโดยธรรมชาติเป็น Normally consolidated clay ที่มีค่า O.C.R. ใกล้เคียงหนึ่ง นอกจากบางพื้นที่ที่พบเป็น Over consolidated clay ซึ่งได้แก่บางพื้นที่ทางตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา เป็นต้น

2. ชั้นบนสุดของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ เป็นชั้นดินที่เรียกว่า Weathered zone หรือ Crustal zone ความหนาประมาณ 3 - 5 เมตร ยกเว้นบริเวณใกล้ปากอ่าวไทยจะบางมากหรือเกือบไม่มีเลย

3. ใต้ชั้นดินเหนียวกรุงเทพ พบเป็นดินเหนียวแข็ง หยาบและกรวด เป็นชั้นดินแยกกัน และปนกันบ้างเรื่อยลงไป

สภาพความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพ ตามที่ได้กล่าวข้างต้น มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ

$$\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = f$$

เมื่อค่า f แตกต่างกันตามสภาพของดินเหนียวกรุงเทพในแต่ละพื้นที่ และค่า σ'_{vo} มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่า Submerged unit weight (γ') และค่าความลึกของดิน (z) โดยที่ค่า γ' จะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่เช่นเดียวกับค่า f

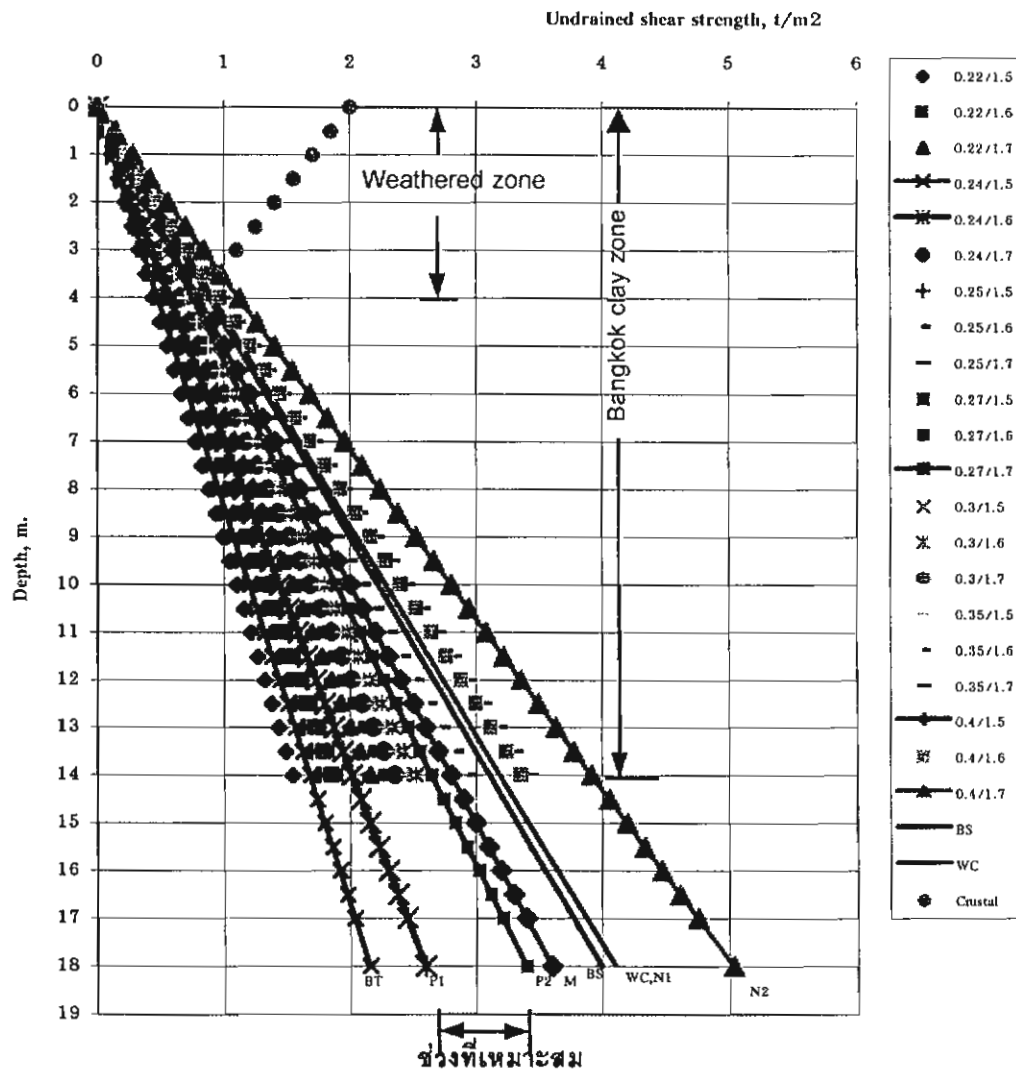
ค่า f ในสมการของค่าความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพตามสมการของ SHANSEP ของแต่ละจุดที่ทำการทดสอบ Field vane shear test พบว่า ค่า f อยู่ในช่วงระหว่าง 0.24 (กรณี ที่ Saturated unit weight เป็น 1.5 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) ถึง 0.40 (กรณีที่ Saturated unit weight เป็น 1.7 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) ดังแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มของค่า f ที่แต่ละ Saturated unit weight และยังพบว่า บางพื้นที่สภาพดินเหนียวกรุงเทพพื้นที่ทางตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา เป็น Over consolidated clay เนื่องจากเหตุการณ์ธรรมชาติ และจากการกระทำของมนุษย์ ดังเช่นที่พบในพื้นที่ใกล้ริมแม่น้ำท่าจีน อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม มีสภาพเป็น Over consolidated clay เนื่องจากการกักเซาะตลิ่งริมแม่น้ำ, บางพื้นที่ในโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์ จังหวัดนนทบุรี เป็นต้น ค่า f ที่ควรใช้อยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 0.27

ความรู้ในฐานความรู้ KB2: ความแข็งแรงของดินและสภาพแผ่นดินไหว

ฐานความรู้ KB2 ประกอบด้วยความรู้ที่ได้จากการประเมิน และวิเคราะห์ข้อมูลแสดงความแข็งแรงของดินแต่ละประเภท ซึ่งจำแนกตามระบบ USCS รวมถึงข้อมูลแสดงลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ และข้อมูลเป็นแผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย โดยที่กำหนดให้ป้อนข้อมูลเป็นภาค จังหวัด และอำเภอ เพื่อแนะนำสภาพความเข้มของแผ่นดินไหว เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว (K_s) และแสดงช่วงของค่าความแข็งแรงของดินโดยประมาณ ซึ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มพื้นที่ คือ

1. กลุ่มพื้นที่ในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง เป็นพื้นที่ที่มีช่วงดินชั้นบนเป็นดินเหนียวกรุงเทพ ที่มีค่ากำลังความแข็งแรงของดินแปรเปลี่ยนตามความลึก และสมการคำนวณค่ากำลังความแข็งแรงเป็นของ SHANSEP เมื่อค่า f อยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 0.27

2. กลุ่มพื้นที่ในส่วนอื่น จะแนะนำช่วงของค่า Strength parameters คือค่า Cohesion (c) และค่า Angle of internal friction (ϕ) ของดินแต่ละประเภท โดยพิจารณาได้จาก Soil chart ในรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 19



หมายเหตุ: นิยามของสัญลักษณ์ ได้แก่ BS คือดินที่ทางสายกรุงเทพ-ศรีราชา, BT คือดินที่ถนนบางนา-ตราด

M คือดินที่โรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์, N1 คือดินที่หนองงูเห่า (Lower bound of strength),

N2 คือดินที่หนองงูเห่า (Upper bound of strength), P1 คือดินที่ถนนร่วมพัฒนา (Lower bound of strength),

P2 คือดินที่ถนนร่วมพัฒนา (Upper bound of strength), WC คือดินตามแนวคลองส่งน้ำดินจากเขื่อนวชิราลงกรณ
กม.ที่ 67-70,

0.xx/y.y มีความหมายเป็น 0.xx คือค่า f , y.y คือค่า Saturated unit weight หน่วยเป็นตันต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 4.20 ช่วงความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพ ตามสมการของ SHANSEP และจากที่พบ
ในเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัย การแสดงความรู้ในระบบอยู่ในรูปแบบของกฎ (Ruled base) คือชุดเงื่อนไขในการตัดสินใจ ซึ่งนำไปสู่คำตอบ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มของฐานความรู้ ดังแสดงเป็นรายละเอียด คือ

1. กฎจากฐานความรู้ KB1 ได้สรุปจากความรู้เพื่อการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน มีจำนวนทั้งหมด 1,083 กฎ โดยมีกลุ่มข้อมูลที่ป้อนเข้า ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และลักษณะของคำตอบ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ง.1 ซึ่งแสดงเป็นผังของข้อมูลที่ป้อนเข้าและคำตอบของแต่ละกฎแสดงในรูปผนวกที่ ง.1 ถึงรูปผนวกที่ ง.12

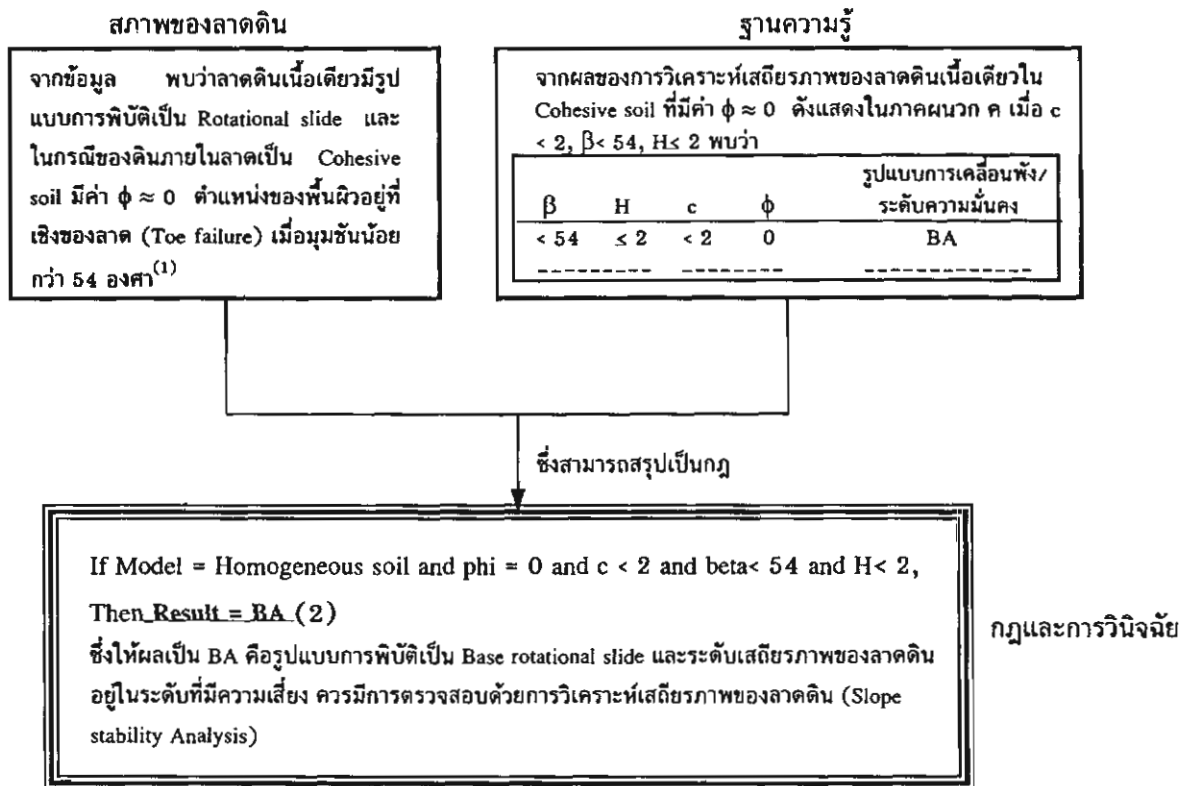
ตารางที่ 4.6 Parameter ของการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

Parameter	คำอธิบาย	หมายเหตุ
Soil Model	ลักษณะชั้นดิน มีให้เลือก 3 รูปแบบ คือ Homogeneous soil, Nonhomogeneous soil (strength varies with depth, และ Stratified soil	
Phi (Degrees)	มุมเสียดทานภายในเม็ดดิน (Angle of internal friction, ϕ), องศา	
Cohesion (TSM)	ค่ายึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (c), ต้นต่อตารางเมตร	
Beta (Degrees)	มุมชันของลาด (Slope angle, β), องศา	
Hw = 0	ระดับน้ำใต้ดิน (Ground water height, Hw) อยู่ที่ผิวดิน	
Hw = ∞	ระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกมากจากระดับผิวดิน	
H	ความสูงของลาด (Slope height, H), ม.	ดูภาพที่ 47 ประกอบ
No of Soil profile	จำนวนชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์	
Upper soil strata	ดินชั้นบน (S1)	
Lower soil strata	ดินชั้นถัดมา (S2)	
Upper soil	สภาพของดินชั้นบน ซึ่งมีให้เลือก phi1 is zero, c1 is zero, หรือ c1 and phi1 is not zero	
Lower soil	สภาพของดินชั้นที่สอง ซึ่งมีให้เลือก firm strata, weaker strata, หรือ stronger strata	
d (m)	ความลึกของดินชั้นบน, ม.	

ซึ่งมีตัวอย่างของกฎในแต่ละลักษณะชั้นดิน ได้แก่

1.1 ตัวอย่างในกรณี Homogeneous soil ซึ่งแสดงกฎในแต่ละกลุ่มของดินภายในลาด คือ

กฎในกรณีของ Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.21

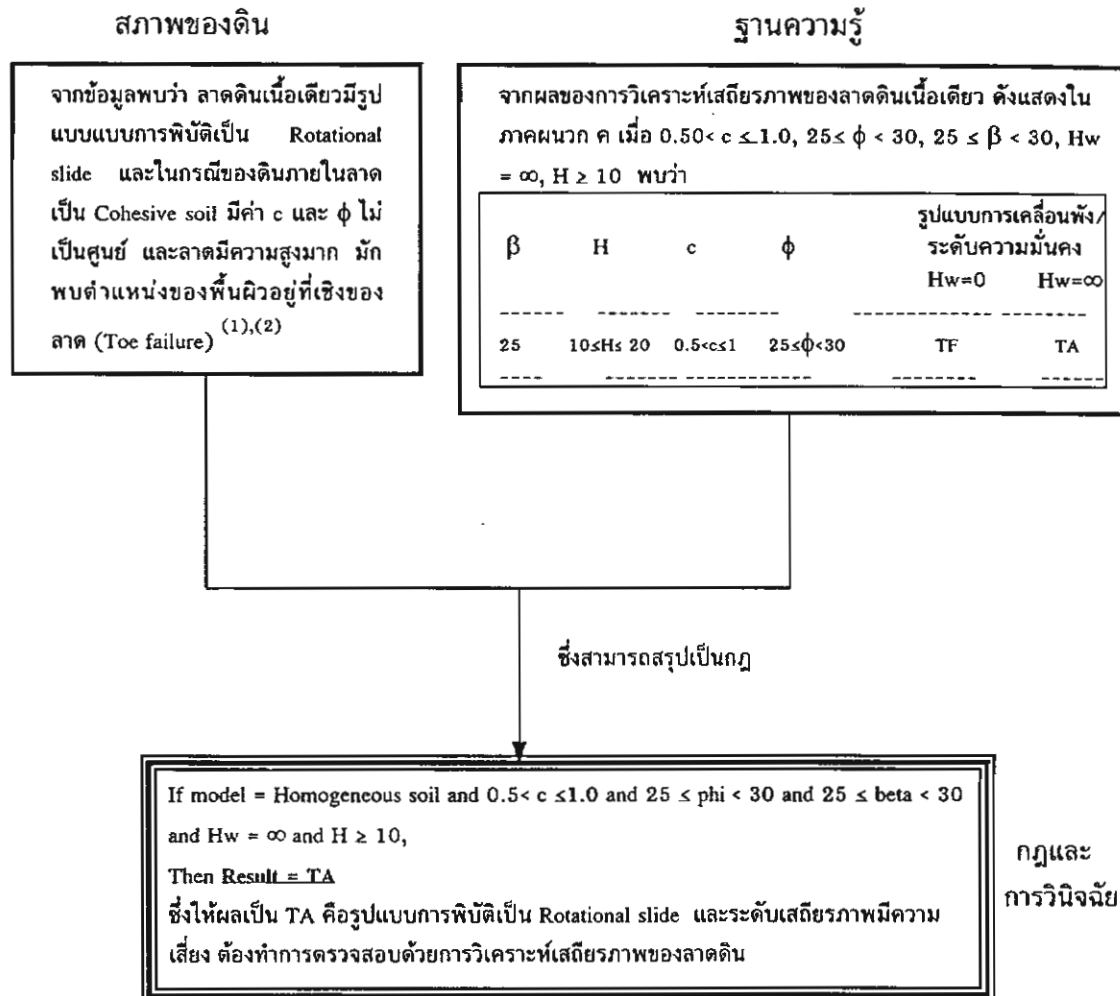


หมายเหตุ:

- (1) เป็น Taylor (1948), Janbu (1967), Chowdhury (1978), Varnes (1978), DM-7.1 (1982), Vaunat และคณะ (1996), Leiner (1996), Terzaghi และคณะ (1996)
- (2) ค่าจำกัดความของอักษรย่อจากตารางผนวกที่ ง.1

รูปที่ 4.21 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดี๋ยว เมื่อเป็น Cohesive soil มีค่า $\phi \approx 0$

กฎในกรณีของ Cohesive soil มีค่า c และ ϕ ไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.22

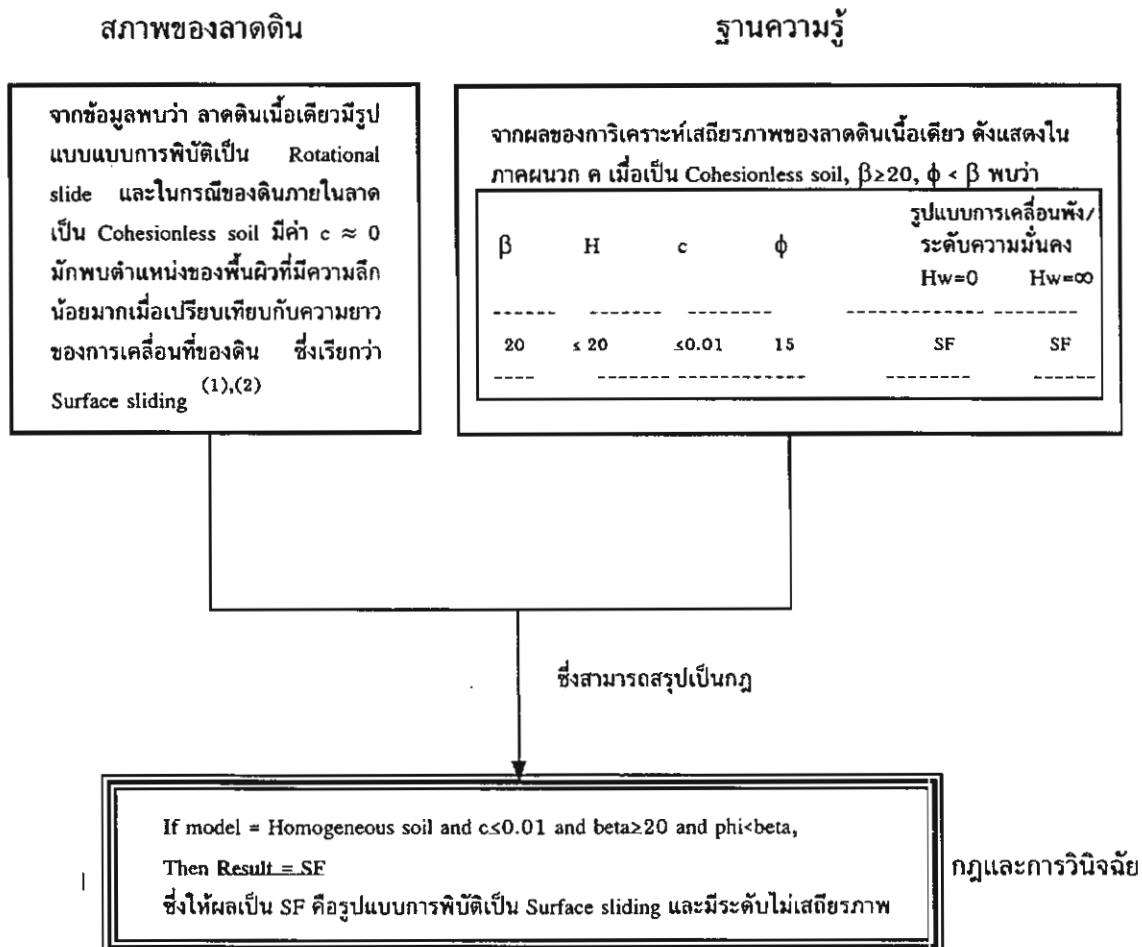


หมายเหตุ:

- (1) เป็น Taylor (1948), Chowdhury (1978), Varnes (1978), DM-7.1 (1982), Vaunat และคณะ (1996), Leiner และคณะ (1996)
- (2) เป็นข้อมูลพิบัติจากการออกสำรวจในภาคสนาม และเอกสารอ้างอิง

รูปที่ 4.22 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพังทลายและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียวเมื่อเป็น Cohesive soil มีค่า c และค่า ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์

กฎในกรณีของ Cohesionless soil มีค่า c ใกล้เคียงศูนย์ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.23



หมายเหตุ:

- (1) เป็น Chowdhury (1978), Varnes (1978), DM-7.1 (1982), Leiner (1996), Terzaghi และคณะ (1996), Vaunat และคณะ (1996)
- (2) เป็นข้อมูลการพังทลายที่พบจากการสำรวจในภาคสนาม

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพังทลายและระดับเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียว เมื่อเป็น Cohesionless soil มีค่า $c \approx 0$

1.2 ตัวอย่างในกรณี Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) ดังแสดงในรูปที่ 4.24

สภาพของลาดดิน

จากข้อมูลพบว่า ลาดดินใน Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) ซึ่งเป็นลักษณะของชั้นดินในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง และในงานวิจัยนี้ใช้สมการของ SHANSEP สำหรับการคำนวณค่า S_u ที่มีค่า $f=0.24$ และ $O.C.R=1$ มีรูปแบบการพังทลายเป็น Rotational slide มักพบตำแหน่งของพื้นผิวในลาดดินที่มีความสูงไม่มากกว่า 5 เมตร เป็น Base rotational slide (1),(2)

ฐานของความรู้

จากผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใน Nonhomogeneous soil ดังแสดงในภาคผนวก ค เมื่อ $\beta \geq 20$, $2 < H \leq 5$ พบว่า

β	H	c	ϕ	รูปแบบการเคลื่อนพัง/ ระดับความมั่นคง	
				Hw=0	Hw= ∞
20	5	แปรเปลี่ยนตามความลึก	0	BFX	BFX

ซึ่งสามารถสรุปเป็นกฎ

If model = Nonhomogeneous soil(strength varies with depth) and $\beta \geq 20$ and $2 < H \leq 5$,

Then Result = BFX

ซึ่งให้ผลเป็น BFX คือรูปแบบการพังทลายเป็น Base rotational slide และมีระดับไม่เสถียรภาพ การวิเคราะห์สามารถใช้ Stability chart ในการพิจารณาระดับเสถียรภาพได้โดยประมาณ

กฎและการวินิจฉัย

หมายเหตุ:

- (1) เป็น Taylor chart (1948), Janbu (1967), Chowdhury (1978), Varnes (1978), DM-7.1 (1982), Leiner (1996), Terzaghi และคณะ (1996), Vaunat และคณะ (1996)
- (2) เป็นข้อมูลการพิบัติจากการสำรวจในสนามและเอกสารอ้างอิงรวมถึงจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 4.24 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพังทลายและระดับเสถียรภาพของลาดดินใน Nonhomogeneous soil (strength varies with depth)

1.3 ตัวอย่างในกรณี Stratified soil ดังแสดงเป็นตัวอย่างกฎในชั้นดินมากกว่า 2 ชั้น ในรูปที่ 4.25 และ ชั้นดิน 2 ชั้นในรูปที่ 4.26

สภาพของลาดดิน

จากข้อมูลพบว่า ลาดดินใน Stratified soil ซึ่งประกอบด้วยชั้นดินมากกว่า 2 ชั้น และดินชั้นบนเป็น Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์ มีรูปแบบการพิบัติประกอบด้วย พื้นผิวส่วนโค้งของวงกลมจากผิวดินลงมา แล้วต่อเนื่องด้วยพื้นผิวนาบในชั้นดินอ่อน หรือ Translational slide ที่ประกอบด้วย blocks หลาย blocks โดยที่ตำแหน่งของพื้นผิวขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความแข็งแรงของดินในแต่ละชั้น และตำแหน่งของชั้นดินอ่อน^{(1),(2)}

สามารถสรุปเป็นกฎ

กฎและการวินิจฉัย

If Model = Stratified soil and Soil profile = More than two soil layers and Upper soil = $c1$ and $\phi1$ is not zero,
Then Result = R6
ซึ่งให้ผลเป็น R6 คือรูปแบบการพิบัติเป็น Translational slide หรือ Complex type คำอธิบายเป็นรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 18

หมายเหตุ:

- (1) เป็น Chowdhury (1978), Vames (1978), DM-7.1 (1982), Terzaghi และคณะ (1996)
- (2) เป็นข้อมูลที่พบจากการสำรวจในภาคสนาม, เอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง, และเอกสารอ้างอิง

รูปที่ 4.25 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพิบัติของลาดดินใน Stratified soil ซึ่งประกอบด้วยชั้นดินมากกว่า 2 ชั้น และดินชั้นบนเป็น Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ ไม่ใกล้เคียงศูนย์

สภาพของลาดดิน

จากข้อมูลพบว่า ลาดดินใน Stratified soil ซึ่งประกอบด้วยชั้นดิน Cohesive soil ที่มีค่า $\phi \approx 0$ วางบนชั้นดิน Firm strata มีรูปแบบการพังทลายเป็น Rotational slide เมื่อ $d > 0.50$ และ $\beta < 54$ ตำแหน่งพื้นผิวเป็น Base failure⁽¹⁾

กฎและการวินิจฉัย

สามารถสรุปเป็นกฎ

If Model = Stratified soil and Soil profile = Two soil layers and Upper soil = Φ_{il} is zero and Lower soil = Firm strata and $d > 0.50$ and $\beta < 54$,

Then Result = B

ซึ่งให้ผลเป็น B คือรูปแบบการพังทลายเป็น Base rotational slide คำอธิบายเป็นรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 18

หมายเหตุ:

(1) เป็น Taylor chart (1948), Janbu (1967), Chowdhury (1978), Varnes (1978), Dm-7.1(1982), Terzaghi และคณะ (1996)

รูปที่ 4.26 ตัวอย่างของกฎสำหรับรูปแบบการพังทลายของลาดดินใน Stratified soil เมื่อเป็นดิน 2 ชั้น และประกอบด้วยชั้นดิน Cohesive soil ที่มีค่า $\phi \approx 0$ วางบน Firm strata

โดยที่คำวินิจฉัยของกฎในฐานความรู้ KB1 เป็นเพียงคำแนะนำเท่านั้น การวิเคราะห์เชิงรายละเอียดยังเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอยู่สำหรับการออกแบบและการก่อสร้าง

2. กฎจากฐานความรู้ KB2 ได้สรุปจากความรู้ของค่าความแข็งแรงของดิน, ลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพฯ, และสภาพความชื้นของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย มีจำนวนทั้งหมด 113 กฎ โดยมีกลุ่มข้อมูลที่ป้อนเข้าดังแสดงในตารางที่ 4.7 และลักษณะของคำตอบดังแสดงในตารางผนวกที่ จ.1 ซึ่งมีผังแสดงข้อมูลที่ป้อนเข้าและคำตอบของแต่ละกฎในรูปผนวกที่ จ.1 ถึง จ.4

ตารางที่ 4.7 Parameter ของคุณสมบัติของดินโดยประมาณและความชื้นของแผ่นดินไหว

Parameter	คำอธิบาย	Attribute list
Part	ภาค	เลือกชื่อภาค ซึ่งมี 5 ภาค คือ Central, Eastern, Northeastern, North, South
Province	จังหวัด	เลือกชื่อจังหวัดในประเทศไทย ซึ่งมี 76 จังหวัด
Amphoe	อำเภอ	เลือกชื่ออำเภอในแต่ละจังหวัด

ซึ่งมีตัวอย่างของกฎ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.28

ตำแหน่งของลาดดิน

จากข้อมูลพบว่า ชั้นดินในจังหวัดกรุงเทพ ประกอบด้วยชั้นดินช่วงบนหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 15 - 25 เมตร มีลักษณะเป็นดินเหนียวกรุงเทพ(Bangkok clay) ซึ่งมีความแข็งแรงของดินในสภาพ Undrained shear strength แปรเปลี่ยนตามความลึกที่สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ $S_u = f(\sigma'_{vo})$ เมื่อ f มีค่าประมาณ 0.24-0.27 และค่า O.C.R. ใกล้เคียง 1.0 และยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว(K_s) ในบริเวณจังหวัดกรุงเทพฯ มีค่าประมาณ 0.01g ถึง 0.0025g⁽¹⁾

กฎและการวินิจฉัย

สามารถสรุปเป็นกฎ

If Part = Central and Province = Bangkok,

Then Result = BKKC A is 0.01g to 0.025g

ซึ่งให้ผลเป็น BKKC A is 0.01g to 0.025g คือลักษณะของชั้นดินในจังหวัดกรุงเทพประกอบด้วยชั้นดินเหนียวกรุงเทพในช่วงดินชั้นบน และค่า K_s ประมาณ 0.01g ถึง 0.025g คำอธิบายเป็นรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 20

หมายเหตุ: (1) เป็นแหล่งของข้อมูลได้แก่ Piencharoen และคณะ (2519), วิชาญ และคณะ (2520), สุวัฒน์ และคณะ (2538), เอกสารรายงานการสำรวจดินของโครงการในประเทศไทย, แผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหวตาม Modified Mercalli Scale, แผนที่จังหวัดและอำเภอในประเทศไทย

รูปที่ 4.27 ตัวอย่างของกฎแสดงลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ และสภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ประเทศไทย

ตำแหน่งของลาดดิน

จากข้อมูลพบว่า ชั้นดินในอำเภอเขาสวนกวาง จังหวัดขอนแก่น มีลักษณะไม่เป็นดินเหนียวกรุงเทพ โดยมีคำแนะนำเรื่องช่วงของความแข็งแรงของดินแต่ละประเภทจำแนกตาม USCS แสดงเป็น Soil chart และมีค่า K_s ประมาณ 0.01g to 0.025g⁽¹⁾

กฎและการวินิจฉัย

สามารถสรุปเป็นกฎ

If part = Northeastern and province = Khon Khen and Amphoe Khao Suan Kwang,

Then Result = See soil chart A is 0.01g to 0.025g

ซึ่งให้ผลเป็น See soil chart A is 0.01g to 0.025g คือคำแนะนำช่วงความแข็งแรงของดินแต่ละประเภทที่จำแนกตามระบบ USCS และมีค่า K_s ประมาณ 0.01g ถึง 0.025g คำอธิบายเป็นรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 20

หมายเหตุ: (1) เป็นแหล่งของข้อมูล ได้แก่ เอกสารรายงานการสำรวจดินของโครงการในประเทศไทย, แผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหวตาม Modified Mercalli Scale, แผนที่จังหวัดและอำเภอในประเทศไทย

รูปที่ 4.28 ตัวอย่างของกฎแสดงช่วงของค่าความแข็งแรงของดินแต่ละประเภท และสภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย

โดยที่การช่วยตัดสินใจจากกฎในฐานความรู้ KB2 เป็นเพียงคำแนะนำเท่านั้น การสำรวจดินยังเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอยู่สำหรับการออกแบบ และการก่อสร้าง

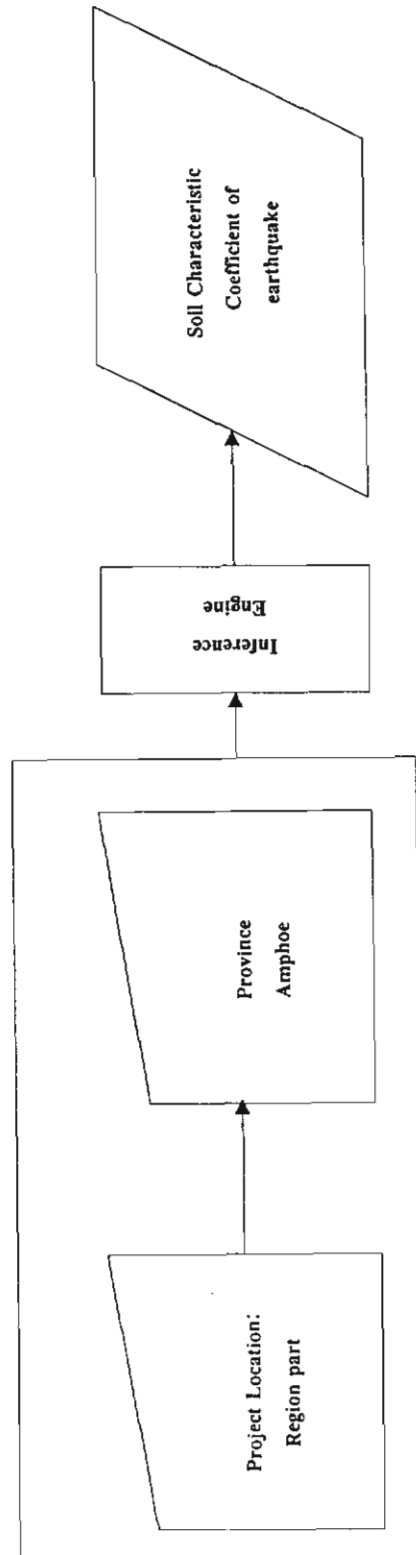
4.3 ผลการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต้นแบบ, KU-EXslope

ในงานวิจัย ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งมีชื่อว่า KU-EXslope สร้างมาจากการนำฐานความรู้มาจัดการเป็นข้อตัดสินใจในการตอบคำถามแก่ผู้ใช้ โดยแสดงในรูปของกฎมุ่งเน้นเพื่อให้คำแนะนำแก่ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้องมากขึ้น โดยที่กฎต่างๆเหล่านี้ จะมีการตรวจสอบความถูกต้องของทั้งเงื่อนไขและคำตอบ ด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการพิบัติจากที่พบในสนามและเอกสารที่เกี่ยวข้อง ก่อนการจัดทำระบบ KU-EXslope

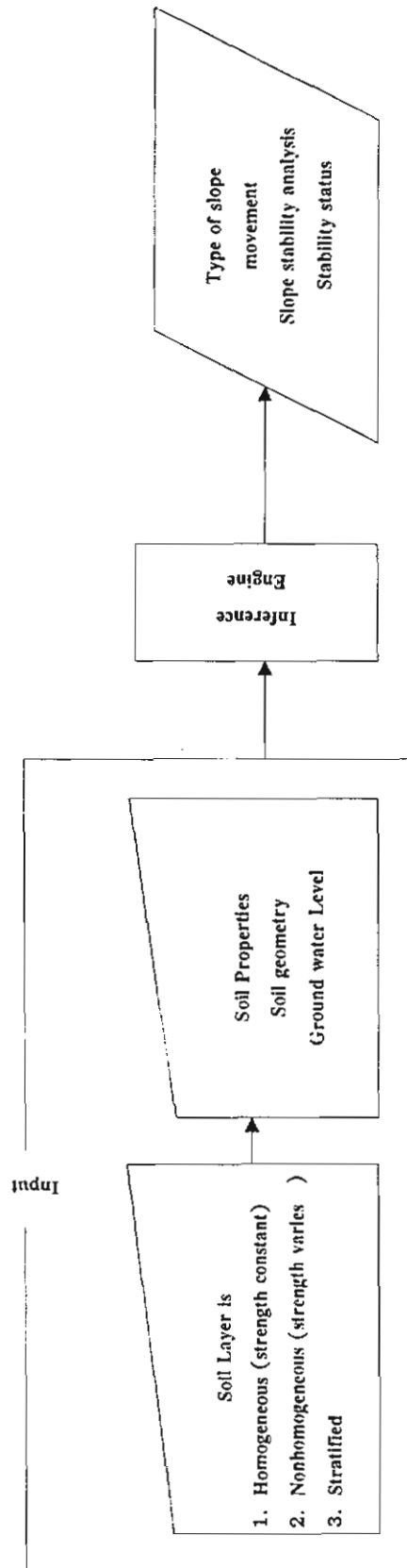
การสร้างระบบ KU-EXslope ได้มาจากการพัฒนามาตรฐานระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ ที่คัดเลือกแล้ว คือ โปรแกรม RAISON เพื่อให้มีความสะดวกต่อผู้ใช้ในการใช้งานของระบบ ด้วยการป้อนกฎต่างๆเข้าในโปรแกรม RAISON ซึ่งทำหน้าที่จัดการกฎต่างๆ ให้อยู่ในลักษณะที่เป็นระบบต่อการค้นหาและประมวลเป็นคำตอบ ดังแสดงเป็นผังของข้อมูลที่ป้อนเข้า และคำตอบในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.30

การทำงานของระบบ KU-EXslope

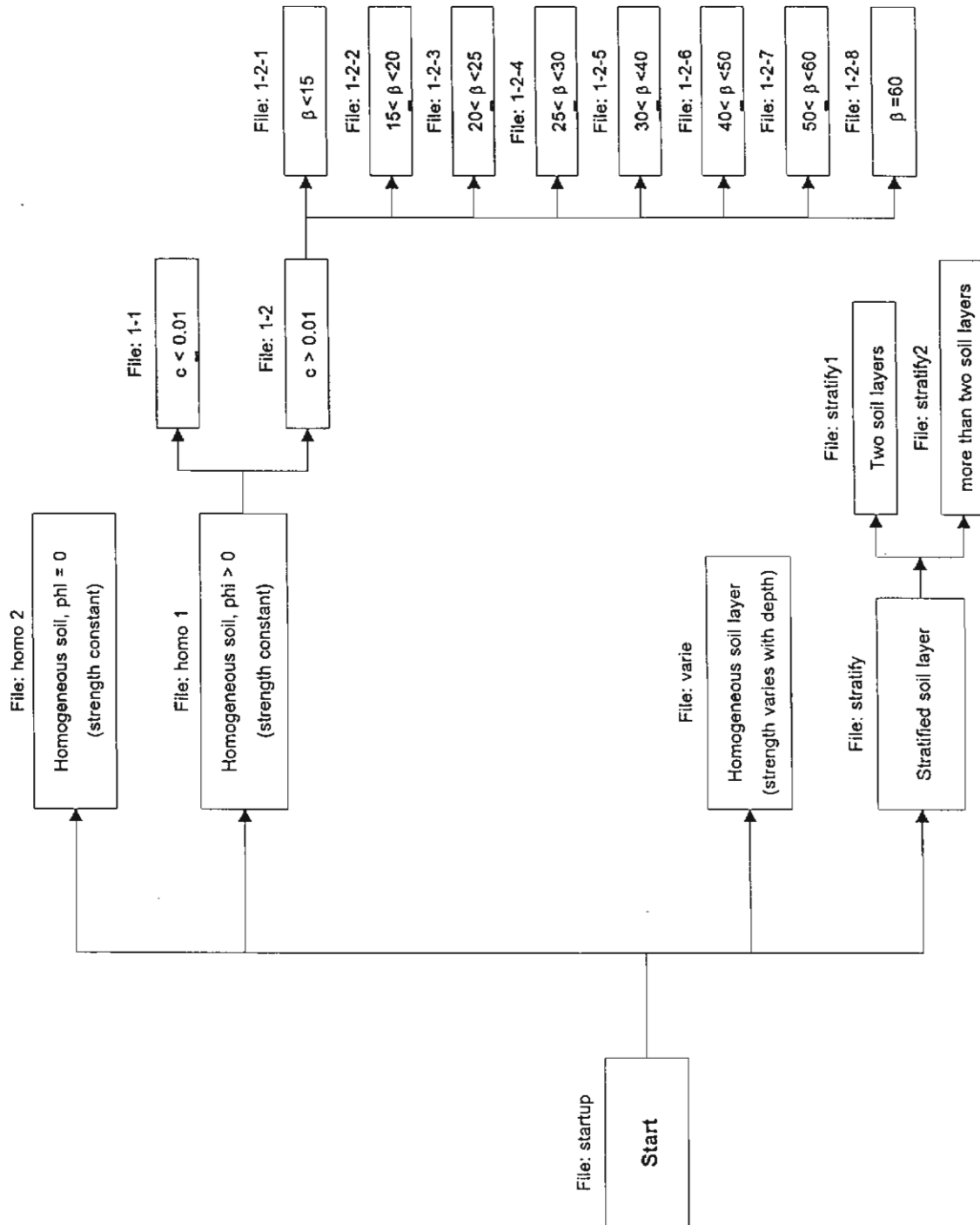
กฎต่างๆในฐานความรู้ จะถูกจัดการและเปรียบเทียบในการหาเหตุผล เพื่อให้ได้คำตอบออกมาเป็น Chart ที่เรียกว่า Decision tree ซึ่งจะแสดงในระบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกฎ โดยโปรแกรม RAISON ในลักษณะที่มีการต่อเชื่อมไปข้างหน้า (Forward chaining) นั่นคือ ค้นหาจากเหตุผลหรือเงื่อนไขในกฎ ไปหาคำตอบ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การอนุมาน (Inference) โดยเครื่องอนุมาน (Inference engine) ในระบบ เนื่องจากกฎมีจำนวนมาก และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกฎตลอดจนการทำงานของโปรแกรมได้เร็วขึ้น จึงได้แบ่งออกเป็น File ต่างๆ ในแต่ละฐานความรู้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ถึงรูปที่ 4.32 นอกจากนี้ ยังมีส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้ที่เรียกว่า User interface สำหรับให้ผู้ใช้ป้อนค่าต่างๆ สำหรับคำถามในลักษณะที่เรียกว่า Interactive mode ซึ่งในการนี้ ระบบจะทำการวิเคราะห์และตรวจสอบค่าต่างๆ ที่ได้กับกฎต่างๆ เพื่อแสดงคำตอบออกมาทาง Decision tree และแสดงคำตอบแก่ผู้ใช้ทราบทางหน้าจอ



รูปที่ 4.29 ฟังก์ชันข้อมูลที่ใช้และคำตอบของกฎในฐานความรู้ KB1

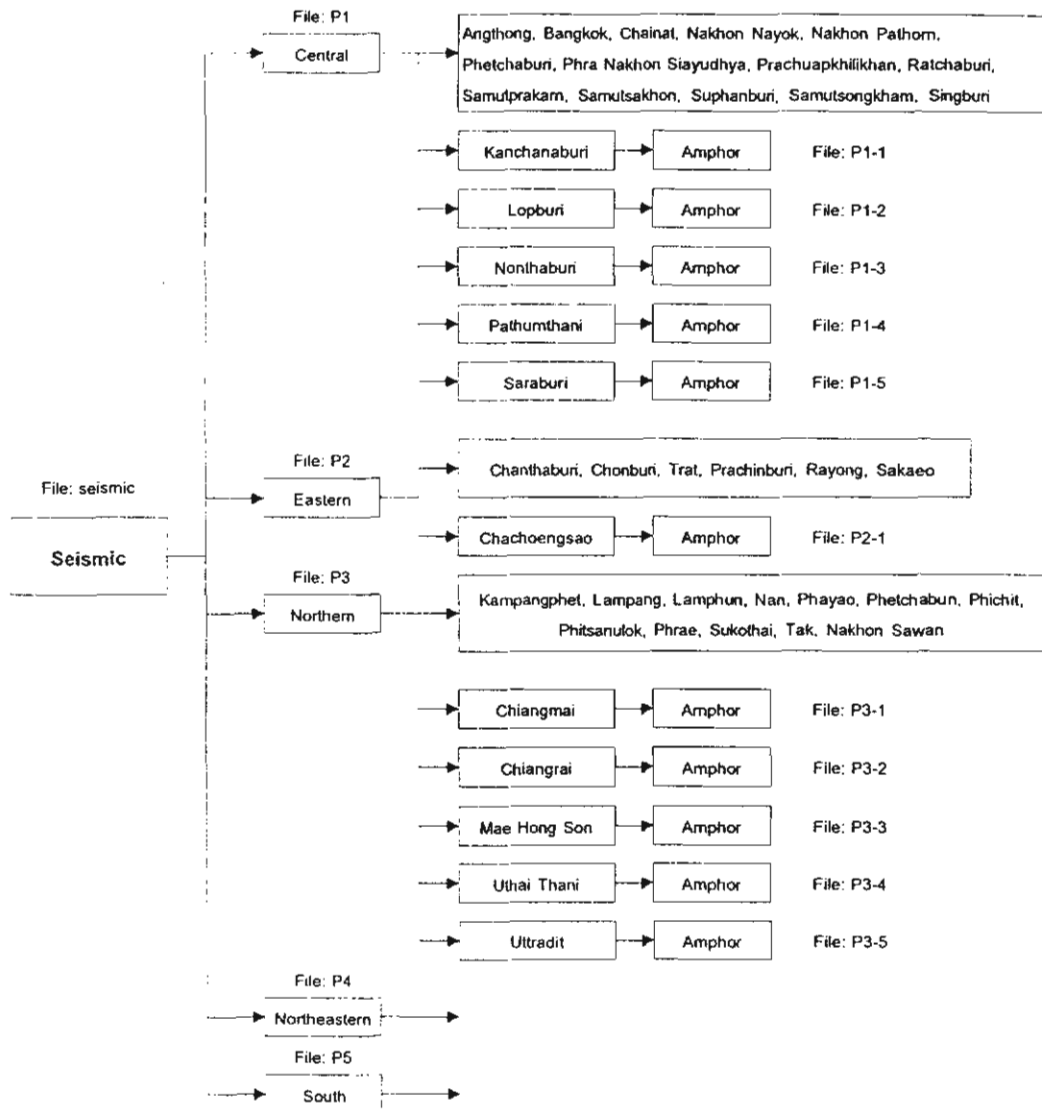


รูปที่ 4.3.0 ฟังก์ชันของข้อมูลที่ป้อนเข้าและคำตอบของกฎในฐานความรู้ KB2



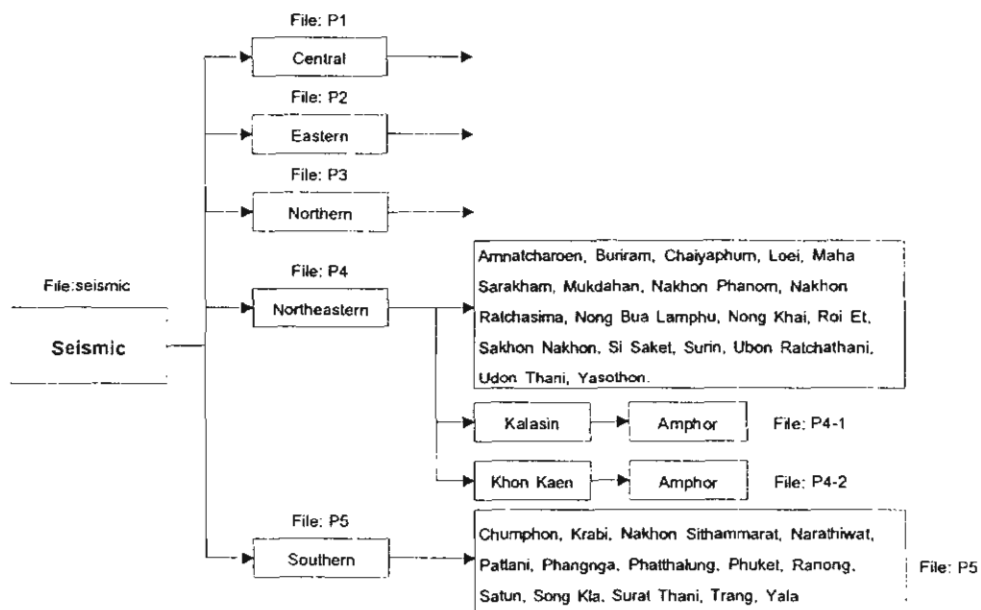
รูปที่ 4.3.1 ฟังก์ชัน File ของฐานความรู้ KB1 ในระบบ KU-EXslope

Note: Extension file เป็น exp.



