



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย
เรื่อง

การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของ
เสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินและใต้ผิวดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สง่า ตั้งชวาล

เมษายน ๒๕๔๔



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย
เรื่อง

การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของ
เสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินและใต้ผิวดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โดย

สง่า ตั้งชวาล

เมษายน ๒๕๔๔



รายงานฉบับสมบูรณ์
การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของ
เสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินและ ใต้ผิวดิน

FINAL REPORT

**RISK AND RELIABILITY ASSESSMENT FOR STABILITY
OF SURFACE AND UNDERGROUND EXCAVATION**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ


ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะกรรมการวิจัยเงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในงานวิจัย และยังขอขอบคุณ คณะกรรมการตรวจสอบและประเมินผลงาน ที่กรุณาให้คำแนะนำที่ดีและเป็นประโยชน์หลายอย่าง ที่ผู้วิจัย ได้นำมาปรับปรุงกับแก้ไขผลงานให้ดีขึ้น

รายงานฉบับนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ การนำเสนอส่วนใหญ่เป็นการสร้างต้นแบบในการวางแผนการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งระบบ และผลงานจะเสร็จสมบูรณ์ได้ต้องมีทีมงานวิจัย องค์กรและบุคคลที่ให้ความสนับสนุนหลายส่วน

ผู้วิจัยขอขอบคุณต่อบุคคลเหล่านี้ ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ได้แก่

- อาจารย์จักรพันธ์ แซ่ลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยแก้ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์แบบฉบับ
- นายสุรัชย์ ลีพิทาเกียรติ วิศว. (โยธา) ผู้ช่วยวิจัยด้านการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณค่าต่าง ๆ กับการวิเคราะห์ค่าผลลัพธ์เชิงสถิติของความเชื่อถือได้

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างจริงใจ สำหรับเจ้าหน้าที่กับวิศวกรของหลายหน่วยงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (เหมืองแร่ลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ ลำปาง) เหมืองหินหลายเหมืองที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยภาคสนาม ยินยอมให้มีการสัมภาษณ์ ถ่ายรูป และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย

 สว่าง วัจจวาล

รองศาสตราจารย์ ดร. สว่าง ตั้งชวาล

เมษายน 2544

ชื่อโครงการ การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของ
 เสถียรภาพของงานชุดเจาะบนพื้นผิวดินและใต้พื้นผิวดิน
 ชื่อผู้ดำเนินงาน รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาล
 วันเดือน ปี เมษายน 2544

บทคัดย่อ

งานชุดเจาะ แหล่งก่อสร้างมีการดำเนินงานทั้งบนพื้นผิวดินและใต้พื้นผิวดิน หลักการที่สำคัญของการประเมินเสถียรภาพงานชุดเจาะมีการทบทวน ผู้วิจัยได้เสนอแนะวิธีการที่ใช้แก้ปัญหาในภาคสนามเชิงความเชื่อถือได้ของแหล่งข้อมูลค้นทางกับการคาดคะเนความเสี่ยงในการปฏิบัติงานเพื่อให้มีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานสูงขึ้น ควบคู่กับการใช้จ่ายในการชุดเจาะที่เหมาะสม

กรณีศึกษาของงานวิจัยโครงการนี้มีหลายรูปแบบของการวิเคราะห์ผล ได้แก่ การพังทลายรูปแบบอาร์กที่ไม่ใช่ส่วนของวงกลม การพังทลายของมวลรูปสี่เหลี่ยม และการเสริมเสถียรภาพของคันดินถม วิธีการเข้าสู่การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นอย่างเป็นระบบมีการเปรียบเทียบกับค่าของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด เนื่องจากความไม่แน่นอนของตัวประกอบที่เกี่ยวข้องทั้งค่าคุณสมบัติมวลสาร ความแปรปรวนในการสุ่มเก็บตัวอย่าง กับวิธีการเข้าสู่ปัญหาเชิงปฏิบัติการ เป้าหมายของงานวิจัยโครงการนี้ ต้องการให้ได้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่หาจากระยะสั้นที่สุดที่วงรีวิกฤตสัมผัสกับพื้นผิวการพังทลาย ซึ่งในการหาผลเฉลยมีการนำโปรแกรมแผ่นตารางมาใช้ ความสะดวกของการประยุกต์กับความชัดเจนในการกำหนดแนวคิด ตลอดจนความหลากหลายในการนำเข้าไปใช้ในการแก้ปัญหาได้กว้างขวางกว่าวิธีการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์ จึงสมควรนำหลักการวิเคราะห์ที่อิงค่าความเชื่อถือได้ไปในงานวิเคราะห์ที่นอกแบบ

คำหลัก: เสถียรภาพการชุดเจาะ ปัจจัยความปลอดภัย การประเมินความเสี่ยง
 ดัชนีความเชื่อถือได้ วิธีเชิงความน่าจะเป็น

Project Title: Risk and Reliability Assessment for Stability
of Surface and Underground Excavation

Name of Investigator: Associate Professor Dr. Sanga Tangchawal

Month and Year: April 2001

ABSTRACT

Site excavation has been carried on both surface and underground. Main assessment criteria were reviewed. The researcher suggests methods in solving the reliability of uncertainty sources, prediction of risk in operation for better safe conditions. These are in accordance with the appropriate cost of excavation.

Case studies in this project are in various forms. Result analyses on failures of non-circular arc, wedge mass, reinforcement of embankment. Probability approach method in these analyses need to be systematic, and compare with the deterministic values of factor of safety. Since there are uncertainty of associated factors. These are mass property values, variations in sampling, and approaching the problem in a practical way. The aim of this project is to obtain the reliability index, which is the shortest distance that a critical ellipse contacts the failure surface. In searching for the solution, a spread sheet program is used. The ease of implementation, conceptual clarity, and versatility of the proposed method should enhance the wider use of the more rational reliability-based analysis and design over the conventional factor-of-safety approach.

Key Words: excavation stability, factor of safety, risk assessment, reliability index, probability method



คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการนี้ เป็นงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาที่ต่อเนื่องมาจากงานวิจัยโครงการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการประเมินเสถียรภาพของการขุดเจาะ ในงานก่อสร้างคานวิศวกรรมเหมืองแร่และโยธา

เนื้อหาหลักของรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ เป็นการนำเสนอสาระสำคัญของปัญหาที่ผู้ปฏิบัติงานต้องประเมินความเสี่ยงของการปฏิบัติงานก่อนดำเนินการขุดเจาะ ทั้งนี้เพื่อใช้วางแผนกับออกแบบหน้างานขุดเจาะ ผู้วิจัยได้แยกการวิเคราะห์เชิงเสถียรภาพออกเป็นทั้งงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินกับใต้พื้นผิวดิน โดยเน้นใช้กับกรณีศึกษาของการพังทลายในหลายรูปแบบ

การเข้าสู่การแก้ปัญหาเชิงความน่าจะเป็น ถูกนำมาใช้แทนการแก้ปัญหาเชิงกำหนดที่หาจากความสมดุลของแรงหรือโมเมนต์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันในเรื่องความไม่แน่นอนของแหล่งข้อมูลต้นทางที่ได้จากภาคสนาม ตลอดจนความแปรปรวนในการสุ่มเก็บตัวอย่าง แนวทางที่กำหนดความเสี่ยงของระบบนั้นใช้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบที่ตรวจสอบครอบคลุมตัวประกอบเชิงสถิติที่มีการแปรผันสูง วิธีการที่ผู้วิจัยใช้เป็นแนวทางผลเฉลยของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากระยะที่สั้นที่สุดที่วงรีวิกฤตของตัวแปรสุ่มสัมพันธ์กับพื้นผิวดิน การพังทลาย เพื่อความสะดวกกับมีความรวดเร็วและง่ายต่อการคำนวณค่าผลลัพธ์โปรแกรมแผ่นคำนวณทำการที่มี Solver ในตัว ถูกนำมาใช้แทนการคำนวณจากความรู้เดิมทางคณิตศาสตร์แบบฉบับ

อนึ่งในการนำเสนอในรายงานนี้ ผู้วิจัยได้แก้ไขข้อบกพร่องที่พบ เช่น มีการระบุขั้นตอนกับเงื่อนไขบังคับของการแก้ปัญหาแต่ละรูปแบบให้ชัดเจน มีการแก้ไขภาพเชิงกราฟิกให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และในหลายปัญหาที่มีการระบุสมการเชิงประสมการณ์เพิ่มเติม สมการเหล่านี้ทางต้นฉบับที่เป็นบทความวิจัยในวารสารต่างประเทศ ไม่ได้แสดงไว้โดยบทความวิจัยที่ถูกใช้อ้างอิง จึงมีการนำเสนอในรายงานฉบับนี้ เพื่อให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เนื่องจากการนำเสนอในเรื่องการแก้ปัญหาเชิงความน่าจะเป็น เป็นโครงการที่ใหม่มากสำหรับการวางแผนและออกแบบการขุดเจาะในประเทศไทย ผู้ที่นำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่เป็นการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์เสียก่อนที่จะนำวิธีการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น อย่างไรก็ตามประโยชน์ของวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาความไม่แน่นอนของตัวแปรสุ่มภาคสนามได้ดีกว่า ผลลัพธ์ขั้นสุดท้ายย่อมให้ความมั่นใจต่อผู้ปฏิบัติงานในเรื่องความปลอดภัยสูงกว่าด้วย ซึ่งผู้วิจัยคาดว่า จะช่วยให้ประสมผลถึงจุดมุ่งหมายสุดท้าย นั่นก็คือ การปฏิบัติงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากมีการวางแผนการวิเคราะห์ทั้งระบบที่ดี

สารบัญ รายงานฉบับสมบูรณ์
โครงการ เรื่อง "การประเมินความเสี่ยง
และความเชื่อถือได้ของ เสถียรภาพของงาน
ขุดเจาะบนพื้นผิวดินและ ใต้พื้นผิวดิน"

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ ภาษาไทย	II
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ	III
คำนำ	IV
สารบัญ	V
รายการตารางประกอบ	X
รายการรูปประกอบ	XII
รายการสัญลักษณ์	XIX
บทที่ 1 บทนำ แนวทางกับขอบเขตการวิจัย	1
1.1 แนวทางและขอบเขตการศึกษาของโครงการ	1
1.2 รูปแบบของการนำเสนอรายงานวิจัย	2
บทที่ 2 แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพงานการขุดเจาะ	3
2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด	3
2.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรง	3
2.1.2 เงื่อนไขของการพังทลายเมื่อคำนวณ จากความสมดุลเชิงแรง	4
2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโมเมนต์	6
2.1.4 เงื่อนไขของการพังทลายเมื่อคำนวณ จากความสมดุลเชิงโมเมนต์	6
2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นแบบง่าย	7
2.2.1 การตรวจวัดความเชื่อถือได้เชิงสถิติ	7
2.2.2 การหาค่าของความน่าจะเป็นของ โอกาสการพังทลาย	10
2.3 แนวทางการหาผลลัพธ์ค่าปัจจัยความปลอดภัย	12
2.4 แนวทางการหาผลลัพธ์ค่าความเสี่ยง และดัชนีความเชื่อถือได้	15

	หน้า
2.5 แนวทางวิเคราะห์สำหรับการแจกแจงที่มีหลายตัวแปร	17
2.5.1 วิธีการหาขอบเขตการพังทลายจากตัวแปรสุ่มเดียว	18
2.5.2 วิธีการหาขอบเขตการพังทลายจากตัวแปรสุ่มสองค่า	20
2.5.3 แนวทางเพิ่มเติมในการหาขอบเขตการพังทลาย	26
2.6 การประมาณค่าจากวิธีโมเมนต์ความน่าจะเป็น	30
บทที่ 3 การวิเคราะห์แหล่งข้อมูลต้นทางที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอน	33
3.1 การวิเคราะห์แหล่งข้อมูลต้นทางที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพ	33
3.2 ความแปรผันหลักที่เกี่ยวข้องกับการประเมินเสถียรภาพ	34
3.2.1 คุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุของมวลดินและหิน	34
3.2.2 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลที่พังทลาย	36
3.2.3 คุณสมบัติที่บัพพร่องของมวลสารในภาคสนาม	36
3.2.4 ระยะห่างกับการปรับเปลี่ยนค่าการวางตัวของระนาบ	37
3.2.5 การจำลองแบบความดันน้ำในมวลสาร	39
3.3 ตัวประกอบหลักความไม่แน่นอนของโอกาสการพังทลาย	39
3.3.1 ฟังก์ชันความน่าจะเป็น	39
3.3.2 แบบจำลองเชิงกำหนด	40
3.3.3 ความคลาดเคลื่อนของมนุษย์กับความคลาดเคลื่อนรวบยอด	42
3.3.4 อิทธิพลของแนวทางหาค่าสหสัมพันธ์	43
บทที่ 4 การวิเคราะห์การพังทลายของงานขุดเจาะบนพื้นผิวดิน	50
4.1 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับการขุดเจาะความลาดเอียง	50
4.1.1 รูปแบบการพังทลายที่พบบ่อยในการตัดความลาดชันมั่นคง	50
4.1.2 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับมวลการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น	52
4.2 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับการพังทลายของมวลบนระนาบเชิงเส้น	52
4.2.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงแบบง่าย	53
4.2.2 ตัวแปรที่สำคัญและการวิเคราะห์เสถียรภาพเบื้องต้น	53
4.2.3 การจัดกลุ่มตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่า	54

	หน้า	
4.2.4	สูตรเชิงประสพการณ์ในการหาโอกาสการพังทลาย	56
4.2.5	ตัวแปรวิกฤตก่อนเกิดการพังทลายแนวระนาบ	60
4.2.6	ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าโอกาสการพังทลาย แนวระนาบ	61
4.2.7	รูปแบบการพังทลายเชิงระนาบที่มีรอยแตกจากแรงดึง	67
4.2.8	เสถียรภาพเชิงกำหนดมวลความลาดเอียงที่มีรอยแตก จากแรงดึง	67
4.2.9	เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นมวลความลาดเอียงที่มี รอยแตกจากแรงดึง	70
4.2.10	ตัวอย่างการหาค่าโอกาสการพังทลายของมวลที่มี รอยแตกจากแรงดึง	71
4.3	การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับความลาดเอียง ที่มีระนาบการพังทลายรูปอาร์ก	79
4.3.1	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงจิกจกัก	79
4.3.2	แนวทางการหาความน่าจะเป็นของการพังทลาย รูปอาร์ก	81
4.3.3	ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายรูปอาร์ก เชิงความเชื่อถือได้	84
4.4	การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของการพังทลายสำหรับ มวลความลาดเอียงที่มีรูปลิ้ม	87
4.4.1	การแก้ปัญหาการพังทลายบนพื้นผิวของมวลรูปลิ้ม อย่างง่าย	88
4.4.2	ตัวอย่างการแก้ปัญหาเชิงกำหนดของการพังทลาย มวลรูปลิ้ม	94
4.4.3	การแก้ปัญหาการพังทลายของมวลรูปลิ้มเชิง ความน่าจะเป็น	95
บทที่ 5	การวิเคราะห์การพังทลายของงานขุดเจาะใต้พื้นผิวดิน	104
5.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพการขุดเจาะเปิด ช่องว่างใต้พื้นผิวดิน	104
5.2	การคำนวณความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย สำหรับอุโมงค์ใต้ผิวดิน	104
5.2.1	การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มสำหรับ การวิเคราะห์เสถียรภาพ	105
5.2.2	ตัวอย่างการคำนวณโอกาสการพังทลาย ของการเปิดช่องว่างใต้ผิวดิน	106

	หน้า
5.3 การคำนวณหาเสถียรภาพของเหมืองใต้ดิน	109
แบบ Room and Pillar	
5.3.1 แนวทางที่นิยมในการออกแบบเหมือง Room and Pillar	109
5.3.2 การเลือกค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย	110
 บทที่ 6	
กรณีศึกษาสำหรับเรื่องความเสี่ยงของการขุดเจาะ	114
6.1 แนวทางการในการใช้แผนตารางทำการเพื่อการวิเคราะห์ผล	114
6.1.1 การวิเคราะห์หาค่าความเชื่อถือได้ในระบบ	114
6.1.2 การวิเคราะห์หาค่าความเชื่อถือได้แนวทางใหม่	116
6.2 กรณีศึกษาของการพังทลายแบบอาร์ก	123
6.2.1 วิธีการปรับปรุงใหม่และเสนอโดย Chen and Morgenstern	123
6.2.2 นัยทั่วไปของวิธี Chen and Morgenstern	124
6.2.3 สูตรและค่าตัวแปรที่ใช้ตามวิธี Chen and Morgenstern	126
6.2.4 ตัวอย่างกรณีศึกษาคับวิธี Chen and Morgenstern	129
6.2.5 วิธีการและขั้นตอนหาค่าผลลัพธ์ที่เป็นกรณีศึกษาการพังทลายแบบอาร์ก	134
6.2.6 วิธีการและขั้นตอนในการหาพื้นผิววิกฤตของการพังทลาย	139
6.2.7 วิธีการและขั้นตอนในการหาคัดซ์ในความเชื่อถือได้	141
6.3 กรณีศึกษาของการพังทลายรูปลิ้ม	145
6.3.1 วิธีการและขั้นตอนในการหาเสถียรภาพเชิงจลนศาสตร์โดยใช้โปรแกรม	145
6.3.2 ผลลัพธ์เสถียรภาพค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด	150
6.3.3 ผลลัพธ์เสถียรภาพเชิงจลนศาสตร์ของมวลรูปลิ้ม	152
6.3.4 ผลลัพธ์ในการหาคัดซ์ในความเชื่อถือได้ของมวลรูปลิ้ม	154
6.4 กรณีศึกษาของการเสริมกำลังดินเหนียวอ่อนระหว่างการขุดเจาะ	157
6.4.1 สถานที่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาการขุดเจาะในดินอ่อนเหนียว	157
6.4.2 หลักการเสริมเสถียรภาพโดยใช้คันดินถม	158

	หน้า	
6.4.3	สูตรเชิงประสมการณ์กับเงื่อนไขที่ใช้ในการ หาค่าเชิงเสถียรภาพ	158
6.4.4	ผลลัพธ์ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด	162
6.4.5	ผลลัพธ์ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อมีการ เสริมเสถียรภาพ	163
6.4.6	ค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อจุดคินอ่อนนิ่มและพุ่มแล้ว เสริมเสถียรภาพ	166
6.4.7	ค่าดัชนีความเชื่อถือได้เมื่อมีการเสริมเสถียรภาพ คันดินถม	168
บทที่ 7	บทสรุป แนวทางการจัดการความเสี่ยงของการขุดเจาะ	172
7.1	หลักการประเมินความเสี่ยงทั่วไป	172
7.1.1	การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ	172
7.1.2	การประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น	173
7.2	กลยุทธ์ในการจัดการข้อมูลดิบเพื่อประเมินความเสี่ยง	174
7.2.1	การสำรวจปัจจัยหลักที่มีผลต่อเสถียรภาพโครงสร้าง	174
7.2.2	แนวทางการบันทึกผลกับการวิเคราะห์ข้อมูล เชิงธรณีวิทยาในพื้นที่	175
7.3	แนวทางการประเมินผลความไม่แน่นอนเชิงการออกแบบ	177
7.3.1	การประเมินผลจากข้อมูลสารสนเทศ	177
7.3.2	การคาดหมายผลลัพธ์เชิงความเสี่ยง	179
7.4	แนวทางการออกแบบหาผลลัพธ์ขนาดมิติที่เหมาะสมที่สุด	182
7.4.1	การวิเคราะห์หาข้อยุติในการออกแบบโดยรวม	182
7.4.2	ตัวอย่างกรณีศึกษาของการหาข้อยุติจากการ ขุดเจาะโดยใช้ตัวถูกระเบิด	185
7.5	แนวทางสรุปในการประเมินความเสี่ยงของงานขุดเจาะ	189
7.5.1	การประเมินความเสี่ยงในรูปแบบ เหตุการณ์ความน่าจะเป็น	189
7.5.2	ผังแผนภูมิการจัดการความเสี่ยงในระบบ	191
บรรณานุกรม		192
ภาคผนวก ก.	ตารางสถิติค่าเบี่ยงเบนปกติ	202
ภาคผนวก ข.	ตารางการแปลงหน่วย	207

รายการตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	ผลเฉลยของฟังก์ชันการพังทลายในกรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าในหลายรูปแบบ	11
ตารางที่	2.2	ค่าการคำนวณตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) ที่ได้จากกรณีทั้ง 7 แบบ ในรูปที่ 2.4	12
ตารางที่	2.3	ค่าเบี่ยงเบนปกติของโมเมนต์ค่ากับโมเมนต์ก่อให้การพังทลาย ให้ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) มีค่าคงที่ 1.5 ซึ่งหาค่าโอกาสการพังทลายได้ 7 กรณี	14
ตารางที่	2.4	รูปแบบการจัดความเสี่ยง และการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่มีผลจากการที่มีฟังก์ชันสมรรถนะเปลี่ยนแปลงไป ค่า FS เป็นค่าที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยของแรงดัน ต่อค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุก	17
ตารางที่	3.1	ผลกระทบของการหาค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองต่อการวิเคราะห์ค่าโอกาสการพังทลายของมวลความลาดเอียงที่เป็นดินในรูป 3.5	47
ตารางที่	4.1	การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ระหว่างการหาค่าจากความสมดุลเชิงจลน์จำกัดกับการหาค่าจากวิธีสถานะเชิงจลน์จำกัด โดยตรวจสอบกับค่าของตัวเลขเสถียรภาพ (stability number) สำหรับมวลดินที่มีเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous soil)	80
ตารางที่	4.2	การคำนวณหาค่าตัวเลขเสถียรภาพด้วยวิธีการแบ่งส่วนมวลสาร (ตารางแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกหาค่าน้ำหนักส่วนแบ่ง ส่วนที่สองหาค่าผลรวมของนิพจน์ต่าง ๆ จากสมการที่ 4.20)	85
ตารางที่	4.3	ค่าเฉลี่ยการวางตัวของระนาบ จากโจทย์ตัวอย่าง	94
ตารางที่	6.1	ความแปรผันเชิงสถิติของตัวแปรสุ่มในตัวอย่างรูปที่ 6.2	117
ตารางที่	6.2	ผลลัพธ์โดยย่อ ที่ได้จากการคำนวณค่าในสมการอนุพันธ์ย่อยซ้ำ แล้วหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ด้วยวิธีสองพิตลองถูก	119
ตารางที่	6.3	ค่าการวางตัวของระนาบกับคุณสมบัติมวลสาร ที่มี ความคั่นน้ำกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตความลาดเอียง	150

	หน้า
ตารางที่ 6.4 ข้อมูลตัวแปรสุ่มทั้ง 7 ชุดที่ต้องป้อนเข้าไปเพื่อหา ภาวะเชิงจลนศาสตร์	153
ตารางที่ 6.5 ค่าคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนที่แปรเปลี่ยนไปตามความลึก จากผิว	163
ตารางที่ 6.6 ค่าเชิงสถิติของคุณสมบัติดินถมกับดินฐานราก ในการ วิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์เชิงความเชื่อถือได้ของคันดินถม สนามบินหนองงูเห่า	169
ตารางที่ A.1 ค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติตัวแปรสุ่มแบบมาตรฐาน	204
ตารางที่ A.2 หน่วยที่แปลงจากระบบ S.I. เป็น Imperial หรือกลับกัน	207

รายการรูป

			หน้า
รูปที่ 2.1		การเลื่อนไหลที่ใช้การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย จากความสมดุลเชิงแรงที่ขนานระนาบได้มวลสาร	5
รูปที่ 2.2		การเลื่อนไหลที่ใช้การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย จากความสมดุลเชิงโมเมนต์บนพื้นผิวระนาบการพังทลาย	5
รูปที่ 2.3		การตรวจวัดความน่าเชื่อถือของระบบทั่วไป	9
รูปที่ 2.4		รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงในดินที่มีค่าไคซีชัน	12
รูปที่ 2.5		ความแปรผันของค่าปัจจัยความปลอดภัย 7 กรณี ตามค่า ตัวเลขความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย กับตัว ประกอบการแปรผันของการลดค่าขอบความปลอดภัยของ ความยาวอาร์ก	14
รูปที่ 2.6		ภาพสเก็ทซ์การหาพื้นที่ความเชื่อถือได้จากตัวแปรสุ่มเดียว	18
รูปที่ 2.7		ดัชนีความเชื่อถือได้ (วิธี Hasofer-Lind) ให้ฟังก์ชัน ความสัมพันธ์เชิงเส้น	21
รูปที่ 2.8		ดัชนีความเชื่อถือได้ของ Hasofer-Lind เมื่อฟังก์ชัน สมรรถนะ ไม่เชิงเส้น	23
รูปที่ 2.9		ภาพกราฟิกแสดงการหาระยะที่สั้นที่สุด สำหรับตัวแปร 2 ค่าที่มี ความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง (แนวทางใน Bulletin No. 112)	25
รูปที่ 2.10		การแสดงผลภาพกราฟิกที่มีจุด p อยู่บนผิววงรี	27
รูปที่ 2.11		การกระจายค่า $1 - \sigma$ ของวงรีเมื่อมีการหมุนในขณะ ที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) มีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ	28
รูปที่ 2.12		การกระจายค่า $1 - \sigma$ และวงรีวิกฤตที่จุดสัมผัส กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $\rho = 0.7$	29
รูปที่ 3.1		การเบี่ยงเบนจากการเลือกแนวกราดตรวจ	37
รูปที่ 3.2		ภาพถ่ายการตัดความลาดแบบขั้นบันได ในเหมืองเปิดหินปูน บริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี	38
รูปที่ 3.3		การเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด ที่แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ แนวทางปกติ แนวทาง ของ Bishop แนวทาง 3 มิติ (3-D) ทำให้ได้ค่า ตัวเลขโอกาสการพังทลาย แตกต่างกันไป 3 รูปแบบ	41

		หน้า
รูปที่ 3.4	ผลกระทบอีกรูปแบบหนึ่งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของค่าโอกาสการพังทลาย	41
รูปที่ 3.5	อิทธิพลของการหาค่าสัมพัทธ์ระหว่างค่าโคฮีชันที่ปรับค่า (c_s) กับค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน ($\tan \phi$) ต่อค่าโอกาส การพังทลาย	44
รูปที่ 3.6	สัมพัทธ์ของพื้นผิวการพังทลายของระนาบต่อเสถียรภาพ ของความลาดเอียง	45
รูปที่ 3.7	ผลค่าความแปรปรวนที่ลดลง เพราะมีการเพิ่มอัตราส่วน ความยาวระยะทาง ต่อ ระยะทางของสัมพัทธ์ในตัวเอง ภายในปริภูมิ	46
รูปที่ 3.8	การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงจากผลงาน Chowdhury (1987)	47
รูปที่ 3.9	ผลกระทบของการหาค่าสัมพัทธ์ในตัวเองต่อค่า โอกาสการพังทลาย	48
รูปที่ 4.1	รูปแบบการพังทลายที่เกิดบ่อยในการเปิดหน้าเหมือง แบบชั้นดินโคลนที่พบบ่อยมี 3 รูปแบบ เกิดได้ทั้งบนตะพัก เดี่ยวหรือบนหลายตะพัก	51
รูปที่ 4.2	ความลาดเอียงแบบง่ายที่มีแนวเปราะบางอยู่ในทิศทาง ที่ขนานกัน	53
รูปที่ 4.3	ภาพสเก็ทซ์เส้นขอบของการพังทลายสำหรับมวลสารที่แบ่งออก เป็นส่วนขอบเส้นโค้งพาราโบลา กับส่วนขอบที่เป็นเส้นตรง	55
รูปที่ 4.4	ภาพสเก็ทซ์เส้นขอบของการพังทลายสำหรับระนาบรอยแตกแยก	56
รูปที่ 4.5	ระนาบการพังทลายที่เกิดจากรอยแตกแยกในมวลสาร การพังทลายเกิดตามแนวเชื่อมรอยต่อระหว่างระนาบ	58
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอกาสการพังทลาย [$p(f)$] กับการแจกแจงค่าขอบความปลอดภัย (Z)	59
รูปที่ 4.7	สมมุติฐานรูปแบบการพังทลายแนวระนาบ ที่ใช้ค่าระยะ ห่างวิกฤตระหว่างระนาบรอยแตกแยก ในรูปกำหนด ให้มีรอยแตกแยก 2 แนว แต่ไม่ต่อเนื่องตลอดแนว วิกฤตมีระยะห่างเท่ากับ S_c และความสูงในแนวตั้ง ของระนาบวิกฤตที่ก่อให้เกิดการพังทลายใช้ค่าเฉลี่ย	60
รูปที่ 4.8	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีการพังทลาย ตามแนวระนาบ การหาผลเฉลยเป็นแบบรูปปิดที่หาขอบเขต ล่างของโอกาสการพังทลาย	62

	หน้า	
รูปที่ 4.9	ผลเฉลยโอกาสการพังทลายวิกฤตที่มีค่าโคฮิซันหลายระดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูงแนวคิงของมวลบนระนาบ	65
รูปที่ 4.10	ผลเฉลยโอกาสการพังทลายวิกฤตที่ค่าระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยกหลายค่า เมื่อเทียบกับค่าความสูง	66
รูปที่ 4.11	ผลเฉลยของโอกาสการพังทลายวิกฤตที่ค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกแยกหลายค่า เมื่อเทียบกับค่าความสูง	66
รูปที่ 4.12	ภาพตัดขวางรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลความลาดเอียงที่มีค่าความชันของตะพักส่วนบนและพบรอยแตกจากแรงคิงในส่วนของตะพักด้านบนด้วย	68
รูปที่ 4.13	ภาพตัดขวางรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลความลาดเอียงที่มีค่าความชันของตะพักด้านบน แต่พบรอยแตกจากแรงคิงในส่วนของผิวหน้าความลาด	68
รูปที่ 4.14	ผลเฉลยค่าโอกาสการพังทลาย ที่มีค่ามุมการตัดความลาดชันหลายค่า กำหนดให้มวลความลาดเอียง มีรอยแตกจากแรงคิงในส่วนตะพักด้านบน	75
รูปที่ 4.15	ผลเฉลยค่าโอกาสการพังทลาย ที่มีค่ามุมการตัดความลาดชันหลายค่า กำหนดให้มวลความลาดเอียง มีรอยแตกจากแรงคิงในผิวหน้าความลาด	75
รูปที่ 4.16	การวิเคราะห์การพังทลายรูปอาร์กของมวลดินเหนียวแข็ง มีชั้นดินทรายรองรับ การคำนวณใช้วิธีการแบ่งส่วน	84
รูปที่ 4.17	ภาพเชิงไอโซเมตริก ที่แสดงความลาดเอียงกับมวลลึ้มในภาพลึ้มถูกยกออกไป เพื่อให้เห็นผิวระนาบที่สัมผัสกับลึ้ม	88
รูปที่ 4.18	แสดงแนวทางหาค่าชันของความเชื่อถือได้ของค่า β ในระนาบ	96
รูปที่ 4.19	การพังทลายของมวลรูปลึ้มภาพสเก็ทซ์แสดงถึง ค่ามุมเอียงเทและแนวทิศทางระนาบต่าง ๆ	97
รูปที่ 4.20	ตัวอย่างหน้าจอของการใช้แผ่นตารางทำการเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ข้อมูลตัวแปรอยู่ในภาวะไม่เชิงเส้น (non-linear) จำนวนมิติ 7 ปริภูมิ สำหรับฐานนิยม (mode) ของการพังทลาย 2 ระนาบ	100
รูปที่ 5.1	ค่านีความเชื่อถือได้ของตัวแปรสุ่มสองค่า ซึ่งเป็นแนวทางหาโอกาสการพังทลายของอุโมงค์วงกลมที่จุดเจาะ ได้พื้นผิวในหินชนิดหนึ่ง	107

	หน้า	
รูปที่ 5.2	กราฟการคำนวณค่าโอกาสการพังทลายสำหรับตัวแปรสุ่มแบบเบี่ยงเบนปกติของ Q และ R ที่ใช้กับการหาเสถียรภาพการขุดเจาะอุโมงค์ (รูปที่ 5.1)	107
รูปที่ 5.3	กราฟการคำนวณค่าโอกาสการพังทลาย สำหรับสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มแบบเบี่ยงเบนปกติ Q และ R ที่ใช้กับค่าปัจจัยความปลอดภัย	108
รูปที่ 5.4	แนวทางที่นิยมสำหรับการออกแบบเหมืองใต้ดินแบบ Room and Pillar	111
รูปที่ 5.5	ฮีสโทแกรมของการศึกษากรณีการพังทลายในเหมืองใต้ดินเปรียบเทียบกับค่า FS ที่ใช้ ในบางกรณีมีการพังทลายถึงแม้ค่า FS มากกว่าหนึ่ง และค่าเฉลี่ยของกรณีเหมืองใต้ดินมีเสถียรภาพ ค่า $FS = 1.73$	112
รูปที่ 6.1	การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากจุดกำเนิดดั้งเดิมในปริภูมิใช้คณิตศาสตร์แบบฉบับ (classical mathematics) ที่มีวิธีการแปลงค่าในปริภูมิหาค่าระยะทางที่สั้นที่สุดในปริภูมิใหม่	115
รูปที่ 6.2	โครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง วางตัวบนมวลดินที่มีการทรุดตัวที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกกคทับในแนวฉากบนมวลดินที่มีการอัดตัวคายน้ำ	116
รูปที่ 6.3	หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงการใช้วงรีวิฤต ก่อนมีการใช้ Invoking Solver tool	122
รูปที่ 6.4	หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงการใช้วงรีวิฤต ภายหลังจากใช้ Invoking Solver tool	122
รูปที่ 6.5	พื้นผิวการพังทลายตามนี้ทั่วไปของวิธี Chen and Morgenstern	124
รูปที่ 6.6	เวกเตอร์ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนส่วนแบ่งเดียว	125
รูปที่ 6.7	ภาพสเก็ทซ์แสดงสัญลักษณ์หลักที่ใช้ในแผ่นตารางทำการ	126
รูปที่ 6.8	หน้าจอส่วนแรกในโปรแกรมแผ่นตารางทำการ แยกจากหน้าจอใหญ่เป็นกรอบสำหรับเงื่อนไข หน่วยที่ใช้ กับนิพจน์หลักที่ใช้ในการคำนวณ	135
รูปที่ 6.9	ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แผ่นแยกส่วนจำเพาะ ที่ใช้ในการคำนวณประมาณค่าจาก two-node Gauss-Legendre quadrature	135

รูปที่ 6.10	แผ่นแบบแสดงหน้าจอของผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่ระบุให้แรงด้านข้างส่วนแบ่งคงที่ ตามวิธีของ Chen and Morgenstern	137
รูปที่ 6.11	ภาพกราฟิกการพังทลายรูปอาร์กที่ผิวส่วนโค้ง ไม่ใช่ช่วงกลม การพล็อตค่าเป็นไปตามค่าพิกัดข้อมูลเข้าของแกน x และ y	138
รูปที่ 6.12	ภาพกราฟิกการพังทลายรูปอาร์กที่ผิวส่วนโค้ง ไม่ใช่ช่วงกลมการพล็อตค่าเป็นไปตามค่าพิกัดข้อมูลเข้าของแกน x และ y แสดงพื้นผิววิกฤต หาจากการคำนวณค่าของปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด	140
รูปที่ 6.13	การหาค่า β ที่สิ้นสุดจากวงรีวิกฤต เป็นรูปเดียวกับรูปที่ 2.12	144
รูปที่ 6.14	ภาพกราฟิกการพังทลายรูปอาร์ก เป็นการค้นหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่เหมาะสมที่สุด จากผลของพื้นผิวการพังทลายวิกฤตกับการใช้วงรีการกระจายค่าที่สัมพันธ์กับพื้นผิวการพังทลาย	144
รูปที่ 6.15	มวลรูปสี่เหลี่ยมที่มีระนาบค้ำยันความลาดเอียงมีแนวเอียงเททิศทางเดียวกันกับระนาบผิวหน้าความลาด	146
รูปที่ 6.16	วิธีการแปลงค่าระนาบ 3 ระนาบ ได้แก่ joint 1 joint 2 และ slope face ให้เป็นค่า $\beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2$ ของสามเหลี่ยม BDC ที่อยู่ในแนวราบกับระดับ	149
รูปที่ 6.17	หน้าจอข้อมูลที่ป้อนเข้าไปเพื่อหาค่า FS เริงกำหนด	151
รูปที่ 6.18	ผลลัพธ์ของข้อมูลออกที่ได้จากคำนวณค่าตัวแปรและค่า FS เริงกำหนด	151
รูปที่ 6.19	ผลเฉลยในการหาค่า χ^2 กับ β จาก Solver ในตัวโปรแกรมแผ่นตารางทำการ สำหรับกลุ่มข้อมูลตัวแปรสุ่มที่ให้มีการแจกแจงปกติ	155
รูปที่ 6.20	การคำนวณค่าสถิติเชิงความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูล ผลลัพธ์สำหรับข้อมูลออกในการหาเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม แสดงเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้จากวิธีวงรีวิกฤต ($FS = 1$) สัมพันธ์กับพื้นที่การพังทลาย	156
รูปที่ 6.21	ที่ตั้งสนามบินหนองงูเห่า ในเขตอำเภอบางพลี สมุทรปราการ	157
รูปที่ 6.22	การหาเสถียรภาพจากความสมดุลเชิงโมเมนต์ โดยใช้ช่วงกลมวิกฤต	159
รูปที่ 6.23	แบบจำลองคันดินถมที่ใช้ทดสอบพฤติกรรมดิน บริเวณหนองงูเห่า ออกแบบโดยคณาจารย์สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียในปี 2518	162

		หน้า
รูปที่ 6.24	หน้าจอแสดงส่วนของข้อมูล เข้ากับส่วนของข้อมูลออก ที่ใช้ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด จากความสัมพันธ์เชิงโมเมนต์สำหรับคานดินทรายถมที่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง บนชั้นดินเหนียวอ่อนของสนามบินหนองงูเห่า ที่กำหนดค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 6.5	164
รูปที่ 6.25	การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณ และพื้นผิวการพังทลายรูปแบบอาร์กวงกลม สำหรับกรณีที่ยังไม่มีการเสริมเสถียรภาพ กับกรณีมีการเสริมเสถียรภาพ	165
รูปที่ 6.26	ภาพกราฟิกคานดินถมที่มีการขุดดินผิวหน้าที่พุ่งออก ก่อนเสริมเสถียรภาพ	166
รูปที่ 6.27	หน้าจอของข้อมูล เข้ากับข้อมูลออก ในการคำนวณค่า F_s ที่มีการขุดหน้าดินที่พุ่งออก เสริมบางสังเคราะห์ 1 ชั้น ค่าคุณสมบัติมวลสารและมิติเชิงเรขาคณิตของคานดินถม 2 ชั้น อิง Bergado et al. (1994)	167
รูปที่ 6.28	หน้าจอโปรแกรมแผ่นตารางทำการที่ใช้ GoalSeek กับ Solver กำหนดให้ β index = 3.0 เมื่อให้ $F_s = 1.0$ เพื่อลดค่า β ตามข้อมูลเข้าที่ป้อนเข้ามา กับที่ระบุในตารางที่ 6.6 (เปลี่ยนค่า T เป็น 600) จากการทำซ้ำเพื่อหาผลเฉลย ได้ค่า β ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 2.0768	170
รูปที่ 7.1	การกำหนดแนวขอบเขตของพื้นที่ กับเส้นชักตัวอย่างข้อมูลที่เป็นระนาบความไม่ต่อเนื่อง หรือเป็น Joint Planes	176
รูปที่ 7.2	การพล็อตกราฟหาเส้นโค้งที่เหมาะสมกับกลุ่มข้อมูลในรูปเป็นเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่เหมาะสมที่สุด กับกลุ่มข้อมูลที่เป็นมิติความยาวของระนาบ	176
รูปที่ 7.3	ฟังก์ชันตัดสินใจอย่างง่ายคล้ายกิ่งต้นไม้ สำหรับความสูงของความลาดเอียง	177
รูปที่ 7.4	การเปรียบเทียบการหาข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม เพื่อปรับเปลี่ยนระดับความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง กับการวิเคราะห์เบื้องต้นที่ใช้ข้อมูลสารสนเทศที่มีอยู่	178
รูปที่ 7.5	การพล็อตค่าใช้จ่ายในระบบเปรียบเทียบกับค่าความคาดหมายเชิงการลดความเสี่ยง ในการออกแบบเพื่อตัดความลาดชันชันใด	180
รูปที่ 7.6	ความแปรผันของค่าความเชื่อถือได้ในการออกแบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดมิติของตัวแปรหลัก	183
รูปที่ 7.7	ความแปรผันของค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการของงานภาคสนาม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดมิติของตัวแปรหลัก	183

	หน้า	
รูปที่ 7.8	ผลการวิเคราะห์โดยภาพรวม เมื่อเปรียบเทียบมุมเอียงเทของการตัดความลาดชันบนดิน กับค่าใช้จ่ายหลายชนิด เช่น ค่าใช้จ่ายโดยตรง ค่าใช้จ่ายเชิงความเสี่ยง กับค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมด	185
รูปที่ 7.9	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดใหญ่ ตัวเลขแนวตั้งเป็นค่าเจาะกับค่าระเบิด ส่วนตัวเลขแนวนอนเป็นรูปแบบผังหน้าตัด กับค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของงาน จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง	187
รูปที่ 7.10	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดใหญ่ ใช้แนวทางเดียวกับรูป 7.9 แต่มีค่าการขนส่งรวมอยู่ด้วย จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง	187
รูปที่ 7.11	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดเล็ก ตัวเลขแนวตั้งเป็นค่าเจาะกับค่าระเบิด ส่วนตัวเลขแนวนอนเป็นรูปแบบผังหน้าตัด กับค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของงาน จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง	188
รูปที่ 7.12	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดเล็ก ใช้แนวทางเดียวกับรูป 7.11 แต่มีค่าการขนส่งรวมอยู่ด้วย จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง	188
รูปที่ 7.13	ตัวอย่างกราฟแผนภูมิความเสี่ยง ในการออกแบบงานขุดเจาะเฉพาะอย่างที่ใช้ในการตัดสินใจ ระหว่างขอบเขตของค่าความปลอดภัยกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการพังทลาย โดยหาจากขอบบนและขอบล่างจากค่าโอกาสความน่าจะเป็น	190
รูปที่ 7.14	การวางแผนในการจัดการเชิงความเสี่ยงของระบบ	191
รูปที่ A.1	ฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน	202

รายการสัญลักษณ์

ในการอธิบายนิยามของสัญลักษณ์ เพื่อเป็นการสะดวกค่าสัญลักษณ์เหล่านี้จะเรียงลำดับอักษรตามการออกเสียงในภาษาอังกฤษ นอกจากนี้ยังมีการแสดงหน่วยประกอบด้วยเท่าที่จำเป็น

A	=	พื้นที่หน้าตัดของมวลที่สัมผัสกับพื้นผิวของการพังทลาย
		ความหนา หนึ่งหน่วย หน่วยเป็น ตร.เมตร หรือ ตร.ฟุต
a, b	=	พจน์ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของมวลรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณด้วยโปรแกรมที่มีแผ่นตารางทำการ
a_0	=	นิพจน์ตัวแปรรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลรูปสี่เหลี่ยม
a_1, b_1	=	นิพจน์ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของระนาบที่ 1 สำหรับมวลรูปสี่เหลี่ยม
a_2, b_2	=	นิพจน์ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของระนาบที่ 2 สำหรับมวลรูปสี่เหลี่ยม
a_i, b_i	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของนิพจน์ตัวแปรที่ใช้ในสมการคำนวณค่าโมเมนต์
a, b	=	หน่วยเวกเตอร์ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบที่ 1 และ 2 ของมวลรูปสี่เหลี่ยม ตามลำดับ
b	=	ระยะในแนวราบจากจุดยอดของความลาดเอียงถึงตำแหน่งที่เกิดรอยแตกจากแรงดึงในตะพักด้านบน หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
α	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของเลขชี้กำลัง
	=	พจน์ตัวแปรแสดงแนวทิศทางของระนาบที่ตัดเป็นมวลรูปสี่เหลี่ยม
α_i	=	มุมเอียงเทของส่วนแบ่งที่ i หน่วยเป็นองศา
α_i^*	=	ทิศทางโคไซน์ของจุดที่เกิดการพังทลาย วัดตามแกน x_i^* หน่วยเป็นองศา
α_Q	=	ฟังก์ชันเลขชี้กำลังของผลรวมแรงหรือโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
α_R	=	ฟังก์ชันเลขชี้กำลังของผลรวมแรงหรือโมเมนต์ที่ด้านไม่ให้เกิดการพังทลาย
B	=	ค่าคงที่เชิงกำลังวัสดุที่ได้จากรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการตัดความลาดชันมั่นคง
	=	ความกว้างของทางลำเลียงชั้นถ่านหิน หน่วยเป็นเมตร
b_i	=	พจน์แทนตัวแปรสุ่มที่เป็นเศษของเศษส่วนในสมการหาค่า FS ที่เป็นปัจจัยความปลอดภัย

β	=	ฟังก์ชันการแจกแจงตัวแปรสุ่มแบบเบตา
	=	ดัชนีความเชื่อถือได้ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
	=	ดัชนีความเชื่อถือได้จากการคำนวณด้วยวิธี ไมเมนต์อันดับที่สองของ Hasofer and Lind
β_1	=	มุมในแนวราบตามรูปแบบเรขาคณิตที่ใช้คำนวณเสถียรภาพของลิ่ม มุมนี้เป็นมุมระหว่างแนวสันหินของหน้าความลาดเอียงกับแนวสันหินของระนาบที่ 1 ที่สัมพันธ์กับมวลรูปลิ่ม
β_2	=	มุมในแนวราบตามรูปแบบเรขาคณิตที่ใช้คำนวณเสถียรภาพของลิ่ม มุมนี้เป็นมุมระหว่างแนวสันหินของหน้าความลาดเอียงกับแนวสันหินของระนาบที่ 2 ที่สัมพันธ์กับมวลรูปลิ่ม
β_a	=	มุมที่แรงดันข้างทำกับแนวราบบนส่วนแบ่ง ที่จุดครึ่งจุด a อยู่ตำแหน่งแนวการพังทลายตามวิธี Chen and Morgenstern
β_b	=	มุมที่แรงดันข้างทำกับแนวราบบนส่วนแบ่ง ที่จุดครึ่งจุด b อยู่ตำแหน่งแนวการพังทลายตามวิธี Chen and Morgenstern
β_i	=	สัมประสิทธิ์ของตัวแปรพิกัดที่หนึ่งที่ไม่พึงพิง
β_{HL}	=	ระยะที่สั้นที่สุดจากจุดกำเนิดไปยังพื้นผิวการพังทลาย
β_{max}	=	ดัชนีความเชื่อถือได้ที่มีค่าสูงสุด = R_i
C	=	เมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมเกี่ยว
C_c	=	ดัชนีการอัดของมวลดินเหนียว
C_F	=	ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างระหว่างที่มีการพังทลาย
		คำนวณเป็นมูลค่าสกุลเงินในปัจจุบัน
C_I	=	ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างเริ่มต้นที่ประมาณการณไว้
C_T	=	ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างทั้งหมดที่คาดการณ์ไว้
CFS	=	ค่ากลางปัจจัยความปลอดภัย เป็นค่าเฉลี่ยของตัวเลขเชิงเสถียรภาพมวลสารที่มีการขุดเจาะ
c	=	โคฮีชันหรือการยึดเกาะติดกันของอนุภาคมวลสาร
		หน่วยเป็นกิโลพาสคัล กิโลกรัมต่อตร.ฟุต หรือปอนด์ต่อตร.ฟุต
	=	ระยะทางคงที่จากจุดกำเนิดของวงรีไนพริภูมิยูลิติก
c.o.v.	=	สัมประสิทธิ์การแปรผันในเมทริกซ์สหสัมพันธ์
c_1, c_2	=	โคฮีชันของระนาบที่ 1 และ 2 ในการคำนวณเสถียรภาพของมวลรูปลิ่ม
c_a	=	ฟังก์ชันของค่าความสูง ความลึกดินถม กับความลึกดินชั้นล่าง
		ค่านี้เป็นค่าสมมูลที่ได้จากค่าเฉลี่ยของกำลังวัสดุเฉือนที่พึงพิงกับความลึกชั้นดิน หน่วยเหมือนค่าโคฮีชัน
C_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยของโคฮีชันมวลดิน

c_i	=	โคฮีชันที่ได้จากการทดสอบแท่งหินตัวอย่าง
c_m	=	โคฮีชันของมวลสารที่เป็นคันดินหรือคันทาง
c_s	=	โคฮีชันมวลสารที่มีการปรับค่าเชิงสถิติแล้ว
c'	=	โคฮีชันประสิทธิภาพของมวลสารที่วิเคราะห์ผล
c'_e	=	โคฮีชันของมวลสารที่มีการเคลื่อนที่ตามระนาบพื้นผิว การพังทลาย
c'_i	=	โคฮีชันประสิทธิภาพของมวลสารที่ถูกแบ่งส่วน
χ^2	=	สัญกรณ์ค่าสถิติเชิงความสัมพันธ์ที่หาจากผลคูณของ เมทริกซ์สำหรับความแปรปรวนร่วมเกี่ยว ที่ตัวแปรสุ่ม มีการแจกแจงค่าแบบปกติ
D	=	ระยะห่างในแนวฉากระหว่างระนาบของรอยแตกแยก L_1 กับ L_2 ของความลาดเอียง ค่าที่สูงสุด จะเท่ากับระยะห่างวิกฤต (S_c) หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต = ระยะในแนวตั้งวัดจากพื้นผิวดินถึงตำแหน่งสัมผัสของวงกลมวิกฤต = ระยะในแนวราบที่วัดจากจุดยอดของความลาดเอียง ถึงจุดตัดกันระหว่างระนาบเปราะบางกับส่วนบนของตะพัก
d_1	=	แกนของโมเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณค่า เมื่อคูณ กับน้ำหนัก W_1 หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
d_2	=	แกนของโมเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณค่า เมื่อคูณ กับน้ำหนัก W_2 หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
d_e	=	ความยาวสมมูลที่ใช้แทนค่ามิติเชิงเรขาคณิตของ ความยาวแนววิถีการพังทลาย หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
$(d_e)_{ave}$	=	ความยาวสมมูลเฉลี่ย
d_i	=	ระยะความยาวของฐานที่เป็นส่วนแบ่ง i หรือ $= a_i$
d_H	=	ความยาวที่ใช้แทนค่ามิติเชิงเรขาคณิตสำหรับ ระนาบที่มุมเอียงเทมีค่าสูง
d_L	=	ความยาวที่ใช้แทนค่ามิติเชิงเรขาคณิตสำหรับ ระนาบที่มุมเอียงเทมีค่าต่ำ
δ	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลแบบ spatial correlation
$\delta_{()}$	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวมันเองของแกนที่ แสดงเป็นพจน์ตัวห้อย หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
δ_1, δ_2	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวมันเองของระนาบที่ 1 และ ระนาบที่ 2 ตามลำดับ

E	=	แรงอัดจากบนด้านข้างส่วนแบ่ง หน่วยเป็นกิโลนิวตัน กิโลกรัม หรือปอนด์
$E(c)$	=	ค่าใช้จ่ายเชิงความคาดหมายเป็นสกุลเงิน ระยะในแนวราบจากจุดยอดความลาดเอียงถึงจุดตัดกันระหว่าง แนวราบสมมุติกับระนาบการพังทลาย หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
E'	=	แรงอัดจากประสิทธิผลบนด้านข้างส่วนแบ่ง
e_0	=	อัตราส่วนช่องว่างก่อนมีน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำมวลสาร
ϵ	=	มุมที่วัดระหว่างระนาบ 2 ระนาบตัดกัน (ระนาบที่ 1 กับ ระนาบที่ 2 ของมวลรูปสี่เหลี่ยม) และระนาบของมุม ϵ นี้ตั้งฉาก กับแนวสัณหิ
η	=	พจน์ที่ใช้แสดงเป็นค่าตัวเลขว่า มวลรูปสี่เหลี่ยมในความลาดเอียง เกิดการโอเวอร์เซงหรือไม่
F	=	พจน์ค่าลิมิตของพื้นที่การพังทลาย ในเมทริกซ์หาค่า ระยะที่สั้นที่สุด ใช้วงรีวิฤกตามวิธี Low and Tang
$F(\)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของนิพจน์หรือตัวแปรในวงเล็บ
$F(t)$	=	ฟังก์ชันความไม่น่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับเวลา ในการประเมิน ความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น
$F_Q(x)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของน้ำหนักบรรทุก ในกรณีที่จะหาค่า โอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย
$F_R(x)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของความต้านทานหรือกำลังวัสดุ ในกรณี ที่จะหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย
$F_{(R-Q)x}$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของขอบความปลอดภัย ในกรณี ที่จะหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย
FS	=	ปัจจัยความปลอดภัยของเสถียรภาพมวลสารต่อ การขูดเจาะ บางครั้งใช้สัญกรณ์แทนเป็น F.S.
$(FS)_{ave}$	=	ค่าเฉลี่ยของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย
F_s	=	ปัจจัยความปลอดภัยของการวิเคราะห์เรื่อง การพังทลายรูปอาร์กตามวิธี Chen and Morgenstern = ปัจจัยความปลอดภัยที่หาจากความสมดุลของโมเมนต์ ในเรื่องคันดินถม
F_v	=	ปัจจัยความปลอดภัยที่เกิดจากแรงเฉือนในแนวตั้งบนส่วนแบ่ง ตามวิธี Chen and Morgenstern
$f(\)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของนิพจน์หรือตัวแปรในวงเล็บ
$f(t)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของความไม่น่าเชื่อถือ เมื่อเทียบกับเวลา
$f_x(x)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง

\vec{r}	=	หน่วยเวกเตอร์ในทิศทางที่ฉากกับระนาบที่ 4 ของมวลรูปสี่เหลี่ยม
$G(X)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงภาวะชี้แจงจำกัดของสมรรถนะ ใช้หาค่าโอกาสการพังทลาย หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$G(q, r)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงสำหรับตัวแปร 2 ค่า อยู่ในบริเวณผลคูณ
$G^*(q, r)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงสำหรับตัวแปร 2 ค่า อยู่ในบริเวณพังทลาย
G_w	=	ความดันน้ำแบบแผ่กระจายรูปพีระมิดหรือรูปกรวยเหลี่ยม
G_{w1}, G_{w2}	=	ความดันน้ำแบบแผ่กระจายแบบพีระมิดบนระนาบที่ 1 กับที่ 2
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง หน่วย เมตร/วินาที ² , มิลลิเมตร/วินาที ² , ฟุต/วินาที ² , นิ้ว/วินาที ²
	=	ระยะในแนวราบที่วัดจากตำแหน่งบนผิวหน้าความลาดเอียงที่เกิดรอยแตกจากแรงดึงจนถึงจุดตัดกัน ระหว่างระนาบเปราะบางกับส่วนบนของตะพัก หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
$g(X)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นชี้แจงจำกัดสมรรถนะ
\vec{g}	=	เวกเตอร์ในแนวที่เป็นเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 4 ของมวลรูปสี่เหลี่ยม
γ	=	หน่วยน้ำหนักของมวลสาร มีหน่วยเป็นกิโลพาสคัล กิโลกรัมต่อตร.เมตร กิโลกรัมต่อตร.ฟุต หรือปอนด์ต่อตร.ฟุต
γ_d	=	หน่วยน้ำหนักมวลสารที่มีการระบายน้ำออก
γ_R	=	หน่วยน้ำหนักของมวลหิน
γ_w	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ
γ_u	=	อัตราส่วนความดันในโพรงช่องว่าง
$\Gamma^2(L)$	=	ตัวประกอบความแปรปรวนร่วมเกี่ยว
H	=	ความสูงในแนวตั้งของเส้นที่เกิดจากระนาบที่ 1 ตัดกับระนาบที่ 2 เมื่อวัดจากจุดปลายมวลสี่เหลี่ยมด้านล่าง ไปยังจุดปลายมวลสี่เหลี่ยมด้านบน หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
	=	ความสูงหรือความลึกที่สายชั้นถ่านอยู่ใต้ระดับพื้นผิว
	=	ความสูงในแนวตั้งของคันดินถม
	=	ความหนาชั้นดินเหนียว
h	=	ความสูงในแนวตั้งของมวลความลาดเอียงบนระนาบ
	=	ความสูงในแนวตั้งของเส้นที่เกิดจากระนาบที่ 1 ตัดกับระนาบที่ 2 เมื่อวัดจากจุดปลายมวลสี่เหลี่ยมด้านล่าง ไปยังจุดแนวสันหินของผิวหน้าความลาดที่ผ่านมวลรูปสี่เหลี่ยม
$(h)_{ave}$	=	ความสูงเฉลี่ยในแนวตั้งของมวลบนระนาบเชิงเส้นที่มีโอกาสของการพังทลาย

h_c	=	ระยะวิกฤตสำหรับความสูงในแนวตั้งของรอยแตกแยกจากแรงดึง เมื่อมีการถมคันดิน
h_w	=	ระยะความสูงในแนวตั้งที่น้ำขังในรอยแตกแยกจากแรงดึง เมื่อมีการถมคันดิน
i	=	พจน์แทนลำดับที่ของตัวแปรสุ่มที่มีจำนวน ตั้งแต่ 1 ถึง n
\vec{i}	=	ขนาดของเวกเตอร์ - i_z ในมวลรูปสี่ม เวกเตอร์ในแนวที่เป็นเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 2 ของมวลรูปสี่ม
J_I	=	ความเข้มหรือความหนาแน่นของรอยแตกแยกในมวลสาร หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$J_{I_{ave}}$	=	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของรอยแตกแยก
J_L	=	ความยาวของรอยแตกแยกในความลาดเอียง หน่วยเป็นฟุต
$J_{L_{ave}}$	=	ค่าเฉลี่ยความยาวของรอยแตกแยกในความลาดเอียง
J_{PP}	=	ความต่อเนื่องของระนาบรอยแตกแยกในความลาดเอียง หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$J_{PP_{ave}}$	=	ค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของระนาบรอยแตกแยก
J_S	=	ระยะห่างในแนวฉากระหว่างระนาบของรอยแตกแยกในความลาดเอียง หน่วยเป็นฟุต
$J_{S_{ave}}$	=	ค่าเฉลี่ยระยะห่างในแนวฉากระหว่างระนาบของรอยแตกแยก
k	=	อัตราส่วนของ H/h ในการคำนวณเสถียรภาพของมวลรูปสี่ม บางกรณีใช้สัญลักษณ์ K
L	=	ค่าสัมบูรณ์ของเวกเตอร์ i ที่ยกกำลังสอง ความยาวระนาบเชิงเส้นของการพังทลาย หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต ความยาวของเส้นโค้งรูปอาร์กการพังทลาย ตัวคูณลากรองจ์ เป็นพจน์ตัวแปรเชิงสเกลาร์ ความยาวของฟิลลาร์ในเหมืองใต้ดิน หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
L_1	=	ระยะความยาวรอยแตกแยกที่กำหนด วัดจากจุดตัดของเส้นขนหน้าความลาดเอียงกับระนาบเปราะบาง ไปยังตำแหน่งที่กำหนด (เกินครึ่งหนึ่งของระยะ L ไปเล็กน้อย)
L_2	=	ระยะความยาวรอยแตกแยกที่กำหนดวัดจากจุดตัดของเส้นตะพักค้ำขนความลาดเอียงกับระนาบเปราะบาง ไปยังตำแหน่งที่กำหนด (เกินครึ่งหนึ่งของระยะ L ไปเล็กน้อย)

L_j	=	ความยาวของระนาบรอยแตกแยกที่ต่อเนื่อง เป็นวิถีวิกฤต เป็นค่าเฉลี่ย ที่หาจากอัตราส่วนความสูงต่อ ไซน์ของมุมเอียง เทระนามที่กระทำกับแนวราบ
ΔL	=	ระยะความยาวด้านฐานของส่วนแบ่งที่หาจากการประมาณเชิงเส้น
ℓ	=	อัตราส่วนของ W / A_2 ในการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม
	=	ผลคูณของ H กับ $\cot \Omega$ ในเรื่องคันดินถม
lever	=	อักษรแสดงแขนของโมเมนต์ที่เกิดจากแรงเสริมในแนวราบของคันดินถม
λ	=	พจน์ตัวแปรที่เป็นตัวคูณในสัญกรณ์เมทริกซ์ เพื่อหาค่ามิติที่เหมาะสมที่สุด
	=	ตัวคูณในสมการเชิงเส้นที่ต้องการหาค่ามุมเอียงเทของแรงต้านข้าง ในกรณีที่แรงต้านข้างคงที่
	=	กำหนดให้ $\beta = \tan \beta$ (β เป็นมุมเอียงเทที่กระทำด้านข้างส่วนแบ่งตามวิธี Chen and Morgenstern)
	=	พจน์ที่ได้จากการประมาณค่าอัตราส่วนระหว่าง มุมเอียงเทกับสัดส่วนความสูงในแนวตั้ง ในเรื่องคันดินถมบนชั้นดินอ่อน
M_O	=	โมเมนต์จากวงกลมวิกฤตที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุก ก่อให้เกิดการคว่ำ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน-เมตร หรือ ฟุต-ปอนด์
M_Q	=	โมเมนต์ที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุก ก่อให้เกิดการพังทลาย
M_R	=	โมเมนต์ที่เป็นผลมาจากความต้านทานการพังทลายของมวลสาร
	=	โมเมนต์จากวงกลมวิกฤตที่ต้านทานการพังทลาย
M_T	=	โมเมนต์จากแรงเสริมเสถียรภาพในแนวระดับของคันดินถม
ΔM_O	=	โมเมนต์จากแรงค้ำน้ำในรอยแตกแยกจากแรงดึง
m	=	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม หรือ ใช้สัญลักษณ์ $mean_x$ หรือ x_{mean}
	=	ค่าเฉลี่ยสำหรับเมทริกซ์ของการกระจายค่าวงรี ที่มีการหมุนหรือมีการเอียงจากแนวราบ เพื่อหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
m_1	=	อัตราส่วน N_1 / A_2 ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม เมื่อมีการสัมผัสกับระนาบที่ 1 เท่านั้น
m_2	=	อัตราส่วน N_2 / A_2 ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม เมื่อมีการสัมผัสกับระนาบที่ 2 เท่านั้น
$mean_{()}$	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ที่เป็นตัวห้อย
$mean_G$	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ G ที่เป็นฟังก์ชันสมรรถนะ
$mean_Q$	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ Q ที่เป็นฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุก

$mean_R$	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ R ที่เป็นฟังก์ชันกำลังวัสดุหรือความต้านทาน
$mean_x$	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ x ที่เป็นตัวแปรสุ่ม
μ	=	สัญกรณ์ที่ใช้เขียนแทนพจน์ค่าเฉลี่ย ในการวิเคราะห์การ ตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องที่มีการแจกแจงแบบปกติ
N, n	=	จำนวนตัวแปรในระบบ
N'	=	แรงอัดจากประสิทธิผลบนระนาบการพังทลาย
$N_f(t)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของการพังทลาย สำหรับพจน์ ตัวแปร N ค่า ในเวลา $t = P_f(t)$
$N_s(t)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของความปลอดภัย สำหรับพจน์ ตัวแปร N ค่า ในเวลา $t = P_s(t)$
n_1	=	อัตราส่วน N_1/A_2 ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปสี่ เมื่อมีการสัมผัสกับระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 2
n_2	=	อัตราส่วน N_2/A_2 ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปสี่ เมื่อมีการสัมผัสกับระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 2
O	=	จุดกำเนิดของแกน
Ω	=	มุมเอียงของระนาบตะพักชั้นมันไคด้านบน เมื่อวัด เทียบกับแนวราบ หน่วยเป็นองศาหรือเรเดียน
	=	มุมเอียงของระนาบผิวหน้าความลาดของคันดินถม
PDF	=	ค่าความน่าจะเป็นของ $N(\mu, \sigma)$ ที่หาจากพื้นที่ใต้เส้นโค้ง
PRA	=	การประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น
$P(\)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของพจน์หรือตัวแปร ในวงเล็บ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$P(Q)$	=	การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
$P(R)$	=	การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าที่ต้านทานการพังทลาย
$P(f)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย
$P_f(t)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของการพังทลาย สำหรับพจน์ตัวแปร N ค่า ในเวลา $t = N_f(t)$
$Pr(\)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม สำหรับพจน์ในวงเล็บ
$P_s(t)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของความปลอดภัย สำหรับพจน์ตัวแปร N ค่า ในเวลา $t = N_s(t)$
$p(G)$	=	ความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย เนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนรวมยอด
$p(f)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นสำหรับความน่าจะเป็นของการพังทลาย หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$p(f)h$	=	ความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย ที่ขึ้นกับความสูง ในแนวดิ่งหรือความลึกของมวลบนระนาบเอียงบาง
$p(x)$	=	ฟังก์ชันที่กำหนดให้เหมาะสมสำหรับมวลสารที่ถูกแบ่งส่วน
p_0	=	ความดันประสิทธิผลที่ระยะกึ่งกลางของชั้นดิน ก่อนที่จะมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำ
p_1, p_2, p_3	=	ความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย 3 เหตุการณ์ที่ ไม่เกิดรวม แยกออกจากกัน
p_c	=	ความน่าจะเป็นของค่าโอกาสวิกฤตการพังทลาย
ΔP	=	ความดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการรกดัดจากโครงสร้างสิ่งก่อสร้าง
$\Phi(\)$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงของพจน์ในวงเล็บที่ไม่มีค่าลดลง ใช้หาค่าโอกาสการพังทลาย
$\Phi(x)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของตัวแปรสุ่ม x ที่มีการแจกแจงปกติ แบบมาตรฐาน
$\Phi(x_p)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของตัวแปรสุ่ม x ที่มีค่าเท่ากับ เปอร์เซ็นต์โอกาสความน่าจะเป็น
ϕ	=	มุมเสียดทานภายในของมวลสาร หน่วยเป็นองศาหรือเรเดียน
$\phi(\)$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของพจน์ในวงเล็บที่ไม่มีค่าลดลง ใช้หา ค่าโอกาสการพังทลาย
ϕ_1, ϕ_2	=	มุมเสียดทานภายในของระนาบที่ 1 และ 2 ใช้ในการ คำนวณเสถียรภาพของมวลรูปลิ้ม
ϕ_i	=	มุมเสียดทานภายในที่ได้ เป็นค่ามุมที่ทดสอบจากแท่งตัวอย่าง
ϕ_m	=	มุมเสียดทานภายในของมวลสารที่เป็นคันดินหรือคันทาง
ψ_1	=	มุมเอียงเทของระนาบที่ 1 เมื่อวัดเทียบกับแนวนอน หน่วยเป็นองศาหรือเรเดียน ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพ ของมวลรูปลิ้ม
ψ_2	=	มุมเอียงเทของระนาบที่ 2 เมื่อวัดเทียบกับแนวนอน
ψ_f	=	มุมเอียงเทของระนาบผิวหน้าความลาดชัน
ψ_p	=	มุมเอียงเทของระนาบเอียงบางที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
$(\psi_p)_{ave}$	=	ค่าเฉลี่ยมุมเอียงเทของระนาบเอียงบาง
Q	=	น้ำหนักบรรทุก (load) ที่กระทำต่อมวลสารในระบบก่อกำ เกิดการพังทลาย พจน์นี้เมื่อเป็นค่าแรง หน่วยเป็นกิโลนิวตัน กิโลกรัม หรือปอนด์ พจน์นี้เมื่อเป็นค่าความเค้น หน่วยเป็น กิโลพาสคัล กิโลกรัมต่อตร.ฟุต หรือปอนด์ต่อตร.ฟุต
	=	ฟังก์ชันการแจกแจงน้ำหนักบรรทุก

Q'	=	ตัวแปรสุ่มน้ำหนักรทุกที่ถูกกลคทอน
Q_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักรทุกที่กระทำ ต่อมวลสารในระบบ = $mean_Q$
Q_{max}	=	น้ำหนักรทุกสูงสุดที่กระทำต่อมวลสารในระบบ
Q_{min}	=	น้ำหนักรทุกต่ำสุดที่กระทำต่อมวลสารในระบบ
QRA	=	การวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ
q	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของน้ำหนักรทุกที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ส่วนประกอบของ \vec{g} ในทิศทางของ \vec{B}
R	=	ความต้านทาน (resistance) ที่กระทำต่อมวลสารในระบบ ก่อให้เกิดการต้านต่อการพังทลาย
R	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความต้านทาน = รัศมีของอาร์กวงกลม หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
$R.I.$	=	ดัชนีความเชื่อถือได้ เท่ากับค่าที่ β_{max} บางที่เขียนเป็น R_i หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$R(t)$	=	ฟังก์ชันความเชื่อถือได้เมื่อเทียบกับเวลา ในการประเมิน ความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น
R'	=	ตัวแปรสุ่มความต้านทานที่ถูกกลคทอน
R_{JL}	=	ความต้านทานที่ผิวสัมผัสของรอยแตกแยก เท่ากับ R_j
R_{RBL}	=	ความต้านทานในช่วงรอยต่อระนาบในแนว เท่ากับ R_r
R_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักรทุกที่ต้านทานต่อการพังทลาย = $mean_R$
R_i	=	ดัชนีความเชื่อถือได้ เท่ากับ $R.I.$
R_j	=	ความต้านทานที่ผิวสัมผัสของรอยแตกแยก เท่ากับ R_{JL}
R_{max}	=	น้ำหนักรทุกสูงสุดที่ต้านต่อการพังทลาย
R_{min}	=	น้ำหนักรทุกต่ำสุดที่ต้านต่อการพังทลาย
R_p	=	กำลังวัสดุของฟิลลาร์ที่ค้ำยันในเหมืองใต้ดิน
R_r	=	ความต้านทานในช่วงรอยต่อระนาบในแนว เท่ากับ R_{RBL}
R_{rH}	=	ความต้านทานในช่วงรอยต่อระนาบมีค้ำมุมเอียงเทสูงในแนว
RBL	=	ความยาวของช่วงต่อระนาบรอยแตกแยกในแนว หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
RBL_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยความยาวของช่วงต่อระนาบรอยแตกแยก
r	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของน้ำหนักรทุกที่ต้านการพังทลาย ส่วนประกอบของ \vec{a} ในทิศทางของ \vec{B}
r_d	=	รัศมีช่องว่างเปิดได้ผิวคินที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต

ρ	=	ความหนาแน่นของมวลสาร หน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อลบ.ม. กิโลกรัมต่อลบ.ม. กิโลกรัมต่อลบ.ฟุต ปอนด์ต่อลบ.ฟุต
	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความแปรปรวนร่วมเกี่ยว
$(\rho)_{ave}$	=	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมวลสาร
S_1, S_2	=	แรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อมวลรูปสัมผัสสัมผัสกับระนาบที่ 1 หรือระนาบที่ 2 เท่านั้น
S	=	ระยะห่างวิกฤตของระนาบรอยแตกแยกในมวลสาร ที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ = D_{max}
S_p	=	น้ำหนักบรรทุกที่กระทำในแนวตั้งบนฟิลลาร์ค้ำยัน หน่วยเป็น เมกะพาสคัล กิโลกรัมต่อตร.เมตร กิโลกรัมต่อตร.ฟุต หรือปอนด์ต่อตร.ฟุต
s_f	=	ค่าใช้จ่ายของการเชื่อมกับเก็บกวาดวัสดุ เมื่อเกิดการพังทลาย
$s(x)$	=	ฟังก์ชันที่อิงตามสมมติฐานให้มีค่าเหมาะสมกับ $\beta(x)$
s_{11}	=	พิกัดบนผิววงรีในแกน x_{11} สำหรับปริภูมิบุคคล
s_{12}	=	พิกัดบนผิววงรีในแกน x_{22} สำหรับปริภูมิบุคคล
$\Sigma(\)$	=	ผลรวมของนิพจน์ในวงเล็บ
σ	=	พจน์ตัวแปรแสดงแทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$\sigma(\)$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรในวงเล็บ
$\sigma_{()}$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรในวงเล็บที่เป็นตัวห้อย
σ_G	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันสมรรถนะ
$\sigma(Q)$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักบรรทุกที่ก่อให้เกิด การพังทลาย = σ_Q
$\sigma(R)$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักบรรทุกที่ต้าน การพังทลาย = σ_R
$\sigma(Z)$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขอบความปลอดภัย = σ_z
σ_1, σ_2	=	ความเค้นอัดฉากที่กระทำในแนวแกนที่ 1 กับที่ 2 ตามลำดับ หน่วยเป็นกิโลพาสคัล กิโลกรัมต่อตร.เมตร กิโลกรัมต่อตร.ฟุต ปอนด์ต่อตร.ฟุต
σ_c	=	กำลังวัสดุแกนเดี่ยวที่เป็นค่าจากการทดสอบแท่งตัวอย่าง
σ_i	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรที่ i
σ_n	=	ความเค้นอัดฉากบนระนาบ
σ'_n	=	ความเค้นอัดฉากประสิทธิภาพบนระนาบของมวลสารที่ มีการเคลื่อนที่
σ_p	=	ความเค้นอัดที่กระทำบนฟิลลาร์ค้ำยัน

T	=	แรงเสริมในแนวราบที่กระทำต่อคันคินถม หรือใช้ยางสังเคราะห์ เมื่อคูณกับแขนของ lever จะได้เป็นโมเมนต์ เสริมเสถียรภาพ
ΔT	=	แรงเฉือนด้านข้างของส่วนแบ่ง
T_s	=	ความเค้นดึงที่ที่เป็นค่าจากการทดสอบแท่งตัวอย่าง
t	=	เวลาจริง หน่วยเป็นวินาที
$(t_r)_{ave}$	=	ค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการพังทลาย หน่วยเป็นวินาที
$\tan \phi$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในบนระนาบ
τ	=	ความเค้นเฉือนบนระนาบเปราะบาง บางที่ใช้สัญลักษณ์ τ_n
θ	=	ค่า arc cosine ของสามเหลี่ยมที่มีมุม θ แบ่งครึ่งมุมในแนวรัศมีของอาร์กวงกลมวิกฤต (2θ)
θ_h	=	มุมที่วัดในแนวรัศมีที่จุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤต เป็นค่ามุมระหว่างปลายสักรอยแตกจากแรงดึง (หรือจุดบนสุดของคันคินถมที่อาร์กวงกลมคัต) ถึงระดับพื้นผิวที่อาร์กวงกลมคัตผ่าน
U, u	=	แรงคั้นหรือความคั้นน้ำ ที่เป็นผลจากน้ำที่ขังในระนาบก่อนให้เกิดการยกตัวมวลสาร
$U Z$	=	หน่วยขอบความปลอดภัย ใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
u_i	=	แรงคั้นน้ำที่ก่อให้เกิดการยกตัวของส่วนแบ่งที่ i
V	=	แรงคั้นน้ำที่เกิดจากน้ำที่ขังในรอยแตกแยกจากแรงดึง
$V ()$	=	สัมประสิทธิ์ความแปรผันของนิพจน์หรือตัวแปรในวงเล็บ
$V ()$	=	สัมประสิทธิ์ความแปรผันของนิพจน์หรือตัวแปรที่เป็นตัวห้อย
$V (Z)$	=	สัมประสิทธิ์ความแปรผันของขอบความปลอดภัย
V_G	=	ความแปรผันของฟังก์ชันสมรรถนะ
V_Q	=	ความแปรผันของน้ำหนักบรรทุกที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
V_R	=	ความแปรผันของน้ำหนักบรรทุกที่ด้านการพังทลาย
$V_{(R-Q)}$	=	ความแปรผันของขอบความปลอดภัย
V_y	=	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวน
W	=	น้ำหนักมวลสารบนระนาบเปราะบาง หน่วยเป็นกิโลนิวตัน กิโลกรัม หรือ ปอนด์
	=	ความกว้างของฟิลลาร์ค้ายัน หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
W_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักมวลสารบนระนาบเปราะบาง
W_1	=	น้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายทางด้านขวาของจุดหมุนโมเมนต์

W_2	=	น้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายทางด้านซ้าย ของจุดหมุนไมเมนต์
W_i	=	น้ำหนักมวลของส่วนแบ่งที่ i
W_n	=	น้ำหนักมวลของส่วนแบ่งลำดับที่ n
W'	=	น้ำหนักประสิทธิผลของมวลส่วนแบ่งที่มีการเคลื่อนที่
X_1, X_2	=	แกนพิกัดที่ 1 และ 2 ของปริภูมิยุคลิด บางที่ใช้ เป็น x_1, x_2
X_i	=	ตัวแปรสุ่มพื้นฐาน โดยที่ค่า $i = 1, 2, \dots, n$ บางที่ใช้เป็น x_i
$(X_i)_{ave}$	=	ค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มพื้นฐาน บางที่ใช้เป็น x_{ave}
$(X_i)'$	=	ตัวแปรสุ่มที่มีค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นศูนย์
x	=	ตัวแปรที่ไม่พึงพิงหรือตัวแปรอิสระ เป็นตัวแปรในพิกัดที่หนึ่ง = แกนพิกัดที่หนึ่ง ในระบบคาร์ทีเซียน = พิกัดในแนวราบ วัดจากจุดล่างสุดของคันดินถม ถึงจุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤต
x_e	=	ค่าใช้จ่ายของการขุดเจาะ
Δx	=	ความกว้างในแนวราบของส่วนแบ่ง
$x_{()}$	=	ค่าเฉลี่ยตัวแปรที่ไม่พึงพิง ซึ่งลำดับที่อยู่ในวงเล็บของตัวห้อย
x_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยของพจน์ตัวแปรที่ไม่พึงพิง
x_p	=	ค่าแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม x
x^*	=	พิกัดในตำแหน่งจุดกำเนิด เดิมที่อยู่ในพื้นที่การพังทลาย
$x^{*'} $	=	พิกัดใหม่ที่ถูกรูปแปลงหรือลดทอนและอยู่ในพื้นที่การพังทลาย
x_i^*	=	พิกัดของตัวแปรที่ i ในตำแหน่งจุดกำเนิด เดิมที่อยู่ในพื้นที่ การพังทลาย
$x_i^{*'} $	=	พิกัดใหม่ของตัวแปรที่ i ที่ถูกรูปแปลงหรือลดทอนและอยู่ใน พื้นที่การพังทลาย
ξ	=	ตัวแปรหุ่นที่ใช้แทนค่า x ในปริพันธ์เพื่อหาแรงดันด้านข้าง ที่เป็นพจน์ $G(x)$ ตามวิธี Chen and Morgenstern
y	=	ตัวแปรที่พึงพิง หรือตัวแปรพิกัดที่สอง = แกนพิกัดที่สอง ในระบบคาร์ทีเซียน
y_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยของ y ที่หาจากอนุกรมของเทย์เลอร์
y_o	=	ระยะในแนวตั้งจากระดับราบของจุดต่ำสุดความลาดเอียง ถึงระนาบการพังทลาย หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต

- Z = ขอบของความปลอดภัย หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นผลต่าง
 ระหว่างค่าพจน์ที่ด้านภาระพังทลายกับค่าพจน์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
 Z = ความยาวของรอยแตกจากแรงดึงที่มีสมมุติฐานให้เกิด
 ในแนวตั้ง หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
 Z_{ave} = ค่าเฉลี่ยของขอบความปลอดภัย
 Z_w = ระยะที่มีน้ำแข็งในรอยแตกจากแรงดึงที่เกิดในมวลความลาดเอียง
 Z = แกนพิทักที่สาม ในระบบคาร์ทีเซียน
 Z = พิกัดในแนวตั้งของจุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤต วัดจากจุด
 ศูนย์กลางวงกลมถึงจุดกำเนิดแกนใน $x-z$ plane
 Z_0 = ระยะในแนวตั้งจากระดับราบของจุดยอดความลาดเอียง
 ถึงตำแหน่งส่วนบนสุดของรอยแตกจากแรงดึง ที่เกิดใน
 ผิวหน้าความลาด หน่วยเป็นเมตรหรือฟุต
 $z(t)$ = ฟังก์ชันความหนาแน่นของอัตราเหตุเป็นภัย ในเวลา t
 ζ = คิวแปรหุนอีกค่าหนึ่งที่ใช้แทนค่า x ในปริพันธ์เพื่อหาแรง
 ดันด้านข้างที่เป็นพจน์ $G(x)$



บทที่ 1

บทนำ

แนวทางกับขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัย เรื่อง "การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินและใต้พื้นผิวดิน" นี้ มีแนวทางเพื่อหาความเหมาะสมเชิงเปรียบเทียบ ในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพพหุงานการก่อสร้างสำหรับการขุดเจาะมวลสารทั้งที่อยู่บนพื้นผิวหรือใต้พื้นผิวดิน

งานการศึกษาวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ งานการขุดเจาะบนพื้นผิวดิน กับงานการขุดเจาะใต้พื้นผิวดิน โดยมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าเสถียรภาพตามรูปแบบการวิเคราะห์เชิงกำหนด (deterministic analysis) กับรูปแบบการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น (probability analysis) พร้อมทั้งนำข้อมูลภาคสนามซึ่งส่วนใหญ่ซึ่งเป็นงานการขุดเจาะภายในประเทศ มาลองทดสอบหาผลลัพธ์เพื่อเป็นตัวอย่างสำหรับใช้เป็นกรณีศึกษา (case histories) ของโครงการ

1.1 แนวทางและขอบเขตการศึกษาของโครงการ

ปัญหาในการปฏิบัติงานภาคสนาม เมื่อมีการวิเคราะห์ผลของค่าเสถียรภาพ เนื่องจากมีตัวแปรสุ่มหลายชนิดที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ยากต่อการตัดสินใจว่า ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่ค่าใดจึงจัดเป็นตัวเลขที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด มีความเสี่ยงในเชิงการพังทลายน้อยสุด หรือตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่ค่าใดจัดเป็นจุดวิกฤตที่แท้จริง

ประเด็นที่สำคัญในการศึกษาเสถียรภาพของพหุงานการก่อสร้าง ได้แก่ มวลสารที่ถูกทำการขุดเจาะนั้นเป็นมวลดินหรือมวลหิน ในธรรมชาติความแปรปรวนของค่าคุณสมบัติดินหรือหินเมื่ออยู่ค่อนข้างสูง ดังนั้นตัวเลขที่ได้จากการทดสอบเมื่อลองมาคำนวณหาเสถียรภาพเชิงแรงหรือเชิงโมเมนต์ มีเปอร์เซ็นต์ค่าโอกาสความผิดพลาดสูง

การวิเคราะห์เสถียรภาพในอีกรูปแบบหนึ่งที่ไม่ใช่วิธีการที่คำนวณเสถียรภาพโดยตรง แต่เป็นการหาค่าเชิงสถิติของโอกาสของความน่าจะเป็น (probability) จากการพังทลาย จัดเป็นหัวข้อหลักของการศึกษาวิจัยในโครงการนี้ แนวทางหลักใช้ความรู้สถิติเชิง

ความเชื่อถือได้หรือความไว้วางใจได้ (reliability) อันเป็นการศึกษาหาสมรรถนะ (performance) ทั้งระบบ นอกจากนี้การศึกษาวิจัยของโครงการได้เสนอแนวทางเปรียบเทียบการวิเคราะห์ในรูปแบบเดิม (เชิงกำหนด) กับในรูปแบบใหม่ (เชิงความน่าจะเป็น) เพื่อหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมไว้ด้วย

1.2 รูปแบบของการนำเสนอรายงานวิจัย

รายงานวิจัยฉบับแรกที่ได้นำเสนอในเดือนมีนาคม 2542 แบ่งหัวข้อการวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นการรวบรวมทฤษฎีการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติทั้งนี้เพื่อหาความเชื่อถือได้ของระบบ ในงานการขุดเจาะเชิงวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมเหมืองแร่ ส่วนที่สองเป็นการรวบรวมข้อมูลและหาวิธีการวิเคราะห์ปัญหาภาคสนาม สำหรับงานการขุดเจาะบนพื้นผิวโดยเน้นเรื่องเสถียรภาพของความลาดเอียง ส่วนที่สามเหมือนกับส่วนที่สองแต่เน้นเรื่องการขุดเจาะใต้พื้นผิว ในส่วนที่สี่ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของรายงานวิจัยฉบับแรกเป็นการศึกษาและหาวิธีการจัดการด้านความเสี่ยงของการปฏิบัติงานในระบบ

รายงานวิจัยฉบับที่สอง ได้นำเสนอในเดือนกรกฎาคม 2542 เป็นการปรับปรุงเนื้อหาเชิงทฤษฎี กับผลการวิเคราะห์ให้สมบูรณ์ขึ้น ในส่วนของการขุดเจาะบนพื้นผิวดิน เน้นการหาเสถียรภาพที่ในแนวทางการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น และให้ใช้ได้หลายรูปแบบของการพังทลายของมวลสารบนพื้นผิวดิน

ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ ที่เป็นรายงานฉบับที่สาม ได้นำเสนอในเดือนพฤศจิกายน 2543 โดยมีเนื้อหาทาง ทฤษฎีกับรูปแบบการวิเคราะห์ผลคล้ายคลึงกับรายงานฉบับที่สอง แต่ในร่างรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ มีการปรับปรุงการวิเคราะห์ในส่วนที่มีการใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการ (spread sheet) ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้ทำให้เกิดความสะดวก คล่องตัว และสามารถใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ไม่ต้องมีหน่วยความจำสูงมาก ในส่วนเพิ่มเติมของโครงการเป็นกรณีศึกษา มีการทดลองนำข้อมูลภาคสนามการขุดเจาะ (ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากการเก็บข้อมูลในประเทศไทย) เพื่อหาค่าตัวเลขเสถียรภาพเชิงความเสี่ยง และยังมีการนำเสนอเพิ่มเติมสำหรับการจัดการ เพื่อวางแผนการสำรวจหรือการออกแบบงานขุดเจาะทั้งระบบ กับเสนอวิธีการลดความเสี่ยงในระหว่างการปฏิบัติงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่ามีความปลอดภัย และคุ้มค่าต่อการดำเนินงาน

รายงานฉบับนี้ซึ่งเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ ที่ได้รับอนุมัติจากคณะกรรมการประเมินผลโครงการวิจัยทุนรัชดาภิเษกสมโภชให้ทำการเผยแพร่ได้ จึงทำการพิมพ์เผยแพร่ในเดือนเมษายน 2544 เนื้อหาเกือบทั้งหมดคล้ายคลึงกับร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ แต่มีการแก้ไขเพิ่มเติมตามข้อเสนอแนะของคณะกรรมการวิจัย เพื่อให้รายงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น



บทที่ 2

แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ งานการขุดเจาะ

การออกแบบที่ดีสำหรับงานก่อสร้างที่มีการขุดเจาะในมวลสาร เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความปลอดภัยของระบบ ทำให้เกิดความมั่นใจต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม ก่อนที่ชุมชนจะเข้าใกล้กับนิคมรับความเสี่ยงได้ ปกติค่าคุณสมบัติมวลสาร (ดินหรือหิน) กับขนาดมิติเชิงเรขาคณิต จัดเป็นค่าแปรผันที่มีความแปรปรวนสูง การวิเคราะห์เสถียรภาพจึงควรใช้แนวทางของสถิติเชิงความน่าจะเป็น ควบคู่กันกับการวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์ที่จุดสมดุลเชิงแรงหรือโมเมนต์ด้วย ทั้งนี้ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานมีความแน่ใจว่าจะไม่เป็นภาระเสี่ยงเกินไป หรือเป็นการออกแบบในลักษณะที่เกินความจำเป็น ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด

การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลสาร วิธีเชิงกำหนด (deterministic method) เป็นพื้นฐานสำหรับงานการออกแบบขุดเจาะของโครงการก่อสร้างเชิงวิศวกรรมโยธา หรือเชิงวิศวกรรมเหมืองแร่ เช่น การถมดินทำคันทาง การตัดไหล่เขา การเปิดหน้าเหมืองแบบขั้นบันได หรือการขุดเจาะอุโมงค์ เป็นต้น สิ่งก่อสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องมีการตรวจสอบยืนยันว่าจะไม่เกิดการพังทลายก่อนกำหนดเวลาอันสมควร หรือมีเสถียรภาพที่เหมาะสมตลอดอายุการใช้งานสำหรับสิ่งก่อสร้างชนิดนั้น

2.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรง

หลักการทั่วไปของการหาเสถียรภาพมวลสารหน้างานขุดเจาะ สิ่งแรกที่จะก่อให้เกิดความแน่ใจว่าระบบโครงสร้างมวลสารมีเสถียรภาพสูงเพียงพอ ได้แก่ การกำหนดตัวเลขเชิงเสถียรภาพจากการหาความสมดุลของแรงที่กระทำต่อมวลสารที่อยู่บนระนาบที่อาจก่อให้เกิดการพังทลาย (plane of failure) ระนาบที่ระบุนี้ อาจอยู่ในรูปแบบที่เป็นระนาบเชิงเส้น หรือเป็นระนาบรูปโค้งคล้ายอาร์ก หรือรูปแบบอื่น ซึ่งค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพตามปกติเรียกว่า ปัจจัยความปลอดภัย (factor of safety) มีสูตรทั่วไปสำหรับการคำนวณค่า ϕ จุดสมดุลของแรงเฉือนที่ขนานกับผิวระนาบ เป็น

$$FS = \frac{\text{ผลรวมแรงต้านทานต่อการเลื่อนไถล}}{\text{ผลรวมแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล}} = 1 \quad (2.1)$$

การหาความสัมพันธ์ที่ระบุในสมการที่ 2.1 ข้างบนนี้ เป็นค่าแรงเฉือน (shear force) ที่กระทำในแนวนานกับระนาบของการพังทลาย

2.1.2 เงื่อนไขของการพังทลายเมื่อคำนวณจากความสมดุลเชิงแรง

เงื่อนไขต่างๆ ที่เป็นสิ่งกำหนดว่า มวลสารจะเลื่อนไถลตามพื้นผิวของระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย หรือเกิดการเลื่อนไถลเชิงเส้น (translational sliding) ได้หรือไม่ (ดูรูปที่ 2.1 หน้า 5) มีหลักการดังนี้

1. การสมดุลเชิงสถิตยศาสตร์

การสมดุลลักษณะนี้เป็นเงื่อนไขหลักที่จำเป็นต้องวิเคราะห์ทุกครั้ง เมื่อการพังทลายหรือการเคลื่อนที่เกิดขึ้น ตามหลักการขีดจำกัดของการสมดุล (limit equilibrium) จะกำหนดให้ค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ที่จุดสมดุลพอดีมีค่าเท่ากับ 1 (หนึ่ง)

2. คุณสมบัติเฉพาะของมวลสารและการวางตัวของระนาบ

ระนาบที่จะเกิดการเลื่อนไถล ควรมีแนวการวางตัวของระนาบ ที่มีเรียกว่า แนวสันระนาบหรือแนวสันหิน (strike) ขนาน หรือเกือบขนานกับหน้า (พื้น) ความลาดเอียง นอกจากนี้ค่ามุมเอียงเท (dip angle) ของระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย มีค่าของมุมเอียงเทน้อยกว่าค่ามุมเอียงเทของความลาดหน้างาน (slope face) แต่ต้องมีค่ามากกว่าค่ามุมเสียดทาน (friction angle) ภายในของระนาบที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล

$$\psi_f > \psi_p > \phi \quad (2.2)$$

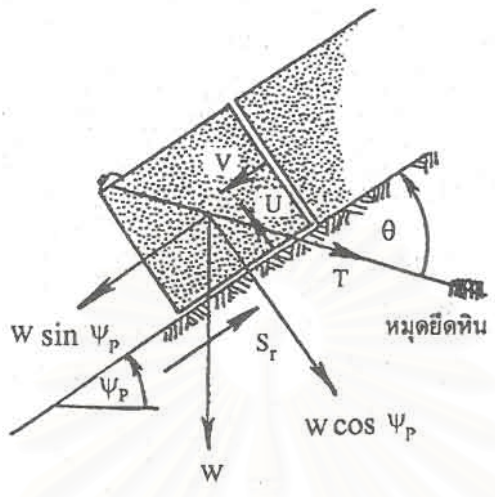
$$\psi_f = \text{มุมเอียงเทของหน้าความลาดเอียง}$$

$$\psi_p = \text{มุมเอียงเทของระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย}$$

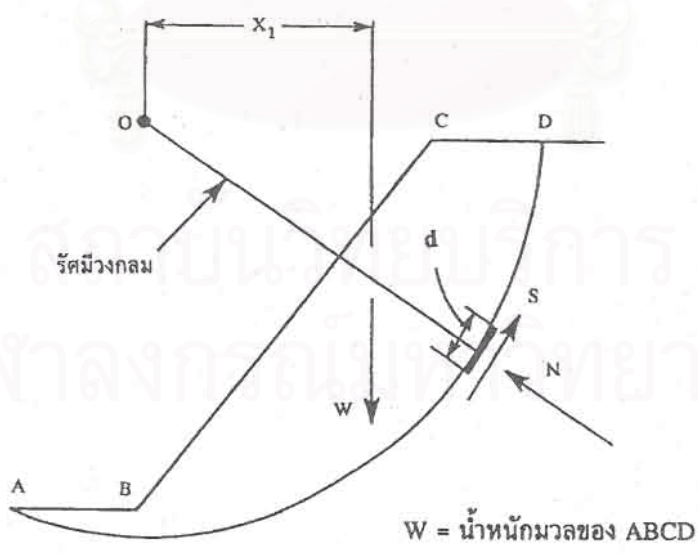
$$\phi = \text{มุมเสียดทานภายในของระนาบ}$$

3. เงื่อนไขประกอบ

เงื่อนไขที่ควรนำมาพิจารณาประกอบรวมกันกับ การเกิดสภาวะของการพังทลายแบบระนาบ ได้แก่



รูปที่ 2.1 การเลื่อนไถลที่ใช้การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย
 จากความสมดุลเชิงแรงที่ขนานระนาบได้มวลสาร



รูปที่ 2.2 การเลื่อนไถลที่ใช้การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย
 จากความสมดุลเชิงโมเมนต์บนพื้นผิวระนาบฟังก์ทลาย

ก. สมมุติว่าความหนาของมวลบางมาก มีผลทำให้พื้นผิวที่หลุดออก (release surfaces) ของมวลสารที่เลื่อนไถลไม่ก่อให้เกิดแรงต้านทานด้านข้าง (หรือถ้าหากจะมีก็เกิดขึ้นน้อยมาก)

ข. พื้นระนาบของการพังทลายถูกสมมุติให้เป็นระนาบราบเรียบ (smooth plane)

ค. สมมุติฐานการพังทลายแบบนี้ มวลสารมีการเลื่อนไถลตามแนวเส้น ดังนั้นจึงไม่มีค่าโมเมนต์ของแรงที่เกิดจากการหมุนตัวของมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโมเมนต์

การหาเสถียรภาพของหน้างานขุดเจาะ ในกรณีนี้ มักใช้กับมวลสารที่เป็นดินและพื้นผิวของระนาบไม่เป็นแนวเส้นตรง ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นผิวการพังทลายแบบรูปอาร์กวงกลม ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ หรือค่าปัจจัยความปลอดภัย สำหรับการคำนวณค่า ϕ จุดสมดุลของโมเมนต์ ดังนี้

$$FS = \frac{\text{ผลรวมโมเมนต์ด้านทานต่อการเลื่อนไถล}}{\text{ผลรวมโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล}} = 1 \quad (2.3)$$

ค่าผลรวมของโมเมนต์ที่ต้านทานต่อการเลื่อนไถล หรือโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล เป็นค่าที่ได้จากแขนของโมเมนต์คูณกับแรงเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวยูอาร์ก โดยจุดศูนย์กลางของอาร์กวงกลม ได้จากค่าตำแหน่งพิคก์ที่ถูกเลือกมาจากการคำนวณ ที่เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงโมเมนต์ที่มีค่าต่ำ (น้อย) สุด

2.1.4 เงื่อนไขของการพังทลายเมื่อคำนวณจากความสมดุลเชิงโมเมนต์

การพังทลายรูปอาร์กวงกลม มีขั้นตอนในการคำนวณหาเสถียรภาพของการเลื่อนไถลเชิงโมเมนต์ (ดูรูปที่ 2.2 หน้า 5) ดังต่อไปนี้

1. พื้นผิวการพังทลายเป็นรูปอาร์กวงกลม โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดพิคก์หนึ่ง และเกิดการเลื่อนไถลเป็นแบบการหมุน (rotational sliding)

2. ใช้สมการเชิงสถิติศาสตร์ หาค่าแรงต่าง ๆ ที่ตรงจุดรอยแตกของพื้นผิว และใช้ค่าคุณสมบัติของมวลสารเชิงกำลังวัสดุเฉือนที่สำคัญมาทำการคำนวณร่วมด้วย ได้แก่ ค่าไคฮ์หรือค่าแรงบิดเหนียวของมวลสาร กับค่าความเสียดทานภายในของมวลสาร เป็นต้น

3. สมมุติว่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลดินถูกทำให้ลดลง จนเกิดการพังทลายตามพื้นผิวยูอาร์กวงกลม แล้วคำนวณหาค่าโมเมนต์แรงต้านทานกับแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล

4. หาค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ค่าที่ได้นี้เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อเทียบกับกำลังวัสดุ

ความยากของการวิเคราะห์ในเรื่องนี้คือ แนวเส้นโค้งรูปอาร์คของการเลื่อนไถล (arc of sliding) ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม การที่จะได้พื้นผิววิกฤตที่แท้จริงต้องคำนึงถึงค่าอัตราส่วนของโคฮีชันมวลสาร ระหว่างค่าของโคฮีชันที่ไม่ให้น้ำไหลออกจากมวลสาร (undrained cohesion) กับค่าของโคฮีชันที่มีน้ำไหลออกจากมวลสาร (drained cohesion) ที่มีค่าอัตราส่วนต่ำสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าโคฮีชันที่มีน้ำไหลออกจากมวลสารมีค่าสูงสุด จึงทำให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด

2.2 การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นแบบง่าย

การศึกษาในเชิงสถิติสำหรับความน่าจะเป็นของการพังทลาย (probability of failure) เป็นการหาค่าเปอร์เซ็นต์โอกาสที่การพังทลายน่าจะเกิดขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นการหาความเชื่อถือได้หรือความไว้วางใจได้ของระบบ (system reliability)

หลักการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานออกแบบ เพื่อหาเสถียรภาพแบบง่ายของหน้างานชุดเจาะเชิงความน่าจะเป็น มีอยู่หลายขั้นตอน ดังต่อไปนี้

2.2.1 การตรวจวัดความเชื่อถือได้เชิงสถิติ

สิ่งแรกที่จะก่อให้เกิดความแน่ใจว่าระบบโครงสร้างมวลสารมีเสถียรภาพสูงเพียงพอได้แก่ การตรวจวัดความเชื่อถือได้ (measure of reliability) ซึ่งเป็นการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของระบบ

กำหนดให้ FS เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยในเชิงอนุรักษ์ ค่า R เป็นค่าระบุ (nominal value) ของความเค้นสูงสุดในมวลสาร ส่วนค่า Q เป็นความเค้นระบุที่เกิดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ จะ ได้รับความสัมพันธ์คือ

$$FS = \frac{R}{Q} \quad (2.4)$$

สมมุติให้ตัวเลขของค่า R เป็นความเค้นด้านการพังทลาย 400 เมกะพาสคัล และค่า Q เป็นความเค้นก่อให้เกิดการพังทลาย 250 เมกะพาสคัล หาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์ได้ค่าเท่ากับ 1.6 ค่าตัวเลขที่หาได้นี้อาจก่อให้เกิดปัญหาว่า สมควรจะทำการคำนวณใหม่อีก เนื่องจากผู้ออกแบบมีประสบการณ์ว่าตัวเลขดังกล่าวค่อนข้างสูงเกินไปในเชิงปฏิบัติงานจริง

ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของระบบมีองค์ประกอบหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว ระดับของน้ำบาดาล แรงบรรทุกเชิงพลศาสตร์

สิ่งที่ยกตัวอย่างมานี้เป็นสาเหตุเนื่องจากอิทธิพลภายนอก ยังมีสาเหตุเนื่องจากองค์ประกอบภายในอีก เช่น การแปรปรวนของค่าคุณสมบัติ ความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดสอบ

ในสภาพที่แท้จริง แบบจำลองที่ให้ความเชื่อถือได้ (หรือความไว้วางใจได้) เกิน 99 % เป็นสิ่งที่กระทำได้ยากมาก จำเป็นต้องใช้การเฝ้าสังเกตการณ์สมรรถนะของโครงสร้างที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกัน ตั้งแต่ 100 ตัวอย่างหรือมากกว่า

รูปที่ 2.3 หน้าที่ 9 เป็นภาพสเก็ทที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการแจกแจงค่าเชิงความน่าจะเป็น (probability distribution) ในรูปที่ 2.3 ก. เป็นการแสดงสมมุติฐานของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์ ส่วนรูปที่ 2.3 ข. แสดงแบบจำลองอัตราส่วนของกำลังในมวลวัสดุ หรือเป็นความต้านทาน (resistance) ค่อนน้ำหนักบรรทุก (load) ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ระบุเป็นรูปแบบฟังก์ชันความน่าจะเป็น ส่วนในรูปที่ 2.3 ค. เป็นการแสดงความสัมพันธ์เชิงความน่าจะเป็นระหว่างค่าฟังก์ชันขอบของความปลอดภัย (safety margin) กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index) การบรรยายสำหรับรูปสเก็ทหลายรูปดังกล่าว ได้ระบุไว้ข้างล่างนี้

1. ค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย

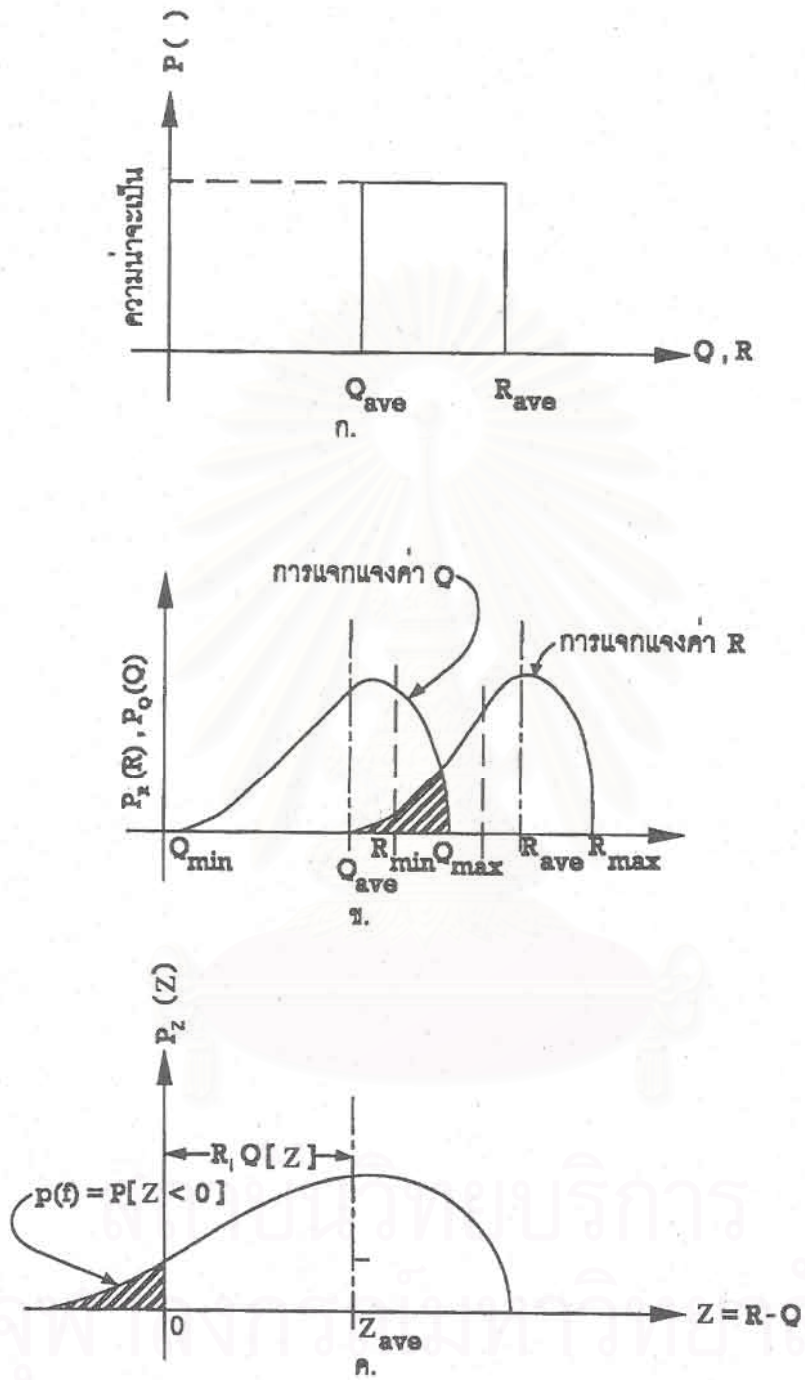
ตัวเลขเชิงเสถียรภาพที่คำนวณมาจากค่าตัวแปรสุ่ม อาจก่อให้เกิดความไม่แน่นอนในเชิงปฏิบัติงานจริง ดังนั้นจึงใช้การกำหนดค่าปัจจัยความปลอดภัยขึ้นใหม่จากค่าเฉลี่ย (mean) หรือเรียกชื่อใหม่ เป็น ค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย (central factor of safety) ได้แก่

$$CFS = \frac{R_{ave}}{Q_{ave}} \quad (2.5)$$

ค่า Q_{ave} และ ค่า R_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันแจกแจงค่าที่ก่อให้เกิดการพังทลาย กับค่าที่ต้านการพังทลายตามลำดับ จากรูปที่ 2.3 ข. จะเห็นได้ว่าค่าของ CFS ในสมการที่ 2.5 มากกว่าค่าของ FS ในสมการที่ 2.4

2. ขอบของความปลอดภัย

จากรูปที่ 2.3 ข. จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของน้ำหนักบรรทุก หรือใช้สัญลักษณ์เป็น Q_{max} มีค่ามากกว่าค่าต่ำสุดของกำลังความสามารถ หรือใช้สัญลักษณ์ว่า R_{min} ทำให้เกิดพื้นที่ซ้อนเหลื่อม หรือ โดเมนบริเวณที่น่าจะเป็นพื้นที่การพังทลายที่มีค่าไม่ไร้ศูนย์ (non-zero) วิธีการที่สะดวกในการประเมินความน่าจะเป็นก็คือ การหาค่าของความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันของความต้านทานหรือ resistance กับฟังก์ชันของน้ำหนักบรรทุกหรือ load



รูปที่ 2.3 การตรวจวัดความเชื่อถือได้ของระบบทั่วไป

ก. ค่าความปลอดภัยเชิงอนุรักษ

ข. แบบจำลองของ ความต้านทาน / น้ำหนักบรรทุก

ค. ขอบของความปลอดภัยกับดัชนีความเชื่อถือได้

สมการของค่าขอบของความปลอดภัย คือ

$$Z = R - Q \quad (2.6)$$

ค่า Z เป็นขอบของความปลอดภัย (safety margin) และค่า R และ Q เป็นตัวแปรสุ่มของความต้านทานกับน้ำหนักบรรทุกทุกตามลำดับ ในเชิงสถิติการเคลื่อนที่ของอนุภาคในมวลสารหรือเกิดการพังทลายจะเป็นไปได้ เมื่อค่าของ Z น้อยกว่า 0 (ศูนย์)

3. ดัชนีความเชื่อถือได้และสัมประสิทธิ์การแปรผัน

การตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งได้แก่ การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index) หรือใช้พจน์ตัวแปรเป็น R_i กำหนดให้ Z_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับ $\sigma [Z]$ เป็นจำนวนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขอบความปลอดภัย

$$R_i = \frac{Z_{ave}}{\sigma [Z]} \quad (2.7)$$

ค่าตัวเลขดัชนีความเชื่อถือได้นี้ เป็นส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของขอบความปลอดภัย หรือใช้สัญลักษณ์เป็น $V [Z]$ เขียนเป็นสมการ

$$R_i = \frac{1}{V [Z]} \quad (2.8)$$

2.2.2 การหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย

ถ้าให้ $p (f)$ เป็นฟังก์ชันของการพังทลาย และ P เป็นโอกาสของความน่าจะเป็นสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$p (f) = P [(R - Q) \leq 0] = P [Z \leq 0] \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.3 ข. กับรูปที่ 2.3 ค. ถ้าหากฟังก์ชันที่หาค่าโอกาสความน่าจะเป็นมีการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ค่าของฟังก์ชันการพังทลาย $[p (f)]$ เป็น

$$p (f) = 1 - F [R_{ave} - Q_{ave}] / [\{\sigma_R\}^2 + \{\sigma_Q\}^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

พจน์ค่า σ_R กับพจน์ σ_Q ในสมการที่ 2.10 เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ resistance กับ load ตามลำดับ เมื่อสมมติให้เส้นโค้งฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มที่มีการ

แจกแจงค่าข้อมูลปกติ ส่วนค่า $F ()$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) สำหรับการหาค่า $F ()$ นี้ ได้จากตารางในตำราสถิติทั่วไป และได้คัดลอกไว้ในส่วนที่เป็นภาคผนวกของรายงานฉบับสมบูรณ์นี้

การที่จะหาค่า $p (f)$ นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดตามรูปแบบเส้นโค้งที่เกิดจากการแจกแจงตัวแปรสุ่ม ผู้วิจัยได้คัดลอกจากหน้า 86 ของตำรา Lee et al. (1983) และนำมาแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ข้างล่าง

ตารางที่ 2.1 ผลเฉลยของฟังก์ชันการพังทลายในกรณีที่
ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าในหลายรูปแบบ

รูปแบบของการแจกแจงค่าฟังก์ชัน	ออกสกวรพหุคูณ $p(f)$
เอกรูป (uniform)	$\frac{1}{2} \left[\frac{Q_{\max} - 2R_{\min} + Q_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right]$
ปกติ (normal)	$1 - F \left(\frac{R_{\text{ave}} - Q_{\text{ave}}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right)$
ลอการิทึมปกติ (log-normal)	$1 - F \left(\frac{\ln \left[\left(\frac{R_{\text{ave}}}{Q_{\text{ave}}} \right) \sqrt{\frac{1+V_Q^2}{1+V_R^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1+V_Q^2)(1+V_R^2)}} \right)$
เลขชี้กำลัง (exponential)	$\frac{\alpha_Q}{\alpha_R - \alpha_Q}$
เบตา (Beta)	$\int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} \left[\int_{R_{\min}}^Q [g_R(Q) dQ] \right] [g_Q(Q)] dQ$

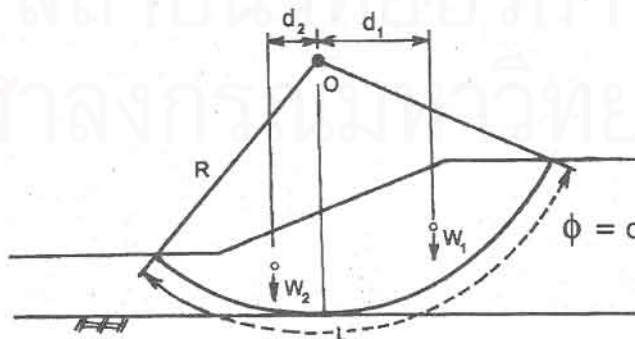
หมายเหตุ การหาค่าฟังก์ชันของ β (เบตา) จำเป็นต้องใช้การ
หาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลข (numerical integration)

2.3 แนวทางการหาผลลัพธ์ค่าปัจจัยความปลอดภัย

วิธีการที่ดีในการใช้ผลลัพธ์เชิงสถิติค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ได้แก่ การหาค่า FS นี้ด้วยวิธีการของ First Order Second Moment (FOSM) ตัวอย่างในรูปที่ 2.4 เป็นการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของความลาดเอียงที่เป็นดินที่มีค่าโคฮีชัน (cohesive soil) โดยใช้สมการคำนวณหาค่าตัวเลขเสถียรภาพ 2 สมการ (ระบุไว้ในหน้าถัดไป) จะเกิดความแปรปรวนของค่า FS ดังตารางที่ 2.2 ที่คัดลอกมาจากบทความของ Chae (1967) ที่ได้ทำการคำนวณกรณีที่เกิดขึ้น 7 กรณี มีตัวเลข FS แตกต่างกันไป

ตารางที่ 2.2 ค่าการคำนวณตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) ที่ได้จากกรณีทั้ง 7 แบบ ในรูปที่ 2.4 จากงานของ Chae (1967)

กรณีศึกษาหมายเลข	ค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ที่หาได้จาก	
	สมการ 2.1	สมการ 2.2
1	1.57	1.22
2	1.70	1.24
3	0.63	0.75
4	0.81	0.87
5	0.74	0.83
6	0.67	0.70
8	2.00	1.67



รูปที่ 2.4 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงในดินที่มีค่าโคฮีชัน

ตามรูปที่ 2.4 หน้า 12 หาค่าปัจจัยความปลอดภัยได้จาก 2 สมการ ดังนี้

$$FS = \frac{c_{ave} L(R)}{W_1 d_1 - W_2 d_2} \quad (2.11)$$

$$FS = \frac{c_{ave} L(R) + W_2 d_2}{W_1 d_1} \quad (2.12)$$

พจน์ตัวแปรในสมการทั้งสองข้างบน มีความหมายดังนี้

c_{ave}	=	ค่าเฉลี่ยของโคฮีชันในดิน
L	=	ความยาวของอาร์กการพังทลาย
R	=	รัศมีของอาร์กวงกลม
W_1	=	น้ำหนักมวลการพังทลายทางด้านขวาของจุดหมุน (O)
W_2	=	น้ำหนักมวลการพังทลายทางด้านซ้ายของจุดหมุน (O)
d_1	=	แขนของโมเมนต์สำหรับการคำนวณค่าน้ำหนัก W_1
d_2	=	แขนของโมเมนต์สำหรับการคำนวณค่าน้ำหนัก W_2

สมการ 2.11 เป็นการคำนวณโมเมนต์ปกติ แต่สมการ 2.12 วิศวกรบางท่านให้ค่าน้ำหนักของ W_2 เป็นโมเมนต์ค้ำ ก่อให้เกิดผลลัพธ์ค่า FS ในตารางที่ 2.2 แตกต่างกัน

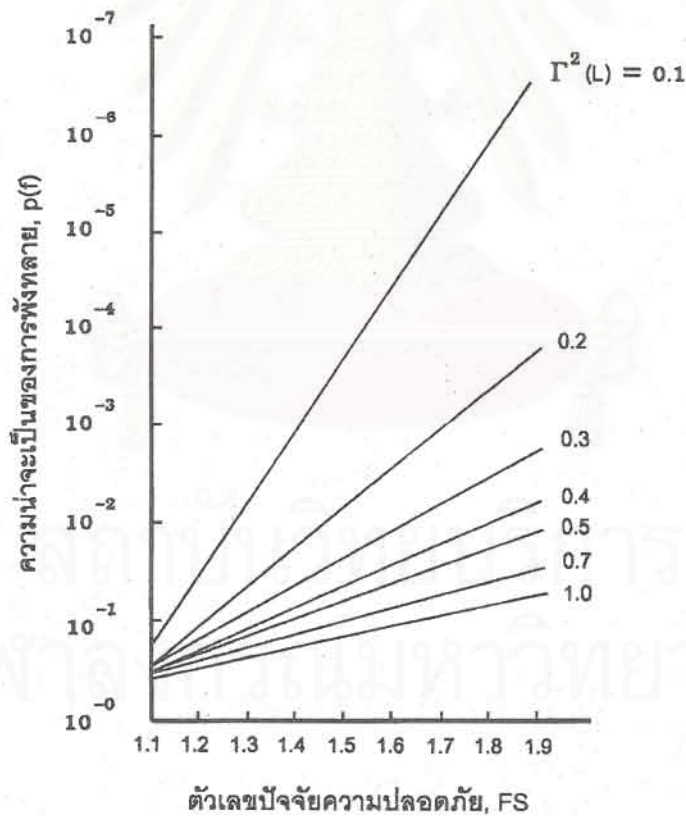
ข้อควรคำนึงในประการถัดมา ได้แก่ ค่าความดันน้ำในโพรง (pore water pressure) ในบางกรณีก็จัดเป็นความดันที่ต้านการพังทลาย บางทีก็จัดเป็นความดันเสริมต่อการพังทลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะให้ตัวแปรความดันน้ำเป็นเศษหรือเป็นส่วนใน 2 สมการข้างบน

ประโยชน์ที่สำคัญในการใช้ค่า FS เป็นการทำให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยของโครงสร้าง ถ้าหากทดลองนำค่าในตารางที่ 2.2 มาหาโอกาสการพังทลายของความลาดเอียงในรูป 2.4 กำหนดให้ตัวเลขข้อมูล FS มีการแจกแจงค่าแบบปกติ (หรือเป็นแบบ Gaussian distribution) และ ไม่พึ่งพิงกับค่าเฉลี่ยของกำลังวัสดุเฉือนกับค่าความหนาแน่นของดิน จากกรณีความลาดเอียงของรูป 2.4 นั้น Li and Lumb (1987) ได้นำมาหาค่าเบี่ยงเบน σ กับ σ เมื่อกำหนดให้ค่า FS มีค่าคงที่เท่ากับ 1.5 แล้วคำนวณหาค่าโอกาสการพังทลาย, $p(f)$ ดังตารางที่ 2.3 โดยใช้สมการของ

$$p(f) = p(R) [G(X) < 0] \quad (2.13)$$

ตารางที่ 2.3 ค่าเบี่ยงเบนปกติของโมเมนต์ด้านกับโมเมนต์ก่อให้เกิดการพังทลาย ให้ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) มีค่าคงที่ 1.5 ซึ่งหาค่าโอกาสการพังทลายได้ 7 กรณี

V_R	V_Q	$p(f)$
0.20	0.20	8.3×10^{-2}
0.20	0.05	5.0×10^{-2}
0.10	0.20	2.3×10^{-2}
0.10	0.05	7.8×10^{-4}
0.05	0.20	9.6×10^{-3}
0.05	0.05	1.4×10^{-8}



รูปที่ 2.5 ความแปรผันของค่าปัจจัยความปลอดภัย 7 กรณี ตามค่าตัวเลขความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย [$p(f)$] กับตัวประกอบการแปรผันของการลดค่าขอความปลอดภัยเนื่องจากความยาวอาร์ก [$\Gamma^2(L)$]

พจน์ $p(R)$ ของสมการ 2.13 หน้า 13 เป็นฟังก์ชันแจกแจงค่าโอกาสความต้านทาน และ $G(X)$ เป็นฟังก์ชันแจกแจงที่ติดจำกัดของสมรรถนะ อักษร X ตัวใหญ่ เป็นข้อมูลเข้าเวกเตอร์ตัวแปร

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 2.3 แสดงว่า การกำหนดค่า FS คงที่ ไม่ได้หมายความว่า จะมีผลทำให้ความเสี่ยงต่อการพังทลายคงที่ หรือการกำหนดค่าขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) ของงานการขุดเจาะ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวเลข FS อย่างเดียว

รูปที่ 2.5 หน้า 14 ที่คัดลอกจากบทความของ Li and Lumb (1987, หน้า 524) เป็นการยืนยันอีกครั้งว่าความเสี่ยงไม่ได้ขึ้นกับค่า FS อย่างเดียว ในรูปดังกล่าว แสดงการแปรผันระหว่างความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย [$p(f)$] เปรียบเทียบกับค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด (FS) ตั้งสมมุติฐานให้ความหนาแน่นของดินคงที่ และข้อมูลเชิงกำลังวัสดุเฉือนของดินที่มีค่าโคฮีชันมีการกระจายค่าปกติ และให้ค่าตัวแทนสัมประสิทธิ์ความแปรผันของขอบความปลอดภัย [$V(Z)$] เป็น 0.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการลดค่าขอบความปลอดภัยคือระยะความยาวของอาร์กการพังทลาย (L) สมมุติให้มีสัญลักษณ์ของตัวประกอบการลดค่าความแปรผันนี้ เป็น $\Gamma^2(L)$ ค่านี้จัดเป็นค่าตัวประกอบความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance factor) เมื่อมีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของตัวแปรสุ่ม

ผลการพล็อตกราฟสหสัมพันธ์ (correlation graphs) ของทั้ง 7 กรณี พบว่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นชัดเจนในพิสัยของค่า FS ระหว่าง 1.2 - 1.5 โดยมีข้อสังเกตว่าค่า $\Gamma^2(L)$ ที่ให้เท่ากับ 0.3 หรือต่ำกว่านี้ ในทางปฏิบัติจึงทำได้ยาก

2.4 แนวทางการหาผลลัพธ์ค่าความเสี่ยงและดัชนีความเชื่อถือได้

เมื่อพบว่ายังมีความแปรปรวนอยู่สูงในการใช้ค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) จากหลักการของ First Order Second Moment (FOSM) จึงทดลองใช้ฟังก์ชันสมรรถนะมาหาค่าความเชื่อถือได้ แนวทางนี้เป็นการสมมุติให้ฟังก์ชันมีความสัมพันธ์เชิงเส้น และใช้การประมาณค่าด้วยอนุกรม Taylor อันดับหนึ่ง และตัวแปรสุ่มได้จากค่าโมเมนต์อันดับแรกของสองโมเมนต์ (first two moments) ทำให้เป็นเป็นชื่อเรียกวิธีการนี้ดังกล่าวซึ่งค่าสองโมเมนต์เป็นพจน์กำลังสอง (square) ในอนุกรมของ Taylor

ปัญหาवलสาร (คินหรือหิน) ค่าฟังก์ชันการแจกแจงร่วม (joint distribution function) ของคุณสมบัติवलสาร หาค่าได้ยากหรือบางครั้งก็ไม่ทราบค่า จึงต้องใช้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้แทนค่าฟังก์ชันการแจกแจงร่วม ซึ่งได้แก่ค่า R_i หรือค่า β ที่มีค่าสูง (มาก) สุด

$$R_1 = \beta_{\max} = \frac{\text{mean}_G}{\sigma_G} \quad (2.14)$$

พจน์ mean_G เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันสมรรถนะ $[G(x)]$ และ σ_G เป็นค่าเบี่ยงเบนปกติของฟังก์ชันสมรรถนะ และถูกใช้เป็นที่ทางเลือกอีกแบบของการวัดความเสี่ยง (risk measure) จากการคำนวณเสถียรภาพเชิงสถิติจำกัดของปัจจัยความปลอดภัยด้วยวิธีอนุรักษ (คำนวณโดยใช้แรงหรือโมเมนต์)

การหาผลเฉลยที่เป็นแนวทางในการใช้ค่า β_{\max} [ซึ่งต่อไปเพื่อความสะดวกจะเขียนเป็น β เจาะ ๆ] เป็นตัวเลขการวัดความปลอดภัย ได้แก่

$$\begin{aligned} p(f) &= p(R) [G(X) < 0] \\ &= p(R) \left[\frac{G(X) - \text{mean}_G}{\sigma_G} - \frac{\text{mean}_G}{\sigma_G} \right] \\ &= p(R) [Z < -\beta] \\ &= \int_{-\infty}^{-\beta} \phi(Z) dz \\ &= \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (2.15)$$

พจน์ Z ข้างบนนี้ ไม่ใช่ค่าขอบของความปลอดภัย แต่เป็นค่าตัวแปรรูปแบบมาตรฐานของ $G(X)$ อนึ่งพจน์ $\phi(z)$ กับพจน์ $\Phi(Z)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) กับฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution) ของ Z ตามลำดับ

ในขณะที่ $\Phi(\)$ เป็นฟังก์ชันที่ไม่มีค่าลดลง (nondecreasing) จึงเกิดความสัมพันธ์ระหว่างค่าหนึ่งต่อค่าหนึ่ง (one-to-one) ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของการพังทลาย (failure probability) กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) ความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดจากตัวแปรสุ่ม จึงถูกจัดให้สอดคล้องกับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ค่าเดียว โดยมีเงื่อนไขกำหนดให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของหน่วยงานชุดเจาะ [เช่น ความลาดเอียง] มีค่าเท่ากัน และมีความเสี่ยงในระดับเดียวกัน ถึงแม้ว่ากระบวนการแปรผันของทั้งสองกรณีจะไม่เหมือนกัน

ในเชิงวิธีการหาค่าสหสัมพันธ์ การที่ทราบค่าโมเมนต์อันดับแรกของสองโมเมนต์สำหรับฟังก์ชันสมรรถนะ $[G(X)]$ ยังไม่เพียงพอที่จะนิยามค่าความน่าจะเป็นของฟังก์ชัน

ความหนาแน่น [probability density function, PDF] ของ Z หรือของ $G(X)$ จึงตั้งสมมุติฐานให้มีการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มแบบปกติหรือแบบลอการิทึมปกติ ใช้สัญลักษณ์ เป็น $\phi(\)$

สิ่งที่สำคัญในการประยุกต์ใช้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ β คือ ถึงแม้ว่า β จะเป็นค่าดัชนีคล่องจง (consistent index) ในการวัดความเสี่ยง แต่ β ไม่ใช่ค่าที่ยืนงไม่แปรเปลี่ยน (invariant) ซึ่ง Li and Lumb (1987) ได้เสนอแนะการจัดรูปแบบความเสี่ยงของฟังก์ชันสมรรถนะไว้หลายรูปแบบ ดังตารางที่ 2.4 ข้างล่าง ใช้ในการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์ และแนวทางวิเคราะห์แบบ FOSM

ตารางที่ 2.4 รูปแบบการจัดความเสี่ยง และการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่มีผลจากการที่มีฟังก์ชันสมรรถนะเปลี่ยนแปลงไป ค่า FS เป็นค่าที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยของแรงต้าน ต่อค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุก

$G(X)$	β
$R - Q$	$\frac{F - 1}{\sqrt{F^2 V_R^2 + V_Q^2}}$
$\frac{R}{Q} - 1$	$\frac{F - 1}{F \sqrt{V_R^2 + V_Q^2}}$
$\ln \left[\frac{R}{Q} \right]$	$\frac{\ln - 1}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}}$

2.5 แนวทางวิเคราะห์สำหรับการแจกแจงที่มีหลายตัวแปร

งานการชุดเจาะภาคสนามมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายอย่าง ถ้าหากพจน์ตัวแปรที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรสุ่มและมีหลายตัวแปร การแจกแจงหลายตัวแปร (multivariate distribution) เพื่อกำหนดรูปแบบรหัส (code format) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

เชิงเสถียรภาพจะมีแนวทางได้หลายรูปแบบ เช่น การคำนวณค่าเชิงสถิติโดยตรง การแปลงเชิงตั้งฉาก (orthogonal transformation) หรือการสร้างเส้นชั้นความหนาแน่น (contour of density) การอธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในรายงานวิจัยนี้เป็นไปค่อนข้างจะรวบรัด รายละเอียดได้ระบุไว้ในเอกสารของ Hasofer and Lind (1974), Johnson and Wichern (1992, Chapters 1 and 4), Halder and Mahadevan (1995)

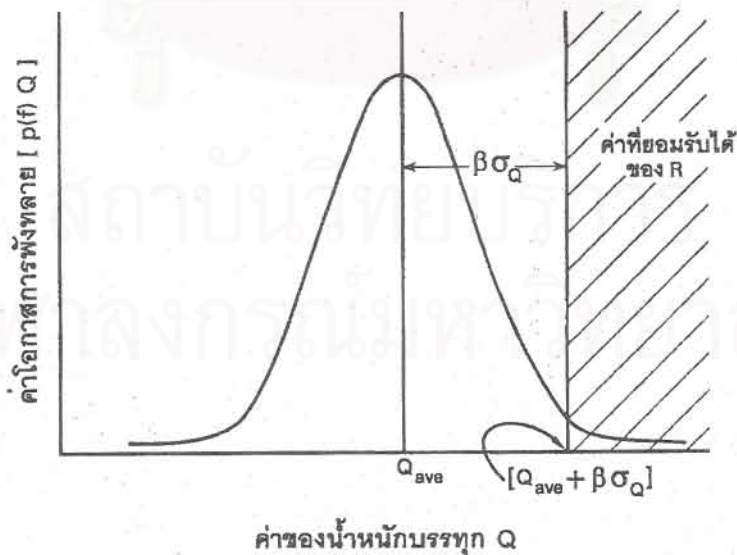
2.5.1 วิธีการหาขอบเขตการพังทลายจากตัวแปรสุ่มเดียว

เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์แบบง่ายเชิงความเชื่อถือได้ กำหนดให้โครงสร้างมีตัวแปรสุ่มเดียว (one random variable) เกี่ยวข้องกับระบบ เมื่อมีการแจกแจงค่าแบบปกติ จะได้ภาพกราฟิกเป็นรูปคล้ายระฆัง สมมติว่าให้โครงสร้างมีค่าความต้านทานเชิงกำหนด (deterministic resistance) เป็นค่า R โครงสร้างนี้ถูกกดอัดด้วยน้ำหนักบรรทุก Q มากกระทำ โอกาสที่เหตุการณ์การพังทลาย (failure event) เกิดขึ้น เมื่อ

$$Q > R$$

ในเชิงสถิติ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์การพังทลาย คือ

$$p [Q > R]$$



รูปที่ 2.6 ภาพสเก็ทการหาพื้นที่ความเชื่อถือได้ของตัวแปรสุ่มเดียว

ถ้าโอกาสความน่าจะเป็นไม่มีเปอร์เซ็นต์น้อย (ค่า) มาก หรือน้อยกว่าค่า ϵ ที่จัดเป็นค่าที่ยอมรับกันได้โดยทั่วไป (socially acceptable) ซึ่งข้อกำหนดของการออกแบบให้เป็นที่ยอมรับได้ เมื่อ

$$p [Q > R] < \epsilon$$

ถ้าหากมีการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ดังรูปที่ 2.6 หน้า 18 จะหาค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนี้

$$R > Q_{ave} + (\beta) \sigma_Q \quad (2.16)$$

พจน์ β เป็นสัมประสิทธิ์ความเชื่อถือได้ ส่วนพจน์ σ_Q เป็นค่าเบี่ยงเบนปกติ

ค่า β ที่มีค่าสูง (มาก) สุด มีชื่อเรียกใหม่ว่า "ดัชนีความเชื่อถือได้" หรือในรายงานเล่มนี้ระบุเป็น R_i หรือเทียบเท่ากับค่า β ที่มีค่าสูงสุด ปกติ R_i ใช้ในการออกแบบหาเสถียรภาพเชิงอนุรักษ์ สมการที่ 2.16 นั้น คาดการณ์ว่าตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ หรือถ้าระบุความหมายอีกทาง โอกาสความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม Q จัดอยู่ในบริเวณปลอดภัยได้ ถ้า

$$Q < R$$

พื้นที่ที่ปลอดภัยนี้ เขียนเป็นสัญลักษณ์ว่า $g(Q)$ ตามเกณฑ์ของความเชื่อถือได้ของโมเมนต์อันดับที่สอง (second moment reliability) จะได้เป็นช่วงของค่า

$$[Q_{ave} - R_i \sigma_Q], [Q_{ave} + R_i \sigma_Q] \text{ อยู่ในพื้นที่ } g(Q)$$

กรณีที่เกี่ยวข้องกัน ระบุให้ q เป็นน้ำหนักบรรทุกกอดัดที่ลดลง (reduced load)

$$q = \frac{(Q - Q_{ave})}{\sigma_Q} \quad (2.17)$$

พื้นที่ที่กำหนดใหม่ จะได้ q อยู่ใน $g(q)$ และช่วงที่กำหนดใหม่ คือ

$$[-R_i, +R_i] \text{ อยู่ในพื้นที่ } g(Q)$$

การจะมีพื้นที่ของการพังทลาย $[g^*(q)]$ สำหรับค่า q เกิดขึ้นได้ ต้องกำหนดให้ ระยะจากจุดกำเนิด (origin) ถึงพื้นที่ $g^*(q)$ มีค่ามากกว่า R_1 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ระยะทางจากจุดค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุก (Q_{ave}) ที่กอดัด ไปยังพื้นที่พังทลาย $[g^*(Q)]$ เมื่อทำการตรวจวัดค่า Q ที่ให้มีการเบี่ยงเบนปกติ จะต้องมีค่ามากกว่าระยะ R_1

2.5.2 วิธีการหาขอบเขตการพังทลายจากตัวแปรสุ่มสองค่า

แนวทางแบบนี้มีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น เรียกชื่อเป็นวิธี Second Moment Reliability Method หรือ Hasofer-Lind Method เป็นต้น แต่หลักการที่สำคัญคือ ต้องการหาพื้นที่การพังทลายสำหรับตัวแปรสุ่มสองตัวแปรในเชิงความเชื่อถือได้

1. การหาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของตัวแปรสองค่า

การตั้งต้นแก้ปัญหาวิธีนี้ เริ่มต้นจากการลดจำนวนตัวแปรลง ถ้าหากกำหนดสัญลักษณ์ พจน์ตัวแปร ดังนี้

$$\begin{aligned} X_i &= \text{ตัวแปรพื้นฐาน โดยที่ } i \text{ มีค่าเท่ากับ } 1, 2, \dots, n \\ (X_i)_{ave} &= \text{ค่าเฉลี่ยของตัวแปรพื้นฐาน} \\ \sigma_i &= \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวแปรที่ } i \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดพจน์ใหม่ของ $(X_i)'$ เป็นตัวแปรสุ่มตัวหนึ่ง ที่มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นศูนย์ (0) จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$(X_i)' = \frac{X_i - (X_i)_{ave}}{\sigma_i} \quad (2.18)$$

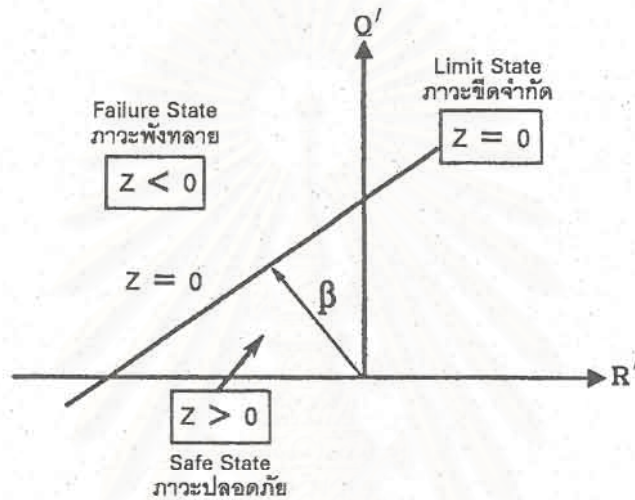
สมการที่ 2.18 ใช้สำหรับผลการแปลง (transform) จากจุดกำเนิดที่เป็นจุดจำกัดเดิม ซึ่งให้นิพจน์ของ $g(X) = 0$ เป็นจุดจำกัดที่ถูกลดทอนใหม่ $g(X') = 0$ เมื่อกำหนดให้ระบบพิภัก X เป็นระบบพิภักที่จุดกำเนิด ส่วน X' เป็นระบบพิภักที่ถูกแปลง (transformed) หรือถูกลดทอน (reduced)

ในทำนองเดียวกัน ระบบพิภัก Y เป็นระบบที่ถูกลดทอน เป็นระบบที่ไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) และมีการแจกแจงค่าแบบปกติ

กำหนดพจน์ค่าดัชนีเชิงความปลอดภัย (safety index) เป็น β_{HL} ซึ่งเป็นระยะเชิงความเชื่อถือได้ค่า (สั้น) สุด จากจุดกำเนิดของแกนในระบบพิภักที่ถูกลดทอนไปยังจุดจำกัดของพื้นผิวการพังทลาย (ดูรูปที่ 2.7) หากความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\beta_{HL} = [(x^{i*})^T (x^{i*})]^{1/2} \quad (2.19)$$

พจน์ x ในสมการ 2.19 เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรพื้นฐานที่ถูกลดทอน ส่วน x^* เป็นพิกัดที่อยู่ในตำแหน่งจุดกำเนิดเดิมในขอบเขตของการพังทลาย พจน์ x'^* เป็นพิกัดใหม่ที่ถูกลดทอนหรือถูกลดทอนไม่ในขอบเขตการพังทลาย



รูปที่ 2.7 คำนวณความเชื่อถือได้ (วิธี Hasofer-Lind) ให้ฟังก์ชันมีความสัมพันธ์เชิงเส้น

จากสมการที่ 2.18 กับ 2.19 แสดงเป็นภาพกราฟิกได้ดังรูปที่ 2.7 ข้างบน โดยกำหนดให้ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์เชิงเส้น

$$Z = R - Q = 0 \quad (2.20)$$

พจน์ Z เป็นขอบเขตความปลอดภัย พจน์ R เป็นตัวแปรสุ่มของความต้านทาน ส่วน พจน์ Q เป็นตัวแปรสุ่มของน้ำหนักบรรทุกที่กดอัด ทั้งค่า R และค่า Q ไม่พึ่งพิงกัน เมื่อเขียนเป็นรูปแบบของตัวแปรที่ถูกลดทอน จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$R' = \frac{R - \text{mean}_R}{\sigma_R} \quad (2.21)$$

หรือ

$$Q' = \frac{Q - \text{mean}_Q}{\sigma_Q} \quad (2.22)$$

Ang and Tang (1984, Chapter 6 หน้า 340-342) ได้แทนค่าพจน์ตัวแปรในสมการที่ 2.20 ถึง 2.22 ที่เป็นสมการภาวะขีดจำกัด (limit state equation) เมื่อ $Z = 0$ (ศูนย์) ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

$$\sigma_R R' - \sigma_Q Q' + \text{mean}_R - \text{mean}_Q = 0 \quad (2.23)$$

ขอบเขตของภาวะขีดจำกัด เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.7 ระยะทางจากขอบการพังทลายเชิงเส้นไปยังจุดกำเนิด 0 เป็นค่าความเชื่อถือได้ อาศัยความรู้เชิงเรขาคณิตพรรณนา (descriptive geometry) ค่าระยะ β_{HL} ที่ตั้งฉากกับขอบการพังทลาย คือ

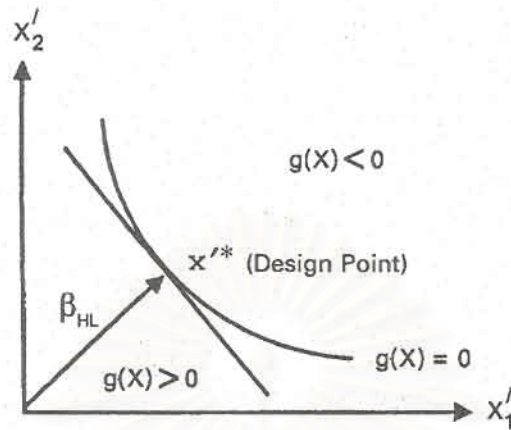
$$\beta_{HL} = \frac{\text{mean}_R - \text{mean}_Q}{[\sigma_R^2 + \sigma_Q^2]^{1/2}} \quad (2.24)$$

2. ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของตัวแปร 2 ค่า

ในมวลสารที่เป็นดินหรือหิน ตัวแปรสุ่มจัดเป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น (non-linear function) กำหนดให้ เวกเตอร์ $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ภาวะขีดจำกัดของฟังก์ชันสมรรถนะ [performance function, $g(X)$] เมื่อค่า $g(X) = 0$ และเป็นฟังก์ชันที่ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของตัวแปร 2 ค่า

ดังนั้นกำหนดให้ $g(X) > 0$ เป็นภาวะที่มีความปลอดภัย กับ $g(X) < 0$ เป็นภาวะที่เกิดการพังทลาย

สมการที่ 2.24 ได้ระบุค่านีของ Hasofer-Lind ไว้ให้เป็นระยะสิ้นสุดจากจุดกำเนิดถึงขอบการพังทลาย ดังรูปที่ 2.8 หน้าถัดไป กำหนดให้ x^* เป็นจุดพิคกที่ทำให้เกิดระยะค่าสุดซึ่งตามทฤษฎีค่าดัชนีความเชื่อถือได้เป็นค่าไม่แปรเปลี่ยน (invariant) จากการแสดงผลเฉลยไว้ในหัวข้อ 2.4 ของรายงานฉบับนี้ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของ Hasofer-Lind สามารถใช้คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการพังทลาย จากวิธีความเชื่อถือได้อันดับที่หนึ่ง (First Order Reliability Method, FORM) ที่ใช้การประมาณเชิงเส้นของภาวะขีดจำกัด ได้สมการความสัมพันธ์ใหม่ที่ดัดแปลงมาจากสมการที่ 2.15 เดิม



รูปที่ 2.8 คำนวณความเชื่อถือได้ของ Hasofer-Lind เมื่อฟังก์ชันมีสมรรถนะไม่เชิงเส้น

สมการที่หาค่าโอกาสความน่าจะเป็น ที่คิดแปลงมานี้ ได้แก่

$$p(f) = \Phi(-\beta_{HL}) \quad (2.25)$$

นิพจน์ด้านขวาของสมการข้างบน เป็นอินทิกรัลหรือปริพันธ์ของฟังก์ชันความหนาแน่น การเบี่ยงเบนปกติ ตามแนวเวกเตอร์จากจุดกำเนิดถึง x'^*

ในกรณีภาวะจำกัดไม่เชิงเส้น การค้นหา (computation) ระยะสั้นสุด (D) เพื่อการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) สำหรับปัญหานี้ ได้ค่า

$$\text{Minimize, } D = [X'^T X']^{1/2} \quad (2.26)$$

เงื่อนไขบังคับในกรณีที่แสดงไว้ในสมการที่ 2.26 คือ $g(X) = 0$ (ศูนย์)

ในกรณีนี้ วิธีการของตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multiplier) ได้แก่

$$L = D + \lambda g(X) \quad (2.27)$$

$$L = [X'^T X']^{1/2} + \lambda g(X) \quad (2.28)$$

พจน์ L ที่เป็นตัวคูณลากรองจ์ในสัญกรณ์เชิงสเกลาร์ มีค่า

$$L = [(X_1')^2 + (X_2')^2 + \dots + (X_n')^2]^{1/2} + \lambda g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.29)$$

เงื่อนไขบังคับสมการที่ 2.29 คือ $X_i = \sigma_{(x_i)} X_i' + \text{mean}_{x_i}$

Shinozuka (1983) ได้หาผลเฉลยเพื่อหาค่าระยะต่ำ (สั้น) สุด สำหรับวิธี Langrange ได้ค่า β_{HL} ในรูปแบบสเกลาร์ ดังนี้

$$\beta_{HL} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i'^* \left(\frac{\partial g}{\partial x_i'} \right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i'} \right)^{2*}}} \quad (2.30)$$

โดยที่โคไซน์แสดงทิศทาง (direction cosines) ตามแกน X_i' ในรูปแบบสเกลาร์ มีค่าเป็น

$$x_i'^* = \alpha_i^* (\beta_{HL}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.31)$$

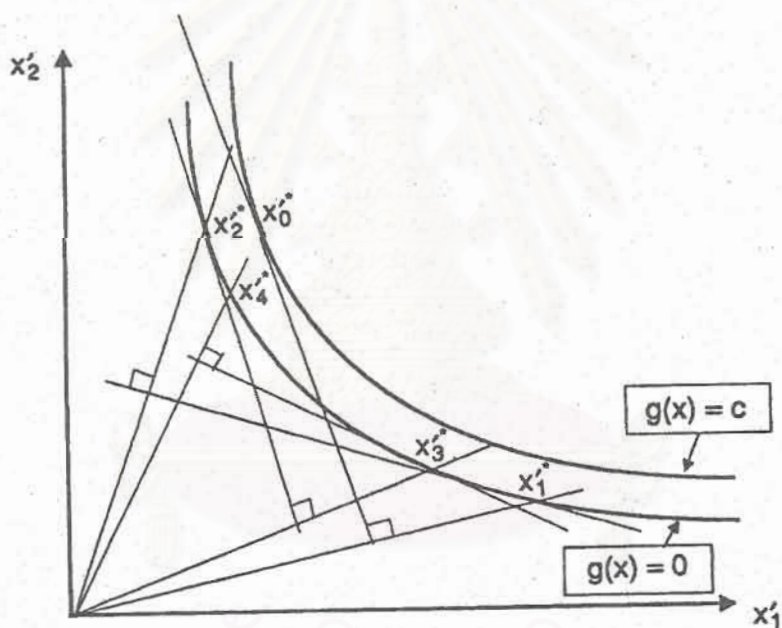
ในขณะที่พจน์ α_i^* มีค่าเป็น

$$\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'} \right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i'} \right)^{2*}}} \quad (2.32)$$

ในปริภูมิ (space) เชิงสามมิติของจุดกำเนิดตัวแปร ตำแหน่งจุดที่เป็นค่าระยะสั้นที่สุดที่ใช้เป็นจุดออกแบบ (design point) สำหรับค่า $i = 1, 2, \dots, n$ มีค่าทั่วไปเป็น

$$x_i^* = \text{mean}_{x_i} - \alpha_i^* \sigma_{x_i} \beta_{HL} \quad (2.33)$$

ขั้นตอนวิธี (algorithm) ในการหาค่าระยะสั้นที่สุด $[\beta_{HL}]$ กับ x_i^* มีการแนะนำจาก Haldar and Mahadevan (1995) ให้ใช้แนวทางที่เสนอไว้ใน Bulletin No. 112 ของสถาบันในกรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศสชื่อ Comité Européen du Béton เสนอขั้นตอนวิธีไว้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพกราฟิกในการหาระยะสั้นที่สุด สำหรับตัวแปร 2 ค่า ที่มี ความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง (แนวทางใน Bulletin No.112)

รูปแบบของการลำดับขั้นตอนวิธีการหาค่า β_{HL} กับ x_i^* มีดังนี้

- 1) สมมุติค่าตั้งต้นของจุดออกแบบ เป็น x_i^* โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ และจุดออกแบบทั่วไปมักกำหนดจาก ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม

2) หาค่าตัวแปรลดค่า $x_i'^*$ จากความสัมพันธ์

$$x_i'^* = \frac{(x_i^* - \text{mean}_{x_i})}{\sigma_{x_i}}$$

3) ประเมินค่าของ $\left(\frac{\partial g}{\partial x_i'^*}\right)$ และ α_i^* ที่ตำแหน่งของ $x_i'^*$

4) คำนวณค่าจุดออกแบบใหม่ ที่เป็นค่า x_i^* ในพจน์ของ β_{HL} โดยใช้สมการที่ 2.33

5) แทนค่า x_i^* ที่เป็นค่าใหม่ ในสมการจำกัดที่กำหนดให้ $g(x^*) = 0$ และหาค่าของ β_{HL}

6) ใช้ค่า β_{HL} ที่หาได้จากขั้นตอนที่ 5 ประเมินซ้ำใหม่เพื่อหา $x_i'^* = -\alpha_i^* \beta_{HL}$

7) ทำการคำนวณซ้ำจากขั้นตอนที่ 3 ถึง 6 จนสามารถต่อจุดสร้างเส้นโค้งลู่อเข้า (convergent curve)

2.5.3 แนวทางเพิ่มเติมในการหาลากขอบเขตการพังทลาย

แนวทางปรับปรุงหาความเชื่อถือได้ จากวิธีโมเมนต์อันดับที่สอง (second moment reliability) ได้แก่ การสร้างทรงรี (ellipsoid) ที่สัมผัสกับผิวการพังทลายในปริภูมิดั้งเดิมที่เป็นจุดกำเนิด (original space) ของตัวแปรสุ่ม โดยไม่อาศัยการแปลงหรือลดค่าตัวแปร

Low and Tang (1997 a) ได้ระบุบทความวิจัยที่ใช้ matrix formulation หาค่าของดัชนี Hasofer-Lind ในรูปแบบใหม่ นั่นคือ

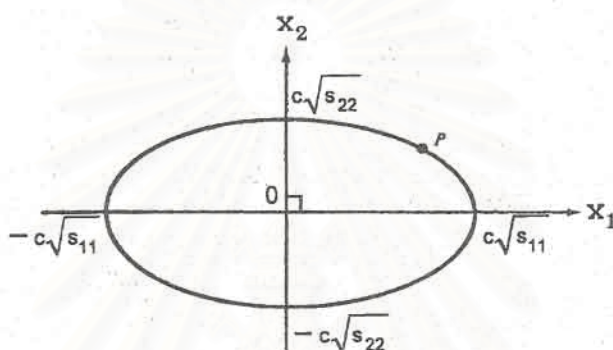
$$\beta_{HL} = \min_{x \in F} [(x - m)^T C^{-1} (x - m)]^{1/2} \quad (2.34)$$

พจน์ตัวแปรในสมการที่ 2.34 มีความหมายดังต่อไปนี้

- x = เวกเตอร์ที่แทนเซตของตัวแปรสุ่ม
- m = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม หรือใช้สัญลักษณ์ mean_x
- C = เมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance matrix)
- F = พื้นที่การพังทลาย

ก่อนที่จะเริ่มแนวทางใหม่ ของการหาความเชื่อถือได้ของระบบ จำเป็นต้องศึกษา พื้นฐานของสมการวงรีในปริภูมิยูคลิด (Euclidean space) ตามพิกัดจุดในรูปที่ 2.10 เมื่อต้องการหาระยะคงที่ c จากจุดกำเนิด

$$\frac{(x_1)^2}{s_{11}} + \frac{(x_2)^2}{s_{22}} = c^2 \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.10 การแสดงภาพกราฟิกที่มีจุด p อยู่บนผิววงรี

ขั้นตอนต่อมา กำหนดให้การกระจายตัวแปรสุ่มสำหรับทรงรีในรูปแบบบัญญัติ มีค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ $1 - \sigma$ เงื่อนไขไม่มีสหสัมพันธ์ในตัวแปร (uncorrelated) แต่ละแกนทรงรีขนานกับแกนพิกัดแนวหนึ่ง เมื่อทรงรีมีการเอียงตัว จะเขียนรูปแบบกำลังสอง (quadratic form) ของสมการที่ 2.34 หน้า 26 เป็น

$$(x - m)^T C^{-1} (x - m) = 1 \quad (2.36)$$

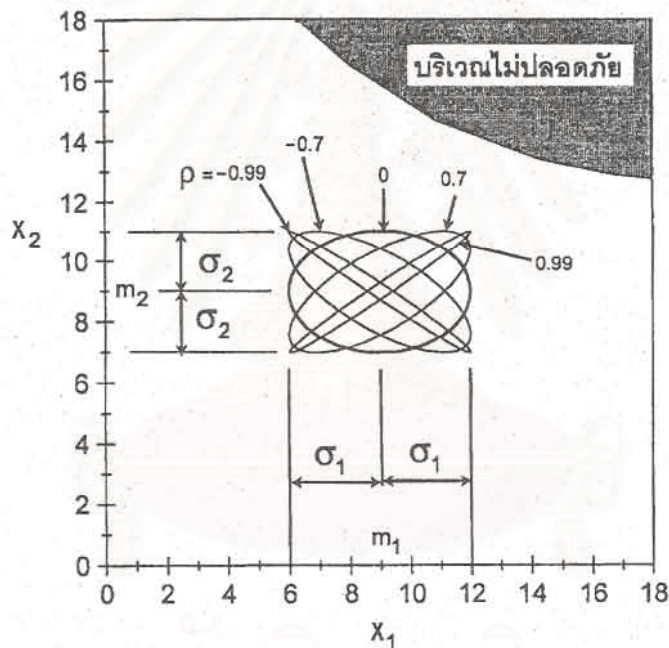
ในกรณีที่มีรูปแบบกำลังสองถูกกำหนดให้เป็นวงรี ในกรณีของ 2 มิติ และเป็นทรงรีแบบไฮเพอร์อิลลิปซอยด์ (hyperellipsoid) สำหรับมิติที่มากกว่า 3 มิติ การแสดงภาพกราฟิกของการพล็อตค่าต่าง ๆ ของสมการที่ 2.36 สำหรับวงรี 2 มิติ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 หน้าถัดไป

เงื่อนไขที่ Low and Tang กำหนดไว้สำหรับการกระจายค่าวงรีที่มีการหมุน เพื่อหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) หลายค่า ได้แก่

- ค่าเฉลี่ย $m_1 = m_2 = 9$
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma_1 = 3, \quad \sigma_2 = 2$

ในกรณีที่ค่า x_1 กับ x_2 ไม่มีสหสัมพันธ์ และได้ค่า $\rho = 0$ (ศูนย์) ก็จะเป็นวงรีแบบเดียวกับรูปที่ 2.10 หรือแสดงในรูป 2.11 สำหรับวงรีวงหนึ่งนี้

เมื่อ x_1 กับ x_2 มีสหสัมพันธ์ วงรีมีการหมุนและเปลี่ยนอัตราส่วนหน่วยระยะไปเรื่อย ๆ แต่ไม่ว่าจะมีการหมุนแบบใด การกระจายค่าของวงรี $1 - \sigma$ ในจุดกำเนิดของกรอบ $x_1 - x_2$ ยังคงถูกนิยามโดยค่า σ_1 และ σ_2



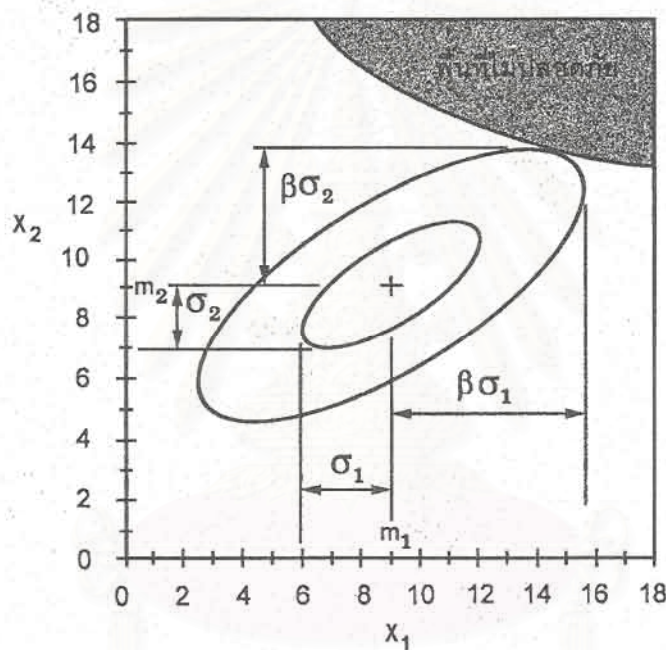
รูปที่ 2.11 การกระจายค่า $1 - \sigma$ ของวงรีเมื่อมีการหมุน ในขณะที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) มีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ

พื้นผิวการพังทลายที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 เป็นระดับขั้นที่สองพหุนาม (second degree polynomial)

$$x_2 = 25.5 - 1.41 x_1 + 0.039 (x_1)^2 \quad (2.37)$$

เงื่อนไขสำหรับสมการที่ 2.37 กำหนดให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $\rho = 0.7$ และค่าดัชนีความเชื่อถือได้, β เท่ากับ 2.18 แนวทางการหานี้ได้มาจากการคำนวณโดย Low (1996, หน้า 1299 - 1301)

ต่อมาวงรี 1 - σ กับวงรี $\beta - \sigma$ ได้ถูกพล็อตเพื่อหาจุดสัมผัสพื้นผิวการพังทลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ข้างล่าง สมการ 2.36 เป็นสมการวงรี $\beta - \sigma$ แต่เมื่อแทนค่าด้านขวาของสมการด้วย β^2 จากการคำนวณของ Low and Tang (1997, หน้า 750) ได้ค่า $\beta = 2.18$



รูปที่ 2.12 การกระจายค่าวงรี 1 - σ และวงรีวิกฤตที่จุดสัมผัส กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $\rho = 0.7$

ในรูปที่ 2.12 ข้างบน วงรีที่สัมผัสกับพื้นผิวการพังทลายเป็น β เท่าของขนาดการกระจายค่า 1 - σ (เมื่อระบุค่าในพจน์อัตราส่วนของแกน) ซึ่งเป็นค่าที่สมเหตุสมผลของดัชนีความเชื่อถือได้ β ในปริภูมิตั้งเคิมที่จุดกำเนิดของตัวแปรสุ่ม

ถ้าหากทำการหาค่าทรงรี (ellipsoid) ที่เล็ก (สั้น) ที่สุดที่สัมผัส กับพื้นผิวการพังทลาย ก็แก้ปัญหาตัวแปรสหสัมพันธ์ในรูปแบบไม่เชิงเส้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการแปลงหรือลดค่าตัวแปรแบบวิธีเคิม

ในเชิงการวิเคราะห์ฟังก์ชันหลายตัวแปร (multivariate function) มีความเกี่ยวข้องระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นปกติ (normal density) กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) สำหรับกรณีของปัญหาเชิง 2 มิติ ได้ฟังก์ชันความหนาแน่นสองตัวแปร

$$f_{x_1, x_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) \quad (2.38)$$

สมการ 2.38 มีเงื่อนไขที่ดัชนี β ถูกนิยามเช่นเดียวกับสมการที่ 2.34 หน้า 26 โดยไม่มีการลดค่าค่า (น้อย) สุด

ในทางกลับกัน เมื่อต้องการลดค่า β (หรือ β^2) ให้มีค่าต่ำสุด ก็ต้องทำให้ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสำหรับตัวแปรสองค่ามีค่าสูง (มาก) สุด ในรูปที่ 2.12 การกระจายค่าของวงรี $1 - \sigma$ และวงรี $\beta - \sigma$ แสดงเป็นเส้นชั้น (contour) สำหรับฟังก์ชันความน่าจะเป็นของค่าความหนาแน่น (probability density function) และเมื่อต้องการหาวงรีเล็กสุด (หรือไฮเพอร์อิลิปซอยด์ สำหรับกรณีหลายตัวแปร) ที่สัมพันธ์กับผิวการพังทลาย จะสมมูลกับการหาจุดที่น่าจะเป็นมากที่สุดที่เกิดการพังทลาย

แนวทางการวิเคราะห์แบบนี้คล้องจองกับผลงานวิจัยของ Shinozuka (1983) ที่ระบุค่าจุดออกแบบ (design point) เป็นจุดค่าแห่ง x^* ที่มีโอกาสความควรจะเป็นมากที่สุด (maximum likelihood) ถ้าตัวแปรสุ่ม x มีการแจกแจงแบบปกติ ทั้งนี้ไม่ได้ฟังฟังกับเงื่อนไขว่าองค์ประกอบอื่นจะมีสหสัมพันธ์กันหรือไม่

2.6 การประมาณค่าจากวิธีไมเมนต์ความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรมโดยทั่วไป ตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องอาจมีมากกว่าค่าเดียว กรณีที่ตัวแปรสุ่มมีความเกี่ยวข้องในหลายรูปแบบ การแจกแจงค่าตัวแปรอาจไม่ใช่เป็นเส้นโค้งเดียว ทำให้ต้องมีการใช้วิธีวิเคราะห์แบบคณิตเชิงซ้อน (complex analysis)

ถ้าหากกำหนดให้ y เป็นผลรวมของค่าตัวแปรสุ่ม และพจน์ β_i เป็นสัมประสิทธิ์ของตัวแปร x นั่นคือ

$$y = \sum (\beta_i) (x_i) \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.39 หาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย (mean) กับค่าความแปรปรวน (variance) ของพจน์ตัวแปร y ได้เป็น

$$\text{mean}_y = \sum (\beta_i) (\text{mean}_{x_i}) \quad (2.40)$$

$$(\sigma_y)^2 = \sum (\beta_i)^2 (\sigma_{x_i})^2 \quad (2.41)$$

ดังนั้น เมื่อ y เป็นผลคูณหรือเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของ x_i ทำให้ยากต่อการหาผลลัพธ์ของสมการที่ 2.40 กับ สมการที่ 2.41 ต้องใช้วิธีการหาปริพันธ์เชิงตัวเลข (numerical integration) แทน แต่ก็ยังมีแนวทางที่จะหาค่าประมาณได้ ตามข้อเสนอแนะของ Rosenblueth (1975) ใช้วิธีการคำนวณจุดค่าประมาณสำหรับโมเมนต์ความน่าจะเป็น (probability moment)

ขั้นตอนของการคำนวณค่าประมาณ เริ่มต้นสมมุติกรณีแรกให้ y เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรเพียงตัวเดียว มีการแจกแจงค่าแบบปกติ นั่นคือ $y = y(x)$ หรือยกตัวอย่างเป็นค่าคุณสมบัติมวลสาร เช่น องค์ประกอบของค่าการแบกรับน้ำหนักบรรทุก (bearing capacity) เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรมุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) ของมวลสาร เพียงอย่างเดียว

ฟังก์ชันดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้รูปแบบ ดังนี้

$$x_+ = \text{mean}_x + \sigma_x \quad (2.42)$$

$$x_- = \text{mean}_x - \sigma_x \quad (2.43)$$

$$y_+ = y(x_+) \quad (2.44)$$

$$y_- = y(x_-) \quad (2.45)$$

จากทั้ง 4 สมการที่ระบุข้างต้น จะทำให้สามารถหาค่าเฉลี่ยกับค่าความแปรปรวนของ y โดยประมาณ (approximate) ดังนี้

$$\text{mean}_y \approx P_+(y_+) + P_-(y_-) \quad (2.46)$$

$$(\sigma_y)^2 \approx P_+(y_+)^2 + P_-(y_-)^2 - (\text{mean}_y)^2 \quad (2.47)$$

พจน์ที่เป็นสัญกรณ์ P ในสมการที่ 2.46 และ 2.47 เป็นสัมประสิทธิ์ของความน่าจะเป็น และมีค่าตามที่กำหนดให้คือ

$$P_+ = P_- = 0.5 \quad (2.48)$$

วิธีการประมาณค่าดังกล่าว สามารถนำไปใช้ในกรณีที่ ตัวแปรที่กำหนด y เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรสุ่ม 2 ตัวแปร ได้แก่ x_1 กับ x_2 ทำให้แปลงสมการชุดใหม่ เป็น

$$y_{++} = y(x_{1+}, x_{2-}) \quad (2.49)$$

$$y_{+-} = y(x_{1+}, x_{2-}) \quad (2.50)$$

$$y_{-+} = y(x_{1+}, x_{2-}) \quad (2.49)$$

$$y_{--} = y(x_{1+}, x_{2-}) \quad (2.50)$$

ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยกับค่าความแปรปรวนของพจน์ y กับค่าสัมประสิทธิ์ P เป็น

$$\begin{aligned} \text{mean}_y &\approx P_{++}(y_{++}) + P_{+-}(y_{+-}) \\ &\quad + P_{-+}(y_{-+}) + P_{--}(y_{--}) \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_y)^2 &\approx P_{++}(y_{++})^2 + P_{+-}(y_{+-})^2 \\ &\quad + P_{-+}(y_{-+})^2 + P_{--}(y_{--})^2 - (\text{mean}_y)^2 \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$P_{++} = P_{--} = 0.25 [1 + \rho_{(x_1, x_2)}] \quad (2.53)$$

$$P_{+-} = P_{-+} = 0.25 [1 - \rho_{(x_1, x_2)}] \quad (2.54)$$

พจน์ $\rho_{(x_1, x_2)}$ เป็นสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่าง x_1 กับ x_2 ดังนั้นถ้าหาก x_1 กับ x_2 เป็นตัวแปรอิสระ (ไม่พึ่งพิง) ค่า $\rho_{(x_1, x_2)}$ เป็น 0 (ศูนย์)

บทที่ 3

การวิเคราะห์แหล่งข้อมูลต้นทาง ที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอน

งานการศึกษาเพื่อประเมินความเสี่ยง ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เป็นแหล่งต้นทาง (source) ทั้งนี้เพราะว่ามวลสารที่เป็นดินและหินมีความไม่แน่นอน (uncertainty) ได้หลายรูปแบบ ดังนั้นจึงมีการนำเสนอกรอบแนวคิด เพื่อเป็นแนวทางป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการประเมินผลความเสี่ยงของระบบในระหว่างปฏิบัติงานภาคสนาม

3.1 การวิเคราะห์แหล่งต้นทางที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพ

ในงานก่อสร้างความลาดเอียงหรืออุโมงค์ใต้ดิน ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพที่เรียกว่า บัญชีความปลอดภัย (F.S.) ที่คำนวณด้วยการวิเคราะห์เชิงแรงหรือเชิงโมเมนต์ ใช้ค่าข้อมูลดิบจาก 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ค่าแปรเชิงคุณสมบัติมวลสาร ค่าแปรเชิงรูปแบบเรขาคณิต กับรูปแบบการพังทลายหน้างานการขุดเจาะ

แหล่งต้นทางที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอน (sources of uncertainty) ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพแบ่งออกเป็น 4 แหล่ง ได้แก่

1. การกระจายค่าของข้อมูลดิบ ข้อมูลดินภาคสนามที่นำมาหาค่าเฉลี่ย ถ้าหากไม่มีความแปรผันสูง เช่น เป็นข้อมูลของค่าคุณสมบัติแบบจุดเดียว (one point property) ก็สามารถทำการทดสอบค่าหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าที่ได้ก็จะใกล้เคียงต่อความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดินภาคสนามหลายประเภทมีความแปรผันสูง และยังขึ้นกับองค์ประกอบเชิงมิติอีก เช่น ระบายของรอยแตกแยกในหิน การหาเฉลี่ยโดยตรงทำไม่ได้ เพราะมีทั้งค่ามุมกับค่าแนวทิศทางของระบายในเชิงสามมิติด้วย

2. ความคลาดเคลื่อนของระบบการตรวจสอบ ในการตรวจสอบข้อมูลแหล่งต้นทาง อาจมีความคลาดเคลื่อน (error) เกิดขึ้นได้สำหรับระบบการตรวจสอบ ปัญหาหลักเกิดจากค่าเฉลี่ยคุณสมบัติจากการตรวจวัด (measured property) แตกต่างจากค่าเฉลี่ย

คุณสมบัติที่ต้องการ (desired property) ตัวอย่างการตรวจวัดระยะความยาวของหน้าตัดชั้นดินมีความเอนเอียง (bias) เกิดตามแนวที่ตรวจวัด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3. ความคลาดเคลื่อนของมนุษย์ สิ่งนี้อาจเป็นไปได้หลายรูปแบบ เช่น ระหว่างการทดสอบหรือตรวจวัดค่าคุณสมบัติมีการกระทำที่ผิดขั้นตอน หรือในระหว่างการออกแบบมีการละเลยค่าบางค่าที่อาจมีผลต่อเสถียรภาพหน้างานก่อสร้างในภายหลัง

4. ข้อมูลดินภาคสนามขาดการบันทึกตรวจสอบ ในสถานะทางธรรมชาติหน้างานการขุดเจาะบางแห่ง อาจขาดต่อการเก็บข้อมูลดิน หรือในบางครั้งข้อมูลดินที่สำคัญไม่ทราบในช่วงการสำรวจ แต่กลับกลายเป็นข้อมูลที่มีผลต่อเสถียรภาพของหน้างานมาก เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับรอยเลื่อน (fault) ที่ในบางครั้งถูกดินคลุมทับ หรือไม่แสดงลักษณะเชิงปรากฏการณ์ ที่มีค้ำขึ้นชี้ว่าอาจมีรอยเลื่อนเกิดขึ้น เช่น ไม้พวย slickenside ในบริเวณ ไม้พบนึ่งของเลื่อนที่ชัดเจน เป็นต้น

3.2 ความแปรผันหลักที่เกี่ยวข้องกับการประเมินเสถียรภาพมวลสาร

มวลสารที่เป็นดินหรือหิน มีองค์ประกอบหลักที่แปรผันได้และควรนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการหาเสถียรภาพเชิงกำหนดตามปกติ คือ ค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุ รายละเอียดรูปแบบเชิงเรขาคณิตทั้งบนพื้นผิวและใต้พื้นผิวดิน คุณสมบัติที่บ่งพร่องของมวลสาร และความดันน้ำ (ของเหลว) ในโพรงช่องว่าง

3.2.1 คุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุของมวลดินและหิน

รายละเอียดของการทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุมวลดินและมวลหิน มีความแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้มีข้อพึงสังวรเกี่ยวกับข้อมูลพื้นฐานของค่าคุณสมบัติ ดังนี้

1. มวลดิน การทดสอบค่ากำลังวัสดุของมวลสารที่เป็นดิน ควรใช้ทฤษฎีการพังทลายของ Mohr-Coulomb ตัวแปรสุมที่ควรทดสอบในการเป็นตัวแทนข้อมูลที่ใช้หาค่าเชิงเสถียรภาพ ได้แก่ ค่าไคฮีชัน (cohesion, c) มุมเสียดทานภายใน (internal angle of friction, ϕ) หรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายใน (coefficient of internal friction, $\tan \phi$)

องค์ประกอบเพิ่มเติมที่ควรทราบ ก็คือ ข้อมูลจากการทดสอบที่มีการกระจายค่าในรูปแบบไทน์ เป็นแบบการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนปกติ หรือแบบการแจกแจงค่าแบบเบคา เป็นต้น

2. มวลหิน ค่ากำลังวัสดุของหินที่เก็บเป็นแบบแท่งหินทรงกระบอกมาทดสอบหาค่าในห้องปฏิบัติการ ส่วนใหญ่ใช้ค่ากำลังวัสดุอัดแกนเดียว (uniaxial compressive strength) กับค่ามุมเสียดทานภายใน ถ้าหากนำทฤษฎีของ Mohr-Coulomb มาใช้มัก จะสมมติให้มีแรงเฉือนค่าแบบเบี่ยงเบนปกติ

3. ความบกพร่องของคุณสมบัติ ในมวลดินแต่ละชั้นเมื่อระดับความลึกแปรเปลี่ยนไป ค่าคุณสมบัติมักเปลี่ยนแปลงตาม ไปด้วย นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบในเรื่องกระบวนการทางธรณีวิทยาของดินเก่า นึกคิดมีผลกระทบสูงต่อค่าคุณสมบัติมวลดินแต่ละแหล่ง

ในมวลหินก็มีโอกาสเกิดความบกพร่องได้ เช่น ถึงแม้จะเป็นหินประเภทเดียวกันแต่ อาจมีพื้นผิวของรอยแตกแยกที่เรียบหรือขรุขระ ก็อาจก่อให้เกิดผลในความแตกต่างเรื่อง กำลังวัสดุเฉือนระหว่างที่พื้นผิวระนาบรอยแตกแยก (เรียบหรือขรุขระ) ขณะที่มวลเคลื่อนที่

4. คุณสมบัติมวลสารภาคสนาม มวลดินหรือมวลหินในภาคสนามที่อยู่กับที่ ไม่ได้ถูก ขุดเจาะเป็นแท่งทรงกระบอกหรือแท่งบล็อกสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ คุณสมบัติของ มวลสารในภาคสนามเหล่านี้ เป็นสิ่งที่มีคุณค่าเชิงวิศวกรรมอย่างยิ่ง เหมาะสำหรับนำค่า เหล่านี้มาใช้ในการออกแบบ แต่ยังมีประเด็นที่ควรเน้นในเรื่องนำค่ากำลังวัสดุมวลสาร มาใช้ว่าเป็นมวลดินหรือมวลหิน

ก) มวลดิน ในการศึกษาความแปรปรวนของค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุของมวลดิน ภาคสนาม สิ่งที่จะต้องพิจารณา คือ สภาวะ (state) ในมวลดิน เพราะว่า วัฏภาค (phase) ในมวลดิน มี 3 เฟส คือ อากาศ น้ำ และ ของแข็ง

เมื่อมวลดินถูกกระทำด้วยความเค้นทั้งหมด การตอบสนองของมวลดินต่อความเค้นจะ ขึ้นอยู่กับว่ามวลดินอยู่ในสภาวะอะไร เช่นเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) ดิน ที่ยังไม่อิ่มตัว (unsaturated soil) ดินที่มีการระบายน้ำออกจากมวล (drained soil) ดินที่ไม่มีการระบายน้ำออกจากมวล (undrained soil)

ตัวอย่างความแปรปรวนของค่ากำลังวัสดุ เช่น เมื่อทำการทดสอบดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการระบายน้ำออกจากมวล (saturated and undrained soil) อนุภาคดินและน้ำอยู่ในสภาวะ incompressible นั่นคือไม่สามารถอัดตัวได้ แต่ในทาง ตรงกันข้ามดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีการอัดตัวได้เมื่อถูกความเค้นกระทำ

ข) มวลหิน ในการศึกษาค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุของมวลหินภาคสนาม ใช้เกณฑ์ ของ Hoek and Brown (1980, หน้า 137-140) ที่เป็นสูตรเชิงประสบการณ์หาค่า ความเค้นอัดแกนเดียวมาหาความสัมพันธ์ของความเค้นอัดแนวตั้งที่ก่อให้เกิดการแตกหักของ

แห่งหินทรงกระบอกที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีการกำหนดค่าคงที่ของคุณสมบัติมวลหินแต่ละชนิดไว้ด้วย สิ่งที่เป็นองค์ประกอบช่วยในการพิจารณาเพิ่มเติม สำหรับค่ากำลังวัสดุ คือ ค่า RQD (Rock Quality Designation) ช่วยทำให้การประเมินกำลังวัสดุภาคสนามของมวลหินมีค่าใกล้เคียงขึ้น

กล่าวโดยสรุป ค่าคุณสมบัติของมวลหินหรือมวลหินภาคสนาม ค่าที่ควรนำมาใช้ในการพิจารณาเชิงเสถียรภาพคือ ค่าโคฮีชัน (cohesion, c) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\tan \phi$) ค่ากำลังวัสดุอัดแกนเดียว (uniaxial compressive strength) เมื่อนำมาวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น จะตั้งสมมุติฐานให้มีการแจกแจงค่าแบบปกติ นอกจากนี้ในการวิเคราะห์เชิงสถิตินี้ มักให้ค่าโคฮีชัน (c) กับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) เป็นตัวแปรอิสระไม่พึ่งพิง (independent variables) ซึ่งกันและกัน ทำให้มีผลแปรเปลี่ยนต่อการหาความเชื่อถือได้สำหรับความเสี่ยงในการออกแบบตัดความลาดเอียง

3.2.2 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน่วยมวลที่พังทลาย

ข้อมูลการตรวจวัดของขนาดหรือมิติ ที่ประกอบเป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน่วยมวลที่พังทลาย การขุดเจาะมวลสารบนพื้นผิวดินมักได้ข้อมูลจากการตรวจวัดมากกว่าการขุดเจาะมวลสารใต้ผิวดิน ในการออกแบบข้อควรระวังคือไม่ควรสมมุติค่าขึ้นมาให้เกินความเป็นจริงในสภาพธรรมชาติ

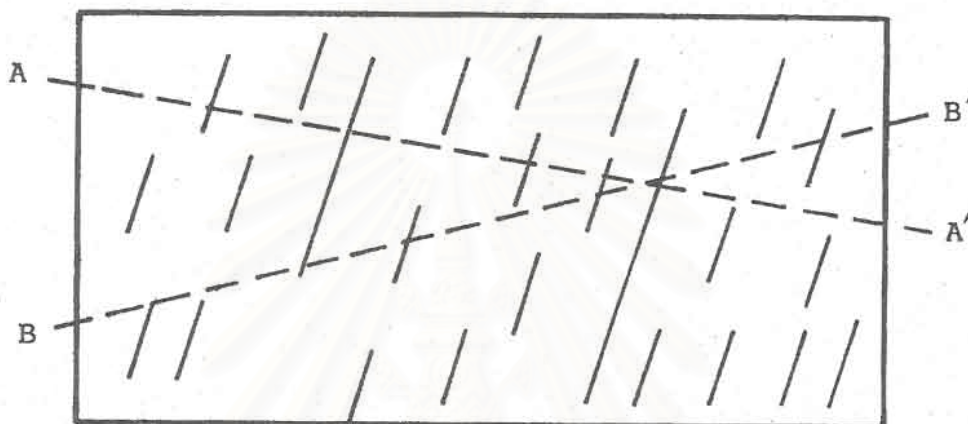
3.2.3 คุณสมบัติที่บกพร่องของมวลสารในภาคสนาม

ในการตัดความลาดเป็นขั้นบันได หรือการขุดเจาะชนิดอื่น สิ่งที่เป็นของปกติว่าจะมีความคลาดเคลื่อนบกพร่องในภาคสนาม ได้แก่ คุณสมบัติมวลสารในเรื่องความยาว ระยะห่าง (spacing) สำหรับความไม่ต่อเนื่องของระนาบ กับผลจากการปรับเปลี่ยนการวางตัว (orientation) ของระนาบในมวลสาร

1. ขนาดหรือมิติความยาวที่บกพร่อง ในการตรวจวัดขนาดความยาวของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลสารที่ทำการขุดเจาะ เมื่อกำหนดแนวเส้นวัดแบบกราดตรวจ (scan line) โอกาสที่จะเกิดความเอนเอียง (bias) ของแนวเส้นที่ตรวจวัดที่ชักเป็นตัวอย่าง (sampling) นี้มีได้หลายรูปแบบ

ก) ความคลาดเคลื่อนจากการกำหนดจุดตัดปลายแนว เมื่อมีรอยแตกในมวลสาร เช่นมีระนาบความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น อาจมีการกำหนดระยะสุดของจุดปลายแนวระนาบคลาดเคลื่อนได้ (truncation error) ซึ่งระยะความยาวที่คลาดเคลื่อนนี้อาจมีพิสัย 0.1 - 1 เมตร

ข) ความยาวเบี่ยงเบน การเลือกแนววัดแบบกราดตรวจ เพื่อให้เป็นแนวตัวแทนของภาพตัดขวางหน้างาน และในบางครั้งยังต้องการให้เกิดการตั้งฉากกับระนาบรอยแตกแยกในชั้นหิน (ดูรูปที่ 3.1) แต่ไม่เลือกแนวกราดตรวจที่ไม่ตั้งฉาก หรือเป็นแนวที่ไม่ผ่านระนาบรอยแตกแยกจำนวนมากที่สุดที่ปรากฏในหน้างานการขุดเจาะ มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ตรวจวัดโดยตรง



รูปที่ 3.1 การเบี่ยงเบนเนื่องจากการเลือกแนวกราดตรวจ ดังในรูปข้างบน ผู้ทำการสำรวจเลือกแนว BB' แทนที่จะเป็นแนว AA' ที่มีจำนวนระนาบรอยแตกแยกในแนวเส้นวัดมากที่สุด และตั้งฉากกับระนาบ

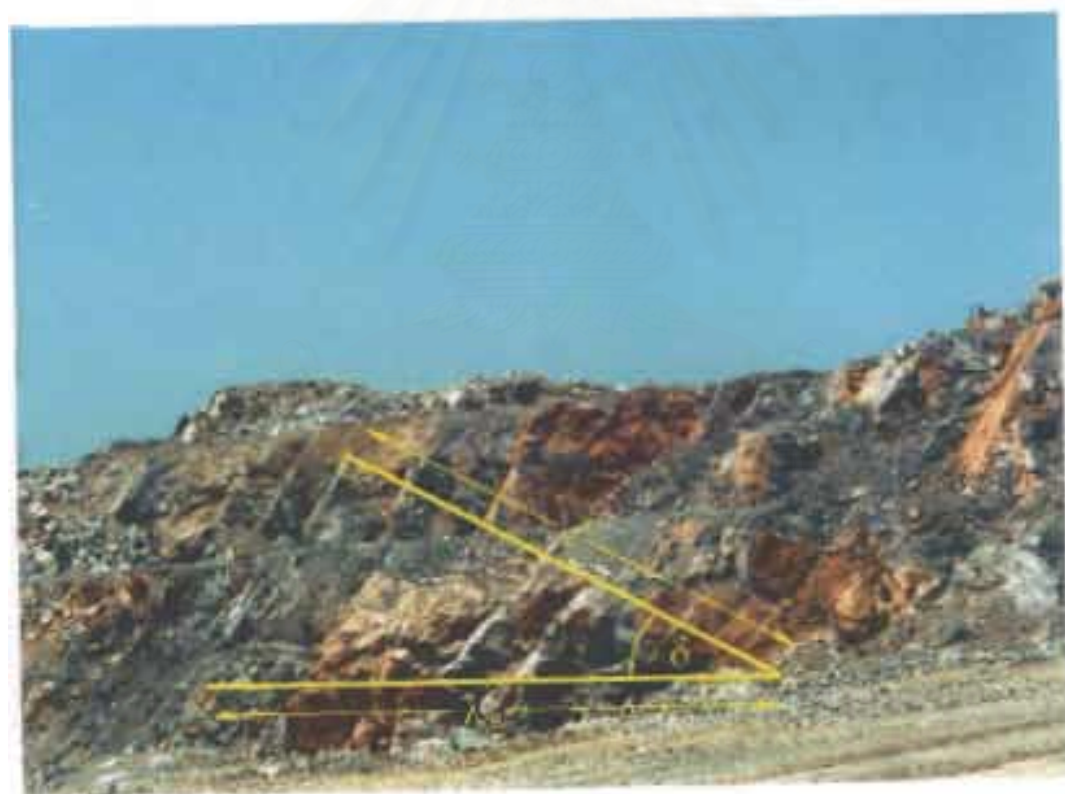
ค) พื้นที่เบี่ยงเบน การคำนวณพื้นที่ของหน้าตัดการขุดเจาะย่อมมีความคลาดเคลื่อนต่อเนื่อง ถ้าหากมีการประเมินระยะความยาวในแนวที่ไม่เหมาะสม หนึ่งพื้นที่ของรอยแตกแยกเมื่อระนาบตรงผิวหน้างานขุดเจาะ (หน้าเหมือง) มีการเอียงเทเข้าไปในมวลสาร การกำหนดระยะแนวเอียงเทที่ลึกเข้าไปในมวลสารต้องใช้วิธีประมาณค่าจากสูตรเชิงประสมการณ์แทน ซึ่งก่อให้เกิดความไม่แน่นอนขึ้น

3.2.4 ระยะห่างกับการปรับเปลี่ยนค่าการวางตัวของระนาบ

ระนาบในมวลสารที่เป็นดินหรือเป็นหิน ถ้าหากเกิดเป็นแนวเล็ก ๆ อาจตรวจพบได้ยากหรือละลายไปในระหว่างการสำรวจ ดังนั้นระยะห่าง (spacing) ที่คำนวณจากแนวกราดตรวจที่กำหนด ก็มีโอกาสผิดพลาด

ในธรรมชาติระนาบรอยแตกแยกที่เกิดในมวลสาร มีค่าการวางตัว (attitude) ในเชิง 3 มิติ ดังนั้น การหาค่าการปรับเปลี่ยนการวางตัวของระนาบ (orientation)

ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดยตรง แนวทิศทาง เช่นแนว strike กับค่ามุมเอียงเท เช่นมุม dip จำเป็นต้องใช้วิธีการพิเศษช่วยในการคำนวณ หรือทำการพล็อตค่าการวางตัวของระนาบที่เป็นข้อมูลคินมาทศาสตร์ลงในแผ่นกระดาษที่ออกแบบพิเศษในรูปแบบ stereo net เพื่อทำการจับกลุ่มและหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งแนวทิศทางกับค่ามุมเอียงเทจากแนวราบ ตัวอย่างในภาพถ่ายข้างล่าง เป็นการวัดความลาดแบบจัมปีนโคของเหมืองหินปูนซีเมนต์เอเชีย ที่อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี มีการกำหนดเส้นลุ่มตัวอย่าง หรือ sampling line กับแนวเส้นตั้งฉากของเซตกลุ่มตัวอย่าง (set normal) ซึ่งมุมระหว่างเส้นลุ่มตัวอย่างกับเส้นตั้งฉากของเซต เรียกว่า acute angle ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของระนาบความไม่ต่อเนื่องในเซต จากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าไม่มีระนาบของ joint ใดในหน้าเหมืองหินปูนนี้ ที่มีค่าการวางตัวเหมือนกัน



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายการวัดความลาดแบบจัมปีนโค ในเหมืองเปิดหินปูนบริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี แสดงระนาบของ joints ที่ปรากฏ สัญลักษณ์ในภาพ / = set normal, λ_s = assumed sampling line, δ = acute angle

ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าความไม่ต่อเนื่องหลายค่าในหนึ่งเซต เป็นค่าทิศทางที่อยู่ในเดียว (single direction) ซึ่งแนวทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่มีพื้นฐานมาจากงานวิจัยของ Fisher (1953), Watson (1966), Priest (1985, 1992) ส่วนรายละเอียดแนวทางการวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับการหาค่าผลลัพธ์ มีระบุไว้ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง "ผลกระทบความไม่ต่อเนื่องในหิน ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน" หน้า 20 - 53 (สง่า ตั้งชวาล และ จดดับ ปัทมสุต, 2539)

3.2.5 การจำลองแบบความดันน้ำในมวลสาร

มวลสารที่เป็นดินหรือหิน การกระจายค่าความดันน้ำมีอิทธิพลโดยตรงต่อโครงสร้างของมวลความลาดเอียงหรือมวลรอบอุโมงค์ ถึงแม้ว่าจะตัดประเด็นองค์ประกอบเรื่องเวลาที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพในระยะยาว ความดันน้ำก็ยังต้องคำนึงถึงทุกครั้ง เช่น เมื่อมีฝนตกในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ระดับน้ำใต้ดินย่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแบบจำลองที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ต้องคำนึงถึงความเค้นประสิทธิผล (effective stress) ที่น้ำขังอยู่ในโพรงช่องว่างของมวลสารด้วย และความน่าจะเป็นของผลกระทบความดันน้ำ ได้แก่ ความเร็วของระดับการเปลี่ยนแปลงที่น้ำเข้ามาในมวลสาร ผลกระทบของฝนที่ตกหนัก กับผลกระทบของน้ำที่ไหลซึมในมวล เป็นต้น

3.3 ตัวประกอบหลักสำหรับความไม่แน่นอนของโอกาสการพังทลาย

การดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ผลความเสี่ยงของการขุดเจาะ นอกจากมีการแยกแยะให้เข้ากับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายมวลสาร ยังมีการแยกตามชนิดของการขุดเจาะที่มีการปฏิบัติงานในสภาวะที่อยู่บนพื้นผิวดินหรือใต้พื้นผิวดิน

ในการประเมินโอกาสการพังทลายเชิงความน่าจะเป็น ตัวประกอบ (factor) ของการเกิดความไม่แน่นอนมีโอกาสเป็นไม่ได้หลายรูปแบบซึ่งมีผลจากสภาพทางภูมิประเทศกับทางธรณีวิทยา อิทธิพลของตัวแปรสุ่มในมวลสาร และอิทธิพลของตัวแปรสุ่มภายนอก จึงมีการเลือกใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ (correlation) อันเป็นการป้องกันหรือลดความคลาดเคลื่อนมนุษย์กับความคลาดเคลื่อนรวมยอด (gross error)

3.3.1 ฟังก์ชันความน่าจะเป็น

ในการหาค่าความน่าจะเป็นของการพังทลาย เมื่อต้องการหาค่าโอกาสของการพังทลาย มีการสมมุติฟังก์ชันการแจกแจง (distributed function) ค่าโอกาสการพังทลาย เช่นค่า $G(x)$ ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนของกลุ่มตัวอย่างจะทราบแต่ก็

ยังมีปัญหาในเรื่องการเลือกฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) ที่จะให้การแจกแจงค่าของกลุ่มข้อมูลเป็นแบบไหน

Mostyn and Li (1993) ได้ระบุไว้ในบทความหน้า 100 ว่า จากการศึกษาโอกาสการพังทลายของคันทางดินถม (embankment) ที่ก่อสร้างโดย U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg พบว่า เมื่อจะเลือกแบบจำลองเสถียรภาพของคันทางดินถม ให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีความสัมพันธ์กับ $G(x)$ ตัวอย่างให้ค่าเฉลี่ย (mean) ปัจจัยความปลอดภัย เท่ากับ 2.0 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation) เท่ากับ 0.2 [หรือค่าเบี่ยงเบน, standard deviation = 0.4] จะได้ค่าโอกาสการพังทลายแตกต่างกันไป เมื่อเลือกใช้ฟังก์ชันความหนาแน่น 3 แบบ ได้แก่ การแจกแจงค่าปกติ การแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (log normal) การแจกแจงค่าแบบแกมมา (gamma)

ผลลัพธ์ค่าโอกาสการพังทลายเมื่อมีการแจกแจงค่าปกติ เท่ากับ 2×10^{-3} ส่วนการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ เท่ากับ 2×10^{-4} และการแจกแจงค่าแบบแกมมา เท่ากับ 2×10^{-4}

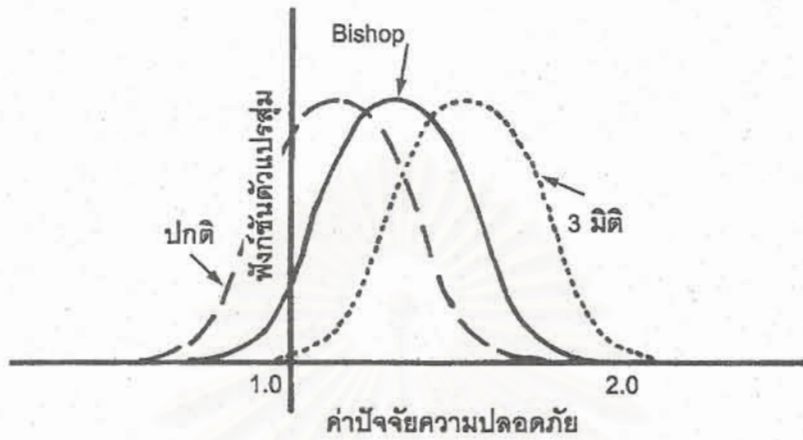
3.3.2 แบบจำลองเชิงกำหนด

การเลือกใช้แบบจำลองเชิงกำหนดด้วยวิธีวิเคราะห์แบบไหน เป็นหัวข้อหลักที่ค่อนข้างมีแนวทางกว้างขวางหลายรูปแบบ ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยหน้างานการขุดเจาะบ่อแม่แปรเปลี่ยนไป ขึ้นอยู่กับความละเอียดของวิธีวิเคราะห์ หรือจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

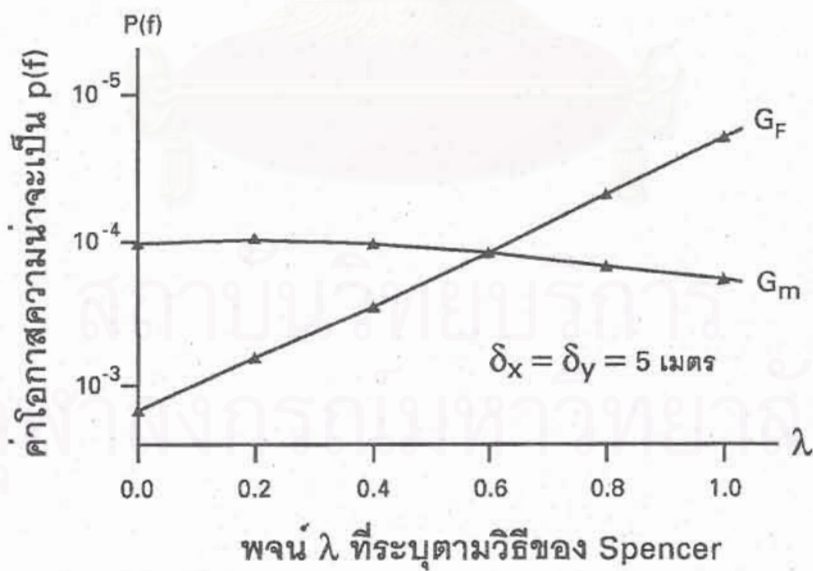
ตัวอย่างในรูป 3.3 เป็นอิทธิพลของชนิดแบบจำลองเชิงกำหนด (deterministic model) ที่ถูกนำมาใช้ในการหาเสถียรภาพความลาดเอียง ถึงแม้ว่าจะสมมุติให้ข้อมูลมีการแจกแจงค่าแบบปกติเหมือนกัน แต่จากการที่ได้เลือกวิธีวิเคราะห์ตามแนวทางที่กำหนดให้แตกต่างกัน เมื่อนำมาพล็อตหาค่าโอกาสการพังทลายได้เส้นโค้งความน่าจะเป็นแตกต่างกัน

ถ้าให้ใช้วิธีแบ่งส่วนแบบปกติ ค่าเฉลี่ย F.S. หาได้เท่ากับ 1.1 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.2 มีค่าโอกาสการพังทลาย 30 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้วิธี Bishop ได้ค่า F.S. สูงขึ้นเป็น 1.3 แต่ค่าเชิงสถิติอื่นใกล้เคียงกัน แต่ค่าโอกาสการพังทลายลดเหลือเพียง 7 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 2 วิธีดังกล่าว เป็นการหาค่าที่จุดสมมูลเชิง 2 มิติ ดังนั้นถ้าหากเลือกใช้แบบจำลองเชิง 3 มิติ ค่า F.S. จะสูงขึ้นถึง 1.6 ถึงแม้ว่าค่าเชิงสถิติอื่นใกล้เคียงกัน แต่ค่าโอกาสการพังทลายลดเหลือต่ำมากแค่ 0.1 เปอร์เซ็นต์

ผลสรุปในกรณีนี้ก็คือ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแบบจำลองเชิงกำหนด ก่อให้เกิดการลดค่าของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยลงไปถึง 30 % หรือมีความแตกต่างของค่าโอกาสการพังทลายถึง 3 เท่า และค่าความค้ำนี้เชื่อถือได้ (β) ลดลง 5 เท่า



รูปที่ 3.3 การเลือกวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดที่แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่แนวทางปกติ แนวทางของ Bishop แนวทาง 3 มิติ (3-D) ทำให้ได้ค่าตัวเลขโอกาสการพังทลาย แตกต่างกันไป 3 รูปแบบ



รูปที่ 3.4 ผลกระทบอีกรูปแบบหนึ่งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าโอกาสการพังทลาย (คัดลอกจาก Li & White, 1987)

ตัวอย่างอีกรูปแบบหนึ่ง (รูปที่ 3.4) ที่มีการแสดงผลกระทบจากแบบจำลองเชิงกำหนดจากความแปรผันของค่าประมาณโอกาสการพังทลาย ถ้าหากใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพของการพังทลายแบบวงกลมด้วยวิธีของ Spencer (1967) ซึ่งแนวทางการวิเคราะห์จะคล้ายคลึงกับวิธีของ Morgenstern and Price (1965)