Note: Extension file เป็น Exp.

รูปที่ 4.32 ผังของ File ของฐานความรู้ KB2 ในระบบ KU-EXslope



Note: Extension file เป็น exp.

รูปที่ 4.32 (ต่อ)

การใช้งาน KU-EXslope เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เริ่มจากผู้ใช้เลือกฐานความรู้ เช่น KB1 สำหรับช่วยเหลือในการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและระดับเสถียรภาพของลาดดิน หรือ KB2 สำหรับแนะนำในการตัดสินใจเลือกช่วงของความแข็งแรงของดิน ลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพ และ สภาพความชื้นของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย ด้วยการเปิด File ชื่อ Startup สำหรับ KB1 และ File ชื่อ Seismic สำหรับ KB2 แล้วจึงดำเนินการป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งระบบจะให้ผลเป็นคำตอบทางหน้าจอ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.35

4.4 การทดสอบและการประเมินสมรรถภาพของระบบ

การพิจารณาความถูกต้องของระบบ จะต้องมีการตรวจสอบโดยพิจารณาจากสภาพการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ ด้วยการนำเงื่อนไขต่างๆที่ได้สร้างไว้ในระบบมาทำการทดสอบ ซึ่งในการนี้ได้พิจารณาเปรียบเทียบจากฐานข้อมูลของสภาพการพังทลายของลาดดินที่พบว่าสอดคล้องกันหรือไม่ ดังแสดงเป็นตัวอย่างกรณีศึกษา 4 ตัวอย่าง คือ

กรณีที่ 1 การพังทลายของคันทางของถนนในเขตหนองจอก

กรณีที่ 2 การพังทลายของริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่บ้านทรายมูล อ.ธาตุพนม จังหวัดนครพนม

กรณีที่ 3 การพังทลายของคันดินถมข้างทางรถไฟสายกรุงเทพ-มาบตาพุด ที่บ้านกิโลเมตร 16 จังหวัดระยอง

กรณีที่ 4 การพังทลายของลาดเขาเนื่องจากการตัดไหล่เขาเพื่อทำถนน Hue Hue ในประเทศออสเตรเลีย

ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.11

ผลของการทดสอบ พบว่าเงื่อนไขและคำตอบสอดคล้องกับข้อมูลการพิบัติของลาดดิน เนื่องจากกฎที่สร้างขึ้น จะถูกพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เก็บรวบรวมก่อนการป้อนเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ การป้อนข้อมูลตามเงื่อนไขของกฎ และการทราบคำตอบทางหน้าจอ ประกอบคำอธิบายเป็นรายละเอียดอยู่ด้วย มีลักษณะที่สะดวกและง่ายต่อผู้ใช้ในการนำระบบ KU-EXslope มาใช้งาน ซึ่งในการนี้ได้แสดงขอบเขตของความสามารถของระบบ KU-EXslope สำหรับการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดินของแต่ละลักษณะชั้นดินในแต่ละช่วงของค่า c (Cohesion) ค่า ϕ (Angle of internal friction) ค่า β (Slope angle) และค่า H (Slope height) ดังแสดงในตารางที่ 4.12

1. Click mouse ที่ RAISON for Windows

Modules

2. Click mouse ที่ Expert Systems

3. โปรแกรมส่วน Expert System

4. Click mouse ที่ File

5. Click mouse ที่ Open...

6. Dialog Box Open

7. เลือก File ที่ต้องการ

8. Click mouse ที่ OK

Tool Bar

Rules

Model [Results]

Tree decision

Rules	Model	Results
1	Homogeneous soil	Homo-pi not equal
2	Homogeneous soil	(Pi Homo-pi equal 0)
3	Nonhomogeneous	(str Nonhomo (Varies)
4	Stratified Soil	Stratified Soil
5		

Ready

NUM

รูปที่ 4.33 การเปิดใช้งานระบบ KU-EXslope

Parameter -

เป็นตัวแปรที่ให้ผู้ใช้งานใส่ข้อมูล

Attribute List -

เป็นตัวเลือกของข้อมูลที่ใช้ในการใส่ค่าสำหรับ Parameter

Values Box -

ใช้สำหรับการกำหนดค่าให้ Parameter

รูปที่ 4.34 การป้อนข้อมูลเข้าในระบบ KU-EXslope

Parameter Values List -

สรุปค่าของ Parameter ที่กำหนดขึ้น

Results -


สรุปผลของการตัดสินใจ

Explanations -


อธิบายรายละเอียดของผลที่ได้

รูปที่ 4.35 การแสดงคำตอบทางหน้าจอ

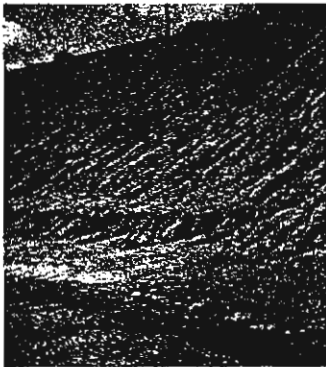
ตารางที่ 4.8 กรณีการพังทลายของคันทางของถนนในเขตหนองจอก

Knowledge base	Input	Result	Fact
KB2	Part = Central Province = Bangkok	BKKC A = 0.010g to 0.025g Explanation: The upper soil layer is soft clay (Bangkok clay), with shear strength varies with depth and $S_u = (0.24 \text{ to } 0.27) \cdot \sigma'_{vo}$, σ'_{vo} is the effective overburden pressure, and also it should be normally consolidated clay. * This is for guideline only. The soil investigation must be done*	ลักษณะชั้นดินพบว่า ช่วงบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ที่เรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพ หนาประมาณ 12 เมตร ซึ่งมีค่า ϕ เป็นศูนย์ และค่า S_u โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.90 ตันต่อตารางเมตร
KB1	Soil model = Non-homogeneous soil (strength varies with depth) Beta = Slope angle = 35 degree H = Slope height = 2.50 m.	BFX Explanation: Type of movement; Base rotational slide in Bangkok clay using Simplified Bishop or Fellenius method. Stability status; Failure, it should be stabilized. Analysis method for strength test; Total strength analysis ($\phi = 0$) for very soft to medium stiff clay. * This is for guideline only. Slope stability analysis should be done. Stability status is resulted from soil around Ruam Pattana road, Amphoe Nongchok, Bangkok.*	 สภาพการพังทลาย คือเกิดการทรุดตัวลงมาประมาณ 0.50 เมตร รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น Base rotational slide และมี Tension crack ลึกประมาณ 0.50 เมตร คาดว่าเกิดจากการขุดลอกคลองและการลดระดับน้ำทันที (Rapid drawdown)

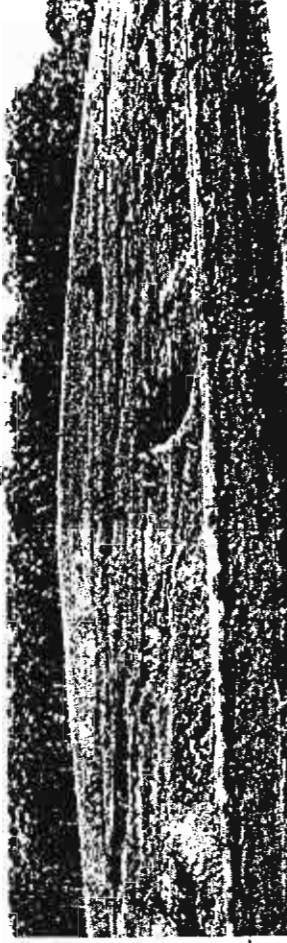
ตารางที่ 4.9 กรณีการพังทลายของริมตลิ่งแม่น้ำโขงที่บ้านทรายมูล อ.ธาตุพนม จ.นครพนม

Knowledge base	Input	Result	Fact
KB2	Part = Northeastern Province = Nakhon Phanom	See soil chart A is 0.01g to 0.025g Explanation: Soil strength determined from the soil chart, $K_s =$ 0.01g to 0.025g * This is for guideline only. The soil investigation must be done*	ลักษณะชั้นดินพบว่า สภาพดิน เดิมส่วนใหญ่ช่วงบนเป็นดิน ประเภท CL มีความหนา ประมาณ 10 เมตร ซึ่งมีค่า $\phi =$ 11 องศา และค่า $c = 1$ ตันต่อ ตารางเมตร
KB1	Soil model = Homogeneous soil, ϕ more than zero Beta = Slope angle = 45 degree H = Slope height = 10.00 m. Phi = Angle of internal friction	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">TF</div> Explanation: Type of movement; Toe rotational slide using Simplified Bishop or Fellenius method. Stability status; Failure, it should be stabilized. Analysis method for strength test; Total strength analysis ($\phi \neq$ 0) or Effective strength analysis for stiff to hard clay; Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	 สภาพการพังที่พบ คือ รูป แบบของการเคลื่อนพัง เป็น Toe rotational slide คาดว่าเกิดจากการที่สภาพ ดินเป็นกลุ่มดินที่ง่ายต่อ การถูกกัดเซาะ โดยเฉพาะ หน้าน้ำหลากประมาณ เดือนสิงหาคม ซึ่งเป็นช่วง ฤดูฝน ประกอบกับเกิด สภาพลระดับน้ำขึ้นใน แม่น้ำโขง

ตารางที่ 4.10 กรณีการพังทลายของลาดคั่นถรมริมทางรถไฟสายกรุงเทพ-มาบตาพุด จว.ระยอง

Knowledge base	Input	Result	Fact
KB2	Part = East Province = Rayong	See soil chart A is 0 to 0.01g Explanation: Soil strength determined from the soil chart, $K_s = 0$ to 0.01g * This is for guideline only. The soil investigation must be done*	ลักษณะชั้นดินพบว่า สภาพดินส่วนใหญ่ช่วงบนเป็นดินประเภท SM มีความหนาประมาณ 8 เมตร ซึ่งมีค่า $\phi \approx 22$ องศา และค่า $c = 0$
KB1	Soil model = Homogeneous soil, phi more than zero Beta = Slope angle = 45 degree H = Slope height = 8 m. Phi = Angle of internal friction = 22 degree c = Cohesion = 0	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">SF</div> Explanation: Type of movement; Rotational slide with surface sliding (the ratio of D/L less than 10%) using Simplified Bishop, Fellenius method, or Infinite slope method. Stability status; Failure, it should be stabilized. Analysis method for strength test; Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or Effective strength analysis * This is for guideline only. Slope stability analysis should be done *	 สภาพการพังทลาย คือ รูปแบบของการเคลื่อนที่ เป็นการเซาะที่ผิวของลาดซึ่งในที่นี้จัดได้ว่าเป็น Surface sliding คาดว่าเกิดจากการที่มีน้ำขังภายในดินซึ่งมีผลจากการระบายน้ำออกจากดินไม่ดีพอ ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลงกว่าที่ได้ออกแบบไว้ ประกอบกับในช่วงฤดูฝน มีการชะล้างดินให้เคลื่อนตัวลงมา

ตารางที่ 4.11 กรณีการพังทลายของไหล่เขาเพื่อทำถนน Hue Hue ในประเทศออสเตรเลีย

Knowledge base	Input	Result	Fact
KB2	-	-	ลักษณะชั้นดินพบว่า สภาพดินเดิมประกอบด้วย Residual soil และ Weathered rock ของ Claystone ในช่วงบน ถัดลงมาเป็นของ Siltstone และ Sandstone ลึกลงจนพบชั้นดินอ่อนซึ่งเป็น Residual soil และ Highly to extremely claystone (มีค่า $c'=1$ ตันต่อตารางเมตร และค่า $\phi'=15$ องศา)
			
KB1	Soil model = Stratified soil Soil profile = more than two soil layers Upper parameter = $c1$ and $\phi1$ is not zero	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">R6</div> Explanation: Translational slide or Complex type composed of circular surface from the ground surface and planar surface along the base of weaker layer, both should be considered in slope stability analysis and using the lower factor of safety * This is for guideline only. Slope stability analysis should be done. *	สภาพการพังทลาย คือ รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็น พื้นผิวเป็นส่วนโค้ง จากผิวดินลึกลงมาถึงชั้นดินอ่อน คือ Residual soil และ Highly to extremely ของ Claystone พื้นผิวจะขยายลึกลงมาแล้วเปลี่ยนเป็นพื้นระนาบสัมผัสและขนานกับส่วนล่างของชั้นดินอ่อนชั้นนี้

ตารางที่ 4.12 ขอบเขตของความสามารถหรือศักยภาพของระบบ KUXslope สำหรับการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน

ลักษณะของชั้นดิน	c, ตันต่อตร.ม.	ϕ , องศา	β , องศา	H, ม.
	Hw			
Homogeneous soil	≤ 0.05	0		0
	$0.05 < c \leq 0.10$	$0 < \phi \leq 10$	10	2
	$0.10 < c \leq 0.50$	$10 < \phi \leq 15$	$10 < \beta \leq 15$	$2 < H \leq 5$
	$0.50 < c \leq 1.00$	$15 < \phi \leq 20$	$15 < \beta \leq 20$	$5 < H \leq 10$
	$1.00 < c \leq 2.00$	$20 < \phi \leq 25$	$20 < \beta \leq 25$	$10 < H \leq 20$
	$2.00 < c \leq 4.00$	$25 < \phi \leq 30$	$25 < \beta \leq 30$	
	> 4.00	$30 < \phi \leq 40$	$30 < \beta \leq 40$	
			$40 < \beta \leq 50$	
			> 50	
Nonhomogeneous soil (strength varies with depth)	≤ 0.05	0		0
	$0.05 < c \leq 0.10$	$0 < \phi \leq 10$	10	2
	$0.10 < c \leq 0.50$	$10 < \phi \leq 15$	$10 < \beta \leq 15$	$2 < H \leq 5$
	$0.50 < c \leq 1.00$	$15 < \phi \leq 20$	$15 < \beta \leq 20$	$5 < H \leq 10$
	$1.00 < c \leq 2.00$	$20 < \phi \leq 25$	$20 < \beta \leq 25$	$10 < H \leq 20$
	$2.00 < c \leq 4.00$	$25 < \phi \leq 30$	$25 < \beta \leq 30$	
	> 4.00	$30 < \phi \leq 40$	$30 < \beta \leq 40$	
			$40 < \beta \leq 50$	
			> 50	
Stratified soil	≤ 0.05	0		0
	$0.05 < c \leq 0.10$	$0 < \phi \leq 10$	10	2
	$0.10 < c \leq 0.50$	$10 < \phi \leq 15$	$10 < \beta \leq 15$	$2 < H \leq 5$
	$0.50 < c \leq 1.00$	$15 < \phi \leq 20$	$15 < \beta \leq 20$	$5 < H \leq 10$
	$1.00 < c \leq 2.00$	$20 < \phi \leq 25$	$20 < \beta \leq 25$	$10 < H \leq 20$
	$2.00 < c \leq 4.00$	$25 < \phi \leq 30$	$25 < \beta \leq 30$	
	> 4.00	$30 < \phi \leq 40$	$30 < \beta \leq 40$	
			$40 < \beta \leq 50$	
			> 50	

- คำอธิบาย 1. ศักยภาพระดับ 1 คือระบบสามารถให้คำวินิจฉัยในรูปแบบและตำแหน่งพื้นผิวของการเคลื่อนพัง และระดับไม่เสถียรภาพของลาดดินทุกประเภท
2. ศักยภาพระดับ 2 คือระบบสามารถให้คำวินิจฉัยในรูปแบบและตำแหน่งพื้นผิวของการเคลื่อนพัง และระดับไม่เสถียรภาพของลาดดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยเฉพาะบริเวณที่ถนนร่วมพัฒนา เขตหนองจอก กรุงเทพฯ
3. ศักยภาพระดับ 3 คือระบบสามารถให้คำวินิจฉัยในรูปแบบและตำแหน่งพื้นผิวของการเคลื่อนพัง แต่ต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อสรุปเป็นคำตอบที่แน่นอน
4. Hw เป็น 0 คือระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน
Hw เป็น ∞ คือระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกมาก และไม่มีผลกระทบต่อนิเสถียรภาพของลาดดิน

4.5 การเผยแพร่และการประยุกต์ใช้

การเผยแพร่มีขึ้นเพื่อทราบถึงผลของความสามารถในการใช้งานของระบบได้อย่างกว้างขวางจากบุคคลภายนอก ทำให้ทราบถึงความสัมฤทธิ์ผลของงานวิจัย รับฟังความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุง รวมถึงการเผยแพร่เพื่อเป็นประโยชน์แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและประชาชน ลักษณะของการเผยแพร่มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบได้แก่ รูปแบบของการนำเสนอเป็นบทความทางวิชาการ เอกสาร การประชุมย่อย Internet และสิ่งตีพิมพ์อื่นๆ ดังแสดงเป็นรายละเอียดในตารางที่ 4.13 และ 4.14

ตารางที่ 4.1.3 การเผยแพร่โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน “KUslope”

วิธีการเผยแพร่	ลักษณะการนำเสนอ	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
<u>โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน “KUslope”</u>				
1. การประยุกต์ใช้ในการพัฒนา	-บันทึกแจ้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง -บันทึกแจ้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	-เพื่อทดสอบและประเมินผล -สามารถในการวิเคราะห์ผล ของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบ กับการที่คิดขึ้นจริง	-นำกรณีศึกษาที่จัดทำสำเร็จมาทำการวิเคราะห์ผลด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ KUslope ที่ศูนย์วิจัยฯ -นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาสรุปเป็นแนวทาง ในการป้องกันและแก้ไขปัญหา	-หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้ใช้เป็นแนวทางในการ ดำเนินงานต่อไป
2. การประยุกต์ใช้ในการพัฒนา	-การประชุมย่อยและการนำเสนอ โดยใช้เครื่อง LCD Projector เป็นสื่อในการนำเสนอ	-เพื่อเสนอแนะวิธีแก้ไขปัญหา การพังทลายของคันแม่ -เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย	-นำกรณีศึกษาที่จัดทำสำเร็จมาทำการวิเคราะห์ผลด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ KUslope ที่ศูนย์วิจัยฯ -นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาสรุปเป็นแนวทาง ในการป้องกันและแก้ไขปัญหา	-หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้ใช้เป็นแนวทางในการ ดำเนินงานต่อไป
3. การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์	-รายงานทางวิชาการและเอกสาร ออกแบบเบื้องต้น โครงการเขียน คลองวังโคก	-เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยโดย นำไปใช้ในทางวิศวกรรม	-ใช้โปรแกรม KUslope ในการวิเคราะห์หาค่าอัตรา ส่วนความปลอดภัยของเขื่อน ในการมีวิกฤตต่าง ๆ	-สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

วิธีการเผยแพร่	ลักษณะการนำเสนอ	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
<u>โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน "KUSLOPE" (ต่อ)</u>				
4. ใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบราย	รายงานทางวิชาการและเอกสาร	- เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยโดย	- ใช้โปรแกรม KUSLOPE ในการวิเคราะห์ห่อค่าอัตรา	- สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดี
ละเอียด โครงการเชื่อมแก๊วคอนกรีต	รายการคำนวณ	นำไปใช้ในงานทางวิศวกรรม	ส่วนความปลอดภัยของเขื่อน	ในการมีวิกฤตต่างๆ
5. ใช้วิเคราะห์ห่อแบบลาดคดโค้ง	รายงานทางวิชาการและเอกสาร	- เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยโดย	- ใช้โปรแกรม KUSLOPE ในการวิเคราะห์ห่อค่าอัตรา	- สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดี
โครงการบ้านสวนป่าสัมฤทธิ์	รายการคำนวณ	นำไปใช้ในงานทางวิศวกรรม	ส่วนความปลอดภัยของลาดคดโค้ง	ในการมีวิกฤตต่างๆ
6. สัมมนาเชิงปฏิบัติการ เรื่องการ	- นำเสนอทฤษฎีทางวิชาการต่างๆ	- เพื่อเผยแพร่โปรแกรม KUSLOPE	- จัดให้ผู้เข้าสัมมนาได้รับฟังบรรยายจากวิทยากรโยธา	- หลังจากสัมมนาพบว่าทุกคนให้ความชื่นชมและ
วิเคราะห์เสถียรภาพด้วย โปรแกรม	โดยใช้เครื่อง LCD Projector	ให้เป็นสื่อที่เข้าใจในทฤษฎีการโยธา	ผู้ทรงคุณวุฒิ	สนับสนุนต่อไปโปรแกรม KUSLOPE ซึ่งเป็นโปรแกรม
KUSLOPE	เป็นสื่อในการนำเสนอ	- เพื่อจะได้ทราบข้อเสนอนะ	- จัดให้ผู้เข้าสัมมนาได้ทดลองใช้งานโปรแกรมจริง	ที่พัฒนาโดยคนไทยเอง และได้ให้ข้อเสนอแนะที่ดี
	- สานักวิชาการใช้งานโปรแกรม	สำหรับนำไปใช้พัฒนาปรับปรุง	โดยมีผู้เชี่ยวชาญแนะนำและตอบข้อซักถาม	สำหรับการที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคต
	KUSLOPE สำหรับงานออกแบบ	โปรแกรมต่อไป	- จัดสัมมนากลุ่มย่อยเพื่อให้ผู้เข้าร่วมได้มีโอกาส	
	ทางวิศวกรรมโยธา โดยให้ผู้เข้ารับ		แสดงความคิดเห็น	
	การอบรมใช้คอมพิวเตอร์ได้			
	ระหว่างทางจราจร			

ตารางที่ 4.14 การเผยแพร่ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน "KU-EXslope"

วิธีการเผยแพร่	ลักษณะการนำเสนอ	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน "KU-EXslope"				
1. การประยุกต์ใช้ในชีวิตปฏิบัติของลาดดินรับค้ำยันน้ำบางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	- การสนทนา	เพื่อทดสอบและประเมินการทำงานของระบบฯ	- นำกรณีพิพาทดังกล่าวมาทดสอบใช้ในระบบฯ ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศูนย์วิจัยฯ - เสนอผลเป็นคำตอบจากระบบแก่ผู้ใช้	- คำตอบแสดงสภาพข้อมูลดินสอดคล้องกับข้อมูลดินที่ได้จากสนาม - คำตอบแสดงสภาพภาพการพังสลอลงกับสภาพการพังที่พบจากสนาม
2. การให้คำแนะนำด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	- ทางไปรษณีย์ - ทางโทรสาร	เพื่อประเมินสมรรถภาพของระบบฯ	- จัดทำเป็นแบบฟอร์มให้ผู้ใช้กรอกข้อมูลที่จะเป็น - ศูนย์วิจัยฯ จะดำเนินการวิเคราะห์และสรุปผลโดยใช้โปรแกรม KU-EXslope แล้วจึงจัดส่งคำแนะนำแก่ผู้ใช้	- จำนวนผู้ส่งแบบฟอร์มเพื่อขอคำแนะนำมีประมาณ 10 กรณี - จัดส่งคำตอบจากระบบแก่ผู้ใช้แล้ว แต่ยังคงขาดการตอบรับแสดงความคิดเห็นในระบบ KU-EXslope จากผู้ใช้
3. การแนะนำระบบแก่กรมทางหลวง	- การบรรยายผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ และการสนทนา	เพื่อพัฒนาระบบฯ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น	- นำเสนอผลงานวิจัย และแนะนำโปรแกรม KU-EXslope - การใช้จากระบบฯ จากกรณีตัวอย่างของวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องของกรมทางหลวง	- จากการนำเสนอ พบว่าทุกคนให้ความสนับสนุนต่อการเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการเกิดระบบผู้เชี่ยวชาญ KU-EXslope โดยมีข้อเสนอแนะในการที่จะพัฒนาระบบฯ ต่อไปนี้ 1. การสื่อสารระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้ง่ายและสะดวก 2. โปรแกรมใช้เวลาน้อยในการแสดงคำตอบแก่ผู้ใช้ 3. บริเวณพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวกรุงเทพมหานครถูกแบ่งเป็นพื้นที่ย่อยๆ อีก เพื่อความชัดเจนในสภาพของ

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

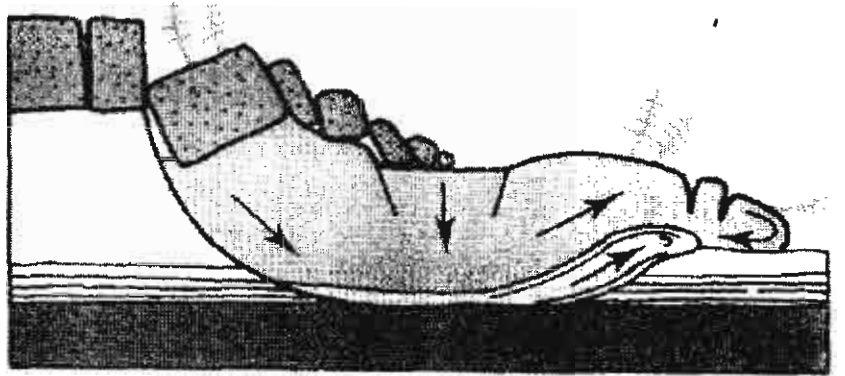
วิธีการเผยแพร่	สื่อที่ใช้	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน "KU-EXslope" (ต่อ)				
3. การแนะนำระบบแก่กรมทางหลวง (ต่อ)				<p>ดินและระดับเสถียรภาพของลาดดินของแต่ละเขตพื้นที่ถูกแบ่ง</p> <p>4. การเพิ่มการเชื่อมต่อของการทำงานของระบบแบบ Backward chaining สำหรับการวิเคราะห์ย้อนกลับ</p> <p>5. การเพิ่มการแนะนำสำหรับ การดำเนินงาน Embankment</p> <p>6. การเพิ่มระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการออกแบบลาดดินที่เหมาะสม. การปรับปรุงแก้ไขลาดดินให้มีเสถียรภาพเป็นขั้นตอนที่เหมาะสมของแต่ละสภาพงาน</p> <p>-จากการนำเสนอ พบว่าทุกคนให้ความสนับสนุนต่อการเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีใน</p> <p>การเกิดระบบผู้เชี่ยวชาญ KU-Exslope โดยมีข้อเสนอแนะในการที่จะพัฒนาระบบต่อไปในอนาคตดังนี้</p> <p>1. การสื่อสารระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้งานและสะดวก</p>
4. การแนะนำระบบแก่กรมชลประทาน	<p>-การประชุมย่อยและการนำเสนอโดยใช้เครื่อง LCD Projector เป็นเครื่องมือในการนำเสนอ</p>	<p>-นำเสนอผลงานวิจัย และแนะนำโปรแกรม KU-EXslope</p> <p>-การใช้งานของระบบจากกรณีตัวอย่างของวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องของกรมชลประทาน</p>	<p>เพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น</p>	

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

วิธีการเผยแพร่	สื่อที่ใช้	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน "KU-EXslope" (ต่อ)				
4. การแนะนำระบบแก่กรมชลประทาน (ต่อ)				<p>2. ไปรแกรมใช้เวลาน้อยในการแสดงค่าตอบแก่ผู้ใช้</p> <p>3. ควรเพิ่มการแนะนำสำหรับกรณีงาน Embankment</p> <p>4. ควรเพิ่มระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการปรับปรุงแก้ไขเสถียรภาพของลาดดิน</p> <p>5. ควรเพิ่มการเชื่อมต่อกับโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินคือโปรแกรม Kuslope โดยมีลำดับขั้นตอนของการทำงานคือระบบ KU-EXslope ให้คำแนะนำแก่ผู้ใช้ แล้วส่งข้อมูลต่อไปยังโปรแกรมวิเคราะห์เพื่อเป็นการวิเคราะห์จากสภาพที่แท้จริง แล้วส่งต่อในการให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขเสถียรภาพของลาดดินเมื่อพบว่ามีความไม่เกิดการพังซึ่งได้จากการวิเคราะห์</p> <p>6. ควรเพิ่มการปรับเปลี่ยนแรงดันน้ำในดินในการประมวลผลด้วย</p>

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

วิธีการเผยแพร่	สื่อที่ใช้	เป้าหมาย	การดำเนินงาน	ผลของการเผยแพร่
5. การนำเสนอบทความทางวิชาการในการประชุมทางวิชาการ โดยใช้เครื่อง LCD Projector เป็นสื่อในการนำเสนอ	-นำเสนอบทความทางวิชาการ -นำเสนอภาพของงานวิจัย	เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ	-จัดทำบทความดังกล่าว -นำเสนอบทความเรื่องระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	-ได้รับความสนใจจากผู้เข้าร่วมสัมมนามาก ที่เป็นจุดเริ่มต้นในการรวบรวมข้อมูลและความรู้ของงานลาดดินไว้อย่างเป็นระบบ
การเผยแพร่ต่อสาธารณชน				
1. การแจกแผ่นพับโครงการวิจัยในการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6	-แผ่นพับโครงการวิจัย	-เพื่อเผยแพร่ผลงานของงานวิจัย	-จัดทำแผ่นพับโครงการวิจัย -แจกแผ่นพับโครงการวิจัย	-เป็นการแนะนำระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน คือ โปรแกรม KU-EXslope ไปแพร่กระจายวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน KUslope, และฐานข้อมูลของกรณีพิบัติที่พบในประเทศไทย
2. การเขียนบทความ เพื่อเดือนภัยการพิบัติของลาดดินในหน้าแล้ง	-บทความในหนังสือพิมพ์	-เพื่อให้ความรู้แก่คนทั่วไป สำหรับการเกิดภัยพิบัติของลาดดินในหน้าแล้ง	-จัดทำบทความดังกล่าว -จัดส่งให้แก่หนังสือพิมพ์ต่าง ๆ ที่สนใจ	-เป็นการให้ความรู้ที่นำเสนอใจและเป็นการเตือนภัยพิบัติของลาดดินที่เกิดขึ้นในหน้าแล้ง
3. การให้สัมภาษณ์ และข้อมูลแก่สื่อมวลชน เกี่ยวกับภัยพิบัติของลาดดิน	-หนังสือพิมพ์ -วิทยุ -โทรทัศน์	-เพื่อให้ความรู้แก่คนทั่วไป สำหรับการเกิดภัยพิบัติของลาดดิน	-จัดเวลาในการให้สัมภาษณ์และข้อมูลสื่อมวลชน -ให้สัมภาษณ์และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	-เป็นการให้ความรู้ที่นำเสนอใจและเป็นการเตือนภัยพิบัติของลาดดิน
4. การทำ Web page	-ระบบเครือข่าย Internet	-เผยแพร่ความรู้ด้านวิศวกรรม ปฐพีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง -เปิดให้บริการรับคำร้องในการขอใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ -เปิดให้บริการขอรับโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน KU-Slope และโปรแกรมวิธีวิจัยการแก้ไขเสถียรภาพของลาดดิน	- จัดตั้งระบบ web server, ftp server เพื่อใช้เป็นเครื่องแม่ข่ายในการเผยแพร่ผลงานวิจัย - ขอชื่อ URL สำหรับ Homepage โครงการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็น http://www.gerd.eng.ku.ac.th - จัดทำ web page สำหรับการเผยแพร่ความรู้และงานวิจัย	- เป็นการให้ความรู้และเผยแพร่ความก้าวหน้าของงานวิจัย ซึ่งในปัจจุบันมีผู้เยี่ยมชม Homepage ของโครงการเป็นจำนวนประมาณ 350 ครั้ง - สามารถเผยแพร่ software ที่ได้พัฒนาขึ้นแก่ผู้ใช้งานในต่างประเทศ



5

บทสรุปและเสนอแนะ
เอกสารอ้างอิง

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินสำหรับงานวิจัยนี้นับเป็นครั้งแรกในประเทศไทย โดยมีความต้องการให้เป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรโยธา และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ในการนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ได้สะดวกและถูกต้องมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนพังก่อให้เกิดการสูญเสียทรัพย์สิน และชีวิตปีละมากมาย ในขณะที่ประเทศไทยยังพบปัญหาในงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหลายประการ อาทิเช่น ขาดการรวบรวมข้อมูลการพิบัติอย่างเป็นระบบ ผู้เชี่ยวชาญในด้านนี้มีจำนวนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณงาน เป็นต้น โดยที่ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินมักมีสาเหตุเบื้องต้นมาจากความผิดพลาดในการเลือกคุณสมบัติเฉพาะของดิน และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงนับเป็นครั้งแรกที่มีการสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้ข้อแนะนำทางด้านเทคนิคเพื่อช่วยเหลือในการวิเคราะห์

2. ในต่างประเทศได้มีการนำเอาระบบผู้เชี่ยวชาญมาประยุกต์ใช้ในการเสนอแนะเพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านงานวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดมีมาไม่น้อยกว่า 10 ปีแล้ว โดยที่ผลงานวิจัยอยู่ในรูปแบบของระบบผู้เชี่ยวชาญที่จัดสร้างขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อาทิเช่น โปรแกรม XPENT ในประเทศฝรั่งเศส ให้ความช่วยเหลือในการบอกรูปแบบของการพังทลาย และการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน, Knowledge-based approach to slope stability analysis ในประเทศมาเลเซีย ให้ความช่วยเหลือในการพิจารณาวิธีปรับปรุงเสถียรภาพของลาด เป็นต้น

3. ในงานวิจัยนี้ได้สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินมีชื่อว่า KU-EXslope ประกอบด้วยฐานความรู้ 2 ฐาน คือ KB1 เป็นความรู้สำหรับการวินิจฉัยรูปแบบการเคลื่อนพังและระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน และ KB2 เป็นความรู้สำหรับให้ความช่วยเหลือในการตัดสินใจเลือกข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์อยู่ 3 ส่วนด้วยกันได้แก่ การหาค่าประมาณของความแข็งแรงของดินแต่ละประเภทที่จำแนกตามระบบ USCS, การประมาณค่าความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพฯ, และการประมาณค่าของความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย

4. ฐานความรู้ที่ใช้สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญ ประกอบด้วยความรู้ที่ประเมินมาจากข้อมูล 4 ส่วน คือ

4.1 ส่วนของด้านรูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดิน ประเมินจากข้อมูลกรณีพิบัติของลาดจากการออกสำรวจในสนาม จากเอกสารของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และจากเอกสารอ้างอิง

4.2 ส่วนของด้านข้อมูลของค่าความแข็งแรงของดินจากรายงานการสำรวจดินของโครงการต่าง ๆ ในประเทศไทย และเอกสารอ้างอิง

4.3 ส่วนของด้านข้อมูลของค่าความเข้มของแผ่นดินไหวจากแผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหวตาม Modified Mercalli Scale และแผนที่แสดงตำแหน่งของจังหวัดและอำเภอในประเทศไทย

4.4 ส่วนของด้านตำแหน่งพื้นผิวของการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดินใน Homogeneous soil และ Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) จากผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพิ่มเติมในกรณีของทั้งสองลักษณะชั้นดิน

5. รูปแบบการเคลื่อนพังของลาดดิน และระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งพิจารณาอิทธิพลจากปัจจัยภายในลาดคือความแข็งแรงของดินและระดับน้ำใต้ดิน (ระดับน้ำที่ผิวดินและระดับน้ำอยู่ลึกมาก) และขนาดหน้าตัดของลาด มีความแตกต่างกันในสามลักษณะชั้นดิน ได้แก่

5.1 Homogeneous soil พบเป็น Rotational slide ที่มีตำแหน่งพื้นผิวเป็น Base, Toe, Slope, หรือ Surface failure และระดับเสถียรภาพของลาดดินที่แตกต่างกันตามประเภทของดินในลาด คือ Cohesive soil ที่มีค่า $\phi \approx 0$ Cohesive soil ที่มีค่า c และ ϕ มากกว่า 0 และ Cohesionless soil ที่มีค่า $c \approx 0$, ค่า Strength parameters ในดิน, ขนาดหน้าตัดของลาด, และตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน

5.2 Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) ซึ่งเน้นไปที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพ พบเป็น Rotational slide มีตำแหน่งพื้นผิวเป็น Base หรือ Toe failure และระดับเสถียรภาพของลาดดิน ที่แตกต่างกันตามค่า c และขนาดหน้าตัดของลาด

5.3 Stratified soil พบเป็น Rotational slide, Translational slide, หรือ Complex type แตกต่างกันตามประเภทของดินในลาด, ตำแหน่งของชั้นดิน Firm strata, และตำแหน่งของชั้นดินอ่อน

6. ระบบแนะนำสภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย ซึ่งได้แสดงในค่าของสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว (K_s) โดยได้นำค่า K_s จากแผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหว มาจัดจำแนกในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ซึ่งทำให้สามารถจัดแบ่งพื้นที่ในประเทศไทยตามค่าความเข้มของแผ่นดินไหว ที่สามารถบอกเป็นค่า K_s ได้ละเอียดลงไปถึงระดับอำเภอ

7. สภาพความแข็งแรงของดิน มีความแตกต่างกันตามตำแหน่งที่ตั้งเป็นภาคและจังหวัด โดยแสดงเป็น 2 พื้นที่ คือ

7.1 พื้นที่ในหลายจังหวัดของที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง ตามที่ประเมินจากส่วนของด้าน ข้อมูลดินพบว่าชั้นดินช่วงบนส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า 10 เมตร มีความแข็งแรงแปรเปลี่ยนตามความลึก และเมื่อนำลักษณะของความแข็งแรงดังกล่าวมาประมวลเป็น รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained shear strength (S_u) และความลึกของชั้นดิน จะได้ ว่าสมการในการคำนวณค่า S_u สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP โดยมีค่า f ประมาณ 0.24 ถึง 0.27 และค่า O.C.R ใกล้เคียงหนึ่ง และยังพบว่าเหนือชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เป็นชั้น Weathered zone หรือ Crustal zone ที่มีความหนาประมาณ 3 – 5 เมตร

7.2 พื้นที่ในส่วนอื่น ชั้นดินจะมีค่าความแข็งแรงของดินแตกต่างกันตามประเภทของดิน ที่จำแนกตามระบบ USCS ดังแสดงเป็น Soil chart ซึ่งได้จากการประเมินส่วนของด้านข้อมูลดิน และ ประมวลเป็น Soil chart แสดงค่าความแข็งแรงของดินกลุ่มที่มีค่า c ไม่เป็นศูนย์ในรูปของกราฟความ สัมพันธ์ระหว่างค่า c และ ϕ , และของดินกลุ่มที่เป็น Cohesionless soil ในรูปของกราฟความ สัมพันธ์ระหว่างค่า Relative density และ ϕ

8. ระบบ KU-EXslope เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญที่นำมาพัฒนาระบบช่วยเขียนระบบผู้เชี่ยวชาญ ที่มีชื่อว่า RAISON เพื่อให้ความสะดวกต่อผู้ใช้ในการใช้งานของระบบ ด้วยการโต้ตอบระหว่างผู้ ใช้กับระบบโดย User interface และเพื่อให้การจัดการประมวลผลเป็นคำตอบจากการค้นหาในฐาน ความรู้ในลักษณะต่อเชื่อมไปข้างหน้าอย่างเป็นระบบ โดย Inference engine เมื่อแสดงความรู้ในรูป แบบของกฎ (Rules) ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขของการตัดสินใจ และนำไปสู่คำตอบของกฎนั้น ๆ กฎใน ฐานความรู้ KB1 มี 1,083 กฎ และกฎในฐานความรู้ KB2 มี 113 กฎ

9. การใช้งานของระบบ KU-EXslope อยู่ในรูปแบบการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้และระบบ ด้วย การป้อนข้อมูลเข้าไปในระบบตามเงื่อนไขของกฎในแต่ละฐานความรู้ตามชนิดของคำตอบที่ต้องการ ที่ระบบแสดงให้ผู้ใช้ทราบทางหน้าจอ พร้อมคำอธิบาย ซึ่งเป็นการสะดวกต่อผู้ใช้

10. ผลของการประเมินสมรรถภาพของระบบ KU-EXslope สรุปได้ว่า เงื่อนไขและคำตอบ ของกฎในแต่ละฐานความรู้ สอดคล้องกับสภาพจริงที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลกรณี พิบัติที่เก็บรวบรวมได้ และ หน่วย User interface ในระบบ อยู่ในรูปแบบที่ง่ายและสะดวกสำหรับผู้ใช้ แต่ยังคงขาดความสามารถในการเชื่อมโยงของการทำงานระหว่างระบบกับโปรแกรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

11. ผลสรุปของความรู้และความจริงที่พบจากการทำฐานความรู้ในระบบ คือ

11.1 กรณีพิบัติของคันทางของถนนบนดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยเฉพาะคันทางของถนน ขนานกับคลองชลประทาน มักพบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide และพบรอยแตกร้าวที่ พื้นผิวดิน ซึ่งมีสาเหตุส่วนใหญ่จากการลดระดับน้ำทันที จึงมักพบเห็นได้มากในช่วงที่มีการสูบน้ำและ

ลอกคลองในหน้าแล้ง และยังมีสาเหตุอื่นจากดินมีความแข็งแรงไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักจราจรที่เพิ่มขึ้น เมื่อลักษณะของหน่วยแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรเป็น Total stress analysis

11.2 กรณีพิบัติของลาดดินถมบนดินเหนียวกรุงเทพฯ มักพบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide และพบรอยแตกร้าวที่พื้นผิวดิน ซึ่งมีสาเหตุจากดินมีความแข็งแรงไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ทับถมอยู่ เมื่อลักษณะของหน่วยแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรเป็น Total strength analysis

11.3 กรณีพิบัติของลาดดินชุดในดินเหนียวกรุงเทพฯ มักพบรูปแบบการเคลื่อนพังเป็น Rotational slide มักพบรอยแตกร้าวที่พื้นผิว และเกิดการพังเมื่อใช้งานแล้วในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งมีสาเหตุจากความแข็งแรงของดินลดลงตามระยะเวลา อันเป็นผลจากการเกิด Negative pore water pressure ที่ช่วงเวลาดิ้นสุดงานก่อสร้าง (End of construction) และเมื่อเวลาผ่านไป Negative pore water pressure จะค่อยลดลง แต่การพังของลาดดินชุดอาจเกิดขึ้นได้ในช่วงระหว่างงานก่อสร้าง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนดินทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง และไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนพังของลาดดิน

11.4 กรณีพิบัติของลาดเนื่องจากการตัดไหล่เขาเพื่อทำถนน มักเกิดขึ้นในช่วงฝนตกชุก โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีสภาพดินตาม Geologic formation เป็น Residual soil และ Weathered rock ของหินแกรนิต ซึ่งมีค่าความยึดเหนี่ยวในดินน้อย เนื่องจากดินมีลักษณะที่อุ้มน้ำ ทำให้ความแข็งแรงในดินลดลง และมีการกัดเซาะบริเวณเชิงของไหล่เขา จึงเกิดการเคลื่อนพังของลาดดินในรูปแบบ Shallow seated rotational slide และหากเกิดฝนตกหนัก สภาพของดินจะมีความชื้นมากจนอยู่ในสภาพไหลได้ ที่เรียกว่า Debris flow ดังที่พบมากในภาคเหนือและภาคใต้

12. ผลสรุปของสิ่งที่เกิดขึ้น เมื่อนำระบบ KU-EXslope มาใช้ในงานวิเคราะห์ คือ

12.1 การให้ความช่วยเหลือในการให้ความรู้ทางเทคนิคสำหรับการเลือกลักษณะของการวิเคราะห์หน่วยแรงในการหาค่าความแข็งแรงของดิน, การแนะนำช่วงของค่าความแข็งแรงของดินแต่ละประเภทที่จำแนกตามระบบ USCS รวมถึงลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง และสภาพความชื้นของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย, และการเลือกวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์และมีอิทธิพลต่อระดับความถูกต้องของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

12.2 การลดขั้นตอนของการวิเคราะห์ให้น้อยลง ในกรณีของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใน Homogeneous soil และ Nonhomogeneous soil (strength varies with depth) นั่นคือ

ระบบ KU-EXslope สามารถบอกระดับไม่เสถียรภาพของลาดดิน ตามรูปแบบจำลองของลาดที่กำหนดไว้ในระบบ และตามข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในระบบ ทำให้สามารถผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับลาดดินที่ไม่เสถียรภาพ เพื่อไปดำเนินการพิจารณาเลือกวิธีการปรับปรุงแก้ไขให้ลาดดินมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น และนำไปสู่การออกแบบลาดดิน

5. เมื่อมีการเผยแพร่ระบบ KU-EXslope ออกสู่สาธารณชน ผลของการนำเอาระบบผู้เชี่ยวชาญนี้ไปใช้ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น คือทำให้กรณีพิบัติของลาดดินเกิดขึ้นน้อยลง และมาตรฐานของการออกแบบลาดดินสูงขึ้นอย่างเป็นระบบ.

5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบ KU-EXslope ได้รับการพัฒนาเป็นครั้งแรก และในระหว่างการจัดทำงานวิจัยได้พบว่าระบบควรได้มีการพัฒนาต่อไปอีก เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปสำหรับงานดิน คือ

1. ระบบควรได้รับการพัฒนาในการเชื่อมโยงการทำงาน ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลและการส่งผ่านผล ระหว่างระบบกับโปรแกรมอื่นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

1.1 ระบบฐานข้อมูลกรณีพิบัติ เพื่อเป็นการปรับปรุงฐานความรู้ให้เหมาะสมกับสภาพการณ์ที่เกิดขึ้นตลอดเวลา และสามารถเก็บกรณีพิบัติที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบในฐานข้อมูลซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อเป็นการสะดวกในการป้อนข้อมูลในลักษณะของตำแหน่งพื้นที่บนแผนที่ และการทราบคำตอบเป็นรูปร่างของพื้นที่ อาทิเช่น สภาพทางธรณีวิทยา สภาพความชื้นของแผ่นดินไหว เป็นต้น

1.3 โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งมีลักษณะเป็นโปรแกรมคำนวณเพื่อเป็นการสะดวกในการลดความซ้ำซ้อนในการป้อนข้อมูลที่เหมือนกันทั้งในระบบ KU-EXslope และโปรแกรมวิเคราะห์ รวมถึงการส่งผ่านคำตอบระหว่างทั้งสองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. ฐานความรู้ ในระบบควรได้รับการพัฒนาให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานลาดดินได้มากขึ้น ได้แก่

2.1 การนำ Dynamic factors มาพิจารณาในการสร้างกฎ อาทิเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับการพิบัติของลาด โดยเฉพาะพื้นที่ตามไหล่เขาในภาคเหนือและภาคใต้,

สภาพของพืชที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด, ระดับน้ำในคลองที่ขนานกับถนนบนดินเหนียวอ่อน ที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาด เป็นต้น

2.2 การจัดทำฐานความรู้เชิงรายละเอียดของการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน เพื่อให้ระบบทำงานได้ครบถ้วนสำหรับงานลาดดิน

3. ในระหว่างการทำวิจัย ยังพบว่าไหล่เขามีการพิบัติเป็นจำนวนมาก ทั้งที่เป็นลาดเขาตามธรรมชาติ และการตัดไหล่เขาเพื่อทำถนน เขื่อน เขื่อนกั้น เป็นต้น ซึ่งมักจะเกิดในดินที่เกิดจากหินแกรนิตเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในช่วงฝนตกชุก ความชื้นจะทำให้ดินมีสภาพชุ่มน้ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนพังในลักษณะ Rotational slide และ Debris flow จึงควรจะต้องมีการศึกษาเป็นรายละเอียดของพฤติกรรมทางด้านธรณีเทคนิคของลาดดินภูเขาที่เกี่ยวข้อง

4. เนื่องจากการพิบัติของลาดดินหลายแห่งอยู่ในพื้นที่ที่เข้าถึงยากได้แก่ ในป่าลึก หรือพื้นที่ภูเขาสูง เป็นต้น ทำให้มีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลได้อย่างทั่วถึง และไม่สามารถประเมินความรุนแรงและปริมาณการเกิดของพื้นที่พิบัติได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น หากสามารถนำเทคนิคของภาพถ่ายทางอากาศ หรือภาพถ่ายดาวเทียมก็จะสามารถศึกษาการกระจายของการพิบัติได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะนำไปสู่การจัดจำแนกพื้นที่เสี่ยงภัยทางการพิบัติของลาดดินได้ในอนาคต

5. การใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ มาประยุกต์กับงานวิจัยทางด้านการพิบัติของลาดดิน ในการประมวลปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติ อาทิเช่น ปริมาณน้ำฝน สภาพธรณีวิทยา เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ในต่างประเทศได้ใช้เป็นเครื่องมือในการจัดทำแผนที่แสดงระดับความเสี่ยงต่อการพิบัติของลาด จึงน่าจะได้มีการนำวิธีการนี้นำมาใช้ในประเทศไทย เพื่อเป็นการเตือนภัยเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดในแต่ละช่วงเวลาและแต่ละพื้นที่ และเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและการก่อสร้างงานดิน

6. ปัญหาที่พบมาก คือมีความยุ่งยากในการเก็บรวบรวมข้อมูลกรณีพิบัติทั้งจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ นั่นคือ กรณีของหน่วยงาน พบว่าการจัดเก็บข้อมูลอย่างไม่เป็นระบบ และขาดความพร้อมของหน่วยงานในการจัดการด้านข้อมูลกรณีพิบัติ, และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณีของการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปริมาณของข้อมูลมีน้อย และรายละเอียดของข้อมูลไม่ครบถ้วน ดังนั้น ในอนาคตจึงควรมีหน่วยงานดังกล่าวสำหรับข้อมูลภัยพิบัติทางธรรมชาติ ได้แก่ ภัยพิบัติจากการเคลื่อนพังของลาดและดินถล่ม ภัยพิบัติจากน้ำท่วม ภัยพิบัติจากไฟไหม้ป่า เป็นต้น เพื่อความเป็นระบบของข้อมูล และการให้ข้อมูล รวมถึงความครบถ้วนของรายละเอียดซึ่งเกี่ยวข้องกับการพิบัติของลาด

7. การเผยแพร่ควรจะได้มีการดำเนินการ เพื่อทราบถึงข้อบกพร่องและความสัมฤทธิ์ผลของระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบ KU-EXslope มีประสิทธิภาพสองชั้น โดยการจัดพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการ การจัดอบรมสัมมนา และการแลกเปลี่ยนข้อมูลทาง Internet

เอกสารอ้างอิง

กรุงเทพมหานคร. 2540. รายงานผลการสำรวจธรณีเทคนิคถนนร่วมพัฒนา. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ. 140 น.

กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. 2530. แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศไทย มาตราส่วน 1:2,500,000.

นภดล เพียรเวช. 2538. ปัญหาเสถียรภาพของลาดดินชุด, น. 261-273. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องปัญหาและความวิบัติทางวิศวกรรมปฐพีและการแก้ไข. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

ปณิธาน ลักษณะประสิทธิ์ และนพดล คูหาทสนะดีกุล. 2536. เขตแผ่นดินไหวและสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย, น. 268-287. ใน รายงานการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

ประพจน์ บุญสินสุข. 2538. Common slope failures in soft Bangkok Clay and simplified analysis, น. 221-236. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องปัญหาและความวิบัติทางวิศวกรรมปฐพีและการแก้ไข. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วรกร ไม้เรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. Library and Nine, กรุงเทพฯ. 264 น.

วรกร ไม้เรียง และ วรณี ศุขสาตร, ร.ต.หญิง. 2542. ลักษณะทางธรณีเทคนิคของการเคลื่อนที่ของลาดดินเนื้อเดียวตามธรรมชาติ, น. 196-201. ใน เอกสารการประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วรกร ไม้เรียง และ ชูเลิศ จิตเจื้อจุน. 2543. การศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน, น. 400-405. ใน เอกสารการประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วิชาญ ภูพัฒน์, ศรีสุข จันทรางศุ, เรืองวิทย์ โชติวิทยานิพันธ์, ธิตี ปวีณธนา, สุรินทร์ กาญจโนภาส, และ วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจานง, ม.ล. 2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำ

เจ้าพระยาตอล่าง. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม
ราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ. 92 น.

ศูนย์วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. 2541. รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 งานวิจัยเรื่องระบบ
ผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน. มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 131 น.

. 2542. รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 4 งานวิจัยเรื่องระบบ
ผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุง เทพฯ. 82 น.

สุวัฒน์ ดิยะไพรัช, นรินทร์ ชัยมณี และฟิลิธีร์ อีรดิolk. 2538. ดินเหนียวกรุงเทพ : สภาพ
ธรณีวิทยาและการประยุกต์ใช้, น. 93-99. ใน การประชุมวิชาการ เรื่องความก้าวหน้า
และวิสัยทัศน์ของการพัฒนาทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.

Abramson, L.W., T.S. Lee, S. Sharma and G.M. Boyce. 1996. Slope Stability and
Stabilization Method. John Wiley & Sons, U.S.A. 627 p.

Arnould, M. and P. Frey. 1978. Analyse des responses a une Enquete Internationale de
l'UNESCO sur les glissements de terrain. International Associated Engineering
Geology Bulletin 17 : 114-118.

Aste, J.P. 1992. SISYPHY: system d'aide au diagnostic en matiere d'instabilite de
pentes., pp. 515-524. In Proceeding of International Conference on Geotechnics
and Computers. Paris.

Barisone, G. and G. Bottino. 1990. Metodologia adottata per la studio generate delle
condizioni di stabilita dei versanti nel Comune di Carema. Bull. A.M.S.,
Annoxxv, n° 1-2, marzo3 giugno 1991 : 253-259.

Bishop, A.W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes.
Geotechnique Vol. 5, No. 1 : 7-17.

Bishop, A.W. and L. Bjerrum. 1960. The relevance of the triaxial test to the solution
of stability problems, pp. 439-501. In Proceeding Research Conference on the
Shear Strength of Cohesive Soils. Denver, Colorado.

Blong, R.J. 1973. A numerical classification of selected landslides of the debris slide-avalanche-flow type. *Engineering Geology* 7 : 99-114.

_____. 1974. Landslide form and hillslope morphology: an example from New Zealand. *Australia Geography* 12: 425-438.

Brand, E.W., Y. Premchitt and H.B. Phillipson. 1984. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong, pp. 377-384. *In* Proceeding 4th International Symposium on Landslides. Toronto, Vol. 1 : 337-384.

Brand, E.W. and H.B. Phillipson. 1984. Site investigation and geotechnical engineering practice in Hong Kong. *Geotechnical Engineering* 15 : 97-153.

Caine, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow. *Geografiska Annaler* 62A (1-2) : 23-27.

Chowdhury, R.N. 1978. *Slope Analysis*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 422 p.

Crozier, M.J. 1973. Techniques for the morphometric analysis of landslips. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 17 (1) : 78-101.

Crozier, M.J., R.J. Eyles, S.L. Marx, J.A. McConchie and R.C. Owen. 1980. Distribution of landslips in the Wairarapa hill country. *N.Z.J. Geol. Geophys* 23 : 575-586.

Denby, B. and M.S. Kizil. 1991. Application of expert systems in geotechnical risk assessment for surface coal mine design. *Journal Survey Mining Reclamation* 5, No. 2: 75-82.

Dimmick, K., S.K. Bhatia and J. Hassett. 1991. Geotextile edge drain design and specification by expert system. *Geotechnique Special Publish No. 27* : 288-297.

DOE : Department of the Environment. 1994. *Landsliding in Great Britain*. HMSO, London. 361 p.

- Douglas, D.J., A.P. Maconochie and B.K. McMahon. 1987. Slip failure in Ashfield Shale at Artarmon, Sydney, pp. 305-314. *In* B.F. Walker and R. Fell (eds.). Soil Slope Instability and Stabilisation. A.A. Balkema, Netherland.
- Dunn, I.S., L.R. Anderson and F.W. Kiefer. 1980. Fundamentals of Geotechnical Analysis. John Wiley & Sons, New York. 414 p.
- East, T.J. 1978. Mass movement landforms in Baarcon Pocket, South-East Queensland: a study of form and process. *Queensland Geographical Journal* 4: 37-67.
- Faure, R.M., S. Leroueil, J.P. Rajot, P. LaRochelle, G. Seve and F. Tavenas. 1988. XPENT, systeme expert en stabilite des pentes, pp. 625-629. *In* Proceeding 5th International Symposium on Landslides. Lausanne.
- Faure, R.M., D. Mascarelli, M. Zelfani, L. Charveriat, J. Gandar and O. Mosuro. 1991. XPENT: and expert system for slope stability, pp. 143-147. *In* Artificial Intelligence and Civil Engineering. CIVIL-COMP Press, Edinburgh.
- Federal Highway Administration. 1988. Highway Slope Maintenance and Slide Restoraion Workshop, pp. 200-247. *In* T.C. Hopkins (ed.). Report No. FHWA-RT-88-040. Washington, D.C.
- Fell, R., J. PatrickMaccregor, J. Williams and P. Searle. 1987. Hue Hue Road landslide, Wyong, pp. 315-324. *In* B.F. Walker and R. Fell (eds.). Soil Slope Instability and Stabilisation. A.A. Balkema, Netherland.
- Fell, R., P. Finlay and G. Mostyn. 1996. Framework for assessing the probability of sliding of cut slopes, pp. 201-208. *In* Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.
- Fellenius, W. 1936. Calculation of the stability of earth dams, pp. 445-459. *In* Transaction 2nd Congress on Large Dams Vol. 4, Washington D.C.
- Fukuoka, M. 1978. Estimation of risks due to landslides. *Bulletin International Associated Engineering Geology* 17 : 44.

- Geotechnical Control Office. 1984. Geotechnical Manual for Slopes 2nd ed. Civil Engineering Services Department, Hong Kong.
- Greenway, D.R. 1987. Vegetation and slope stability, pp. 187-230. *In* M.J. Anderson and K.S. Richards (eds.). Slope Stability, Wiley.
- Gray, D.H. and A.T. Leiser. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostrand Reinhold, New York. 40 p.
- Hansen, A. 1984. Landslide hazard analysis, in Brunaden and Prior: 523-603.
- Hayes-Roth, F., D. Waterman and D. Lenat. 1983. Building expert systems. Addison-Wesley. U.S.A. 147 p.
- Hirokane, M., I. Mikami, K. Yagashire and S. Ohmori. 1993. Knowledge acquisition and evaluation for selection of slope protection structures, pp. 161-169. *In* B.H.V. Topping (ed.). Knowledge-based systems for civil and structural engineering, Edinburgh.
- Hutchinson, J.N. 1978. A geotechnical classification of landslides, in Crozier : 19-86.
- Hunt, R.E. 1986. Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation. McGraw-Hill, Inc. U.S.A. 729 p.
- Ismil, Z. 1989. Knowledge-based approach to slope stability analysis, pp. 1-8. *In* International Conference on Engineering Geology in Tropical Terrains. Kuala Lumpur.
- Jahns, R.H. 1978. Landslides. National Academy of Sciences, Geophysical Predictions: 58-65.
- Janbu, N. 1967. Discussion of dimensionless parameters for homogeneous earth slopes. Journal Soil Mechanics and Foundation Engineering Division Vol. 93, No. SM6 : 367-374.
- _____. 1996. Slope stability evaluation in engineering practice, pp. 17-34. *In* Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.

Japan Ministry of Construction. 1972. Dangerous Slope Failure. Department of River Works, Japan. 14 p.

Johnson, K.A. and N. Sitar. 1990. Hydrological conditions leading to debris flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal* 27 : 789-790.

Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Bulletin Geological Society American* 95: 406-421.

Lacasse, S. and F. Nadim. 1994. Reliability issues and future challenges in geotechnical engineering for offshore structures, pp. 9-38. *In Proceeding 7th International Conference on the Behavior of Offshore Structures*. Cambridge, USA.

Lambe, T.W. and R.V. Whitman. 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York. 553 p.

Leroi, E. 1996. Landslide hazard-Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments, pp. 35-52. *In Proceeding 7th International Symposium on Landslides*. Trondheim.

Leroueil, S., F. Tavenas and J.P. Le Blhan. 1983b. Propreites caracteristiques des argiles de l'est du Canads. *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 20 : 681-705.

Liener, S., H. Kienholz, M. Liniger and B. Krummenacher. 1996. SLIDISP A procedure to locate landslide prone areas, pp.279-284. *In Proceeding 7th International Symposium on Landslides*. Trondheim.

Lowe, J. 1969. Stability analysis of embankments, pp. 1-36. *In Proceeding ASCE : Stability and Performance of Slopes and Embankments*. Berkeley, California.

Lumb, P. 1975. Slope failures in Hong Kong. *Quaterly Engineering Geology* 8: 31-65.

Mascarelli, D., R.M. Faure and R. Kastner. 1992. Anatomie d'un projet a base de connaissances XPENT systeme de travail en ingenierie des pentes, pp. 587-598. *In Proceeding of International Conference on Geotechnics and Computers*. Paris.

- Mintzer, O.W. 1962. Terrain Investigation Techniques for Highway Engineers. Annual Report No. 196-1, Engineering Experiment Station, Ohio State University, Columbus, Ohio. 42 p.
- Mitchell, J.M. 1976. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, New York. 422 p.
- Morgenstern, N.R. and V.E. Price. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* Vol. 15, No. 1 : 79-93.
- Morgenstern, N.R. 1995. Managing risk in geotechnical engineering. Proceeding 10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Guadalajara, Vol. 4 : 31-45.
- Meyerhof, G.G. 1970. Safety factors in soil mechanics. *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 7 (4) : 349-355.
- Moser, M. and F. Hohensinn. 1983. Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology* 19 : 185-211.
- Moula, M., D.G. Toll and N. Vaptismas. 1995. Knowledge-based systems in geotechnical engineering. *Geotechnique* 45 (2). pp. 209-221.
- Mullarkey, P.W. 1986. A geotechnical KBS using fuzzy logic, pp. 847-859. In D. Sriram and R. Adey (eds.). *Applications of Artificial Intelligence in Engineering Problems* Vol. 2, Berlin.
- Mullarkey, P.W. and S.J. Fenves. 1986. Fuzzy logics in a geotechnical knowledge-based system : CONE. *Civil Engineering System* 3 No. 2 : 58-81.
- Naval Facility Engineering Command. 1982. *Soil Mechanics, Design Manual DM-7.1*. Alexandria, Virginia: Department of the Navy, U.S.A. 348 p.
- Nilsen, T.H. and B.L. Turner. 1975. Influence of rainfall and ancient landslide deposits on recent landslides (1950-71) in urban areas of Contra Costa County, California. *USGS Bulletin* 1388 : 1-18.

- Nutalaya, P. and J.L. Rau. 1981. Bangkok : The sinking metropolis. Episodes Vol. 4 : 3-8.
- O'Loughlin, C.L. 1974. A study of tree root strength deterioration following clear felling. Canadian Journal of Forestry Research 4(1): 107-113.
- Parikh, S.A. and N. KameswaraRao. 1991. An expert system for civil engineering applications. Geotechnical Spec. Publication 1 No. 27: 413-421.
- Paochaiyangyuen, R. 1993. Analysis of slope instability along Rangsit-Nakhon Nayok Highway. M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Patterson, D.W. 1990. Introduction to Artificial Intelligence & Expert Systems. Prentice-Hall Inc., New York. 448 p.
- Piancharoen, C. and C. Chuamthaisong. 1976. Groundwater of Bangkok Metropolis, Thailand, pp. 510-526. In Proceeding International Hydrogeological Conference. Budapest.
- Pilgrim, A.T. and A.J. Conacher. 1974. Causes of earthflows in the southern Chittering Valley, Western Australia. Australia Geology Studies 12 : 38-56.
- Popa, A. and L. Fetea. 1996. Risk factors monitoring for landslides, pp. 337-338. In Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.
- Popescu, E.M. 1996. From landslide causes to landslide remediation, pp. 75-95. In Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.
- Rehak, D.R., P.P. Christiano and D.D. Norkin. 1985. SITECHAR: and expert system component of a geotechnical site characterization workbench, pp. 117-133. In C.L. Dym (ed.). Applications of Knowledge-based Systems to Engineering Analysis and Design. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Reshad, M.M., N.A.B. Yehia, A.I. Bazaraa and A.I. Dessouki. 1991. Foundcom: a conceptual model for the integrated knowledge-based CAD systems for foundation design, pp. 125-135. In Artificial Intelligence and Civil Engineering. CIVIL-COMP Press, Edinburgh.

- Rib, H.T. and T. Liang. 1978. Recognition and Identification, pp. 74-80. In R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control, Transportation Special Report No 176. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- Rice, R.M., E.S. Corbett and R.G. Bailey. 1969. Soil slips related to vegetation, topography, and soils in southern California. *Water Resources Research* 5(3): 647-659.
- Rich, E. 1983. Artificial Intelligence. McGraw-Hill, New York. 176 p.
- Rogers, N.W. and M.J. Selby. 1980. Mechanisms of shallow translational landsliding during summer rainstorms : North Island, New Zealand. *Geografiska Annaler* 62A : 11-21.
- Romana, M.R. 1993. A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating, in comprehensive Rock Engineering. Pergamon Press. Vol. 3: 575-591.
- Sassa, K. 1985. The geotechnical classification of landslides. *Proceeding IVth International Conference and Field Workshop on Landslides*. Tokyo: 31-40.
- Schuster, R.L. 1978. Introduction, pp. 1-10. In R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control, Transportation Special Report No 176. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- Selby, M.J. 1967. Aspects of the geomorphology of the greywacke ranges bordering the lower and middle Waikato Basins. *Earth Science* 1: 37-58.
- Shyu, G.C. and R.D. Hryciw. 1991. SOLES: a knowledge-based soil liquefaction potential evaluation system. *American Society of Civil Engineers*: 403-412.
- Sidle, R.C., A.J. Pearce and C.L. O'Loughlin. 1985. Hillslope Stability and Land Use. American Geophysical Union Water Resources Monograph II, U.S.A. 20 p.
- Skempton, A.W. 1953. Soil mechanics in relation to geology. *Proceeding Yorkshire Geological Society* 29 (1): 33-62.

- Sowers, G.F. and D.L. Rayster. 1978. Field investigation, pp. 81–111. *In* R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control, Transportation Special Report No 176. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- Taylor, D.W. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York. 700 p.
- Terzaghi, K. 1950. Mechanisms of landslides. Geological Society of America, Berkeley Volume : 83–123.
- Terzaghi, K. and R.B. Peck. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York. 729 p.
- Terzaghi, K., R.B. Peck and G. Mesri. 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc., Singapore. 549 p.
- Toll, D.G., M. Moula, A. Oliver and N. Vaptimas. 1992. A knowledge-based system for interpreting site investigation information, pp. 607–614. *In* Proceeding of International Conference on Geotechnics and Computers. Paris.
- Toll, D.G. 1996. Artificial Intelligence Applications in Geotechnical Engineering. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, <http://geotech.civen.okstate.edu/ppr9608/index.htm>, January 15, 1998.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes, pp. 11–33. *In* R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control, Transportation Special Report No 176. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- Vaunat, L., S. Leroueil, L. Picarelli, J. Locat, H. Lee and R. Faure. 1996. Geotechnical characterization of slope movement, pp. 53–74. *In* Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.
- Walker, B.F. and R. Fell. 1987. Soil Slope Instability and Stabilisation. A.A. Balkema Publishers, Netherlands. 440 p.

Whitman, R.V. and W.A. Bailey. 1967. Use of computers for slope stability analysis. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions Vol. 93, SM4 : 475-498.

Wieland, M. 1989. Effects of Floods of November 18-23, 1988 in Southern Thailand on Highway Bridges and Large Dams. Swiss Disaster Relief Unit, Bangkok. 181p.

Wiesner, T.J. and R.J. Carr. 1987. Wharf Road foreshore redevelopment, Newcastle Harbour. pp. 431-436. In B.F. Walker and R. Fell (eds.). Soil slope instability and stabilisation. A.A. Balkema, Netherland.

Wislocki, A.P. and S.P. Bentley. 1989. An expert system for landslide hazard and risk assesment, pp. 249-252. In Proceeding 4th International Conference Artificial Intelligence Technique Applications. Edinburgh.

Wu, T.H., M.A. Abdel-Latif and G.F. Wieczorrek. 1996. Landslide hazard prediction, pp. 423-428. In Proceeding 7th International Symposium on Landslides. Trondheim.

สารบัญภาคผนวก

ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ KU-EXslope

- ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม KU-EXslope
- คู่มือการใช้งาน Expert System for Slope Stability analysis (KU-EXslope) ภายใต expert shell RAISON For Windows
- การจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน
- คุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว

ภาคผนวก ข. คู่มือประกอบการใช้งานโปรแกรม KUslope

- ประวัติความเป็นมาของโปรแกรม KUslope
- ข้อจำกัดของโปรแกรม KUslope
- ลักษณะทั่วไปของ KUslope
- ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม KUslope
- ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม KUslope

ภาคผนวก ค. ตำแหน่งของการพิบัติของลาดดินที่สำรวจในสนาม

- ตำแหน่งของกรณีพิบัติของลาดดินจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ง. แผนภูมิของกฎในฐานความรู้ KB1

- คำจำกัดความของผลการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

ภาคผนวก จ. แผนภูมิของกฎในฐานความรู้ KB2

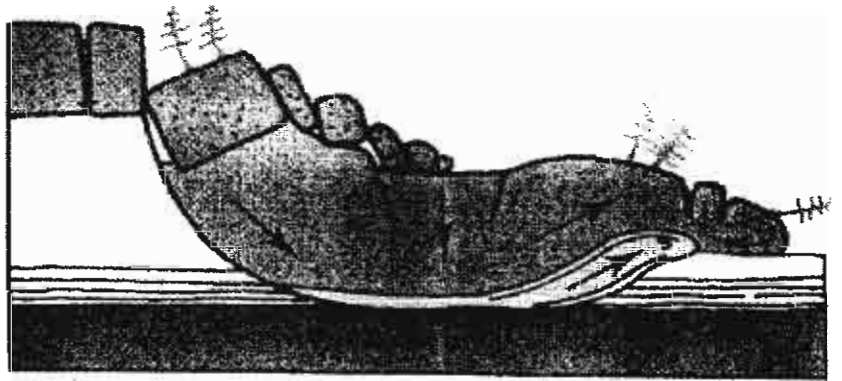
- คำจำกัดความของคำตอบในฐานความรู้ KB2 ของระบบ

ภาคผนวก ฉ. การจำแนกพื้นที่การปกครองตามความเข้มของแผ่นดินไหว

- การจัดแบ่งพื้นที่ตามความเข้มของแผ่นดินไหว

ภาคผนวก ช. แผ่น CD-ROM โปรแกรม KU-EXslope, KUslope และ RAISON

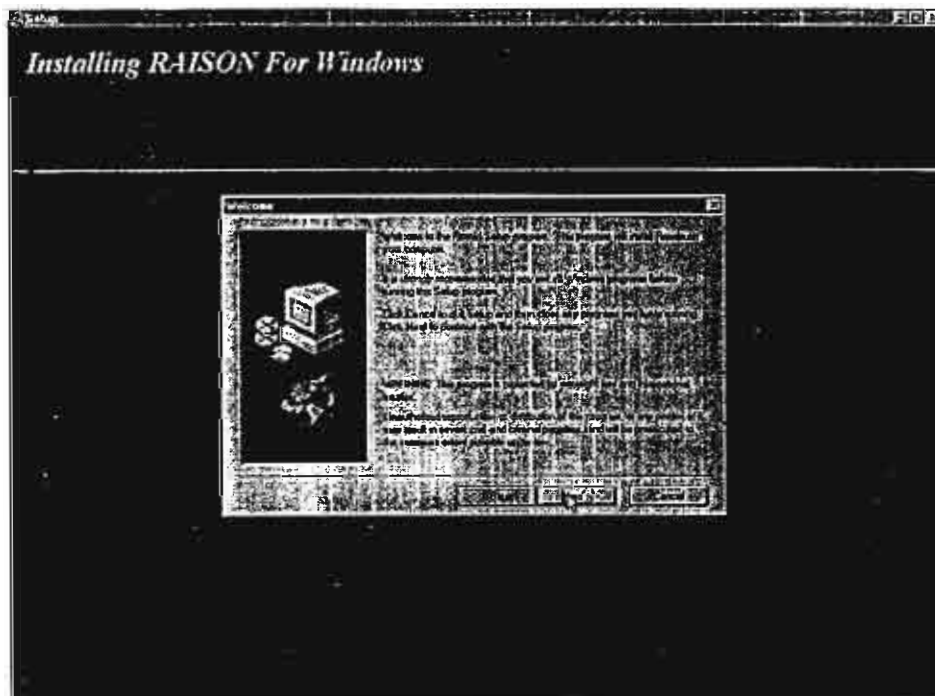
A
 B
 C
 D
 E
 F
 G
 H
 I
 J
 K



คู่มือการใช้งานโปรแกรมระบบ
 พิมพ์ด้วย *KU-EXslope*

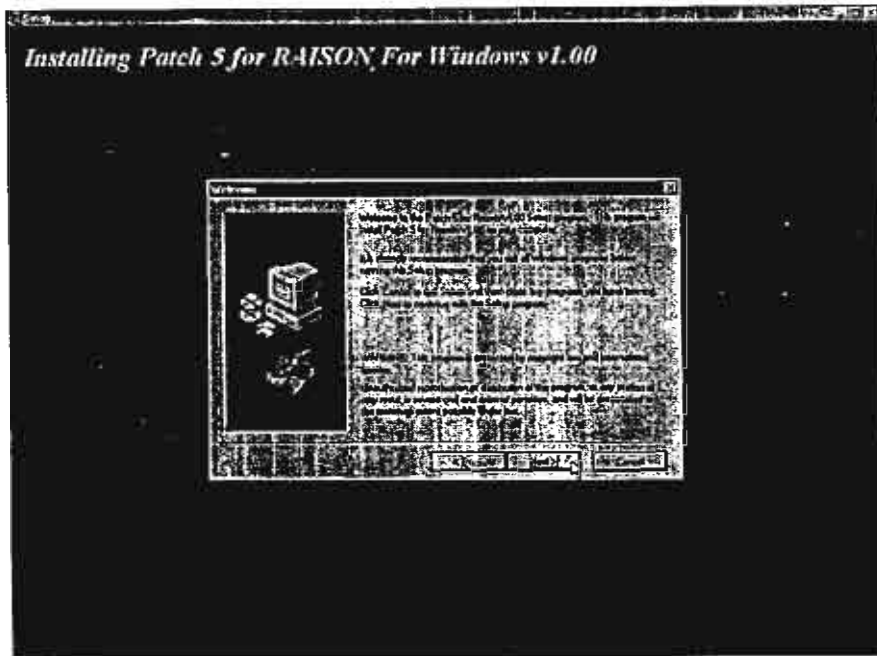
ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม KU-EXslope

1. เปิดโปรแกรม Windows Explorer ขึ้นมา
2. ที่ Drive CD-ROM เข้าไปที่ Directory ชื่อ Install RAISON
3. ดับเบิลคลิกที่ไฟล์ Setup.exe เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรม RAISON
4. กำหนด Directory ที่จะทำการติดตั้ง ให้อยู่ที่ C:/Rmwin
5. ทำตามขั้นตอนต่อมาจนเสร็จสิ้นขั้นตอนการ



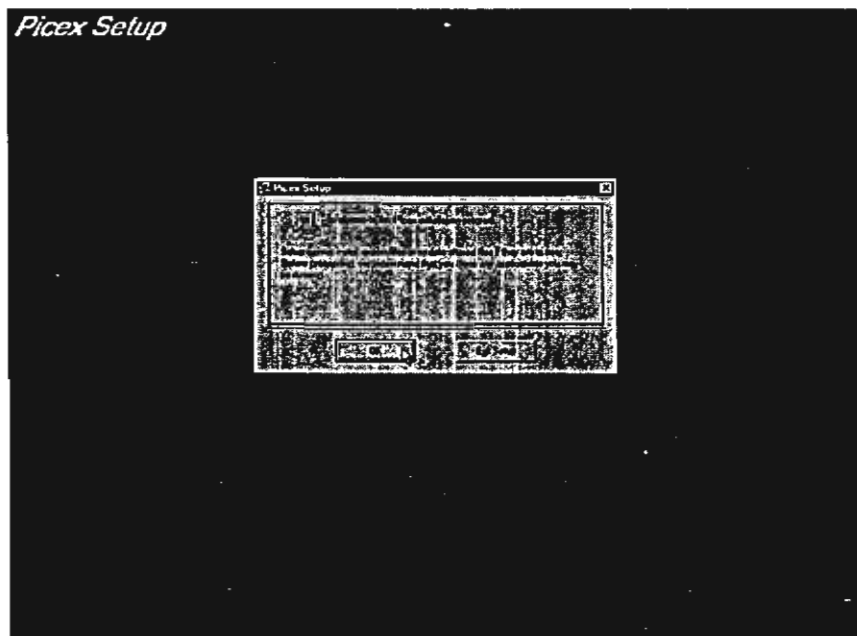
รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งโปรแกรม RAISON

6. ดับเบิลคลิกที่ไฟล์ Rw100p5.exe ใน Directory Install Raison เพื่อทำการ Upgrade โปรแกรม RAISON



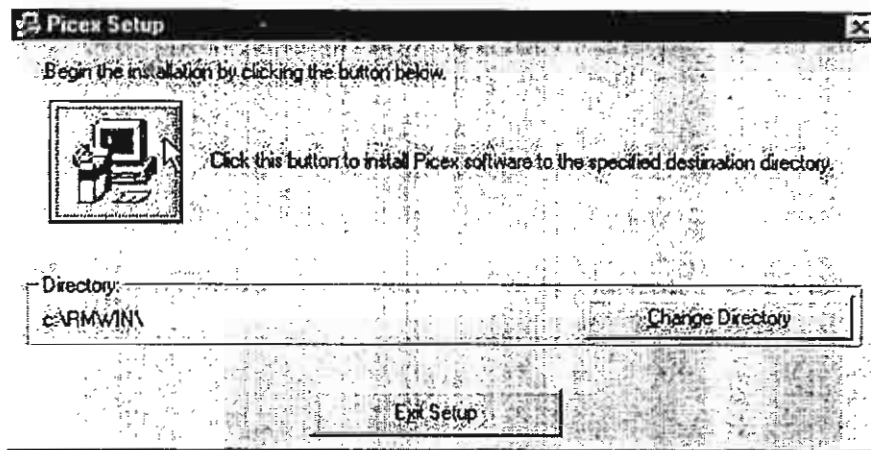
รูปที่ 2 Upgrade โปรแกรม RAISON

7. หลังจากทำการติดตั้งโปรแกรม Raison เรียบร้อยแล้ว ให้ไปที่ Drive CD-ROM เข้าไปที่ Directory ชื่อ PicExSetup
8. ดับเบิลคลิกที่ไฟล์ Setup.exe เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรม PicEx



รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งโปรแกรม PicEx

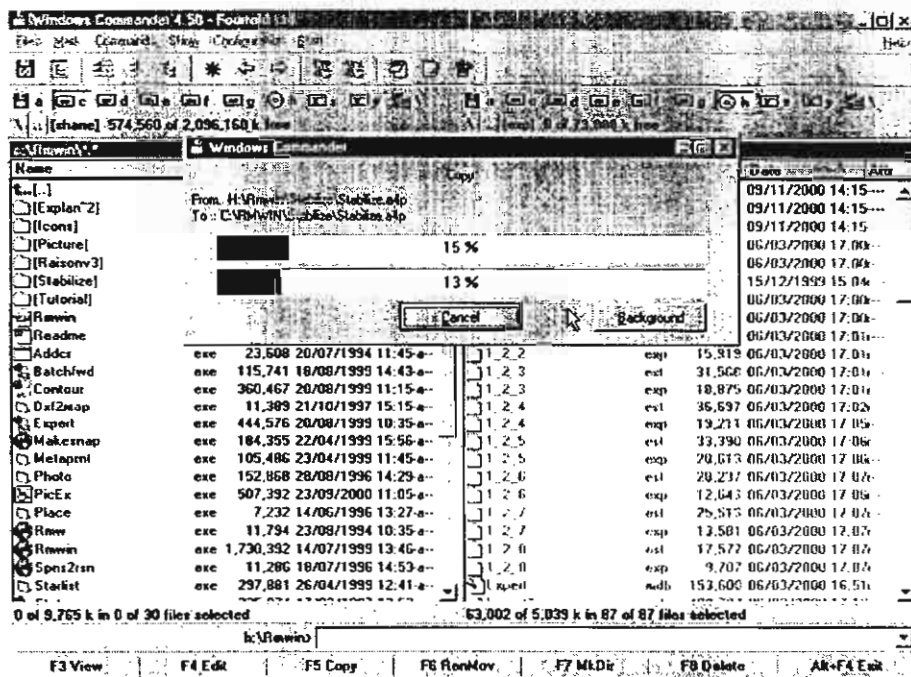
9. กำหนด Directory ที่จะทำการติดตั้ง ให้อยู่ที่ C:/Rmwin



รูปที่ 4 กำหนด Directory ของโปรแกรม PicEx ให้อยู่ที่ C:/Rmwin

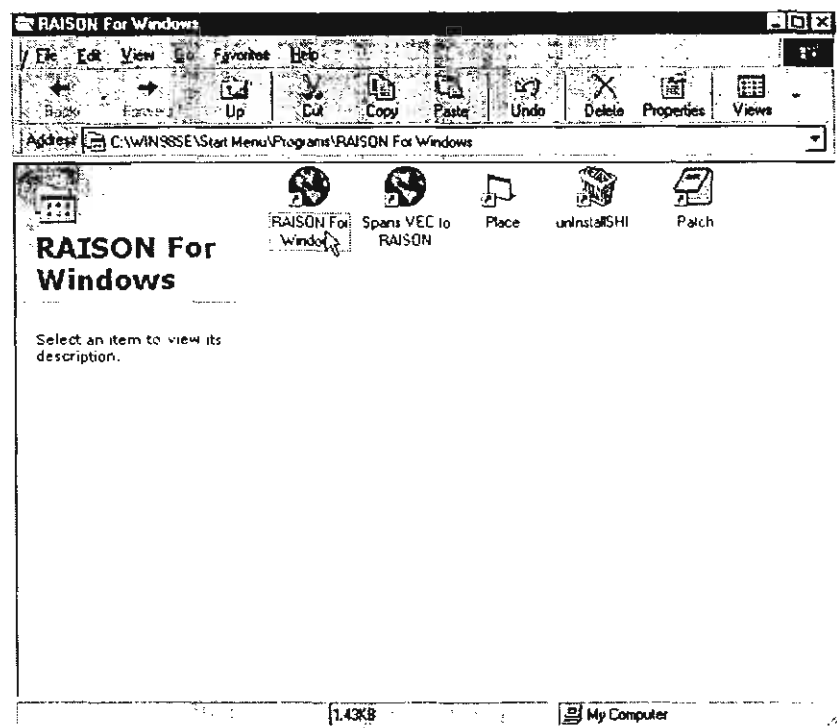
10. ทำตามขั้นตอนต่อมาจนเสร็จสิ้นขบวนการ

11. ทำการ Copy ไฟล์ต่างๆที่อยู่ใน Directory Rmwin จาก Drive CD-ROM ไปที่ C:/Rmwin