เมื่อกำหนดให้ค่าสัมพัทธ์ δ_x กับ δ_y เท่ากับ 5 เมตร พบว่าค่าโอกาสการพังทลาย [พจน์ $p(f)$] มีความแปรผันกับพจน์ G_M (นิยามเป็นฟังก์ชันผลเฉลยเชิงไมเนมอนด์) ที่แตกต่างกับความแปรผันกับพจน์ G_F (นิยามเป็นฟังก์ชันผลเฉลยเชิงแรง) ค่า λ (ตามวิธีของ Spencer) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไป มีผลกระทบต่อ G_F มากกว่าค่า G_M อย่างค่อนข้างชัดเจน

3.3.3 ความคลาดเคลื่อนของมนุษย์กับความคลาดเคลื่อนรวมยอด

โครงสร้างสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีการเสียดำเนินการสูง เช่น สะพานขนาดใหญ่หรือเขื่อนกักเก็บน้ำ ก่อนการก่อสร้างส่วนใหญ่มีแผนงานการสำรวจและการทดสอบที่ดีมาก ทำให้การออกแบบน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม จากผลงานวิจัยหลายแหล่ง พบว่า ยังมีโอกาสเกิดการพังทลาย ประมาณ 1×10^{-3} ในโครงสร้างเหล่านี้ ซึ่งเป็นผลมาจากการคลาดเคลื่อนของมนุษย์ (human error) หรือเป็นความคลาดเคลื่อนรวมยอด (gross error) ในเรื่องที่ไม่ทราบฐานนิยม (mode) ของการพังทลายในมวลสาร หรือไม่ทราบข้อมูลในเชิงปฏิบัติการจริงเรื่องอื่น จี๊ดจำกัดที่ควรนำมาพิจารณาเพื่อแก้ไขในการออกแบบควรมีโอกาสค่อนข้างสูง หรือมีค่าโอกาสการพังทลายมากกว่า 1×10^{-3}

ข้อควรระวังอีกอย่างหนึ่งในการออกแบบงานการขุดเจาะ นั่นคือ ผู้ออกแบบจะสนใจปัญหาค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากกว่าปัญหาการประมาณค่าโอกาสการพังทลาย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นการเลือกออกแบบงานการขุดเจาะที่เสียดำเนินการน้อยสุด

Melchers (1987) ได้เสนอสูตรเชิงประสมการณ์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เป็นค่าใช้จ่ายกับตัวแปรในเชิงเสถียรภาพ

$$C_T = [C_I \{ p(f) \}] + \{ [p(f) + p(G)] C_F \} \quad (3.1)$$

พจน์ตัวแปรในสมการข้างบนมีความหมาย ดังนี้

- C_T = ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่คาดการณ์ (expected total cost)
- C_I = ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นที่ประมาณไว้
- $p(f)$ = โอกาสของการพังทลายจากการคำนวณเชิงเสถียรภาพ
- $p(G)$ = โอกาสของการพังทลายเนื่องจากความคลาดเคลื่อนรวมยอด
- C_F = มูลค่าปัจจุบันที่เป็นค่าใช้จ่ายในการพังทลาย

จากสมการที่ 3.1 หน้า 42 กำหนดให้ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (C_1) เป็นฟังก์ชันค่าโอกาสการพังทลาย [$p(f)$] และทำนองเดียวกันค่าใช้จ่ายทั้งหมด (C_T) ก็เป็นฟังก์ชันกับ $p(f)$ เมื่อผู้ออกแบบทำการลดค่าใช้จ่ายทั้งหมด หรือให้ค่า C_T ค่าสุด แต่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรง ต่อค่า $p(G)$ ต้องมีเงื่อนไขว่า $p(G) \ll 1$ กับค่า $C_F \ll C_1$ ซึ่งในความเป็นจริง การออกแบบตามเงื่อนไขดังกล่าวทำไม่ได้

ถ้าหากพิจารณาอีกมุมมองหนึ่ง เมื่อเกิดเงื่อนไข $p(f) < p(G)$ มีผลทำให้ไม่สามารถนำค่า $p(f)$ มาเปรียบเทียบเพื่อทำการออกแบบหลายแนวทาง ซึ่งทำไม่ได้

3.3.4 อิทธิพลของแนวทางหาค่าสหสัมพันธ์

ในทางสถิติการหาค่าสหสัมพันธ์ (correlation) มีหลายรูปแบบ ได้แก่ การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในระบบ การหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวการพังทลาย และการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ที่เป็นตัวแปรของระบบ) ในปริภูมิ การอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวในหัวข้อนี้จะช่วยให้ผู้ออกแบบมีความมั่นใจสูงขึ้นในการหาค่าสหสัมพันธ์

1. สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในเชิงกำลังวัสดุ

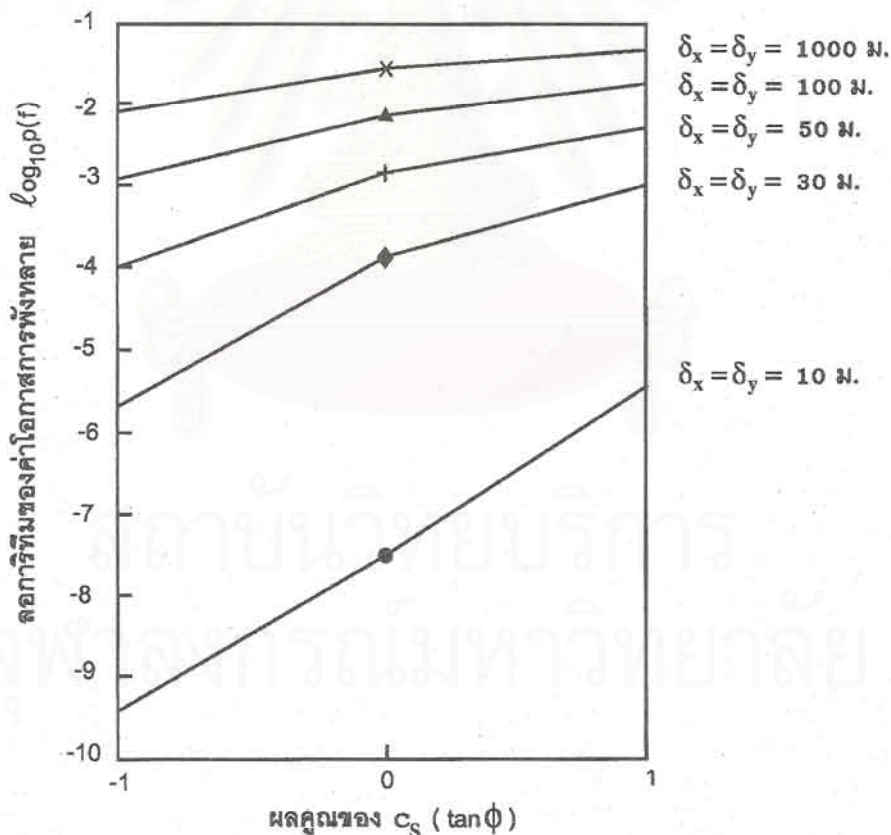
แนวทางที่นักวิจัยหลายท่านใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น เมื่อมีความเกี่ยวข้องกับกำลังวัสดุเฉือนของมวลสาร ได้แก่ ค่าตัวแปรโคฮีชัน และมุมเสียดทานภายใน โดยกำหนดให้ตัวแปรสองค่านี้เป็นตัวแปรที่ไม่พึ่งพิงซึ่งกันและกัน นักวิจัยรุ่นแรกที่ตั้งสมมุติฐานเรื่องนี้ ได้แก่ Alonso (1973) แต่ตามหลักฐานความเป็นจริงภาคสนาม (A-Grivas and Harrop-Williams, 1979) แนวทางเช่นนี้ใช้ไม่ค่อยดีหรือมีผลไม่เด่นชัดในดินที่ไม่อิ่มตัวและเป็นดินตกค้างอยู่กับที่ (unsaturated and residual soil) เพราะมีผลลัพธ์ว่า ค่าโคฮีชันกับค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าสหสัมพันธ์เป็นค่าติดลบ หรือพบว่าค่ามุมเสียดทานภายในที่มีค่าระดับสูงมีความสัมพันธ์กับค่าโคฮีชันที่มีค่าระดับต่ำ

ผลงานจากทีมวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย New South Wales ประเทศออสเตรเลีย ได้ตีพิมพ์ไว้หลายบทความใน Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering (1993) พบว่าระดับขั้นของความเชื่อมั่นจะสูงขึ้น ถ้าหากใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นแทนการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด ถ้าหากกำหนดค่าของ spatial correlation ในกลุ่มข้อมูล มีสัญลักษณ์เป็น δ และค่า δ มีการเกิดสหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ในทุกทิศทาง (perfect all directions) ให้เท่ากับ 1,000 ดังนั้น ในกรณีของความลาดเอียงปกติ ค่าตัวแทนของ spatial correlation ในแนวแกน x กับแนวแกน y ได้แก่ δ_x กับ δ_y มีค่าเท่ากับ 10 ทั้งสองค่า ซึ่งข้อมูลเชิงภาคสนามที่นักวิจัยมหาวิทยาลัย New South Wales นำมาวิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ โดยใช้ค่าตัวเลขผลคูณ

ของตัวแปรในแกน x [เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าโคฮีชันมวลสารที่ปรับค่าเชิงสถิติแล้ว (c_s) กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\tan \phi$)] เทียบกับตัวแปรในแกน y ซึ่งเป็นค่าของลอการิทึมความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย

ผลลัพธ์ของการหาสหสัมพันธ์เชิงกำลังวัสดุ (รูปที่ 3.5 ข้างล่าง) ได้คัดลอกมาจากผลงานของ Mostyn and Li (1993, Figure 7 หน้า 102) ระบุว่า ถ้าหากผลคูณของค่าโคฮีชันที่ปรับค่าข้อมูลแล้ว (c_s) กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\tan \phi$) มีค่าอยู่ระหว่าง $+1$ ถึง -1 มีผลทำให้ค่าโอกาสการพังทลาย [$p(f)$] มีการลดค่าจากรดับค่าที่ 10^{-6} ไปจนถึงค่าที่ 10^{-9} หรือค่าที่ต่ำกว่านี้

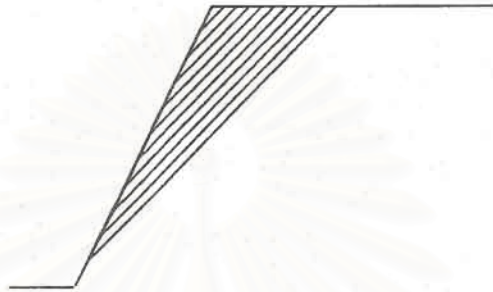
ถ้าหากเป็นกรณีอุดมคติที่สมบูรณ์แบบ ให้มีค่า spatial correlation = 1,000 อิทธิพลของสหสัมพันธ์ต่อตัวแปรเชิงกำลังวัสดุยังมีอยู่ เพียงแต่ว่ามีผลกระทบต่อค่าผลคูณระหว่างโคฮีชันกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดน้อยลง



รูปที่ 3.5 อิทธิพลของการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าโคฮีชันที่ปรับค่า (c_s) กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\tan \phi$) ต่อ ค่าโอกาสการพังทลายของมวลสาร

2. สหสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของการพังทลาย

การพังทลายของมวลสารมีผลกระทบโดยตรงต่อพื้นผิวของการพังทลาย ยกตัวอย่าง ในรูปที่ 3.6 ข้างล่าง เป็นการพังทลายแนวระนาบของความลาดเอียง ซึ่งในรูปได้แสดง การเอียงเทของระนาบไว้หลายค่าของความชัน



รูปที่ 3.6 สหสัมพันธ์ของพื้นผิวการพังทลายของระนาบต่อเสถียรภาพของความลาดเอียง

ถ้าหากความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลายในระนาบเดียว คือ 10 % ดังนั้น การพังทลายของความลาดเอียงมีโอกาสเท่ากัน คือ 10 % ซึ่งหมายความว่า การเกิด สหสัมพันธ์ต้องสมบูรณ์ ถ้าหากองค์ประกอบอันใดอันหนึ่งขาดหายไปจะมีผลทั้งระบบ อย่างไรก็ตามถ้าค่าโอกาสการพังทลายแต่ละระนาบไม่พึ่งพิงกับค่าโอกาสการพังทลายของระนาบอื่น กล่าวอีกในนัยหนึ่ง ค่าโอกาสการพังทลายทั้งหมด (overall probability of failure) เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของทุกระนาบที่ไม่เสถียร (เปลี่ยนแปลงได้) เช่นอาจมีค่าได้ตั้งแต่ 1 (หนึ่ง) ถึง $[1 - 0.1]^{10}$ ในกรณีของค่าหลังนี้ เท่ากับ 65 %

ดังนั้นความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย ได้รับอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิด สหสัมพันธ์ของฐานนิคม (mode) สำหรับการพังทลายหลายรูปแบบ ซึ่งต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเกิดสหสัมพันธ์ของตัวแปรในตัวเองภายในแฟร็กเมนต์ ได้แก่ การเกิด สหสัมพันธ์แบบ spatial correlation หรือ autocorrelation

3. สหสัมพันธ์แบบ autocorrelation

คุณสมบัติมวลสารที่เป็นดินหรือหิน มีลักษณะการเกิดสหสัมพันธ์ของตัวเองภายในแฟร็กเมนต์ ตัวอย่างเช่นค่าไคฮ์ชันของมวลดินเหนียวหนึ่กงานจุดเจาะ มีค่าเป็น c_0 จึงสันนิษฐานว่า มวลดินเหนียวชนิดเดียวกันในตำแหน่งที่ใกล้ ๆ กัน ควรจะมีค่าเท่ากับ c_0 ด้วย แบบ จำลองความน่าจะเป็นในเชิงสถิติส่วนใหญ่ มักสมมุติให้ค่าคุณสมบัติมวลสารเป็นเช่นนี้ หรือ

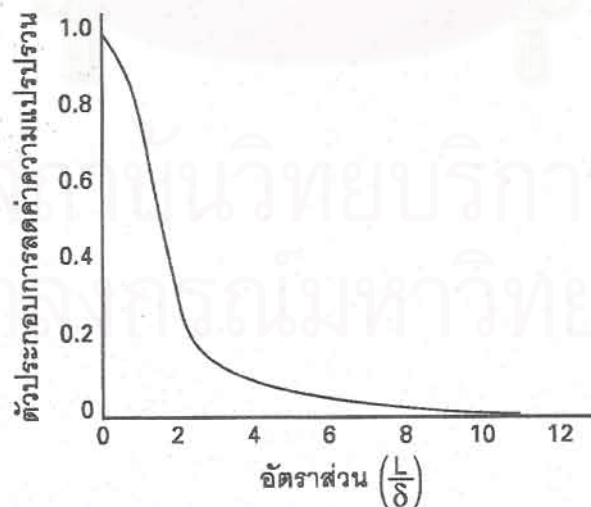
แสดงว่า แต่ละค่าคุณสมบัติมวลสารมีสหสัมพันธ์ในตัวเองอย่างสมบูรณ์ ไปจนตลอดระยะทางไม่จำกัด (infinite distance)

การวิเคราะห์ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิบของมวลดินและหิน ต้องการข้อมูลดิบมากกว่าปกติ แต่ถ้าหากผู้วิเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูล กับหาค่าความแปรปรวนของตัวแปรคุณสมบัติในมวลสารตลอดแนวตรวจวัด หรือครอบคลุมทั้งพื้นที่ หรือครอบคลุมทั้งปริมาตร Mostyn and Li (1993) ได้เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาภาคสนาม ดังนี้

ก. ถ้าหาก ปริมาตร (หรือแนวเส้น หรืออื่น ๆ) มีค่าน้อย (เล็ก) เมื่อเทียบกับระยะทางที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์ ความแปรปรวนของตัวแปรจะมีค่าเท่ากับความแปรปรวนเป็นจุด (point variance) และค่าความแปรปรวนมีค่าสูง (มาก)

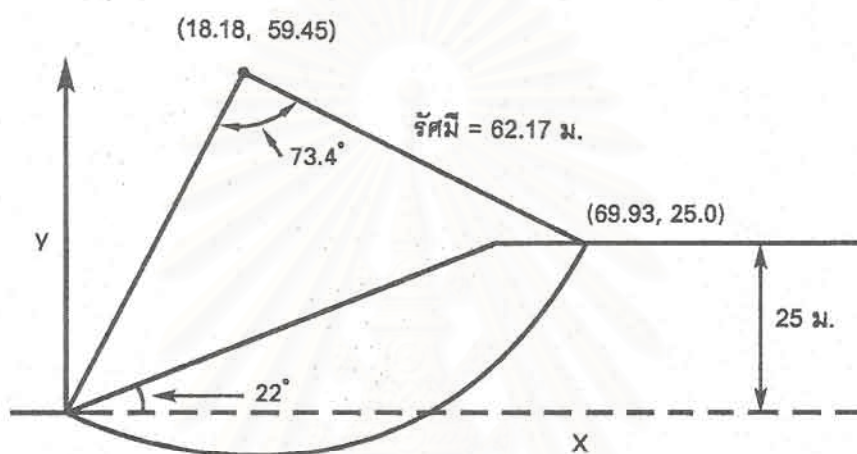
ข. ถ้าหาก ปริมาตร (หรือแนวเส้น หรืออื่น ๆ) มีค่าสูง (ใหญ่) เมื่อเทียบกับระยะทางที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์ ดังนั้นแต่ละปริมาตรที่สมมติเป็นตัวแทนจะถูกรวมเข้าไปในพิสัยตลอดปริมาตร (แนว) ของการตรวจวัด ความแปรปรวนของตัวแปรมีค่าน้อย (เล็ก) การใช้ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลดิบก็น่าจะเพียงพอ

แนวทางในการลดค่าความแปรปรวน (variance reduction) ที่ผู้วิจัยได้คัดลอกมาเป็นผลงานของที่รวบรวมมาตีพิมพ์ในหน้า 103 เอกสาร Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering (1993) จากกราฟข้างล่าง (รูปที่ 3.7) มีค่าการลดค่าความแปรปรวนไปถึง 30 % สำหรับค่าสหสัมพันธ์เป็นจุด ที่ค่า ความยาว (L) ต่อ ระยะทางของสหสัมพันธ์ในตัวมันเองภายในปริภูมิ (δ) เท่ากับ 2



รูปที่ 3.7 ผลค่าความแปรปรวนที่ลดลง เพราะมีการเพิ่มอัตราส่วนความยาวระยะทาง ต่อ ระยะทางของสหสัมพันธ์ในตัวมันเองภายในปริภูมิ

การวิเคราะห์ความลาดเอียงของมวลดิน ที่มีการระบุค่าสหสัมพันธ์ในตัวแปรภายในปริภูมิ ไว้ในเอกสารงานวิจัยหลายแห่ง ดังตัวอย่างรูป 3.8 ผลงานของ Chowdhury (1987) ได้สรุปผลกระทบของสหสัมพันธ์ในตัวมันเอง (autocorrelation) สำหรับมวลความลาดเอียงที่เป็นดินที่มีการพังทลายรูปอาร์ก ต่อความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย ถ้าหากให้ค่า δ มีค่าสูงมากถึง 10,000 ปรากฏว่ายังมีโอกาสการพังทลายที่มีค่าถึง 1.9×10^{-2}



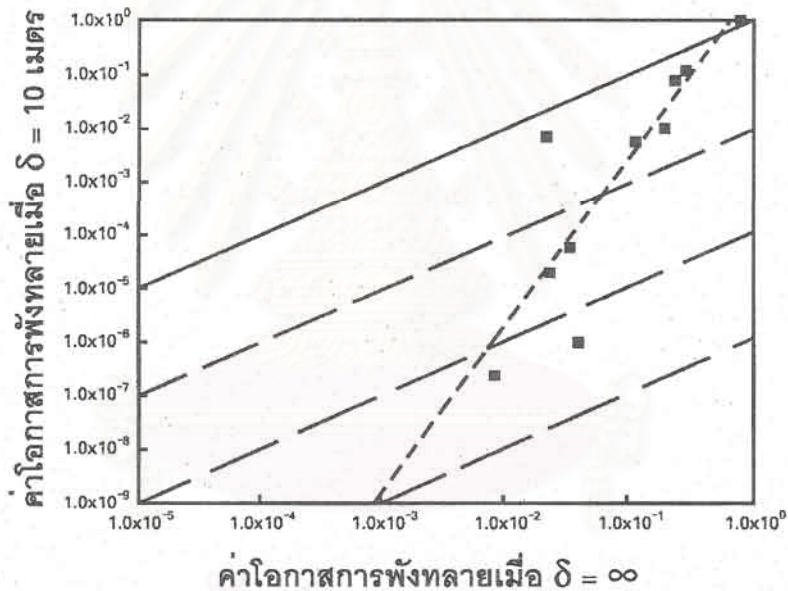
รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงจากผลงาน Chowdhury (1987)

ตารางที่ 3.1 ผลกระทบของการหาค่าสหสัมพันธ์ในตัวมันเองต่อการวิเคราะห์ค่าโอกาสการพังทลายของมวลความลาดเอียงที่เป็นดินในรูป 3.5

δ_x (ม.)	δ_x (ม.)	p (f)
10,000	10,000	1.9×10^{-2}
100	10	1.3×10^{-3}
10	10	6.6×10^{-5}
10	1	2.0×10^{-5}
1	1	8.4×10^{-6}
0.001	0.001	6.0×10^{-6}

จากการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น เมื่อกำหนดให้ $\delta_x = 10$ เมตร และมีค่า $\delta_y = 1$ เมตร ปรากฏว่าค่าโอกาสการพังทลายลดลงไปจนถึงค่าที่ 2.0×10^{-5} [ดูตารางที่ 3.1 หน้า 37 ประกอบ] ดังนั้นถ้าผู้วิเคราะห์ละเอียดเรื่องของความสัมพันธ์ในตัวเองภายในแฟร็กเมนต์ เช่น ให้ค่า $\delta_x = \infty$ (ค่าอนันต์) อาจมีผลต่อความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลายแตกต่างกันไปถึงเลขยกกำลังสามหลัก

ในการหาผลกระทบของค่าความสัมพันธ์ในตัวเอง (autocorrelation) ต่อค่าโอกาสการพังทลายของความลาดเอียง จากผลงานของ Mostyn and Soo (1992) มีการพล็อตกราฟเปรียบเทียบ ระหว่างค่าโอกาสการพังทลายที่ $\delta = \infty$ (อนันต์) กับค่าโอกาสการพังทลายที่ $\delta = 10$ เมตร ดังแสดงผลลัพธ์ ในกราฟรูปที่ 3.9 ข้างล่าง



รูปที่ 3.9 ผลกระทบของการหาค่าความสัมพันธ์ในตัวเองต่อค่าโอกาสการพังทลาย

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาค่าสัมพันธ์กับค่าโอกาสการพังทลาย สรุปได้ดังนี้

1. เส้นทึบในรูป 3.9 แสดงภาวะเท่ากัน (equality) ระหว่างการวิเคราะห์ผลค่าสัมพันธ์ที่กำหนด 2 ค่า ส่วนเส้นประเป็นผลลัพธ์ที่ได้มีการเกิดสัมพันธ์บางส่วนแบบ spatial correlation ที่ค่า $\delta = 10$ เมตร และมีโอกาสเป็นจริงมาก

2. กรณีสมมุติ ถ้าให้ค่าโอกาสการพังทลายต่ำเพียง 50 % มีผลเพียงลดค่าความแปรปรวนลง แต่ไม่มีความแตกต่างในเรื่องค่าสัมพันธ์ในตัวเองภายในแฟร็กเมนต์

3. กรณีสมมุติ ถ้าให้ค่าโอกาสการพังทลายสูงกว่า 50 % การละเลยนำค่าตัวแปรสหสัมพันธ์ในควมมันเองมาใช้ในการคำนวณเป็นสิ่งที่ไม่เสี่ยงเกินไป เพราะการที่มีค่าโอกาสการพังทลายสูง แสดงว่าในระบบเสถียรภาพของมวลสารมีปัญหามาก

4. ในขณะที่ค่าโอกาสการพังทลายลดลงจากระดับ 50 % อัตราส่วน ระหว่างค่า $p(f)$ ทั้งสองแกนลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว จนถึงค่าที่ $p(f) = 10^{-5}$ เมื่อกำหนดให้ δ เป็นค่าอนันต์ ซึ่งมีค่าโอกาสการพังทลาย เท่ากับ 1 %

5. เส้นตรงที่ประมาณค่าได้เหมาะสมที่สุด (best fit) สำหรับค่าข้อมูลลอการิทึม ได้แสดงไว้เป็นเส้นประขวางเส้นหนึ่งในรูป 3.9 เมื่อวิเคราะห์ค่าที่เป็นจริง เช่นที่ค่าโอกาสการพังทลายสำหรับสหสัมพันธ์ที่ค่าอนันต์ มีค่า $p(f)$ เป็น 10 หรือ 0.1 % มีความแตกต่างของผลลัพธ์เป็นเลขยกกำลังสองจนถึงเลขยกกำลังหก ซึ่งเป็นข้อดีอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น

6. การวิเคราะห์ผลเชิงอนุรักษ์ ไม่ควรนำค่าผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ แต่ควรใช้ค่าผลลัพธ์โอกาสความน่าจะเป็น ในลักษณะของดัชนีชี้นำของระบบ

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ กับงานขุดเจาะบนพื้นผิวดิน

การศึกษาเสถียรภาพของพื้นลาดเอียง ไหล่ทาง หรือการทรงตัวของมวลสารก่อนเกิดการพังทลายเป็นสิ่งที่วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความมั่นใจว่า โครงสร้างเหล่านั้น เช่น ความลาดเอียงหน้าเหมือง ไหล่ทางถนน หรือคันทางเขื่อน มีเสถียรภาพและปลอดภัย ไม่เกิดการพังทลายระหว่างใช้งาน ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง คงทนใช้งานได้นาน

4.1 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับการขุดเจาะความลาดเอียง

โครงสร้างสิ่งก่อสร้างที่พบเห็นในชีวิตประจำวัน ที่เป็นความลาดเอียงหรือความลาดชันของมวลสาร ได้แก่ ความลาดของหน้างานดินหรือหน้างานเหมืองหิน ความลาดของดินไหล่ทางถนน ความลาดของคันทางเขื่อนดินหรือเขื่อนหินทิ้ง เป็นต้น การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับมวลที่มีความลาดเอียงหรือความลาดชันเหล่านี้ใช้หลักการเดียวกัน

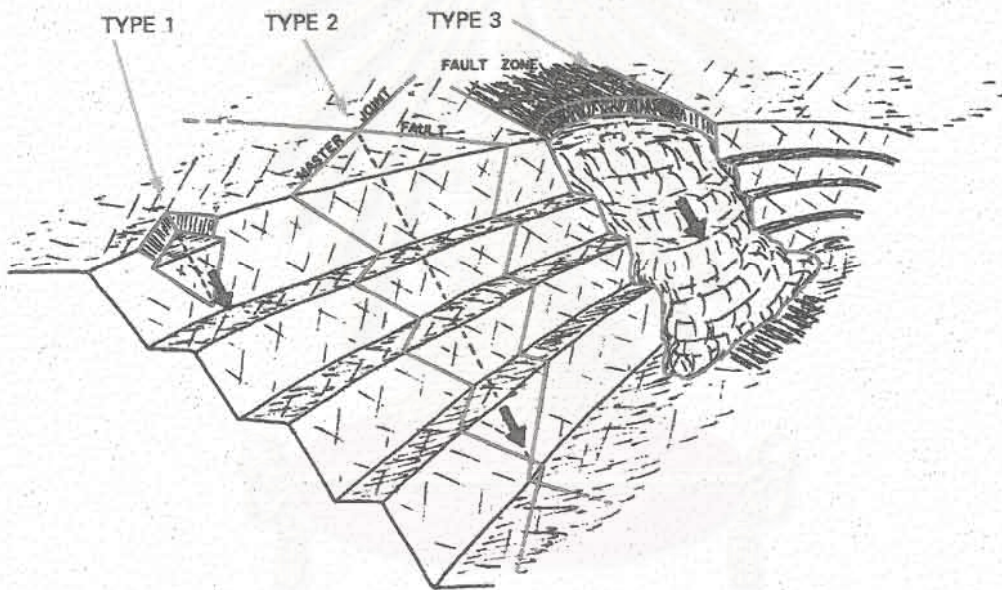
4.1.1 รูปแบบการพังทลายที่พบบ่อยในการตัดความลาดชันแน่นไค

เนื่องจากหัวข้อวิจัยเกี่ยวข้องกับการศึกษาความเสี่ยงของการขุดเจาะกับความเชื่อถือได้ของการขุดเจาะ การวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงของมวลสารจึงเน้นไปในทำนองเดียวกันที่กล่าวมาในบทก่อนหน้านี้ และการประเมินเสถียรภาพก็ใช้ความสมดุลเชิงขีดจำกัด (limit equilibrium) เป็นแนวทางเบื้องต้นก่อนจะนำไปสู่การหาความน่าจะเป็นเชิงสถิติ แต่จะแยกวิเคราะห์ตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงและความชนิดรูปแบบการพังทลายที่พบบ่อยในมวลสารหน้างานขุดเจาะ

การวิเคราะห์ความลาดเอียงที่เป็นมวลดินและมวลหิน ปกติจะแบ่งตามลักษณะของรูปร่างหรือพื้นผิวการพังทลาย ได้ดังนี้

- ก. การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับมวลการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น
- ข. การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับมวลการพังทลายบนระนาบรูปอาร์ก
- ค. การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับมวลการพังทลายรูปลิ้ม

จากรูปแบบการพังทลายที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายรูปแบบ แนวทิศทางเปราะบางที่เป็นต้นเหตุให้มีการพังทลายนี้ มักมีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่นเรียกเป็น "weak zone" หรือเรียกเป็น "daylight" แนวทิศทางเหล่านี้ อาจเป็นระนาบของรอยแตกแยกเกิดขึ้นในความลาดเอียง เช่น ระนาบรอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding plane) รอยแตกแยกตามธรรมชาติ (joint) รอยเลื่อน (fault) เป็นต้น โอกาสที่จะเกิดการพังทลายตามระนาบความไม่ต่อเนื่องในมวลหินเหล่านี้มีความเป็นไปได้สูง หรือบางทีระนาบความไม่ต่อเนื่องตั้งแต่ 2 ระนาบตัดกัน ทำให้มวลหินมีการไถลเลื่อนตามแนวเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน (line of intersection) ภาพสเก็ชข้างล่าง เป็นการพังทลายที่พบบ่อยในเหมืองเปิดแบบขั้นบันได หรือตามแนวตัดไหล่ทางความลาดทำถนน มี 3 รูปแบบ



รูปที่ 4.1 รูปแบบการพังทลายที่เกิดบ่อยในการเปิดหน้าเหมืองแบบขั้นบันได ที่พบบ่อยมี 3 รูปแบบ เกิดได้ทั้งบนตะพักเดี่ยวหรือบนหลายตะพัก

ลักษณะเฉพาะของการพังทลายที่พบบ่อย มีดังนี้

1) การพังทลายเฉพาะที่ ลักษณะของการพังทลายมักเกิดเฉพาะในการตัดตะพักขั้นบันได (bench) เดี่ยว ใช้ชื่อเรียกเป็น Type I การพังทลายอาจเกิดจากระนาบเปราะบางระนาบเดียว เช่น single joint plane หรือหลายระนาบรวมกัน (joint plane and tension crack) เมื่อมีแรงหรือโมเมนต์ที่เกิดจากมวลสารบนระนาบ

เพราะบางที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลสูงกว่าแรงหรือโมเมนต์ที่ต้านการเลื่อนไถล ทำให้เกิดความไม่สมดุลและเกิดการพังทลายเฉพาะที่ กรณีที่เกิดการพังทลายบนพื้นผิวระนาบเชิงเส้น เรียกว่า plane failure แต่ถ้าเกิดการพังทลายบนพื้นผิวระนาบเชิงวงกลม เรียกว่า circular failure หรือถ้าเกิดการพังทลายตามแนวเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกันก็ได้มวลสารที่เกิดการพังทลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม เรียกว่า wedge failure

2) การพังทลายขนาดใหญ่ ลักษณะของการพังทลายมักเกิดจากผลของระนาบความไม่ต่อเนื่องที่ตัดผ่านชั้นชั้นดินได้หลายตะพัก (Type II) และในสภาวะที่เหมาะสมแนวระนาบของความไม่ต่อเนื่องที่มีตั้งแต่ 1 แนวขึ้นไปตัดกันเข้าไปมวลดินหน้างานขุดเจาะทำให้มวลดินมีโอกาสเกิดการพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยม โดยเลื่อนไถลตามเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน ปกติการพังทลายขนาดใหญ่ มักตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ผลไมเอริเวทที่ครอบคลุมพื้นที่ค่อนข้างกว้างขวาง ทั้งนี้ในการตรวจสอบเฉพาะแหล่งไม่สามารถสังเกตได้ง่ายนัก

3) การพังทลายตามโซนเปราะบาง ลักษณะของการพังทลายมักเกิดตามแนวโซนที่มีเสถียรภาพต่ำ (Type III) เช่น แนวรอยเลื่อน แนวเปราะบางที่เป็นรอยแตกแยกชั้นดินที่มีการพุ่งสูง หรือแนวรอยร้าวด้านหลังเหมืองเปิดที่เป็นผลจากการระเบิดหินหน้างานไม่ดี การพังทลายแบบนี้เกิดบ่อยภายหลังที่เกิดฝนตกหนัก ระดับน้ำใต้ดินสูง มวลดินอึดตัวเลื่อนไถลได้ง่าย

4.1.2 ตัวแปรหลักที่ใช้หาผลลัพธ์ในการเกิดการพังทลาย

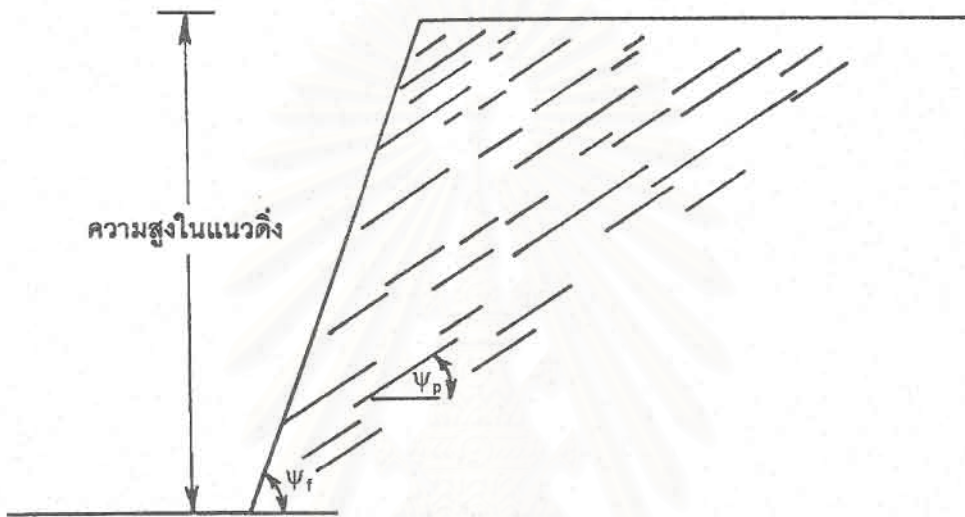
การหาความเชื่อถือได้สำหรับมวลความลาดเอียงที่มีระนาบการพังทลายหลายรูปแบบจำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรหลัก ที่มีส่วนสูงที่สุดที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ที่ตัวแปรหลักแบบ "daylight" หากตัวแปรหลักที่ก่อให้เกิดผลลัพธ์การพังทลายนี้มีความเชื่อถือได้ว่าจะไม่มีผลกระทบต่อ การพังทลาย แสดงว่าสิ่งก่อสร้างที่เป็นงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินนี้มีความมั่นคง เสถียรภาพสูง ความเสี่ยงการใช้งานมีน้อย

4.2 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับมวลการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น

ความลาดเอียงที่มีมวลการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น ได้แก่ ความลาดเอียงที่มีระนาบการพังทลายระนาบเดียว และรูปแบบเชิงเรขาคณิต ก็อาจเป็นมวลสารความลาดที่วางตัวบนระนาบที่จำกัด (หรือยาวมาก) นอกจากนี้ก็อาจเป็นมวลความลาดเอียงที่ถูกแนวรอยแตกแยก (ซึ่งอาจมากกว่า 1 ระนาบ) ที่ขนานเป็นแนวเดียวกับตัดผ่าน

4.2.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงแบบง่าย

ความลาดเอียงที่มีระนาบของการพังทลายขนานกันในแนวเคียว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ข้างล่าง ซึ่งระนาบเปราะบางนี้อาจรองรับมวลดินหรือมวลหินที่ใช้การวิเคราะห์ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 4.2 ความลาดเอียงแบบง่ายที่มีแนวเปราะบางอยู่ในทิศทางที่ขนานกัน

4.2.2 ตัวแปรที่สำคัญและการวิเคราะห์เสถียรภาพเบื้องต้น

สิ่งที่เป็นตัวแปรที่สำคัญใช้เป็นเกณฑ์ในการหาโอกาสของการพังทลาย ได้แก่

- ก. ขนาดมิติของความลาดเอียง เช่นมุมเอียงเท ความสูงในแนวตั้ง เป็นต้น
- ข. ข้อมูลดินเกี่ยวกับแวมุมเอียงเทและทิศทางระนาบเปราะบางที่เป็นรอยแตกแยกที่ก่อให้เกิดการพังทลาย กับค่ามุมเสียดทานของระนาบเปราะบาง
- ค. ค่าคุณสมบัติของมวลสาร เช่นค่าไคฮีสชัน ค่ามุมเสียดทานภายใน ค่าหน่วยน้ำหนักมวลสาร

เมื่อแทนค่าข้อมูลดินภาคสนาม กับค่าคุณสมบัติที่เป็นค่าตัวแทน (representative values) สำหรับค่าตัวเลขคุณสมบัติในสมการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงจลน์จลจกจำกัด (FS) เมื่อเกิดการพังทลายในแนวระนาบ นั่นคือ

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (4.1)$$

ค่า c เป็นค่าโคฮีชัน A เป็นพื้นที่ของมวลสารที่สัมผัสกับระนาบของการพังทลาย W เป็นน้ำหนักของมวลสารบนระนาบ U เป็นแรงคั้นน้ำหนักบนระนาบ V เป็นค่าแรงคั้นน้ำในรอยแตกจากแรงคั้น (ถ้ามีปรากฏบนมวลสาร) ค่า ψ_f เป็นมุมเอียงของความลาดเอียง กับค่า ψ_p เป็นมุมเอียงเทระนาบเปราะบางหรือระนาบรอยแตกแยก

4.2.3 การจัดกลุ่มตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่า

ตัวแปรหลักในการพังทลายบนระนาบเชิงเส้นถูกจัดให้อยู่ในหมวดหมู่ใหม่เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงสถิติในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกลุ่มเดียวกันได้

1. กลุ่มตัวแปรขนาดมิติเชิงเรขาคณิต

จากรูปที่ 4.2 หน้า 53 ขนาดมิติเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียง มีจำนวน 6 ตัวแปร และแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ตัวแปรที่เป็นกลุ่มย่อยแรกเป็นตัวแปรเชิงกำหนด (deterministic variables) ได้แก่ ความสูงของความลาดเอียง มุมเอียงเทของความลาด และมุมเอียงเทของระนาบรอยแตกแยก

ตัวแปรที่เป็นกลุ่มย่อยที่สองเป็นตัวแปรเชิงสุ่ม (stochastic variables) ซึ่งได้แก่ ค่าเฉลี่ยความยาวของระนาบรอยแตกแยก (mean joint length, JL_{ave}) ค่าเฉลี่ยความยาวของช่วงรอยต่อ (mean rock bridge length RBL_{ave}) ของรอยแตกแยก และค่าระยะห่างเฉลี่ยระนาบรอยแตกแยก (mean joint spacing, JS_{ave}) ถ้าหากทราบค่าตัวแปรสุ่ม 2 ค่า คือ JL_{ave} กับ RBL_{ave} ก็สามารถหาค่าความต่อเนื่องระนาบรอยแตกแยก (mean joint plane persistence, JPP_{ave}) ตามสูตรเชิงประสพการณ์ที่เสนอแนะใน U.S.Bureau of Mines: Open File Report, No. 46 (3) - 81 หน้า 188 ที่ผู้วิจัยได้คัดลอกมาอีกดังนี้

$$JPP_{ave} = \frac{JL_{ave}}{[JL_{ave} + RBL_{ave}]} \quad (4.2)$$

จากสมการข้างบน ค่าความยาวของช่วงต่อรอยแตกแยก (RBL) กับค่าความยาวของรอยแตกแยก (JL) มักจะสมมุติให้มีการแจกแจงค่าแบบเลขชี้กำลัง (exponential distribution)

ส่วนค่าระยะห่างรอยแตกแยก (JS) ก็สมมุติให้มีการแจกแจงค่าแบบเลขชี้กำลังเช่นเดียวกัน ดังนั้นถ้าให้พจน์ JI_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มหรือความหนาแน่นของจำนวนรอยแตกแยก (mean joint intensity) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

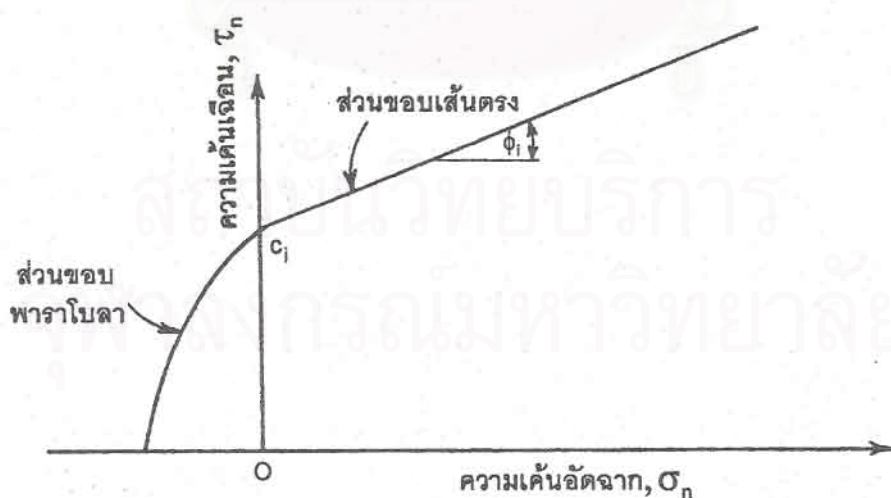
$$JI_{ave} = \frac{JPP_{ave}}{JS_{ave}} \quad (4.3)$$

2. กลุ่มตัวแปรเชิงกำลังวัสดุ

ตัวแปรในกลุ่มนี้ มี 5 ตัวแปร ได้แก่

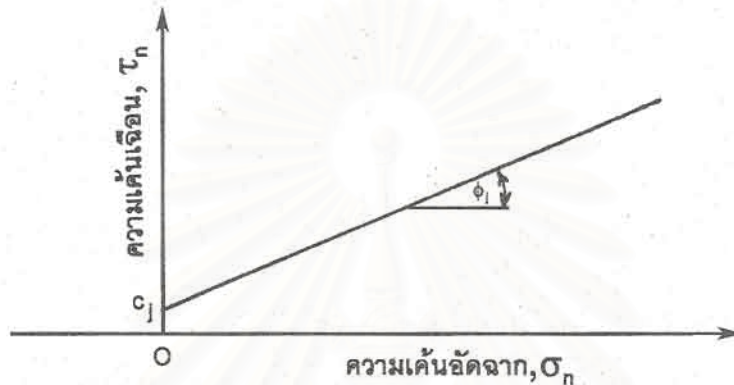
- ก. ค่าโคฮีชันที่ทดสอบจากแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ หรือเรียกว่า intact cohesion (c_i)
- ข. ค่ามุมเสียดทานภายในที่ทดสอบจากแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ หรือเรียกว่า intact friction angle (ϕ_i)
- ค. ค่าโคฮีชันของระนาบรอยแตกแยก (joint cohesion, c_j)
- ง. ค่ามุมเสียดทานของระนาบรอยแตกแยก (joint friction angle, ϕ_j)
- จ. ค่ามุมเสียดทานภายในสูงสุดของมวลสาร (ultimate internal friction angle of mass, ϕ_{ult})

ตัวแปร 5 ตัวแปรข้างบน ค่า c_i กับค่า ϕ_j เป็นค่าที่สำคัญที่สุด ตามปกติจากเส้นขอบการพังทลาย (failure envelope) สำหรับมวลสาร ค่าโคฮีชันที่ทดสอบจากแท่งตัวอย่าง (c_i) เป็นค่าที่หาจากจุดตัดบนแกน y ระหว่างส่วนที่เป็นเส้นตรง (แกน x เป็นค่าความเค้นอัดฉาก) กับส่วนเส้นโค้งพาราโบลา (แกน y เป็นค่าความเค้นเฉือน) ดังรูปที่ 4.3 และยังคงสมมุติให้ค่า $c_i = 2$ เท่าของค่ากำลังวัสดุซึ่งที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่าง



รูปที่ 4.3 ภาพสเก็ทเส้นขอบของการพังทลายสำหรับมวลสารที่แมงออก เป็นส่วนขอบเส้นโค้งพาราโบลา กับส่วนขอบที่เป็นเส้นตรง

สมมุติฐาน สำหรับกรณีค่าไคซีชันกับค่ามุมเสียดทานภายในของระนาบรอยแตกแยก กำหนดให้เส้นขอบการพังทลายเป็นเส้นตรง (ดูรูปที่ 4.4) ถ้าหากรอยแตกแยกมีผิงดินหรือผิงหินนุ่มๆ ทำให้ความเสียดทานลดลงมาก อาจสมมุติให้ $c_j = 0$ (ศูนย์) สำหรับค่าความเสียดทานสูงสุด เป็นค่าที่เป็นเกณฑ์ที่สูงมาก มักกำหนดให้ ϕ_{ult} มีค่าอยู่ประมาณ $50-60^\circ$ ซึ่งไม่พบในหินปกติทั่วไป ค่าปกติของ ϕ_{ult} ที่ใช้เท่ากับ 30°



รูปที่ 4.4 ภาพสเก็ทซ์เส้นขอบของการพังทลายสำหรับระนาบรอยแตกแยก

3. กลุ่มตัวแปรอื่น ๆ

กลุ่มตัวแปรนี้ มีค่าได้หลายอย่าง และค่อนข้างมีค่าแปรปรวนมากในมวลสารที่เป็นดิน แต่ในมวลสารที่เป็นหินค่าที่ทดสอบได้มักจะใกล้เคียงกันในชนิดเดียวกัน ในการคำนวณเสถียรภาพตัวแปรที่จำเป็นมาก ได้แก่ ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลสาร (γ) บางทีถ้ามวลสารนั้นเป็นหินแข็งจะใช้สัญลักษณ์ให้แตกต่างไปจากปกติ โดยเขียนสัญลักษณ์ เป็น γ_R

4.2.4 สูตรเชิงประสมการณ์ในการหาโอกาสการพังทลาย

ในธรรมชาติ โอกาสการพังทลายของความลาดเอียงเป็นฟังก์ชันกับปริมาตรของมวลสารบนระนาบ ดังนั้นถ้าหากมุมเอียงของความลาดเอียงมาก ยังมีโอกาสการพังทลายสูง ถ้าหากให้โอกาสการพังทลายเกิดขึ้นเมื่อค่าขอบความปลอดภัยน้อยกว่าศูนย์ หรือเขียนเป็นสมการในรูปแบบของแรงที่กระทำบนมวลสาร

$$Z = R - Q = R - W \sin \psi_p \quad (4.4)$$

แรงที่มีความต้านทานการพังทลาย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ความต้านทานของมวลในส่วนเป็นช่วงรอยต่อ (R_{RBL}) กับความต้านทานของมวลในผิวสัมผัสในรอยแตกแยก (R_{JL}) นั่นคือ

$$R = R_{RBL} + R_{JL} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 กำหนดพจน์ใหม่ ให้ $R_{RBL} = R_r$ และให้ $R_{JL} = R_j$

$$R = R_r + R_j \quad (4.6)$$

คามปกติการเคลื่อนตัวของมวลสารบนระนาบ จะเริ่มเปลี่ยนแปลงสภาวะจากจุดเปลี่ยนของมุมลาดเอียงหรือมุมเอียงเท เริ่มจากช่วงมุมเอียงระนาบมีค่าต่ำ (low dip angle) จนถึงช่วงมุมเอียงระนาบมีค่าสูง (high dip angle) จะเขียนความสัมพันธ์ใหม่เพื่อหาค่าความต้านทานทั้งหมดสำหรับมวลหินที่อยู่ในช่วงค่อ (rock bridge) ที่ไม่มีรอยแตกแยกในมวลสาร คือ

$$R_r = R_{rL} + R_{rH} = T_s [d_L + d_H] \quad (4.7)$$

กำหนดให้พจน์ตัวแปรในสมการที่ 4.7 มีความหมายดังนี้

- R_r = ความต้านทานทั้งหมดของมวลสารที่เป็นช่วงรอยค่อ
- R_{rL} = ความต้านทานมวลสารช่วงรอยค่อ เมื่อมีมุมเอียงเทต่ำ
- R_{rH} = ความต้านทานมวลสารช่วงรอยค่อ เมื่อมีมุมเอียงเทสูง
- T_s = ค่ากำลังวัสดุตั้งที่ได้จากการทดสอบจากแท่งตัวอย่าง
- d_L = พจน์ที่ใช้แทนค่ามิติเชิงเรขาคณิต สำหรับมุมเอียงเทต่ำ (ไม่พึ่งพิงกับค่าโคฮีชันและค่ามุมเสียดทาน)
- d_H = พจน์ที่ใช้แทนค่ามิติเชิงเรขาคณิต สำหรับมุมเอียงเทสูง

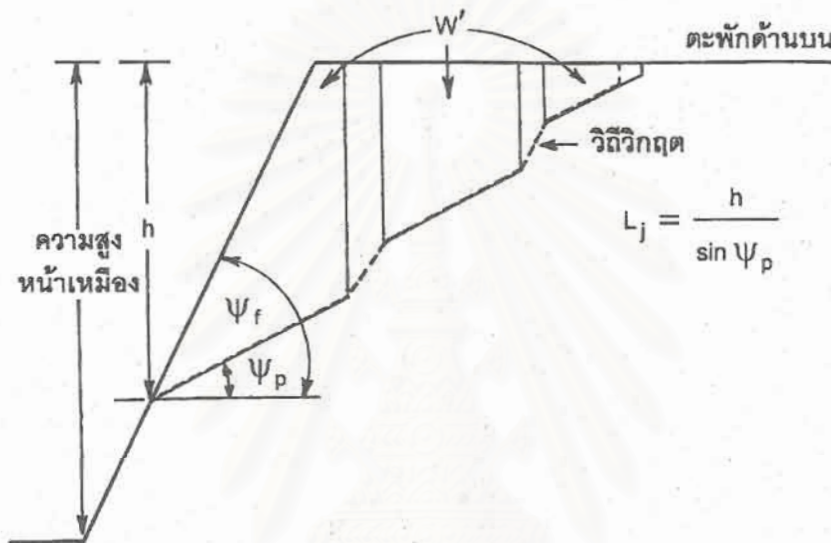
สมการที่ 4.7 ถ้าหากจะเขียนให้ง่ายขึ้น สมมติให้ d_e เป็นพจน์ที่แทนค่าของความยาวสมมูล (equivalent length) ซึ่งไม่พึ่งพิงกับค่าโคฮีชันหรือค่าความเสียดทาน

$$R_r = T_s [d_L + d_H] = T_s (d_e) \quad (4.8)$$

กรณีที่จะหาค่าความสัมพันธ์ของความต้านทานในรอยแตกแยก (R_j) หาได้จากสมการที่ 4.9 หน้าถัดไป (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบด้วย)

$$R_j = W' [\cos (\Psi_p)_{ave}] \tan \phi_j \quad (4.9)$$

พจน์ W' ในสมการที่ 4.9 เป็นน้ำหนักประสิทธิผลที่มวลสารวางตัวบนระนาบรอยแตกแยก ส่วน ϕ_j เป็นมุมเสียดทานภายในของรอยแตกแยก และมุม $(\Psi_p)_{ave}$ เป็นค่าเฉลี่ยของระนาบเอียงเทหลายระนาบ หรือบางทีก็ใช้ค่า overall inclined angle ของการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น



รูปที่ 4.5 ระนาบการพังทลายที่เกิดจากรอยแตกแยกในมวลสาร การพังทลายเกิดตามแนวเชื่อมรอยต่อระหว่างระนาบ

จากสมการที่ 4.4 ถึงสมการที่ 4.9 หากความสัมพันธ์ของค่าขอบความปลอดภัยได้

$$Z = T_s d_e + W' [\cos (\Psi_p)_{ave} \tan \phi_j] - W [\sin (\Psi_p)_{ave}] \quad (4.10)$$

ถ้าต้องการหาค่า หน่วยของขอบความปลอดภัย (unit safety margin, UZ) ก็หาค่าความยาวเฉลี่ยของรอยแตกแยก $(L_j)_{ave}$ จากความสัมพันธ์ข้างล่าง

$$UZ = \frac{Z}{[(L_j)_{ave}]} = \frac{Z [\sin (\Psi_p)_{ave}]}{h} \quad (4.11)$$

พจน์ h เป็นความสูงในแนวตั้งของระนาบการพังทลาย (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

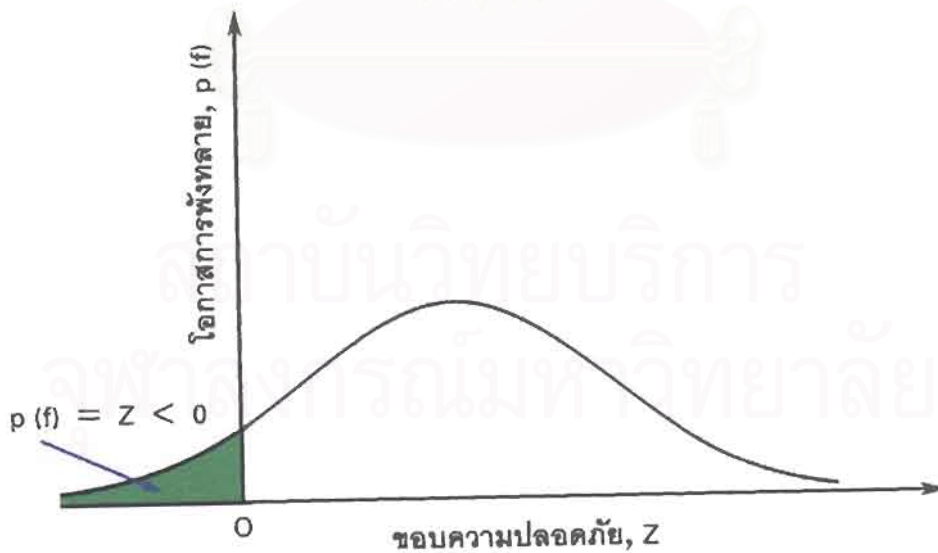
การที่หาสูตรเชิงประสมการณ์ของ Z (ขอบความปลอดภัย) และ UZ (หน่วยของขอบความปลอดภัย) ก็เพื่อต้องการหาแนวของทิศทางการพังทลายตามระนาบ (failure plane) ซึ่งในความหมายทางสถิติแนวทิศทางการพังทลายตามระนาบ (failure plane) นั้นเอง สิ่งที่ทำหน้าที่วิเคราะห์ให้มีความสนใจก็เป็นเรื่องวิธีวิกฤตเท่านั้น แนววิธีอื่นจะไม่ให้ความสนใจ

Einstein et al. (1979) ได้หาโอกาสความเสี่ยงของการพังทลายตามระนาบ โดยทำการหาอนุพันธ์ของนิพจน์ในสมการที่ 4.11 ได้ผลลัพธ์เป็น

$$\frac{d\{UZ(h)_{ave}\}}{dh} = A \tan \phi_j - B \sin (\Psi_p)_{ave} \quad (4.12)$$

สมการที่ 4.12 นี้แสดงว่า ค่าความปลอดภัยขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่กี่ตัวแปร กำหนดให้ค่าคงที่ A เป็นค่าความลาดเอียงของ $\frac{(W')_{ave} \cos (\Psi_p)_{ave}}{L_j}$ ที่ขึ้นกับค่า h (ความสูงหรือความลึก)

ส่วนค่าคงที่ B เป็นค่าความลาดเอียงของ $\frac{(W)_{ave}}{L_j}$ ที่ขึ้นกับค่า h



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอกาสการพังทลาย $[p(f)]$ กับการแจกแจงค่าขอบความปลอดภัย (Z)

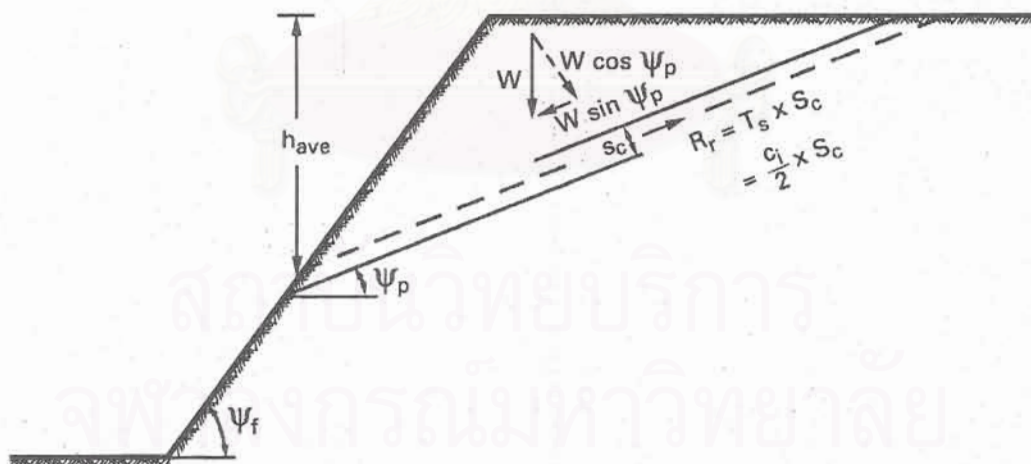
เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการ 4.12 แสดงว่า ส่วนประกอบเชิงเรขาคณิต (geometric component) 3 ค่าตัวแปร $\left[\left\{ \frac{(d_e)_{ave}}{L_j} \right\}, A, B \right]$ ถูกแยกออกจาก ส่วนประกอบเชิงกำลังวัสดุ (strength component) 2 ค่าตัวแปร $[c_i, \phi_j]$

ในการหาความน่าจะเป็นของการพังทลาย (ดูรูปที่ 4.6) หากจากการกำหนดช่วงไว้ดังนี้

$$p(f) = \% Z < 0 \quad (4.13)$$

4.2.5 ตัวแปรวิกฤตก่อนมีการพังทลายแนวระนาบ

ในมวลที่เป็นหิน ระบายของรอยแตกแยกในธรรมชาติ (เช่น joint, fracture, weak plane) เป็นมิติเชิงเรขาคณิตที่สำคัญที่มีผลต่อการพังทลาย ก่อนที่มวลบนระนาบเชิงเส้นจะเริ่มมีการเคลื่อนที่ ระบายของแตกแยกที่สัมผัสระหว่างมวลหินกับระนาบเปราะบางที่ก่อให้เกิดการพังทลายมีการแยกห่างออกจากกัน (separation) ตัวแปรวิกฤตที่ต้องนำมาวิเคราะห์ด้วยคือ ระยะห่างวิกฤตของระนาบรอยแตกแยก (critical joint separation) ใช้สัญกรณ์เป็น S_c



รูปที่ 4.7 สมมุติฐานรูปแบบการพังทลายแนวระนาบ ที่ใช้หาค่าระยะห่างวิกฤตระหว่างระนาบรอยแตกแยก ในรูปกำหนดให้มีรอยแตกแยก 2 แนว แต่ไม่ต่อเนื่องตลอดแนววิกฤตมีระยะห่างเท่ากับ S_c และความสูงในแนวตั้งของระนาบวิกฤตที่ก่อให้เกิดการพังทลายใช้ค่าความเฉลี่ย

ในเชิงสถิติของความน่าจะเป็น ค่าของ S_c เท่ากับค่าของ Z (ขอบความปลอดภัย) จากรูปที่ 4.7 หน้า 60 เมื่อกำหนดให้ $Z = 0$ สามารถหาความสัมพันธ์ คือ

$$Z = 0 = R_r + R_j - DF \quad (4.14)$$

พจน์ R_r กับ R_j เป็นความต้านทานในช่วงรอยต่อ กับความต้านทานที่ผิวสัมผัสของรอยแตกแยก ตามลำดับ ส่วนพจน์ DF เป็นค่าเวกเตอร์แรงที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.7 แทนค่าของตัวแปรต่าง ๆ ลงไป ทั้งค่าโคฮีชันที่ผิวสัมผัส (c_i) ค่ามุมเสียดทานระนาบรอยแตกแยก (ϕ_j) หน่วยน้ำหนักหิน (γ_r) ตลอดจนค่าความสูงเฉลี่ย (h_{ave}) กับค่ามุมเอียงเทของระนาบกับความลาดชัน (มุม ψ_p กับมุม ψ_f) ได้นิพจน์ในรูปแบบใหม่ที่ใช้หาค่าระยะห่างวิกฤตของระนาบรอยแตกแยก ดังนี้

$$S_c = \frac{\gamma_R (h_{ave})^2 \left(\frac{1}{\tan \psi_p} - \frac{1}{\tan \psi_f} \right) (\sin \psi_p - \cos \psi_p \tan \phi_j)}{c_i} \quad (4.15)$$

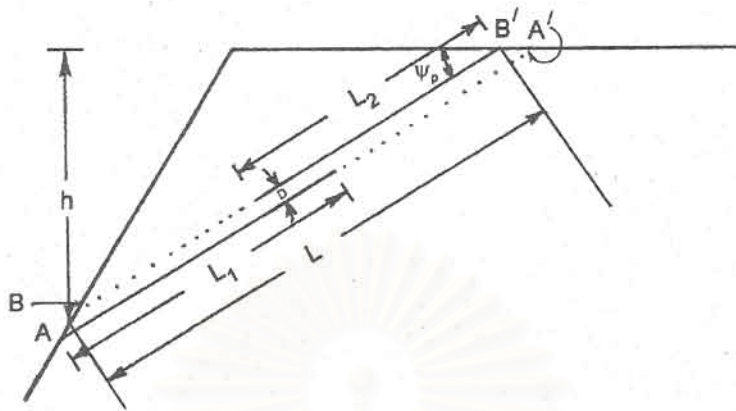
พจน์ S_c เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงเรขาคณิต [ได้แก่ค่า ψ_p, ψ_f, h_{ave}] และยังเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงกำลังวัสดุ [ได้แก่ค่า ϕ_j, c_i] ถ้าหากค่านี้เท่ากับศูนย์ หมายถึงระนาบการพังทลายต่อเนื่องเป็นระนาบเดียว มักเกิดเฉพาะในมวลหินแข็งที่มีการตัดความลาดเป็นมุมชันมาก ปกติค่า S_c จึงเป็นค่าขอบต่ำของโอกาสการพังทลายที่ขึ้นกับค่าความสูงในแนวตั้ง หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ [$p(f)h$] อนุโลมให้ h ประมาณค่าเท่ากับค่า h_{ave} ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย

4.2.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าโอกาสการพังทลายแบบระนาบ

ตัวอย่างการวิเคราะห์นี้ เป็นการหาโอกาสการพังทลายของมวลบนระนาบที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับค่าของความสูงในแนวตั้ง (หรือความลึก) นั่นคือ [$p(f)h$] ที่เป็นผลจาก 3 ตัวแปรหลัก [ค่าโคฮีชัน ค่าระยะห่างรอยแตกแยก ค่าความยาวรอยแตกแยก]

1. สมการผลเฉลยเชิงความน่าจะเป็นของการพังทลายแบบระนาบ

การเริ่มต้นของการหาผลเฉลยในรูปแบบปิด (closed form solution) ให้ทำการสมมติรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียง ดังรูปที่ 4.8 หน้าถัดไป และให้การพังทลายอยู่ในระนาบของรอยแตกแยก (joint)



รูปที่ 4.8 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีการพังทลายตามแนวระนาบ การหาผลเฉลยเป็นรูปแบบบิดที่หาขอบเขตล่างของโอกาสการพังทลาย

สมมติฐานในการใช้ผลเฉลยนี้ คือ

1. ระนาบรอยแตกแยก AA' (ในรูปที่ 4.8) มีความต่อเนื่อง 100% หรือระยะของ $L_1 \geq L$ (ระยะ L วัดจากจุดตัดที่ความลาดส่วนล่างถึงจุดตัดที่ความลาดส่วนบน)
2. รอยแตกแยก AA' ไม่ใช่เป็นรอยแตกแยกสมบูรณ์ตลอดแนว (completely jointed) ส่วนรอยแตกแยก BB' เป็นรอยแตกแยกสมบูรณ์ตลอดแนว
3. ค่าระยะ D ในรูปเป็นช่วงห่างในแนวตั้งฉากระหว่างระนาบรอยแตกแยก AA' กับรอยแตกแยก BB' หรือกำหนดให้ $D \leq S_c$ (critical separation = ระยะห่างวิกฤต)
4. ที่จุด A และจุด B เป็นจุดที่มีรอยแตกแยก (joint) แต่เส้นแนวระนาบ AA' กับ BB' เป็นแนวที่มีรอยแตกแยกบางส่วน (partially joint)