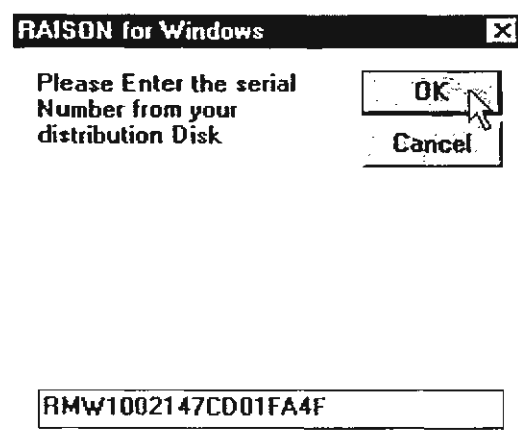
รูปที่ 5 Copy ไฟล์จาก Dive CD-ROM ไปที่ C:/Rmwin

12. เมื่อทำการติดตั้งโปรแกรมตามขั้นตอนดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการ Run โปรแกรม Raison จะปรากฏ Dialog ให้ป้อน Serial Number ขึ้นมา



รูปที่ 6 ดับเบิลคลิกที่ Icon RAISON For Windows เพื่อ Run โปรแกรม

13. ทำการป้อน Serial Number ต่อไปนี้ในช่องว่าง RMW1002147CD01FA4F
14. สำหรับวิธีการใช้งานโปรแกรม ให้ดูจากคู่มือการใช้งานโปรแกรม RAISON



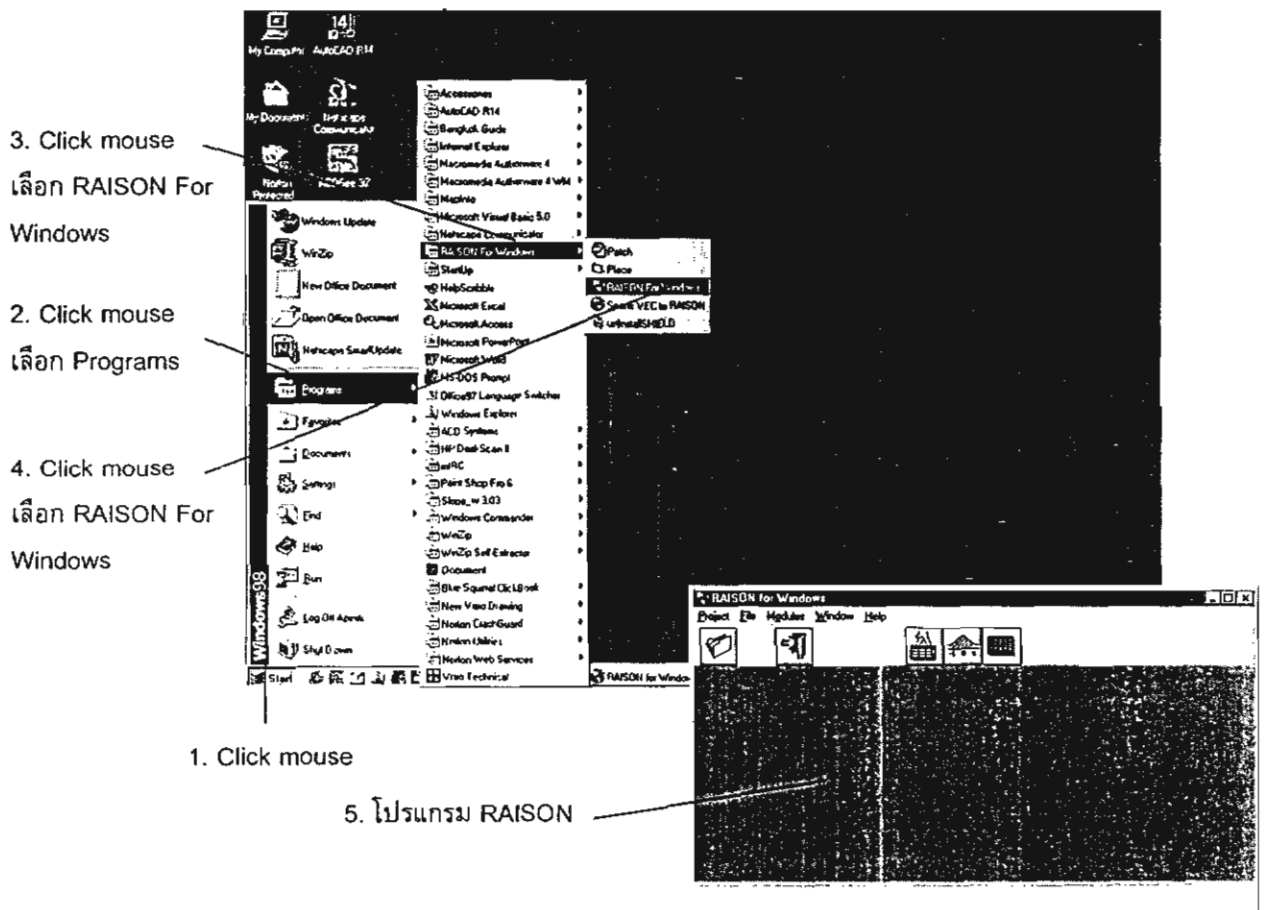
รูปที่ 7 ป้อน Serial Number ก่อนใช้งานโปรแกรม

คู่มือการใช้งาน Expert System for Slope stability analysis (KU-EXslope)

ภายใต้ expert shell RAISON For Windows

1. การเปิดโปรแกรม RAISON เพื่อเริ่มทำงาน

1. Click mouse ที่ปุ่ม *Start*
2. เลื่อน mouse ไปที่ *Programs* จะปรากฏเมนู
3. เลื่อน mouse ไปที่ *RAISON For Windows* จะปรากฏเมนูย่อย
4. Click mouse ที่ *RAISON For Windows*
5. จะปรากฏโปรแกรม RAISON บนหน้าจอแสดงดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปิดโปรแกรม RAISON

2. การเปิด Expert System ในส่วนของโปรแกรม RAISON เพื่อเริ่มใช้งาน

1. จากหน้าจอโปรแกรม RAISON Click mouse ที่ menu *Modules*
2. Click mouse ที่ Sub-menu *Expert System*
3. จะปรากฏโปรแกรมในส่วนของ Expert System
4. Click mouse ที่ *File*
5. Click mouse ที่ *open*

6. ปรากฏ Dialog Box *open*

7. เลือก File ที่ต้องการ

7.1 startup.exp - การจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

7.2 seismic.exp - คุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว

8. Click mouse ที่ *ok*

1. Click mouse ที่ **RAISON for Windows**

Modules

2. Click mouse ที่ **Database**

Expert Systems

3. ไปโปรแกรมส่วน **Expert System**

Expert System

4. Click mouse ที่ **File**

File

5. Click mouse ที่ **Open...**

Open...

Open an existing document

6. Dialog Box *Open*

7. เลือก File ที่ต้องการ

8. Click mouse ที่ **OK**

Tool Bar

Rules

Expert System - [STARTUP.EXP]

Rules	Model	Results
1	Homogeneous soil (P)	Homo-pi not equal
2	Homogeneous soil (P)	Homo-pi equal 0
3	Nonhomogeneous (str)	Nonhomo (Varies)
4	Stratified Soil	Stratified Soil
5		

Model [Results]

- Stratified Soil - { Stratified Soil }
- Homogeneous soil (Phi equal 0) - { Homo-pi
- Homogeneous soil (Phi more than 0) - { Hom
- Nonhomogeneous (strength varies with depth


Ready

NUM

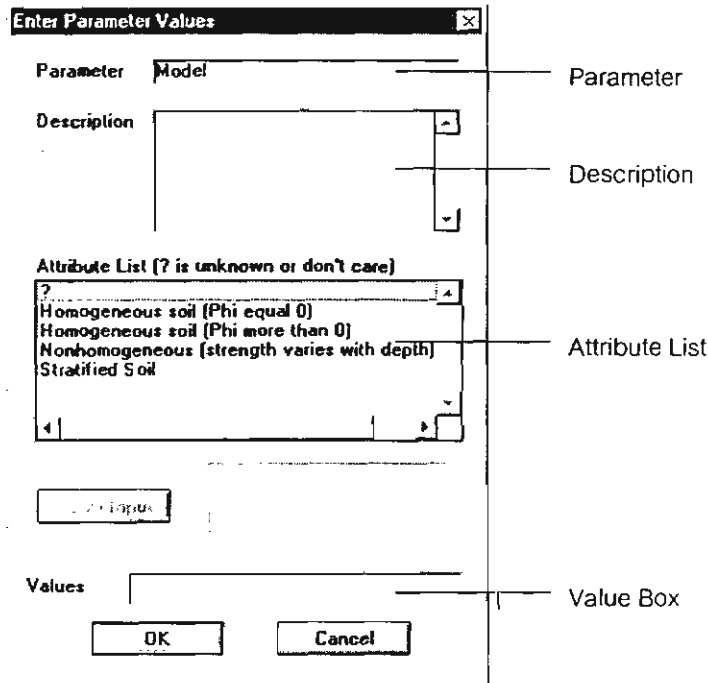
Tree decision

รูปที่ 2 การเปิดใช้งาน Expert System

2.1 การทำ Interactive Forward Chaining

1. Click mouse ที่ 

2. จะปรากฏ Dialog Box *Enter Parameter Values*



Parameter - เป็นตัวแปรที่ให้ผู้ใช้งานใส่ข้อมูล (ดูสรุปรายละเอียดในตารางที่ 1 และ 4)

Attribute List - เป็นตัวเลือกของข้อมูลที่ใช้ในการใส่ค่าสำหรับ Parameter ที่เป็น Discrete (ดูสรุปรายละเอียดในตารางที่ 2 และ 4)

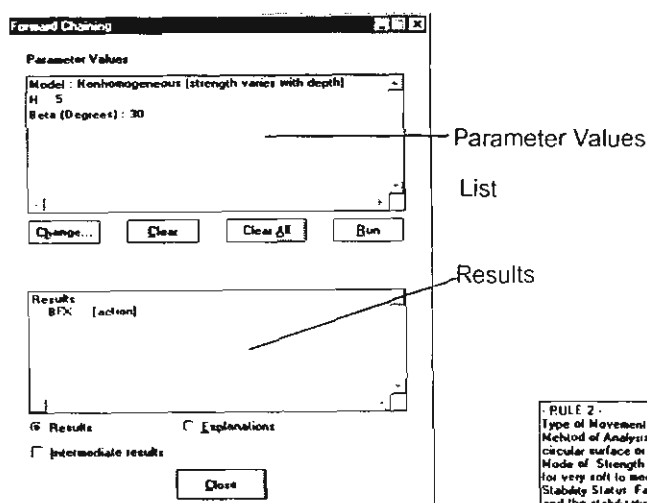
Values Box - ใช้สำหรับการกำหนดค่าให้ Parameter (ค่าเตือน ห้ามใส่ Input "?" จะทำให้การตัดสินใจผิดพลาด)

รูปที่ 3 Dialog Box *Enter Parameter Values*

3. Input ข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจ

- ถ้าข้อมูลเป็นแบบ Discrete ให้คลิกเลือกที่ Attribute list แล้วจะปรากฏค่าที่ Value Box แล้วคลิก <OK>
- ถ้าข้อมูลเป็นแบบ Continuous ให้พิมพ์ค่าที่ Values แล้วคลิก <OK>

4. ทำซ้ำในข้อ 3 จนกระทั่งปรากฏ Dialog Box *Forward chaining*



Parameter Values List - สรุปค่าของ Parameter ที่กำหนดขึ้น

Results - สรุปผลของการตัดสินใจ (ดูสรุปรายละเอียดในตารางที่ 3 และ 5)

Rule 2:
Type of Movement: Base rotational slide in Bangkok clay
Method of Analysis: for F.S.: Simplified Bishop method for circular surface or Felinus method.
Mode of Strength Analysis: Total strength analysis (Phi = 0)
for very soft to medium stiff clay
Stability Status: Failure will occur, slope should be stabilized and the stabilization program can also be used

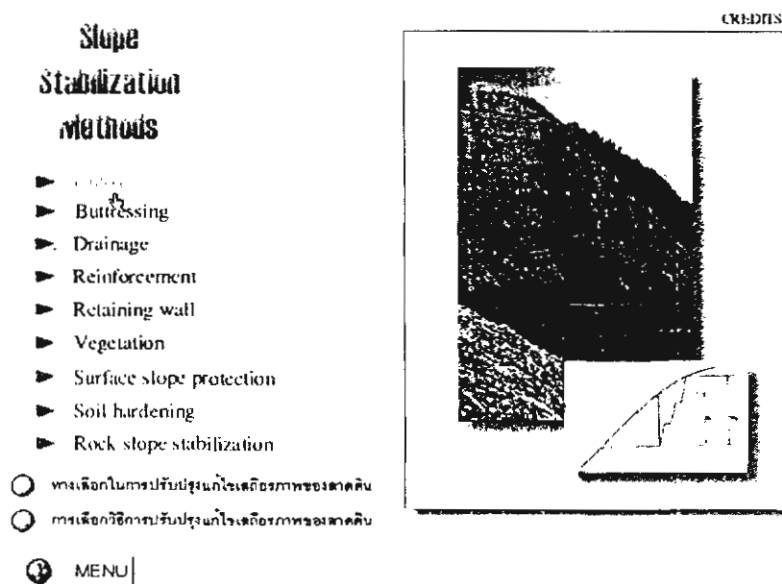
Explanations

5. ในกรณีที่ Results แสดงสัญลักษณ์ " [action] " ให้ทำการดับเบิลคลิกที่สัญลักษณ์ดังกล่าว โปรแกรมจะแสดงรูปที่เป็นตัวอย่างลักษณะการเคลื่อนพัง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปตัวอย่างการเคลื่อนพังที่เกิดในกรณีที่กำลังวิเคราะห์

6. ดับเบิลคลิกที่ รูป Slope Stabilization Methods จะปรากฏหน้าต่างแสดงวิธีและแนวทางในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของลาดดิน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วิธีและแนวทางในการแก้ไขปัญหเสถียรภาพของลาดดิน

3. การจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

ลักษณะชั้นดินถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท เพื่อสะดวกต่อการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน คือ

3.1 Homogeneous (strength constant with depth) เป็นชั้นดินเนื้อเดียวที่กำลังความแข็งแรงของดินคงที่ตามความลึก หรือมีอิทธิพลของแนวการเคลื่อนพังผ่านดินเพียงชั้นเดียว (ข้อเสนอนี้จะ เมื่อไม่มีการตรวจสอบแนวการเคลื่อนพัง กว่ความหนาของชั้นดินชั้นแรก(ค่า D) ควรมากกว่า 10 เท่าของความสูงของลาดดิน (H)) (ดูรูปที่ 4)

3.2 Non-homogeneous (strength varies with depth) เป็นชั้นดินที่กำลังความแข็งแรงสูงขึ้นตามความลึก และสอดคล้องกับสมการของการคำนวณค่ากำลังความแข็งแรงของ SHANSEP :

$$S_u = f(\sigma'_{vo})(O.C.R.)^m \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อ S_u = Undrained shear strength ($\phi = 0$)

σ'_{vo} = Effective overburden pressure

O.C.R = Over consolidation ratio

ค่าของ f ประมาณ 0.22 – 0.26

ค่าของ m ประมาณ 0.8 ถึง 0.9

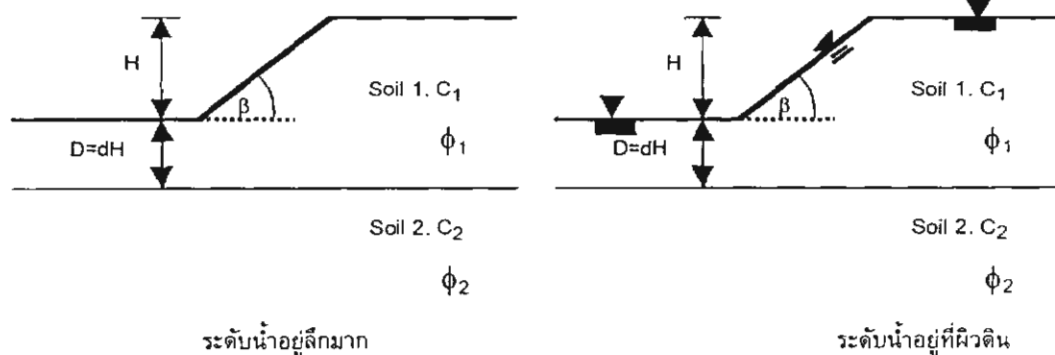
3.3 Stratified Soil การเคลื่อนพังที่มีอิทธิพลของแนวการเคลื่อนพังผ่านแนวผ่านชั้นดินตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า Parameter และ attribute list ต่างๆที่ใช้จำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดินได้มีดังตารางที่ 1 และ 2 โดยผลของการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดินสามารถแบ่งออกได้เป็นตารางที่ 3 โดยกำหนดให้

F.S. < 1.00 คือ ระดับไม่เสถียรภาพ (Failure, F)

$1.00 \leq F.S. < 2.50$ คือ ระดับเสถียรภาพมีความเสี่ยง ควรมีการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope stability analysis, A)

F.S. ≥ 2.50 คือ ระดับเสถียรภาพสูง (Stable หรือ Unfailure, U)



รูปที่ 4 รูปแบบของลาดดินที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับสร้างกฎ

ตารางที่ 1 Parameter ของการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

Parameter	คำอธิบาย	หมายเหตุ
Model	ลักษณะชั้นดิน	รูปที่ 4 ประกอบ
Phi (Degrees)	มุมเสียดทานภายในเม็ดดิน (Angle of internal friction, ϕ), องศา	
Cohesion (TSM)	ค่ายึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (C), ดันต่อตารางเมตร	
Beta (Degrees)	มุมชันของลาด (Slope angle, β), องศา	
Hw	ระดับน้ำใต้ดิน (Ground water height, Hw)	
H	ความสูงของลาด (Slope height, H), ม.	
Soil profile	จำนวนชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์	
Upper parameter	คุณสมบัติของดินชั้นบน	
Lower soil	คุณสมบัติของดินชั้นที่สอง	
D (m)	ความหนาของดินชั้นบนนับจากเชิงของลาด, ม.	

ตารางที่ 2 Attribute list / Range ของ Parameter การจำแนกรูปแบบการเคลื่อนพัง และระดับเสถียรภาพของลาดดิน

Parameter	Attribute list	Range	Description
Model	Homogeneous (strength constant with depth) Phi equal 0	-	ดูคำอธิบายข้อ 3.1 โดยที่ดินมีค่า ϕ เท่ากับ 0 เป็นกลุ่มดินซึ่งถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็น กลุ่ม CH, CL, และ MH ที่มีสภาพ Consistency เป็นดินอ่อนถึงแข็งปานกลาง วิธีวิเคราะห์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรง คือ Total strength analysis ($\phi = 0$)
	Homogeneous (strength constant with depth) Phi more than 0	-	ดูคำอธิบายข้อ 3.1 โดยยกเว้นกรณีของ Homogeneous (strength constant with depth) Phi equal 0
	Non-homogeneous (strength varies with depth)	-	ดูคำอธิบายข้อ 3.2
	Stratified Soil	-	ดูคำอธิบายข้อ 3.3
Phi (Degrees)	-	0-90	ค่ายึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (ϕ), องศา
Cohesion (TSM)	-	0-4	และมุมเสียดทานภายในเม็ดดิน (Angle of internal friction, ϕ), ดันต่อตารางเมตร
Beta (Degrees)	-	0-90	มุมชันของลาด (Slope angle, β),
Hw	0	-	ระดับน้ำที่ผิวดิน
	Infinity	-	และระดับน้ำอยู่ลึกมาก

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Parameter	Attribute list	Range	Description
H	-	0-30	ความสูงของลาด (Slope height, H)
Soil profile	two soil layers	-	จำนวนชั้นดินที่ใช้ในการพิจารณาเท่ากับ 2 ชั้น
	more than two soil layers	-	จำนวนชั้นดินที่ใช้ในการพิจารณามากกว่า 2 ชั้น
Upper parameter	Phi(1) is zero	-	ดินชั้นบนมีค่า ϕ ใกล้เคียงศูนย์ เป็นกลุ่มดิน ซึ่งถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็น กลุ่ม CH, CL, และ MH ที่มีสภาพ Consistency เป็นดิน อ่อนถึงแข็งปานกลาง วิธีวิเคราะห์ในการ ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรง คือ Total strength analysis ($\phi = 0$)
	C(1) is zero	-	ดินชั้นบนมีค่า c ใกล้เคียงศูนย์ ($c < 0.05 \text{ t/m}^2$) เป็นกลุ่มดินซึ่งถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็นกลุ่ม SP, SW, GP, และ GW และกลุ่ม ML, SP-SM, SW-SM, GP-SM, GW-GM, SM, GM ที่มีสภาพ Plasticity เป็น Nonplastic soil วิธีวิเคราะห์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรง คือ Effective strength analysis
	C(1) and Phi(1) is not zero	-	ดินชั้นบนมีค่า ϕ และ C ไม่ใกล้เคียงศูนย์ ($c \geq 0.05 \text{ t/m}^2$)
Lower soil	firm strata	-	ดินชั้นที่สองแข็งแรงกว่าดินชั้นแรกและแข็งแรงมาก
	weaker strata	-	ดินชั้นที่สองแข็งแรงน้อยกว่าดินชั้นแรก
D (m)	-	-	ความหนาของชั้นดินชั้นแรกนับจากเชิงของลาด

4. คุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว

ระบบผู้เชี่ยวชาญจะจำแนกโดยใช้จังหวัดและอำเภอ เป็น Parameter และ attribute list ที่ใช้ในการหาความเข้มของแผ่นดินไหวและคุณสมบัติของดินโดยประมาณดังตารางที่ 4 ซึ่งผลของความเข้มของแผ่นดินไหวจะแสดงตามมาตรฐาน Modified mercalli scale อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว (Coefficient of earthquake, A) และแบ่งคุณสมบัติของดินโดยประมาณออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- 4.1 กลุ่มพื้นที่ในที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง จะถูกแนะนำว่าเป็นพื้นที่ที่มีช่วงดินชั้นบนเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) หรือ Marine soft clay หรือ Soft clay ซึ่งมีค่ากำลังความแข็งแรงของดินเหนียวดังกล่าวแปรเปลี่ยนตามความลึก และมีสมการการคำนวณค่ากำลังความแข็งแรงของดินเหนียวตามสมการของ SHANSEP (สมการที่ 1)

4.2 กลุ่มพื้นที่ในส่วนอื่น จะแนะนำช่วงของค่า Strength parameter คือ ค่า cohesion (c) กับค่า Angle of internal friction (ϕ) ของดินแต่ละประเภทซึ่งถูกจำแนกตามระบบ USCS โดยดูได้จาก Soil chart ดังแสดงในรูปที่ 5,6, และ 7

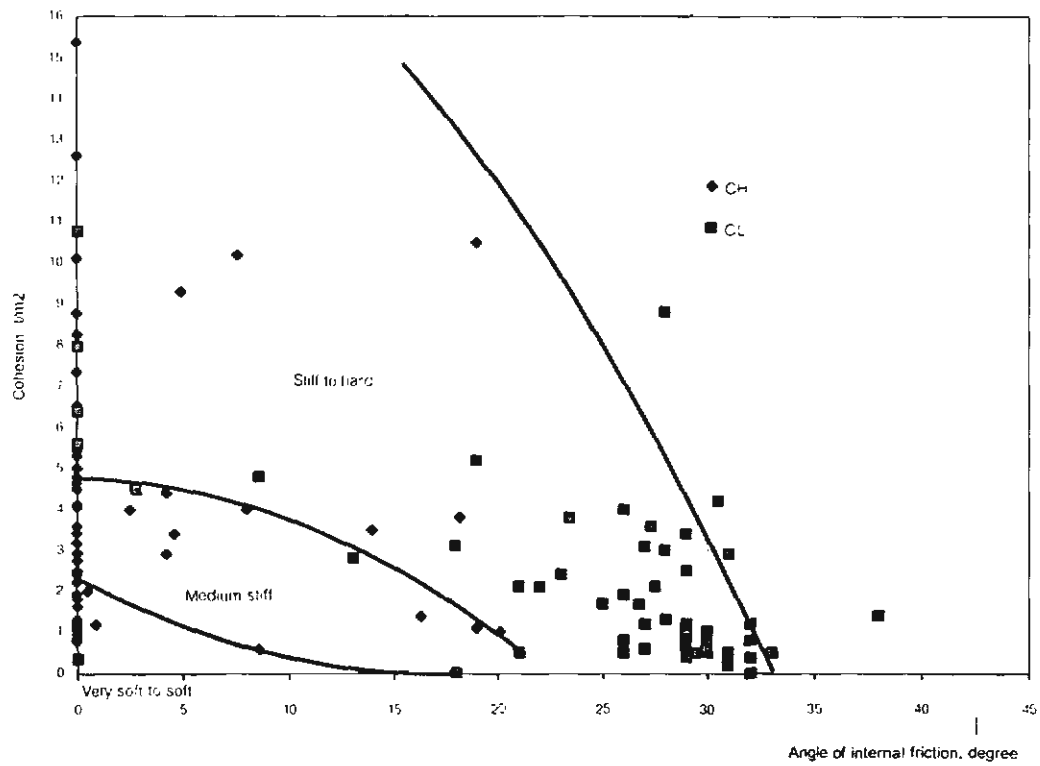
ผลคุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหวที่ถูกแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 Parameter ของคุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว

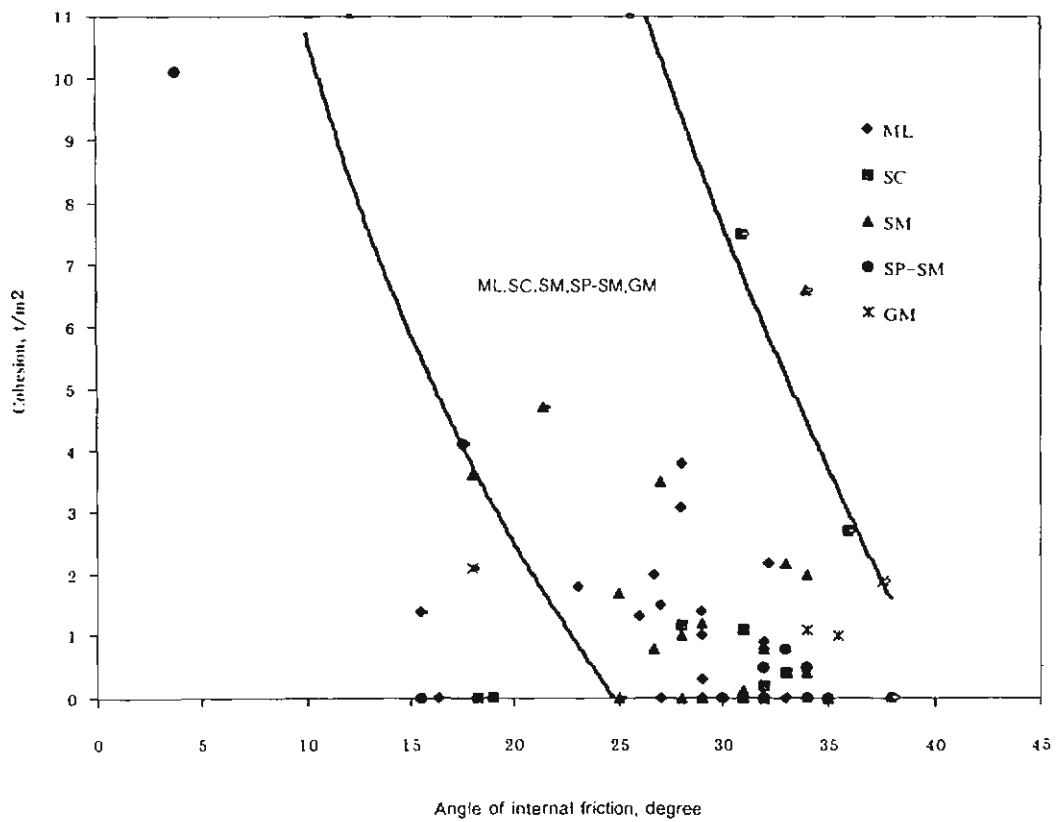
Parameter	คำอธิบาย	Attribute list
Part	ภาค	Central, Eastern, Northern, Northeastern ,Southern
Province	จังหวัด	ชื่อจังหวัดในประเทศไทย
Amphor	อำเภอ	ชื่ออำเภอในแต่ละจังหวัด

ตารางที่ 5 Result ของคุณสมบัติของดินโดยประมาณและความเข้มของแผ่นดินไหว

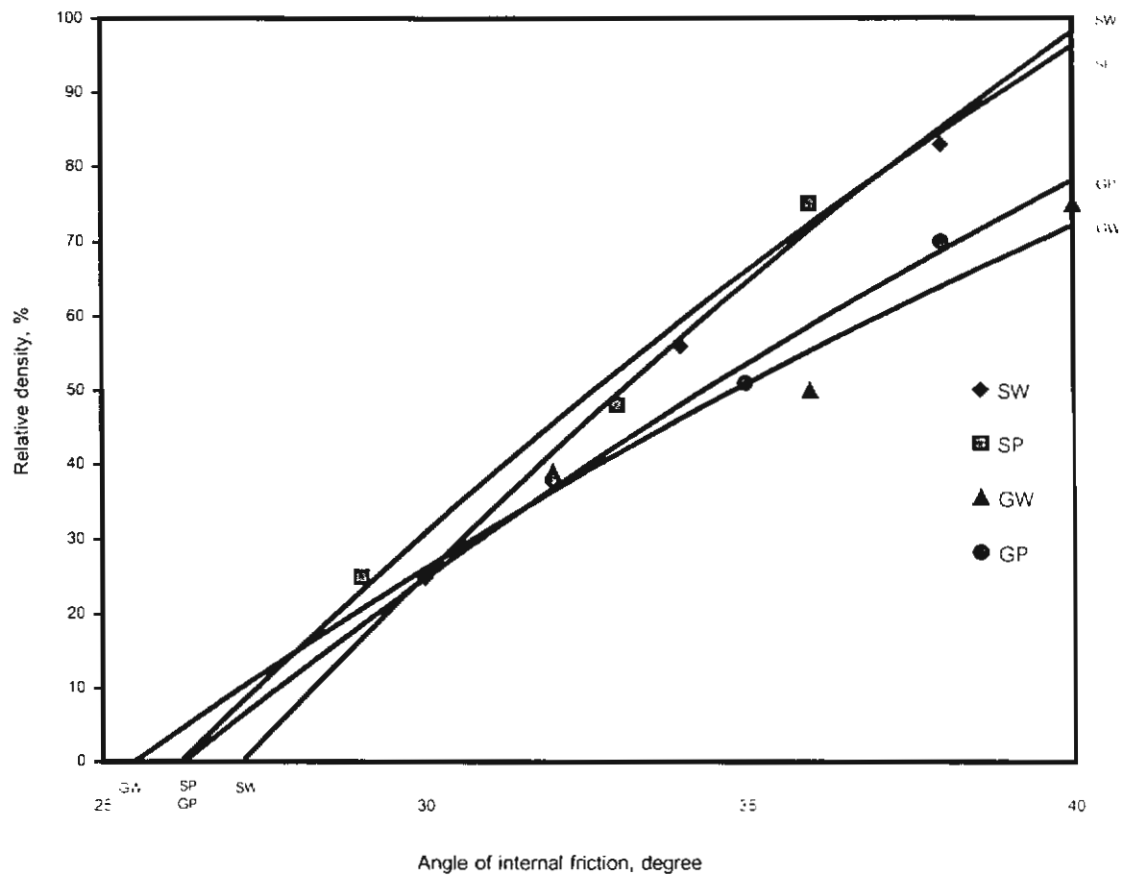
Result	คำอธิบาย
See Soil Chart/ A = 0.000 g to 0.010 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 5, 6 และ 7 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.000 – 0.010 g
See Soil Chart/ A = 0.010 g to 0.025 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 5, 6 และ 7 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.010 – 0.025 g
See Soil Chart/ A = 0.025 g to 0.050 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 5, 6 และ 7 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.025 – 0.050 g
See Soil Chart/ A = 0.050 g to 0.100 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 5, 6 และ 7 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.050 – 0.100 g
BKKG/ A = 0.000 g to 0.010 g	คุณสมบัติของดินดูคำอธิบายข้อ 4.1 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.000 – 0.010 g
BKKG/ A = 0.010 g to 0.025 g	คุณสมบัติของดินดูคำอธิบายข้อ 4.1 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.010 – 0.025 g
BKKG/ A = 0.025 g to 0.050 g	คุณสมบัติของดินดูคำอธิบายข้อ 4.1 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.025 – 0.050 g
BKKG/ A = 0.050 g to 0.100 g	คุณสมบัติของดินดูคำอธิบายข้อ 4.1 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.050 – 0.100 g



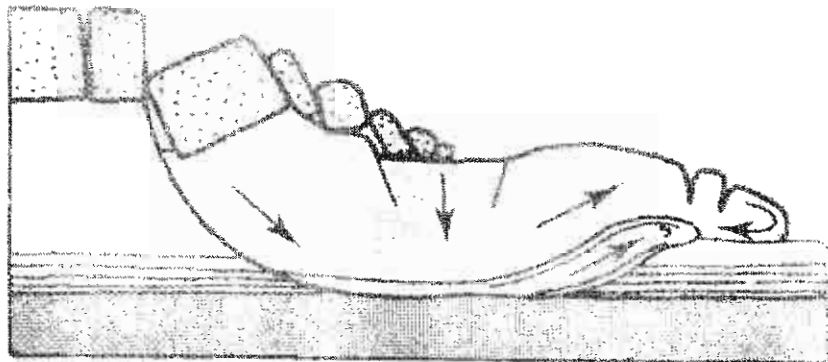
รูปที่ 5 Soil Chart (Soil properties of fine grained soil)



รูปที่ 6 Soil Chart (Soil properties of coarse grained soil)



รูปที่ 7 Soil Chart (Soil properties of cohesionless soil)



**คู่มือการใช้งานของโปรแกรม
วิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน**

KUslope

คู่มือประกอบการใช้งานโปรแกรม KUslope

ลักษณะและความสามารถโดยทั่วไปของโปรแกรม KUslope

1. การวิเคราะห์หอยุ่บนพื้นฐานของลักษณะผิวการเคลื่อนพัง เป็นส่วนโค้งของวงกลม
2. สามารถกำหนดชั้นดินที่แตกต่างกันได้หลายชั้น (Multi-layered soil)
3. สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของความดันน้ำ ได้ โดยกำหนดให้อยู่ในรูปของ Pore Water Pressure Ratio(r_u) และ Phreatic Surface
4. มีความยืดหยุ่นในการควบคุมรัศมี และจำนวนวงกลมที่คาดว่าจะพิบัติ
5. สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากแผ่นดินไหวในแนวราบได้ (Horizontal seismic coefficient) โดยใช้หลักการของ Pseudo-static
6. ใช้ได้ทั้งทฤษฎีของ Fellenius และ Simplified Bishop ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ
7. สามารถหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้โดยวิธีกำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลมเพียงจุดเดียว แล้วให้คอมพิวเตอร์ค้นหาโดยอัตโนมัติ หรือให้การค้นหาโดยการกำหนดให้อยู่ในรูปกริด หรือโดยการกำหนดจุดศูนย์กลางและรัศมี
8. สามารถวิเคราะห์ผลจาก Tension crack ได้
9. มี User Interface ที่ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน
10. สามารถใช้งานได้บนหลายๆ Platform เช่น Windows 95, Windows 98, WinNT ,Windows 2000

Hardware Requirement

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ IBM compatible 486 หรือสูงกวานั้น (แนะนำให้ใช้ CPU ระดับ Pentium 100 ขึ้นไป)
 2. หน่วยความจำไม่ควรต่ำกว่า 16 MB
 3. เนื้อที่ว่างสำหรับติดตั้งโปรแกรมใน Harddisk ประมาณ 2 MB
 4. การ์ดแสดงผล VGA หรือสูงกวานั้น (ความละเอียดไม่ควรต่ำกว่า 800*600)
 5. Drive CD-ROM หรือ Disk Drive สำหรับติดตั้งโปรแกรม
 6. Mouse, Monitor, Printer etc.
-

ประวัติความเป็นมาของโปรแกรม KUslope

การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน(KUslope)ได้พัฒนา โดยมีพื้นฐานมาจากโปรแกรม REAME (Rotational Equilibrium Analysis of Multilayered Embankments Embankments) ของ Huang (1957) ซึ่งจากโปรแกรม REAME มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้มีการพัฒนาโปรแกรมต่อมา เป็นช่วงระยะเวลา ดังนี้

- พ.ศ. 2530 ดร.วรการ ร่วมกับ คุณสมพร อุ่นจิตติกุล เขียนโปรแกรม ชื่อ RE ซึ่งเขียนด้วย Interpreted Basic จากพื้นฐานเดิมของโปรแกรม REAME มหาวิทยาลัย Kentucky สหรัฐอเมริกา
- พ.ศ. 2531-2532 ดร.วรการ ได้พัฒนาต่อบน Complied Basic เป็น RE1-RE3
- พ.ศ. 2533 คุณสุเทพ ทำการพัฒนาบนภาษา Pascal โดยปรับปรุงเรื่องการแสดงผล และความเร็ว ในการคำนวณ ใช้ชื่อโปรแกรมว่า RE4
- พ.ศ. 2535 คุณสามารถ ได้พัฒนาโปรแกรมบนภาษา C เป็น RE5 ซึ่งมีความสามารถเพิ่มขึ้นใน หลายส่วน อาทิเช่น สามารถบันทึกข้อมูลแล้วนำกลับมาแก้ไขได้ เพิ่มความเร็วในการวิเคราะห์ แต่โปรแกรม RE5 ก็ยังมีข้อผิดพลาดอยู่ เช่น Failure surface ตัดกับส่วนที่เป็นน้ำในลักษณะผิว โค้ง ไม่สามารถคำนวณในกรณีที่มีเส้นผิวน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง การที่ไม่สามารถหาค่าอัตราส่วน ปลอดภัยโดยการกำหนดจุดศูนย์กลางและรัศมี เป็นต้น
- พ.ศ. 2541-2543 คุณจุลิศ จิตเจริญ ทำการพัฒนาต่อจาก RE5 โดยเปลี่ยน Platform จากที่ใช้ งานบน Dos ซึ่งยากและไม่สะดวกต่อการใช้งาน ให้มาอยู่บน Windows ที่ง่ายต่อการใช้งานมาก กว่าและได้แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เคยมี อาทิเช่น สามารถคำนวณในกรณีที่มีเส้นผิวน้ำเข้ามา เกี่ยวข้อง สามารถหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยการกำหนดจุดศูนย์กลางและรัศมี แก้ไข Failure surface ให้เป็นเส้นตรงเมื่อตัดกับส่วนที่เป็นน้ำ สามารถวิเคราะห์ผลจาก Tension Crack ได้ ฯลฯ ซึ่งในปัจจุบันก็ได้ดำเนินการพัฒนาโปรแกรมไปด้วยอย่างต่อเนื่อง

ข้อจำกัดของโปรแกรม KUslope

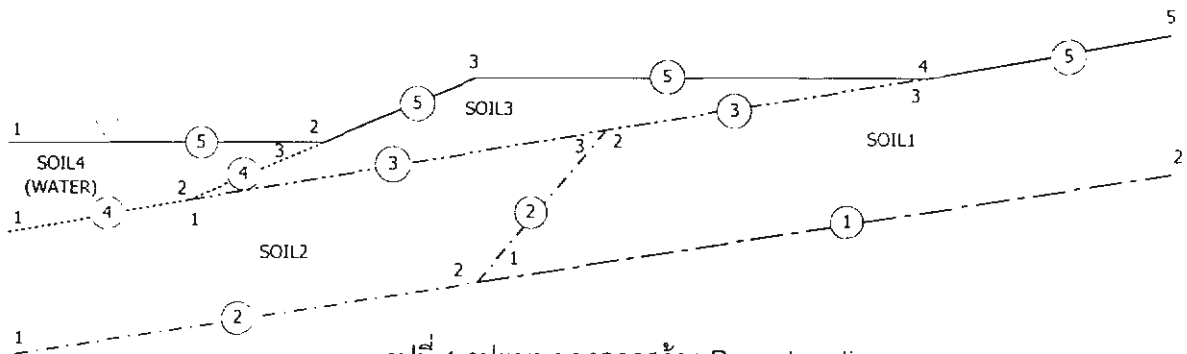
1. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มี Boundary Line ไม่เกิน 37 เส้น หรือเท่ากับ 36 ชั้นดิน
 2. จำนวน Node ในแต่ละ Boundary Line มีได้ไม่เกิน 50 Node
 3. สามารถกำหนดจำนวน Slice ได้ไม่เกิน 40 Slices
 4. สามารถมี Bottom Line ได้ไม่เกิน 10 เส้น
 5. เส้น Phreatic Line สามารถมีจำนวน Node ได้ไม่เกิน 20 Node
 6. ในแต่ละจุดศูนย์กลาง สามารถมี Trial Radius ได้ไม่เกิน 90 วง
-

ลักษณะทั่วไปของ KUslope (General Features of KUslope)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของโปรแกรม ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณและยังทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ถูกต้องอีกด้วย

การกำหนดชั้นดิน (Numbering of Soil Boundaries)