นั่นคือ $L_1 + L_2 \geq L$ และค่า $D < S_c$

จากสมมติฐานทั้ง 4 ข้อ ทำให้หาโอกาสการพังทลายผ่านจุด A ค่าโอกาสการพังทลายที่จุด A, $[p(f)A]$ มีขอบเขตล่าง (lower bound) ความน่าจะเป็น ดังนี้

$$[p(f)A] = P_1 + P_2 + P_3 = P_c \quad (4.16)$$

พจน์ตัวแปรในสมการที่ 4.16 มีความหมายและความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_1 &= p \text{ [AA' มีความต่อเนื่อง (continuous) 100%]} \\
 P_2 &= p \text{ [AA' ไม่มีความต่อเนื่อง 100%, BB' มีความต่อเนื่อง 100%,} \\
 &\quad D \leq S_c] \\
 P_3 &= p \text{ [A และ B มีรอยแตกแยก (joint), AA' และ BB' ไม่มี} \\
 &\quad \text{ความต่อเนื่อง 100%, } (L_1 + L_2) \geq L; D < S_c]
 \end{aligned}$$

ในเหตุการณ์ (event) ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 โอกาส ไม่เกิดพร้อม (mutually exclusive) หาค่าผลเฉลยสำหรับแต่ละเหตุการณ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_1 &= [(\text{JL}_{\text{ave}}) / \{(\text{JL}_{\text{ave}}) + (\text{Rr}_{\text{ave}})\}] e^{-L(\text{JL}_{\text{ave}})^{-1}} \quad (4.17) \\
 &= \{(\text{JPP})_{\text{ave}}\} \times e^{-L(\text{JL}_{\text{ave}})^{-1}}
 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 4.8 หน้า 62 ได้ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต $L = \frac{h}{\sin \psi_p}$

$$P_1 = \{(\text{JPP})_{\text{ave}}\} \times e^{-h \{(\text{JL}_{\text{ave}} \sin \psi_p)\}^{-1}} \quad (4.18)$$

ในทำนองเดียวกัน ผลเฉลยของ p_2 และ p_3 ได้เป็น

$$P_2 = (1 - p_1) p_1 \{1 - e^{-s_c(\text{JS}_{\text{ave}})^{-1}}\} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
 P_3 &= \text{JPP}_{\text{ave}} \left[\frac{P_2}{(1 - p_1)} \right] \times \left[\left\{ \frac{h}{(\text{JL}_{\text{ave}} \sin \psi_p)} \right\} \right. \\
 &\quad \left. - \left\{ 1 - \frac{P_1}{\text{JPP}_{\text{ave}}} \right\} \right] \quad (4.20)
 \end{aligned}$$

2. ความสัมพันธ์ของโอกาสการพังทลายตามเงื่อนไขต่าง ๆ

สมการที่เป็นผลเฉลยในรูปแบบบิตทั้ง 3 สมการข้างบนนี้ใช้สำหรับทำการคาดคะเนหาเสถียรภาพของความลาดเอียง ซึ่งถ้าหากทดลองแทนค่าคุณสมบัติและขนาดมิติเชิงเรขาคณิต เพื่อหาโอกาสวิกฤตของการพังทลาย (p_c) ต่อ ค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอกาสวิกฤตกับความสูง เนื่องจากอิทธิพลของโคอีชันที่ผิวสัมผัสของระนาบ (c_1)

ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอกาสวิกฤตกับความสูง เนื่องจากอิทธิพลของระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยก (JS_{ave})

ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโอกาสวิกฤตกับความสูงเนื่องจากอิทธิพลระยะความยาวเฉลี่ยของรอยแตกแยก (JL_{ave})

3. ตัวแปรที่กำหนดความเงื่อนไคต่าง ๆ

ผลเฉลยของสมการในรูปแบบปิด เพื่อหาค่าโอกาสการพังทลาย กำหนดค่าตัวแปรดังนี้

ก) ตัวแปรทั่วไป

- มุมเสียดทานภายในของรอยแตกแยก (ϕ_j) = 0°
- มุมเอียงเทของความลาดเอียง (ψ_f) = 60°
- มุมเอียงเทของระนาบการพังทลาย (ψ_p) = 40°
- หน่วยน้ำหนักมวลหิน (γ_R) = 15 กิโลกรัมต่อตร.ฟุต
(1.58 กิโลพาสคัล)

ข) ตัวแปรความเงื่อนไค

เงื่อนไคแบบที่หนึ่ง กำหนดให้มีการแปรเปลี่ยนค่าโคฮีชันที่ผิวสัมผัส ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกแยก (JL_{ave}) = 40 ฟุต (12.2 เมตร) กับให้ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยก (JS_{ave}) = 5 ฟุต (1.52 เมตร) ค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของระนาบรอยแตกแยก (JPP_{ave}) = 50 %

ส่วนโคฮีชันของมวลหินที่แปรเปลี่ยนมีค่าพิสัย c_i ระหว่าง 25 ถึง 500 กิโลกรัมต่อตร.ฟุต (2.64 - 52.80 กิโลพาสคัล)

เงื่อนไคแบบที่สอง กำหนดให้มีการแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างเฉลี่ย ระหว่างรอยแตกแยก โคฮีชันที่ผิวสัมผัสของมวลหิน = 15 กิโลกรัมต่อตร.ฟุต (1.58 กิโลพาสคัล) ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกแยก (JL_{ave}) = 40 ฟุต (12.2 เมตร) กับให้ค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของระนาบรอยแตกแยก (JPP_{ave}) = 50 %

ส่วนระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยกของมวลหินที่แปรเปลี่ยน มีค่าพิสัย JS_{ave} ระหว่าง 2 ถึง 10 ฟุต (0.61 - 3.05 เมตร)

เงื่อนไคแบบที่สาม กำหนดให้มีการแปรเปลี่ยนค่าระยะความยาวเฉลี่ยของรอยแตก โคฮีชันที่ผิวสัมผัสของมวลหิน = 25 กิโลกรัมต่อตร.ฟุต (2.64 กิโลพาสคัล) ระยะห่างเฉลี่ยของรอยแตกแยก (JS_{ave}) = 5 ฟุต (1.52 เมตร) กับให้ค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของระนาบรอยแตกแยก (JPP_{ave}) = 50 %

ส่วนความยาวเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยกของมวลหินที่แปรเปลี่ยน มีค่าพิสัย JL_{ave} ระหว่าง 20 ถึง 40 ฟุต (6.1 - 12.2 เมตร)

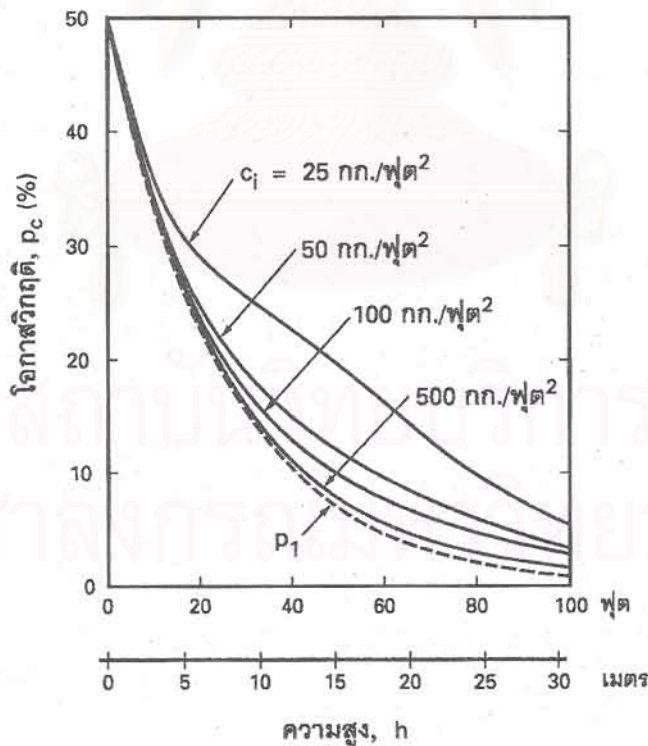
4. ผลเฉลยกับกราฟการคาดคะเนโอกาสความน่าจะเป็น

ผลเฉลยตามรูปแบบทั้ง 3 เงื่อนไข เป็นการหาค่าโอกาสวิกฤตของการพังทลายที่ใช้พจน์ p_c แทนกับค่าโอกาสการพังทลายอีก 3 เหตุการณ์ที่แทนด้วยพจน์ p_1, p_2, p_3 โดยอิงกับค่าความสูงเฉลี่ยในแนวตั้งของระนาบการพังทลาย ซึ่งอนุโลมให้ค่า $h_{ave} = h$

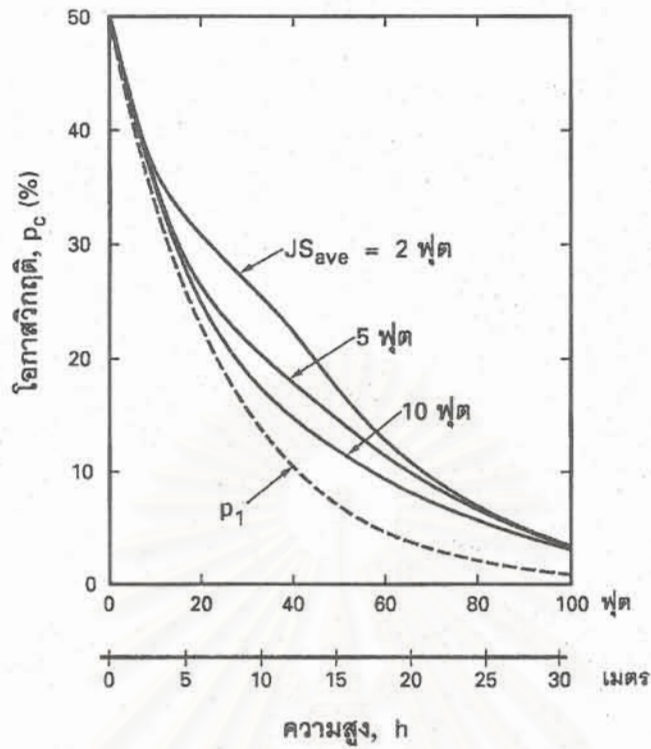
ในเงื่อนไขที่หนึ่ง ค่าโอกาสการพังทลายถูกพล็อตเทียบกับความสูง แยกเป็นกราฟเส้นโค้ง 5 เส้น ดังรูปที่ 4.9 ข้างล่าง เส้นโค้งเส้นแรกเป็นการพล็อตค่าของ p_1 ส่วนเส้นโค้งอีก 4 เส้นเป็นการพล็อตที่ค่า c_i ที่เปลี่ยนไปทั้งหมด 4 ค่า ที่ 25, 50, 100 และ 500 กิโลกรัมต่อตร.ฟุต (2.64, 5.86, 10.56 และ 52.80 กิโลพาสคัล)

รูปที่ 4.10 ในหน้าถัดไป มีกราฟเส้นโค้ง 4 เส้น เส้นแรกเป็นค่าความสัมพันธ์ของ p_1 เมื่อเทียบกับความสูง ส่วนเส้นโค้งอีก 3 เส้น เป็นการกำหนดค่า $J_{S_{ave}}$ ที่ 3 ระยะ ได้แก่ 2, 5, 10 ฟุต (0.61, 1.52, 3.05 เมตร)

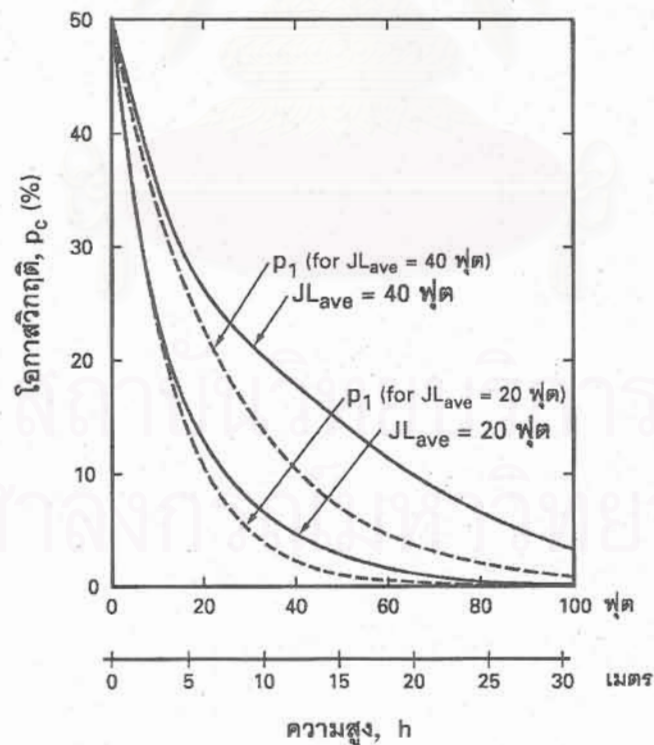
รูปที่ 4.11 มีกราฟเส้นโค้ง 4 เส้น กราฟ 2 เส้นคู่แรกเป็นค่าความสัมพันธ์ของ p_1 เมื่อเทียบกับความสูงที่ระยะของ $J_{L_{ave}} = 20$ กับ 40 ฟุต (6.1 กับ 12.2 เมตร) ส่วนเส้นโค้งอีก 2 เส้น เป็นการกำหนดค่า $J_{L_{ave}}$ ที่ 2 ระยะ เทียบกับค่า p_c ที่เป็นผลรวมโอกาสการพังทลายของ $p_1 + p_2 + p_3$



รูปที่ 4.9 ผลเฉลยโอกาสการพังทลายวิกฤต ที่ค่าโคฮิซันหลายระดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงแนวตั้งมวลบนระนาบ



รูปที่ 4.10 ผลเฉลยโอกาสการพังทลายวิกฤตที่ค่าระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรอยแตกแยกหลายค่าเมื่อเทียบกับค่าความสูง



รูปที่ 4.11 ผลเฉลยโอกาสการพังทลายวิกฤต ที่ค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกแยกหลายค่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูง

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟทั้งหมดใน 3 รูปที่พล็อตตามข้อกำหนด 3 เงื่อนไขที่มีการแปรเปลี่ยนของค่า c_i , $J_{S_{ave}}$ และ $J_{L_{ave}}$ ปรากฏว่าได้กราฟเส้นโค้งเลขชี้กำลังรูปแบบคล้ายกัน ค่าเปอร์เซ็นต์วิกฤตที่ระดับของความสูงค่าต่าง ๆ ก็คล้ายคลึงกัน

4.2.7 รูปแบบการพังทลายเชิงระนาบที่มีรอยแตกจากแรงดึง

ในการตั้งสมมติฐานของการพังทลายบนระนาบเชิงเส้นที่กล่าวมาแล้ว และระบุไว้ในหัวข้อย่อย 4.2.1 ถึง 4.2.6 ไม่ได้มีข้อกำหนดในเรื่องรอยแตกแยกในแนวอื่นที่เกิดในแนวความลาดเอียง เช่นรอยแตกที่เป็นผลจากแรงดึงก่อให้เกิดลักษณะของการแตกร้าวนั้นเป็นแนวยาวในแนวสารซึ่งปรากฏการณ์ธรรมชาติรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) มีโอกาสเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ เกิดในส่วนบนของพื้นผิวความลาดเอียง (upper slope surface) กับเกิดในส่วนพิน้ำความลาดเอียง (slope face) แต่ที่พบมากมักเป็นกรณีแรกที่มีรอยแตกร้าวก่อนแนวระเบิด

4.2.8 เสถียรภาพเชิงกำหนดมวลความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง

รูปแบบเชิงเรขาคณิตกับวิธีการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย ที่นำเสนอในที่นี้อิงจากข้อเสนอแนะในเอกสาร Rock Slope Engineering (Hoek and Bray, 1981) โดยผู้วิจัยได้ดัดแปลงให้มีเงื่อนไขเพิ่มเติม ดังแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตไว้ในรูปที่ 4.12 ถึง 4.13 หน้าถัดไป ทั้งนี้ในภาพสเก็ทดังกล่าวมีการกำหนดให้พื้นผิวส่วนบนของความลาดเอียงมีความชัน ถ้าให้ Ω เป็นค่ามุมที่วัดเทียบกับแนวราบ และกำหนดให้ค่า Ω เริ่มต้นที่ค่าใดค่าหนึ่ง ตั้งแต่ 0 ถึงน้อยกว่า 90 องศา ปกติในเชิงการปฏิบัติงานภาคสนาม การตัดพื้นผิวส่วนบนของความลาดเอียง ให้อยู่ในแนวระดับราบพอดีเป็นเรื่องที่ปฏิบัติได้ยากและไม่นิยม ทั้งนี้ควรให้ความชันของพื้นผิวตะพักด้านบนอยู่ระหว่าง 2-5 องศาจะทำให้สะดวกต่อการเกลี่ยพื้นหรือปรับระดับพื้นผิวส่วนบนของความลาดเอียงด้วยเครื่องจักรกล

1. การหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของมวลที่มีรอยแตกจากแรงดึงบนพื้นผิวส่วนบน

ถ้าหากใช้วิธีการหาค่าความสมดุลของแรงที่กระทำบนมวลสาร จากรูปที่ 4.12 ให้ลักษณะเชิงเรขาคณิตของมวลความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึงเกิดบริเวณตะพักด้านบน ความสัมพันธ์ของสมการตัวแปรขนาดมิติเชิงเรขาคณิต สำหรับความยาวของรอยแตกจากแรงดึง (Z) กับระยะความยาวของพื้นที่ระนาบการพังทลาย (A) เป็น

$$Z = h + b \tan \Omega - (b + h \cot \Psi_f) \tan \Psi_p \quad (4.21)$$

$$A = (b + h \cot \Psi_f) \sec \Psi_p \quad (4.22)$$

จากนั้นหาค่าน้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น (W) ที่เป็นค่า น้ำหนักมวลที่อยู่ระหว่างระนาบเปราะบางตัดกับรอยแตกจากแรงดึง

$$W = 0.5 \gamma_R [h^2 \cot \psi_f + 2bh + b^2 \tan \Omega - (h \cot \psi_f + b)^2 \tan \psi_p] \quad (4.23)$$

ถ้าหากมีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องก็คำนวณค่าแรงดันยกตัวของน้ำ (U) กับค่าแรงดันน้ำที่อยู่ในรอยแตกจากแรงดึง (V) ตามสมมุติฐานที่ให้การกระจายความดันน้ำเป็นรูปสามเหลี่ยม สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำทั้งสองแบบ คือ

$$U = 0.5 \gamma_w Z_w A \quad (4.24)$$

$$V = 0.5 \gamma_w Z_w^2 \quad (4.25)$$

ในส่วนของแรงอัดจากประสิทธิผล (effective normal force: N') ที่กระทำบนระนาบการพังทลายเชิงเส้น มีค่าเป็น

$$N' = W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p \quad (4.26)$$

เมื่อใช้สมการสมดุลของแรงบนระนาบ จะหาค่าแรงที่ต้านการไถลเลื่อนที่เป็นผลมาจากกำลังวัสดุไมมวลสาร (resistance forces: R) กับแรงกระทำจากน้ำหนักมวล ความลาดเอียงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล (loading forces: Q) ตามสมการข้างล่าง

$$R = cA + N' \tan \phi \quad (4.27)$$

$$Q = W \sin \psi_p + V \cos \psi_p \quad (4.28)$$

ดังนั้นค่าปัจจัยความปลอดภัยด้วยวิธีเชิงกำหนด (FS) คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{R}{Q}$ เป็นตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลสาร

2. การหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของมวลที่มีรอยแตกจากแรงดึงที่ผิวหน้าความลาดจากรูปที่ 4.13 หน้า 68 กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงตรงผิวหน้าของมวลความลาดเอียงทำให้หาค่าตัวแปรต่าง ๆ คล้ายคลึงกับหัวข้อย่อที่ 1 โดยมีสมการเชิงประสพการณ์เหมือนกัน แต่มีความแตกต่างในเรื่องตัวแปรที่เป็นค่าขนาดมิติของมวลความลาดเอียงกับขนาดมิติของความยาวรอยแตกจากแรงดึง กับค่าน้ำหนักมวลสาร ดังนี้

$$Z = h - z_0 - y_0 \quad (4.29)$$

$$z_0 = (g - D) \tan \psi_f \quad (4.30)$$

$$y_0 = [h \cot \psi_f - (g - D)] \tan \psi_p \quad (4.31)$$

$$A = [h \cot \psi_f - (g - D)] \sec \psi_p \quad (4.32)$$

$$E = h [\cot \psi_p - \cot \psi_f] \quad (4.33)$$

$$W = (0.5) \gamma_R [(h)(E) - (Z + z_0) \{ (g - D) + E \} + z_0 (g - D)] \quad (4.34)$$

สมการอื่น ๆ ในการหาค่าตัวแปร กับหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยจะใช้สมการเดิมในเรื่องรอยแตกจากแรงดึงที่อยู่บนตะพักความลาดเอียงแทน

4.2.9 เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นมวลความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง

สภาพธรรมชาติของการขุดเจาะมวลสาร น้ำในธรรมชาติอาจแทรกซึมผ่านมวลได้หลายวิธีการ เช่นฝนตกทำให้มวลเปียกหรือการที่น้ำแทรกซังอยู่ในรอยแตกแยกของมวลหิน ก่อให้เกิดแรงดันน้ำที่มีผลต่อเสถียรภาพ ดังนั้นการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเพียงค่าเดียวอาจไม่ได้ครอบคลุมถึงปัญหาที่แท้จริงในภาคสนาม

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นในที่นี้ ถ้าหากประยุกต์ใช้ในรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่ระบุไว้ในรูป 4.12-4.13 โดยมีการตั้งสมมุติฐานตัวแปรสุ่มความดันน้ำที่อยู่ในรอยแตกจากแรงดึงมีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) เพื่อนำมาหา

ค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย (central factor of safety: CFS) กับประเมินค่าความเชื่อถือได้รวมทั้งค่าของโอกาสการพังทลายเชิงความน่าจะเป็น คังสมการที่ผู้วิจัยได้วิเคราะห์กับคัดแปลงจากเอกสารต้นฉบับ 2 เล่ม คือ Geotechnical Engineering (Lee et al., 1983) กับ Reliability - Based Design in Civil Engineering (Harr, 1987)

ค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย (CFS) คังนี้ความเชื่อถือได้ (β) กับโอกาสของการพังทลาย [$p(f)$] ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น มีดังนี้

$$CFS = \frac{R_{ave}}{Q_{ave}} \quad (4.35)$$

$$\beta = \frac{R_{ave} - Q_{ave}}{\sqrt{\sigma^2(R) + \sigma^2(Q)}} \quad (4.36)$$

$$p(f) = 1 \times 10^{-\beta} \quad (4.37)$$

พจน์ R_{ave} กับ Q_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มแรงต้านทานกับแรงที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ส่วน $\sigma(R)$ กับ $\sigma(Q)$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงต้านทานกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำตามลำดับ ทั้งนี้คำนวณมาจากค่าความแปรเปลี่ยนของระดับอัตราส่วนแรงดันน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึงหรือเป็นค่าอัตราส่วน Z_w / Z (พจน์ Z_w เป็นระดับความสูงของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง) ที่ค่าต่าง ๆ เช่น 0 (แสดงว่ามวลแห้ง), 1 (แสดงว่ามวลเปียกน้ำขังเต็มในรอยแตก) เป็นต้น และในกรณีที่มีมวลมีน้ำซึมผ่านบางส่วน (partial seepage) แต่ขังไม่เต็มในรอยแตกจะได้ค่าอัตราส่วน Z_w / Z จะมากกว่าศูนย์แต่น้อยกว่าหนึ่ง

4.2.10 ตัวอย่างการหาค่าโอกาสการพังทลายของมวลที่มีรอยแตกจากแรงดึง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ในหัวข้อข้อย่อยนี้ ประยุกต์กับการหาเสถียรภาพมวลความลาดเอียงที่มีทั้งระนาบเปราะบางตัดผ่าน และมีรอยแตกจากแรงดึง ปกติในการปฏิบัติงานขุดเจาะจริง การตัดหน้าความลาดด้วยวิธีเจาะระเบิดหิน ความสูงของหน้าเหมืองมักเป็นค่าที่คงที่ เนื่องจากสมรรถภาพของเครื่องเจาะในแต่ละเหมืองหินมีจำกัดหรือในการทำการเจาะจะแปรเปลี่ยนระดับค่าความลึกหลุมเจาะที่เหมาะสมได้เพียงเล็กน้อย สิ่งที่มีความเป็นไปได้มากกว่าจึงเป็นค่ามุมความชันของการตัดความลาด คังนั้นการหาค่ามุมความลาดเอียงที่เหมาะสมที่สุด จึงเป็นเป้าหมายหลักในการทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานภาคสนาม

ได้มาก และยังสามารถหาค่าครีความเชื่อถือได้ กับหาค่าโอกาสการพังทลายของมุมความ
ชันหน้าเหมืองหินตามเงื่อนไขที่แตกต่างกันไป เนื่องจากความดันน้ำที่กระทำ

ตัวอย่างวิธีการคำนวณได้ระบุไว้ในหัวข้อย่อย 1 และ 2 ที่แยกเป็น 2 กรณี โดยที่
กรณีแรกรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักส่วนบน กรณีที่สองมีรอยแตกแยกในผิวหน้าความลาด

1. ตัวอย่างการวิเคราะห์หาโอกาสความน่าจะเป็นสำหรับการพังทลายในกรณีแรก
กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักส่วนบน ค่าพจน์ที่ทราบจากการตรวจวัดกับ
ค่าที่ได้จากการทดสอบมวลสารในภาคสนาม มีดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมือง (h) เท่ากับ 15 เมตร
- มุมชันระนาบความลาดเอียง (ψ_f) เท่ากับ 20 องศา
- มุมชันของตะพักส่วนบน (Ω) เท่ากับ 2 องศา
- มุมเสียดทานของระนาบเปราะบางที่เป็นมวลหินปูน เท่ากับ 30 องศา
- ระยะห่างในแนวราบ (b) วัดจากยอดความลาดเอียงถึงรอยแตกที่อยู่บนตะพัก
เท่ากับ 3 เมตร
- หน่วยน้ำหนักมวลความลาดเอียงที่เป็นหินปูน (γ_R) เท่ากับ 25.14 กิโลนิวตันต่อ
ลูกบาศก์เมตร (160 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
- หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) กำหนดให้ เท่ากับ 9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร
(62.4 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
- โคฮีชัน (c) ของหิน เท่ากับ 107.3 กิโลพาสคัล (2,000 ปอนด์ต่อตารางฟุต)
- อัตราส่วนของระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง มีค่าส่วนของ Z_w / Z
เท่ากับ 0, 0.25, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 ตามลำดับ

ผลเฉลย

การทำกรคำนวณควรใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการ (spread sheet) เพราะมี
การใช้สมการหลายสมการและมีค่าที่ต้องหาหลายค่า และได้ค่าละเอียดถูกต้องมากกว่าการ
คำนวณด้วยมือ แต่เพื่อความเข้าใจง่ายผู้วิจัย ได้แสดงวิธีการคำนวณด้วยมือโดยใช้เครื่องคิด
เลขธรรมดาช่วย ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องที่ทศนิยมหลักที่สาม ลำดับชั้นคอนกรีตดังนี้

1. กำหนดค่ามุมความชันของการตัดความลาด ที่ค่าหนึ่ง ในที่นี้ให้เท่ากับ 70 องศา

2. ทำการหาค่าตัวแปรระยะมิติของมวลความลาดเอียง ได้แก่ ค่า Z กับค่า A
โดยใช้สมการที่ 4.21 กับ 4.22 ตามลำดับ จากตัวแปรที่ทราบค่าที่กำหนดในโจทย์ ดังนั้น
หาค่า Z กับ A ที่ตัดมุมความลาด 70 องศา เป็น 12.026 และ 9.003 เมตรตามลำดับ

3. ทำการคำนวณค่าของน้ำหนักมวลที่วางตัวบนระนาบการพังทลาย หรือหาค่า W จากสมการที่ 4.23 โดยแทนค่าตัวแปรที่อยู่ทางด้านขวาของสมการ ได้ค่าน้ำหนักของมวลที่มีโอกาสเลื่อนไถลบนระนาบ เท่ากับ 1,837.236 กิโลนิวตัน

4. เมื่อทราบค่า Z_w กับ A ก็คำนวณหาค่าของแรงค้ำน้ำที่เป็นค่า U กับค่า V จากสมการที่ 4.24 กับ 4.25 ที่ระดับอัตราส่วนของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงค้ำหลายค่า คือ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 (มวลแห้ง) มีค่า U กับ V เป็น 0 ด้วย

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.25 มีค่า U เป็น 132.756 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 44.335 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.40 มีค่า U เป็น 212.409 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 113.496 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.60 มีค่า U เป็น 318.613 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 255.367 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.80 มีค่า U เป็น 424.818 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 453.986 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 1.00 (รอยแตกมีน้ำขังเต็ม) ค่า U จะสูงสุดเป็นที่ 531.021 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็นค่าสูงสุดที่ 709.352 กิโลนิวตัน

5. ทำการคำนวณค่าของแรงอัดฉากประสิทธิผล (N') จากสมการที่ 4.26 โดยใช้ค่าของตัวแปร W , U , V กับมุมของระนาบกับความชัน แทนหาค่าแรงอัดฉากที่ระดับต่าง ๆ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 (มวลแห้ง) มีค่าแรงอัดฉากเป็น 1,726.438 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 1,578.518 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 1,475.211 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 1,320.484 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 1,146.348 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 952.803 กิโลนิวตัน

6. จากนั้นทำการคำนวณค่าของแรงต้านทานทั้งหมดต่อการเลื่อนไถล (R) สำหรับแต่ละอัตราส่วนระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงค้ำ ทั้งนี้หาค่าโดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านขวาสมการที่ 4.27 จะได้ค่าความต้านทานจากกำลังวัสดุในมวลสารที่แปรเปลี่ยนตามผลของแรงค้ำน้ำที่กระทำ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 มีค่าแรง R เป็น 1,962.724 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่า R เป็น 1,877.323 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่า R เป็น 1,817.678 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่า R เป็น 1,728.347 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่า R เป็น 1,627.809 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่า R เป็น 1,516.066 กิโลวัตต์

7. จากนั้นทำการคำนวณค่าของแรงทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล (Q) สำหรับแต่ละอัตราส่วนระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง ทั้งนี้หาค่าโดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านขวาสมการที่ 4.28 จะได้ค่าแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลที่แปรเปลี่ยนตามผลของแรงดันน้ำที่กระทำ

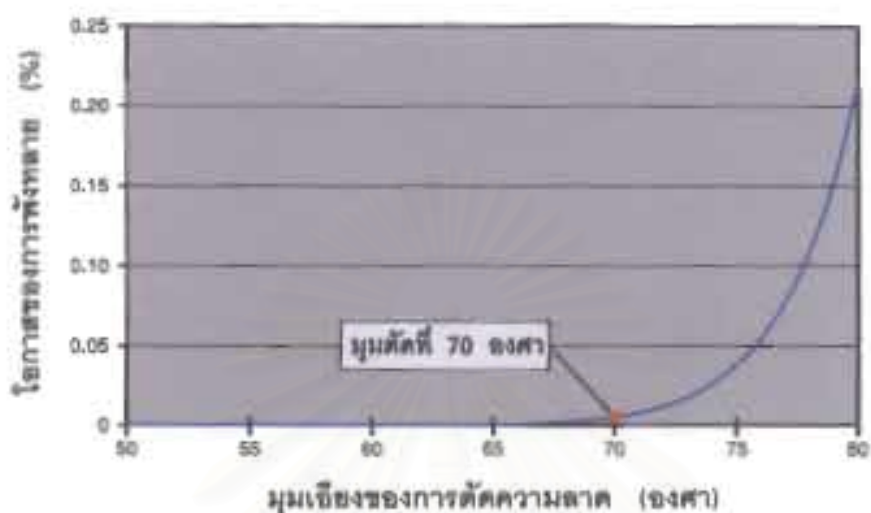
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 มีค่าแรง Q เป็น 628.372 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่า Q เป็น 670.033 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่า Q เป็น 735.024 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่า Q เป็น 868.338 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่า Q เป็น 1,054.979 กิโลวัตต์
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่า R เป็น 1,294.945 กิโลวัตต์

8. การหาค่าเชิงสถิติของแรงที่กระทำนานกับระนาบของการพังทลาย ทั้งที่เป็นค่าของ R กับค่าของ Q นั้น ตั้งสมมุติฐานของการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มทั้งสองเป็นแบบปกติ (normal distribution) และโดยให้มีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ของตัวแปรสุ่มที่ค่า $(n - 1)$ ถ้าค่า n เป็นจำนวนของตัวอย่างทั้งหมดที่วิเคราะห์เชิงสถิติ

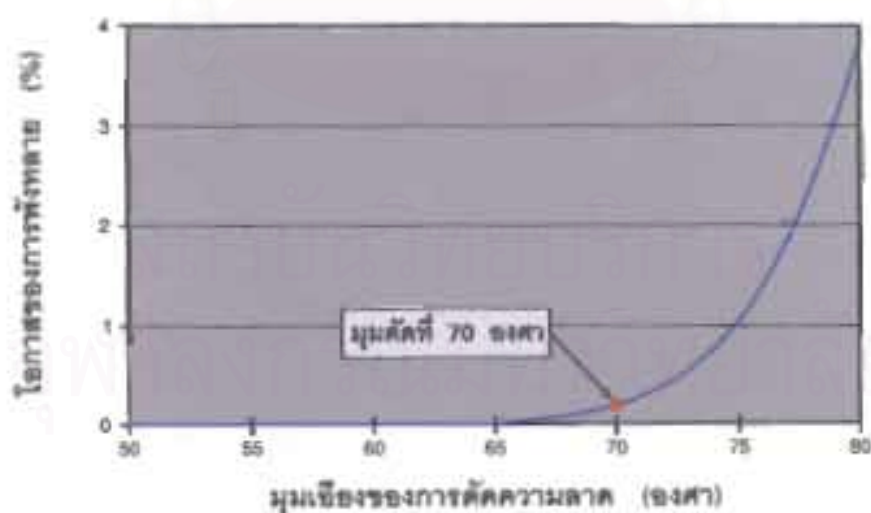
- ค่าเฉลี่ย (mean) ของพจน์ R หรือ R_{ave} เป็น 1,754.991 กิโลวัตต์ กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) พจน์ R หรือ $\sigma(R)$ เป็น 164.935 กิโลวัตต์

- ค่าเฉลี่ย (mean) ของพจน์ Q หรือ Q_{ave} เป็น 875.282 กิโลวัตต์ กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) พจน์ Q หรือ $\sigma(Q)$ เป็น 257.379 กิโลวัตต์

9. เมื่อต้องการหาค่ากลางปัจจัยความปลอดภัย (CFS) ก็ใช้สมการที่ 4.35 เพื่อทำการคำนวณค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพจากค่าเฉลี่ยของความสมดุลแรง ที่ภาวะความดันน้ำหลายสถานะ ในกรณีนี้ได้ค่า CFS ของการตัดมูลลาดชัน 70 องศา เท่ากับ 2.005



รูปที่ 4.14 ผลเฉลยค่าโอกาสการพึ่งหลาย ที่มีค่ามุมการตัดมุมความลาดชันหลายค่า กำหนดให้มวลความลาดเอียง มีรอยแตกจากแรงดึงในจำนวนที่หักค้ำเขน



รูปที่ 4.15 ผลเฉลยค่าโอกาสการพึ่งหลาย ที่มีค่ามุมการตัดมุมความลาดชันหลายค่า กำหนดให้มวลความลาดเอียง มีรอยแตกจากแรงดึงในผิวหน้าความลาด

10. แนวคิดในเรื่องความเชื่อถือได้สำหรับตัวแปรที่ไม่สหสัมพันธ์ (uncorrelated variables) มีวิธีหาค่าของดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index: β) จากการวิเคราะห์เส้นฉากจากจุดกำเนิดถึงพื้นผิวของการพังทลาย ซึ่งระบุเป็นสมการที่ 4.36 ได้ค่าในกรณีของการตัดมุมลาดที่ 70 องศา เป็น 2.878

11. ค่าของโอกาสการพังทลาย $[p(f)]$ จากสมการที่ 4.37 ซึ่งเป็นสมการแบบประมาณค่าใกล้เคียง (approximate equation) สำหรับตัวแปรสุ่มในระบบ ในที่นี้ได้ค่า $p(f)$ เป็น 0.00133 (เท่ากับ 0.133 %) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ความน่าจะเป็นการพังทลาย (probability of failure) คือ 1.33 ครั้งใน 1,000 เหตุการณ์

รูปที่ 4.14 หน้าที่ 75 เป็นภาพกราฟโอกาสการพังทลายที่เทียบกับค่ามุมความลาดชันของมวลหินปูน ที่ระดับค่ามุมต่าง ๆ เริ่มตั้งแต่ 50 องศา ถึง 80 องศา สำหรับค่าที่สมมุติในตัวอย่างนี้ (ตัดมุมลาดที่ 70 องศา) ได้แสดงเป็นจุดมีลูกศรชี้บนกราฟ

2. ตัวอย่างการวิเคราะห์หาโอกาสความน่าจะเป็นสำหรับการพังทลายในกรณีที่สอง กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงอยู่ผิวหน้าความลาด ค่าพจน์ที่ทราบจากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการทดสอบมวลสารในภาคสนาม มีดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมือง (h) เท่ากับ 15 เมตร
- มุมชันระนาบความลาดเอียง (ψ_f) เท่ากับ 20 องศา
- มุมชันของตะพักด้านบน (Ω) เท่ากับ 2 องศา
- มุมเสียดทานของระนาบเปราะบางที่เป็นมวลหินปูน เท่ากับ 30 องศา
- ระยะแนวราบที่เป็นผลต่างของค่า g กับค่า D หรือ $[g - D]$ เท่ากับ 1 เมตร [ค่า g วัดในแนวราบจากตำแหน่งของรอยแตกจากแรงดึงไปยังจุดตัดของระนาบการพังทลายกับตะพักด้านบน ส่วนค่า D วัดในแนวราบจากยอดความลาดเอียงถึงจุดตัดของระนาบการพังทลายกับตะพักด้านบน]
- หน่วยน้ำหนักมวลความลาดเอียงที่เป็นหินปูน (γ_R) เท่ากับ 25.14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (160 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
- หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) กำหนดให้ เท่ากับ 9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (62.4 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
- โคฮีชัน (c) ของหิน เท่ากับ 107.3 กิโลพาสคัล (2,000 ปอนด์ต่อตารางฟุต)
- อัตราส่วนของระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง มีค่าส่วนของ Z_w / Z เท่ากับ 0, 0.25, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 ตามลำดับ

ผลเฉลย

ผู้วิจัย ได้แสดงวิธีการคำนวณด้วยมือโดยใช้ เครื่องคิดเลขธรรมดาช่วย ผลลัพธ์มีความถูกต้องที่ทศนิยมตำแหน่งที่สาม โดยมีลำดับขั้นตอนคล้ายคลึงกับการคำนวณของกรณีแรก ดังนี้

1. กำหนดค่ามุมความชันของการตัดความลาด ที่ค่าหนึ่ง ในที่นี้ให้เท่ากับ 70 องศา
2. ทำการหาค่าตัวแปรระยะมิติของมวลความลาดเอียง ได้แก่ ค่า Z , y_0 , A โดยใช้สมการที่ 4.30 ถึง 4.32 ตามลำดับ จากตัวแปรที่ทราบค่าที่กำหนดในโจทย์ ดังนั้น ค่า Z , y_0 , A ที่ตัดหน้าเหมือง 70 องศา เป็น 10.629, 1.623 และ 4.746 เมตร
3. หาค่าตัวแปรที่ระยะในแนวราบ E ที่วัดจากจุดยอดความลาดถึงจุดค้ำของเส้นสมมุติในแนวราบกับระนาบเปราะบาง ใช้สมการที่ 4.33 ได้ค่า E เป็น 35.753 เมตร
4. ทำการคำนวณค่าของน้ำหนักมวลที่วางตัวบนระนาบการพังทลาย หรือหาค่า W จากสมการที่ 4.34 ที่ทราบค่าตัวแปรที่อยู่ทางด้านขวาของสมการแล้ว ได้ค่าน้ำหนักของมวลที่มีโอกาสเลื่อนไถลบนระนาบ เท่ากับ 601.766 กิโลนิวตัน
5. เมื่อทราบค่า Z_w กับ A ก็คำนวณหาค่าของแรงค้ำน้ำที่เป็นค่า U กับค่า V จากสมการที่ 4.24 กับ 4.25 ที่ระดับอัตราส่วนของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงค้ำหลายค่า คือ
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 (มวลแห้ง) มีค่า U กับ V เป็น 0 ด้วย
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.25 มีค่า U เป็น 61.858 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 34.637 กิโลนิวตัน
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.40 มีค่า U เป็น 98.972 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 88.670 กิโลนิวตัน
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.60 มีค่า U เป็น 148.458 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 199.507 กิโลนิวตัน
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0.80 มีค่า U เป็น 197.944 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็น 354.678 กิโลนิวตัน
 - ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 1.00 (รอยแตกมีน้ำขังเต็ม) ค่า U จะสูงสุดเป็นที่ 247.430 กิโลนิวตัน กับมีค่า V เป็นค่าสูงสุดที่ 554.185 กิโลนิวตัน
6. จากสมการที่ 4.26 ทำการคำนวณค่าของแรงอัดจากประสิทธิผล (N') โดยใช้ค่าของตัวแปร W , U , V กับมุมของระนาบกับความชัน แทนหาค่าแรงอัดจากที่ระดับต่าง ๆ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 (มวลแห้ง) มีค่าแรงอัดฉากเป็น 565.475 กิโลนิวตัน

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 491.771 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 436.176 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 348.781 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 246.224 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่าแรงอัดฉากเป็น 128.502 กิโลนิวตัน

7. จากนั้นทำการคำนวณค่าของแรงต้านทานทั้งหมดต่อการเลื่อนไถล (R) สำหรับแต่ละอัตราส่วนระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง ทั้งนี้หาค่าโดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านขวาสมการที่ 4.27 จะได้ค่าความต้านทานจากกำลังวัสดุในมวลสารที่แปรเปลี่ยนตามผลของแรงดันน้ำที่กระทำ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 มีค่าแรง R เป็น 835.697 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่า R เป็น 793.144 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่า R เป็น 761.046 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่า R เป็น 710.589 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่า R เป็น 651.378 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่า R เป็น 583.418 กิโลนิวตัน

8. จากนั้นทำการคำนวณค่าของแรงทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล (Q) สำหรับแต่ละอัตราส่วนระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง ทั้งนี้หาค่าโดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านขวาสมการที่ 4.28 จะได้ค่าแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลที่แปรเปลี่ยนตามผลของแรงดันน้ำที่กระทำ

- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เท่ากับ 0 มีค่าแรง Q เป็น 205.816 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.25 มีค่า Q เป็น 238.364 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.40 มีค่า Q เป็น 289.138 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.60 มีค่า Q เป็น 393.291 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 0.80 มีค่า Q เป็น 539.105 กิโลนิวตัน
- ที่อัตราส่วน Z_w / Z เป็น 1.00 มีค่า R เป็น 726.579 กิโลนิวตัน

9. การหาค่าเชิงสถิติมีวิธีการเหมือนกับกรณีแรก โดยมีผลลัพธ์ดังนี้

- พจน์ R_{ave} = 722.546 กิโลนิวตัน และ $\sigma(R)$ = 93.631 กิโลนิวตัน
- พจน์ Q_{ave} = 398.716 กิโลนิวตัน และ $\sigma(R)$ = 201.079 กิโลนิวตัน

10. ค่า CFS จึงหาได้ เท่ากับ 1.812 และในทำนองเดียวกัน ค่า β เป็น 1.456 จากนั้นหาค่าของ $p(f)$ ในการตัดมุมลาดที่ 70 องศา เท่ากับ 0.0350 (3.50 %) ในรูปที่ 4.15 หน้า 75 แสดงกราฟต่อเนื่องโอกาสการพังทลายเทียบกับการตัดความลาดชันของหน้าเหมือง ที่คำนวณเอียงแตกต่าง ๆ

4.3 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้สำหรับความลาดเอียงที่มีระนาบการพังทลายรูปอาร์ก

มวลความลาดเอียงที่มีการพังทลายแบบนี้ มักเป็นมวลดิน ได้แก่ ดินเหนียวอ่อน (soft clay soil) หรือดินเหนียวแข็ง (stiff clay soil) บางทีก็พบในดินเหนียวปนทราย (sandy clay soil) โดยที่ไม่พบบ่อยนักในดินที่ไม่มีค่าไคฮ์ชั้นของมวลสาร

4.3.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงขีดจำกัด

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงที่มีมวลดินมีพื้นผิวการพังทลายเป็นรูปอาร์ก มีแนวทางการวิเคราะห์หลายรูปแบบ แบ่งแนวทางการวิเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีการหลัก คือ

1. วิธีการความสมดุลเชิงขีดจำกัด (limit equilibrium method)
2. วิธีการสถานะเชิงขีดจำกัด (limit state method)

การวิเคราะห์แบบแรกเป็นการวิเคราะห์เชิงอนุรักษ์ ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพจัดเป็นตัวเลขกลุ่มขอบเขตบน (upper bound) เน้นหาค่าความสมดุลของค่าความเค้นเฉือนที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลในแนวระนาบรูปอาร์กหรือคล้ายคลึงกับรูปอาร์ก กับค่าความเค้นเฉือนที่ก่อให้เกิดการต้านการเคลื่อนที่ของมวลในแนวระนาบ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต้าน กับความเค้นเฉือนที่ก่อให้เกิดมวลเคลื่อนที่ คือ ค่าปัจจัยความปลอดภัย และหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ

การวิเคราะห์ความสมดุลเชิงขีดจำกัด มีรายละเอียดเพิ่มเติมอีก ได้แก่ วิธีการแบ่งส่วนมวลสาร (slice method) การใช้วงกลมเสียดทาน (friction angle) ที่สมมุติให้พื้นผิวการพังทลายเป็นรูปวงกลม การวิเคราะห์โดยสมมุติว่าพื้นผิวการพังทลายเป็นรูปเส้นเวียนแบบก้นหอย (logspiral surface)

การวิเคราะห์แบบหลังเป็นแบบวิธีสถานะเชิงขีดจำกัด เป็นการวิเคราะห์ที่ปรับปรุงเพิ่มเติมให้สามารถใช้ได้กับมวลดินในธรรมชาติ ที่มีแร่กับสารประกอบหลายอย่างไม่ได้เป็นดินเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หลักการสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถานะเชิงขีดจำกัดจะเน้นตรงที่หาค่าแรงผลักดันเชิงรุก (active thrust) ที่ยังกระทำมวลสาร

ในลักษณะทำให้มวลสารเกิดการเคลื่อนที่ถ้าหากมวลสารวางตัวบนระนาบในสถานะ เจริงสถิต (static state) ก็ใช้คำนวณค่าตัวเลขที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลบนระนาบ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ระหว่างการหาค่าจากความสัมพันธ์เชิงจิตจำกัดกับการหาค่าจากวิธีสถานะ เจริงจิตจำกัด โดยตรวจสอบกับค่าของตัวเลขเชิงเสถียรภาพ (stability number) สำหรับมวลดินที่มีเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous soil)

มุมความลาดเอียง (slope angle) องศา	มุมเสียดทาน (friction angle) องศา	วิธีความสมดุลเชิงจิตจำกัด (limit equilibrium)			วิธีสถานะ เจริงจิตจำกัด (limit state)
		แบ่งส่วน (slice)	วงกลม (circle)	เวียนแบบก้นหอย (logspiral)	เวียนแบบก้นหอย (logspiral)
45	0	0.170	0.170	0.170	0.180
	5	0.141	0.136		0.136
	15	0.085	0.083		0.083
	25	0.048	0.044		0.043
30	0	0.156	0.156	0.156	
	5	0.114	0.110		0.110
	15	0.048	0.046		0.046
	25	0.0012	0.0009	0.0008	0.0008
15	0	0.145	0.145	0.145	0.180
	5	0.072	0.070	0.070	0.0695
	10		0.0023		0.0022

Chen (1975) ได้ทดลองนำผลเฉลยมาวิเคราะห์หาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ ซึ่งเรียกว่า Stability Number [ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ $c_i / \gamma h$] สำหรับมวลดินที่มีค่าความสูงคงที่มีเนื้อเดียวกันตลอด แต่ค่ามุมความเอียง (slope angle) กับค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) ของมวลเปลี่ยนไป การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) นี้พบว่าค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ: $c_i / \gamma h$ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังได้แสดงค่าเหล่านี้ไว้ในตารางที่ 4.1 ในเชิงปฏิบัติงานจริงภาคสนาม การเลือกจะวิเคราะห์วิธีวิเคราะห์แบบไหน จะขึ้นอยู่กับว่าข้อมูลดิบในการวิเคราะห์สำหรับวิธีนั้นมีเพียงพอหรือไม่สำหรับการหาผลเฉลยค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ

4.3.2 แนวทางการหาความน่าจะเป็นของการพังทลายรูปอาร์ก

ในการทดสอบทางด้านตัวอย่างหินเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุ เช่นค่าโคฮีชัน ค่ามุมเสียดทานภายใน อาจได้ค่าที่เป็นผลลัพธ์ของการทดสอบมากกว่าค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุในภาคสนาม ทำให้มีการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยเกินความเป็นจริง

ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่นิยมใช้สำหรับมวลดิน มีค่าระหว่าง 1.2-3.0 ดังนั้นถ้าหากค่าความแปรปรวน (variance) ถูกปรับให้มัน้อยลง การออกแบบก็มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น

แนวทางที่จะหาค่าความน่าจะเป็นมาวิเคราะห์ปัญหานี้ จะเริ่มต้นที่ทำการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยตามรูปแบบเดิม แต่ทำการปรับค่าคุณสมบัติและวิธีการคำนวณเชิงสถิติให้มาเกี่ยวข้องกับค่าโอกาสของการพังทลาย ดังมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. มวลดินอาจมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หรือในบางกรณีอาจเป็นมวลดินที่มีแร่หรือสารประกอบหลายอย่างและไม่มีเนื้อเดียวกัน (non-homogeneous) การคำนวณเสถียรภาพเชิงไมเมนต์ของการพังทลายรูปอาร์ก กำหนดให้

$$FS = \frac{M_R}{M_Q} \quad (4.38)$$

พจน์ M_R เป็นโมเมนต์ที่ต้านการพังทลาย ส่วนพจน์ M_Q เป็นโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ในบางกรณีพจน์ M_Q อาจมีค่าเดียว แต่พจน์ M_R ควรจะมีได้หลายค่า เนื่องจากพจน์นี้เป็นค่าความต้านทานเชิงกำลังวัสดุ ที่ค่าคุณสมบัติพื้นฐานคือค่าโคฮีชัน (c) กับค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ในมวลดินที่มีความแปรปรวนสูง

2. ทำการคำนวณโดยเลือกใช้วิธีการคำนวณค่าเชิงเสถียรภาพ ซึ่งมาจากข้อเสนอแนะของ Fellenius (1936) ตามวิธีการแบ่งส่วน

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^N \left\{ c'_i d_i + (\Delta W_i \cos \alpha_i - u_i d_i) \tan \phi' \right\}}{\sum_{i=1}^N \left\{ \Delta W_i \sin \alpha_i \right\}} \quad (4.39)$$

- c'_i = โคฮีชันเชิงประสิทธิผล
 d_i = ระยะความยาวของฐานส่วนแบ่งที่ i
 W_i = น้ำหนักของส่วนแบ่งที่ i
 α_i = มุมเอียงเทของส่วนแบ่งที่ i
 u_i = แรงดันน้ำที่ก่อให้เกิดการยกตัวของส่วนแบ่งที่ i
 ϕ' = มุมเสียดทานประสิทธิผล

3. สมมติว่าพจน์ตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ 4.39 มีเพียงค่า c และ ϕ เท่านั้นที่เป็นตัวแปรสุ่ม (random variable) จึงจำเป็นต้องใช้การหาค่าเฉลี่ย (mean) กับค่าความแปรปรวน (variance)

ในส่วนที่เป็นเศษ (numerator) ของสมการที่ 4.39 แยกเขียนตัวแปรสุ่มของแต่ละส่วนแบ่ง (slice) ในรูปแบบใหม่เป็น

$$a_i c' = b_i \tan \phi'_i \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} a_i &= d_i \\ b_i &= (\Delta W_i \cos \alpha_i - u_i d_i) \end{aligned}$$

ก. การหาค่าเฉลี่ย

ถ้าหากสมมติให้ตัวแปรหนึ่งมีความแปรผันกับค่าหลายค่า หรือเขียนเป็นอนุกรมของเทย์เลอร์ (Taylor's series) ได้เป็น

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.41)$$

ถ้าหากให้แต่ละค่าของ x_i เป็นค่าที่ไม่พึ่งพิงกับค่าเฉลี่ย $(x_i)_{ave}$ และค่าของ σ_i เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เขียนอนุกรมหาความสัมพันธ์ใหม่ สำหรับค่าเฉลี่ยของ y

$$y_{ave} = F[(x_1)_{ave}, (x_2)_{ave}, (x_3)_{ave}, \dots, (x_n)_{ave}] \quad (4.42)$$

สมการข้างบนนี้ ตั้งอยู่ในสมมุติฐานที่สมมุติว่า นิพจน์ของอนุกรมที่เหลือมีค่าที่ละได้ (negligible) จึงจะสามารถให้ค่าทางด้านซ้ายและทางด้านขวาเท่ากัน

ข. การหาค่าความแปรปรวน

ถ้าหากให้ค่าความแปรปรวนตัวแปรหนึ่งมีความแปรผันกับค่าหลายค่า หรือเขียนเป็นอนุกรมที่คล้ายคลึงกับการหาค่าประมาณของค่าเฉลี่ย

$$V_y = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial F}{\partial x_i} \right]^2 [\sigma_i]^2 \quad (4.43)$$

$$V_y = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial F}{\partial x_i} \right]^2 [V_i] \quad (4.44)$$

4. จากสมการที่ 4.42 กับสมการที่ 4.44 ทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของโมเมนต์ของพจน์ M_R

$$(M_R)_{ave} = a_i (c)_{ave} + b_i (\tan \phi)_{ave} \quad (4.45)$$

$$V_{M_R} = (a_i)^2 V_{R'} + (b_i)^2 V_{\tan \phi'} \quad (4.46)$$

5. หาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่เป็นการวิเคราะห์เชิงความเชื่อถือได้

$$CFS = (FS)_{ave} = \frac{(M_R)_{ave}}{(M_Q)_{ave}} \quad (4.47)$$

6. หาค่าตัวเลขโอกาสของการพังทลาย เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบเบี่ยงเบนปกติ จากตารางที่ 2.1 หน้า 11 ของรายงานฉบับนี้ได้ค่า

$$p(f) = 1 - F \left\{ \frac{R_{ave} - Q_{ave}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right\} \quad (4.48)$$

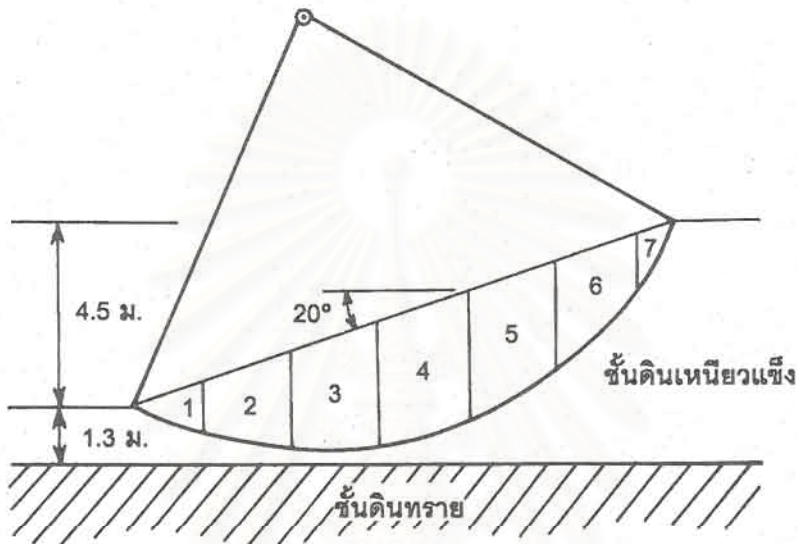
เมื่อกำหนดให้ตัวเลขของ c_i กับ ϕ ที่ก่อให้เกิดการพังทลายมีค่าเดียว หรือค่าของ σ_Q กับค่า V_Q มีค่าเป็น 0 (ศูนย์)

$$p(f) = 1 - F \left\{ \frac{(F_{ave} - 1)}{(F_{ave})(V_{M_R})} \right\} \quad (4.49)$$

7. การวิเคราะห์หาค่าตัวเลขโอกาสความปลอดภัยสำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (log-normal) ได้ผลลัพธ์ในทำนองเดียวกันกับการแจกแจงค่าแบบเบี่ยงเบนปกติ (normal distribution) และเมื่อสมมุติให้ค่า c_i และ ϕ ของโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดความไม่เสถียรภาพ มีค่าตัวเลขเดียว

$$p(f) = 1 - F \left\{ \frac{\ln \left[F_{ave} \sqrt{\frac{1}{1 + V_{M_Q}^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V_{M_Q}^2)}} \right\} \quad (4.50)$$

4.3.3 ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายรูปอาร์กเชิงความเชื่อถือได้
จากรูปที่ 4.16 ข้างล่าง ที่มีรูปแบบเชิงเรขาคณิตเป็นความลาดเอียงที่เป็นมวลดินเหนียวแข็ง (stiff clays) โดยแสดงค่ามิติระยะความยาวของฐานส่วนแบ่งกับค่ามุมเอียงเทของแต่ละส่วนแบ่งไว้ในตารางที่ 4.2 หน้า 85



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์การพังทลายรูปอาร์กของมวลดินเหนียวแข็ง ที่มีชั้นดินทรายรองรับด้านล่าง การคำนวณใช้วิธีแบ่งส่วน

เมื่อทำการเปิดหน้าดินให้ได้ระดับความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง เท่ากับ 4.5 เมตร และตัดมุมเอียงเทของความลาดเอียง เท่ากับ 20° มวลชั้นดินเหนียวแข็งนี้ถูกรองรับด้วยชั้นดินทรายที่มีการระบายน้ำออกจากมวลอย่างดี (fully drained)

กำหนดให้การคำนวณเสถียรภาพใช้วิธีการแบ่งส่วนมวลสาร และมีจุดศูนย์กลางของการหมุนเชิงโมเมนต์ที่จุด O ถ้าหากกำหนดให้ระยะจุดล่างสุด (toe) ของความลาดเอียงมีระยะห่างจากพื้นระดับของชั้นดินทราย เท่ากับ 1.3 เมตร และการพังทลายรูปอาร์กเกิดขึ้นเฉพาะในมวลดินเหนียวแข็งที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ 16.0 กิโลพาสคัล

ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความเชื่อถือได้ของค่าตัวเลขโอกาสการพังทลาย กำหนดให้มีค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติมวลดินเหนียวแข็ง ดังนี้

- ค่าเฉลี่ยของโคฮีชันประสิทธิภาพ, $(c')_{ave} = 2.159$ กิโลพาสคัล
- ค่าเฉลี่ยแทนเจนต์มุมเสียดทานประสิทธิภาพ, $(\tan \phi')_{ave} = 0.312$
- ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น, $(\rho)_{ave} = 15.13$ กิโลนิวตันต่อลบ.ม.