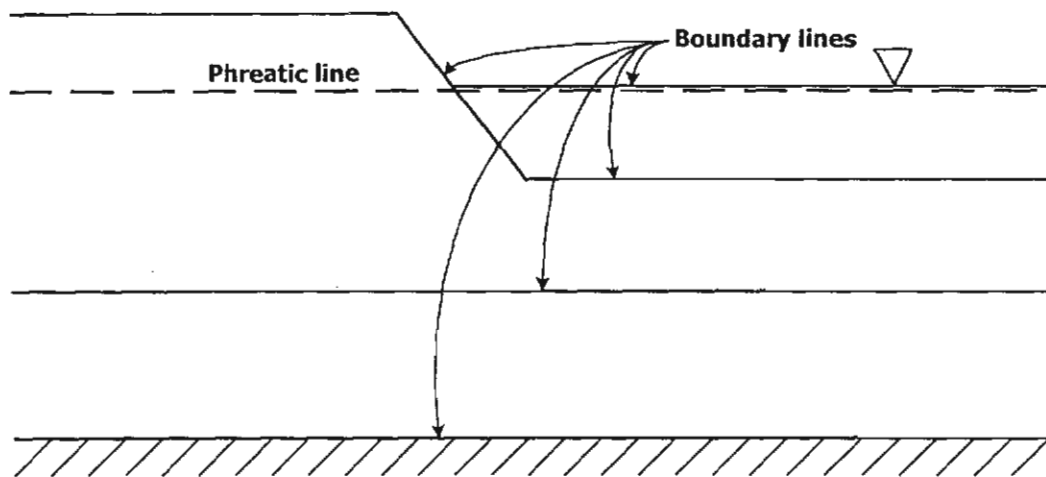
เส้น boundary line จะประกอบด้วยส่วนของเส้นตรงส่วนหนึ่งหรือหลายๆส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งดินออกเป็น 2 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยเส้น boundary line จะถูกกำหนดจากล่างไปบนตามลำดับ เส้น boundary line ที่อยู่ล่างสุดจะเรียกว่า bottom line หรือ rock line ซึ่งจะถูกกำหนดโดยชั้นหินแข็ง หรือชั้นที่เป็นดินค่อนข้างแข็ง (rock or stiff stratum) ซึ่งอยู่ด้านล่างของลาดดิน ส่วนเส้น boundary line เส้นบนสุดจะเรียกว่า ground line และถูกกำหนดโดยผิวดิน (ground surface) รวมถึงผิวน้ำด้วยถ้าเป็นกรณีที่มีน้ำเกี่ยวข้องกับอยู่ด้วย ดินที่อยู่เหนือเส้น boundary line ใดๆ จะเป็นดินชนิดเดียวกับหมายเลขเส้น boundary line นั้นๆ ดังนั้นจำนวนชนิดของดินทั้งหมดจะน้อยกว่าจำนวนเส้น boundary line อยู่ 1 เสมอ



รูปที่ 1 รูปแบบของการสร้าง Boundary line

รูปที่ 1 แสดงรูปตัดของลาดดิน ซึ่งประกอบด้วยดิน 4 ชนิด (ชนิดที่ 4 เป็นน้ำ) และมีเส้น boundary line จำนวน 5 เส้น จากกฎข้างต้นกำหนดไว้ให้เส้น boundary line ที่มีหมายเลขต่ำกว่าต้องอยู่ใต้เส้น boundary line ที่มีหมายเลขสูงกว่าเสมอ ในส่วนที่เป็นน้ำให้พิจารณาเหมือนกับเป็นดินชนิดหนึ่งโดยมีค่า cohesion และ friction angle เท่ากับ 0 และมี unit weight เท่ากับ 1 t/m^3 (หน่วย CGS) หรือ 66.4 kN/m^3 (หน่วย SI)

เส้น boundary line แต่ละเส้นจะถูกกำหนดด้วยจุด โดยกำหนดจุดเป็นหมายเลขตามลำดับจากซ้ายไปขวา ถ้าเส้น boundary line 2 เส้นตัดกันที่ตรงจุดตัดจะต้องมี 2 หมายเลข โดยเป็นของแต่ละเส้น boundary line ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ที่จุดที่ 1 บนเส้น boundary line #1 ก็เป็นจุดที่ 2 บนเส้น boundary line #2 ด้วย เช่นเดียวกันกับจุดที่ 3 บนเส้น #4 ก็เป็นจุดที่ 2 บนเส้น #5 ด้วย และเพื่อให้วงกลมที่เป็นไปได้ถูก run จำเป็นต้องขยายจุดปลายของเส้น boundary line เส้นล่างสุด และเส้น



รูปที่ 3 การกำหนดเส้น Phreatic line

การควบคุมรัศมี (Control of Radius)

ส่วนของวงกลมแทนผิวที่มีรัศมีมากที่สุด (Maximum radius) ถูกกำหนดโดยตำแหน่งของเส้น rock line หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า bottom line ส่วนวงกลมวงที่มีรัศมีน้อยที่สุด (Minimum radius) ก็ได้จากเส้น ground line โดยที่ช่วงระหว่างรัศมีมากที่สุดและน้อยที่สุดนี้ จะมีจำนวนวงกลมตัดผ่านเท่ากับค่าของ No. of circles ที่ถูกกำหนด

เนื่องจากเส้น boundary line เส้นสุดท้ายก็คือเส้น ground line ซึ่งทุกๆ ส่วนของเส้น ground line จะถูกใช้เพื่อกำหนดรัศมีน้อยที่สุด แต่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องระบุหมายเลขเส้น และหมายเลขจุดบนเส้น เพื่อที่จะใช้หาค่ารัศมีน้อยที่สุด ซึ่งตรงกันข้ามกับการหาค่ารัศมีมากที่สุด ที่จำเป็นต้องระบุตำแหน่งของเส้น rock line

พิจารณาตัวอย่าง ในรูปที่ 1 จะได้ว่า

No. of bottom line = 2

สำหรับเส้นแรก Line No. = 1

beginning point number = 1

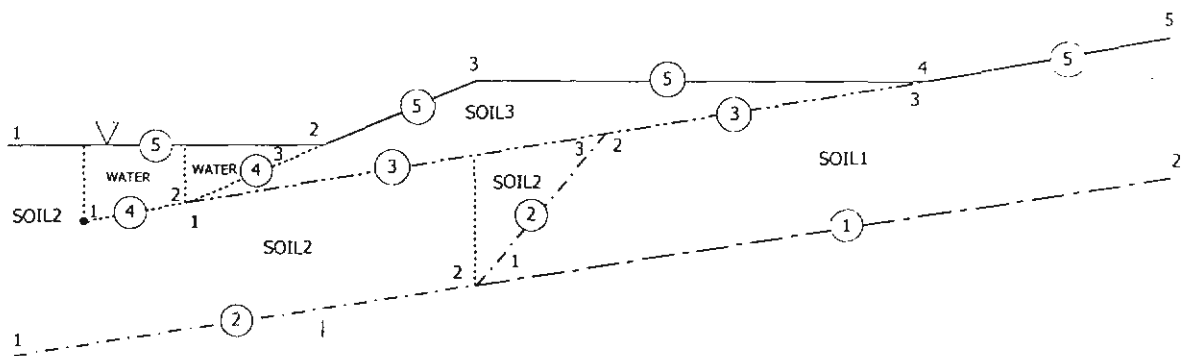
ending point number = 2

สำหรับเส้นที่ 2 Line No. = 2

beginning point number = 1

ending point number = 2 เป็นต้น

บนสุดออกไปให้มากที่สุด ในรูปที่ 1 นี้คือจุดที่ 2 บนเส้น #1, จุดที่ 1 บนเส้น #2 และจุดที่ 1, 5 บนเส้น #5 ถึงแม้ว่า เส้น boundary line เส้นอื่นๆจะมีความยาวสิ้นสุดที่ตรงไหนก็ได้ แต่ก็ควรตระหนักว่า เส้น boundary line เป็นเส้นที่แบ่งดินออกเป็น 2 ชนิด ในกรณีที่เส้น boundary line สิ้นเกินไป ดินที่อยู่เหนือเส้นนั้น เฉพาะภายในบริเวณเส้นดัง 2 เส้นที่ลากผ่านจุดปลายทั้ง 2 เท่านั้น ที่จะเป็นชนิดเดียวกับหมายเลขเส้น boundary line นั้น ส่วนดินที่อยู่ด้านนอกเส้นดัง 2 เส้นนี้ จะเป็นดินคนละชนิดกันซึ่งถูกกำหนดด้วยเส้น boundary line ที่อยู่ข้างใต้ เช่น ถ้าจุดที่ 1 บนเส้น #4 ไม่ได้ถูกขยายออกไปให้ยาวพอ ส่วนของน้ำจะถูกพิจารณาว่าเป็นดิน #2 แทนดิน #4 ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างปัญหาที่เกิดจากการกำหนดความยาวของ Boundary line สิ้นเกินไป

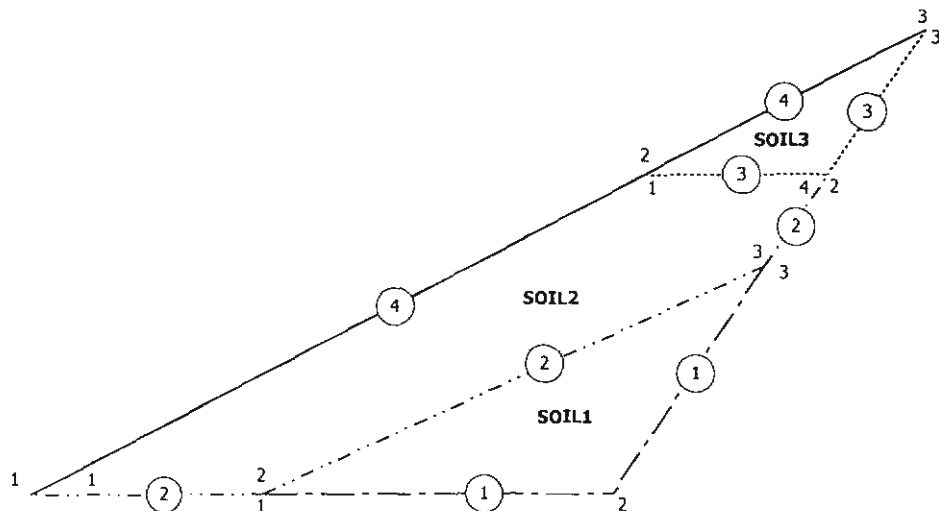
การระบุสภาพการซึมน้ำ (Seepage specification)

เงื่อนไขการซึมน้ำ (Seepage Condition) มี 3 ลักษณะ คือ

1. ไม่มีการซึมน้ำ (No seepage)
2. สภาพการซึมน้ำถูกกำหนดด้วยเส้น piezometric line (with phreatic surface)
3. สภาพการซึมน้ำถูกกำหนดด้วย pore pressure ratio (with pore pressure)

ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบของสภาพการซึมน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เราอาจจะกำหนดโดยระบุค่า pore pressure ratio เป็น 0 หรือกำหนดให้เส้น piezometric line อยู่ต่ำกว่าผิวการพัง (failure surface) ซึ่งก็ต้องป้อนค่าของเส้น piezometric line จึงไม่สะดวกเท่ากับการระบุเงื่อนไขว่าไม่มีการซึมน้ำ (No seepage) ดังในข้อ 1

อนึ่ง ในการสร้างเส้น piezometric line นั้น จะสร้างแยกออกมาต่างหาก จากการสร้างเส้น boundary line แต่สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน คือเกิดจากส่วนของเส้นตรงจำนวนหนึ่งมาประกอบกัน จุดที่ใช้กำหนดเป็นเส้น piezometric line นั้น ต้องกำหนดจากซ้ายไปขวา ตามลำดับ เส้น piezometric line นี้จะเป็นอิสระจากเส้น boundary line สามารถวางตำแหน่ง ณ. ที่ใดก็ได้จะอยู่เหนือหรือใต้เส้น ground line ก็ได้ ถ้าเป็นกรณีที่มีน้ำอยู่ด้วย ผิวน้ำ(water surface) จะเป็นส่วนหนึ่งของเส้น piezometric line และจำเป็นที่จุดปลายทั้ง 2 ของเส้น piezometric line จะต้องขยายออกให้ยาวพอ ๆ กับเส้น ground line ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 การกำหนด rock line ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง

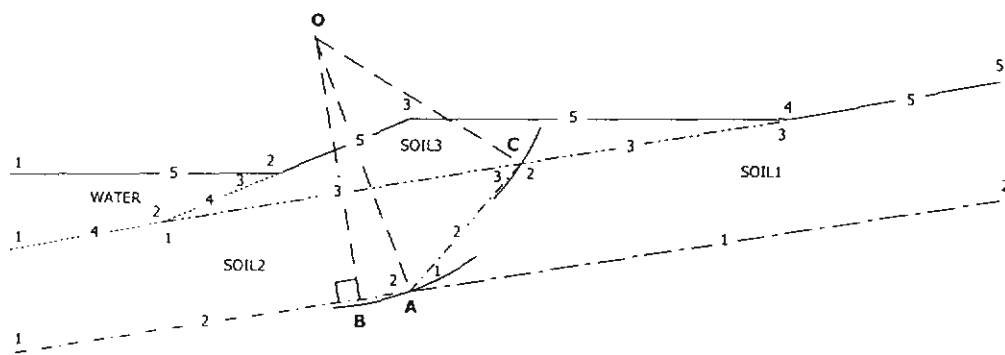
ในกรณีที่เส้น boundary line ที่ระบุเป็นเส้น rock line มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เราสามารถระบุซ้ำลงไปได้อีก ดังในรูปที่ 4 กรณีของเส้น boundary line #2

พิจารณาตัวอย่าง ในรูปที่ 4 จะได้ว่า

No. of bottom line	=	4	
Line No.	= 1, beg. No.	= 1, end No.	= 3
Line No.	= 2, beg. No.	= 1, end No.	= 2
Line No.	= 2, beg. No.	= 3, end No.	= 4
Line No.	= 3, beg. No.	= 2, end No.	= 3 เป็นต้น

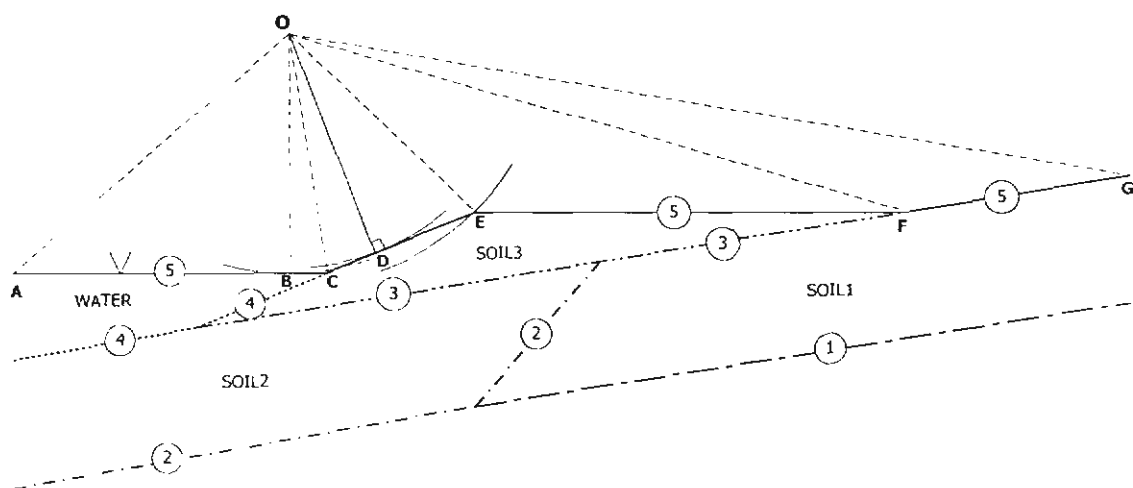
เพื่อแสดงว่ารศมีมากที่สุดถูกกำหนดขึ้นได้อย่างไร ให้พิจารณาจากรูปที่ 5 ที่จุดศูนย์กลาง O และเส้น boundary line #1 เป็นอันดับแรก เนื่องจากเส้น boundary line #1 มีจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 ถูกระบุว่าเป็นส่วนหนึ่งของเส้น rock line ให้ทำการลากเส้นจากจุดศูนย์กลาง O ไปตั้งฉากกับส่วนของเส้นตรงนี้ ถ้าพบว่าเส้นตั้งฉากตัดนอกส่วนของเส้นตรงแล้ว ให้เปลี่ยนไปพิจารณา ระยะที่สั้นที่สุดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดปลายทั้งสองของเส้น boundary line #1 แทน ซึ่งในกรณีนี้ก็คือ OA โดยจะถูกเลือกว่าเป็นรศมีที่มากที่สุดไว้ก่อนในตอนแรก ต่อจากนั้นจึงทำการพิจารณาส่วนของเส้น boundary line #2 ต่อมา ซึ่งจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 ของ boundary line #2 ก็ถูกพิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของเส้น rock line ด้วยเช่นกัน เส้นตั้งฉากกับส่วนของเส้นตรงนี้ที่ลากจากจุดศูนย์กลาง O คือ OB ซึ่งระยะ OB จะถูกเลือกไว้เป็นรศมีที่มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบ OA กับ OB ปรากฏว่า OB สั้นกว่า ดังนั้น OB จะถูกใช้เป็นรศมีที่มากที่สุดแทน แต่ถ้าในกรณีที่จุดปลายของเส้น boundary line #2 ที่ใช้ระบุว่าเป็นเส้น rock line เป็นจุดที่ 3 แทนที่จะเป็นจุดที่ 2 ดังในข้างต้นแล้ว เส้นตั้งฉากกับส่วนของเส้นตรงจากจุดที่ 2 ถึงจุด

ที่ 3 ที่ลากจากจุดศูนย์กลางจะตัดนอกเส้นตรง โดยมีระยะ OC เป็นระยะที่สั้นที่สุดระหว่างจุดปลายทั้งสอง ระยะ OC จะถูกเลือกให้เป็นค่ารัศมีที่มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับ OB แล้ว OC ยังสั้นกว่า OB ดังนั้น OC จะถูกใช้เป็นรัศมีที่มากที่สุดแทน ซึ่งวงกลมจะไม่สัมผัสกับเส้น rock line จึงเป็นการอธิบายได้ว่าทำไมจุดปลายที่ใช้ในการกำหนดเส้น rock line ของเส้น boundary line #2 ต้องเป็นจุดที่ 2 แทนที่จะเป็นจุดที่ 3



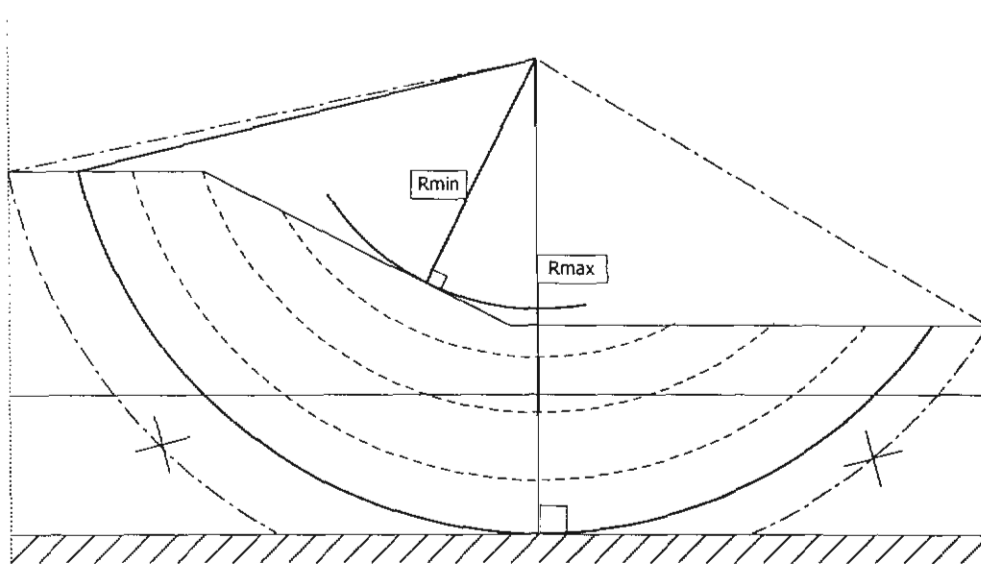
รูปที่ 5 การหา Maximum radius

ส่วนวิธีการในการหารัศมีที่น้อยที่สุดนั้น สามารถทำได้โดยพิจารณาระยะที่สั้นที่สุด จากจุดศูนย์กลางที่ถูกเลือกกับเส้น ground line โดยพิจารณาที่แต่ละจุดตัดของเส้น ground line และจุดที่ตั้งฉากกับเส้น ground line แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ค่าที่น้อยที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นรัศมีน้อยที่สุด ซึ่งจะไม่มียังวงกลมใดที่มีรัศมีน้อยกว่าค่ารัศมีน้อยที่สุดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ระยะ OD มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งก็คือรัศมีที่น้อยที่สุดนั่นเอง (Minimum radius)



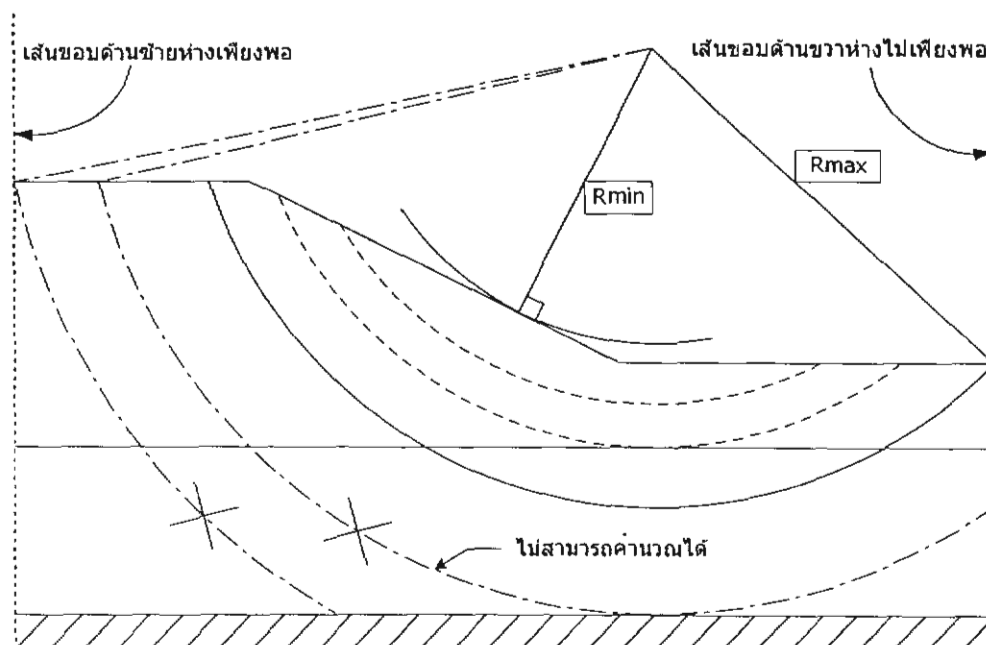
รูปที่ 6 การหา Minimum radius

รูปที่ 7 แสดงการหาค่ารัศมีที่น้อยที่สุด และรัศมีที่มากที่สุด ของรูปตัดทั่วไป ที่มีขอบเขตของระยะในแนวราบมากเพียงพอ ค่ารัศมีที่มากที่สุดจะถูกจำกัดโดย Rock line (Bottom line)



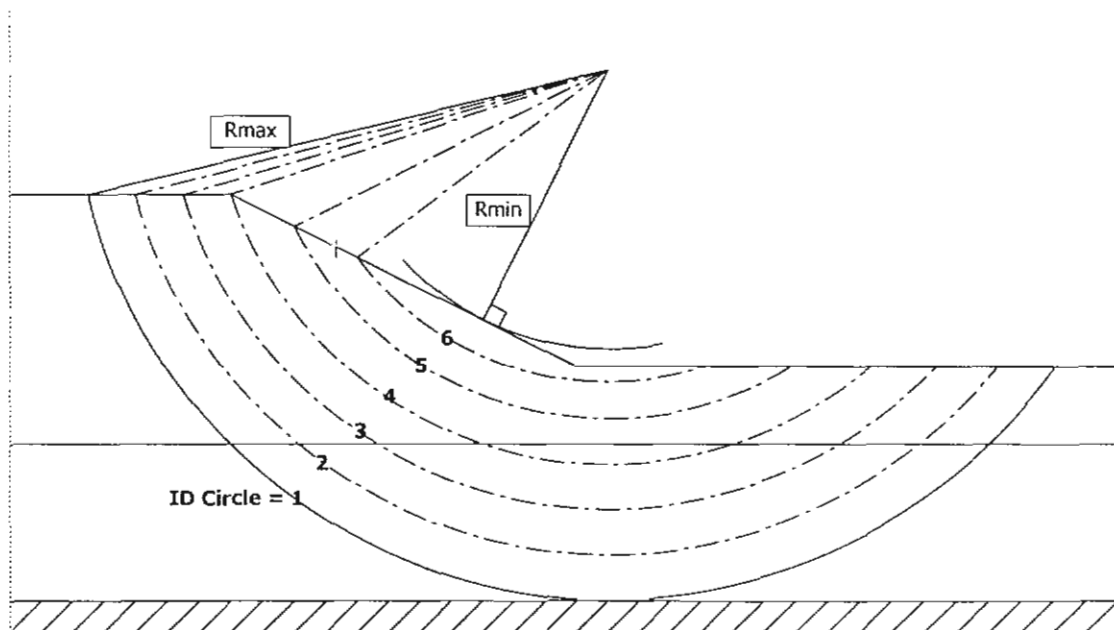
รูปที่ 7 การหาค่ารัศมี เมื่อขอบเขตของระยะในแนวราบมากเพียงพอ

แต่ในกรณีที่ มีการกำหนดขอบเขตของระยะในแนวราบไม่มากเพียงพอ ค่ารัศมีที่มากที่สุดจะถูกจำกัดโดย ขอบเขตของเส้น ground line ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างปัญหา เมื่อกำหนดขอบเขตของระยะในแนวราบไม่เพียงพอ

ระยะห่างของวงกลมที่อยู่ระหว่างรัศมีมากที่สุดและน้อยที่สุดนั้น จะถูกกำหนดจากค่า radius decrement ถ้าค่า radius decrement ถูกระบุให้เท่ากับ 0 แล้ววงกลมจะมีระยะห่างเท่าๆกัน คือ สม่ำเสมอจากรัศมีมากที่สุดถึงรัศมีน้อยที่สุด นั่นคือค่า radius decrement จะเท่ากับ $(\text{maximum radius} - \text{minimum radius}) / \text{No. of circles}$ ในกรณีนี้ที่ค่า radius decrement ไม่เท่ากับ 0 วงกลมจะเริ่มที่รัศมีวงแรก ที่รัศมีมากที่สุด ส่วนวงต่อมาจะมีรัศมีลดลงเรื่อยๆตามค่า radius decrement ที่ได้ระบุไว้ จนกระทั่งมีจำนวนวงกลมเท่ากับค่าของ No. of circles หรือจนกระทั่งค่ารัศมีเองนั้น มีค่าน้อยกว่าค่ารัศมีน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นในตอนแรก



รูปที่ 9 การระบุค่า ID Circle ของวงกลมการเคลื่อนพัง

เมื่อค่า radius decrement ไม่ได้ถูกกำหนดให้เท่ากับ 0 ก็ไม่จำเป็นต้องเริ่มต้นที่วงกลมแรกหรือวงกลมวงที่มีรัศมีมากที่สุด เราอาจใช้ค่า ID No. for first circle ในการระบุว่าวงกลมวงแรกที่ต้องการ run จะเป็นวงไหน ในกรณีทั่วไป ค่า ID No. for first circle จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 คือให้วงกลมแรกที่ถูก run เป็นวงที่มีค่ารัศมีมากที่สุด ถ้าค่า ID No. for first circle กำหนดให้เท่ากับ 2 แล้ววงกลมวงแรกที่ถูก run จะเป็นวงที่มีรัศมีมากที่สุดเป็นอันดับ 2 (พิจารณารูปที่ 9 ประกอบ)

ลักษณะนี้จะถูกใช้เมื่อเส้น rock line อยู่ใกล้กับผิวของลาดดิน ซึ่งในกรณีนี้ วงกลมที่วิกฤตที่สุดมักจะเป็นวงที่สัมผัสกับเส้น rock line ซึ่งก็คือวงกลมวงแรกหรือวงกลมที่มีรัศมีมากที่สุดนั่นเอง เพื่อให้แน่ใจว่าหลักการนี้ถูก การ run ก็ควรกำหนดค่าของ No. of circles เท่ากับ 2, ID No. for first circle เท่ากับ 1 และค่า radius decrement เป็นระยะสั้นๆ ดังนั้นวงกลม 2 วงจะถูก run และค่าส่วนปลอดภัย

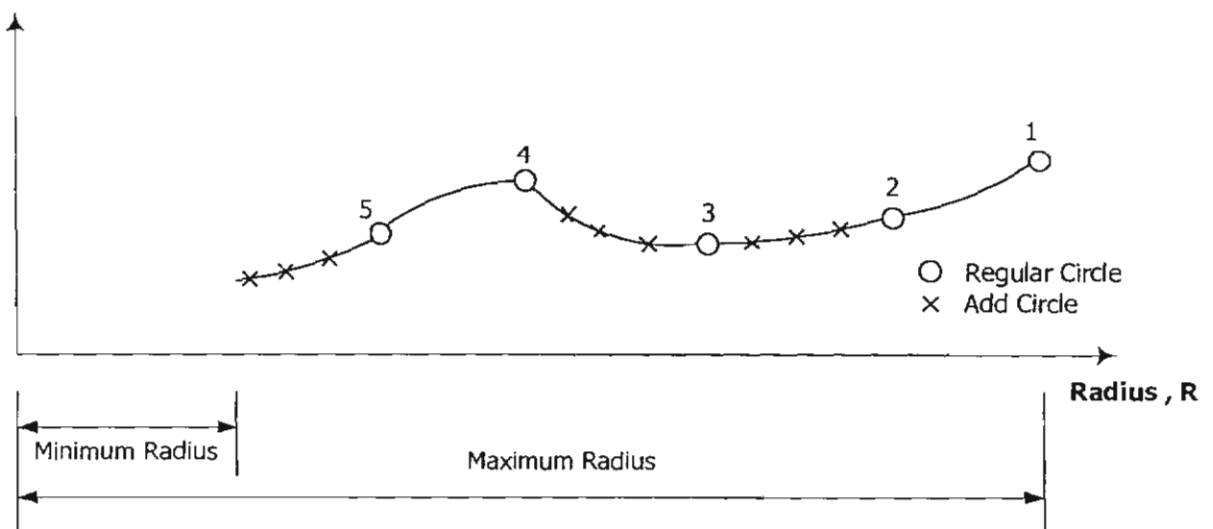
ภัยจะถูกคำนวณออกมา ซึ่งถ้าพิจารณาผลลัพธ์แล้วพบว่าวงกลมที่มีรัศมีมากที่สุดไม่ใช่วงกลมที่วิกฤตที่สุดก็ต้อง run ใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าส่วนปลอดภัยต่ำสุดจริงๆ

จำนวนของวงกลมที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน (Number of Circle at Each center)

ถึงแม้ว่าที่จุดศูนย์กลางหนึ่งๆ ผู้ใช้โปรแกรมสามารถระบุจำนวนของวงกลม (No. of circles) ได้ แต่จำนวนของวงกลมที่ถูก run จริงๆ นั้นอาจจะมากกว่า หรือน้อยกว่าค่าของ No. of circles ก็ได้

สาเหตุที่จำนวนของวงกลมที่ถูก run มากกว่า No. of circles เป็นเพราะว่า หลังจากที่ยังวงกลมกำลังถูก run ตามลำดับ จากวงแรกที่มีรัศมีมากที่สุด จนถึงวงสุดท้ายที่มีรัศมีน้อยที่สุด เรียบร้อยแล้ว เมื่อใดก็ตามที่พบว่า มีวงกลมที่มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลม 2 วง ที่อยู่ติดกัน เมื่อนั้นค่าของ No. of add. radii จะถูกใช้เพื่อเพิ่มวงกลมขึ้นอีกบนแต่ละด้านของวงกลมชุดแรก เพื่อหาค่าส่วนปลอดภัยที่ต่ำสุดจริงๆ ดังแสดงในรูปที่ 10

Safety Factor



รูปที่ 10 การใช้ค่า No. of add. radii ในการเพิ่มจำนวนวงกลม

รูปที่ 10 แสดงว่า วงกลมถูกเพิ่มเข้าไปอย่างไร สมมติว่ามีการกำหนดค่าให้ No. of circles เท่ากับ 5 และ No. of add. radii เท่ากับ 3 วงกลม 3 วงจะถูกเพิ่มบนแต่ละด้านของวงกลม #3 เพราะว่าวงกลม #3 มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลมทั้ง 2 วงที่อยู่ติดกัน คือ วงกลม #2 และ วงกลม #4 หลังจากนั้นวงกลม 3 วง จะถูกเพิ่มเข้าไประหว่างวงกลม #5 กับค่ารัศมีน้อยที่สุด (ground line) ด้วย ทั้งนี้เพราะวงกลม #5 มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลม #4

สำหรับเหตุผลที่จำนวนวงกลมที่ถูก run อาจน้อยกว่า No. of circles นั้น เนื่องจาก

1. เมื่อค่าอัตราส่วนปลอดภัยของวงกลมมีค่ามากกว่า 100 แล้ววงกลมถัดมาที่มีค่ารัศมีน้อยกว่า จะไม่ถูก run
2. เมื่อรัศมีของวงกลมนั้นไม่ตัดลาดดิน
3. เมื่อค่า radius decrement มากกว่ารัศมีของวงกลมวงใดวงหนึ่งใน No. of circles นั้น น้อยกว่าค่ารัศมีน้อยที่สุด แล้ววงกลมนั้นและวงถัดมาจะไม่ถูก run
4. เมื่อค่า min. depth of tallest slice ถูกระบุว่าจะไม่เท่ากับ 0 กรณีวงกลมที่มีชั้นที่สูงที่สุด ต่ำกว่าค่าที่ระบุนี้จะไม่ถูก run (สำหรับค่า min. depth of tallest slice นี้จะกล่าวในหัวข้อถัดไป)

ความสูงต่ำสุดของชั้นที่สูงที่สุด (Minimum Depth of Tallest Slice)

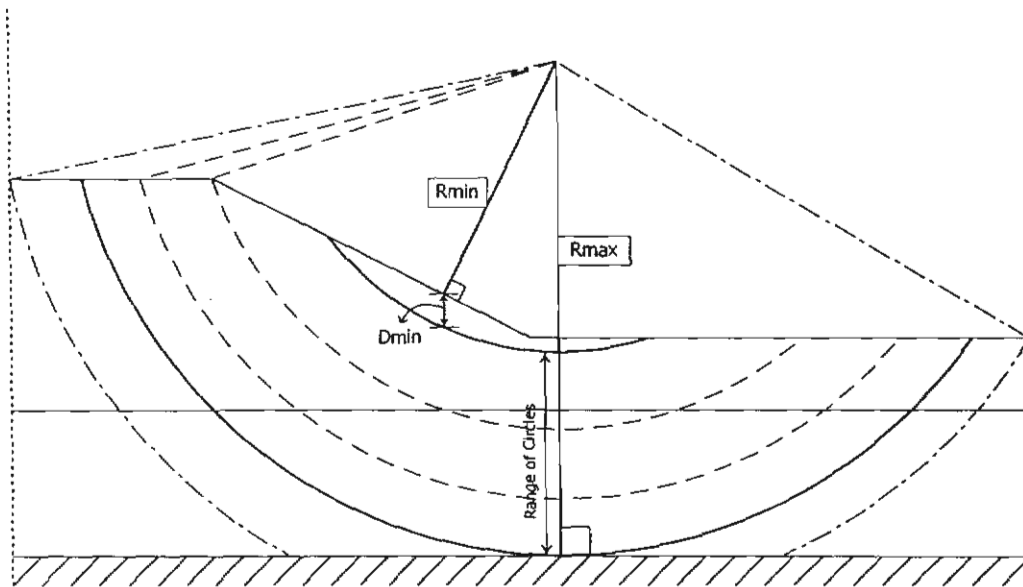
ถ้าดินในลาดดิน ไม่มีค่า Cohesion (Cohesion เท่ากับ 0) เช่นดินทรายหรือลาดหินทิ้ง ซึ่งดินชั้นล่างไม่เป็นดินอ่อน และไม่มีสภาพการซึมน้ำ (No seepage) ค่าส่วนปลอดภัยสามารถหาได้โดยตรงจากสมการของ infinite slope คือ

$$F.S. = \tan \phi / \tan \theta$$

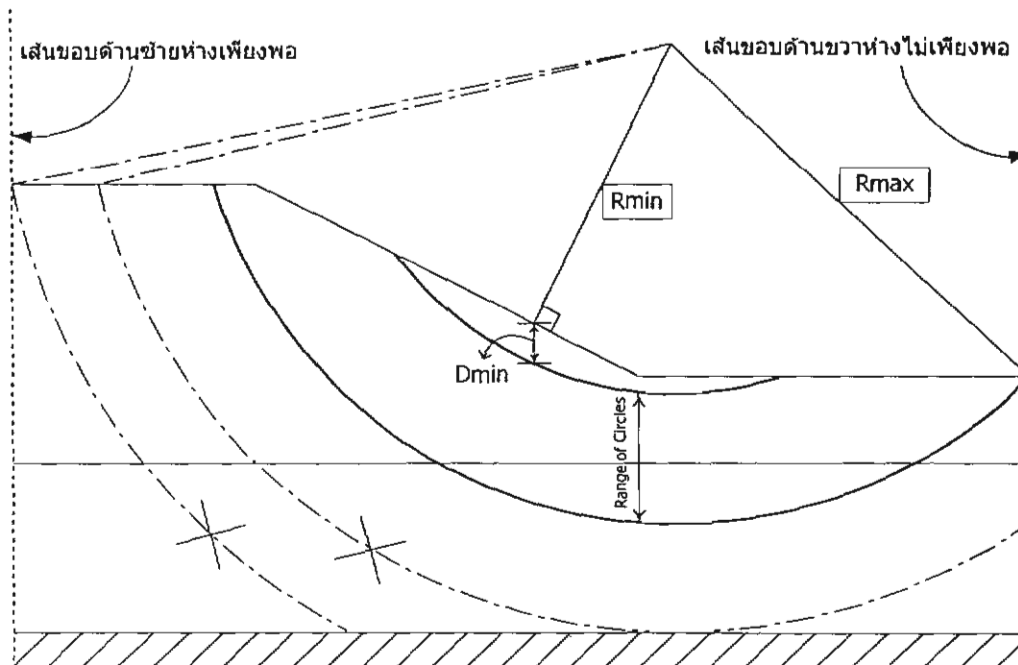
เมื่อ θ = Slope angle

ถ้าพิจารณาพังถล่มสมมติให้เป็นแบบวงกลม (circular failure surface) แล้วพิจารณาพังที่วิกฤตที่สุดจะเป็นวงกลมตื้นๆ ซึ่งตัดลาดดินบางๆตามผิวดินเท่านั้น ซึ่งไม่น่าจะเป็นอันตรายต่อลาดดินมากนัก ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการกำหนดค่า min. depth of tallest slice ขึ้นมา เพราะถ้าเกิดดังกรณีข้างต้นแล้วก็ไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคำนวณ เนื่องจากสามารถหาค่าส่วนปลอดภัยได้โดยตรงจากสมการข้างต้นแทน แต่ถ้ามีการกำหนดค่า min. depth of tallest slice แล้ว วงกลมวงที่ตัดลาดดิน แล้วมีความสูงของชั้นที่สูงที่สุด (tallest slice) ต่ำกว่าค่า min. depth of tallest slice จะไม่ถูกพิจารณา ทำให้ได้ค่าส่วนปลอดภัยมากขึ้นกว่าที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ถ้ายังค่า min. depth of tallest slice กำหนดไว้มากเท่าใด ค่าส่วนปลอดภัยก็จะมากขึ้นตาม เว้นเสียแต่จะมีดินชั้นล่างๆเป็นดินอ่อน (weak layers) และมีสภาพการซึมน้ำ (seepage) ในกรณีนี้ยังวงกลมตัดลาดดินลึกเท่าใด ก็จะต้องวิกฤตขึ้นเท่านั้น

ถ้าค่า min. depth of tallest slice ถูกกำหนดให้ไม่เท่ากับ 0 แล้วเฉพาะวงกลมวงที่มีชั้นที่สูงที่สุด สูงกว่าค่า min. depth of tallest slice เท่านั้นที่จะถูก run ซึ่งแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 การหาช่วงที่วงกลมสามารถตัดผ่าน เมื่อขอบเขตของระยะในแนวราบเพียงพอ

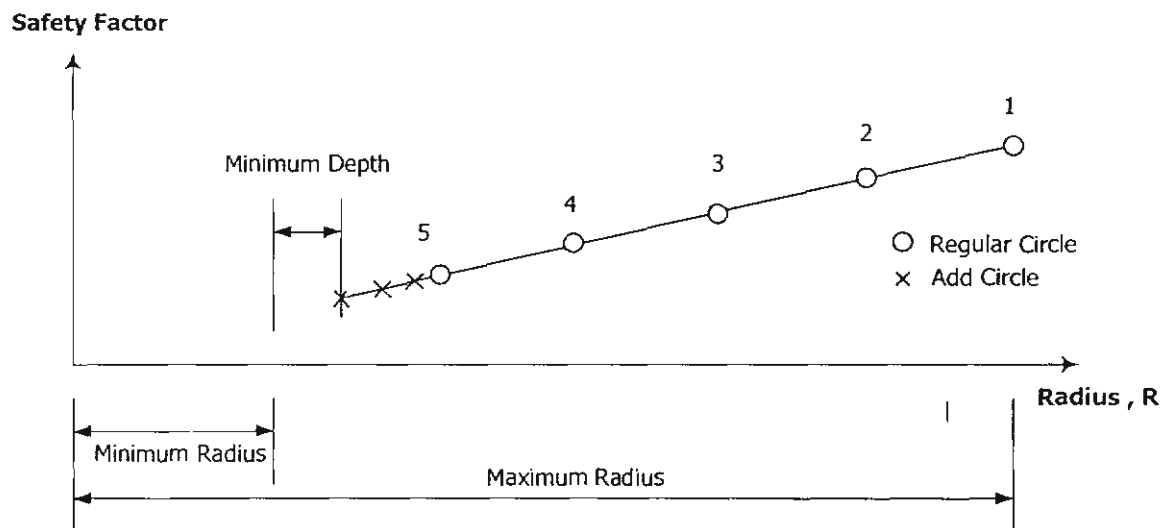


รูปที่ 12 ตัวอย่างปัญหา เมื่อกำหนดขอบเขตของระยะในแนวราบไม่เพียงพอ

สำหรับในกรณีที่วงกลมวงสุดท้ายถูก run และมีค่าส่วนปลอดภัยมากกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลมก่อนหน้านี้ จะไม่มีการเพิ่มวงกลมเข้าไปเพื่อหาค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด เพราะว่าค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดได้ถูกกำหนดแล้วจากวงกลมบางวงกลมก่อนหน้านี้ แต่ในทางตรงข้าม ถ้าวงกลมวงสุดท้ายมีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลมก่อนหน้านี้ ค่าของ No. of add. radii จะถูกใช้เพิ่มเข้าไปเพื่อให้แน่ใจว่าเราสามารถหาค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดได้ถูกต้อง ดังแสดง

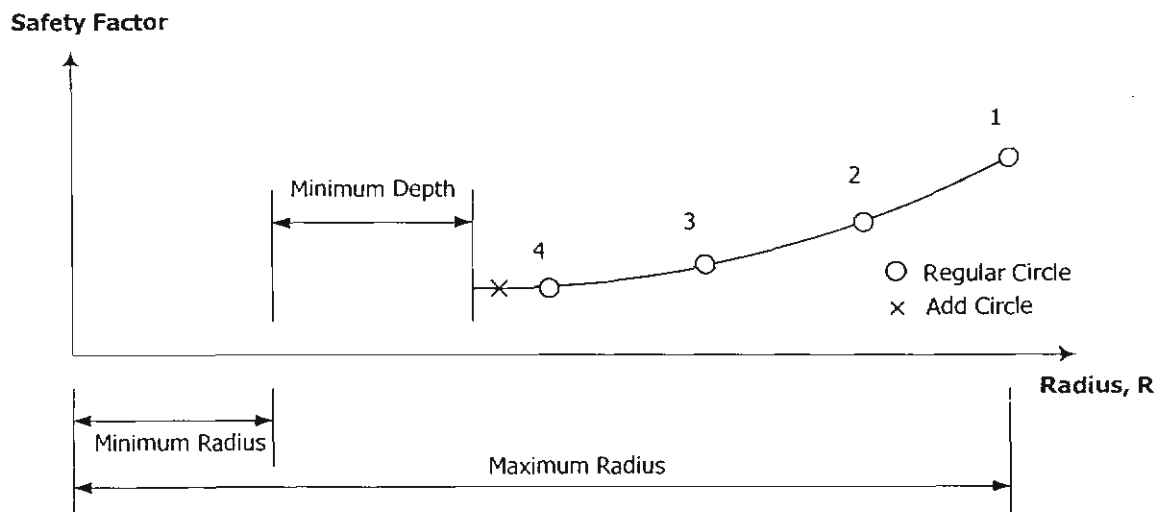
ในรูปที่ 13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงกลมจะถูกเพิ่มเข้าไปได้อย่างไร เมื่อกำหนดให้ค่า No. of circle เท่ากับ 5 วง ถูก run ทุกวงและวงกลม 3 วง (No. of add. Radii) ถูกเพิ่มเข้าไประหว่างวงกลม #5 และเส้น ground line เพราะวงกลม #5 มีค่าส่วนปลอดภัยต่ำกว่าค่าส่วนปลอดภัยของวงกลม #4

แต่เนื่องจากวงกลมสุดท้ายของวงกลม 3 วง ที่เพิ่มเข้าไปนี้ มีความสูงของชั้นที่สูงที่สุด ต่ำกว่าค่า min. depth of tallest slice ดังนั้นเฉพาะวงกลม 2 วงแรกที่เพิ่มเข้าไปเท่านั้นที่จะถูก run



รูปที่ 13 การเพิ่มจำนวนวงกลมเมื่อ ค่าของ FS. มีแนวโน้มลดลง

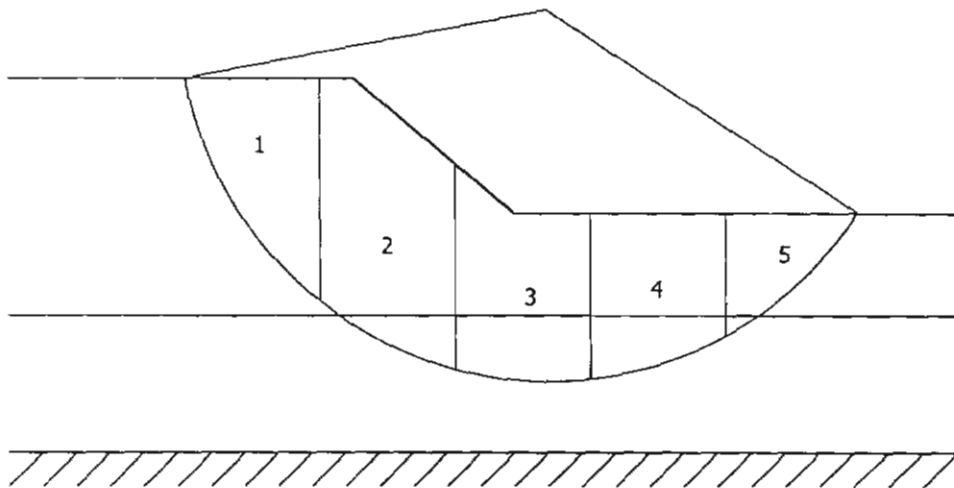
สำหรับกรณีดังรูปที่ 14 จะมีวงกลมหลักถูก run เพียง 4 วง เท่านั้น เพราะวงที่ #5 ไม่ถูก run เนื่องจากค่าความสูงของชั้นส่วนที่สูงที่สุด(tallest slice) ต่ำกว่า min. depth of tallest slice ที่กำหนดไว้ ส่วนวงกลมที่ถูกเพิ่มเข้ามา 3 วงนั้น จะถูก run เพียงวงเดียวเท่านั้น เนื่องจากวงกลม 2 วงหลังมี ค่าความสูงของชั้นส่วนที่สูงที่สุด(tallest slice) ต่ำกว่า min. depth of tallest slice



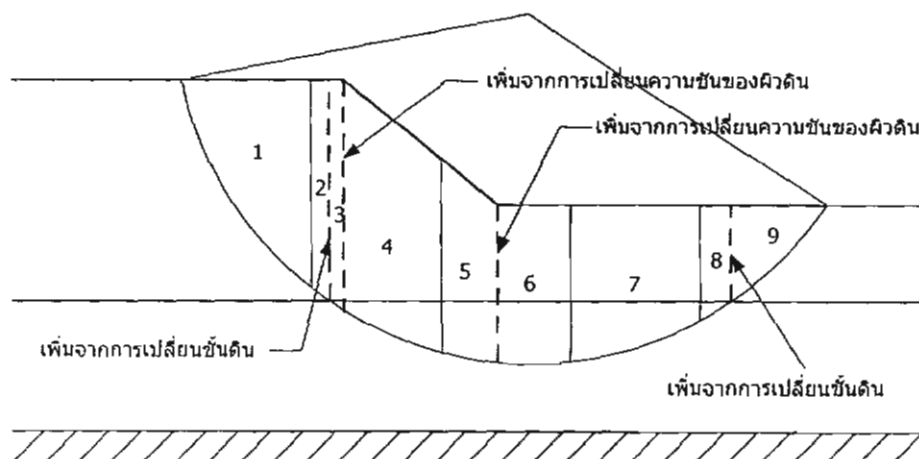
รูปที่ 14 การลดลงของจำนวนวงกลม เนื่องจากค่า min. depth of tallest slice

การแบ่งย่อยของชิ้นส่วนดิน (Subdivision of Slice)

จำนวนของชิ้น (slice) ในตอนแรกจะถูกกำหนดด้วยค่า No. of Slices ดังรูปที่ 15 ซึ่งอย่างไรก็ตามที่แต่ละจุดหักมุม (breaking point) ของเส้น ground line และที่แต่ละจุดตัดของวงกลมกับเส้น boundary line จะมีการแบ่งเป็นชิ้นย่อยๆลงไปอีก ดังรูปที่ 16 ซึ่งถ้าเป็นรูปตัดที่ซับซ้อนแล้ว จำนวนของชิ้นต่างๆที่ถูกแบ่งจริงจะมากกว่าค่า No. of Slices มาก ในที่นี้ No. of Slices = 5 (รูปที่ 15) แต่จำนวน Slice ที่แบ่งจริง = 9 (รูปที่ 16)



รูปที่ 15 การแบ่งชิ้นส่วนดิน เริ่มแรกซึ่งจะถูกกำหนดโดยค่า No. of Slices



รูปที่ 16 การแบ่งชิ้นส่วนดิน ในภายหลังที่จำนวนชิ้นส่วนเพิ่มขึ้น

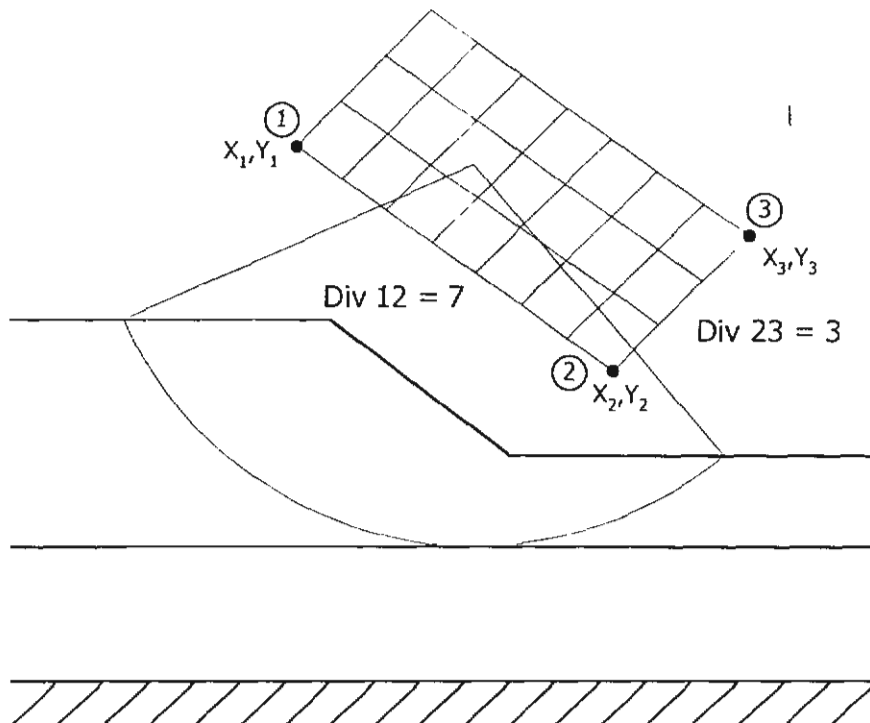
รูปแบบในการค้นหาจุดศูนย์กลางของวงกลมที่ตำแหน่งต่างๆ (Control of Trial Centers)

รูปแบบในการค้นหา (Search Condition) มี 3 ลักษณะ คือ

1. การค้นหาแบบโครงข่าย (Grid Search)
2. การค้นหาโดยระบุจุดศูนย์กลางและรัศมี (Specified Search)
3. การค้นหาแบบอัตโนมัติ (Automatic Search)

การค้นหาแบบโครงข่าย (Grid Search)

การค้นหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยวิธีนี้ เป็นการวิเคราะห์จากกลุ่มของจุดศูนย์กลาง โดยตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง จะได้มาจากจุดตัดของกริดในโครงข่าย ซึ่งค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด จะได้จากการเปรียบเทียบกับจุดอื่นๆในกลุ่ม หลังจากที่ได้ค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดนี้แล้ว โปรแกรมจะนำจุดที่ได้มา เป็นจุดเริ่มต้นของการค้นหาแบบอัตโนมัติ (Automatic Search) ต่อไป เพื่อหาค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดจริงๆ ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 การระบุในการค้นหาแบบโครงข่าย

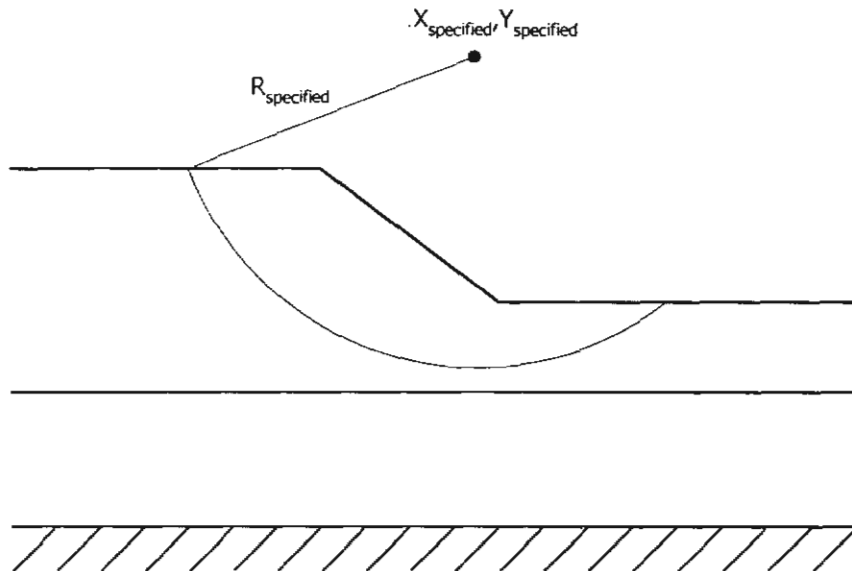
ตำแหน่งของ grid จะถูกกำหนดด้วย 3 ตัวแปรด้วยกันคือ

1. X และ Y coordinates ของจุด 3 จุด
2. จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่างจุด #1 กับจุด #2 (No. of divisions between points 1 and 2)
3. จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่างจุด #2 กับจุด #3 (No. of division between points 2 and 3)

จุด 3 จุด ต้องเป็นจุดจากด้าน 2 ด้านที่ติดกันของสี่เหลี่ยมด้านขนาน

การค้นหาโดยระบุจุดศูนย์กลางและรัศมี (Specified Search)

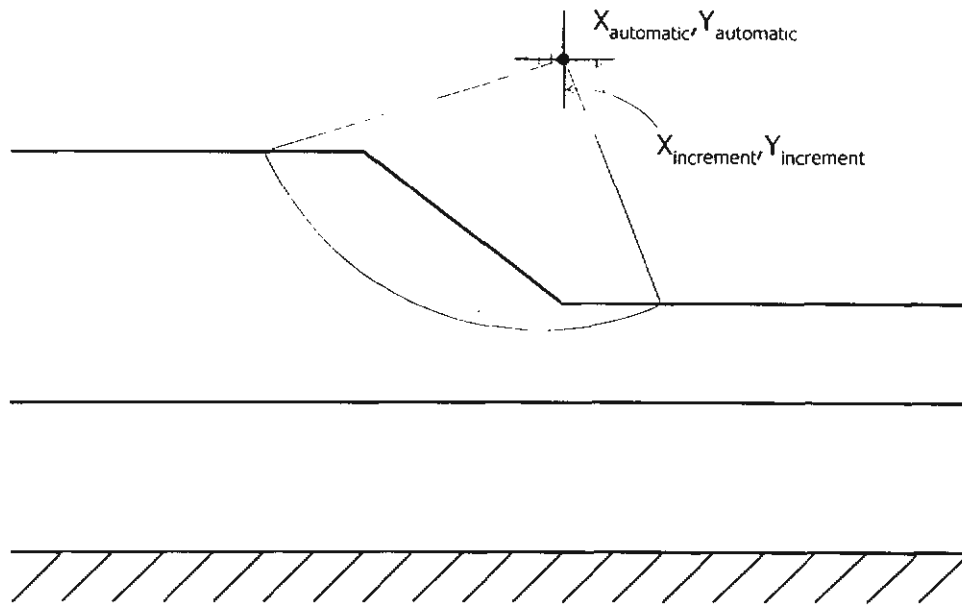
การค้นหาแบบนี้ จะใช้ในกรณีที่ทราบตำแหน่งและลักษณะการพังที่แน่นอน โดยจะระบุจุดศูนย์กลางของวงกลมและรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในกรณีของการวิเคราะห์ย้อนกลับได้ (Back Analysis) เมื่อลาดดินเกิดการพิบัติแล้ว



รูปที่ 18 การระบุในการค้นหาแบบกำหนดจุดศูนย์กลางและรัศมี

การค้นหาแบบอัตโนมัติ (Automatic Search)

การค้นหาโดยวิธีนี้ จะกระทำโดย กำหนดเพียงจุดศูนย์กลางของวงกลมเริ่มต้นที่ใช้ในการค้นหา และ ความละเอียดในการค้นหา ดังแสดงในรูปที่ 19 จากนั้นโปรแกรมจะทำการค้นหา ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุดให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งโปรแกรมจะทำการค้นหา โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากจุดแรก กับค่าของจุดที่อยู่ในแนวราบทั้งซ้ายและขวา และในแนวตั้ง จนกว่าจะได้จุดที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุดในบริเวณนั้น ซึ่งรูปแบบของของการค้นหาโดยอัตโนมัติ (Automatic Search) จะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 19 การค้นหาจุดศูนย์กลางแบบอัตโนมัติ

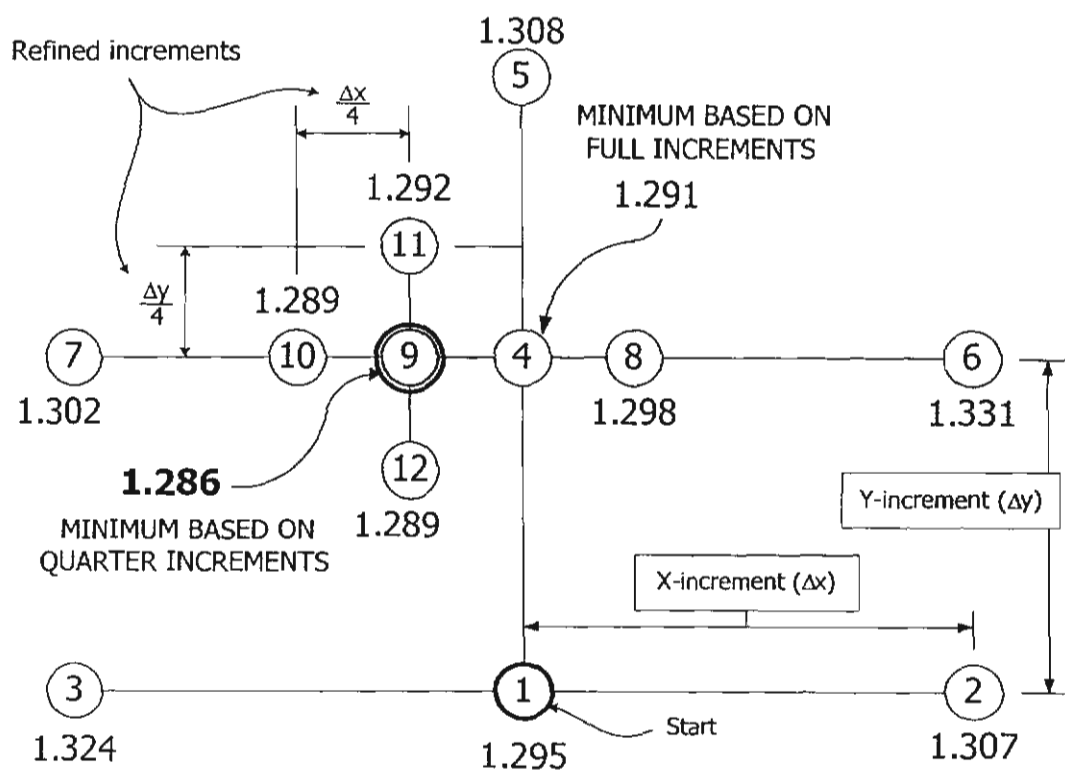
ขั้นตอนการของการค้นหาแบบอัตโนมัติ (Algorithm of Automatic Search)

ในขั้นตอนการของการค้นหาแบบอัตโนมัตินั้น จำเป็นต้องระบุค่า coordinate ของจุดศูนย์กลางแรกที่จะทำการค้นหา และค่าความละเอียดของการค้นหาในแต่ละแกน($X_{increment}$ และ $Y_{increment}$) ในทิศทางราบและตั้ง ตามลำดับ จากรูปที่ 20 จะแสดงให้เห็นทราบว่า ขั้นตอนการค้นหา ถูกดำเนินการเพื่อหาค่าส่วนปลอดภัยน้อยที่สุดได้อย่างไร เริ่มต้นด้วยค่าส่วนปลอดภัยที่จุดศูนย์กลางแรกคือ จุด #1 ถูกกำหนดขึ้น จากนั้นขั้นตอนการค้นหา ก็จะเข้าไปค้นหาต่อที่ระยะ $X_{increment}$ ในแนวราบ ซึ่งจุด #2 จะถูกกำหนดขึ้น ถ้าค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #2 ต่ำกว่าค่าส่วนปลอดภัยของจุด #1 ขั้นตอนการค้นหาจะทำการค้นหา ต่อไปเรื่อยๆทางขวามือ จนกระทั่งค่าส่วนปลอดภัยมีค่ามากกว่า ค่าส่วนปลอดภัยที่จุดก่อนหน้านั้น และจะย้ายไปกระทำทางด้านซ้ายมือ จนได้ค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดในแนวราบ สำหรับกรณีตัวอย่างในรูปที่ 20 ค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #2 มากกว่าค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #1 ดังนั้นจุด #3 ที่ระยะ $X_{increment}$ ไปทางซ้ายของจุด #1 จะถูกพิจารณาและค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #3 ก็มากกว่าค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #1 ซึ่งมีค่าส่วนปลอดภัยต่ำสุดในแนวราบ ถ้าค่าส่วนปลอดภัยของจุด #3 ต่ำกว่าค่าส่วนปลอดภัยของจุด #1 ขั้นตอนการค้นหา ก็จะกระทำต่อไปทางซ้าย จนกว่าจะหาค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดในแนวราบได้ เมื่อสิ้นสุดการค้นหาทางแนวราบแล้ว ขั้นตอนการค้นหาก็จะย้ายไปกระทำในแนวตั้ง โดยจะทำการค้นหาที่ระยะ $Y_{increment}$ จากจุดที่มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยที่สุดในแนวราบ ตามรูปนี้คือ จุด #4 ปรากฏว่า ค่าส่วนปลอดภัยที่ได้้น้อยกว่าค่าส่วนปลอดภัยของจุด #1 จึงทำการ search ขึ้นต่อไปอีกจนได้ค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดในแนวตั้ง แล้วจึงย้ายมากระทำการ search ในแนวราบ

ซ้ำอีกครั้งดังเช่น จุด #4 มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าจุดอื่นๆใน 4 ทิศ คือ จุด #1, #5, #6 และ #7 ซึ่งจุด #4 นี้จะมีค่าส่วนปลอดภัยต่ำที่สุดในขบวนการค้นหา ด้วยระยะ X, Y increment

จากจุด #4 ขบวนการข้างต้นจะถูกกระทำซ้ำโดยใช้ระยะ $\frac{1}{4}$ ของ X, Y increment ในการ search โดยจะได้ค่าส่วนปลอดภัยที่จุด #9 ซึ่งต่ำกว่าที่จุดอื่นๆใน 4 ทิศ รอบๆตัวมัน คือ จุด #4, #10, #11 และ #12 เมื่อไม่มีจุดใดๆที่อยู่รอบๆตัวมัน มีค่าส่วนปลอดภัยน้อยกว่าตัวมันแล้ว ขบวนการในการค้นหาก็จะหยุดลง ดังนั้นจุด #9 นี้ ก็จะเป็นจุดที่มีค่าส่วนปลอดภัยต่ำที่สุด

จากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 20 เป็นเพียงการยกตัวอย่างให้ดูเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ขบวนการ search จะกระทำหลายขั้นตอน(steps)มาก เพื่อให้ได้ค่าส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด ถ้าค่า X increment เท่ากับ 0 แล้ว การ search จะกระทำเฉพาะในแนวดิ่งเท่านั้น หรือถ้า Y increment เท่ากับ 0 การ search จะทำเฉพาะในแนวราบเท่านั้น

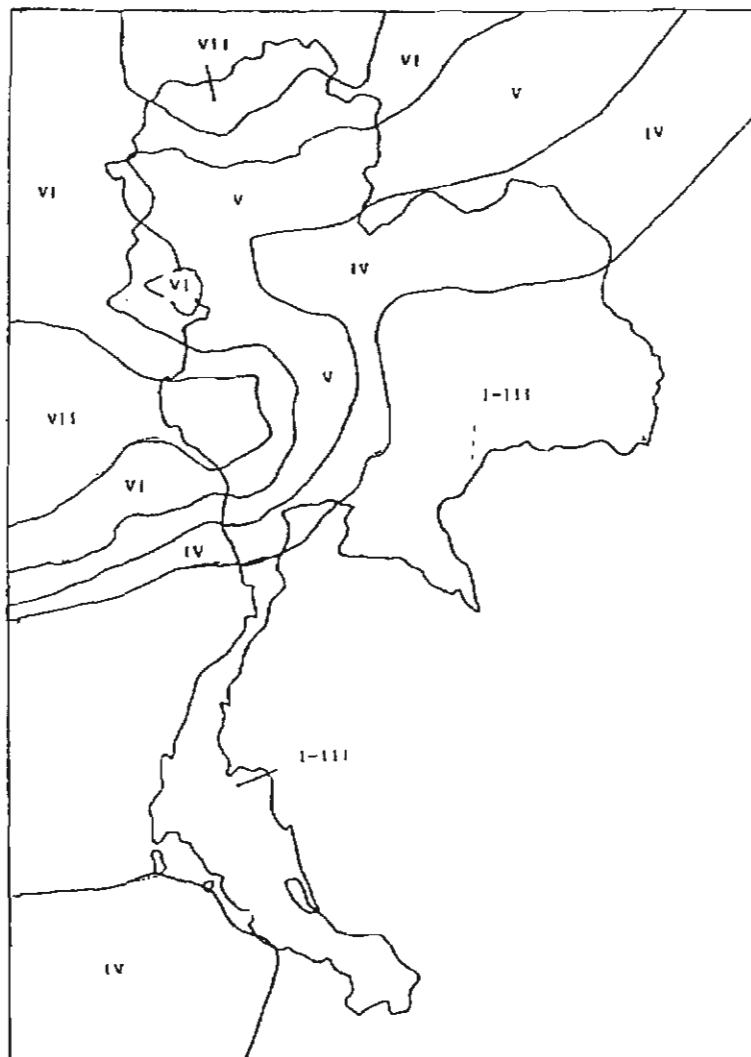


รูปที่ 20 ขั้นตอนของขบวนการค้นหาแบบอัตราในมิติ

ค่าสัมประสิทธิ์ของความสั่นสะเทือน (Seismic Coefficient, K_s)

โดยทั่วไปแล้วในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้น อาจจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวด้วย โดยเฉพาะถ้าเป็นงานก่อสร้างขนาดใหญ่แล้ว ผลกระทบอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวก็อาจจะส่งผลให้เห็นได้ชัด เช่น งานเขื่อนดิน เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการสำรวจและศึกษาสภาพการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณต่างๆทั่วโลก ซึ่งข้อมูลที่ได้จากบันทึกแผ่นดินไหวเหล่านั้น สามารถนำมาประมวลผลทางสถิติเป็นความเข้มของความสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้น และได้มีการนำมาดัดแปลงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความสั่นสะเทือน (Seismic Coefficient, K_s) เพื่อใช้ในการออกแบบ เรียกว่าวิธี Pseudo-static สำหรับในประเทศไทยนั้น ได้มีการประเมินจัดเขตแผ่นดินไหวตาม "Modified Mercalli Scale" ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยมีการจัดให้อยู่ในรูปของพื้นที่ความเข้มแผ่นดินไหวต่าง ๆ กัน ซึ่งจะสามารถทราบค่าของ K_s ได้โดยนำหมายเลขของ Zone ไปเปรียบเทียบกับค่าของ K_s ในตารางที่ 1



รูปที่ 21 Zone ความเข้มของแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Modified Mercalli Scale 1931)

ตารางที่ 1 ความเข้มของแผ่นดินไหวในมาตราเมอร์แคลลีปรับปรุงที่มีต่อความรู้สึกและความเสียหาย

Modified Mercalli Intensity Scale (1931, Wood and Neumann)	Acceleration or Coefficient of earthquake
I. Detected only sensitive instruments	0.005 g
II. Felt by a few persons at rest, especially on upper floors, delicately suspended objects may swing	
III. Felt noticeably indoors but not always recognized as earthquake; standing autos rock slightly, vibration like passing a truck	
IV. Felt indoors by many, outdoors by few, at night some awoken, dishes, windows, doors disturbed, motor cars rock noticeably	0.01 g
V. Felt by most people, some breakage of dishes, windows and plaster, disturbance of fall objects	0.05 g
VI. Felt by all, many frightened run outdoors, falling plaster and chimneys, damage small	
VII. Everybody runs outdoors, damage to building varies depending on quality of construction noticed by drivers of automobiles.	0.1 g
VIII. Panel walls thrown out of frames, fall of walls, monuments, chimneys, sand and mud ejected, drivers of autos disturbed	0.5 g
IX. Buildings shifted off foundations, cracked, thrown out of plumb, ground cracked, underground pipes broken	
X. Most masonry and frame structures destroyed, ground cracked, rails bent, landslides	1.0 g
XI. Low structures remain standing bridge destroys, fissures in ground, pipes broken, landslides, rails bent	5.0 g
XII. Damage total, waves seen on ground surface, lines of sight and level destroyed, objects thrown into the air	

Approximate relationships earthquake intensity, and accelerations. (after Cimensky)

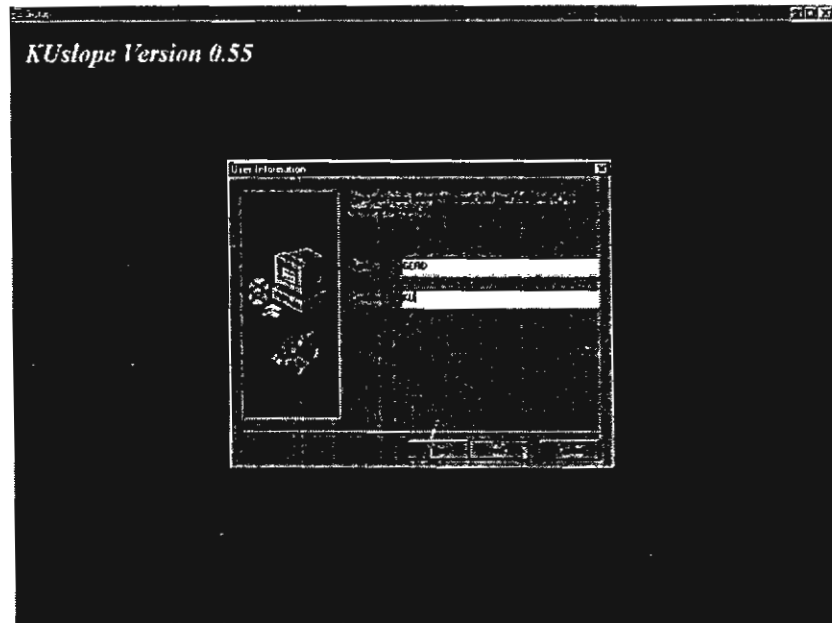
- [illegible]

รูปที่ 1

- [illegible]

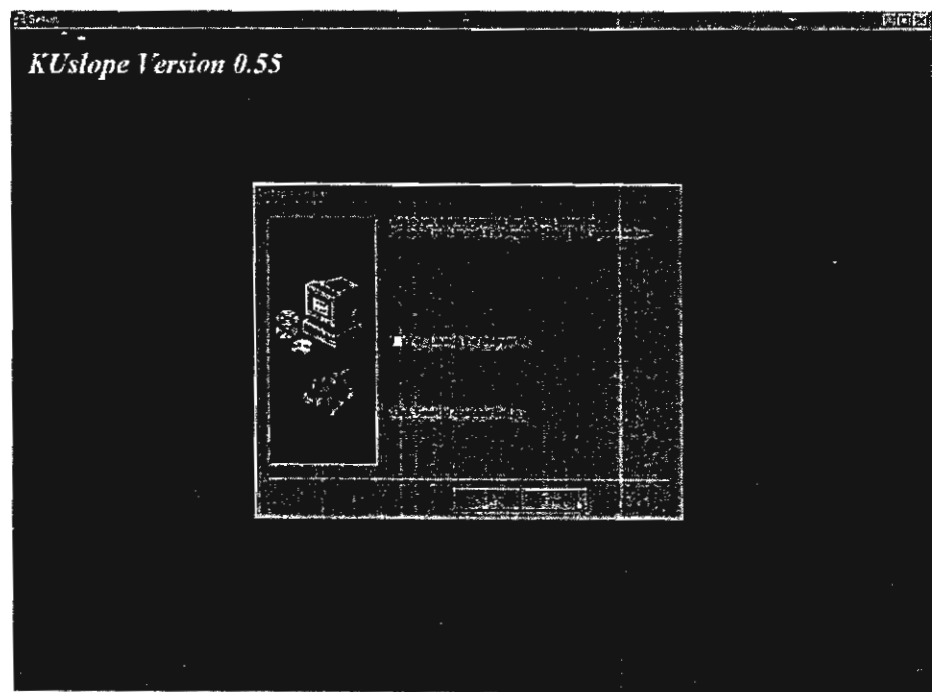
รูปที่ 2

3. กรอกรายละเอียดของผู้ใช้และชื่อองค์กรลงไป เสร็จแล้วคลิกที่ปุ่ม Next



รูปที่ 3

4. จากนั้น โปรแกรมจะทำการติดตั้งส่วนประกอบต่างๆลงไป เมื่อเสร็จแล้วจะปรากฏ windows ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4 ให้คลิกที่ปุ่ม Finish



รูปที่ 4

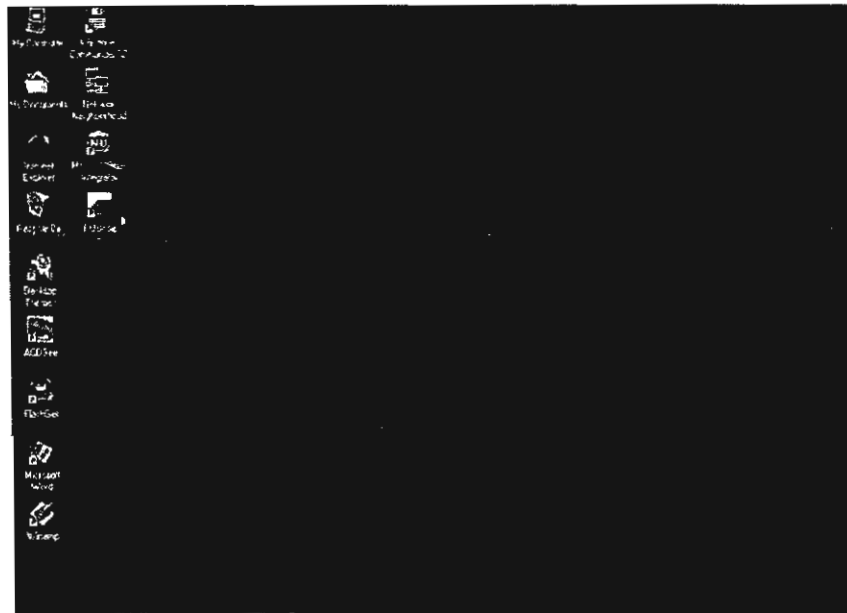
5. หลังจากทำการติดตั้งโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะปรากฏ Icon ของโปรแกรม KUslope บน Desktop ดังแสดงในรูปที่ 5



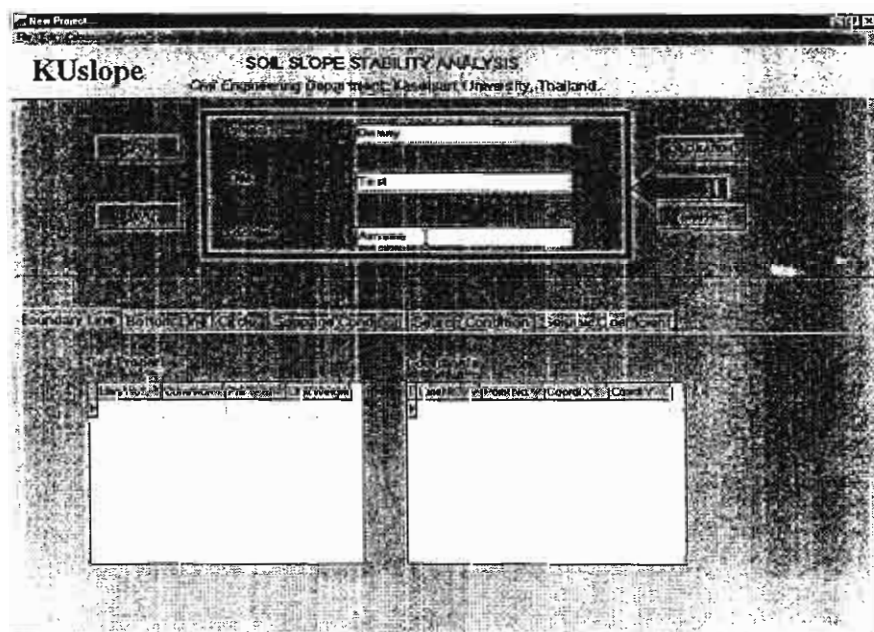
รูปที่ 5

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม KUslope (Step to run KUslope)

1. จากหน้าจอ (รูปที่ 1) ทำการดับเบิลคลิกที่ Icon KUslope จะปรากฏ Windows ของโปรแกรม ขึ้นมา (รูปที่ 2) ทำการกรอกรายละเอียดเบื้องต้นของโครงการที่จะทำการวิเคราะห์ เช่น ชื่อของโครงการ (Project Name) , ตำแหน่งที่ตั้ง (Location) , รหัสของโครงการ (Title) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1



รูปที่ 2

2. ทำการป้อนข้อมูล ที่แถบ Boundary Line ซึ่งอยู่ด้านหน้าสุด ลงไปในช่องว่าง โดยจะเป็นค่าของ Line No. , Cohesion, Phi (Friction Angle) และ Unit Weight ตามลำดับ ดังรูปที่ 3

Soil Properties

Line No.	Cohesion	Phi	Unit Weight
1	5	10	1.8
2	1	5	1.5
3	0	0	0

รูปที่ 3

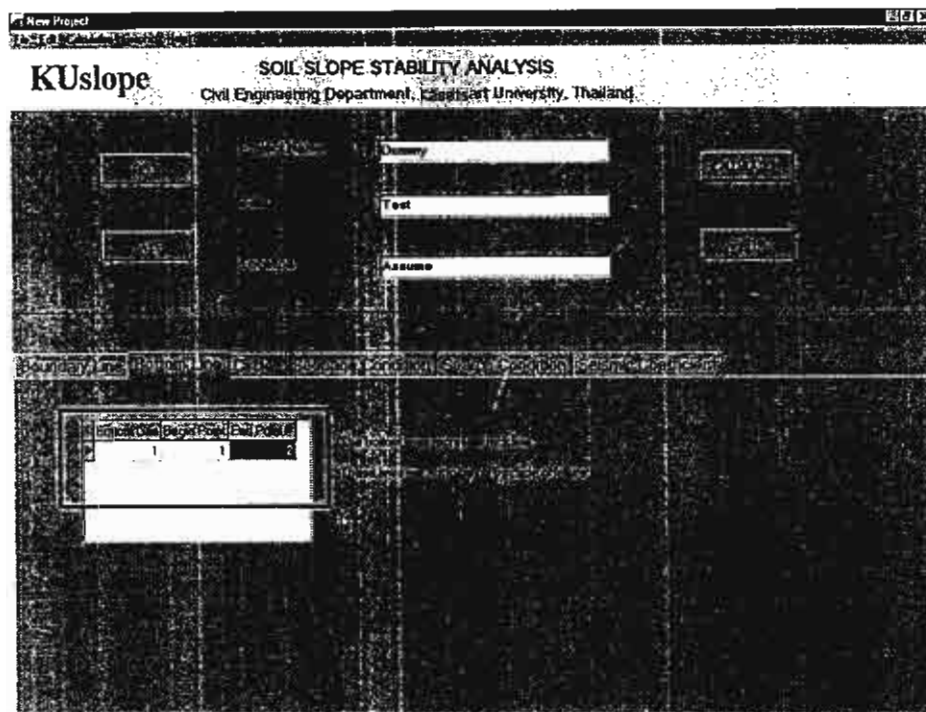
3. จากนั้น ทำการป้อนค่า Line No., Point No., Coordinate X และ Y ของเส้น Boundary Line แต่ละเส้น ในตาราง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

Coordinate

Line No.	Point No.	Coord X	Coord Y
1	1	-20	0
1	2	20	0
2	1	-20	5
2	2	20	5
3	1	-20	15
3	2	-5	15
3	3	5	10
3	4	20	10

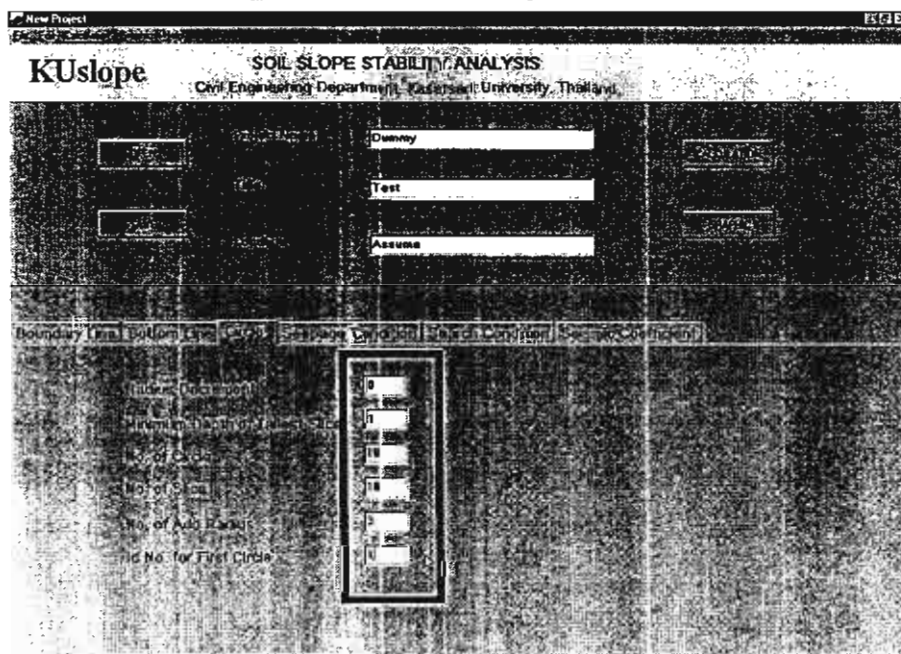
รูปที่ 4

4. ป้อนหมายเลขของ Bottom Line (Rock Line) และค่าจุดเริ่มต้น (Begin Point) กับจุดท้ายสุด (End Point) ของแต่ละ Bottom Line ดังแสดงในรูปที่ 5



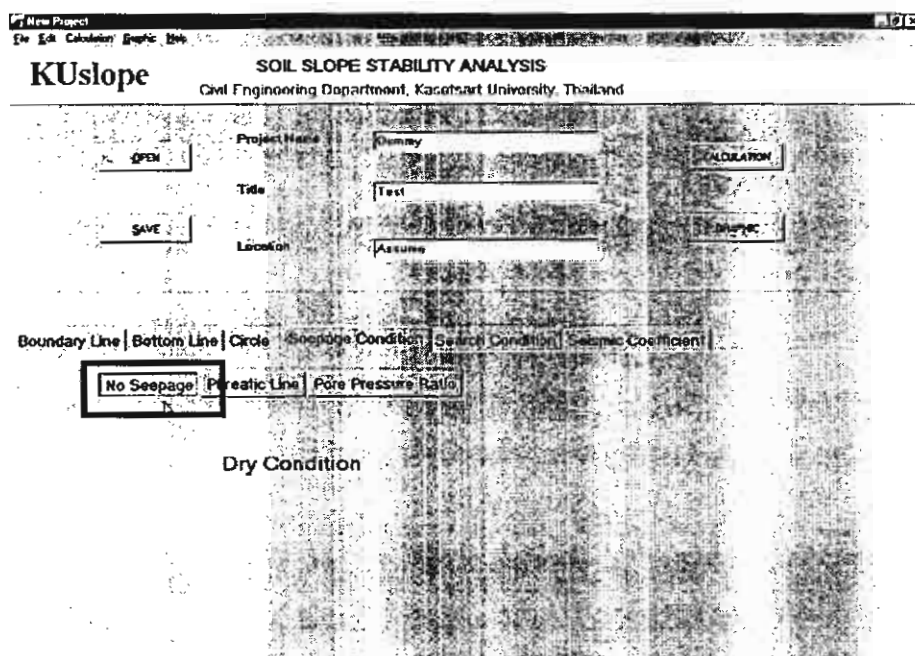
รูปที่ 5

5. เมื่อป้อนข้อมูลของ Boundary Line และ Bottom Line เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เลื่อน Mouse มาคลิกที่แถบ Circle จะปรากฏ Windows ดังแสดงในรูปที่ 6