ผลเฉลย

จากรูปที่ 4.16 ได้ทำการแบ่งส่วนของมวลสารออกเป็น 7 ส่วน ตามตารางที่ 4.2 ข้างล่าง ได้ระบุค่าของระยะความยาวของฐานแต่ละส่วนแบ่ง กับผลรวมของระยะความยาวของอาร์กการพังทลาย และค่ามุมเอียงของแต่ละชิ้นส่วนแบ่ง

ตารางที่ 4.2 การคำนวณหาค่าตัวเลขเสถียรภาพด้วยวิธีการแบ่งส่วนมวลสาร (ตารางแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกหาค่าน้ำหนักส่วนแบ่ง ส่วนที่สองหาค่าผลรวมของนิพจน์ต่าง ๆ จากสมการที่ 4.39)

ส่วนแบ่ง	d (ม.)	α (องศา)	W (กิโลนิวตัน)	$c'd$ (กิโลนิวตัน)
1	2.1	-20	22.4	4.5
2	2.1	-10	59.2	4.5
3	2.0	5	80.0	4.3
4	2.1	20	89.6	4.5
5	2.2	30	89.6	4.7
6	2.6	40	68.8	5.6
7	2.5	50	19.2	5.4
			$\sum_{i=1}^N d_i = 15.6$	$\sum_{i=1}^N c'd_i = 33.5$

ส่วนแบ่ง	d (ม.)	α (องศา)	$W \cos \alpha_i$ (กิโลนิวตัน)	$W \sin \alpha_i$ (กิโลนิวตัน)
1	2.1	-20	6.6	-7.6
2	2.1	-10	18.1	-10.2
3	2.0	5	25.0	7.0
4	2.1	20	26.2	30.6
5	2.2	30	24.3	44.8
6	2.6	40	16.5	44.0
7	2.5	50	3.8	14.7
			$\sum_{i=1}^N W_i \cos \alpha_i = 120.5$	$\sum_{i=1}^N W_i \sin \alpha_i = 123.3$

การคำนวณค่าเลขนัยสำคัญ เพื่อหาผลลัพธ์ที่เป็นค่ากลางปัจจัยความปลอดภัย (CFS) แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 หน้า 85 จากค่าตัวเลขนัยสำคัญต่าง ๆ ใช้สมการที่ 4.47 หา ค่าผลลัพธ์

$$\begin{aligned} \text{CFS} &= \frac{(M_R)_{\text{ave}}}{(M_Q)_{\text{ave}}} \\ &= \frac{[33.5 + 120.5]}{123.3} = 1.25 \end{aligned}$$

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการหาค่าไคอีชันประสิทธิผลกับการหาค่ามุม เสียดทานประสิทธิผลนั้น มีค่าความแปรปรวนของค่าทั้งสองคือ

$$V_{R'} = 30\% \quad \text{และ} \quad V_{\tan \phi'} = 2.5\%$$

จากความรู้ทางสถิติ

$$V_y = \left[\left\{ \frac{V_x}{100} \right\} (x)_{\text{ave}} \right]^2 \quad (4.51)$$

ดังนั้นหาค่าตัวเลขความแปรปรวนได้

$$V_{yc'} = [0.3 \times 2.159]^2 = 0.420$$

$$V_{y \tan \phi'} = [0.025 \times 0.312]^2 = 6.08 \times 10^{-5}$$

เมื่อต้องการหาค่านิพจน์ที่เป็นเศษ (ไม่เมนต์ความต้านทาน) ของแต่ละส่วนแบ่ง แทนค่าลงในสมการที่ 4.40 (หน้า 82) และข้อมูลจากตารางที่ 4.2 หน้า 85 ได้ค่า

$$\sum_{i=1}^n (a_i)^2 = 15.6 \quad (4.52)$$

$$\sum_{i=1}^n (b_i)^2 = 120.5 \quad (4.53)$$

จากสมการที่ 4.46 (หน้า 83) และทำการบวกค่าของส่วนแบ่งทุกส่วน

$$\begin{aligned}(V_y)_{M_R} &= \{(15.6)^2 (0.420)\} + \{(120.5)^2 (6.08 \times 10^{-5})\} \\ &= 102.2 + 0.883 = 103.08\end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.51 หน้า 86 จะได้

$$\begin{aligned}(V_x)_{M_R} &= [(V_y)_{M_R}]^{0.5} \left[\frac{100}{[V_x]} \right] \\ &= [103.08]^{0.5} \left[\frac{100}{154} \right] = 6.59 \%\end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบเบี่ยงเบนปกติ สามารถหาค่าโอกาสของการพังทลายจากสมการที่ 4.49 (หน้า 83)

$$p(f) = 1 - F \left\{ \frac{(F_{ave} - 1)}{(F_{ave})(V_x)_{M_R}} \right\}$$

สำหรับค่านิพจน์ทางด้านขวา หาค่าได้จาก

$$\begin{aligned}F [] &= F \left[\frac{\{1.25 - 1\}}{\{(1.25)(0.0659)\}} \right] \\ &= F [3.03] = 0.9988\end{aligned}$$

(ดูจากตารางสถิติในภาคผนวก ก. ที่คัดมาบางส่วน
จากตำราทางสถิติทั่วไป)

ดังนั้นจึงหาค่าโอกาสของการพังทลายได้เป็น

$$p(f) = 1 - 0.9988 = 0.0012$$

แสดงว่ามีโอกาส เกิดขึ้นได้ประมาณ 1.2 ครั้งใน 1000 เหตุการณ์

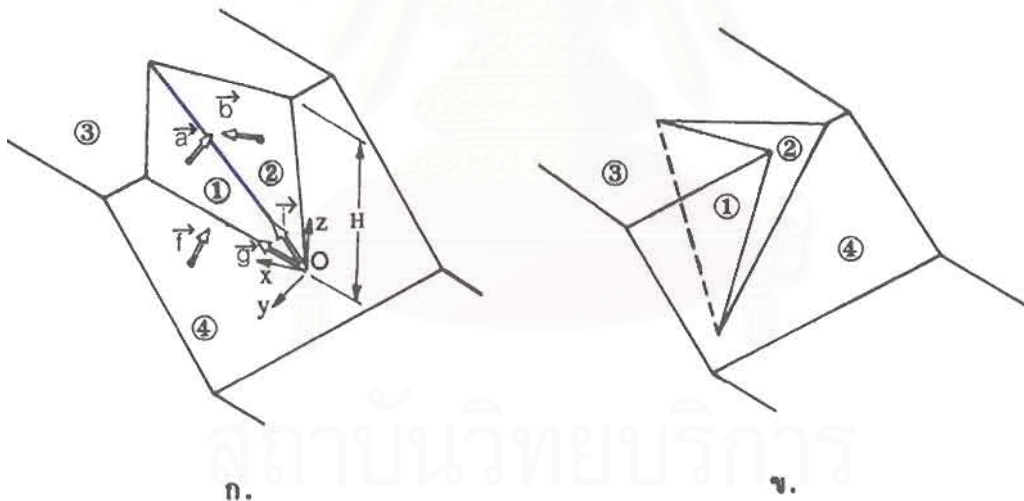
4.4 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของการพังทลายสำหรับมวลความลาดเอียงที่รูปสี่เหลี่ยม

มวลความลาดเอียงที่มีการพังทลายแบบนี้ มักเป็นมวลหินที่มีระนาบเปราะบางตัดกัน
มวลที่เกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีรูปทรงพีระมิด (คล้ายกับโครงสร้างเคระะซีครอนของแร่ซิลิเกต)

เงื่อนไขของการพังทลายนี้ ตัวแปรหลักได้แก่ ระบายรอยแตกแยกในมวลหินต้องค้ำกันเป็นมุมแหลม และมุมเอียงเทของเส้นที่เกิดจากระนาบค้ำกัน (line of intersection) จะต้องมีค่าน้อยกว่ามุมเอียงเทของผิวหน้าความลาด (slope face) นอกจากนี้ค่าของมุมเอียงเททั้งสองนี้ต้องมีค่ามากกว่ามุมเสียดทานภายในของมวลหิน

4.4.1 การแก้ปัญหากการพังทลายบนพื้นผิวของมวลรูปสี่เหลี่ยมอย่างง่าย

มวลรูปสี่เหลี่ยม (wedge) ตามปกติเกิดจากมวลสารที่เป็นหินแข็งเกร็ง ที่มีผลมาจากระบายความไม่ต่อเนื่อง เช่น ระบายรอยแตกแยก ระบายชั้นหิน มาค้ำกัน ทำให้ได้มวลสารเป็นทรงพีระมิดรูปสี่เหลี่ยม การเคลื่อนไถลของมวลสี่เหลี่ยมมักเกิดตามแนวของเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบค้ำกัน ได้แนว "daylight" ทิศทางกับมุมเอียงเทของการเคลื่อนไถล



- รูปที่ 4.17 ภาพเชิงไอโซเมตริก ที่แสดงความลาดเอียงกับมวลสี่เหลี่ยม ในภาพสี่เหลี่ยมถูกยกออกไป เพื่อให้เห็นผิวระนาบที่สัมผัสกับมวลสี่เหลี่ยม เส้นสีน้ำเงินเป็นแนวการเคลื่อนไถลของมวลสี่เหลี่ยม
- ก. กรณีปกติ (standard case) กำหนดให้ระบายเลข 1 มีมุมเอียงเทน้อยกว่าระบายเลข 2
 - ข. กรณีระบายเลข 1 วางค้ำบนระบายเลข 2 มีการเกิดไอเวอร์แซง มีมุมเอียงเทในทิศทางเดียวกัน

รายละเอียดและผลเฉลยของการแก้ปัญหาการพังทลายบนผิวหินของมวลลิม ได้ถูกนำเสนอไว้ในเอกสารหลายแห่ง เฉพาะที่ผู้วิจัยได้คัดเลือกเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดและเชิงความน่าจะเป็น ได้แก่ Hoek et al. (1973), Bray and Brown (1976), Goodman (1995), Low (1997)

1. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลลิมอย่างง่าย

กำหนดให้มีมวลลิมรูปออกตะฮีดรอนที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกันระหว่างการทำการขุดเจาะความลาดเอียงในหินแข็งเกร็ง มวลเกิดการพังทลายโดยไถลเลื่อนตามแนวเชิงเส้นแต่ไม่เกิดการหมุนตัว รูปแบบเชิงเรขาคณิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 หน้า 88 โดยมีสมมุติฐานเพิ่มเติมให้พื้นผิวตะกักชั้นบนโคค้ำบน [upper ground surface (bench)] มีความลาดชันที่มุมเอียงเทเป็นศูนย์ และไม่มีรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) เกิดขึ้นในมวลหินรูปลิม

ภาพสเก็ทซ์ของรูปที่ 4.17 นั้น หมายเลขอาระบิกเป็นสัญกรณ์ของระนาบความไม่ต่อเนื่อง หมายเลข 1 กับ 2 เป็นระนาบที่ตัดกันในความลาดของมวลหิน กำหนดให้มุมเอียงเท (dip angle) ของระนาบ 1 มีค่าต่ำกว่าระนาบ 2 ส่วนระนาบอื่น ระนาบ 3 เป็นส่วนตะกักชั้นบนโคค้ำบนความลาด ระนาบ 4 เป็นผิวหน้าความลาด

2. ขอบเขตในการหาผลเฉลย

เงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดในการหาผลเฉลยด้วยวิธีอย่างง่ายนี้ ได้แก่

ก. มีการพังทลายตามแนวเส้น และใช้ได้เฉพาะกับระนาบที่ตัดกันแค่ 2 ระนาบเท่านั้น

ข. ระนาบเปราะบางดังกล่าว ในหัวข้อ ก. จะมีแรงค้ำน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณก็ได้

ค. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของลิม เป็นดังภาพสเก็ทซ์รูปที่ 4.12 อิทธิพลของรอยแตกจากแรงดึงหรือแรงเสริมเสถียรภาพจากภายนอก ไม่ได้นำมาคำนวณร่วมด้วย

3. สัญกรณ์และพจน์ตัวแปรในการคำนวณ

นอกจากหมายเลขอาระบิกที่แสดงถึงระนาบความไม่ต่อเนื่อง หรือระนาบที่เป็นส่วนประกอบความลาดเอียง ยังมีข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณ กับสัญกรณ์และเครื่องหมายพจน์ตัวแปรต่าง ๆ ด้วย

ก. สัญกรณ์

γ = หน่วยน้ำหนักมวลสารที่เป็นหินแข็งเกร็ง

H	=	ความสูงในแนวตั้งจากจุดตัดกลางสุด (จุด 0) ถึงยอดความลาด
Ψ	=	มุมเอียงเทของระนาบ หรือเรียกว่า dip angle เป็นองศา
α	=	แนวทิศทางเอียงเทของระนาบหรือเรียกว่า dip direction เป็นองศา
c	=	โคฮีชันของแต่ละระนาบ
ϕ	=	มุมความเสียดทาน เป็นองศา
u	=	ความดันน้ำที่ขังในระนาบ 1 และ 2
η	=	สัญลักษณ์แสดงถึงการที่ความลาดเอียง (slope) เกิดโอเวอร์แฮง (overhang) จุดต่ำสุดความลาด (toe) ให้ใช้ค่า + 1 ถ้าไม่มีการโอเวอร์แฮง (ดูรูปที่ 4.17 ก.) และให้ใช้ค่า - 1 ถ้ามีการโอเวอร์แฮง (ดูรูปที่ 4.17 ข.)

ข. สัญลักษณ์พจน์ตัวแปร

		พจน์ตัวแปรที่มีเครื่องหมาย (\rightarrow) เป็นปริมาณเวกเตอร์ (vector quantity)
FS	=	ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย
A	=	พื้นที่ผิวหน้าของลิ่ม
W	=	น้ำหนักของมวลลิ่ม
N	=	แรงปฏิกิริยาจากประสิทธิผลบนระนาบ
S	=	แรงเฉือนที่กระตุ้นให้มวลเคลื่อนที่บนระนาบ
x, y, z	=	พิกัดแกนคาร์ทีเซียน มีจุดกำเนิดที่ 0 และแกน z อยู่ในแนวตั้งด้านบน ในขณะที่เดียวกันกำหนดให้ แกน y อยู่ในแนวเอียงเทของระนาบ 2
\vec{a}	=	หน่วยเวกเตอร์ในทิศทางฉากกับระนาบ 1 โดยมีส่วนประกอบเป็น (a_x, a_y, a_z)
\vec{b}	=	หน่วยเวกเตอร์ในทิศทางฉากกับระนาบ 2 โดยมีส่วนประกอบเป็น (b_x, b_y, b_z)
\vec{f}	=	หน่วยเวกเตอร์ในทิศทางฉากกับระนาบ 4 โดยมีส่วนประกอบเป็น (f_x, f_y, f_z)
\vec{g}	=	เวกเตอร์ในแนวที่เป็นเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบเลข 1 กับระนาบเลข 4 มีส่วนประกอบเป็น (g_x, g_y, g_z)
\vec{i}	=	เวกเตอร์ในแนวที่เป็นเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบเลข 1 กับระนาบเลข 2 มีส่วนประกอบเป็น (i_x, i_y, i_z)
i	=	$-i_z$

$$\begin{aligned}
 q &= \text{ส่วนประกอบของ } \vec{g} \text{ ในทิศทางของ } \vec{b} \\
 r &= \text{ส่วนประกอบของ } \vec{a} \text{ ในทิศทางของ } \vec{b} \\
 k &= \left| (\vec{i})^2 \right| = (i_x)^2 + (i_y)^2 + (i_z)^2 \\
 \ell &= W / A_2 \\
 p &= A_1 / A_2 \\
 n_1 &= N_1 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการสัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 1 และ 2} \\
 n_2 &= N_2 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการสัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 1 และ 2} \\
 |\ell i / (k)^{0.5}| &= S / A_2 \quad \text{เมื่อมีการสัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 1 และ 2} \\
 m_1 &= N_1 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการสัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 1 เท่านั้น} \\
 &\quad \text{นิพจน์ที่เป็นส่วน ในเครื่องหมายเศษส่วนของ } FS = S_1 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการ} \\
 &\quad \text{สัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 1 เท่านั้น} \\
 m_2 &= N_2 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการสัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 2 เท่านั้น} \\
 &\quad \text{นิพจน์ที่เป็นส่วน ในเครื่องหมายเศษส่วนของ } FS = S_2 / A_2 \quad \text{เมื่อมีการ} \\
 &\quad \text{สัมผัสระหว่างมวลลึ้มกับระนาบ 2 เท่านั้น}
 \end{aligned}$$

4. ผลเฉลยสำหรับการหาค่าเชิงเสถียรภาพ

Bray and Brown (1976) ได้เสนอสูตรเชิงประสมการณที่แก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์เชิงเวกเตอร์ เพื่อหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด ซึ่งเป็นผลเฉลย 4 แนวทาง คือ

ก. ในกรณีที่เกิดการสัมผัสของมวลลึ้มบนระนาบ 1 กับระนาบ 2

$$n_1 > 0 \quad \text{และ} \quad n_2 > 0$$

$$FS = [n_1 \tan \phi_1 + n_2 \tan \phi_2 + |p| c_1 + c_2] \{k\}^{0.5} |\ell i| \quad (4.54)$$

ข. ในกรณีที่เกิดการสัมผัสของมวลลึ้มบนระนาบ 1 แต่ไม่มีการสัมผัสกับระนาบ 2

$$n_2 < 0 \quad \text{และ} \quad m_1 > 0$$

$$FS = \frac{m_1 \tan \phi_1 + |p| c_1}{\left[\ell^2 (1 - a_z^2) + k u_2^2 + 2(r a_z - b_z) \ell u_2 \right]^{0.5}} \quad (4.55)$$

- ค. ในกรณีที่เกิดการสัมผัสของมวลลึ้มบนระนาบ 2 แต่ไม่มีการสัมผัสกับระนาบ 1
 $n_1 < 0$ และ $m_2 > 0$

$$FS = \frac{m_2 \tan \phi_2 + c_2}{\left[\ell^2 b_y^2 + k p^2 u_1^2 + 2(r b_z - a_z) p \ell u_1 \right]^{0.5}} \quad (4.56)$$

- ง. กรณีที่มวลลึ้มลอยบนผิวน้ำ ไม่มีการสัมผัสใด ๆ กับระนาบทั้งสอง
 $m_1 < 0$ และ $m_2 < 0$

5. ขั้นตอนการคำนวณ

การหาเสถียรภาพในเชิงกำหนด ใช้การคำนวณตัวเลขทั้งหมด 15 ขั้นตอน ตามข้อเสนอแนะของ Bray and Brown (1976) ดังนี้

- (1) กำหนดให้

$$(a_x, a_y, a_z) = \left[\begin{array}{l} \sin \psi_1 \sin (\alpha_1 - \alpha_2), \\ \sin \psi_1 \cos (\alpha_1 - \alpha_2), \cos \psi_1 \end{array} \right]$$

- (2) กำหนดให้

$$(f_x, f_y, f_z) = \left[\begin{array}{l} \sin \psi_4 \sin (\alpha_4 - \alpha_2), \\ \sin \psi_4 \cos (\alpha_4 - \alpha_2), \cos \psi_4 \end{array} \right]$$

(3) $b_y = \sin \psi_2$

(4) $b_z = \cos \psi_2$

(5) $i = a_x b_y$

(6) $g_z = f_x a_y - f_y a_x$

(7) $q = b_y (f_z a_x - f_x a_z) + b_z g_z$

- (8) ในขั้นตอนนี้ กำหนดเงื่อนไขว่า
 - ถ้าหาก $\eta q / i > 0$

$$\begin{aligned} & - \text{หรือถ้าหาก } \alpha_3 = \eta(\psi_4) \text{ กับ} \\ & \tan \psi_3 > [1 - (f_z)^2]^{0.5} / [f_z - (\eta q / i)] \end{aligned}$$

เมื่อได้ตามการพิสูจน์ค่าพจน์ 2 ครั้งข้างต้นของกรณีหลังนี้ แสดงว่าไม่มีการเกิดลิ่มให้จบการคำนวณ

$$(9) \quad r = a_y b_y + a_z b_z$$

$$(10) \quad k = [1 - (r)^2]$$

$$(11) \quad \ell = (\gamma H q) / (3 g_z)$$

$$(12) \quad p = -b_y f_x / g_z$$

$$(13) \quad n = [(\ell / k) (a_z - r b_z) - p u_1] [p / |p|]$$

ตามปกติในการคำนวณค่าแรงคั้นน้ำในระนาบ มักให้ระนาบความไม่ต่อเนื่องมีน้ำข้างอยู่เต็ม ดังนั้นค่าแรงคั้นน้ำจะเพิ่มจากจุดที่เริ่มต้น (ค่าศูนย์) ตรงผิวหน้าอิสระ ไปยังจุดที่มีค่าแรงคั้นน้ำสูงสุด (จุดใดจุดหนึ่งบนเส้นที่เกิดจากระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 2 ตัดกัน) นั่นคือ

$u_1 = u_2 = \gamma_w H_w / 6$ ซึ่ง γ_w เป็นหน่วยน้ำหนักน้ำ และ H เป็นความยาวทั้งหมด (overall length) ของมวลลิ่ม ดังนั้น ถ้า $\psi_3 = 0$ ได้ค่า $H_w = H$

$$(14) \quad n_2 = [(\ell / k) (b_z - r a_z) - u_2]$$

$$(15) \quad m_1 = [(\ell a_z - r u_2 - p u_1) [p / |p|]$$

$$(16) \quad m_2 = [(\ell b_z - r (p u_1) - u_2]$$

(17) ทำการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย (ค่า FS) โดยพิจารณาจากเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อ ที่เป็นสูตรเชิงประสมการณของผลเฉลยค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ

4.4.2 ตัวอย่างการแก้ปัญหาเชิงกำหนดของการพังทลายมวลรูปสี่ม

วิธีการหาผลลัพธ์จากโจทย์ตัวอย่างของการแก้ปัญหาการพังทลายของมวลรูปสี่ม โดย
ใช้การคำนวณค่าเชิงกำหนด ดังแนวทางข้างล่าง

โจทย์ตัวอย่าง

กำหนดให้มีการตรวจวัดหน้างานเหมืองหินแห่งหนึ่ง เพื่อหาค่าการวางตัวของระนาบ
(attitude of plane) ทำให้เขียนตารางค่าเฉลี่ยมีติความไม่ต่อเนื่อง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยการวางตัวของระนาบ สำหรับโจทย์ตัวอย่าง

ระนาบหมายเลข	1	2	3	4
มุมเอียงเท, ψ°	47	70	10	65
แนวเอียงเท, α°	52	18	45	45

เมื่อทำการตรวจวัดภาคสนามเพิ่มเติม และนำตัวอย่างหินหน้าเหมืองมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยคุณสมบัติเชิงกำลังเฉือนของวัสดุ ได้ดังนี้

มวลสี่มไม่มีการโอเวอร์แชง นั่นคือ $\eta = +1$ ค่าหน่วยน้ำหนักหินเท่ากับ 25 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. ความสูงในแนวตั้ง (H) = 1 โคฮีชันของระนาบที่ 1 เท่ากับ 25 กิโลพาสคัล และมุมเสียดทานภายในของระนาบที่ 1 เท่ากับ 30 องศา ส่วนโคฮีชันของระนาบที่ 2 เท่ากับ 0 (ศูนย์) และมุมเสียดทานภายในของระนาบที่ 2 เท่ากับ 35 องศา ความดันน้ำของระนาบทั้งสองเท่ากัน คือ 30 กิโลพาสคัล

ผลเฉลย

$$(1) (a_x, a_y, a_z) = (0.40897, 0.60632, 0.68200)$$

$$(2) (f_x, f_y, f_z) = (0.41146, 0.80753, 0.42262)$$

$$(3) b_y = 0.93969$$

$$(4) b_z = 0.34202$$

$$(5) i = 0.38431$$

$$(6) \quad g_z = -0.08078$$

$$(7) \quad q = -0.12891$$

$$(8) \quad \eta q / i < 0$$

ทดสอบค่า $\tan \psi_3 = 0.17633;$

$$[1 - (f_z)^2]^{0.5} / [f_z - (\eta q / i)] = 1.19558$$

- ตามเงื่อนไข $\tan \psi_3 < 1.19558$ แสดงว่า มวลลิมเกิดจึงทำการคำนวณในขั้นตอนต่อไป

$$(9) \quad r = 0.80301$$

$$(10) \quad k = 0.35517$$

$$(11) \quad \ell = 265.969$$

$$(12) \quad p = 4.78639$$

$$(13) \quad n_1 = 161.456$$

$$(14) \quad n_2 = -183.988$$

$$(15) \quad m_1 = 13.7089$$

$$(16) \quad m_2 = -54.3389$$

(17) $n_2 < 0$ และ $m_1 > 0$ แสดงว่ามีการสัมผัสระหว่างมวลลิมกับระนาบเพียงระนาบเดียว นั่นคือ ระนาบหมายเลข 1

- ใช้สมการที่ 4.55) หน้า 91 คำนวณหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) จะได้ผลลัพธ์ สำหรับกรณีที่มีการพังทลายของมวลลิมในขณะที่มีน้ำขังเต็มทั้ง 2 ระนาบ ค่าของ FS = 0.626 แสดงว่ามีการพังทลายเกิดขึ้น

ในทางกลับกัน ถ้าหากใช้ตัวเลขค่ามิติเชิงเรขาคณิตกับค่าคุณสมบัติของมวลสารเหมือนเดิมเพียงแต่สมมุติว่า ระนาบที่ 1 กับระนาบที่ 2 แห้ง ไม่มีน้ำขัง ค่าของ FS ใหม่ = 1.154 ซึ่งสูงกว่าหนึ่ง แสดงว่ามวลลิมมีเสถียรภาพเพียงพอถ้าไม่มีน้ำขังในระนาบ

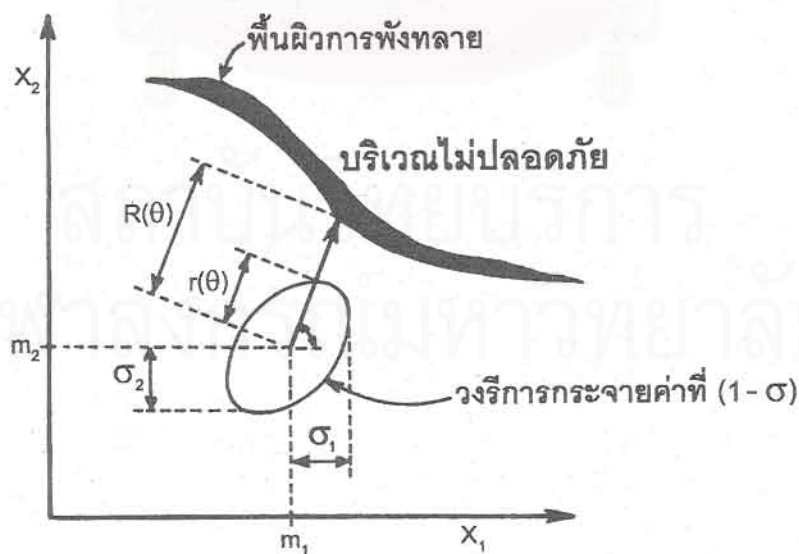
4.4.3 การแก้ปัญหาค่าการพังทลายของมวลลิมเชิงความน่าจะเป็น

ค่าตัวเลขเสถียรภาพที่คำนวณจากการสมมูลของแรง จัดเป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงอนุรักษ์ (conventional factor of safety) มีข้อด้อยตรงที่ไม่ได้สะท้อนถึง

ความไม่แน่นอนของตัวแปรหลายตัวแปรที่ประกอบอยู่ในมวลสารที่เป็นดินหรือหิน การปรับแต่งค่าเชิงสถิติโดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (weighted average) ทำให้ช่วยแก้ไขความผิดพลาดเนื่องจากการกระจายค่า (scatter) ของข้อมูลดินภาคสนาม ทั้งในกรณีของค่าคุณสมบัติมวลสารกับค่าแปรเปลี่ยน เนื่องจากภาวะเชิงธรณีวิทยาที่แตกต่างกันออกไป สำหรับมวลสารแต่ละแหล่ง วิธีการเชิงความน่าจะเป็นนี้เป็นการหาผลลัพธ์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของการพังทลายมวลรูปลิ่ม

1. การวิเคราะห์ที่ไมเมนดอันดับที่สองเพื่อหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้

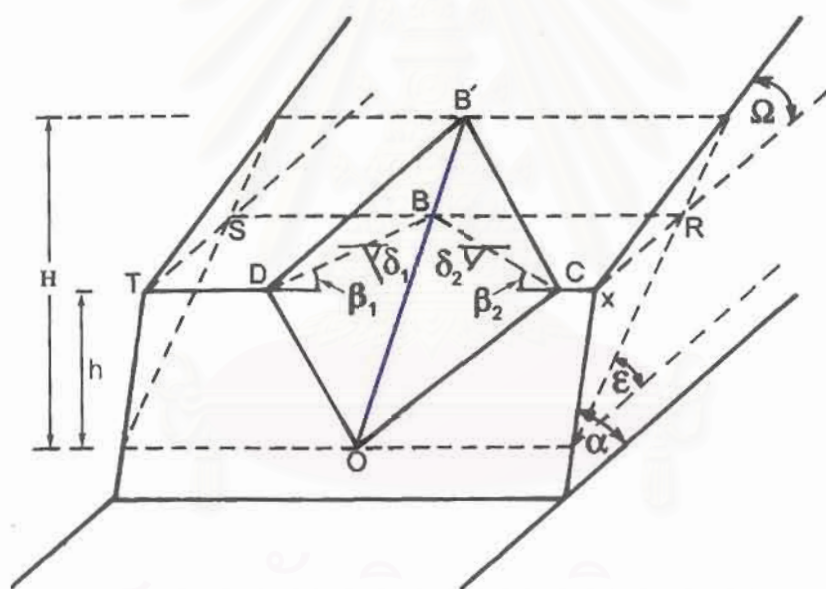
รูปแบบการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้, β ด้วยวิธี Hasofer and Lind (1974) ได้ถูกนำมาแสดงไว้อีกครั้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ลักษณะของตัวแปรทั้ง 4 ตัว ได้ใช้เหมือนเดิม คือ m_1 , δ_1 , m_2 และ δ_2 เป็นค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มสองค่า คือตัวแปร x_1 , x_2 และให้สมมุติฐานของค่า β เป็นค่าระยะค่าสุดจากจุด mean_x หรือ x_{mean} (ซึ่งเป็นแฟริมาตรเวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่ม) ไปถึงขอบของพื้นที่การพังทลาย ในหน่วยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนั้นจึงสามารถหาผลลัพธ์โดยใช้ matrix formulation จากสมการที่ 2.34 หน้า 26 โดยนิยามพจน์ตัวแปรมีความหมายเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 แสดงแนวทางหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของค่า β ในระนาบ

2. การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของมวลหินรูปเตตระฮีดรอน

หลักการเดิมที่ได้อธิบายไว้ก่อนแล้ว ซึ่งเป็นการสร้างวงรีที่สัมผัสกับขอบการพังทลาย ในระนาบของตัวแปรสองค่ายังคงใช้อยู่ แต่เมื่อจะมาประยุกต์ใช้หาค่าความเชื่อถือได้ของการพังทลายสำหรับมวลลิ่มทรงเตตระฮีดรอน ก็มีการเพิ่มสัญลักษณ์กับเครื่องหมายบ้าง ดังรูปที่ 4.19 ที่วาดใหม่ข้างล่าง กับคำอธิบายเพิ่มเติมในหน้าถัดไป



รูปที่ 4.19 การพังทลายของมวลรูปลิ่ม ภาพสเก็ทแสดงถึงค่ามุมและระนาบสามเหลี่ยม BDC ในรูป อยู่ในแนวนอน เส้น TS และ XR อยู่ในแนวนอนด้วย มุม α เอียงเทของความลาด มุม Ω เป็นมุมที่ระนาบตะพักบนทำกับแนวนอน เส้น OB เป็นเส้นที่เกิดจากระนาบที่ 1 กับ 2 ตัดกัน ส่วนค่า h เป็นความสูงในแนวดิ่งของเส้น OB ที่ตัดกับระนาบแนวนอน ค่า H เป็นความสูงในแนวดิ่งของเส้น OB' ที่ตัดกับระนาบตะพักบนที่มีค่ามุมเอียงเท ส่วนสัญลักษณ์อื่นได้ระบุแล้ว

ก. สัญกรณ์ เครื่องหมาย และสูตรเชิงประสมการณ์เพิ่มเติม

- β = คำนีความเชื่อถือได้ด้วยวิธีไฮเมนอันดับที่สอง
ของ Hasofer and Lind
- β_1 = มุมในแนวราบ หน่วยเป็นองศา ซึ่งเป็นมุมระหว่าง
แนวส้นหิน (strike) ของระนาบพิวหน้าความลาดเอียง
กับแนวส้นหินของระนาบที่ 1 ที่รองรับหรือสัมผัสมวลลิ่ม
- β_2 = มุมในแนวราบ หน่วยเป็นองศา ซึ่งเป็นมุมระหว่าง
แนวส้นหิน (strike) ของระนาบพิวหน้าความลาดเอียง
กับแนวส้นหินของระนาบที่ 2 ที่รองรับหรือสัมผัสมวลลิ่ม
- Ψ_1 = มุมเอียงเทของระนาบที่ 1 ซึ่งวัดเทียบกับเส้นแนวนอน
- Ψ_2 = มุมเอียงเทของระนาบที่ 2 ซึ่งวัดเทียบกับเส้นแนวนอน
- ϵ = มุมเอียงเทของระนาบที่ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบที่ 1
กับระนาบที่ 2 ตัดกัน วัดเทียบกับเส้นแนวนอน

ค่า ϵ เป็นองศา หาได้จากสมการ 4.57 ข้างล่าง (Low, 1997) ดังนี้

$$\tan \epsilon = \frac{\sin (\beta_1 + \beta_2)}{\sin \beta_1 \cot \delta_2 + \sin \beta_2 \cot \delta_1} \quad (4.57)$$

ในกรณีที่มีน้ำขังอยู่ในระนาบ Low (1997) ได้เสนอการแก้ปัญหาด้วยสูตรเชิง
ประสมการณ์เพิ่มเติม ดังนี้

กำหนดให้ G_w เป็นความดันน้ำแบบแผ่กระจายของพีระมิด หรือรูปกรวยเหลี่ยม
(pyramidal water pressure distribution)

$$G_{w1} = G_{w2} = 0.5 k \quad (4.58)$$

ค่าเฉลี่ยของความดันน้ำแบบแผ่กระจายบนระนาบ 1 กับระนาบ 2 คือ

$$G_{w1} = \frac{3 u_1}{\gamma_w h} ; \quad G_{w2} = \frac{3 u_2}{\gamma_w h} \quad (4.59)$$

ค่าเฉลี่ยของแรงดันน้ำบนระนาบ 1 กับระนาบ 2 คือ

$$u_1 = u_2 = \frac{\gamma_w h K}{6} \quad (4.60)$$

$$K = \frac{H}{h} = \frac{\left(1 - \frac{\tan \Omega}{\tan \alpha}\right)}{\left(1 - \frac{\tan \Omega}{\tan \varepsilon}\right)} \quad (4.61)$$

ข. ขั้นตอนในการหาค่าพจน์ตัวแปรของการคำนวณค่าเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม

การนำเสนอจะเป็นรูปแบบแผ่นตารางทำการ (spread sheet) ซึ่งได้คัดลอกจากบทความวิจัยของ Low (1997, หน้า 502-504) ค่าตัวเลขนี้สำคัญต่าง ๆ ก็ใช้ค่าเดียวกับบทความหัวข้อ "Reliability Analysis of Rock Wedges" ดังกล่าว

(1) เริ่มต้นโดยการเข้าโปรแกรมที่มีซอฟต์แวร์ Solver tool เพื่อใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ในรูปแบบแผ่นตารางทำการ (spread sheet)

(2) ทำการใส่ค่าข้อมูลเข้า (input) ลงในโปรแกรม ดังรูปที่ 4.20 หน้าถัดไป ที่เป็นการแสดงภาพหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีค่ากลุ่มข้อมูลเข้าหลายกลุ่ม

- กลุ่มค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับตัวแปรสุ่มในเชิงการปรับเปลี่ยนทิศทางของการวางตัวระนาบ คือค่า $\beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2$
- กลุ่มค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับตัวแปรสุ่มในเชิงการแรงดันน้ำและกำลังต้านทานภายในของวัสดุ คือค่า $G_{w1}, \tan \phi_1, c_1 / \gamma h$

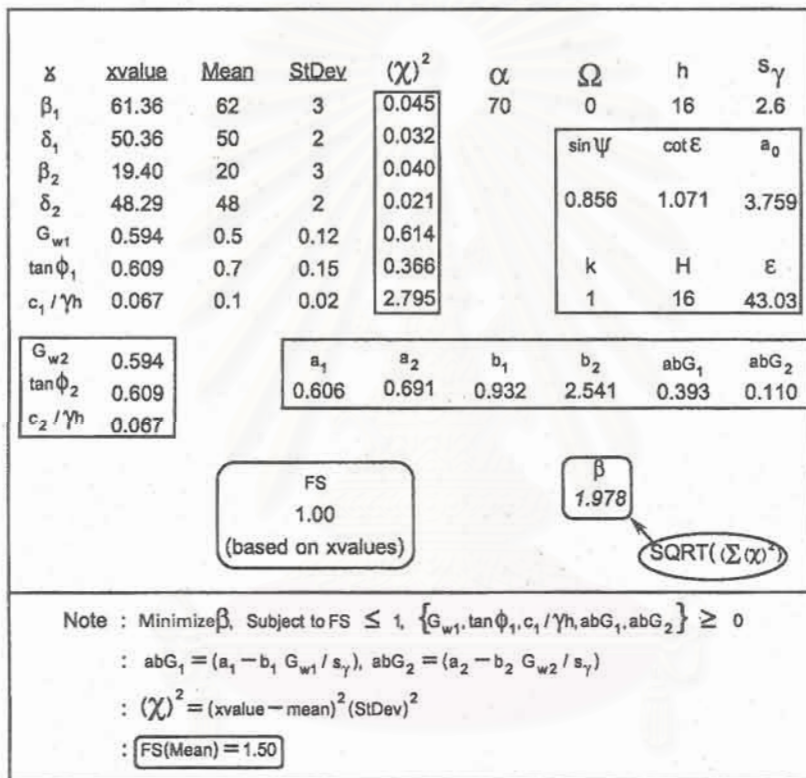
กำหนดให้ตัวแปรเหล่านี้ เป็นตัวแปรที่ไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) และมีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normally distributed) ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานในขั้นต่อไปว่า $G_{w2} = G_{w1}, \tan \phi_2 = \tan \phi_1$ และ $c_2 / \gamma h = c_1 / \gamma h$

(3) จากเหตุผลที่ตัวแปรเป็นแบบไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) จึงใช้สมการทรงรี 7 มิติแทนการหาสมการ 2 มิติของวงรีรูปแบบบัญญัติ (canonical form)

$$\text{minimize } \beta = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (4.62)$$

เงื่อนไขของสมการข้างบนคือ $FS(\beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2) \leq 1$

ดังนั้น $x_1, x_2, \dots, x_7 = \beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2, G_{w1}, \tan \phi_1, c_1/\gamma h$ ตามลำดับ
 และ m_i กับ $\sigma_i =$ ค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x_i (หลายค่า)
 ตามลำดับ ซึ่ง $i = 1, 2, \dots, 7$



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างหน้าจอของการใช้แผ่นตารางทำการเพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ข้อมูลตัวแปรอยู่ในภาวะไม่เชิงเส้น (non-linear) จำนวนมิติ 7 มิติ สำหรับฐานนิยม (mode) ของการพังทลาย 2 ระนาบ (คัดลอกจาก Fig. 7, B.K. Low, 1977, p. 502)

(4) ค่าตัวเลขในเซลล์ข้อมูล (cell) ของรูปที่ 4.20 เช่น $a_1, a_2, b_1, b_2, \dots, \sin \psi, \cot \epsilon, a_0, FS$ ที่มีกรอบล้อมรอบ ได้จากการคำนวณจากสูตรเชิงประสมการณ์ที่ปรับปรุงใหม่โดย B.K. Low ที่ได้แก้ไขจากสูตรเชิงประสมการณ์เดิมที่เสนอ

ไว้ก่อนหน้านี้นี้โดย Hoek et al. (1973) กับ Bray and Brown (1976) สูตร
 ประสมการที่ปรับปรุงใหม่นี้เป็นสมการสำเร็จรูปปิด (closed form) แทนสมการเดิมที่
 นำเสนอในรูปแบบดำเนินการโดยเวกเตอร์ (vector operation) นอกจากนี้สมการ
 ใหม่ยังใช้ได้กับกรณีที่จะหักชั้นมันไดค้ำบน มีมุมเอียงเทไปในแนวทิศทางเดียวกับความลาด
 ชั้นหน้างานขุดเจาะ

สูตรเชิงประสมการที่จำเป็นต้องใช้เพิ่มเติม ในการคำนวณค่าตัวเลขในเซลล์ข้อมูล
 (ใช้ภาพสเก็ทซ์ของรูปที่ 4.19 หน้า 97 ประกอบ) ได้แก่

$$FS = \left(a_1 - \frac{b_1 G_{w1}}{s_\gamma} \right) \times \tan \phi_1 + \left(a_2 - \frac{b_2 G_{w2}}{s_\gamma} \right) \quad (4.63)$$

$$\times \tan \phi_2 + \left(3b_1 \frac{c_1}{\gamma_h} + 3b_2 \frac{c_2}{\gamma_h} \right)$$

พจน์ s_γ หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง γ / γ_w สำหรับพจน์ a_1 , a_2 ,
 b_1 , b_2 ในสมการ 4.63 หากจากสมการที่ 4.64 ถึง 4.66 ตามลำดับ

$$a_1 = \frac{[\sin \delta_2 \cot \delta_1 - \cos \delta_2 \cos (\beta_1 + \beta_2)]}{\sin \psi \sin (\beta_1 + \beta_2)} \quad (4.64)$$

$$a_2 = \frac{[\sin \delta_1 \cot \delta_2 - \cos \delta_1 \cos (\beta_1 + \beta_2)]}{\sin \psi \sin (\beta_1 + \beta_2)} \quad (4.65)$$

$$b_1 = a_0 \sin \beta_2 \sin \delta_2 ; b_2 = a_0 \sin \beta_1 \sin \delta_1 \quad (4.66)$$

เนื่องจากยังมีพจน์ตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าอีก 2 พจน์ จึงยังไม่สามารถแก้สมการที่
 4.63 ถึง 4.66 จึงต้องนิยามค่า $\sin \psi$ กับ a_0 ดังนี้

$$\sin \psi = \sqrt{\{1 - [\sin \delta_1 \sin \delta_2 \cos (\beta_1 + \beta_2) + \cos \delta_1 \cos \delta_2]^2\}} \quad (4.67)$$

$$a_0 = \frac{\sin \psi}{[\sin (\beta_1 + \beta_2) \sin \delta_1 \sin \delta_2]^2 (\cot \epsilon - \cot \alpha)} \quad (4.68)$$

$$h = \frac{DC}{(\cot \varepsilon - \cot \alpha) \times (\cot \beta_1 + \cot \beta_2)} \quad (4.69)$$

ค่าระยะ DC ในสมการข้างบน เป็นมิติที่ทราบค่าและวัดจากภาคสนาม (ดูรูปที่ 4.19 หน้า 97 ประกอบ)

เมื่อต้องการหาปริมาตรของลิ่ม (V) ที่มีรูปทรงแบบเคระเซีครอน มีความสัมพันธ์กับค่าของ h และ K และมุมเอียงเทในทิศทางอื่น ๆ ดังนี้

$$\frac{V}{h^3} = \frac{K}{6} \times (\cot \beta_1 + \cot \beta_2) \times (\cot \varepsilon - \cot \alpha)^2 \quad (4.70)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าคุณสมบัติกับค่ามิติเชิงเรขาคณิตของภาพสเก็ตรลงในสมการที่ 4.61 ถึง 4.70 ร่วมกับการแก้สมการความสัมพันธ์พจน์ตัวแปรของการพังทลายรูปลิ่ม [สมการที่ 4.57 หน้า 98 ถึงสมการ 4.61 หน้า 99] สามารถทำการบรรจุเป็นข้อมูลเข้าในเซลล์ของหน้าจอกอมพิวเตอร์ในรูปที่ 4.20 หน้า 100 ได้

หลักการที่สำคัญที่ได้กล่าวมาแล้วคือ ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่ไม่มีสหสัมพันธ์ และมีการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนปกติ นอกจากการตั้งสมมุติฐานให้ $G_{w2} = G_{w1}$, $\tan \phi_2 = \tan \phi_1$ และ $c_2 / \gamma h = c_1 / \gamma h$ แล้วยังมีสมมุติฐานเพิ่มเติมอีกว่า สมการที่หาค่าได้ในเซลล์ข้อมูลใช้ค่า xvalue (คอลัมน์ที่ 2 ในจอภาพของรูปที่ 4.20) ไม่ใช่ค่า mean (คอลัมน์ที่ 3 ในจอภาพของรูปที่ 4.20)

ค. การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของการพังทลายมวลรูปลิ่ม

ดัชนี β สำหรับฐานนิคมที่มีสองระนาบ เมื่อต้องการหาค่าที่เป็นระยะสั้นสุดหรือเหมาะสมที่สุด สำหรับใช้หาความเชื่อถือได้ของการพังทลายรูปลิ่ม เมื่อทำปฏิบัติการในโปรแกรมที่คำนวณและแสดงผลโดยแผ่นตารางทำการ (spread sheet) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) เริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ค่า xvalues = mean values ทำได้โดยการ copy ค่า mean values แล้ว paste บนค่า xvalues

(2) เมื่อดำเนินการในขั้นตอน (1) เสร็จสิ้น ค่าตัวเลข FS ในขั้นตอนนี้ จะมีค่าเท่ากับ 1.50 (ดู footnote หน้าจอของรูปที่ 4.20) เพราะคำนวณตามค่าเฉลี่ย

(3) ทำการเรียกโปรแกรมย่อยช่วยการคำนวณ ได้แก่ Solver tool ที่บรรจุใน dialog box และทำการกำหนดค่าดังนี้

- ให้ค่า β ในเซลล์ เท่ากับ ค่าต่ำสุด (minimum) ซึ่งกระบวนการนี้ทำได้โดย เปลี่ยนค่า "xvalue" เซลล์ ตามเงื่อนไข:

$$FS \leq 1, \quad a b G_1 \geq 0, \quad a b G_2 \geq 0$$

(4) ขั้นตอนในข้อ (3) สามารถทำได้โดยเพิ่มเงื่อนไขบังคับ (constraint) สำหรับนิยามค่าพิสัย (range) ของการเปลี่ยนเซลล์ที่สามารถแปรผันได้

ตัวอย่างของการนิยามค่าพิสัยของคอลัมน์ "xvalue" ทั้งหมดให้มีเงื่อนไขบังคับที่มี ค่า $xvalue \geq 0$ และค่ามุมระนาบต่าง ๆ ($\beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2$) $\leq 180^\circ$ ตามปกติโปรแกรมย่อยที่เป็น Solver นี้ สามารถมีเงื่อนไขบังคับได้ถึง 500 เงื่อนไข ซึ่งรวมถึงขอบเขตบนและขอบเขตล่างด้วย

(5) ค่าผลลัพธ์ของดัชนีความเชื่อถือได้ (β) [คำนวณตามสมการที่ 4.62 หน้า 99] เท่ากับ 1.978 สำหรับระนาบที่มีฐานนิยม 2 ฐาน ดังที่แสดงค่าไว้ในภาพหน้าจอของรูปที่ 4.20 ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ กับงานขุดเจาะใต้พื้นผิวดิน

งานการขุดเจาะใต้พื้นผิวดินเชิงวิศวกรรมโยธาหรือวิศวกรรมเหมืองแร่ เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อการจราจร หรืออุโมงค์เพื่อการขนส่งลำเลียงแร่หรือลำเลียงหิน ตลอดจนถึงขั้นการทำเหมืองใต้ดิน

5.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพการขุดเจาะเปิดช่องว่างใต้พื้นผิวดิน

เมื่อทำการขุดเจาะมวลสารใต้พื้นผิวดิน ซึ่งเป็นช่องว่างเปิด (opening) ในมวลดินหรือมวลหิน เป็นลักษณะการเปิดช่องว่างในรูปแบบของอุโมงค์ (tunnel) หรือเป็นการเปิดครีฟท์ (drift) โดยทั่วไปรูปหน้าตัดของช่องว่างเปิดเหล่านี้ เป็นรูปวงกลม หรือเป็นรูปเกือกม้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพเบื้องต้น เป็นการหาค่าความเค้นที่จุดขอบอุโมงค์ เพื่อหาค่าความเค้นจุดวิกฤต เช่น ถ้าหากค่าความเค้นดิ่งที่จุดนั้นเท่ากับค่ากำลังวัสดุดึงในมวลสาร ก็แสดงว่าตัวเลขค่าปัจจัยความปลอดภัยเท่ากับหนึ่ง

ในการหาเสถียรภาพยังต้องคำนึงถึงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของช่องว่างเปิด ในกรณีที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าขนาดมิติอื่นก็ใช้การวิเคราะห์เชิงระนาบความเค้น (plane stress) แต่ในกรณีของอุโมงค์ที่มีความหนาหรือความสูงของมวล มีมากกว่าขนาดมิติของความกว้างและความยาว ก็ใช้การวิเคราะห์เชิงระนาบความเครียด (plane strain)

5.2 การคำนวณความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลายสำหรับอุโมงค์ใต้ผิวดิน

แนวทางของการใช้หาค่าโอกาสของความน่าจะเป็นสำหรับช่องว่างเปิดใต้พื้นผิวดินที่จะมีโอกาสพังทลาย มีระบุไว้ในเอกสารเรื่อง "Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock" (Mahtab and Grasso, 1992,

หน้า 111-118) และผู้วิจัย ได้ดัดแปลงกับ เรียบเรียงใหม่ เพื่อให้เหมาะกับหัวข้อการวิจัย ในเรื่องนี้และง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงสถิติ

5.2.1 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

กำหนดให้มีการแจกแจงของฟังก์ชันตัวแปรสุ่ม ที่ค่าตัวแปรสุ่มที่ก่อให้เกิดมีการเปลี่ยนรูปร่างและปริมาตร (deformation) ของโครงสร้างมวลสาร มีสัญลักษณ์เป็น Q ซึ่งหมายถึงน้ำหนักบรรทุก (load) ส่วนค่าตัวแปรสุ่มที่ต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างและปริมาตร มีสัญลักษณ์เป็น R หมายถึง ความต้านทาน (resistance) หรือกำลังวัสดุมวลสาร

ถ้าหากเขียนเป็นสมการของค่าโอกาสการพังทลาย ในรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจง (distribution function)

$$P(f) = P[Q > R] = \int_0^{\infty} \{1 - F_Q(x)\} \{f_R(x)\} dx \quad (5.1)$$

ในสมการ 5.1 ฟังก์ชันการแจกแจง F_Q และ F_R เป็นตัวแปรสุ่มที่ไม่พึงพิงของน้ำหนักบรรทุกกับความต้านทานตามลำดับ สำหรับค่าลิมิตของอินทิกรัล เริ่มจากศูนย์ถึงอนันต์ เพื่อให้ตรงกับสภาพในธรรมชาติของขีดจำกัดเชิงกายภาพ

เมื่อทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของโอกาสการพังทลาย [พจน์ $p(f)$] กับ ค่ากลางปัจจัยความปลอดภัย (พจน์ CFS) ค่าการแจกแจงตัวแปรสุ่ม [$\sigma(Q)$, $\sigma(R)$] กับ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน [$V(Q)$, $V(R)$]

เริ่มจากสมมติฐานแบบง่ายนี้ให้ค่าตัวแปรสุ่ม Q และ R มีการแจกแจงค่าแบบปกติ จะเขียนสมการแทนค่าตัวแปรสุ่มในลักษณะคล้ายคลึงกับที่ระบุไว้ในบทที่ 2 แต่แสดงไว้ในรูปแบบใหม่ของฟังก์ชันการแจกแจงค่า (distribution function) เป็น

$$F(x) = 1 / \sigma \{2\pi\}^{0.5} \int_{-\infty}^x \exp \left[-(x - x_{ave})^2 / 2(\sigma)^2 \right] dx \quad (5.2)$$

สมการที่ 5.2 เขียนในรูปแบบฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) เป็น

$$f(x) = 1 / \sigma \{2\pi\}^{0.5} \exp \left[-(x - x_{ave})^2 / 2(\sigma)^2 \right] \quad (5.3)$$

พจน์ค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในสมการที่ 5.3 หาได้จากความสัมพันธ์

$$x_{ave} = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.4)$$

$$\sigma = \left[\left\{ \frac{1}{(n-1)} \right\} \left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ave})^2 \right\} \right]^{0.5} \quad (5.5)$$

ดังนั้นถ้าหากให้ฟังก์ชันการแปรผันแบบเบี่ยงเบนปกติสำหรับช่วงเวลา t มีค่าเป็น

$$t = \frac{(x - x_{ave})}{\sigma} \quad (5.6)$$

ทำให้เขียนสมการของฟังก์ชันการแจกแจงสำหรับโอกาสการพังทลายเป็น

$$P(f) = 1 / (2\pi)^{0.5} \int_{-\infty}^{r_d} e^{-t^2/2} dt \quad (5.7)$$

ค่าลิมิตสูงของ r_d นิพจน์ที่เป็นอินทิกรัล หากจากการพิจารณาว่าโอกาสการพังทลายเกิดขึ้นได้เมื่อความต้านทานน้อยกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำ โดยหากจากค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน ได้แก่

$$r_d = \frac{[\text{mean}_R - \text{mean}_Q]}{[(\sigma_R)^2 + (\sigma_Q)^2]^{0.5}} \quad (5.8)$$

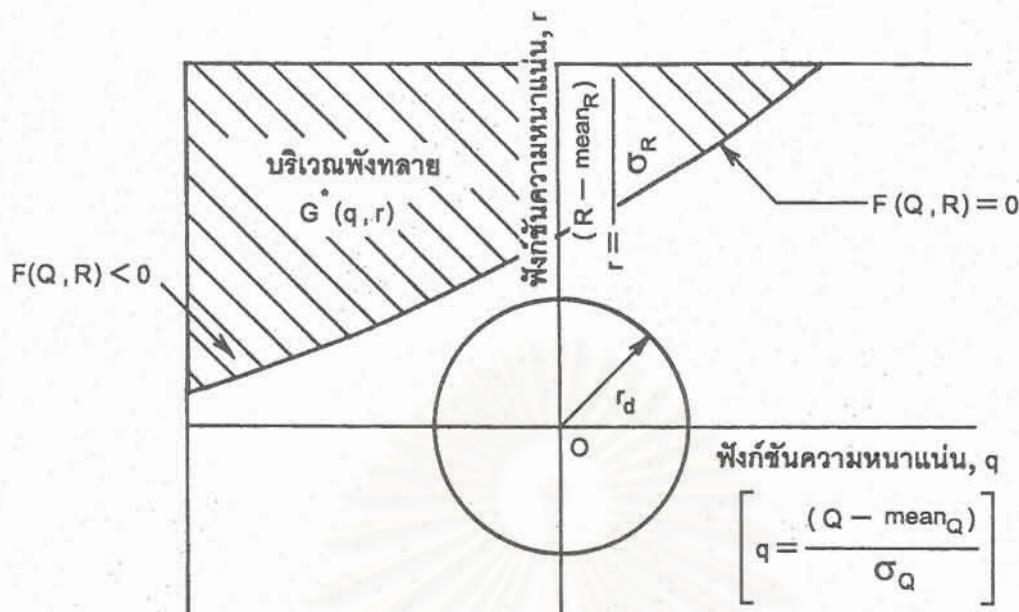
5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณโอกาสการพังทลายของการเปิดช่องว่างใต้ผิวดิน

ตัวอย่างที่ใช้นี้ได้มาจากบทความวิจัยของ Hasofer and Lind (1974) ที่ตั้งสมมุติฐานให้มีการขุดเจาะอุโมงค์ใต้พื้นผิวในหินชนิดหนึ่ง

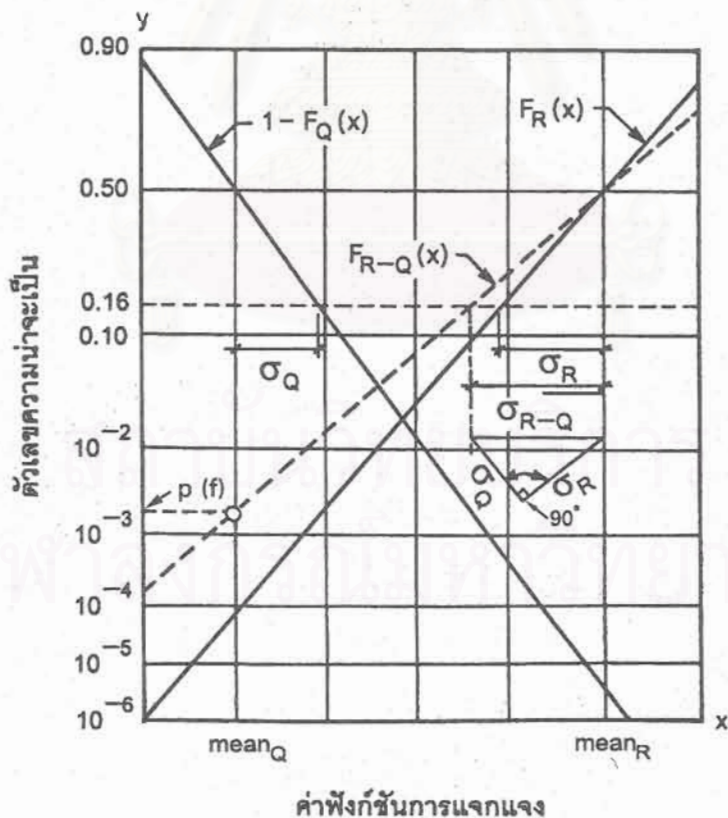
ในรูปที่ 5.1 หน้าถัดไป เป็นการสเก็ทซ์ภาพสำหรับการแปลความหมายเชิงกายภาพของงานการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีรัศมีของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมเท่ากับ r ถ้าหากต้องการจะหาบริเวณที่จัดว่าปลอดภัย (safe region) กับบริเวณที่เกิดการพังทลาย (failure region) สำหรับดัชนีความเชื่อถือได้ (reliable index) ซึ่งกำหนดให้การพังทลายจะเกิดขึ้นได้ระยะทางจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์ถึงขอบอุโมงค์ (ค่าระยะรัศมี) ต้องมีค่าน้อยกว่าระยะทางจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์ถึงขอบของพื้นที่การพังทลาย

กำหนดให้ $G(q, r)$ เป็นค่าแจกแจงเบี่ยงเบนปกติของฟังก์ชันที่เป็นบริเวณปลอดภัย ส่วน $G^*(q, r)$ เป็นค่าแจกแจงเบี่ยงเบนปกติของฟังก์ชันที่เป็นบริเวณพังทลาย การคำนวณใช้กราฟผลเฉลยซึ่งจัดทำโดยทีมงานวิจัยของ NLEC เมืองลิสบอน ประเทศโปรตุเกส โดยกราฟนี้ได้ตีพิมพ์ในหน้า 115 ของเอกสารที่เขียนโดย Mahtab and Grasso (1992) และผู้วิจัยโครงการนี้ได้คัดลอกไว้ และนำมาพิมพ์ซ้ำอีก

ในรูปกราฟที่ 5.2 หน้า 95 แกนในแนวนอน (abscissa) ที่เป็นพิกัดที่หนึ่ง มีพจน์ mean_Q เป็นจุดกำเนิดแทนค่าตัวแปรสุ่ม Q และ R



รูปที่ 5.1 คำนวณความเชื่อถือได้ของตัวแปรสุ่มสองค่า ซึ่งเป็นแนวทางหาโอกาสการฟังก์ทลายของอุโมงค์วงกลม ที่จุดเจาะได้พื้นผิวในหินชนิดหนึ่ง

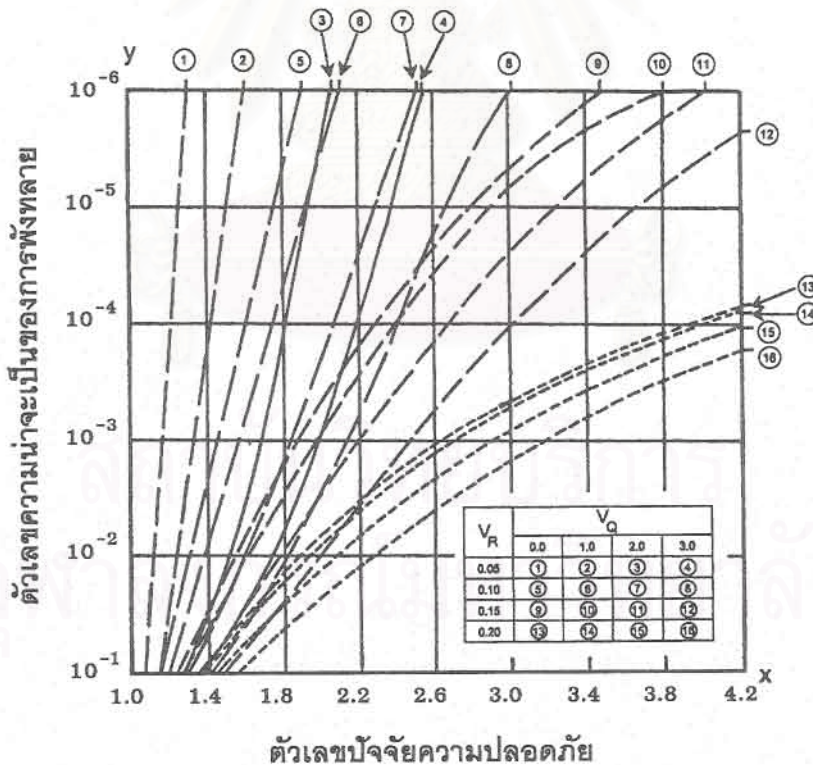


รูปที่ 5.2 กราฟการคำนวณค่าโอกาสการฟังก์ทลายสำหรับตัวแปรสุ่มแบบเบี่ยงเบนปกติของ Q และ R ที่ใช้กับการหาเสถียรภาพการขุดเจาะอุโมงค์ (รูปที่ 5.1)

ในขณะที่แกนในแนวดิ่ง (ordinate) ที่เป็นพิกัดที่สองเป็นค่าตัวเลขความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$]

เส้นตรงจำนวน 3 เส้นในกราฟของรูปที่ 5.2 เป็นฟังก์ชันตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบเบี่ยงเบนปกติ ได้แก่ $F_Q(x)$, $F_R(x)$ และ $F_{R-Q}(x)$ จุดส่วนร่วมของเหตุการณ์ (intersection) เป็นจุดตัดของที่เกิดระหว่าง เส้นตรงของฟังก์ชันการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนปกติของ $F_{R-Q}(x)$ กับเส้นระดับที่ $mean_Q$ ของแกนตั้งจะเป็นค่า $p(f)$

ในทำนองเดียวกัน ที่ค่า $p(f)$ ที่กำหนดให้ (ให้ค่าความน่าจะเป็น = 0.16) สามารถหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละฟังก์ชันตัวแปรสุ่มทั้ง 3 ค่าได้ ค่าเบี่ยงเบนที่สามารถอ่านค่าระยะในแนวนอนจากกราฟของรูปที่ 5.2 ได้แก่ V_Q , V_R , V_{R-Q}



รูปที่ 5.3 กราฟการคำนวณค่าโอกาสการพังทลาย สำหรับสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มแบบเบี่ยงเบนปกติ Q และ R ที่ใช้กับค่าปัจจัยความปลอดภัย

ต่อมาเมื่อต้องการหาพจน์ตัวแปรของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน $\{V(\)\}$ กับค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ก็หาจากสมการที่ 5.8 ได้ค่าความสัมพันธ์ดังนี้

$$r_d = \frac{[1 - FS]}{[(V_Q)^2 + (FS)^2 (V_R)^2]^{0.5}} \quad (5.9)$$

กราฟในรูปที่ 5.3 หน้าที่ 96 ได้คัดลอกมาจากเอกสารที่ Martab and Grasso เรียบเรียงไว้ (หน้า 117) ซึ่งเป็นการศึกษาโอกาสการพังทลายสำหรับค่าความแปรปรวนที่กำหนดไว้ดังนี้

- V_R มีค่าหลายค่าได้แก่ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20
- V_Q มีค่าหลายค่าได้แก่ 0.0, 0.10, 0.20 และ 0.30 สำหรับกรณีที่ V_Q มีค่าเป็น 0 แสดงว่าเป็นน้ำหนักบรรทุกเชิงกำหนด (deterministic load)

เส้นกราฟหลายเส้น (มีทั้งหมด 16 เส้น) ในรูปที่ 5.3 เกิดจากการจัดหมู่ (combination) ผสมกันของพจน์ V_Q กับพจน์ V_R ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า $V_Q = 0.0$ และ $V_R = 0.05$ ก็ให้อ่านจุดพิกัดต่าง ๆ ที่เส้นกราฟหมายเลข 1 เป็นต้น

ความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.3 ยังแปลความหมายอีกรูปแบบหนึ่งว่า เมื่อกำหนดค่าโอกาสการพังทลายที่ค่าตัวเลขหนึ่ง ค่าตัวแปรของปัจจัยความปลอดภัยจะมีค่าสูงขึ้นถ้าหากค่าตัวแปรของพจน์ V_Q กับ V_R มีค่าสูงด้วย

ในทางกลับกันค่าตัวเลขโอกาสการพังทลายมีได้หลายค่า แสดงว่ามีความแปรปรวนสูงสำหรับค่ากำลังวัสดุในมวล (R) และค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อระบบ (Q) เช่น ถ้าหากค่า V_R กับ V_Q มีค่ามาก (สูง) กว่า 0.2 ค่าตัวเลขโอกาสการพังทลายจะมีค่าไม่น้อยกว่า 10^{-4} โดยที่ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยมีผลกระทบน้อยมาก

5.3 การคำนวณหาเสถียรภาพของเหมืองใต้ดินแบบ Room and Pillar

การทำกรเปิดช่องว่างใต้ดิน สำหรับงานเหมืองแร่ รูปแบบหนึ่งที่มีผู้นิยมใช้ในการทำเหมืองใต้ดิน ได้แก่ วิธีการเปิดเหมืองแบบ Room and Pillar ปกติใช้กับเหมืองถ่านหินที่มีชั้นสายถ่านมีเนื้อเดียวกันตลอด และความสมบูรณ์ของถ่านหินมีตลอดทั้งสาย

5.3.1 แนวทางที่นิยมในการออกแบบเหมือง Room and Pillar

ลักษณะของสายแร่แผ่กระจายในแนวค่อนข้างราบ และมีความหนาของชั้นสายแร่ตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไป ส่วนที่เป็นแร่ถ่านหินก็จะขุดเจาะแล้วลำเลียงออกไปทางปากอุโมงค์

ขนส่งหรือทางปล่อง ดังนั้นเมื่อนำแร่ออกไปแล้วจึงยังเหลือเป็นเสาค้ำยันรูปสี่เหลี่ยม (นิยมใช้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือจตุรัส) กลายเป็นส่วนของพิลลาร์ (pillar) สำหรับช่องว่างที่แร่ถ่านหินถูกขุดเจาะและลำเลียงออกไป เหลือเป็นโพรงช่องว่างอยู่ เรียกว่า room รูปที่ 5.4 หน้าถัดไป เป็นภาพตัดขวาง (cross section) กับภาพผัง (plan view) ของการทำเหมืองใต้ดินของ Room and Pillar ในรูปแบบหนึ่งที่มีพื้นที่ช่องว่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งหาค่าน้ำหนักบรรทุกบนพิลลาร์ (pillar load) ที่กระทำบนมวลสาร นั้นคือ

$$\sigma_p = \frac{0.025 H [(W + B)(L + B)]}{W \times L} \quad (5.10)$$

นิพจน์ $0.025 H$ อาจสามารถแทนค่าด้วยความดันในแนวตั้งที่เป็นจริง (virgin vertical pressure) เกิดจากมวลสารส่วนบนเพียงอย่างเดียว สูตรเชิงประสมการณ์นี้ ตั้งสมมุติฐานให้มีความดันเพิ่มสูงในอัตราเท่ากับ 0.025 เมกะพาสคัล ต่อความลึกทุกกระยะ ลึกต่ำลง 1 เมตร ความหมายของพจน์ตัวแปรที่เหลือในสมการที่ 5.10 คือ