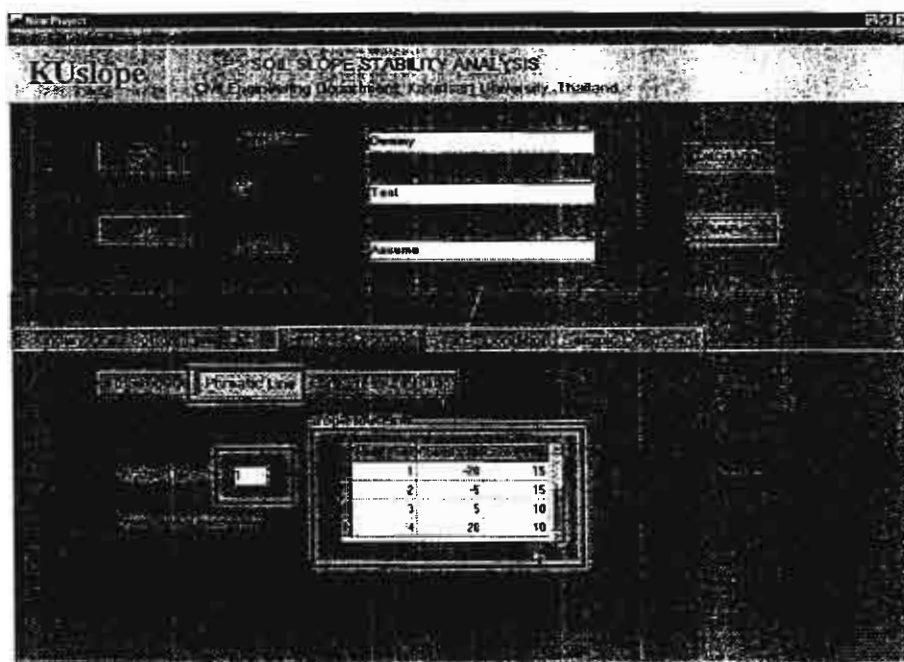
รูปที่ 6

6. ทำการป้อนค่าต่างๆ ลงไปในช่องว่าง ซึ่งก็คือค่าของ Radius Decrement, Minimum Depth of Tallest Slice, No. of Circle, No. of Slice, No. of add Radius และ Id No. for First Circle ตามลำดับ (ต้องกรอกข้อมูลให้ครบทุกช่อง มิเช่นนั้นถ้าช่องใดว่าง คอมพิวเตอร์จะนับค่าเป็นศูนย์)
7. เลื่อน Mouse ไปคลิกที่แถบ Seepage Condition ในกรณีที่โมดูลสภาพการซึมน้ำให้คลิกที่คลิกที่ ปุ่ม No Seepage ดังแสดงในรูปที่ 7



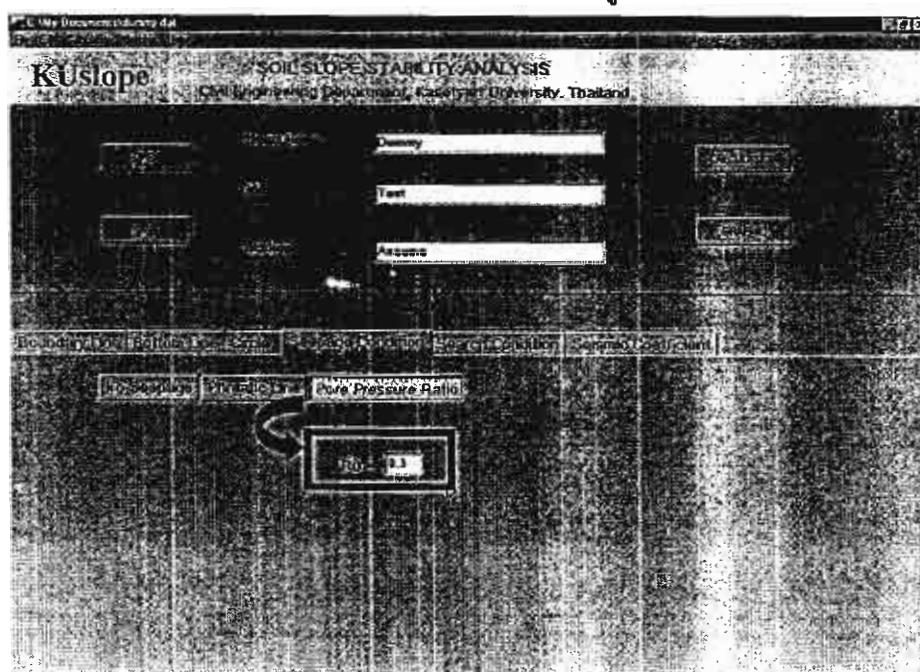
รูปที่ 7

8. ถ้าในกรณีที่สภาพการซึมน้ำถูกกำหนดด้วยเส้น Piezometric line (with Phreatic surface) ก็ให้คลิกที่ ปุ่ม Phreatic line แล้วทำการป้อนข้อมูลลงไป ซึ่งก็คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ (Water Density) และ Coordinate ของเส้นผิวน้ำตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8



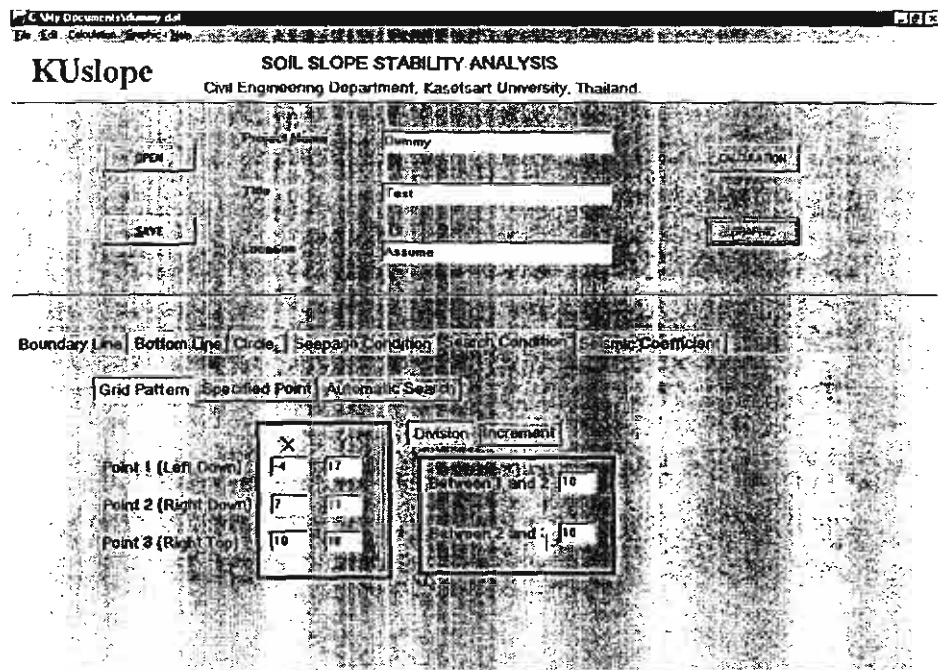
รูปที่ 8

9. ในกรณีที่สภาพการซึมน้ำถูกกำหนดด้วย Pore Pressure Ratio (R_u) ก็ให้ทำการคลิกที่ ปุ่ม Pore Pressure Ratio และป้อนค่าลงไปในช่วงว่าง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9

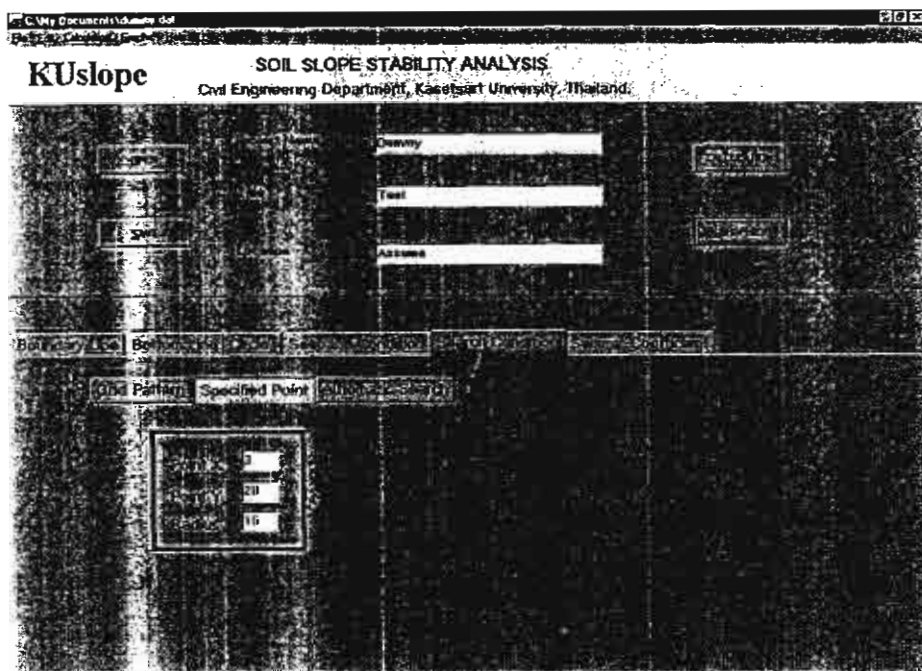
10. กำหนดรูปแบบของการค้นหา โดยคลิกที่แถบ Search Condition ในกรณีที่ต้องการค้นหาเป็นโครงข่าย สามารถทำได้โดย คลิกที่ปุ่ม Grid Pattern แล้วกรอกข้อมูลของตาราง Grid ที่จะทำการ Search ดังแสดงในรูปที่ 10 (ดูรายละเอียดของการค้นหาได้ใน คู่มือหน้า 15)



รูปที่ 10

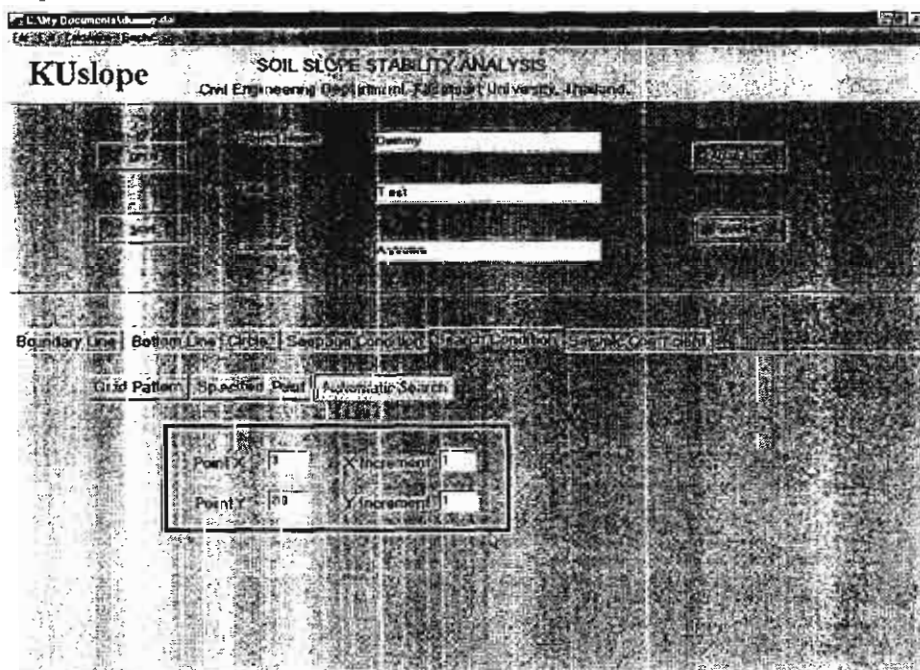
สำหรับการ Search ด้วยวิธี Grid Pattern นั้นต้องทำการป้อนจำนวนส่วนแบ่งระหว่างจุด #1 กับ #2 และระหว่างจุด #2 กับ #3 ดังแสดงในรูปที่ 10

และถ้าต้องการใช้วิธีค้นหาแบบอัตโนมัติร่วมด้วย ก็ให้ทำการระบุค่าของ X, Y Increment ลงไปด้วย โดยคลิกที่ปุ่ม Increment (โดยปกติมักใช้ X, Y Increment เท่ากับ 1)



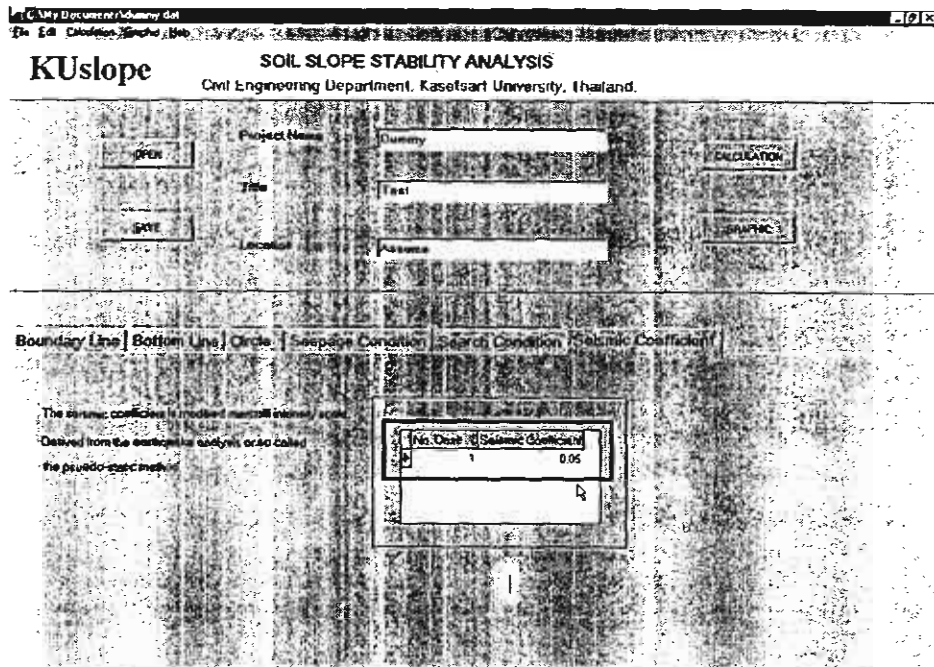
รูปที่ 11

12. ในกรณีที่ต้องการ Search แบบ Automatic สามารถทำได้ โดยคลิกที่แถบ Automatic Search แล้วทำการป้อนค่า Point X, Point Y ที่ช่องว่าง และป้อนค่าของ X, Y Increment ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 12



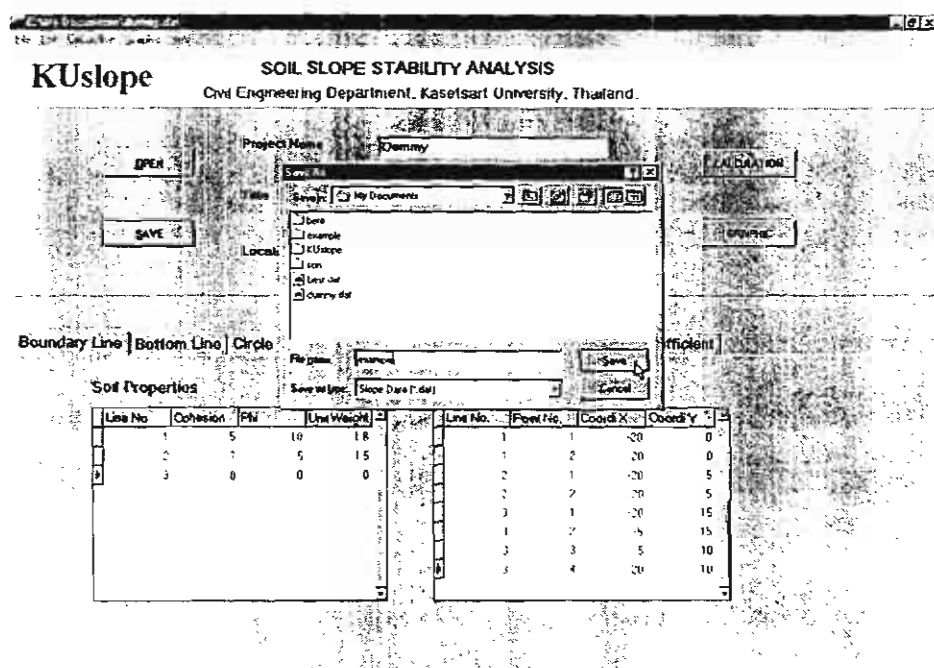
รูปที่ 12

13. คลิกที่แถบ Seismic Coefficient ทำการป้อนข้อมูลลงในตาราง ถ้ามี Case ของการวิเคราะห์หลาย Case ก็ให้ทำการ เพิ่มจนครบจำนวน Case ดังแสดงรูปที่ 13



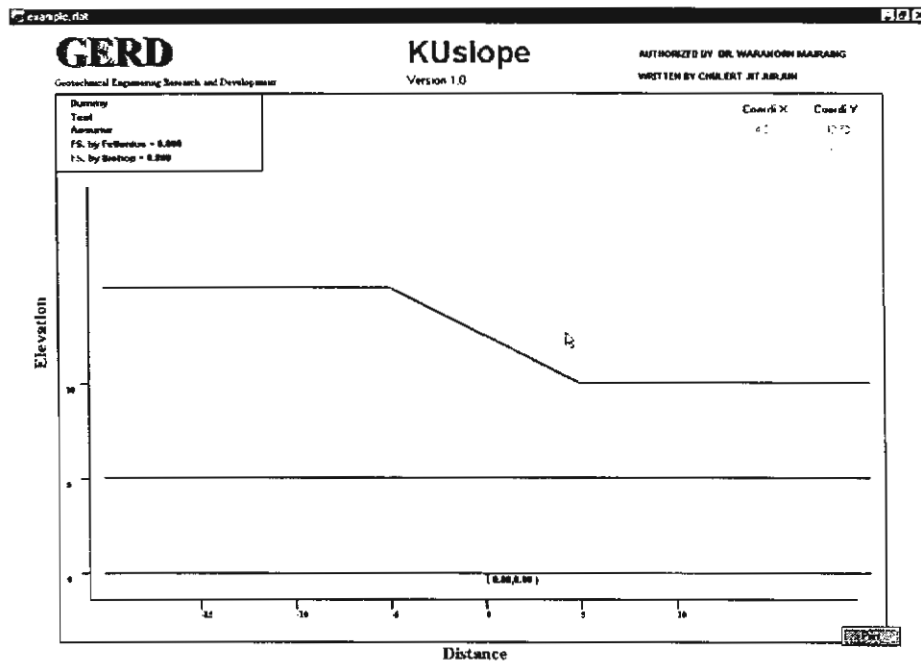
รูปที่ 13

14. เมื่อทำการป้อนข้อมูลทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ให้เลื่อน Mouse ไปคลิกที่ปุ่ม Save หรือคลิกที่เมนู File เลือก Save เพื่อบันทึกข้อมูล ทำการพิมพ์ชื่อ File แล้วคลิกที่ปุ่ม Save ดังรูปที่ 14



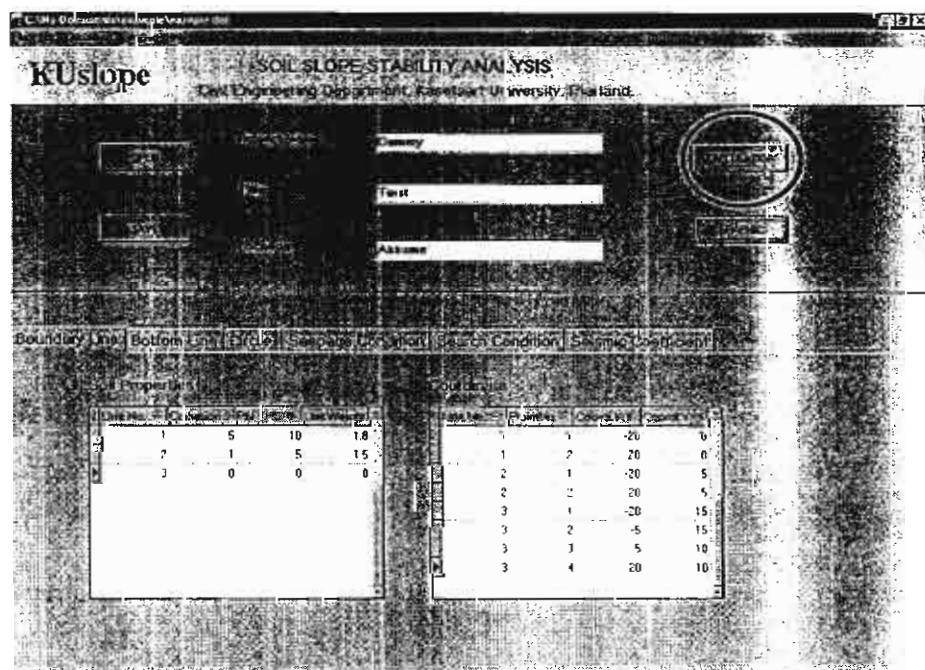
รูปที่ 14

15. ตรวจสอบความถูกต้องของรูปตัด โดยเลื่อน Mouse ไปคลิกที่ปุ่ม Graphic หรือคลิกที่เมนู Graphic เลือก Geometry จะแสดงรูปร่างของรูปตัด ดังแสดงในรูปที่ 15



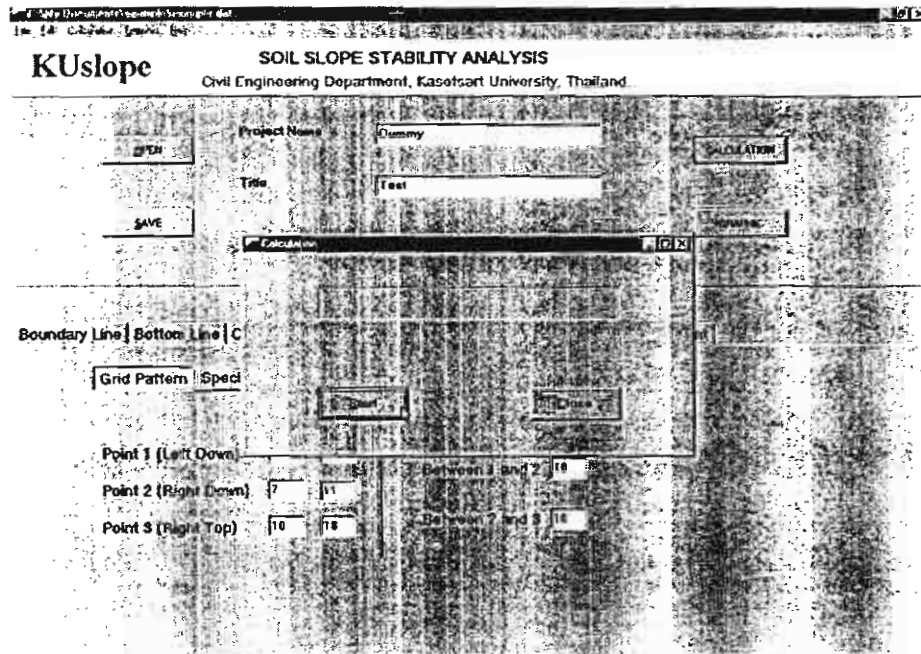
รูปที่ 15

16. เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปตัดเรียบร้อยแล้ว ให้เลื่อน Mouse ไปคลิกที่ปุ่ม Calculation หรือคลิกที่เมนู Calculation เลือก Run ดังแสดงในรูปที่ 16

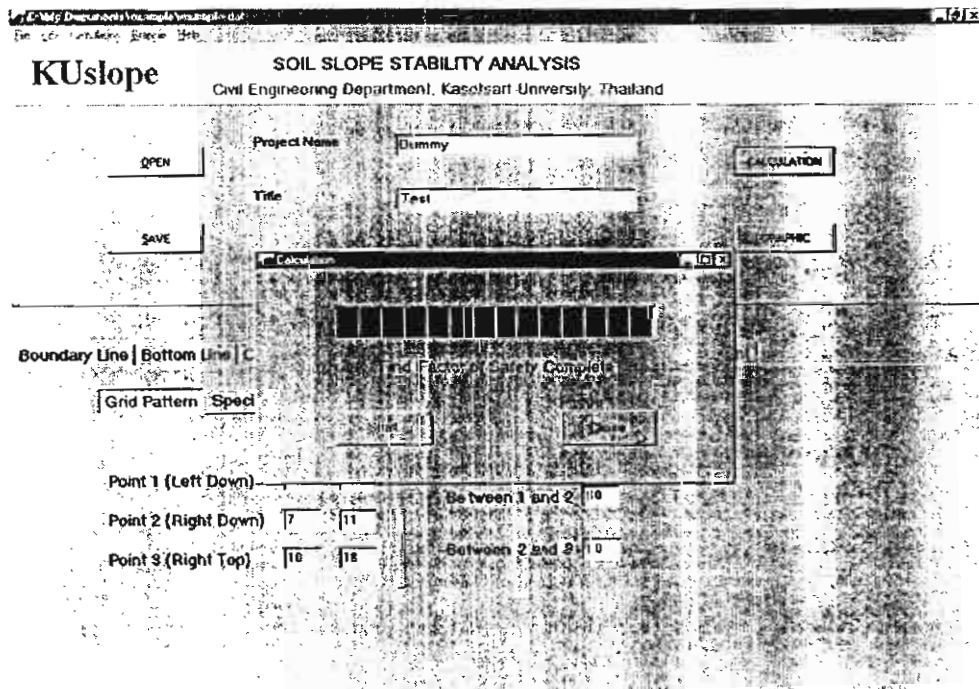


รูปที่ 16

17. หลังจากคลิกที่ปุ่ม Calculation แล้ว จะปรากฏ windows ของการคำนวณขึ้นมา (รูปที่ 17) ให้คลิกที่ปุ่ม Start คอยจนกว่าการคำนวณจะเสร็จสิ้น ซึ่งจะปรากฏข้อความว่า " Find Factor of Safety Complete " ดังแสดงในรูปที่ 18 แล้วจึงคลิกที่ปุ่ม Close เพื่อปิดหน้าต่าง

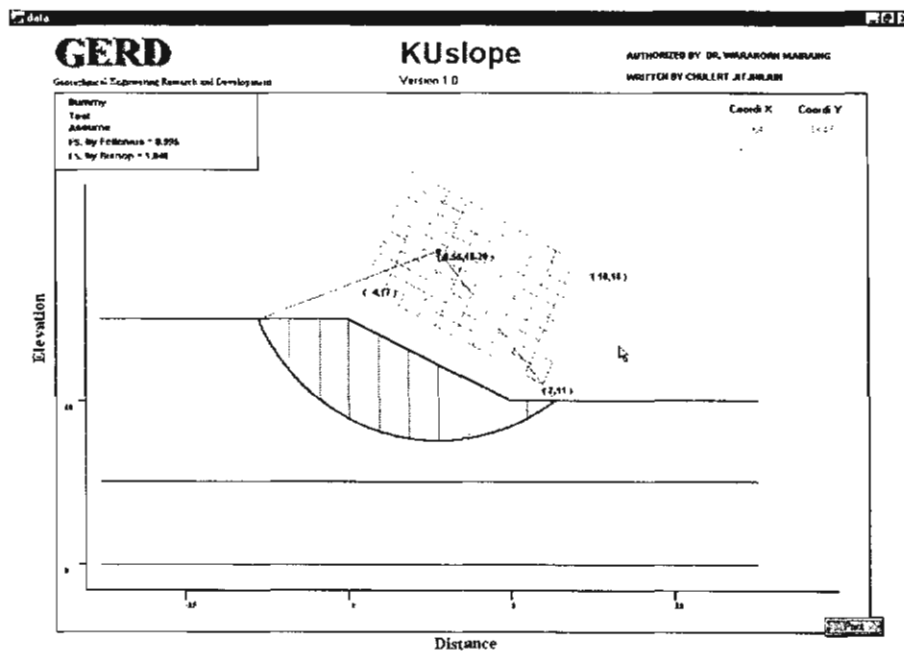


รูปที่ 17



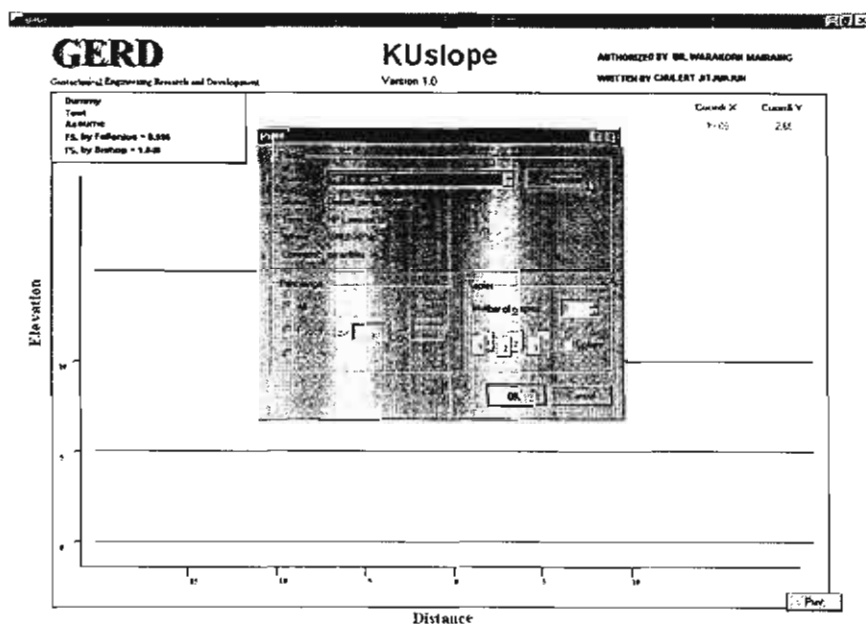
รูปที่ 18

18. คลิกที่ปุ่ม Graphic หรือคลิกที่เมนู Graphic เลือก Geometry เพื่อดูผลที่ได้จากการคำนวณ
 ดังแสดงในรูปที่ 19



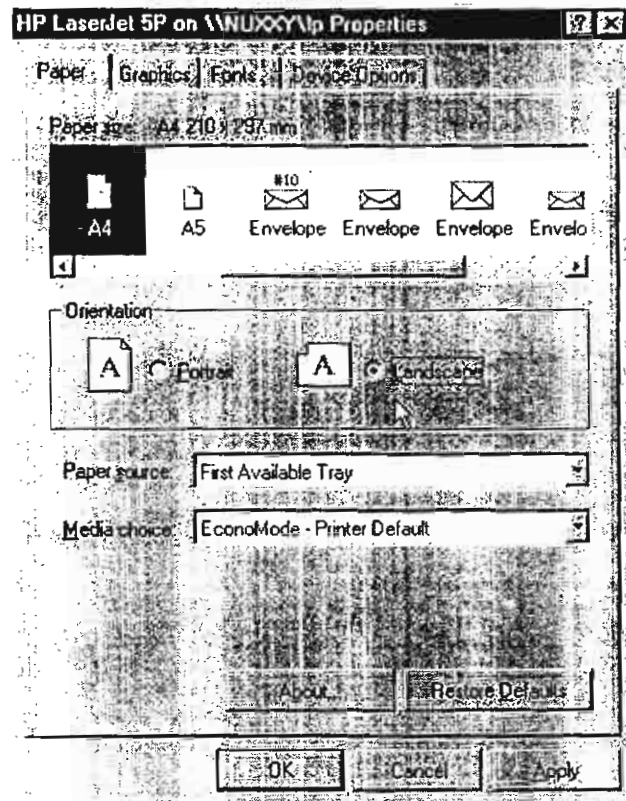
รูปที่ 19

19. ถ้าต้องการที่จะพิมพ์ภาพที่ได้จากการคำนวณออกมาทางเครื่องพิมพ์ ให้คลิกที่ปุ่ม Print ที่อยู่
 ด้านล่าง ทางขวามือ จะปรากฏ windows ของเครื่องพิมพ์ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 20



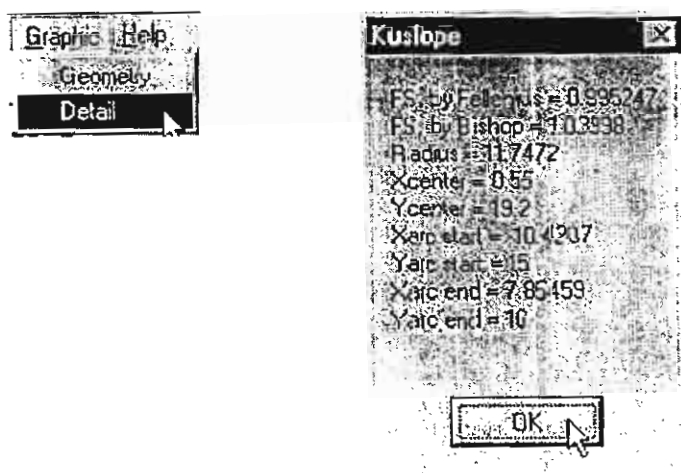
รูปที่ 20

20. ทำการกำหนดชนิดของเครื่องพิมพ์ และคลิกที่ปุ่ม Properties เพื่อกำหนดคุณสมบัติและรูปแบบของกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 21 หลังจากกำหนดเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ปุ่ม OK.



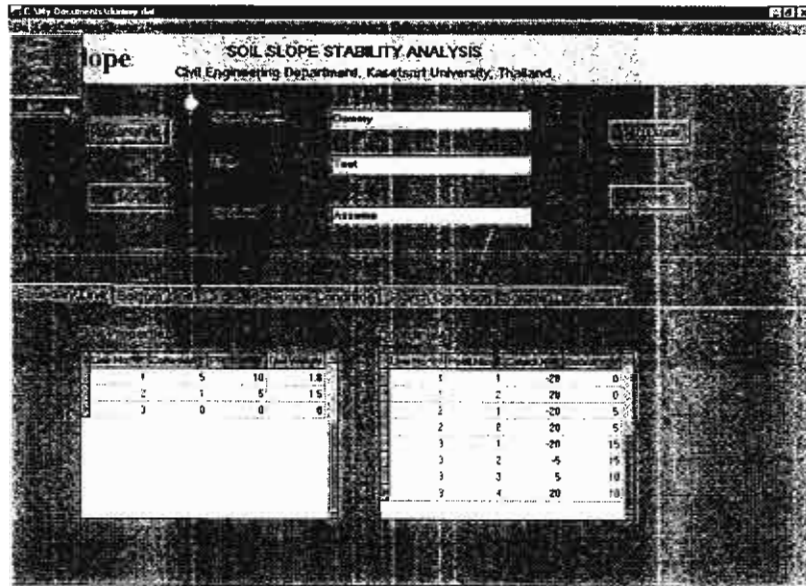
รูปที่ 21

21. ในกรณีถ้าต้องการทราบ รายละเอียดของลักษณะการเคลื่อนพัง ให้เลื่อน Mouse ไปคลิกที่เมนู Graphic เลือก Detail จะปรากฏหน้าต่างแสดงรายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 22

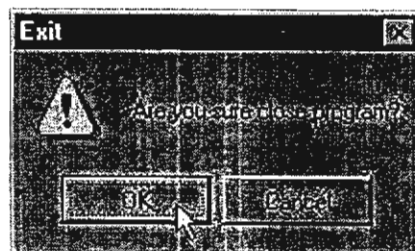


รูปที่ 22

22. เมื่อต้องการจะออกจากโปรแกรม สามารถทำได้หลายทาง เช่น คลิกที่ปุ่มกากบาทที่มุมขวาบนสุดของ Window หรือเลื่อน Mouse ไปคลิกที่เมนู File เลือก Exit ดังแสดงในรูปที่ 22 จะปรากฏ Windows ขึ้นมาเพื่อยืนยันว่าต้องการออกจากโปรแกรมจริงๆหรือไม่ (รูปที่ 23) ให้คลิกที่ปุ่ม OK. เพื่อออกจากโปรแกรม



รูปที่ 22



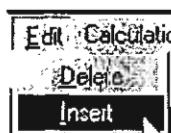
รูปที่ 23

23. ในขณะที่กำลังทำงานถ้าต้องการที่จะลบข้อมูลทั้งแถว(row)ที่อยู่ในตาราง สามารถทำได้โดยเลื่อน Mouse ไปคลิกที่เมนู Edit เลือก Delete ดังแสดงในรูปที่ 24 ข้อมูลในตารางจะถูกลบทั้งไป (อาจใช้ short cut คีย์แทน โดยการกดปุ่ม Ctrl+Delete)



รูปที่ 24

24. ในทางตรงกันข้าม ถ้าต้องการที่จะเพิ่มข้อมูลระหว่างแถว(row)ที่อยู่ในตาราง สามารถทำได้โดยเลื่อน Mouse ไปคลิกที่เมนู Edit เลือก Insert ดังแสดงในรูปที่ 25 ข้อมูลในตารางจะถูกเพิ่มเข้ามา (อาจใช้ short cut คีย์แทน โดยการกดปุ่ม Ctrl+Insert)



รูปที่ 25

STABILITY ANALYSIS DATA FORM

PROJECT.....
SEISMIC COEFFICIENT (Ks).....
RUN BY.....

LOCATION.....
DATA FILE.....
CHECKED BY.....

TITLE.....
RESULT FILE.....
DATE.....

NO. OF BOUNDARY LINES

NO. OF POINT ON B.L. NO.

COORDINATES (X,Y) OF PT. NO.

	B.L. 1	B.L. 2	B.L. 3	B.L. 4	B.L. 5
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

	B.L. 6	B.L. 7	B.L. 10	B.L. 11	B.L. 12
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

RADIUS DECREMENT (USE ZERO FOR EQUAL SPACING)

NO. OF TRIAL CIRCLE AT ONE CENTER

NO. OF ADDITION RADIUS

Control Circle
MINIMUM DEPTH OF THE TALLEST SLICE
INDICATED SLICES
ID. OF THE FIRST CIRCLE

NO. OF BOTTOM LINE

LINE NO. BEGIN POINT END POINT

1,2,3

4,5,6

Bottom Line

SOIL PROPERTIES : c, ϕ , γ FOR SOIL

1,2,3

4,5,6

7,8,9

10,11,12

13,14,15

16,17,18

Soil Properties

SEEPAGE CONDITION (0=NO SEEPAGE, 1=TOP FLOW LINE, 2=PORE PRESSURE RATIO)

FOR SEEPAGE CONDITION OF 1 OR 2, INPUT WATER CONTENT

FOR SEEPAGE CONDITION OF 1, INPUT NO. OF POINTS ON TOP FLOWLINE

COORDINATES (X,Y) OF POINTS ON TOP FLOWLINE

Seepage Condition

SEARCH INDEX (0=GRID, 1=AUTOMATIC, 2=SPECIFIED PT.)

0: FOR GRID, INPUT COORDINATES OF CORNER PT. 1,2,3

0: DIVISION BETWEEN PTS. 1-2 AND 2-3

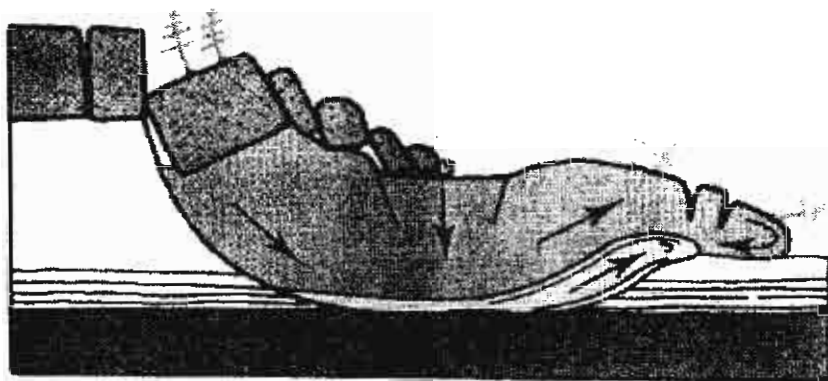
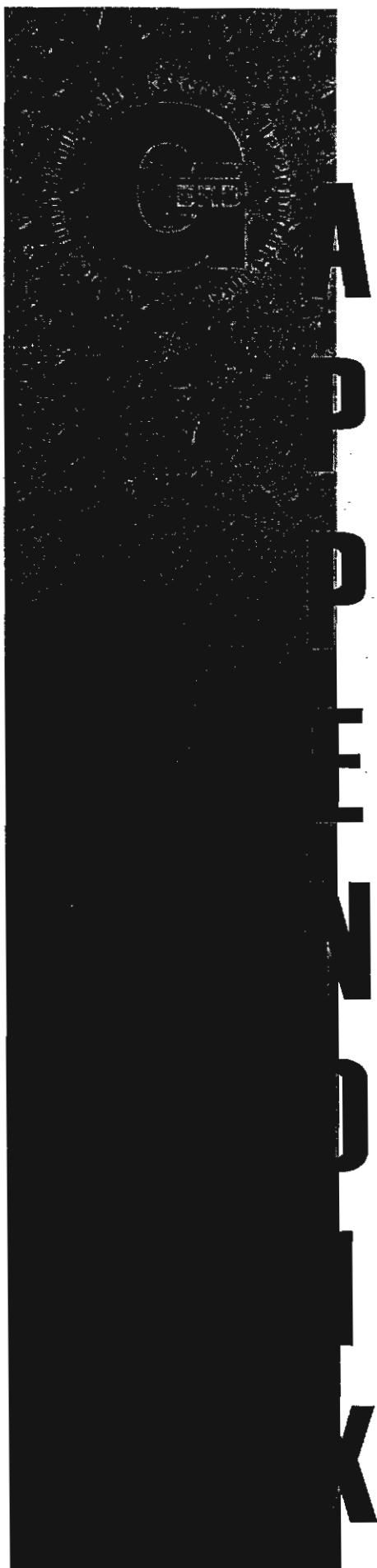
0: FOR FINE SEARCHING, INPUT X-INCREMENT, Y-INCREMENT

1: FOR AUTOMATIC, INPUT TRIAL CENTER (COORDINATES)

1: FOR FINE SEARCHING, INPUT X-INCREMENT, Y-INCREMENT

2: FOR SPECIFIED, INPUT CENTER POINT (X,Y) AND RADIUS

Search Condition



**ตำแหน่งของการพัตต์
ของลาดดินที่สำรวจในสนาม**

ตารางผนวกที่ ค.1 ตำแหน่งของกรณีพิบัติของลาดดินจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง

โครงการ	ลักษณะงาน	ที่ตั้ง			พิกัด		
		บ้าน	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	เหนือ	ตะวันออก
ที่							
1	คันดินถมของถนน	ถนนสายลาดกระบัง-วัดกึ่งแก้ว-บางพลี			กรุงเทพฯ		
2	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3091		สมุทรสาคร	กม.ที่ 0+250 ถึง 18+587	
3	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3263		อยุธยา	กม.ที่ 0+000 ถึง 15+500	
4	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 305		ปทุมธานี	กม.ที่ 45+000 ถึง 60+000	
5	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 305		ปทุมธานี	กม.ที่ 29+500 ถึง 45+000	
6	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 305		นครนายก	กม.ที่ 51 ถึง 62	
7	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 305		นครนายก	กม.ที่ 51+460	
8	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 305			ตลอดเส้นทางที่เกิดการพัง	
9	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 9+300 ถึง 9+700	
10	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 10+400 ถึง 10+700	
11	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 13+100 ถึง 13+800	
12	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 14+600 ถึง 15+000	
13	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 19+700 ถึง 19+975	
14	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 20+375 ถึง 20+775	
15	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 43+100 ถึง 44+050	
16	คันดินถมของถนน		ทางหลวงหมายเลข 3454		อยุธยา	กม.ที่ 44+650 ถึง 45+100	
17	คันดินถมของถนน	"คมอุตสาหกรรมเวลโกร์ที่ถนนบางนา-ตราด			ฉะเชิงเทรา	กม.ที่ 35	
18	คันดินถมของถนน		ทางสายคลองด่าน-บางบ่อ		สมุทรปราการ	กม.ที่ 5+750 ถึง 6+750	
19	คันดินถมของถนน	ในโครงการสนามบินนานาชาติแห่งที่สองที่หนองจอก			กรุงเทพฯ		
20	งานดินถมสำหรับเป็น Stockpile	ในโครงการสนามบินนานาชาติแห่งที่สองที่หนองจอก			กรุงเทพฯ		
21	งานขุดดิน	ในโครงการสนามบินนานาชาติแห่งที่สองที่หนองจอก			กรุงเทพฯ		
22	งานขุดดินคลองระบายน้ำ	ประตูน้ำเจริญราชทางสายหมายเลข 3			สมุทรปราการ	ที่กม. 39	
23	งานขุดดินเป็นอ่างเก็บน้ำดี	นิคมสวนอุตสาหกรรมพานทอง			อ่างทอง		
24	งานขุดดินเป็นทะเลสาบ	โครงการ A			กรุงเทพฯ		

ตารางผนวกที่ ค.1 (ต่อ)

โครงการ	ลักษณะงาน	ที่ตั้ง			พิกัด		
		บ้าน	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	เหนือ	ตะวันออก
25	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.สัมปอ	นาสินวน	เมือง	มุกดาหาร	1821190	478793
26	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	วัดพระศรีมหาโพธิ์ ห้วยใหญ่ ห้วยใหญ่			มุกดาหาร	1847737	474310
27	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ท่าไค้	นาสินวน	ห้วยใหญ่	มุกดาหาร	1817812	483811
28	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ห้วยกอก	ดอนตาล	ดอนตาล	มุกดาหาร	1799743	497416
29	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.นาสนาม	เขมราฐ	เขมราฐ	อุบลราชธานี	1775318	518956
30	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ห้วยไผ่	ห้วยไผ่	โขงเจียม	อุบลราชธานี	1696614	550081
31	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.คันพระลาน	นาตาล	กิ่งอ.นาตาล	อุบลราชธานี	1756279	538682
32	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	วัดสว่างเวฬุวัน ห้วยไผ่		โขงเจียม	อุบลราชธานี	1696614	550018
33	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ยักษ์คู่	ขามุนาม	ขามุนาม	อำนาจเจริญ	1793962	501827
34	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.นาสีดา	ขามุนาม	ขามุนาม	อำนาจเจริญ	1798183	499211
35	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.อาจสามารถ 5 อาจสามารถ		เมือง	นครพนม	1972237	426644
36	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.อาจสามารถ 6 อาจสามารถ		เมือง	นครพนม	1972237	426644
37	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.นาทม		ธาตุพนม	นครพนม	1882019	471877
38	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	โพธิ์ชัย			หนองคาย		
39	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	ศรีเชียงใหม่			หนองคาย		
40	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 2146			ขอนแก่น	กม.ที่ 0+000 ถึง 19+808.2	
41	ริมตลิ่งแม่น้ำเจ้าพระยา	ด.โพธิ์งามดำ		สบพญา	ชัยนาท		
42	ริมตลิ่งแม่น้ำเจ้าพระยา	วัดไชโยวรวิหาร		ไชโยอ่างทอง	อ่างทอง		
43	ริมตลิ่งแม่น้ำเจ้าพระยา	วัดแก้วฟ้าจุฬามณี		บางซื่อ	กรุงเทพฯ		
44	ริมตลิ่งแม่น้ำบางปะกง	ค่ายศรีโสธร			ฉะเชิงเทรา		
45	ริมตลิ่งแม่น้ำยม	วัดราชธานี		เมือง	สุโขทัย		
46	ริมตลิ่งแม่น้ำปากพนัง			ปากพนัง	นครศรีธรรมราช		
47	ริมตลิ่งแม่น้ำน่าน			เมือง	พิษณุโลก		
48	ริมตลิ่งแม่น้ำปราจีนบุรี			เมือง	ปราจีนบุรี		
49	งานตัดไหล่เขาของถนน	Hue Hue Road between Sydney and NewCastle ประเทศออสเตรเลีย			NewSouth Wales		
50	งานตัดไหล่เขาของบ่อ W transfer depot	Lanceley Artarmon ประเทศออสเตรเลีย			NewSouth Wales		

ตารางผนวกที่ ค.1 (ต่อ)

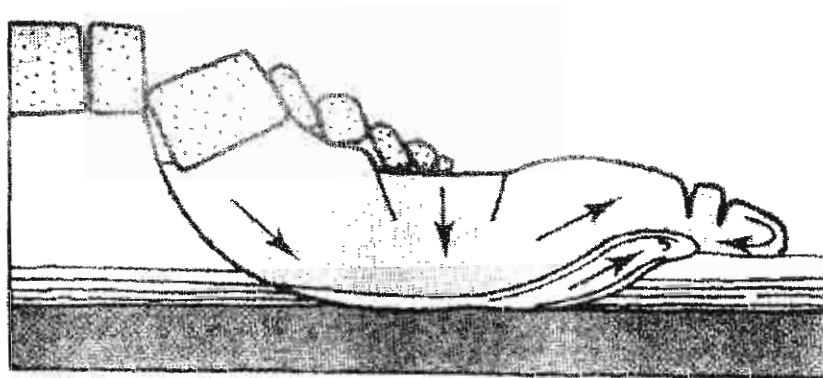
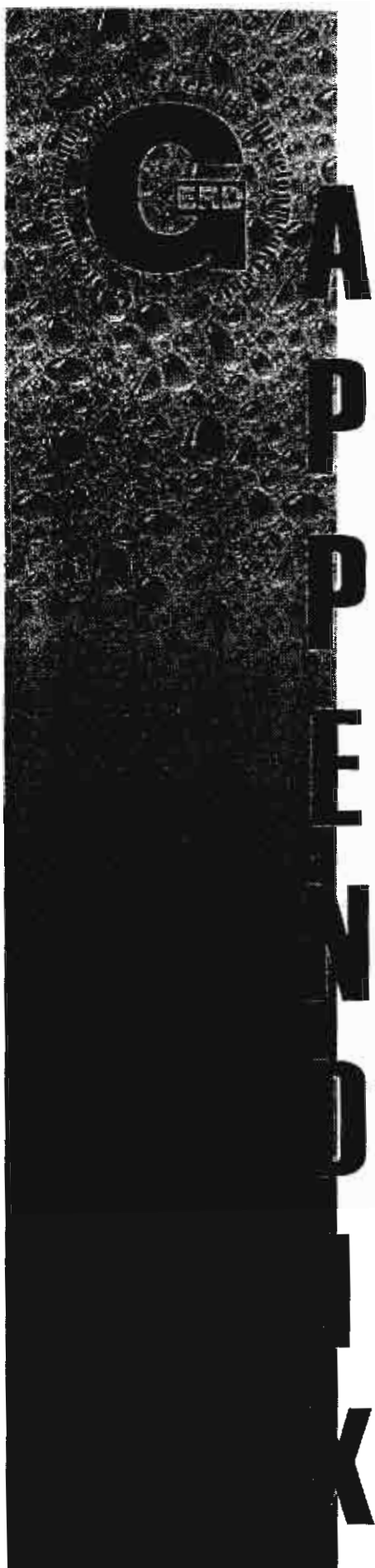
โครงการ ที่	ลักษณะงาน	ที่ตั้ง			พิกัด		
		บ้าน	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	เหนือ	ตะวันออก
51	งานถมดิน	บน NewCastle Harbour Offshore			NewSouth		
		ประเทศออสเตรเลีย			Wales		
52	คันดินถมบน Quaternary Sediments	Hunter Valley ประเทศออสเตรเลีย			NewSouth		
					Wales		
53	ลาดเขาธรรมชาติ	แถบภูเขาหลวงในจังหวัดนครราชสีมา และสุราษฎร์ธานี					

ตารางผนวกที่ ค:2 ตำแหน่งของกรณีพิบัติของลาดดินที่ออกสำรวจในภาคสนาม

โครงการ ที่	ลักษณะงาน	ที่ตั้ง			พิกัด	
		บ้าน	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	เหนือ ตะวันออก
1	คันดินถมของถนน	ทางหลวงหมายเลข 3261			ปทุมธานี	กม.ที่ 28+540
2	คันดินถมของถนน	ทางหลวงหมายเลข 3261			ปทุมธานี	กม.ที่ 29+500
3	คันดินถมของถนน	ทางหลวงหมายเลข 305			ปทุมธานี	กม.ที่ 32+037.5
4	คันดินถมของถนน	ทางหลวงหมายเลข 305			ปทุมธานี	กม.ที่ 40+957.5
5	คันดินถมของถนน	ทางหลวงหมายเลข 34			สมุทรปราการ	กม.ที่ 22+540
6-8	คันดินถมของถนน	ถนนอยู่วิทยา			กรุงเทพฯ	กม.ที่ 0+100,0+200,0+300
9	คันดินถมของถนน	ถนนอยู่วิทยา			กรุงเทพฯ	กม.ที่ 1+200
10	คันดินถมของถนน	ถนนอยู่วิทยา			กรุงเทพฯ	กม.ที่ 3+700
11-12	คันดินถมของถนน	ถนนร่วมพัฒนา			กรุงเทพฯ	กม.ที่ 2+000 และ 5+000
13	งานเนินดินถม	ทางรถไฟสายกรุงเทพฯ-มาบตาพุด			ระยอง	
14	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ้านวัดธาตุ		เมือง	หนองคาย	1980626 263535
15	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	วัดท่าสายทอง		เมือง	หนองคาย	1983069 264945
16	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บริเวณอยู่ต่อเรือ		เมือง	หนองคาย	
17	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ้านท่าม่วง			หนองคาย	2014723 304785
18	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.หนองหอยท่า	ธาตุพนม		นครพนม	1875766 471094
19	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ธาตุพนม	ธาตุพนมเหนือ	ธาตุพนม	นครพนม	1874473 471077
20	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.น้ำก่ำ	น้ำก่ำ	ธาตุพนม	นครพนม	1869315 471380
21	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.ทรายมูล	น้ำก่ำ	ธาตุพนม	นครพนม	1860166 472113
22	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	วัดพระแม่ไผ่ท่าสองคอน	ห้วยไผ่		มุกดาหาร	1854881 471772
23	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	บ.เหนือ	เขมราฐ	เขมราฐ	อุบลราชธานี	1773798 523536
24	ริมตลิ่งแม่น้ำโขง	รร.บ้านไต้	เขมราฐ	เขมราฐ	อุบลราชธานี	1773360 524882
25-28	คันดินถมของถนน	ถนนเลียบคลองในเขตหนองจอก			กรุงเทพฯ	
29	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 1			ลำปาง	2092364 598066
30	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 103			ลำปาง	2055328 614610
31	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 11			ลำปาง	1996574 573064
32	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 11			แพร่	1989862 586845
33	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 11			แพร่	1990129 587380
34-40	งานตัดไหล่เขา	ดอยอ่างขาง จำนวน 7 จุดพิบัติ			เชียงใหม่	
41-48	งานตัดไหล่เขา	ดอยตุง จำนวน 8 จุดพิบัติ			เชียงราย	
49	งานตัดเขา	เขื่อนแม่หลวงหลวง			เชียงราย	2216243 527411
50-53	งานตัดเขา	เหมืองแม่เมาะ จำนวน 4 จุดพิบัติ			ลำปาง	
54-55	ลาดเขาธรรมชาติ	ที่ดอยแม่สลองจำนวน 2 จุดพิบัติ			เชียงราย	
56-58	งานตัดไหล่เขา	ที่ดอยแม่สลองจำนวน 3 จุดพิบัติ			เชียงราย	
59	ลาดเขาธรรมชาติ	เขื่อนแม่สลอง			แพร่	2046301 630675
60	งานถมดิน	Plant คอนกรีตผสมเสร็จของ CPAC			กรุงเทพฯ	

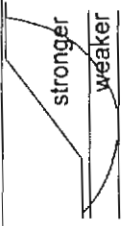

ตารางผนวกที่ ค.2 (ต่อ)

โครงการ ที่	ลักษณะงาน	ที่ตั้ง			พิกัด		
		บ้าน	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	เหนือ	ตะวันออก
61	งานถมดิน	โครงการ A แหล่งที่พัฒนาอสังหาริมทรัพย์			กรุงเทพฯ		
62-63	งานตัดไหล่เขาของถนน	ถนนริมเข้านางหงษ์ จำนวน 2 จุดตัด			พังงา		
64-65	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4 จำนวน 2 จุดตัด			พังงา	กม.ที่ 181+000 และกม.ที่ 183+000	
66	งานตัดไหล่เขาของถนน	ใกล้เข้านางหงษ์			พังงา	8.53551	98.554
67	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4			พังงา	8.42114	98.4862
68	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4			พังงา	8.57503	98.362
69-72	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 401 จำนวน 4 จุดตัด			พังงา		
73	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4025			ภูเก็ต	7.96714	98.2839
74-78	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4233 จำนวน 5 จุดตัด			ภูเก็ต		
79	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 4028			ภูเก็ต	7.8579	98.2927
80	ลาดเขาธรรมชาติ	หลังโครงการบริษัทภูเก็ตแพนด้าซี			ภูเก็ต	7.94997	98.2971
81	งานตัดไหล่เขาของถนน	ทางหลวงหมายเลข 401 จำนวน 4 จุดตัด			สุราษฎร์ธานี	8.8833	98.5058
82-84	ลาดเขาธรรมชาติ	บ.เหมืองทวด บ้านนาสาร จำนวน 3 จุดตัด			สุราษฎร์ธานี		
85-88	ลาดเขาธรรมชาติ	บ.กระพูนเหนือ ต.เจ็ดยี่สิบ จ.ฉะเชิงเทรา จำนวน 4 จุดตัด			นครศรีธรรมราช		
89-91	ลาดเขาธรรมชาติ	อ.พิปูน จำนวน 3 จุดตัด			นครศรีธรรมราช		
92	ลาดเขาธรรมชาติ	บ.พุดลี เมือง			นครศรีธรรมราช	8.43956	99.8669
93-96	ลาดเขาธรรมชาติ	อ.ลานสกา จำนวน 4 จุดตัด			นครศรีธรรมราช		
97	ลาดเขาธรรมชาติ	ร่อนพิบูลย์			นครศรีธรรมราช	8.28303	99.8221
98-99	งานตัดไหล่เขาของเหมือง	โรงงานปูนซิเมนต์ ที่อ.ทุ่งสง จำนวน 2 จุดตัด			นครศรีธรรมราช		
100	ลาดเขาธรรมชาติ	สุสานหอย ต.ไล่ไทย เมือง			กระบี่		
101	ลาดเขาธรรมชาติ	เขาคิชฌกูฏ			จันทบุรี		
102	งานตัดไหล่เขา	หลังศาลาวัดสวนหงษ์			นครนายก		
103	งานตัดไหล่เขา	สำนักสงฆ์ เขาน้อย			นครนายก		
104	ริมตลิ่งแม่น้ำบางปะกง	บริเวณบ้านแหลมใต้			ฉะเชิงเทรา		
105	งานตัดไหล่เขา	ทางหลวงหมายเลข 108 อ.ขุนยวม			แม่ฮ่องสอน		



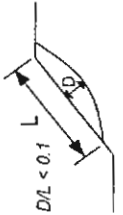
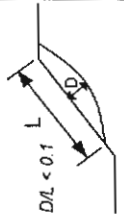
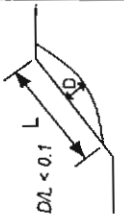
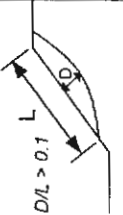
ແພນກູມີຂອງກຸ໊າໃນຊຸ້ານຄວາມຮູ້
KB1

ตารางผนวกที่ ง.1 (ต่อ)

Result	Explanation
R4	 <p>Rotational slide with circle tangent to the base of weaker layer</p>
R5	 <p>Rotational slide with circle tangent to the base of upper weaker layer or tangent to the lower stronger layer; both should be considered in slope stability analysis and using the lower factor of safety</p>
R6	<p>Translational slide or Complex type composed of circular surface from the ground surface and planar surface along the base of weaker layer, both should be considered in slope stability analysis and using the lower factor of safety</p>


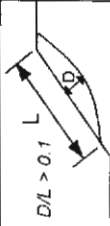


Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

ตารางผนวกที่ ง.1 (ต่อ)

Explanation				
Result	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status
SF	 $D/L < 0.1$	Simplified Bishop method or Fellinius method or Infinite slope method	Effective strength analysis	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used
SA	 $D/L < 0.1$	Simplified Bishop method or Fellinius method or Infinite slope method	Effective strength analysis	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.
SU	 $D/L < 0.1$	Simplified Bishop method or Fellinius method or Infinite slope method	Effective strength analysis	Failure of slope will not occur; the slope is stable.
SLF	 $D/L > 0.1$	Simplified Bishop method or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective stress for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used




Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

ตารางผนวกที่ 3.1 (ต่อ)

Result	Explanation			
	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status
SLA	 <p>Slope rotational slide with the ratio of D/L more than 10 %</p>	Simplified Bishop method or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective stress for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.
SLU	 <p>Slope rotational slide with the ratio of D/L more than 10 %</p>	Simplified Bishop method or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective stress for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Failure of slope will not occur; slope is stable.
TF	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective strength analysis for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used
TA	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective strength analysis for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.





Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

ตารางผนวกที่ ง.1 (ต่อ)

Explanation					
Result	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status	
TU	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi \neq 0$) or effective strength analysis for stiff to hard clay. Effective strength analysis for coarse grained soil and silt	Failure of slope will not occur; slope is stable	
BF	 <p>Base rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi = 0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used	
BA	 <p>Base rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi = 0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.	





Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

ตารางผนวกที่ ง.1 (ต่อ)

Explanation				
Result	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status
BU	 <p>Base rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi=0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Failure of slope will not occur; slope is stable
TFC	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used
TAC	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.
TUC	 <p>Toe rotational slide</p>	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Failure of slope will not occur; slope is stable



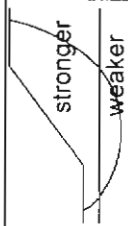
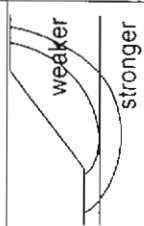
Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

ตารางผนวกที่ 3.1 (ต่อ)

Result	Explanation			
	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status
BFC	 Base rotational slide	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used
BAC	 Base rotational slide	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.
BUC	 Base rotational slide	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method or stability chart	Total strength analysis ($\phi=0$ condition) for very soft to medium stiff soil	Failure of slope will not occur; slope is stable
TFX*	 Toe rotational slide in Bangkok clay	Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used

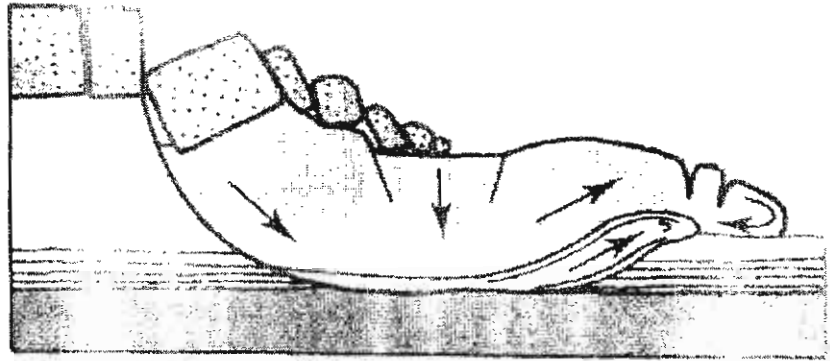
Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done

ตารางผนวกที่ ง.1 (ต่อ)

Explanation				
Result	Type of Movement	Method of Analysis for F.S.	Mode of Strength Analysis	Stability Status
BFX*		Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Failure will occur; slope should be stabilized and the stabilization program can also be used
BAX*		Simplified Bishop method for circular surface or Fellinius method	Total strength analysis ($\phi=0$) for very soft to medium stiff clay	Slope stability can not exactly be evaluated; Analysis should be done.
R1		Rotational slide with the circle going through the weaker layer		
R2		Rotational slide with the circle either tangent to the stronger layer or going through the stronger layer; both should be considered in slope stability analysis and using the lower factor of safety		
R3	Rotational or Translational slide, both should be considered in slope stability analysis and using the lower factor of safety			

Note This is used for guide line only. Slope stability analysis must be done.

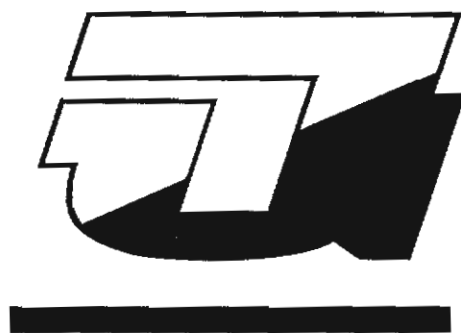
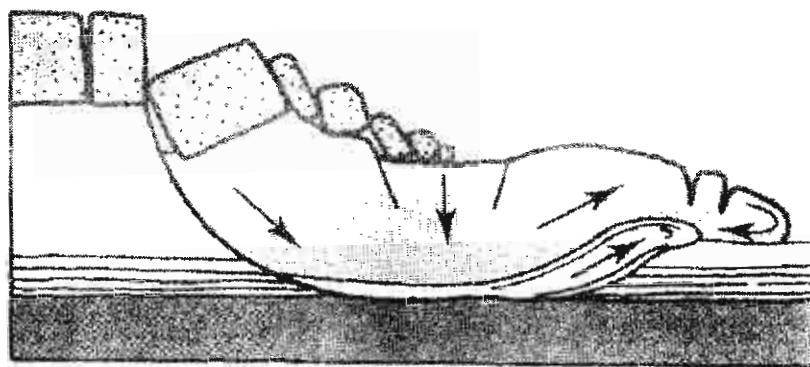
This result is analyzed from soil around Ruam Pattana Road, Amphor Nongchok, Bangkok ($S_u = 0.24\sigma'_{vo}$)



แผนภูมิของกรกฎในฐานควมรู้
KB2

ตารางผนวกที่ จ.1 คำจำกัดความของคำตอบในฐานความรู้ KB2 ของระบบ

Result	คำอธิบาย
See Soil Chart/ A = 0 000 g to 0 010 g	ความแข็งแรงของดินดูจากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 และค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหวเท่ากับ 0 ถึง 0.01g
See Soil Chart/ A = 0 010 g to 0 025 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.010 – 0.025 g
See Soil Chart/ A = 0 025 g to 0 050 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.025 – 0.050 g
See Soil Chart/ A = 0 050 g to 0 100 g	คุณสมบัติของดินดูจากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 และ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.050 – 0.100 g
BKKC/ A = 0 000 g to 0 010 g	ชั้นดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าความแข็งแรงของดิน, S_u สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ $S_u = f * \sigma'_{vo}$ เมื่อ f มีค่าประมาณ 0.24 ถึง 0.27 และ σ'_{vo} เป็น Effective Overburden Pressure และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.000 – 0.010 g
BKKC/ A = 0 010 g to 0 025 g	ชั้นดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าความแข็งแรงของดิน, S_u สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ $S_u = f * \sigma'_{vo}$ เมื่อ f มีค่าประมาณ 0.24 ถึง 0.27 และ σ'_{vo} เป็น Effective Overburden Pressure และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.010 – 0.025 g
BKKC/ A = 0 025 g to 0 050 g	ชั้นดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าความแข็งแรงของดิน, S_u สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ $S_u = f * \sigma'_{vo}$ เมื่อ f มีค่าประมาณ 0.24 ถึง 0.27 และ σ'_{vo} เป็น Effective Overburden Pressure และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.025 – 0.050 g
BKKC/ A = 0 050 g to 0 100 g	ชั้นดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าความแข็งแรงของดิน, S_u สอดคล้องกับสมการของ SHANSEP คือ $S_u = f * \sigma'_{vo}$ เมื่อ f มีค่าประมาณ 0.24 ถึง 0.27 และ σ'_{vo} เป็น Effective Overburden Pressure และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวเท่ากับ 0.050 – 0.100 g



**การจำแนกพื้นที่การปกครอง
ตามความเข้มขของแผ่นดินไหว**

ตารางผนวกที่ จ.1 สภาพความเข้มของแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย

Zone	Location		Modified Mercalli Scale	K _s
	Province	Amphoe		
A1	Amnat Charoen, Buriram Chaiyaphum , Chanthaburi, Chonburi , Chumphon, Krabi, Mahasarakham , Mukdahan, Nakhon Ratchasima, Narathiwat, Nakhon Si Thammarat, Pattani, Phangnga , Phatthalung, Phuket , Prachinburi, Prachuap Khilikhan, Ranong, Rayong , Roi Et, Sa Kaeo, Satun , Si Saket, Songkhla , Surat Thani, Surin , Trang, Trad, Ubon Ratchathani, Yala, Yasothon	Every amphoe in each province	I - III	0 to 0.01g
	Chachoengsao	Except Bang Nam Preo, and Muang		
	Kalasin	Except Khammuang, and Tha Khan To		
	Khon Kaen	Except Khao Suan Kwang		
A2	Bangkok , Loei, Nakhon Nayok , Nakhon Phanom, Nong Bua Lamphu, Nong Khai, Petchaburi , Phetchabun, Phitsanulok , Sakon Nakhon, Samut Prakarn , Samut Sakhon, Samut Songkhram, Sukothai, Udon Thani	Every Amphoe in each province	IV	0.01g to 0.025g
	Chachoengsao	Bang Nam Preo, and Muang		
	Kalasin	Khammuang, and Than Khan To		
	Khon Kaen	Khao Suan Kwang		
	Lopburi	Chai Badan , Tha Luang, King Amphoe Lamsonthi, and Phattana Nikhom		
	Nonthaburi	Except Sai Noi		
	Pathum Thani	Except Lat Lum Kaeo		
	Saraburi	Except Phraphut Thabat, Nong Dan, Don Put, and Ban Mo		
	Uttaradit	Except Ban Khon, Fak Tha, Tha Pla, Muang, and Lap Lae		

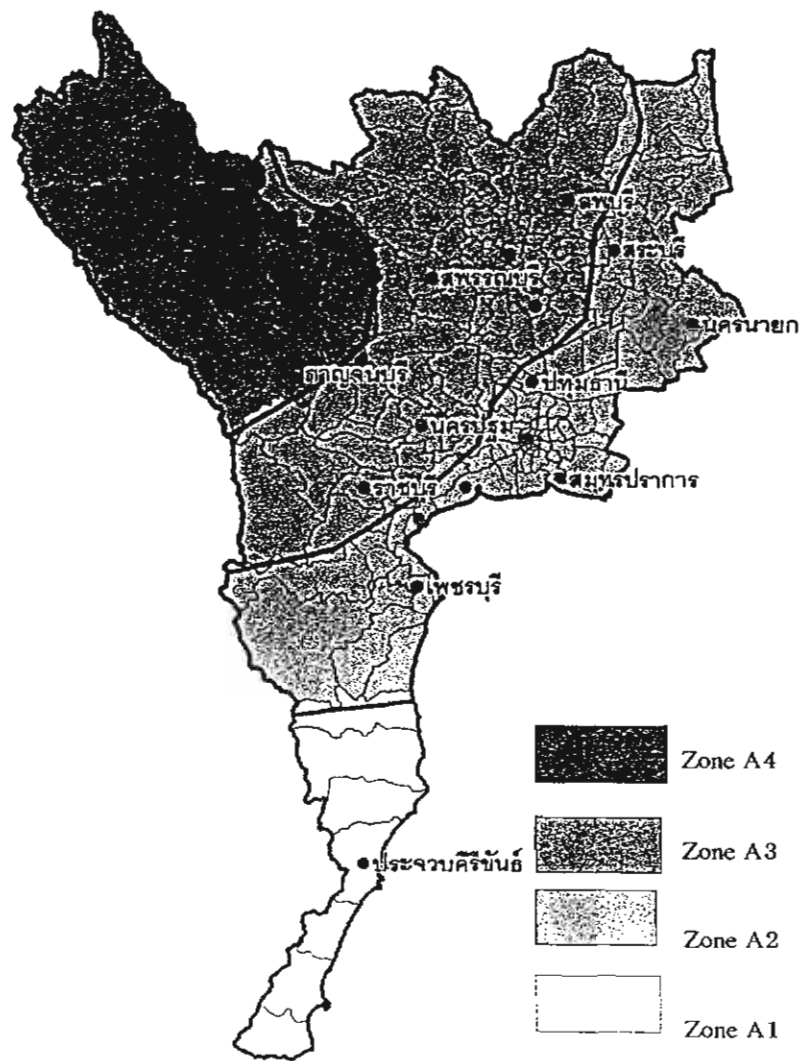
ตารางผนวกที่ ๑.1 (ต่อ)

Zone	Location		Modified Mercalli Scale	K _s
	Province	Amphoe		
A3	Angthong , Chainat, Kampaeng Phet, Lampang, Lamphun , Nakhon Pathom, Nakhon Sawan , Nan, Phayao, Phichit, Phra Nakhon Siayudhya, Phrae , Ratchaburi, Singburi , Suphanburi, Tak	Every amphoe in each province	V-VI	0.025g to 0.05g
	Chiangmai	Except Mae Ai , Fang, Chiang Dao, Wang Haen, King Amphoe Chaipakan, Mae Taeng, Phrao		
	Chiangrai	King Amphoe Khun Tan, Thoeng,		
	Kanchanaburi	Phaya Meng Rai, and Padaet King Amphoe Dan Makham,		
	Lopburi	Tha Muang , and Tha Maka Except Chai Badan, King Amphoe Lam Sonthi,		
	Mae Hong Son	Tha Luang, and Phattana Nikom Except Pai, and King Amphoe		
	Nonthaburi	Pangmapha		
	Pathum Thani	Sai Noi		
	Saraburi	Lat Lumkaeo Phraphut Thabat, Non Dan,		
	Uthai Thani	Don Put, and Ban Mo		
	Uttaradit	Except Ban Rai Ban Khok, Fak Tha, Tha Pla, Muang, Lae Lae		
A4	Chiangmai	Mae Ai, Fang, Chaing Dao, Wang Haeng, King Amphoe Chaipakan, Mae Taeng, and Phrao	VII	0.05g to 0.1g
	Chiang Rai	Except King Amphoe Khun Tan, Thoeng, Phaya Meng Rai, and Pa Daet		
	Kanchanaburi	Except King Amphoe Dan Makham, Tha Muang, and Tha Maka		
	Mae Hong Song Uthaithani	Pai , and King Amphoe Pangmapha Ban Rai		

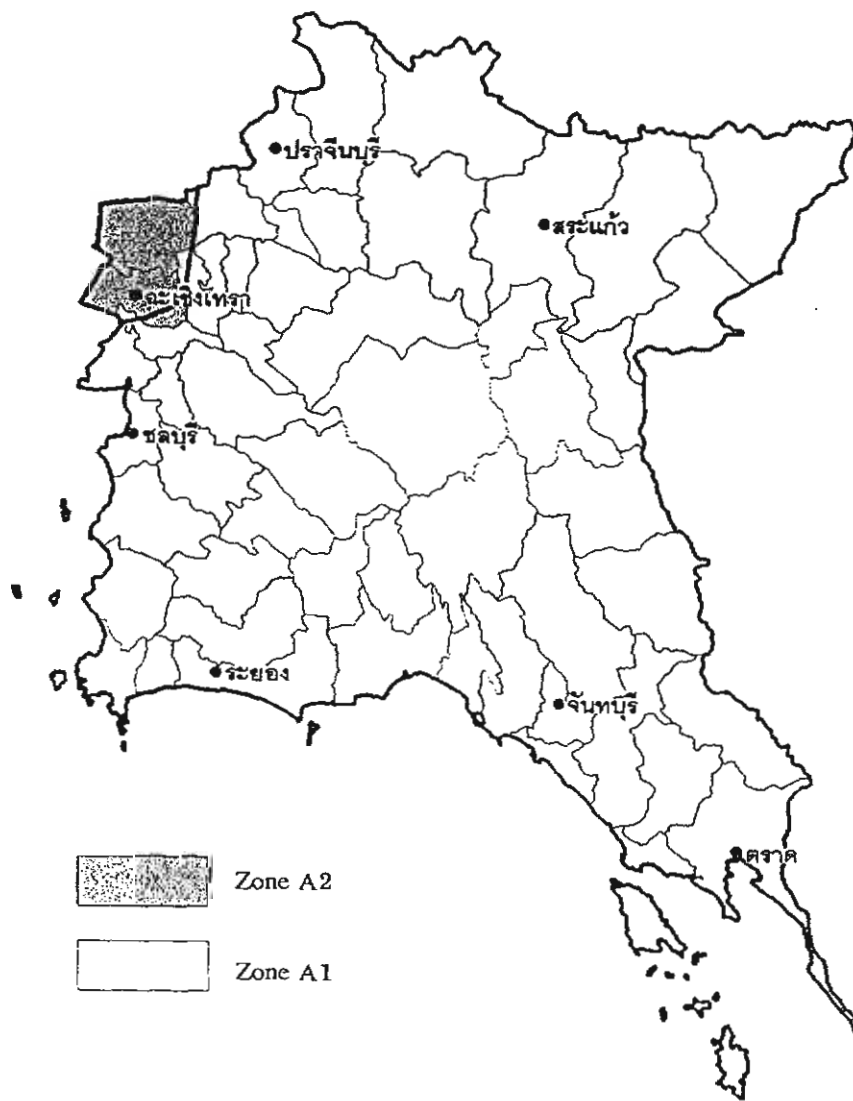
การจัดแบ่งพื้นที่ตามความเข้มของแผ่นดินไหว

การจัดแบ่งพื้นที่ในประเทศไทยตามความเข้มของแผ่นดินไหวในประเทศไทย เป็นการพิจารณาเปรียบเทียบภาพแผนที่แสดงความเข้มของแผ่นดินไหวตาม Modified mercalli scale ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นดินไหว (K_s) กับตำแหน่งของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทยในแผนที่แสดงตำแหน่งของอำเภอและจังหวัดของแต่ละภาค ซึ่งมีด้วยกัน 76 จังหวัด และ 5 ภาค คือ ภาคกลาง, ภาคตะวันออก, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ภาคเหนือ, และภาคใต้

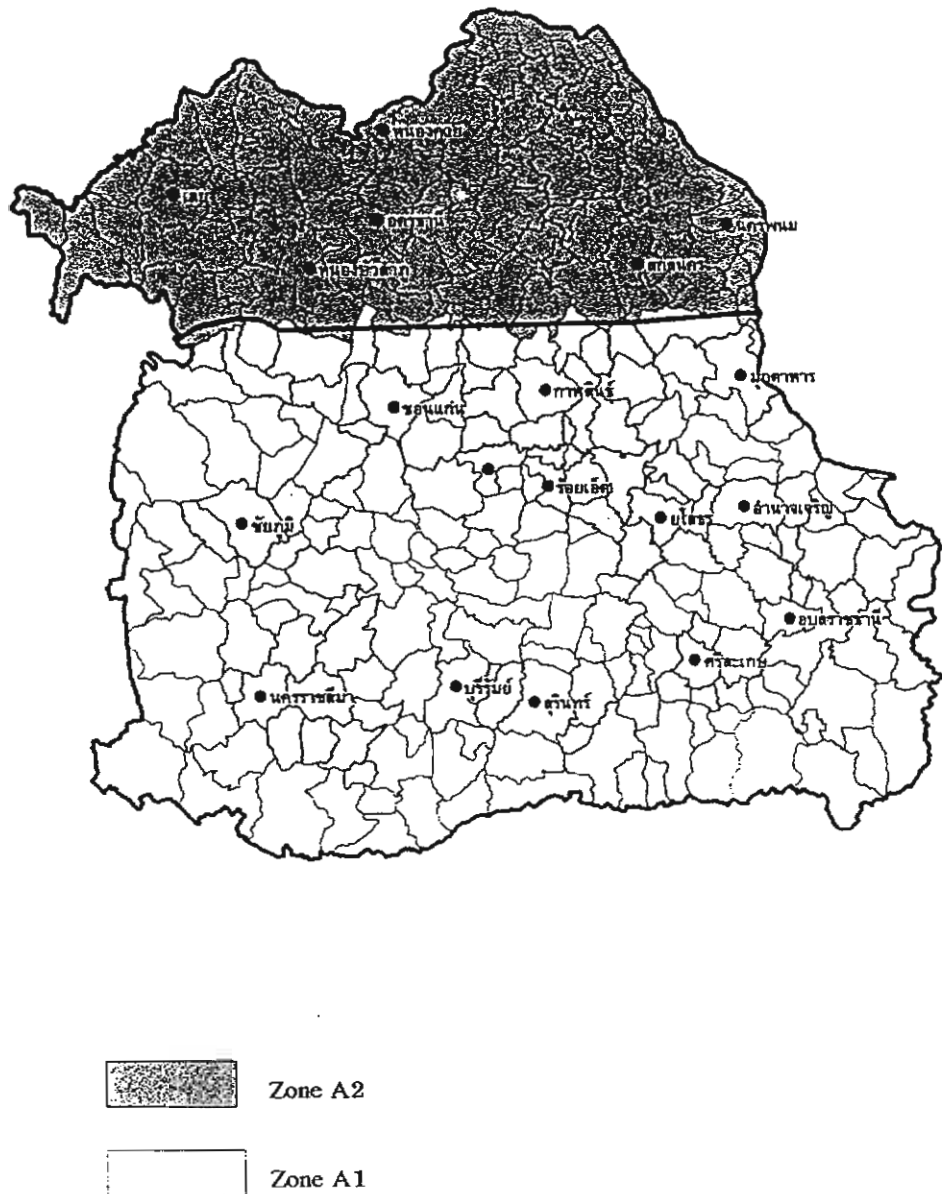
การดำเนินการ เริ่มจากการวางซ้อนกันของภาพแสดงความเข้มของแผ่นดินไหว บนแผนที่แสดงอำเภอและจังหวัดของแต่ละภาค หากพบว่าแนวเส้นที่แบ่งขอบเขตของแต่ละความเข้มของแผ่นดินไหวตัดแบ่งพื้นที่ในอำเภอ จะสรุปเป็นค่า K_s เพียงหนึ่งค่าตามปริมาณพื้นที่ของส่วนที่ค่า Zone ของความเข้มของแผ่นดินไหวครอบคลุมอยู่มากกว่า 50% ดังแสดงในรูปผนวกที่ ฉ.1 ถึงรูปผนวกที่ ฉ.5 และดำเนินการต่อไปเป็นตารางแสดงค่า K_s ของแต่ละอำเภอและจังหวัด ดังแสดงในตารางผนวกที่ ฉ.1 การที่ได้จัดทำเช่นนี้ เนื่องจากระบบผู้เชี่ยวชาญ KU-EXslope ไม่สามารถเชื่อมโยงกับระบบ GIS จึงได้จัดทำการแนะนำค่าดังกล่าวด้วยการให้ผู้ใช้อป้อนข้อมูลเป็นภาค, จังหวัด, และอำเภอ ตามลำดับ



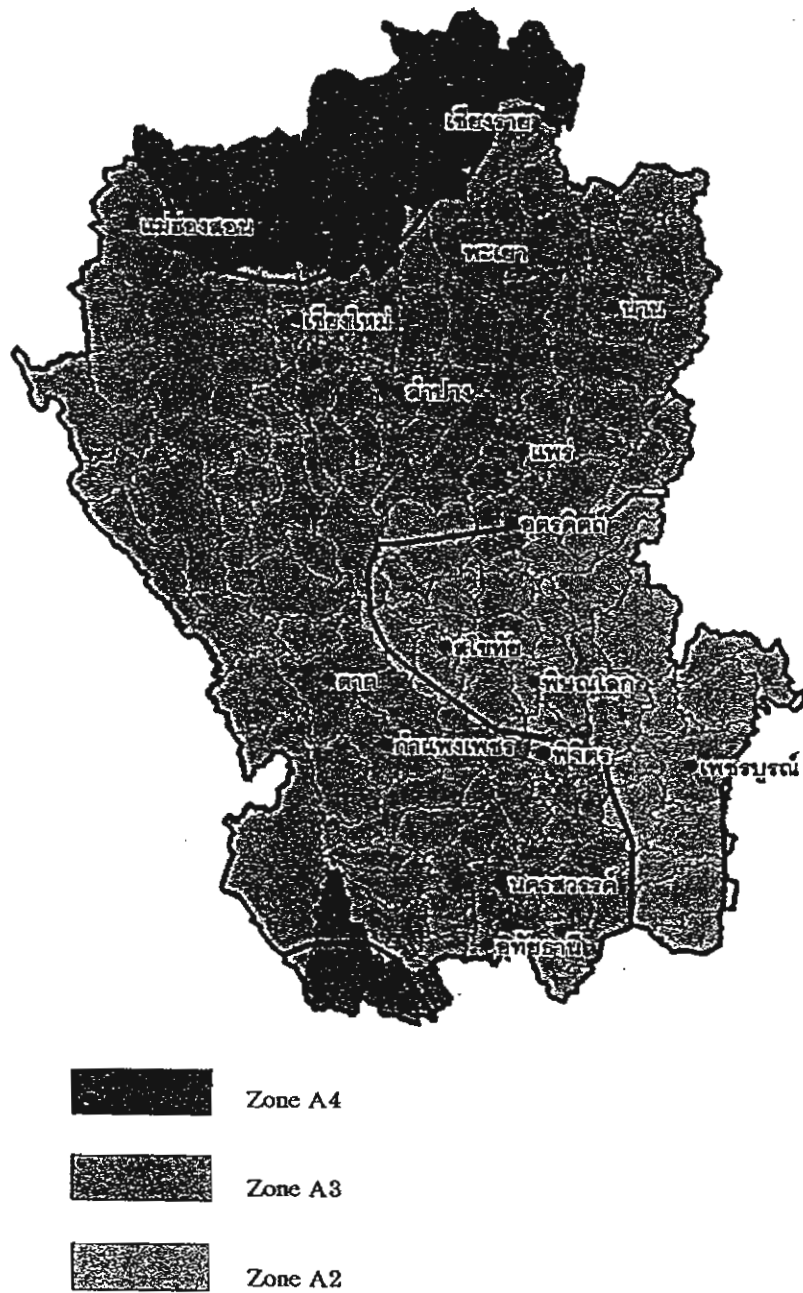
รูปผนวกที่ จ.1 ความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ในภาคกลาง



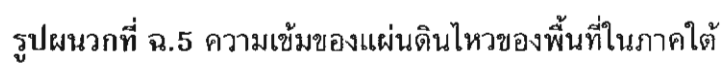
รูปผนวกที่ จ.2 ความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

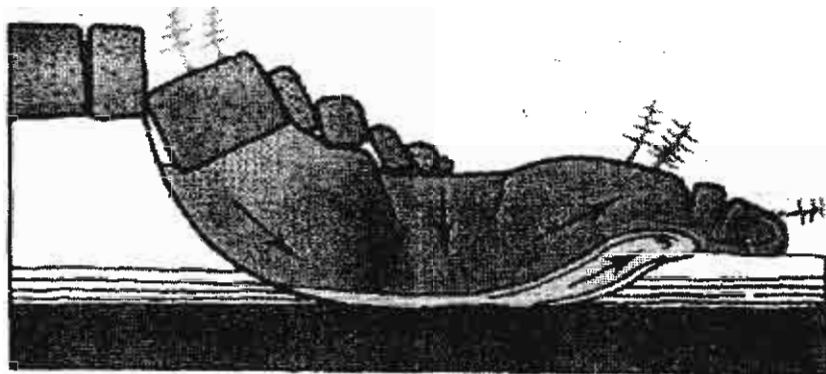


รูปผนวกที่ จ.3 ความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ในภาคเหนือ



รูปผนวกที่ จ.4 ความเข้มของแผ่นดินไหวของพื้นที่ในภาคเหนือ





ᐃᐃᐃᐃ CD-ROM ᐃᐃᐃᐃᐃᐃ

KU-Exslope, Kuslope

ᐃᐃᐃᐃ RAISON