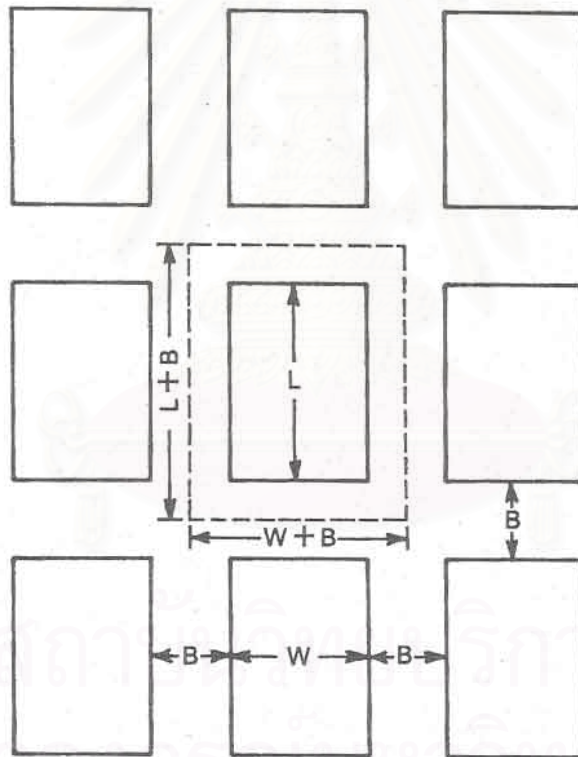
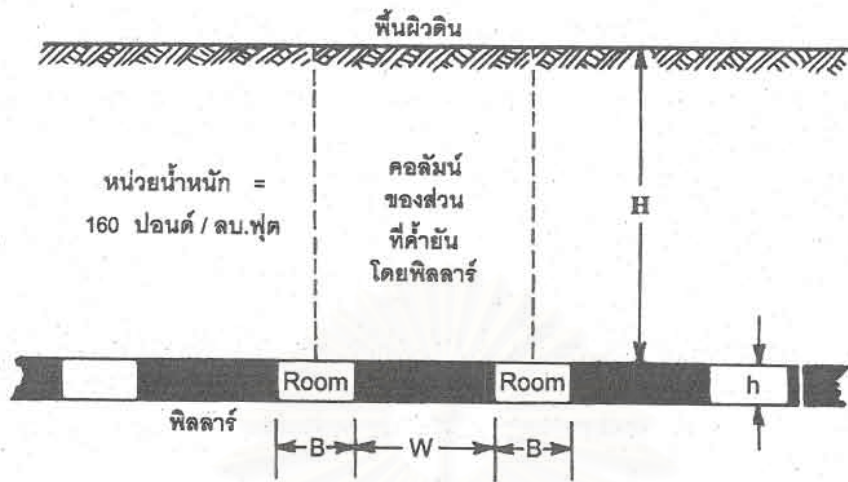
- σ_p = ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกเชิงสถิติศาสตร์ที่กระทำบนพิลลาร์ หน่วยเป็น เมกะพาสคัล
- B = ความกว้างของทางลำเลียงชั้นถ่านหิน หน่วยเป็นเมตร
- H = ความลึกที่สายชั้นถ่านหินอยู่ใต้ระดับพื้นผิว หน่วยเป็นเมตร
- L = ความยาวของพิลลาร์ หน่วยเป็นเมตร
- W = ความกว้างของพิลลาร์ หน่วยเป็นเมตร

ในกรณีที่มีรูปแบบเชิงเรขาคณิตของพิลลาร์เปลี่ยนไป เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส (square) สูตรเชิงประสมการณ์จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\sigma_p = 0.025 H \left[\frac{(W + B)}{W} \right]^2 \quad (5.11)$$

5.3.2 การเลือกค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย

เมื่อคำนวณค่าเสถียรภาพของเหมืองใต้ดินด้วยวิธี Room and Pillar ที่ใช้ค่าขีดจำกัดเชิงแรงหรือความเค้นที่มากกระทำบนเสาค้ำยันของช่องว่างในเหมืองใต้ดิน ได้ค่า



$$S_p = \frac{1.1 H [(W + B)(L + B)]}{W \times L}$$

รูปที่ 5.4 แนวทางที่นิยมสำหรับการออกแบบเหมือนได้ดินแบบ Room and Pillar

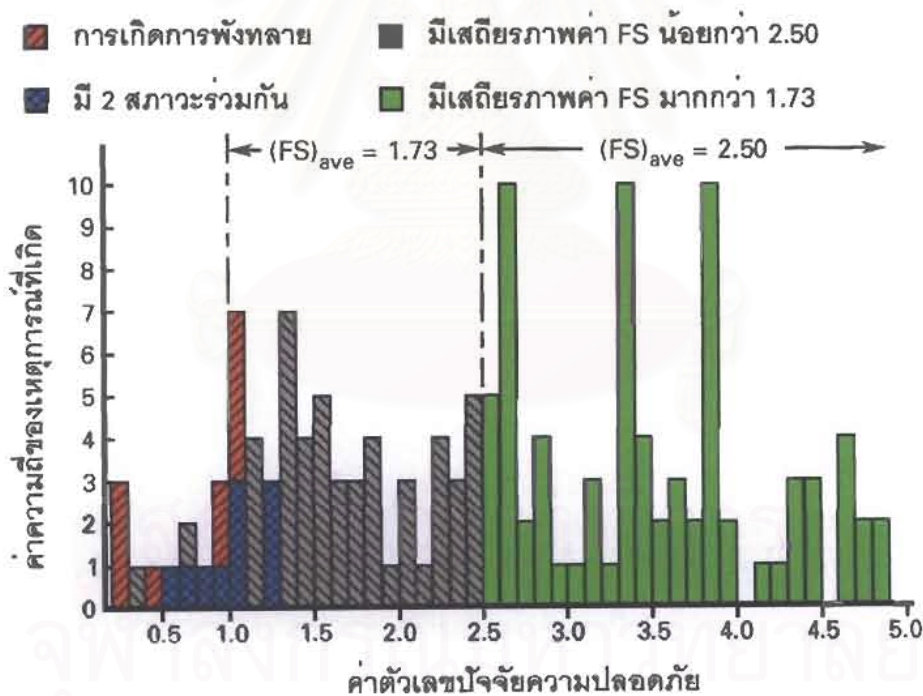
ก. ภาพตัดขวางของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการทำเหมือง

ข. ภาพผังของเหมืองแสดงในส่วนที่เป็นเสาค้ำยันกับส่วนที่เป็นช่องว่าง

$$FS = \frac{R_p}{\sigma_p} \quad (5.12)$$

พจน์ R_p ในสมการที่ 5.12 คือ ค่ากำลังวัสดุของพิลลาร์ที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนพจน์ σ_p คือน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่กระทำต่อพิลลาร์

การระบุเสถียรภาพโครงสร้างสิ่งก่อสร้างได้ดินในที่นี้ ก็เช่นเดียวกับโครงสร้างอื่นที่กำหนดให้ค่า FS มากกว่า แต่ในสภาพความเป็นจริง ได้มีการเก็บข้อมูลเหมืองถ่านหินที่มีการขุดเจาะแบบ Room and Pillar เปรียบเทียบกับค่า FS ที่หาได้จากสมการที่ 5.12 Bieniawski (1984, หน้า 209) ระบุว่าค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) กับความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลาย $[p(f)]$ น่าจะมีความสอดคล้องกันเพียง 50 % ค่าความปลอดภัยที่แท้จริงค่าตัวเลข FS ควรจะเกินหนึ่ง



รูปที่ 5.5 ฮิสโทแกรมจากการศึกษากรณีการพังทลายในเหมืองใต้ดิน เปรียบเทียบกับค่า FS ที่ใช้ ในบางกรณีมีการพังทลาย ถึงแม้ค่า FS มากกว่าหนึ่ง ค่าเฉลี่ย (กรณีเหมืองใต้ดิน มีเสถียรภาพ ที่ค่า FS ต่ำกว่า 2.5) ของ $FS = 1.73$

ปัญหาที่ควรคำนึง ได้แก่ ค่าตัวเลขเสถียรภาพที่ระดับใดที่เป็นที่ยอมรับของการทำเหมืองแร่ถ่านหิน จากการสำรวจเหมืองได้คืนประเภทนี้ในสหรัฐอเมริกา มีผลของเหตุการณ์ที่บันทึกเป็นกรณีศึกษาการพังทลายจำนวนเป็นจำนวน 174 เหมือง ซึ่งรวมทั้งการพังทลาย 3 เหมือง กับรวมกับกรณีศึกษาในประเทศอื่นอีก 20 กรณี

ข้อสรุปของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่พล็อตในรูป 5.5 หน้า 112 ค่าพิสัยของ FS ที่อยู่ระหว่าง 1.5 - 2.0 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับสภาวะของเหมืองแร่ถ่านหินในสหรัฐอเมริกา กรณีของค่าเฉลี่ยเชิงเสถียรภาพ มีค่าเฉลี่ยของ FS ที่ 1.73 (ดูรูป 5.5)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

กรณีศึกษาสำหรับเรื่อง ความเสี่ยงของการขุดเจาะ

งานการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขุดเจาะภายในประเทศ ที่เน้นเรื่องความเสี่ยงเชิงรูปแบบความน่าจะเป็น ยังไม่มีการวิจัยอย่างจริงจัง การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ยังคงเป็นในรูปแบบของการหาค่าตัวเลขเสถียรภาพด้วยวิธีเชิงกำหนด อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเสนอแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ กับการจัดการความเสี่ยงในการขุดเจาะเชิงความน่าจะเป็น จึงได้นำตัวอย่างกรณีศึกษาในเอกสารของต่างประเทศมาเป็นแนวทางเบื้องต้นก่อนจะใช้ค่าตัวเลขคุณสมบัติมวลสาร กับขนาดมิติเชิงเรขาคณิตของหน้างานการขุดเจาะภายในประเทศ

6.1 แนวทางในการใช้แผนตารางทำการเพื่อวิเคราะห์ผล

ข้อเด่นสำหรับการใช้วิธีการประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็นนั้น ต้องการแก้ไขจุดบกพร่องของการวิเคราะห์หาเสถียรภาพเชิงอนุกรมที่ไม่สามารถจัดการกับปัญหาในเรื่องความไม่แน่นอนของตัวแปรหลักในระบบ หรือจัดการกับกระจายค่าของคุณสมบัติของตัวแปรที่ไม่สามารถหาค่าตัวแทน (representative value) ที่น่าเชื่อถือได้

6.1.1 การวิเคราะห์หาค่าความเชื่อถือได้ในระบบ

จากการทบทวนแนวทางการวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อหาความเชื่อถือได้ในระบบ ที่ผู้วิจัยได้แสดงวิธีการโดยย่อไว้ในหลายหัวข้อของรายงานฉบับนี้ เช่น หัวข้อที่ 2.4 กับ 2.5 ของบทที่ 2 ที่เป็นการหาขอบเขตการพังทลายและดัชนีความเชื่อถือได้ ตลอดจนตัวอย่างในบทที่ 4 ที่เป็นการประยุกต์ใช้กับงานขุดเจาะบนพื้นผิวดิน ทั้งในรูปแบบการพังทลายเชิงระนาบ การพังทลายแบบอาร์ก และการพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยม และสุดท้ายก็ประยุกต์ใช้กับตัวอย่างงานขุดเจาะใต้พื้นผิวดินของการขุดเจาะอุโมงค์ในบทที่ 5

หลักการที่ใช้เพื่อให้กระบวนการคำนวณหาผลลัพธ์มีประสิทธิภาพสูงนั้น ใช้การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) ที่แปลงค่าบนพื้นผิวของการพังทลายที่อยู่ในปริภูมิที่มีการลดการ

แปรผันในระบบ ดังนั้นระยะทางที่สั้นที่สุดที่วัดจากพื้นผิวการพังทลายที่มีการแปลงค่า ไปถึงจุดกำเนิดของตัวแปรที่ลดค่า ก็คือ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index)

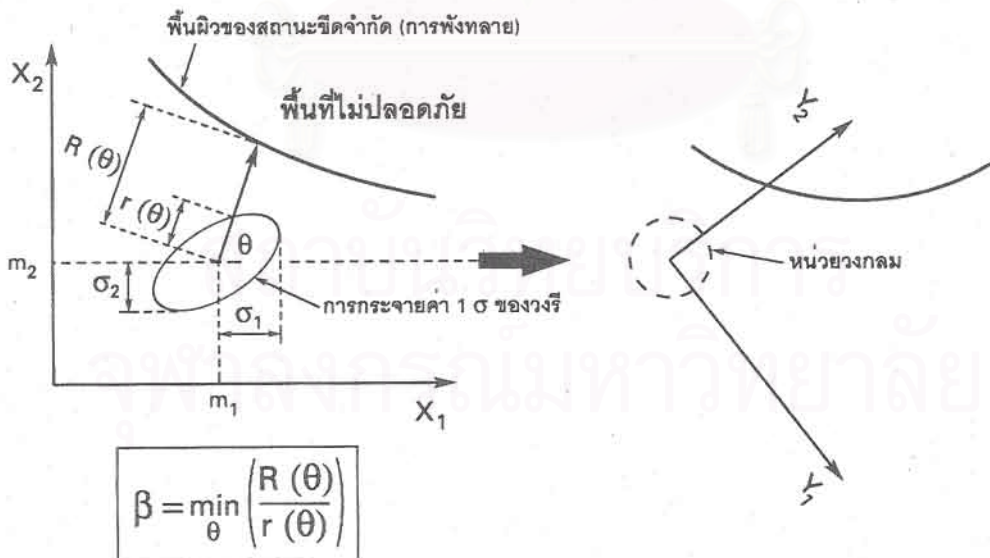
รูปที่ 6.1 ข้างล่างเป็นการทบทวนแนวทางวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้อีกครั้ง ทั้งนี้ เริ่มต้นจากที่ทำการเคลื่อนที่กรอบอ้างอิง (frame of reference) แบบหมุนไปยังแกนใหม่ที่เป็นแกน Y_1 กับแกน Y_2 (ดูรูปที่ 6.1 ประกอบ) ซึ่งแต่ละแกนขนานกับแกนมุขสำคัญ (principal axis) ของจุดกำเนิดวงรีการกระจายค่าตัวแปรสุ่ม (หรือเป็นจุดกำเนิดของทรงรีที่มีมิติสูงขึ้น) กระบวนการต่อไปมีการเลื่อนขนาน (translation) กับทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized) ของตัวแปรสุ่ม จนทั้งนี้ได้รับการกระจายค่า 1σ (one sigma) สำหรับทรงรีในปริภูมิเดิมที่จุดกำเนิด กลายเป็นจุดศูนย์กลางทรงกลมหน่วยหนึ่งซึ่งจุดกำเนิดปริภูมิของการแปลงค่า (transformed space)

ผลเฉลยสำหรับการแก้ปัญหานี้ เกี่ยวข้องกับการแปลงเชิงตั้งฉาก (orthogonal transformation) เมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) โดยการหาค่าเฉพาะ (eigenvalues) และค่าเวกเตอร์เฉพาะ (eigenvectors) โดยใช้วิธีอนุพันธ์ย่อยทำการคำนวณซ้ำกันหลายครั้ง (Ang and Tang, 1984; Halder and Mahadevan, 1995)

การหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (β) ที่อยู่ในจุดกำเนิดปริภูมิของค่าตัวแปรสุ่ม X_1 และ X_2

การเข้าสู่คณิตศาสตร์แบบฉบับ

β = ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดกำเนิดของการแปลงในปริภูมิ (Y_1, Y_2) ไปยังพื้นผิวของการพังทลายที่เป็นผลมาจากการแปลง



รูปที่ 6.1 การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากจุดกำเนิดดั้งเดิมในปริภูมิ ใช้คณิตศาสตร์แบบฉบับ (classical mathematics) ที่มีวิธีการแปลงค่าในปริภูมิหาค่าระยะทางที่สั้นที่สุดในปริภูมิใหม่

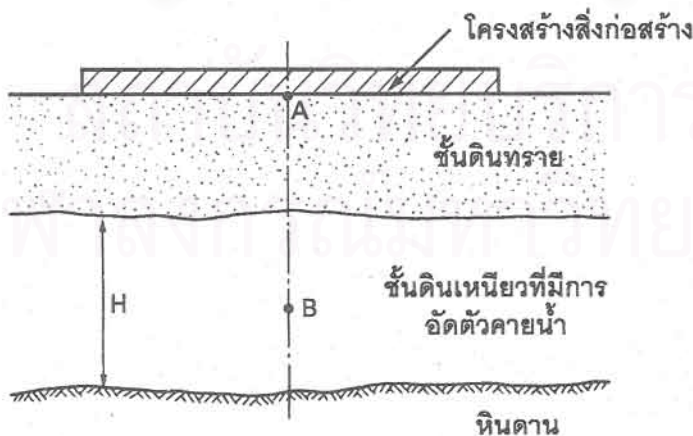
6.1.2 การวิเคราะห์หาค่าความเชื่อถือได้แนวทางใหม่

แนวทางเลือกอีกแบบที่ใช้หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ หรือเรียกอีกชื่อเป็น ค่าดัชนีของ Hasofer-Lind ซึ่ง Low (1996) กับ Low and Tang (1997 a) ได้ใช้แนวทางของ matrix formulation หาค่าดัชนีในรูปแบบใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้เรียบเรียงและอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.5.3 หน้า 26-30 ของรายงานฉบับนี้

การเข้าสู่วิธีการคำนวณที่ใช้โปรแกรมที่มีแผ่นตารางทำการ (spread sheet) เช่นใช้โปรแกรม Microsoft Excel, Version 7.0 เป็นต้น ตัวอย่างในบทความของ Low (1996) มีการทดลองใช้วิธีแก้ปัญหาคำนวณด้วยแผ่นตารางทำการ จากตัวอย่างเรื่องการทรุดตัวของมวลดินใต้โครงสร้างสิ่งก่อสร้างที่ Ang and Tang (1984) ได้แสดงเป็นโจทย์ตัวอย่างไว้ในหน้า 372-374, Vol. II และผู้วิจัยโครงการนี้ขอเสนอในรูปแบบการเปรียบเทียบ ระหว่างวิธีการที่ใช้คณิตศาสตร์แบบฉบับ (classical mathematics) ของการหาอนุพันธ์ย่อย หาค่าตัวเลขดัชนีความเชื่อถือ กับวิธีการที่ใช้แผ่นตารางทำการ (spread sheet) เพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจมากขึ้น ก่อนจะมีการนำเสนอเป็นกรณีศึกษา (case histories) ของการคำนวณโดยใช้แผ่นตารางทำการในหัวข้อต่อไป

ตัวอย่างปัญหาการทรุดตัวในดินเหนียวที่มีการอัดตัวคายน้ำ

จากรูปที่ 6.2 ข้างล่างมีโครงสร้างสิ่งก่อสร้าง (construction structure) วางทับบนชั้นดินทราย (sand) ที่ชั้นนี้อยู่ด้านบนของชั้นดินเหนียวที่มีการอัดตัวคายน้ำปกติ (normal consolidated clay) สมมุติให้ผลของการทรุดตัวเกิดจากโครงสร้างเพียงอย่างเดียว และสูตรเชิงประสมการณ์ของการทรุดตัวให้อิงตาม Peck et al. (1974) ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวฉากบนมวลดินเหนียว



รูปที่ 6.2 โครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง วางทับบนมวลดินที่มีการทรุดตัวที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางในแนวฉากบนมวลดินที่มีการอัดตัวคายน้ำ

เมื่อกำหนดให้ S เป็นค่าระยะการทรุดตัวเชิงปฐมภูมิเนื่องจากการอัดตัว (primary consolidation settlement) คำนวณจากสูตรของ Peck et al. (1974) จะได้

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (6.1)$$

พจน์ตัวแปรในสมการ 6.1 มีนิยามคือ

- C_c = ดัชนีการอัดของดินเหนียว
- e_0 = อัตราส่วนช่องว่างก่อนเมื่อน้ำหนักบรรทุก
- H = ความหนาในแนวดิ่งของชั้นดินเหนียว (ดูรูป 6.2)
- p_0 = ความดันประสิทธิผลตั้งต้นที่ระยะกึ่งกลางของชั้นดินเหนียว (จุด B ในรูป 6.2) ก่อนเมื่อน้ำหนักบรรทุก
- Δp = ความดันที่เพิ่มขึ้นที่จุด B เนื่องจากการอัดจากโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง
- \log = สัญกรณ์ลอการิทึมที่มีฐาน 10 (สิบ)

เนื่องจากความหนาของชั้นดินเหนียวไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) และมวลดินเหนียวไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งชั้น ความคลาดเคลื่อนของการหาระยะการทรุดตัวเกิดได้ และเมื่อต้องการแก้ไขใช้ตัวประกอบของ N

เมื่อต้องการให้ระยะการทรุดตัวน้อยกว่า 6.35 มิลลิเมตร (2.5 นิ้ว) จากการตรวจสอบภาคสนาม ตัวแปรต่าง ๆ มีความแปรผันเชิงสถิติ ดังตารางที่ 6.1 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 6.1 ความแปรผันเชิงสถิติของตัวแปรในตัวอย่างรูปที่ 6.2

	ค่าเฉลี่ย	สัมประสิทธิ์การแปรผัน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวประกอบแก้ไข, N	1.0	0.10	0.10
ดัชนีการอัด, C_c	0.396	0.25	0.099
อัตราส่วนช่องว่าง, e_0	1.19	0.15	0.1785
ความหนาชั้นดินเหนียว, H	168 in. (4.27 m.)	0.05	8.40
ความดันประสิทธิผล, p_0	3.72 ksf (178 kPa)	0.05	0.186
ความดันที่เพิ่มขึ้น, Δp	0.50 ksf (24 kPa)	0.20	0.10

ผลของการนำค่าตัวประกอบแก้ไข, N ถูกนำไปใช้ในแบบจำลองวิเคราะห์ผล จึงเขียนฟังก์ชันสมรรถนะ (performance function) เพื่อหาโอกาสความน่าจะเป็นของการแจกแจงค่าระยะการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวที่จุด A

$$g(X) = 2.5 - N \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (6.2)$$

การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้จากสมการ 6.2 ข้างบน มีแนวทางการแสดงวิธีแก้ปัญหา 2 แบบ โดยการใช้การหาอนุพันธ์ตามหลักการของคณิตศาสตร์แบบฉบับ กับวิธีการหาจาก Solver tool ของโปรแกรมแผ่นตารางทำการ

ก. วิธีการหาผลเฉลยโดยใช้คณิตศาสตร์แบบฉบับ

วิธีการแก้ปัญหานี้ ใช้การหาอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันสมรรถนะที่จุดการพังทลาย สำหรับแต่ละค่าตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปรในตารางที่ 6.1 ที่ระบุนิยามไว้ หน้า 117 ถ้าให้สัญลักษณ์ * มีความหมายเป็นจุดการพังทลาย ได้ค่านิพจน์ทั้ง 6 รูปแบบตามสมการที่ 6.3 ถึง 6.8 คือ

$$\left(\frac{\partial g}{\partial N'} \right)_* = - \frac{C_c^*}{1 + e_0^*} h^* \log \left\{ \frac{p_0^* + \Delta p^*}{p_0^*} \right\} \sigma_N \quad (6.3)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial C_c'} \right)_* = - \frac{n^*}{1 + e_0^*} h^* \log \left\{ \frac{p_0^* + \Delta p^*}{p_0^*} \right\} \sigma_{C_c} \quad (6.4)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial e_0'} \right)_* = n^* \frac{C_c^*}{(1 + e_0^*)^2} h^* \log \left\{ \frac{p_0^* + \Delta p^*}{p_0^*} \right\} \sigma_{e_0} \quad (6.5)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial H'} \right)_* = - n^* \frac{C_c^*}{(1 + e_0^*)^2} \log \left\{ \frac{p_0^* + \Delta p^*}{p_0^*} \right\} \sigma_H \quad (6.6)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial p_0'} \right)_* = n^* \frac{C_c^*}{(1 + e_0^*)^2} h^* \frac{1}{\ln 10} \left\{ \frac{\Delta p^*}{(p_0^* + \Delta p^*) p_0^*} \right\} \sigma_{p_0} \quad (6.7)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial \Delta p'} \right)_* = - n^* \frac{C_c^*}{(1 + e_0^*)^2} h^* \frac{1}{\ln 10} \left\{ \frac{\Delta p^*}{p_0^* + \Delta p^*} \right\} \sigma_{\Delta p} \quad (6.8)$$

ตารางที่ 6.2 ผลลัพธ์โดยย่อ ที่ได้จากคำนวณค่าในสมการอนุพันธ์ย่อยซ้ำ
แล้วหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก
(จาก Ang and Tang, 1984, Vol. II หน้า 374)

Iteration No.	Variable X_i	Assumed Failure Point x_i^*	$\left(\frac{\partial g}{\partial X_i'}\right)^*$	$\alpha_{x_i}^*$	New x_i^*
1	N	1.00	-0.166	-0.290	$1.00 + 0.029\beta$
	C_c	0.396	-0.416	-0.724	$0.396 + 0.0717\beta$
	e_0	1.19	0.136	0.236	$1.19 - 0.042\beta$
	H	168.00	-0.084	-0.145	$168.00 + 1.218\beta$
	P_0	3.72	0.078	0.136	$3.72 - 0.0253\beta$
	Δp	0.50	-0.313	-0.544	$0.50 + 0.0544\beta$
	Failure equation: $2.5 - (1 + 0.029\beta) \frac{0.396 + 0.0717\beta}{1 + (1.19 - 0.042\beta)} (168 + 1.218\beta) \times \log \left[\frac{(3.72 - 0.0253\beta) + (0.5 + 0.0544\beta)}{3.72 - 0.0253\beta} \right] = 0$ By trial-and-error: $\beta = 1.27$				
2	N	1.037	-0.241	-0.323	$1.00 + 0.0323\beta$
	C_c	0.487	-0.508	-0.681	$0.396 + 0.0674\beta$
	e_0	1.137	0.209	0.280	$1.19 - 0.05\beta$
	H	169.60	-0.126	-0.166	$168.00 + 1.394\beta$
	P_0	3.688	0.117	0.157	$3.72 - 0.0292\beta$
	Δp	0.569	-0.409	-0.548	$0.50 + 0.0548\beta$
	Failure equation: $2.5 - (1 + 0.0323\beta) \frac{0.396 + 0.0674\beta}{1 + (1.19 - 0.05\beta)} (168 + 1.394\beta) \times \log \left[\frac{(3.72 - 0.0292\beta) + (0.5 + 0.0548\beta)}{3.72 - 0.0292\beta} \right] = 0$ By trial-and-error: $\beta = 1.27$				

เมื่อต้องการหาผลเฉลยจากการทำซ้ำครั้งแรก (first iteration) สมมุติให้พจน์ในสมการที่ 6.3 ถึง 6.8 มีค่าเช่นเดียวกับค่าที่ระบุในตารางที่ 6.1

$$n^* = N_{\text{mean}} = 1.00$$

$$c_c^* = C_{c \text{ mean}} = 0.396$$

$$e_0^* = e_{0 \text{ mean}} = 1.19$$

$$h^* = H_{\text{mean}} = 168.00$$

$$p_0^* = P_{0 \text{ mean}} = 3.72$$

$$\Delta p^* = \Delta p_{\text{mean}} = 0.50$$

ในตารางที่ 6.2 หน้า 119 ได้แสดงวิธีการคำนวณซ้ำ 2 ครั้งไว้ แต่เนื่องจากการที่จะหาค่าตัวเลขบางตัว มีกระบวนการค่อนข้างยาว จึงได้ระบุเฉพาะผลลัพธ์ในคอลัมน์ จะสังเกตว่าคอลัมน์สุดท้ายมีค่า β ที่ไม่ทราบค่า วิธีการที่จะแก้ปัญหานี้ต้องใช้การลองผิดลองถูก (trial and error) ปรากฏว่าได้ค่า $\beta = 1.27$ ทั้งสองครั้ง

จากค่า β ที่ได้ หาค่าที่จุดเกิดการพังทลาย (failure point) จะได้ค่าผลลัพธ์ของตัวแปรทั้ง 6 ค่าดังนี้

$$n^* = 1.041, c_c^* = 0.482, e_0^* = 1.127, h^* = 169.8, p_0^* = 3.683, \Delta p^* = 0.570$$

เมื่อต้องการหาค่าโอกาสของระยะการทรุดตัวที่จุด A ในรูป 6.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่คิดแปลงมาจากสมการ 2.15 หน้า 16 ถ้าให้พจน์ $\Phi(\)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของขอบความปลอดภัย นั่นคือ

$$p(f) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (6.9)$$

แทนค่าพจน์ $\beta = 1.27$ ในสมการ 6.9 ข้างบน และใช้ตารางการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มที่มีฟังก์ชันค่อเนื่องกับการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนปกติ (ตารางในภาคผนวก) จะได้คำตอบโอกาสของการทรุดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปที่จุด A

$$\begin{aligned}
 p(f) &= 1 - \Phi(1.27) = 1 - 0.89796 \\
 &= 0.10204 \text{ หรือเกิดได้ประมาณ } 10.2 \text{ ครั้งใน } 100 \text{ เหตุการณ์}
 \end{aligned}$$

ข. วิธีการหาผลเฉลยโดยใช้ Solver tool ของโปรแกรมแผ่นตารางทำการ
 วิธีการแก้ปัญหานี้ ใช้การหาทรงรี (ellipsoid) ที่สัมผัสกับพื้นผิวการพังทลาย แต่เนื่องจากตัวแปรไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) และสมการทรงรี 6 มิติสามารถขยายได้เป็นรูปแบบบัญญัติ (canonical form) ของสมการวงรี (ellipse) ในรูปแบบ 2 มิติ ปัญหานี้จึงแสดงในสมการที่บัญญัติขึ้น คือ

$$\text{Minimize: } \beta = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (6.10)$$

สมการ 6.10 ข้างบน กำหนดให้

$$g(x_{\text{mean}}) = 2.5 - N \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = 0 \quad (6.11)$$

พจน์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 6.11 เป็นค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อเทียบกับ x_i หลายค่า ($i = 1, 2, \dots, n$)

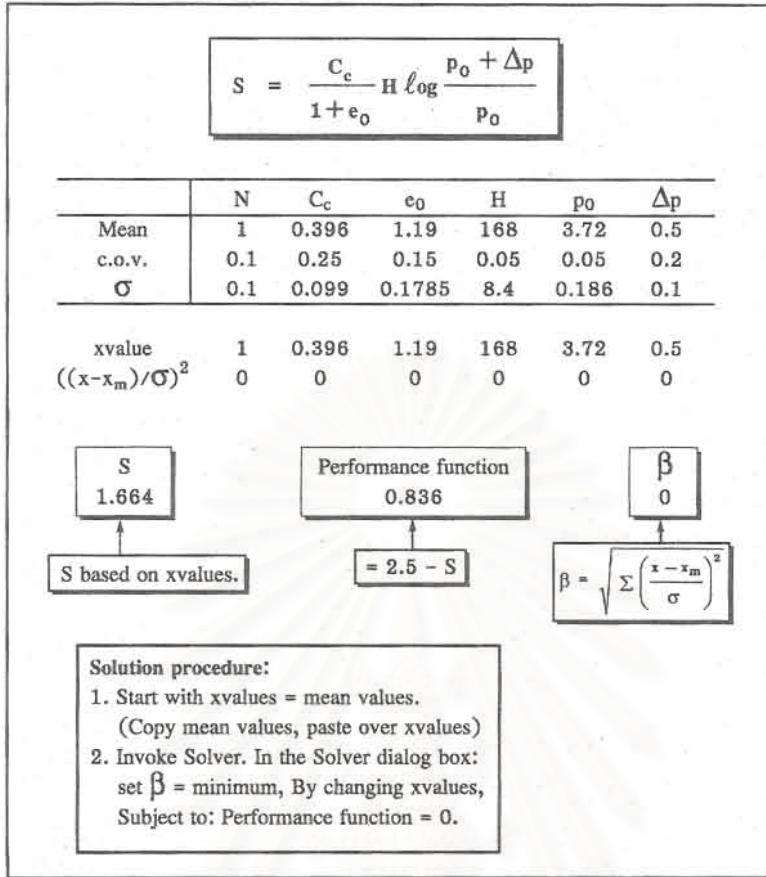
วิธีการที่จะใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการนี้ ได้อธิบายแนวทางการวิเคราะห์สำหรับการแจกแจงที่มีหลายตัวแปรไว้ในหัวข้อ 2.5 หน้า 17 - 30 ในส่วนของกรการหาวงรีวิกฤตที่จุดสัมผัสมีการแสดงเป็นตัวอย่างไว้ในหัวข้อย่อย 2.5.3

ขั้นตอนของการหาค่านี้ความเชื่อถือได้ สำหรับปัญหาในโจทย์ตัวอย่างนี้ มีระบุไว้ในกรอบของรูปที่ 6.3 กับ 6.4 หน้าถัดไป ซึ่งเป็นการแสดงวิธีการเข้าสู่การแก้ปัญหโดยใช่วงรีวิกฤต และมีขั้นตอนที่มีการใช้แผ่นตารางทำการดังนี้

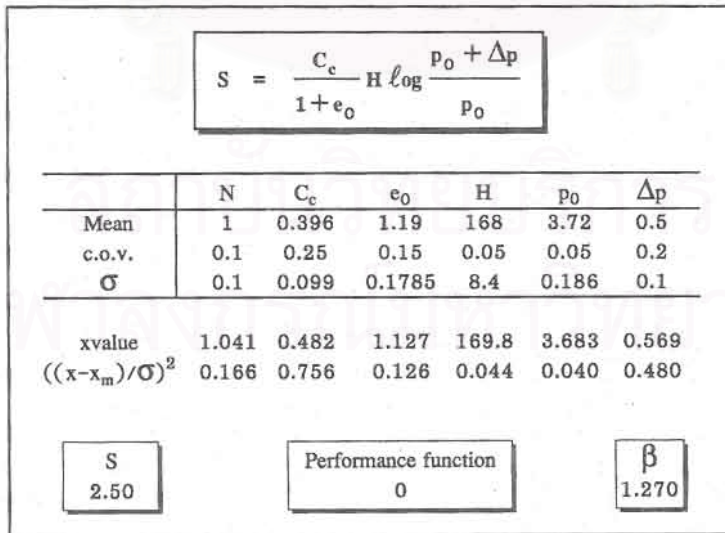
(1) เริ่มต้นโดยการเข้าโปรแกรมที่มีซอฟต์แวร์ Solver tool เพื่อใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ในรูปแบบแผ่นตารางทำการ (spread sheet)

(2) ทำการใส่ค่าข้อมูลเข้า (input) ลงในโปรแกรม ดังรูปที่ 6.3 หน้าถัดไป ที่เป็นการแสดงภาพหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีค่ากลุ่มข้อมูลเข้าหลายกลุ่ม

สำหรับตัวแปรสุ่มในรูปที่ 6.3 มีทั้งหมด 6 ตัวแปร มีการระบุค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ไว้ด้วย



รูปที่ 6.3 หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงการใช้วงรีวิกฤตก่อนมีการใช้ Invoking Solver tool



รูปที่ 6.4 หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงการใช้วงรีวิกฤตภายหลังที่ใช้ Invoking Solver tool

กำหนดให้ตัวแปรเหล่านี้ เป็นตัวแปรที่ไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) และมีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normally distributed)

(3) ในการเข้าสู่วิธีแก้ปัญหาโดยใช้วงรีวิฤกฤก กำหนดค่า x values = mean values ทำได้โดยการ copy ค่า mean values แล้ว paste บนค่า x values

(4) จากเหตุผลที่ตัวแปรเป็นแบบไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) จึงใช้สมการทรงรี 7 มิติแทนการหาสมการ 2 มิติของวงรีรูปแบบบัญญัติได้

(5) เมื่อใช้ Invoking Solver ในช่อง dialog box ของ Solver เริ่มต้นทำการกำหนดคระยะที่สั้นที่สุด (β) โดยการเปลี่ยนค่า x values ที่มีเงื่อนไขกำหนดให้ฟังก์ชันสมรรถนะ $[g(X)] = 0$ (ศูนย์)

(6) ความเงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งรวมทั้งขอบบนและขอบล่าง จะได้ค่าระะยะการทรุดตัวหรือค่า $S = 2.5$ นิ้ว และมีคระยะความเชื่อถือได้ที่ค่า $\beta = 1.27$ ซึ่งเป็นค่าคระยะนี้ได้จากวิธีไมเมนค้ออันดับที่สอง ที่ไม่ต้องอาศัยการแปลงหรือลดค่าตัวแปร

6.2 กรณีศึกษาของการพังทลายแบบอาร์ก

ตัวอย่างที่ยกมาเป็นกรณีศึกษานี้ เป็นเรื่องของการพังทลายที่เกิดภายในมวลสารที่เป็นดินไม่พบว่ามีการเกิดการพังทลายรูปแบบนี้ในมวลหิน ในมวลที่เป็นดินทั้งหมดหรือเป็นดินส่วนใหญ่มีที่เนินเพียงส่วนน้อย จะมีพื้นผิวการพังทลายของความลาดเป็นแบบรูปอาร์กวงกลม หรือพื้นผิวรูปอาร์กที่ไม่ใช่เป็นส่วนโค้งของวงกลม

แนวทางในการแก้ปัญหานี้ใช้วิธีการแบ่งส่วน (slice method) มาคำนวณหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการกับเงื่อนไขของการคำนวณการพังทลายรูปอาร์กก็มีหลายรูปแบบและมีผลทำให้ค่าปัจจัยความปลอดภัย, FS ที่คำนวณได้แตกต่างกันไป จึงต้องมีการกำหนดแนวทางเลือกใช้สูตรเชิงประสมการณ์ ควบคู่ไปกับการประยุกต์จากโปรแกรมแผ่นตารางทำการที่อิงตามข้อเสนอแนะของ Low (1996) เพื่อหาค่าความเชื่อถือได้ของการตัดความลาดชันนั้นได้

6.2.1 วิธีการที่ปรับปรุงใหม่และเสนอโดย Chen and Morgenstern

แนวทางเดิมที่ Morgenstern and Price (1965) ได้เสนอไว้เป็นการใช้วิธีของการหาความสมดุลของแรงกับโมเมนต์จากสมการหลัก 2 สมการ ที่เป็นสมการสมดุลของแรงกับสมการสมดุลของโมเมนต์ จำเป็นต้องมีการใช้ปริพันธ์หลายชั้น (multiple integral) เพื่อหาค่าผลลัพธ์ของการแบ่งส่วนที่พื้นผิวการพังทลายที่ไม่เป็นวงกลม (non-circular slip)

Chen and Morgenstern (1983) ได้ปรับปรุงแนวทางเดิมขึ้นมาใหม่ เรียกว่า generalized method of slices ด้วยเหตุผลหลักคือ

1) วิธีของการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของพื้นผิวการพังทลายที่ไม่เป็นวงกลมมีหลายวิธี เช่น Janbu (1954, 1973); Morgenstern and Price (1965) Spencer (1967, 1973) และ Sarma (1973) แต่ผลลัพธ์สุดท้ายของค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะว่าใช้สมการสมดุลเดียวกัน และกำหนดให้ตัวแปรที่ไม่รู้ค่า (unknown variables) ในสมการดังกล่าวมีสหสัมพันธ์กัน

2) สมมุติฐานของวิธีการในข้อ 1) ที่กำหนดไว้สำหรับตัวแปรที่ไม่รู้ค่า ไม่มีความเป็นไปได้เพียงอย่างเดียว (uniqueness) มีฟังก์ชันบางค่าที่สมมุติขึ้นและบางกรณีไม่สอดคล้องกับสถานะทางกายภาพของมวลสารในภาคสนาม

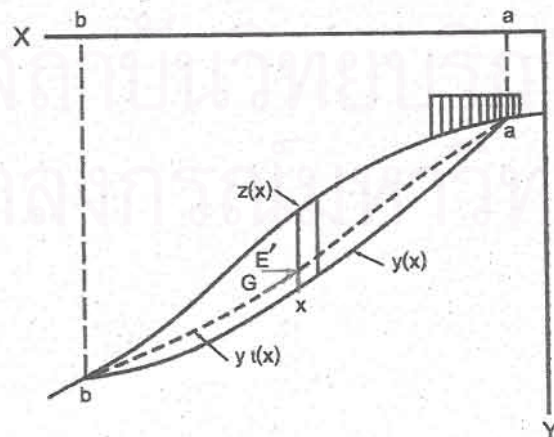
แนวทางของ Chen and Morgenstern จึงต้องการแก้ไขในเรื่องข้อด้อยดังกล่าว ที่มีสมมุติฐานใหม่ ดังนี้

ก. วิธีการใหม่นี้ ไม่มีการจำกัด (restriction) ขอบเขตการแจกแจงค่าตัวแปร ดังนั้นการค้นหาค่าผลเฉลยของสมการกระทำจากกลุ่มของฟังก์ชันที่สมมุติขึ้นและมีการกำหนดค่าที่จุดครึ่ง (fixed point) ทั้งสองขอบ

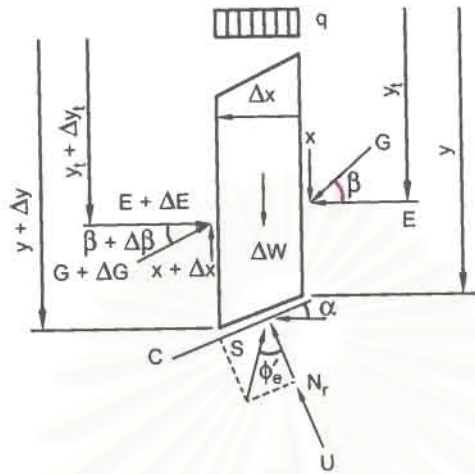
ข. เพื่อให้การสมมุติค่าฟังก์ชันมีความเหมาะสมกับสถานะทางกายภาพ ได้มีการเสนอแนะรหัส (code) เพื่อการไปสู่การใช้คำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง

6.2.2 นัยทั่วไปของวิธี Chen and Morgenstern

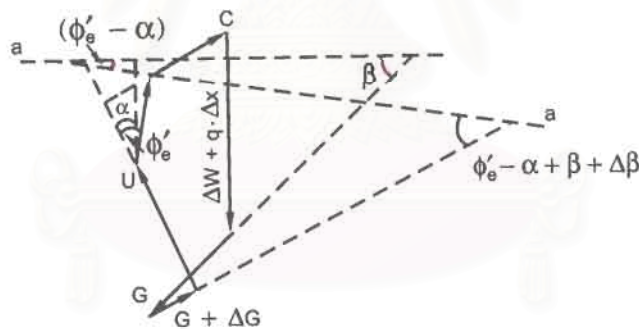
คามที่ได้มีการเสนอแนะไว้ในข้อ 6.2.1 นั้น มีนัยทั่วไป (generalized) ของการวิเคราะห์หาเสถียรภาพความลาดเอียงโดยย่อ ดังนี้



รูปที่ 6.5 พื้นผิวการพังทลายคานนัยทั่วไปของวิธี Chen and Morgenstern



ก. การหาแรงลัพธ์ประสิทธิผลบนส่วนแบ่งเดียว



ข. แนวเวกเตอร์ของแรงที่กำหนดได้ไม่ เท่ากันทั้งสองด้านของ ส่วนแบ่ง ทำมุมเอียงจากแนวราบเท่ากับมุม $(\phi'_e - \alpha)$

รูปที่ 6.6 เวกเตอร์ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนส่วนแบ่งเดียว

1. หลักของความสมดุล

มวลสารถูกแบ่งออกเป็นหลายส่วน ดังรูปที่ 6.5 หน้า 124 ที่แสดงรูปแบบนี้ ทั่วไปของพื้นผิวการพังทลายในมวลดิน กำหนดให้ความสมดุลทั้งแรงกับโมเมนต์ของแต่ละ ส่วนแบ่งเดียว ๆ ต้องเป็นไปในแนวทางเดียวกันทุกส่วนแบ่ง

2. เกณฑ์ของการพังทลายตามรูปแบบของ Mohr - Columb

พื้นผิวของการพังทลายเป็นไปตามเกณฑ์ Mohr - Columb ที่ใช้กับมวลสารที่เป็นวัสดุเปราะ (brittle material) นั่นคือ

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (6.12)$$

พจน์ตัวแปรในสมการข้างบน มีนิยามดังนี้

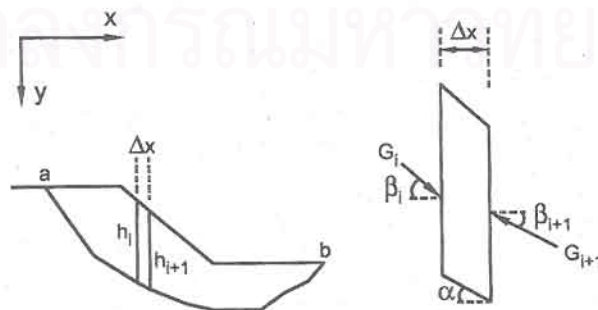
σ'_n	=	ความเค้นประสิทธิผลอัดฉากบนพื้นผิวการพังทลาย
τ	=	ความเค้นเฉือนบนพื้นผิวการพังทลาย
c'	=	โคฮีชันประสิทธิผล
ϕ'	=	มุมเสียดทานประสิทธิผล

3. แรงลัพธ์ด้านข้างกับแรงลัพธ์ฉาก

วิธีการของ Chen and Morgenstern กำหนดแรงลัพธ์ด้านข้าง (resultant side force) กับกำหนดแรงลัพธ์ฉาก (resultant normal force) ของแต่ละส่วนแบ่งดังรูปสเก็ทซ์ 2 รูป (รูปที่ 6.6 ก. และ ข.) หน้า 125

6.2.3 สูตรและค่าตัวแปรที่ใช้ตามวิธี Chen and Morgenstern

กรณีศึกษาที่ใช้โปรแกรมแผ่นคารางทำการอิงตามบทความของ Low et al. (1998) เป็นการคำนวณโดยใช้วิธี generalized method of slices ซึ่งมีการกำหนดความสมดุลของแรงกับโมเมนต์ที่มีจุดครึ่ง (fixed point) ของมวลการพังทลาย ดังรูปที่สเก็ทซ์ใหม่ข้างล่าง



รูปที่ 6.7 ภาพสเก็ทซ์แสดงสัญลักษณ์หลักที่ใช้ในโปรแกรมแผ่นคารางทำการ

ดังนั้นจากรูป 6.7 ที่แสดงความสมดุลของแรงบนส่วนแบ่งเล็ก ๆ ในแนวดิ่งใช้วิธีหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง โดยทำการหาปริพันธ์ (integrate) ตลอดความกว้างของมวลดินที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย และกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตแรงลัพธ์ด้านข้าง (พจน์ G) มีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดขอบปลายทั้งสองด้าน (จุด a และ b ในรูปที่ 6.7) กับมีเงื่อนไขแบบของทิศทางกับมุมเอียงแนวแรงเช่นเดียวกับรูปที่ 6.6 ในหน้า 125 ด้วย

สมการสมดุลแรง

$$\int_a^b p(x) s(x) dx = 0 \quad (6.13)$$

สมการสมดุลโมเมนต์

$$\int_a^b p(x) s(x) t(x) dx = 0 \quad (6.14)$$

พจน์ $p(x)$ ในสองสมการข้างบน เป็นฟังก์ชันที่กำหนดให้เหมาะสมกับค่ามิติเชิงเรขาคณิตกับค่าคุณสมบัติของมวลสารที่เป็นความลาดเอียง หรือหาจากนิพจน์

$$p(x) = \left(\frac{dW}{dx} + q \right) \sin(\phi'_e - \alpha) - \gamma_u \frac{dW}{dx} \sec \alpha \sin \phi'_e + c'_e \sec \alpha \cos \phi'_e \quad (6.15)$$

พจน์ตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 6.15 มีนิยามค่าตัวแปรต่อหน่วยความกว้าง (unit width) ดังนี้

$\frac{dW}{dx}$	=	ความกว้างของส่วนแบ่งต่อหน่วย
q	=	แรงน้ำหนักบรรทุกบนมวลในแนวดิ่งต่อหน่วย
ϕ'_e	=	ความเสียดทานภายในตามระนาบพื้นผิว การพังทลายในขณะที่มีการเคลื่อนที่ มีค่าเท่ากับ $\tan^{-1} \left[\frac{\tan \phi'}{F_s} \right]$
α	=	มุมเอียงเมื่อเทียบกับแนวราบ
γ_u	=	อัตราส่วนความดันในโพรงช่องว่าง
c'_e	=	โคฮีชันที่เกิดขึ้นตามระนาบพื้นผิว การพังทลายในขณะที่มีการเคลื่อนที่

$\frac{c'}{F_s}$ = อัตราส่วนของค่าโคฮิซึ่แปรละติทิดลกับค่า
ปัจจัยความปลอดภัยที่อิงตามฟังก์ชัน $s(x)$;
ฟังก์ชัน $s(x)$ ในสมการที่ 6.13 ถึง 6.14
เป็นแรงต้านข้างที่เอียงทำมุม $\beta(x)$ ดังรูป 6.7

พจน์ $s(x)$ หาได้จากความสัมพันธ์กับค่ามุม $\beta(x)$ ดังสมการข้างล่าง

$$s(x) = \sec \psi'_e \exp \left[- \int_a^x \tan \psi'_e \frac{d\beta}{d\zeta} d\zeta \right] \quad (6.16)$$

ค่ามุม ψ'_e ในสมการข้างบน ได้แก่

$$\psi'_e = \phi'_e - \alpha + \beta \quad (6.17)$$

ในบทความของ Chen and Morgenstern (1983) ได้แสดงวิธีการหาแรงลัพท์
ต้านข้าง (G) เมื่อเทียบกับมุมเอียง β ไว้ ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\tan \beta = \lambda f(x) + f_0(x) \quad (6.18)$$

ซึ่งในที่นี้ $f(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันที่สมมุติขึ้น พจน์ λ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้อง
การหา และพจน์ $f_0(x)$ เป็นฟังก์ชันอีกค่าหนึ่งที่กำหนดตามสภาพพื้นผิวที่เอียงเท
ของมวลดินบนระนาบของการพังทลาย

จากรูปที่ 6.7 มีพื้นผิวที่เอียงตรงจุดครึ่ง 2 จุด คือจุด a และ b ทำให้ได้ค่า
มุม β เป็น 2 ค่า คือมุม β_a กับมุม β_b แสดงเป็นนิพจน์ทั้ง 4 สมการต่อไปนี้

$$f(a) = 0 \quad (6.19)$$

$$f(b) = 0 \quad (6.20)$$

$$f_0(a) = \tan \beta_a \quad (6.21)$$

$$f_0(b) = \tan \beta_b \quad (6.22)$$

สมการทั้ง 4 เป็นการกำหนดเงื่อนไขเพื่อแก้ปัญหาในเรื่อง non-convergence ที่เกิดขึ้นระหว่างคำนวณด้วยกระบวนการทำซ้ำ

เมื่อค่า $f(x) = 1$ และ $f_0(x) = 0$ ค่าของ $\tan \beta = \lambda$ ซึ่งเป็นกรณีเดียวกันกับที่จะยกตัวอย่างการคำนวณโดยใช้แผนตารางทำการในหัวข้อต่อไป และมีความหมายเดียวกันกับบทความของ Morgenstern and Price (1965) ที่กำหนดให้ค่าของแรงดันข้างที่กระทำเป็นมุม β มีค่าคงที่

6.2.4 ตัวอย่างกรณีศึกษาด้วยวิธี Chen and Morgenstern

กรณีศึกษาที่นำเสนอต่อไปนี้ใช้โปรแกรมแผนตารางทำการคำนวณค่า โดยอิงการใช้วงกลมวิฤตในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ภาพสเก็ทกับสูตรกับคำอธิบายต่าง ๆ มีการระบุไว้ในหัวข้อก่อนนี้แล้ว

1. เป้าหมายกับเงื่อนไขหลัก

จุดมุ่งหมายเป็นการหาการพังทลายรูปอาร์ก ที่พื้นผิวการพังทลายไม่ใช่ส่วนโค้งของวงกลม ค่าที่ต้องการทราบเป็นค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่มีสัญกรณ์พิเศษว่า F_s กับค่าสัมประสิทธิ์ของ λ พจน์ s ที่เป็นตัวห้อยของ F_s มีความหมายถึงฟังก์ชัน $s(x)$ ที่เป็นตัวแปรที่ไม่รู้ค่าในสมการสมดุลแรงกับโมเมนต์ด้วยวิธี Chen and Morgenstern สำหรับฟังก์ชัน λ เป็นฟังก์ชันพิเศษที่กำหนดให้ $\lambda = \tan \beta$ หมายถึงแรงลัพท์ด้านข้างของส่วนแบ่งคงที่ตลอดเวกเตอร์แรงเอียงกับแนวราบเป็นมุม β

2. สูตรเชิงประสมการณเพิ่มเติม

จากกรณีสมมุติดังกล่าวที่ให้ค่า β คงที่ ดังนั้น $\frac{d\beta}{dx}$ เท่ากับ ศูนย์ สมการสมดุลแรงกับโมเมนต์ในหัวข้อ 6.2.3 แปลงเป็นสมการข้างล่าง

$$\int_a^b p(x) \sec \psi'_e dx = 0 \quad (6.23)$$

ส่วนข้อกำหนดเชิง boundary conditions ที่ให้แรงดันข้างที่จุด a และ b คงที่นั้น Low et al. (1998) ได้แสดงนิพจน์เชิงปริพันธ์อิงตามสมมุติฐานเดิมของ Chen and Morgenstern ได้สมการปริพันธ์ของมวลสารที่เกิดการพังทลาย คือ

$$\int_a^b p(x) \sec \psi'_e \left[\int_a^x (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) d\xi \right] dx = 0 \quad (6.24)$$

พจน์ ξ เป็น ตัวแปรหุ่น (dummy variable) ที่ใช้แทนค่าตัวแปรสุ่ม, x เพื่อหาผลเฉลยให้สอดคล้องกับ boundary conditions ที่ระบุ และสมการข้างบนนี้เป็น การหาปริพันธ์ตลอดแนวพื้นผิวของการพังทลาย (จากจุด a ไปยังจุด b) และสามารถระบุ ให้เป็นผลรวมของค่าปริพันธ์แต่ละส่วนแบ่ง

จากสมการ 6.23 กับสมการ 6.24 ถ้ากำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมให้แต่ละส่วนแบ่ง เป็นแนวเส้นตรงตั้งแต่ละระดับบนถึงระดับล่าง ได้รับความสัมพันธ์เฉพาะในส่วนแบ่งหนึ่ง ๆ ดังนี้

$$\frac{dW}{dx} = \gamma(x) \times h(x) \quad (6.25)$$

พจน์ $\gamma(x)$ เป็นฟังก์ชันหน่วยน้ำหนักส่วนแบ่ง และ $h(x)$ เป็นความสูงส่วนแบ่ง (หรือเป็นความหนาของมวลสารที่ระดับนั้น) ถูกสมมุติให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้นในแต่ละ ชั้นย่อย (layer) ของมวลดินบนระนาบรูปอาร์ก หาค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักดินที่บริเวณ ส่วนต่อประสาน (interface) เป็น

$$\text{Average unit weight } \gamma \text{ at an interface} = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sum h_i} \quad (6.26)$$

3. ค่าคุณสมบัติมวลสารกับค่ามิติเชิงเรขาคณิต

ค่าที่ต้องการป้อนเข้าเป็นข้อมูลใช้ในการวิเคราะห์ผลในโปรแกรมแผ่นตารางทำการ มีค่าคุณสมบัติดินที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous soil) กับค่ามิติเชิงเรขาคณิต ดังนี้

- หน่วยน้ำหนักมวลดิน (γ) เท่ากับ 19 กิโลนิวตันต่อลบ.ม.
- มุมเสียดทานประสิทธิผล (ϕ') เท่ากับ 20 องศา
- โคฮีชันมวลดิน (c') เท่ากับ 28.5 กิโลนิวตันต่อลบ.ม.
- ความสูงของการตัดความลาดชันมั่นคง เท่ากับ 12 เมตร

4. ตัวแปรที่ต้องป้อนเข้าโปรแกรมกับสมการคำนวณหลักที่ใช้

คำอธิบายตัวแปรและสมการหลักที่ใช้คำนวณในโปรแกรม กับแสดงไว้ในคอลัมน์ของ แผ่นตารางทำการ มีดังนี้

ก. ตัวแปรที่ต้องป้อน

1) จุดพิกัดของตำแหน่งรูปเชิงเรขาคณิตของมวลสารบนแกน x กับแกน y เป็น ตัวแปรที่ต้องป้อนเข้า พิกัดของ x มีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดที่อยู่บนยอดความลาด (crest) ไป

ยังจุดที่อยู่ล่างสุดความลาด (toe) พิกัดของ y มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ y มีระยะต่ำลง และ พิกัดของ x มีสองตำแหน่ง (คือหนึ่งค่าพิกัด x) คือ y_{slip} กับ y_{topo} หมายถึง จุดพิกัดบนพื้นผิวที่มีแนวโน้มเกิดการพังทลาย กับพิกัดบนพื้นผิวดินของภูมิประเทศ

- 2) ค่าหน่วยน้ำหนัก (γ) มวลสาร กับค่าของอัตราส่วนความดันในโพรง (γ_u)
- 3) ค่าน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่กระทำบนมวลสาร (q) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.6
- 4) ค่าโคฮีชันประสิทธิผล (c') กับมุมเสียดทานประสิทธิผล (ϕ')
- 5) ค่าเริ่มต้นก่อนการคำนวณของปัจจัยความปลอดภัยที่แรงลัพธ์ด้านข้างคงที่ ได้แก่ ค่าของ F_s กับค่า λ (ที่ให้เท่ากับ $\tan \beta$)

ข. สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณ

- 1) ค่าของ h มีความสัมพันธ์คือ $h = y_{slip} - y_{topo}$
- 2) มุมเอียงเท (α) เมื่อเทียบกับแนวราบของแต่ละส่วนแบ่ง

$$\alpha = \arctan \left(\frac{h}{\Delta x} \right)$$

- 3) ความกว้างของแต่ละส่วนแบ่ง (Δx)

$$\Delta x = x_{n-1} - x_n$$

- 4) ค่าโคฮีชันที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมวลสารเริ่มมีการเคลื่อนที่ (c'_e)

$$c'_e = \frac{c'}{FS}$$

โดยที่ค่าของ FS เป็นค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยปกติ ซึ่งมักกำหนดตั้งต้นให้เท่ากับ 1

- 5) ค่ามุมเสียดทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมวลสารเริ่มมีการเคลื่อนที่ (ϕ'_e)

$$\phi'_e = \arctan \left(\frac{\tan \phi'}{FS} \right)$$

6) สมการที่ 6.15 ที่กำหนด $p(x)$ เป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดกับสถานะเชิงกายภาพของมวลสาร

$$\int_a^b p(x) \sec(\psi'_e) dx = 0$$

ค่าของพจน์ $p \sec \psi'_e$ เป็นสัญกรณ์ที่ใช้แทนค่าของ $\int_a^b p(x) \sec(\psi'_e) dx$ ในคอลัมน์ตารางทำการ

ในกรณีที่มีพิกัด x อยู่ 12 จุด และมีค่า y_{slip} กับ y_{topo} อยู่ 12 จุดด้วย ดังนั้น ค่า x_i ในที่นี้จะหมายถึง $i = 1, 2, \dots, 12$

7) กำหนดให้สัญกรณ์ ttx เป็นปริพันธ์ (intergrand) ที่อยู่ไว้ในวงเล็บใหญ่ของสมการที่ 6.24 มีการหาค่าปริพันธ์จากลิมิต a ถึง x นั่นคือ

$$ttx = \int_a^x (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) d\xi$$

8) พจน์ $G(x)$ เป็นแรงลัพท์ด้านข้าง ถ้าให้ n เป็นจำนวนส่วนแบ่ง จะได้ความสัมพันธ์ของแรงลัพท์ด้านข้างที่กระทำบนแต่ละส่วนแบ่ง ดังนี้

$$G(x)_n = G(x)_{n-1} - \{p\secant(n, 1) + p\secant(n, 2)\} \frac{(x_n - x_{n-1})}{2}$$

9) มุมเอียงเทของแรงลัพท์ด้านข้าง (β) หาจาก

$$\beta = \arctan \lambda$$

10) ความเค้นอัดฉากประสิทธิผล (σ'_n) ที่ผลจากแรงอัดฉาก (แรง N_r รูป 6.6) กระทำบนฐานส่วนแบ่งค่อนหน่วย

$$\sigma'_n = \frac{N_r}{\Delta L}$$

ค่าระยะความยาว ΔL ของส่วนแบ่งหาจากการประมาณเชิงเส้น

$$\Delta L = \frac{\Delta x}{\cos \alpha}$$

11) ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลที่มีการเคลื่อนที่หาจาก

$$\tan \phi'_e = \frac{\tan \phi'}{FS}$$

12) ดังนั้นในสมการสมดุลของแรงที่กระทำบนส่วนแบ่ง หาค่าแรงปฏิกิริยาที่กระทำตั้งฉากกับฐานของส่วนแบ่ง, N_r ได้เป็น

$$N_r = \frac{W_n - \Delta T - (c'_e \times \Delta L) \sin \alpha}{\cos \alpha + \tan \phi'_e \sin \alpha}$$

13) น้ำหนักของมวลแต่ละส่วนแบ่ง, w_n มีค่าเป็น

$$w_n = \frac{1}{2} \gamma (h_2 + h_1) \Delta x$$

14) ค่าความแตกต่างของแรงเฉือนบนด้านข้างส่วนแบ่ง, ΔT (แต่ในรูปที่ 6.6 ใช้สัญกรณ์เป็น Δx) มีค่าเป็น

$$\Delta T = (G(x)_2 - G(x)_1) \sin \beta$$

15) จากสมการในหัวข้อย่อย 10) ถึงหัวข้อย่อย 14) แปลงเป็นรูปแบบสมการที่ใช้หาความดันอัดฉากประสิทธิภาพบนส่วนแบ่งที่มีแรงลัพธ์ด้านข้างคงที่ ซึ่งมวลมีการเคลื่อนที่ด้วย

$$\sigma'_n = \frac{\gamma \frac{(h_2 + h_1)}{2} \frac{(G(x)_2 - G(x)_1) \sin \beta}{\Delta x} - c'_e \tan \alpha}{1 + \tan \phi'_e \tan \alpha}$$

16) ความเค้นเฉือนบนพื้นผิวของการพังทลาย, τ ที่เป็นค่าที่ใช้คำนวณสำหรับส่วนแบ่งที่มีแรงลัพธ์ด้านข้างคงที่ ซึ่งมวลมีการเคลื่อนที่ด้วย

$$\tau = c'_e + \sigma'_n \tan \phi'_e$$

17) สมมุติฐานในหัวข้อนี้ เป็นการกำหนดให้สถานะทางกายภาพของมวลที่เกิดการพังทลายเป็นไปตามความจริงในธรรมชาติ นั่นคือ แรงเฉือนในแนวตั้งบนพื้นผิวของมวลส่วนแบ่งใด ๆ ก็ตาม มีค่าไม่เกินกำลังวัสดุเฉือน (shear strength) ที่มวลมีการเคลื่อนที่อยู่บนพื้นผิวการพังทลาย

จากรูปที่ 6.6 แสดงวิธี generalized method of slices พจน์ E' เป็นแรงอัดฉากประสิทธิภาพบนด้านข้างในแนวตั้ง ซึ่งมีความสัมพันธ์เท่ากับ

$$E' = G(x) \cos \beta$$

18) จากการที่กำหนดให้ค่าแรงลัพธ์ด้านข้างคงที่ และหาแรงอัดฉากประสิทธิภาพได้ แล้วจึงสามารถหาค่าของปัจจัยความปลอดภัยที่เกิดจากแรงเฉือนในแนวตั้ง (F_v) ของส่วนแบ่งที่กำหนดให้ด้านข้างของส่วนแบ่งอยู่ในแนวตั้งด้วย

$$F_v = \frac{G(x) \cos \beta \tan \phi'_e + c'_e (y_{slip} - y_{topo})}{G(x) \sin \beta}$$

6.2.5 ขั้นตอนวิธีการและการหาค่าผลลัพธ์กรณีศึกษาของการพังทลายแบบอาร์ก

ขั้นตอนวิธีการคล้ายคลึงกับการแก้ปัญหาโดยใช้วงรีวิฤต ในหัวข้อ 6.1.2 ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการเข้าโปรแกรม สร้างรูปแบบหน้าจอกับกำหนดคอลัมน์กับการแสดงค่าผลลัพธ์ในเชิงความน่าจะเป็นจากตัวเลขดัชนีความเชื่อได้ ร่วมกับวิธีการคำนวณซ้ำ ดังมีการอธิบายส่วนสำคัญต่าง ๆ ในหัวข้อย่อย ดังนี้

1. การเข้าสู่โปรแกรมแผ่นตารางทำการแก้ปัญหากรณีที่มีแรงด้านข้างคงที่

จากรูปที่ 6.7 กับสมการที่ 6.23 ถึง 6.26 ได้มีการกำหนดให้มีแรงด้านข้างที่กระทำบนส่วนแบ่งเดี่ยวกวที่หรือระบุเป็น constant side force inclination, $\tan \beta = \lambda$ ดังนั้นพจน์ตัวแปรสำหรับแต่ละส่วนแบ่ง เช่น พจน์ $\gamma(x)$ กับ $h(x)$ ของสมการที่ 6.25 จะเป็นฟังก์ชันเกือบเป็นเส้นตรง และพจน์ $p(x)$ ส่วนใหญ่จึงเป็นพหุนามระดับขั้นสอง (second degree polynomial) เมื่อพิจารณาโดยรวมของปัญหาเชิงตัวเลข (numerical problems) ที่จะหาปริพันธ์จากสมการ 6.23 กับ 6.24 ใช้ค่าเพียง 2 จุดต่อ (node) ของ Gauss-Legendre quadrature สำหรับการประมาณค่าพื้นที่หน้าตัดก่อนจะหาค่าน้ำหนักของมวลสารต่อหนึ่งหน่วยความหนา ซึ่งน่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมแล้ว เนื่องจากเหตุผลที่ว่า Gauss quadrature ที่มีจำนวนจุดต่อเป็น n -node มีค่าปริพันธ์ที่แม่นยำ (exact) สำหรับพหุนามที่มีระดับขั้นเท่ากับ $2n - 1$ หรือต่ำกว่า

การตั้งคั้งใช้โปรแกรมที่มีซอฟต์แวร์ Solver tool เพื่อจะทำการป้อนข้อมูลเข้าลงในโปรแกรมกับแสดงภาพหน้าจอกของข้อมูลแยกเป็นคอลัมน์ ซึ่งต้องมีการกำหนดแผ่นตารางจำเพาะ (module sheet) โดยใช้รหัสคำสั่งแมโคร (macro code) เพื่อการคำนวณค่าปริพันธ์ กับฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

2. รูปแบบหน้าจอกของโปรแกรมแผ่นตารางทำการ

วิธีการที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างอัตโนมัติ (automated optimization) ใช้การป้อนข้อมูลเข้ากับการคำนวณค่าฟังก์ชันประกอบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.8 ถึง 6.10

รูปที่ 6.8 กับ 6.9 ในหน้าถัดไป เป็นการแสดงหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการประมาณพื้นที่โครงสร้างซ้อนใน (nested structure of quadratures) กับการแสดงสูตรการคำนวณฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่มีรายละเอียดของตัวอย่างการคำนวณซ้ำแสดงในแผ่นแบบ (template) แยกส่วนไว้ต่างหาก (รูปที่ 6.10)

Spreadsheet automated optimization of nested quadratures

Constant side force inclination:
 $\tan \beta = \lambda$

Units:
 m, kN/m², kN/m²
 α and ϕ_s in radians

FS
1.079314

FS	λ
2.079314	0.258525
$\lambda \leq 1$	

ϕ_s	ϕ_e
9.38E-09	-1.695E-07

รูปที่ 6.8 หน้าจอส่วนแรกในโปรแกรมแผ่นคานวางทำการ แยกจากหน้าจอใหญ่ เป็นกรอบสำหรับเงื่อนไข หน่วยที่ใช้ กับนิพจน์หลักที่ใช้ในการคำนวณ

```

'-Spreadsheet functions for nested quadrature integration -
'CONSTANT SIDE FORCE INCLINATION.

Function QuadPt(xl, xr, Index) As Double
'To determine the x-coordinate for a Gauss-Legendre quadrature node within
'the left and right boundaries (xl,xr) of a slice
Const pai = 3.1415926536: Const gqn = 0.5773502692
diff = (xr - xl) / 2 * gqn: qp2 = (xr + xl) / 2
Select Case Index
Case 1: QuadPt = qp2 - diff
Case 2: QuadPt = qp2 + diff
End Select
End Function

Function pjsc(xl, xr, hl, hr, alfa, gl, gr, phie, ce, q, ru, lamda, Index) As Double
'To compute p(x)*Secant(sai) at a quadrature node of a slice.
Const pai = 3.1415926536: Const gqn = 0.5773502692
beta = Atn(lamda)
xoor = QuadPt(xl, xr, Index)
'To interpolate for Height*Gamma(L.e. dW/dx)
interp = (xoor - xl) / (xr - xl)
gamma = gl + Interp * (gr - gl)
dWdx = gamma * (h) + interp * (hr - hl)
temp = dWdx * (Sin(phie - alfa) - ru / Cos(alfa) * Sin(phie))
pj = temp + q * Sin(phie - alfa) + ce / Cos(alfa) * Cos(phie)
pjsc = pj / Cos(phie - alfa + beta)
End Function

Function IntIdx(xl, xr, alfa, lamda, Index) As Double
'Performs the inner integral, Eq.26 of Chen-Morgenstern (1983), for a segment of
'a slice. The integrand is constant within a slice, when beta is constants.
Const pai = 3.1415926536: Const gqn = 0.5773502692
beta = Atn(lamda)
diff = (xr - xl) / 2 * gqn
qp2 = (xr + xl) / 2
Select Case Index
Case 1: v1 = xl: vr = qp2 - diff
Case 2: v1 = qp2 - diff: vr = qp2 + diff
Case 3: v1 = qp2 + diff: vr = xr
End Select
Integrand = Sin(beta) - Cos(beta) * Tan(alfa)
IntIdx = (vr - v1) * Integrand 'To be summed cumulatively in spreadsheet.
End Function

Sub CalSlopeReliability()
Application.ScreenUpdating = False
SolverReset
SolverLoad Range("G4:G9")
SolverSolve True
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
  
```

รูปที่ 6.9 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แผ่นแยกส่วนจำเพาะ ที่ใช้ในการคำนวณ ประมาณค่าจาก two-node Gauss-Legendre quadrature

ในส่วนของรูปที่ 6.8 เป็นโครงสร้างส่วนแรก que แสดงกรอบเงื่อนไขเฉพาะที่กำหนดให้ $\tan \beta = \lambda$ กรอบถัดมาที่มีการระบุหน่วยของพจน์ตัวแปร ส่วนอีก 2-3 กรอบเป็นการระบุค่าความสัมพันธ์ระหว่าง FS กับ λ กับค่า FS - 1 ที่หาจากวิธีหาค่าที่เหมาะสมสำหรับกรอบของฟังก์ชันที่อยู่ในปริพันธ์มีอยู่ 2 กรอบ แสดงเป็นสัญกรณ์ \int กับ $\int\int$ มีค่าดังสองสมการข้างล่าง

$$\int = \sum_{i=0}^{12} \left(\text{psecant}(i, 1) + \text{psecant}(i, 2) \right) \times \left(\frac{x_r - x_l}{2} \right)_i \quad (6.27)$$

$$\int\int = \sum_{i=0}^{12} \left(\left(\text{psecant}(i, 1) \times \text{ttx}(i, 1) \right) + \left(\text{psecant}(i, 2) \times \text{ttx}(i, 2) \right) \right) \times \left(\frac{x_r - x_l}{2} \right)_i \quad (6.28)$$

รูปที่ 6.10 หน้าถัดไป แสดงหน้าจอที่ได้จัดเตรียมไว้สำหรับรับข้อมูลค่าคุณสมบัติกับค่ามิติเชิงเรขาคณิตที่เกิดจากการตัดความลาดในมวลดิน (ตั้งค่าที่ระบุไว้ในหน้า 118) และเมื่อได้ป้อนข้อมูลเข้าของค่า x , y_{slip} , y_{topo} แล้ว ก็มีการคำนวณค่าความสูงแนวโค้ง (h) ที่ส่วนต่อของแต่ละ slice จากการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของมุมที่ฐานของแต่ละส่วนแบ่ง (α) กับการที่หาค่า Δx จากการคำนวณผลจากค่าพิกัด x กับ y ทั้งสามค่าที่ป้อนเข้ามาในโปรแกรม ก็หาค่าของหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยได้จากสมการที่ 6.26

จากค่าคุณสมบัติที่สมมุติ กำหนดให้มวลแห้งไม่มีค่าความดันน้ำในโพรง ค่า γ_u กับค่า q (ความดันภายในสมทบ: surcharge pressure) เท่ากับ 0 (ศูนย์)

สำหรับสัญกรณ์ c'_e เป็นค่าโคฮีชันที่มวลมีการเคลื่อนที่ (หน่วยกิโลนิวตันต่อตร.ม.) กับสัญกรณ์ ϕ'_e เป็นมุมเสียดทานประสิทธิภาพของมวลที่มีการเคลื่อนที่ (หน่วยเป็นเรเดียน) ได้จากการคำนวณจากสูตรที่ระบุในหน้า 119 โดยใช้ค่าเดิมของ c' กับ ϕ' เป็นฐานในการคำนวณ ซึ่งค่าของ c'_e กับ ϕ'_e นี้แปรเปลี่ยนไปตามค่า FS ที่เปลี่ยนไปได้ตลอดเวลาจนกว่าจะได้ค่า FS ที่เหมาะสมที่สุด

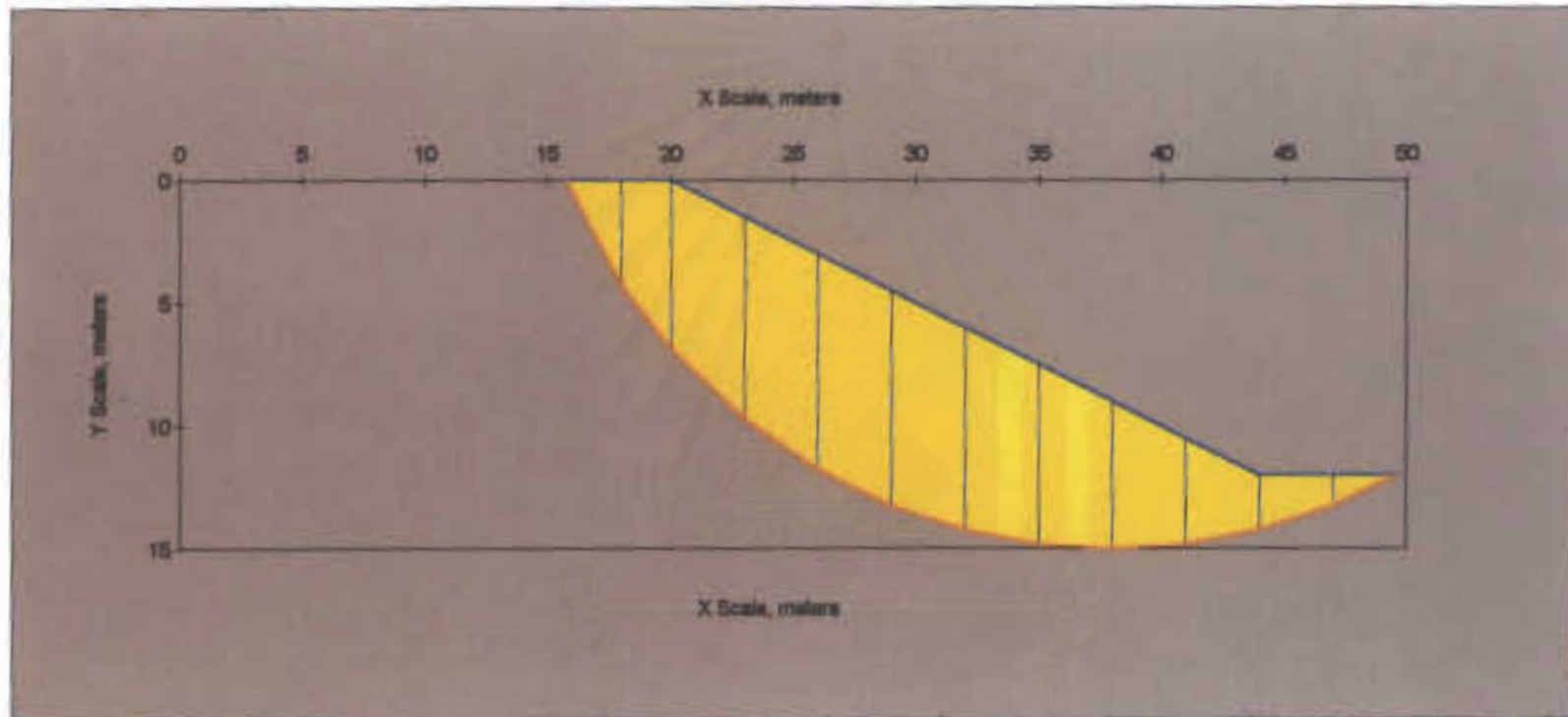
คอลัมน์ที่แสดงนิพจน์ psecant 2 คอลัมน์ ได้จากการคำนวณด้วยรหัสแมโคร ดังที่ได้ระบุรหัสคำสั่งไว้รูปที่ 6.9 ส่วนแรกของ psecant คือคอลัมน์ค่า psecant (i, 1) ส่วนที่สองของ psecant คือคอลัมน์ถัดมาเป็นค่า psecant (i, 2)

ในทำนองเดียวกันคอลัมน์ที่แสดงนิพจน์ ttx 3 คอลัมน์ ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคำสั่งแมโคร (รูปที่ 6.9) ส่วนแรกของ ttx คือคอลัมน์ค่า ttx (i, 1) ส่วนที่สองของ ttx คือคอลัมน์ถัดมา เป็นค่า ttx (i, 2) และ ส่วนที่สามของ ttx คือเป็นค่าสะสมของ ttx ที่เกิดจากผลรวมนิพจน์ Inttdx ที่ระบุนิยามในรูปที่ 6.9

Sx	x	y _{sp}	y _{pp}	h	α	Δx	γ	r ₀	c ₀	φ ₀	q	c	φ'	psecant	bx Cumulative	(x-x)/2			
0	15.75	0	0	0			19												
1	18	4.27	0	4.27	1.085836	2.25	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	19.48602	-27.40208	-0.754623	-2.816293	-3.570916	1.125
2	20	6.87	0	6.87	0.915101	2	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	-44.99242	-66.81814	-3.997084	-5.161396	-5.587564	1
3	23	9.73	1.5	8.23	0.761512	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	-60.15444	-68.9206	-6.014033	-7.17917	-7.605639	1.5
4	26	11.78	3	8.78	0.599452	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	-49.94822	-52.48016	-7.866384	-8.578752	-8.839497	1.5
5	29	13.25	4.5	8.75	0.455616	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	-31.41984	-31.32812	-8.981575	-9.369739	-9.511817	1.5
6	32	14.24	6	8.24	0.318748	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	-9.639048	-8.823426	-9.555688	-9.675545	-9.719416	1.5
7	35	14.81	7.5	7.31	0.187762	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	11.86669	12.01865	-9.677356	-9.562444	-9.520384	1.5
8	38	15	9	6	0.063249	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	30.1693	28.48118	-9.400576	-9.073255	-8.953447	1.5
9	41	14.81	10.5	4.31	-0.063249	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	43.79604	38.87363	-8.755892	-8.216161	-8.018606	1.5
10	44	14.24	12	2.24	-0.187762	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	48.61543	38.8012	-7.743304	-6.991163	-6.715861	1.5
11	47	13.25	12	1.25	-0.318748	3	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	44.13935	37.15981	-6.354827	-5.367718	-5.006484	1.5
12	49.62	12	12	0	-0.44516	2.62	19	0	13.70644	0.17328777	0	28.5	20	40.10804	27.75837	-4.612155	-3.534826	-3.140496	1.31

G(x)	β	σ ₀	τ	F ₀
0	0.252986			
8.905564	0.252986	10.18061	15.48849	56.00338
120.7161	0.252986	60.29763	24.26114	7.887974
314.3287	0.252986	97.89371	30.84209	4.389175
467.9713	0.252986	124.5164	35.50222	3.544188
562.0932	0.252986	139.9614	38.20576	3.180387
589.7869	0.252986	146.1302	39.28557	2.998696
553.9589	0.252986	143.3427	38.79763	2.910425
465.9832	0.252986	131.4596	36.71757	2.873997
341.9787	0.252986	110.3827	33.02821	2.842926
210.8537	0.252986	78.3759	27.42562	2.617514
88.905	0.252986	50.78619	22.59623	3.008808
-9.38E-09	0.252986	29.3596	18.84565	

รูปที่ 6.10 แผ่นแบบแสดงหน้าจอของผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสม ความเงื่อนไข
ที่ระบุให้แรงค้ำข้างส่วนแบ่งคงที่ ตามวิธีของ Chen and Morgenstern



สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ 6.11 ภาพกราฟการพังทลายรูปอาร์กที่ผิวส่วนโค้งไม่ใช่วงกลม การหาค่าเป็นไปตามค่าที่คข้อมูลเข้าของแกน x และ y (แสดงที่ผิว slip เป็นสีฟ้า) และเส้นตรงของผิวหน้าความลาดชันกับระดับพื้น (เป็นสีส้ม)

คอลัมน์ที่แสดงนิพจน์ $(x_r - x_l) / 2$ ได้มาจากความสัมพันธ์ของสูตรแถวลำดับสองค่า (two array formulas) ซึ่งใช้สัญกรณ์ $\{ \}$ กับ $\{ \{ \}$ (ในกรอบของรูปที่ 6.8 หน้า 123) และแสดงนิพจน์เป็นสมการที่ 6.27 กับ 6.28

ผลลัพธ์ของข้อมูลออก (output) ที่ได้จาก Solver tool เป็นค่าจากสูตรคำนวณของ $G(x)$ ที่แยกส่วนหลังของตาราง และถูกจัดไว้เป็นคอลัมน์แรกในรูปที่ 6.10 ซึ่งเป็นการหาค่าผลรวมของแรงด้านข้างส่วนแบ่ง และค่า $G(x)$ นี้ไม่พึ่งพิงกับค่าผลเฉลยของ F_s กับ λ สูตรถูกป้อนเข้าไปเก็บไว้ในเซลล์ข้อมูลที่เป็น boxed cell

ค่าเริ่มต้นของ FS กับ λ ปกติให้ $FS = 1$ และ $\lambda = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขบังคับ (constraint) ของการคำนวณที่ $FS \geq 0$ และ $\lambda \leq 1$ ดังนั้นได้ผลลัพธ์ค่าปริพันธ์สมการที่ 6.23 เมื่อมีส่วนแบ่งมวลสารรูปโค้งที่ไม่ใช่อาร์กวงกลมทั้งหมด 12 ส่วน มีผลเฉลยของ FS ที่คำนวณค่าอย่างอัตโนมัติระบุในรูป 6.10 ได้ค่า $FS = 2.079314$ และค่าพจน์ $\lambda = 0.258525$

รูปที่ 6.11 หน้า 138 เป็นภาพกราฟิกที่พล็อตค่าตามข้อมูลเข้าที่ป้อนเข้าไปตามพิกัดของ x และ y เพื่อแสดงลักษณะของพื้นผิวโค้งรูปอาร์กแต่ไม่ใช่ส่วนของวงกลม ตำแหน่งพิกัด $x_u = 15.75$ เมตรที่ระดับสูงของพื้นผิวเท่ากับศูนย์ ส่วนพิกัด $x_b = 49.62$ เมตร โดยมีค่าของ y_{slip} เท่ากับ y_{topo} เป็นค่าระดับสูง 12.00 เมตร

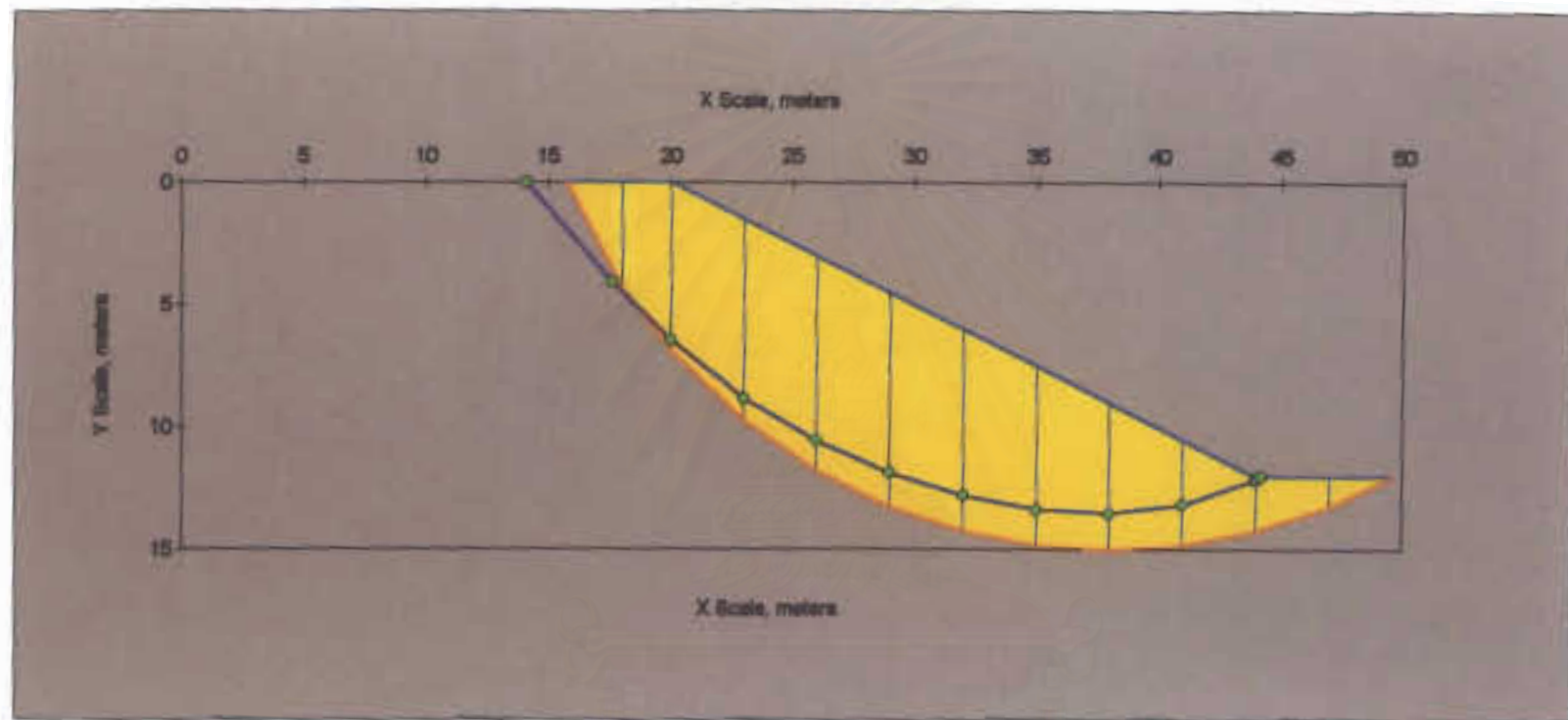
6.2.6 วิธีการและขั้นตอนในการหาพื้นผิววิกฤตของการพังทลาย

จากพื้นผิวการพังทลายที่เลือกมาจากการคำนวณด้วย Solver tool ในโปรแกรมแผ่นตารางทำการ และแสดงภาพกราฟิกไว้ในรูป 6.11 ปรากฏว่าค่าปัจจัยความปลอดภัยที่หาผลลัพธ์ได้ยังไม่ใช่ค่าต่ำสุด จึงมีการใช้ Solver tool คำนวณหาค่าซ้ำอีก เพื่อให้ได้ค่าที่ต่ำสุด และหารูปแบบพื้นผิววิกฤตของการพังทลาย (critical slip surface)

วิธีการนี้เป็นการกำหนดขอบความปลอดภัยของนิพจน์ $FS - 1$ ให้มีค่าต่ำสุด ทั้งนี้เพราะว่าค่าฟังก์ชัน FS ไม่สามารถหาค่าต่ำสุด (เหมาะที่สุด) ได้ เพราะเป็นพจน์ที่มีแต่ค่าข้อมูลเชิงตัวเลข ลำดับขั้นตอนมีดังนี้

1. เริ่มทำปฏิบัติการ Invoke Solver ใหม่คือจากการทำปฏิบัติการของ Solver tool ชุดแรกไปแล้ว ทั้งนี้ในปฏิบัติการชุดใหม่ตรงช่องเล็ก ๆ ของ dialog box ให้เปลี่ยนค่าที่กำหนดใหม่ เป็น $(FS - 1) = \text{minimum}$ ทั้งนี้โดยการเปลี่ยนเซลล์จำนวน 4 เซลล์ ได้แก่ค่าพจน์:

- FS
- λ
- x_0, x_1, x_{11}, x_{12} [พิกัดแกน x ชุดแรก กับพิกัดแกน x ชุดสุดท้าย]
- $(y_1 - y_{11})$ นั่นคือค่า y_{slip} [พิกัดแรกกับพิกัดสุดท้ายแกน y]



รูปที่ 6.12 ภาพกราฟิกการพังทลายรูปอาร์กที่มีส่วนโค้งไม้ใช้วงกลมการห้อยค่า เป็นไปตามค่าพิกัดข้อมูลเข้าของแกน x และ y (แสดงที่ผิว slip เป็นสีฟ้า) และพื้นผิววิกฤต (สีม่วง) หากจากการคำนวณค่าของปัจจัยความปลอดภัยค่าสุดท้าย เส้นตรงผิวหน้าความลาดชันกับระดับพื้น (สีส้ม)

2. กำหนดเงื่อนไขบังคับชุดแรก ลงในช่องเล็ก ๆ Solver dialog ดังนี้
 - $\iint = 0$ (ตามข้อกำหนดของวิธี Chen and Morgenstern)
 - $\iiint = 0$ (ตามข้อกำหนดของวิธี Chen and Morgenstern)
 - $FS \geq 1$ (เพื่อให้มั่นใจว่ามีเสถียรภาพ)
 - $\lambda \leq 1$ (มีผลทำให้แรงด้านข้างกระทำกับแนวราบไม่เกิน 45°)

3. กำหนดเงื่อนไขบังคับชุดที่สอง ลงในช่องเล็ก ๆ ของ Solver dialog ดังต่อไปนี้
 - $\Delta x \text{ column} \geq 0.1$ (เป็นค่าทุกค่าในคอลัมน์ Δx ที่เป็นเลขค่าน้อยแต่มากกว่าศูนย์)
 - last few α cells ≥ -1 เรเดียน (นั่นคือ $\alpha \geq -57.3^\circ$)
ค่านี้ปรับแก้มาจากการลองผิดลองถูกหามุมที่เหมาะสมของส่วนแบ่งชุดหลัง
 - last few h cells ≥ 0 เนื่องจากค่า h ของส่วนแบ่งชุดแรกไม่ค่อยมีผลต่อการเปลี่ยนค่า FS
 - $G(x) \geq 0$ (ค่าแรงดันด้านข้าง ไม่ควรมีค่าเป็นลบ)
 - $\sigma'' \geq 0$ (ค่าแรงอัดจากประสิทธิผลบนระนาบพื้นผิวการพังทลาย ไม่ควรมีค่าเป็นลบ)

4. ค่าผลลัพธ์และรูปภาพของพื้นผิววิกฤต ที่ได้จากการทำปฏิบัติการของ Solver tool ครั้งหลังนี้ ได้ค่า $FS = 1.986$ ซึ่งต่ำกว่าค่า FS ที่ทำปฏิบัติการครั้งแรก (2.079) ส่วนรูปภาพที่แสดงพื้นผิววิกฤตรูปอาร์กที่ไม่ใช่วงกลม แสดงไว้ในรูปที่ 6.12 หน้า 140 โดยแนววิถีรูปอาร์กตัดผ่านจุดล่างสุด (toe) ของความลาด

5. เงื่อนไขบังคับในการหาพื้นผิววิกฤตนี้ ยังต้องขึ้นกับผลการพิจารณาปัญหาที่เกิดกับประสบการณ์ของผู้ทำปฏิบัติการ เช่น ค่า Δx ต้องมากกว่าศูนย์ เพราะถ้าเป็นศูนย์ก่อให้เกิดปัญหาในการคำนวณ และการคำนวณโดยกำหนดเงื่อนไขและให้มีแรงด้านข้างคงที่นี้ ทำการหาพื้นผิววิกฤตได้ง่ายและเสียเวลาน้อยกว่า การทำปฏิบัติการโดยไม่มีเงื่อนไข

6.2.7 วิธีการและขั้นตอนในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้

แนวทางที่ใช้การคำนวณด้วย Solver tool เพื่อหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับพื้นผิวโค้งของการพังทลาย (slip surface) มีการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการ และมีการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากเค็มที่เสนอแนะโดย Hasofer and Lind (1974) และมีการแก้ไขเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของกระจายค่าวงรี (Low and Tang, 1997 a)

1. สูตรเชิงประสกรณณ์ที่ใช้หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) เป็นค่าตัวเลขเชิงความน่าจะเป็น ที่ใช้แทนการหาพื้นผิววิกฤตที่เป็นการวิเคราะห์เชิงกำหนด สมการ 6.29 ข้างล่างนี้เป็นรูปแบบเมทริกซ์ที่เสนอแนะโดย Hasofer and Lind (1974) สมการที่ 6.30 ปรับปรุงใหม่โดย (Low and Tang, 1997 a) ส่วนสมการ 6.31 เขียนในรูปแบบรหัสคำสั่งในโปรแกรมแผ่นแผ่นตารางทำการ แปลงมาจากสมการ 6.30

$$\beta_{HL} = \min_{x \in F} \sqrt{(x - m)^T C^{-1} (x - m)} \quad (6.29)$$

$$\beta_{HL} = \min_{x \in F} \sqrt{\left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]^T [R]^{-1} \left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]} \quad (6.30)$$

$$R.I. = \text{sqrt}(\text{mmult}(\text{transpose}(nx), \text{minverse}(\text{crmat}), nx)) \quad (6.31)$$

นิยามของพจน์ตัวแปรใน 3 สมการข้างบน ได้แก่

- β_{HL} = ดัชนีความเชื่อถือได้ที่เป็นค่าระยะสั้นสุด จากจุดกำเนิดถึงขอบของการพังทลาย
- x = เวกเตอร์ที่แทนเซตตัวแปรสุ่ม
- m = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม หรือคือ x_{mean}
- C = เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว
- F = บริเวณที่เกิดการพังทลาย
- $[R]^{-1}$ = ตัวผกผันของเมทริกซ์สหสัมพันธ์
- σ_i = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
- $R.I.$ = ดัชนีความเชื่อถือได้ที่กำหนดให้ฟังก์ชันสมรรถนะ เป็นค่า FS - 1

2. ขั้นตอนและเงื่อนไขบังคับในการทำปฏิบัติการเพื่อหาค่า R.I. ต่ำสุด

เริ่มทำปฏิบัติการ Invoke Solver ใหม่ต่อจากการทำปฏิบัติการ Solver tool ชุดแรกไปแล้ว ทั้งนี้โยปฏิบัติการชุดใหม่ตรงช่องเล็ก ๆ ของ dialog box ให้เปลี่ยนค่าที่กำหนดใหม่เป็นค่า $R.I. = \text{minimum}$ ทั้งนี้โดยการเปลี่ยนเซลล์จำนวน 5 เซลล์ ได้แก่

- FS
- λ
- xvalues of c' and ϕ' [ค่าคุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุ]
- x_0, x_1, x_{11}, x_{12} [พิกัดแกน x ชุดแรก กับพิกัดแกน x ชุดสุดท้าย]
- $(y_1 - y_{11})$ นั่นคือค่า y_{slip} [พิกัดแรกกับพิกัดสุดท้ายแกน y]

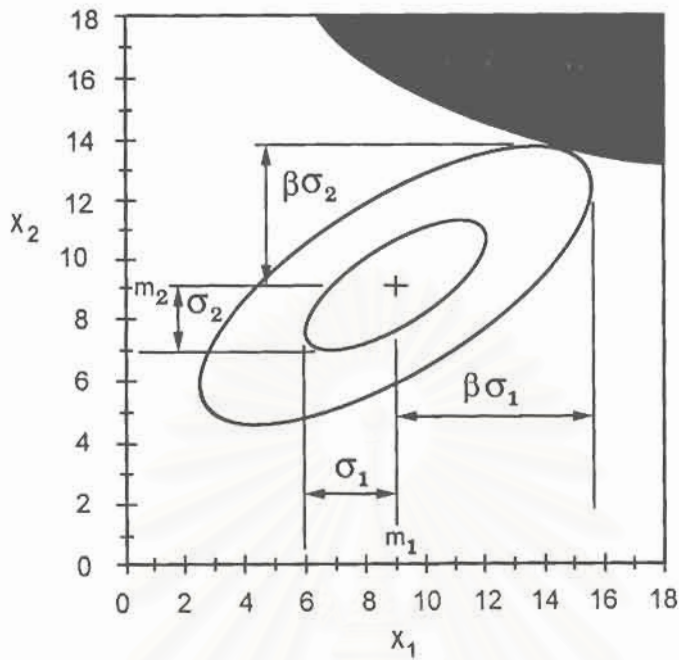
กำหนดเงื่อนไขบังคับลงในช่องเล็ก ๆ Solver dialog ดังนี้

- $\int \int = 0$ (ตามข้อกำหนดของวิธี Chen and Morgenstern)
- $\int \int \int = 0$ (ตามข้อกำหนดของวิธี Chen and Morgenstern)
- PerFunc (FS - 1) = 0 (เพื่อให้มั่นใจว่ามีค่าต่ำสุด)
- FS ≥ 1
- $\lambda \leq 1$ (มีผลทำให้แรงดันข้างกระทำกับแนวราบไม่เกิน 45°)
- xvalues of c' and $\phi' \geq 0$ (เพื่อแสดงว่ามีแรงเชิงประสิทธิผล เกิดในมวลสาร)
- Δx column ≥ 0.1 (เป็นค่าทุกค่าในคอลัมน์ Δx ที่เป็นเลขค่าน้อยแต่มากกว่าศูนย์)
- last few α cells ≥ -1 เรเดียน (นั่นคือ $\alpha \geq -57.3^\circ$)
ค่านี้ปรับแก้มาจากการลองผิดลองถูกหามุมที่เหมาะสมของส่วนแบ่งชุดหลัง
- $h_{10}, h_{11} \geq 0.1$ เนื่องจากเป็นค่า h ของส่วนแบ่งชุดสุดท้าย
เนื่องจากการเปลี่ยน h_{12} ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่า
- $G(x) \geq 0$ (ค่าแรงดันด้านข้าง ไม่ควรมีค่าเป็นลบ)
- $\sigma_n \geq 0$ (ค่าแรงอัดฉากประสิทธิผลบนระนาบพื้นผิวการพังทลาย ไม่ควรมีค่าเป็นลบ)

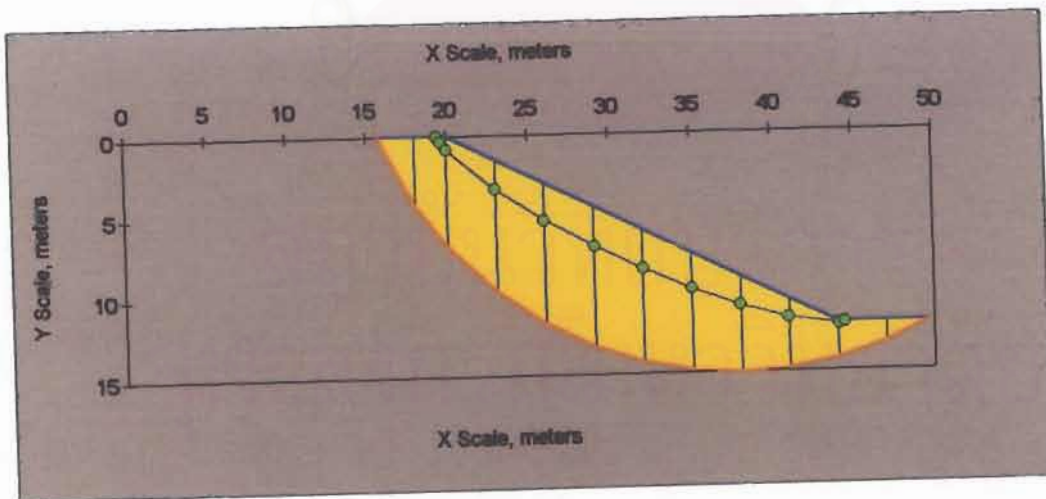
เมื่อทำการเปลี่ยนเซลล์และกำหนดเงื่อนไขเสร็จแล้ว ก็ทำปฏิบัติการต่ออีกครั้งเพื่อหาค่า R.I. ทั้งนี้เป็นการหาพื้นผิววิกฤตพร้อมกันไปด้วย

3. ผลลัพธ์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ต่ำสุด

ค่าผลลัพธ์ดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับกรณีเกิดพื้นผิววิกฤต ที่ได้จากการทำปฏิบัติการของ Solver tool ในกรณีนี้ ได้เริ่มต้นหาค่า FS ที่มีความน่าจะเป็นได้ คือค่า FS = 1 และ $\lambda = 0.5$ ทั้งนี้โดยใช้สองค่าของ c' กับ ϕ' ซึ่งต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่ระบุ $(FS - 1) = 0$ ค่า β ที่กำหนดหาค่าของวงรีการกระจายค่าที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $1-\sigma$ (one-sigma) ตามที่ได้บรรยายไว้ในหน้า 26-30



รูปที่ 6.13 การหาค่า β ที่สิ้นสุดจากวงรีวิกฤต เป็นรูปเดียวกับรูปที่ 2.12



รูปที่ 6.14 ภาพกราฟการพังทลายรูปอาร์ก เป็นการค้นหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่เหมาะสมที่สุด จากผลของพื้นผิวการพังทลายวิกฤตกับจากการใช้วงรีการกระจายค่าที่สัมพันธ์กับพื้นผิวการพังทลาย ตามแนวคิดวงรีวิกฤตในรูปบน

จากการพิจารณานั้นให้ค่าคุณสมบัติที่ใช้ทั้ง ϕ' กับ c' นั้นมีการแจกค่าปกติที่ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน $1 - \sigma$ และมีจุดศูนย์กลางของวงรีที่ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทั้งสอง (คูแกน x_1 กับ x_2 ในรูป 6.13) จากสมการที่ 6.30 เมื่อให้ $\beta = 1$ ปรากฏว่าวงรีที่ $1 - \sigma$ มีการเอียงทำให้ขอบนอกวงรีสัมผัสพื้นผิวการพังทลาย ซึ่งจากการคำนวณด้วย Solver ได้ ค่า β ที่ 2.904 ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายของค่า R.I. นั้นเอง

ภาพกราฟิกในรูป 6.14 เป็นการแสดงพื้นผิวรูปอาร์กที่ได้จากการป้อนข้อมูลเข้าของ พิกัดแกน x และ y ส่วนพื้นผิววิกฤตของการพังทลาย เป็นค่าที่คำนวณที่อิงจากวงรีวิกฤตที่มี ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $1 - \sigma$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เป็นวงรี $\beta - \sigma$ (β -sigma ellipse) ที่พื้นผิววิกฤตที่ $FS = 1$

6.3 กรณีศึกษาการพังทลายรูปลิ้ม

ตัวอย่างที่ยกมาเป็นกรณีศึกษา นี้ เป็นเรื่องของ การพังทลายที่เกิดภายในมวลสารที่เป็นหิน และมวลหินมีรอยแตกแยกเป็นระนาบที่มีการวางตัวในแนวทางที่เหมาะสม และมีการตัดกันของระนาบจนทำให้เกิดมวลรูปลิ้ม ที่มีโอกาสเกิดการพังทลายตามแนวเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน ลักษณะของการพังทลายรูปลิ้มนี้ไม่พบเกิดในมวลดิน

แนวทางของกรณีศึกษาการพังทลายรูปลิ้ม เป็นไปในรูปแบบเดียวกับกรณีศึกษาการพังทลายรูปอาร์กในหัวข้อ 6.2 ได้แก่ มีการเสนอแนะวิธีการและขั้นตอนของการใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการเพื่อหาปัจจัยความปลอดภัยเชิงจลนศาสตร์ กับมีการค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ในเชิงความน่าจะเป็นของการพังทลาย

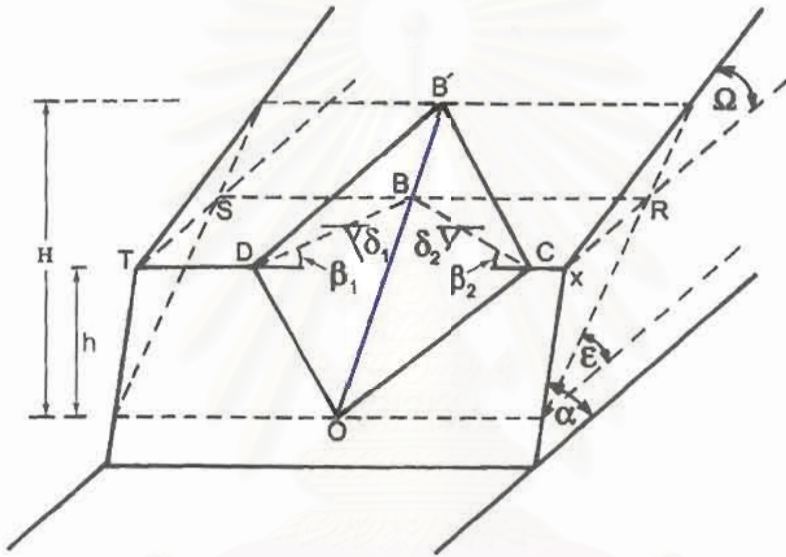
6.3.1 วิธีการและขั้นตอนในการหาเสถียรภาพเชิงจลนศาสตร์โดยใช้โปรแกรม

หลักการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปลิ้ม โดยใช้การหาค่าผลลัพธ์ของเวกเตอร์แรงตามได้ที่น่าเสนอโดย Hoek et al. (1974) และ Hoek and Bray (1976) มีการปรับปรุงใหม่และนำเสนอการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยโดยใช้สมการรูปแบบปิด โดย Low (1997) เพื่อหาค่าโอกาสที่จะเกิดการพังทลายเชิงจลนศาสตร์ (kinematics)

1. รูปแบบกับสูตรและเงื่อนไขบังคับการพังทลายรูปลิ้ม

หลักการวิเคราะห์โอกาสการพังทลายมวลรูปลิ้มที่มีรูปทรงพีระมิด ได้มีการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.4 หน้า 87 - 103 มีการยกตัวอย่างวิธีคำนวณโดยใช้เวกเตอร์ของแรงกับการนำตัวอย่างเดียวกันมาหาค่าเชิงความเชื่อถือได้ โดยใช้ Solver tool ดังนั้นการนำเสนอเป็นกรณีศึกษาในแบบนี้ ถ้ามีส่วนใดซ้ำกับหัวข้อ 4.4 จะเว้นหรือระบุไว้

รูปแบบที่ใช้ในการหาค่าการพังทลายเชิงจลนศาสตร์มีเพียงรูปแบบเดียว ที่กำหนดให้มวลรูปสี่เหลี่ยม มีมุมเอียงของระนาบด้านบนของพื้นผิวตะพัก (upper ground) เป็นไปในแนวทิศทางเดียวกันกับมุมเอียงของระนาบผิวน้ำความลาด (slope face) ภาพสเก็ทซ์ข้างล่างเป็นรูปเดียวกันกับ รูปที่ 4.15 บทที่ 4 โดยมีนิยามของสัญลักษณ์กับนิยามของเครื่องหมายเหมือนกันกับที่ระบุไว้ในหน้า 97-100



รูปที่ 6.15 มวลรูปสี่เหลี่ยมที่มีระนาบด้านบนความลาดเอียง มีแนวเอียงทิศทางเดียวกับระนาบผิวน้ำความลาด รูปนี้ใช้วิเคราะห์ค่าเชิงจลนศาสตร์กับเชิงความน่าจะเป็นที่หาจากดัชนีความ เชื่อถือ ได้กับวงรีวิกฤตสัมผัสพื้นที่การพังทลาย

2. มวลรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเลื่อน ไถลและสัมผัสผิวระนาบด้านล่างทั้ง 2 ระนาบ

สูตรเชิงประสมการณ์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงจลนศาสตร์ แบ่งตามสถานะของการพังทลายในขณะที่มวลรูปสี่เหลี่ยมมีการเคลื่อนที่เป็น 4 ชุด ได้แก่ มวลสี่เหลี่ยมมีการสัมผัสกับระนาบด้านล่าง 2 ระนาบ มวลสี่เหลี่ยมมีการสัมผัสกับระนาบที่ 1 เพียงระนาบเดียว มวลสี่เหลี่ยมมีการสัมผัสกับระนาบที่ 2 เพียงระนาบเดียว และมวลสี่เหลี่ยมมีการลอยตัวไม่สัมผัสกับระนาบใด

กรณีศึกษาการพังทลายรูปสี่เหลี่ยม ใช้เฉพาะกรณีที่มวลรูปสี่เหลี่ยมมีการสัมผัสทั้ง 2 ระนาบด้านล่าง เมื่อต้องการหาสูตรเชิงประสมการณ์จากแบบจำลองมวลรูปสี่เหลี่ยมในรูปที่ 6.15 ได้

มีการจัดรูปแบบของสมการปิดให้เหมาะสม เพื่อหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (FS) ที่เป็นฟังก์ชันของ กลุ่มข้อมูลหลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นมุมเอียงเท รูปแบบเชิงเรขาคณิต ความดันน้ำ และคุณสมบัติมวลสาร

กลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับค่าปัจจัยความปลอดภัย คือ มุมที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนระนาบรอยแตกแยก [joint orientation angles: $\beta_1, \delta_1, \beta_2, \delta_2$] ความสูงของลิ้ม (h) มุมเอียงเทผิวหน้าความลาด (α) และมุมเอียงเทระนาบตะกอนชั้นบนโคได้นวน (Ω) กลุ่มข้อมูลความดันน้ำที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน [normalized water pressure: G_{w1} และ G_{w2}] กลุ่มข้อมูลเชิงกำลังวัสดุของระนาบรอยแตกแยก [ϕ_1, ϕ_2, c_1, c_2]

สมการที่ใช้หาค่าปัจจัยความปลอดภัย ในกรณีที่มีมวลรูปลิ้มสัมผัสกับ 2 ระนาบด้านล่าง มีทั้งหมด 13 สมการ และสมการเหล่านี้เกือบทั้งหมดระบุไว้แล้วในหัวข้อ 4.4.3 บทที่ 4 แต่เพื่อให้สะดวกต่อการอ่าน จึงมีการพิมพ์ซ้ำและจัดลำดับเลขที่สมการใหม่

สมการที่ 6.32 ถึง 6.44 เป็นสมการรูปแบบปิดที่ปรับปรุงใหม่ ตามข้อเสนอแนะของ Low (1997) โดยสมการที่ 6.32 (สมการที่ 4.46 เดิม) เป็นสมการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยทั่วไปที่มีระนาบสัมผัสกับมวลลิ้มทั้ง 2 ระนาบ ซึ่งเรียกใหม่ว่า "BiPlane" ส่วนสมการที่เหลือเป็นการหาผลเฉลยของพจน์ตัวแปร ทั้งที่เป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตกับคุณสมบัติมวลสาร และตัวแปรอื่น ๆ ทั้งนี้ควรดูรูปที่ 6.15 กับนิยามพจน์ในหัวข้อ 4.4.3

$$F_s = \left(a_1 - \frac{b_1 G_{w1}}{s_\gamma} \right) \times \tan \phi_1 + \left(a_2 - \frac{b_2 G_{w2}}{s_\gamma} \right) \times \tan \phi_2 + 3b_1 \frac{c_1}{\gamma h} + 3b_2 \frac{c_2}{\gamma h} \quad (6.32)$$

$$a_1 = \frac{[\sin \delta_2 \cot \delta_1 - \cos \delta_2 \cos (\beta_1 + \beta_2)]}{\sin \psi \sin (\beta_1 + \beta_2)} \quad (6.33)$$

$$a_2 = \frac{[\sin \delta_1 \cot \delta_2 - \cos \delta_1 \cos (\beta_1 + \beta_2)]}{\sin \psi \sin (\beta_1 + \beta_2)} \quad (6.34)$$

$$b_1 = a_0 \sin \beta_2 \sin \delta_2; \quad b_2 = a_0 \sin \beta_1 \sin \delta_1 \quad (6.35)$$

$$\sin \psi = \sqrt{\left\{ 1 - [\sin \delta_1 \sin \delta_2 \cos (\beta_1 + \beta_2) + \cos \delta_1 + \cos \delta_2]^2 \right\}} \quad (6.36)$$

$$a_0 = \frac{\sin \Psi}{\left[\sin (\beta_1 + \beta_2) \sin \delta_1 \sin \delta_2 \right]^2 (\cot \varepsilon - \cot \alpha)} \quad (6.37)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{\sin (\beta_1 + \beta_2)}{\sin \beta_1 \cot \delta_2 + \sin \beta_2 \cot \delta_1} \quad (6.38)$$

$$G_{w1} = G_{w2} = 0.5K \text{ for pyramidal distribution} \quad (6.39)$$

$$K = \frac{H}{h} = \left(1 - \frac{\tan \Omega}{\tan \alpha} \right) \bigg/ \left(1 - \frac{\tan \Omega}{\tan \varepsilon} \right) \quad (6.40)$$

$$h = \frac{DC}{(\cot \varepsilon - \cot \alpha) \times (\cot \beta_1 + \cot \beta_2)} \quad (6.41)$$

$$\frac{V}{h^3} = \frac{K}{6} \times (\cot \beta_1 + \cot \beta_2) \times (\cot \varepsilon - \cot \alpha)^2 \quad (6.42)$$

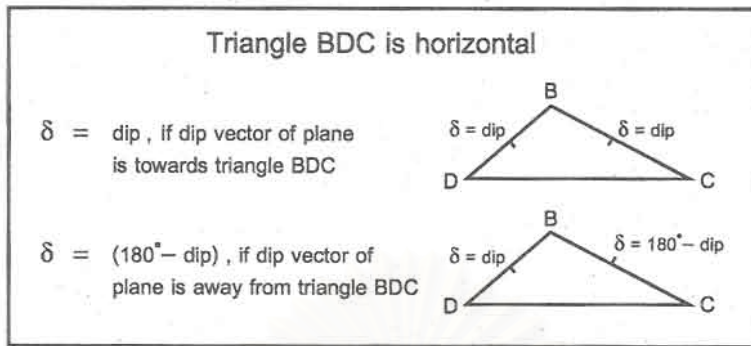
$$G_{w1} = \frac{3u_1}{\gamma_w(h)} ; G_{w2} = \frac{3u_2}{\gamma_w(h)} \quad (6.43)$$

$$u_1 = u_2 = \frac{\gamma_w(hK)}{6} \quad (6.44)$$

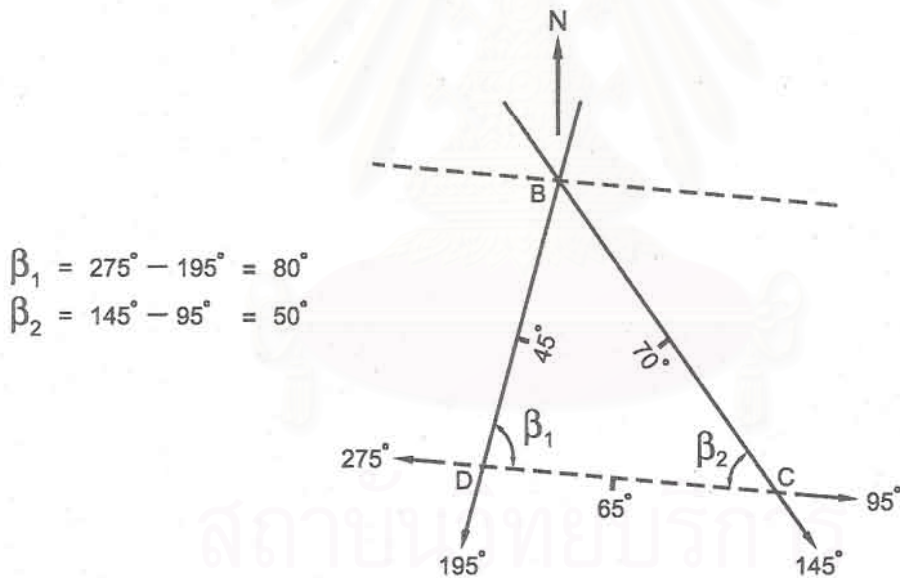
3. การแปลงค่าข้อมูลการวางตัวของระนาบก่อนใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการ

เนื่องจากในการรับข้อมูลเข้าในโปรแกรมที่ใช้ Solver tool ค่าการวางตัวของระนาบรอยแตกแยกที่วางตัวด้านล่างของมวลรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้แทนด้วย Joint 1 และ Joint 2 กับค่าการวางตัวของระนาบผิวหน้าความลาด (slope face) ต้องมีการแปลงค่ามุมเอียงเท (dip angle) กับแนวทิศทางเอียงเท (dip direction) ใหม่

ตัวอย่างการแปลงค่าการวางตัวของระนาบในรูป 6.16 หน้าถัดไป มีรูปแบบที่เป็นภาพสเก็ชกับสัญลักษณ์ รวมทั้งตารางเล็ก ๆ ค่า กับวิธีการพิก ที่ได้ทำการแปลงค่าระนาบ 3 ระนาบให้อยู่ในรูปแบบของค่ามุม β กับ δ โดยเริ่มจากใช้สามเหลี่ยม BDC รูป 6.15 ที่วางตัวในแนวราบ และลากเส้น strike สำหรับระนาบทั้งสามเทียบกับทิศเหนือ พร้อมทั้งแสดงมุม true dip ไว้ด้วย จากวิธีการพิกหาค่ามุม β_1 กับ β_2 กับหาค่ามุม δ ที่มีค่าเท่ากับ dip (ถ้ามุม dip อยู่ในสามเหลี่ยม BDC) หรือมีค่าเท่ากับ $(180 - \text{dip})$ ถ้ามุม dip อยู่นอกสามเหลี่ยม BDC



	Dip Direction / Dip Angle
Joint 1	105° / 45°
Joint 2	235° / 70°
Slope face	185° / 65°



$\beta_1 = 80^\circ, \beta_2 = 50^\circ, \delta_1 = 45^\circ, \delta_2 = 70^\circ$

รูปที่ 6.16 วิธีการแปลงค่าระนาบ 3 ระนาบ ได้แก่ joint 1, joint 2 และ slope face ให้เป็นค่า $\beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2$ ของสามเหลี่ยม BDC ที่อยู่ในแนวราบกับระดับ การแปลงมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเลือกระบุมุม δ ที่อยู่ในหรือนอกสามเหลี่ยม การพล็อตค่าเส้นกรอบของสามเหลี่ยมตามค่า strike ของสามระนาบ การวัดค่ามุม β_1, β_2 และค่ามุม δ_1, δ_2 ตามลำดับ

6.3.2 ผลลัพธ์เสถียรภาพค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด

ในการทดสอบหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนดนี้ ใช้ค่าตัวเลขการวางตัวของระนาบกับค่าคุณสมบัติมวลสาร ในตารางที่ 6.3 ที่คัดลอกมาจาก Hoek and Bray (1981, หน้า 207) แต่แทนที่จะใช้วิธีการฉายภาพ 3 มิติด้วยการพล็อตค่าบน stereo net แล้วหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด แต่ในหัวข้อย่อยนี้จะใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการหาค่าแทน

ตารางที่ 6.3 ค่าการวางตัวของระนาบกับคุณสมบัติมวลสาร ที่มีความดันน้ำกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตความลาดเอียง

ระนาบ (ชื่อหรือลำดับเลข)	แนวทิศทางเอียงเท / มุมเอียงเท (วัดแนวทิศเทียบกับทิศเหนือ ส่วนมุมเอียงเทียบกับแนวราบ)	คุณสมบัติมวลสาร
A หรือ 1	105° / 45°	$\phi_1 = 30^\circ$, $c = 24 \text{ kPa}$
B หรือ 2	235° / 70°	$\phi_2 = 20^\circ$, $c = 48 \text{ kPa}$
Slope Face	185° / 65°	ไม่ได้ใช้ในการคำนวณ
Upperground Surface	195° / 12°	ไม่ได้ใช้ในการคำนวณ
หมายเหตุ หน่วยน้ำหนัก (γ) = 25 kN/m ³ หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) = 10 kN/m ³ ความสูงทั้งหมดในแนวตั้งของลิ้ม (H) = 40 m.		

หลักการคำนวณเสถียรภาพมวลรูปลิ่ม โดยใช้การหาด้วยโปรแกรมแผ่นตารางทำการ ยังมีเงื่อนไขบังคับเชิงจลนศาสตร์ ในการก่อให้เกิดลิ้ม ได้แก่

$$\Omega < \varepsilon < \alpha \quad (6.45)$$

นอกจากนี้ในโปรแกรมคำนวณ ยังกำหนดเงื่อนไขบังคับเพิ่มเติมอีก ได้แก่

$$abG_1 \geq 0; \quad abG_2 \geq 0 \quad (6.46)$$

Factor of Safety Using Spreadsheet

	Joint 1	Joint 2
β	80	50
δ	45	70

α	Ω	h	γ	γ_s	ρ_y
65	12	30.55	25	10	2.5

ϕ_1	ϕ_2	c_{s1}	c_{s2}	c	c_s	u_1	u_2
30	20	0.654725	0.654725	24	48	0	0

α inclination of slope face
 Ω inclination of upper ground surface

รูปที่ 6.17 หน้าจอของข้อมูลที่ป้อนเข้าไปเพื่อหาค่า FS เริงกำหนด

$\sin \Psi$	$\cot \epsilon$	a_0	K	H	a_1	a_2	b_1	b_2	Z
0.982689	1.467911	3.786785	1.30945	40	1.540336	0.945671	2.725903	2.636982	-0.185264

Check: $\Omega < \epsilon < \alpha$
 12 < 34.26426 < 65

Check: $abG_1 \geq 0$, $abG_2 \geq 0$
 0.828449 >= 0 , 0.255072 >= 0

wedge is formed contact on both planes

FS = 1.32422

รูปที่ 6.18 ผลลัพธ์ของข้อมูลออกที่ได้จากคำนวณค่าตัวแปรและค่า FS เริงกำหนด

เมื่อทำการป้อนข้อมูลเข้าไปในเซลล์ ดังรูปที่ 6.17 หน้า 151 ซึ่งมีค่าที่ต้องป้อนเข้าไปทั้งหมด 18 ค่า ที่ระบุใน 3 คอลัมน์ โปรแกรมแผ่นตารางทำการก็มีการคำนวณด้วย Solver tool ได้ค่ามิติเชิงเรขาคณิตกับคุณสมบัติมวลสารที่คำนวณ และระบุในคอลัมน์แถวแรกของรูป 6.18 จำนวนทั้งหมด 10 ค่า สำหรับค่า h นั้นต้องใช้สมการที่ 6.40 หาค่าของ K มาก่อนแล้วแทนค่า H หาค่าของ h มาป้อนเข้าไปในเซลล์ข้อมูล

ก่อนที่จะมีการระบุค่า FS ที่เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัย โปรแกรมมีการตรวจสอบ 2 ขั้นตอน โดยตรวจสอบค่ามุมว่ามีความเป็นไปได้ที่มวลรูปสี่เหลี่ยมจะเกิดได้ (ระบุค่ามุมในคอลัมน์แถวที่สอง) กับตรวจสอบว่าค่านิพจน์เชิงเรขาคณิตกับคุณสมบัติมีค่ามากกว่าศูนย์ (ระบุค่าผลลัพธ์ของ abG_1 กับ abG_2 ในคอลัมน์แถวที่สาม)

สำหรับผลลัพธ์ที่แสดงว่ามวลสี่เหลี่ยม และการสัมผัสแบบโหนด แสดงไว้ในคอลัมน์แถวที่สี่ และค่า FS ที่เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนดระบุไว้ในคอลัมน์แถวที่ห้า ซึ่งได้คำตอบเป็น $FS = 1.324$

6.3.3 ผลลัพธ์เสถียรภาพเชิงจลนศาสตร์ของมวลรูปสี่เหลี่ยม

จากผลของการคำนวณปัจจัยความปลอดภัยที่ได้ ไม่ได้ให้ความมั่นใจในเรื่องการกระจายค่าของข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ดังนั้นจึงต้องมีการป้อนข้อมูลตัวแปรสุ่ม ที่มีทั้งค่า x values, mean values และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อหาเงื่อนไขเชิงจลนศาสตร์ว่ามวลรูปสี่เหลี่ยมมีสถานะแบบโหนด แต่เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ที่มีแนวทางใช้ Solver tool หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ยังต้องใช้ได้เฉพาะกรณีของ BiPlane เท่านั้น ดังนั้นมวลสี่เหลี่ยมในกรณีนี้จึงมีสถานะเคี้ยว

วิธีการหาผลลัพธ์เชิงจลนศาสตร์นี้ต้องมีการป้อนข้อมูลตัวแปรสุ่ม 7 ชุด ที่ประกอบด้วยค่า x values, ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังในตารางที่ 6.4 หน้าถัดไป วิธีนี้เป็นการทำงานการปรับข้อมูลตัวแปร ที่มีภาวะสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) จำนวน 7 มิติในปริภูมิ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหน้า 99-102 ของรายงานฉบับนี้

เงื่อนไขบังคับหลักมี 2 ประการได้แก่

เงื่อนไขบังคับแรก

$$\phi_1 = \phi_2 ; G_{w1} = G_{w2}; c_1 = c_2 \quad (6.47)$$

เงื่อนไขบังคับที่สอง

ใช้ได้กับภาวะ BiPlane และ

$$abG_1 \geq 0; abG_2 \geq 0 \quad (6.48)$$

การป้อนค่าข้อมูลเข้าทำเหมือนที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อย 6.3.2 และใช้ค่าการวางตัวระนาบของ Joint 1, Joint 2 และ Slope Face เหมือนกัน ดังนั้นค่าของ β_1 , δ_1 , β_2 , δ_2 มีค่า 10 ค่าของสองคอลัมน์แถวแรกที่ป้อนเหมือนกันกับรูปที่ 6.17 แต่มีค่าของคอลัมน์ที่สามที่ป้อนเข้าไปใหม่อีก 8 ค่าต่างกัน กำหนดให้ค่าที่ป้อนเข้าไปใหม่เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_2 = 30^\circ; & G_{w1} &= G_{w2} = 0.6547; \\ c_1 &= c_2 = 48; & u_1 &= u_2 = 0 \text{ (ศูนย์)}\end{aligned}$$

ก่อนที่โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า ต้องมีการป้อนข้อมูลตัวแปรสุ่ม 7 ชุดที่ประกอบด้วยค่า xvalues, ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลตัวแปรสุ่มทั้ง 7 ชุดที่ต้องป้อนเข้าไปเพื่อหาภาวะเชิงจลนศาสตร์

x	xvalues	Mean	StDev	$(X)^2$
β_1	80	80	3	0
δ_1	45	45	2	0
β_2	50	50	3	0
δ_2	70	70	2	0
G_{w1}	0.6547	0.6547	0.12	0
$\tan \phi_1$	0.5774	0.5774	0.15	0
$c_1/\gamma h$	0.0629	0.0629	0.02	0

หน้าจอข้อมูลออกของการคำนวณค่า FS เชิงจลนศาสตร์ คล้ายคลึงกับรูปที่ 6.18 ที่มีการคำนวณพจน์ตัวแปรในสมการต่าง ๆ ซึ่งเป็นพจน์เชิงเรขาคณิตของความมวลลิม กับพจน์เชิงคุณสมบัติมวลสาร และต่อมาก็มีการตรวจสอบตามเงื่อนไข 2 ขั้นตอน ก่อนที่จะแสดงผลเชิงจลนศาสตร์ว่ามวลลิมเกิดเป็น BiPlane และสรุปเป็นค่า FS = 1.636

6.3.4 ผลลัพธ์ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของมวลรูปสี่เหลี่ยม

ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้ทั้งในหัวข้อ 6.3.2 และ 6.3.3 ไม่ได้เป็นแนวทางการเข้าสู่ค่าเชิงตรรกยะ (rational approach) ที่สนองตอบเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบ ดังนั้นจึงต้องทำการปฏิบัติการเพิ่มเติม เพื่อหาค่าระยะที่สั้นสุด (β) โดยใช้วงรีวิกฤตที่วัดจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม x_{mean} ไปยังจุดสัมผัสพื้นที่การพังทลาย ในหน่วยทิศทางของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ โดยใช้ Solver tool นี้เป็นการปฏิบัติการหาผลลัพธ์ขั้นตอนสุดท้ายในเรื่องเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม

1. วิธีการและเงื่อนไขบังคับในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้นี้ มีวิธีการและขั้นตอนคล้ายคลึงกับที่ได้อธิบายมาในหน้า 129-130 ของรายงานฉบับนี้ นั่นคือมีการปรับปรุง matrix formulation และนำมาเขียนในรูปแบบรหัสคำสั่ง ดังสมการที่ 6.30 หน้า 130

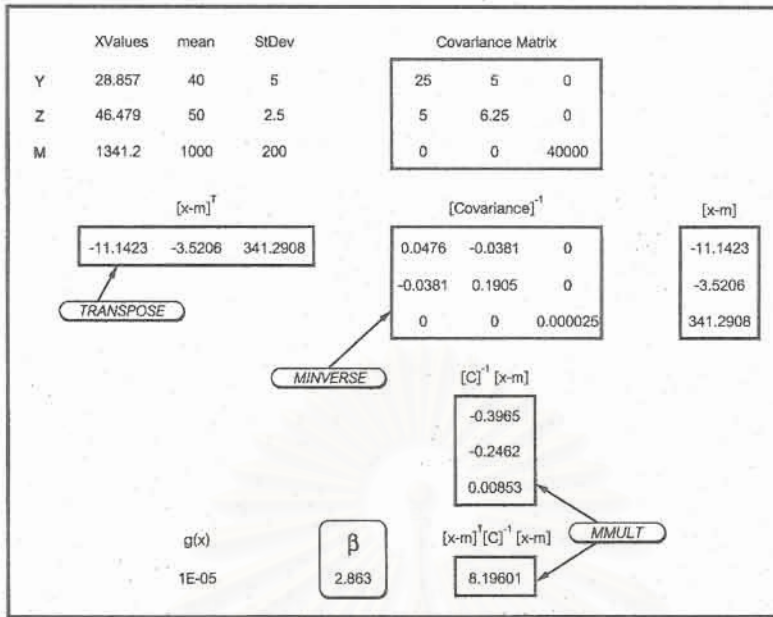
เงื่อนไขบังคับมวลสี่เหลี่ยมต้องมีฐานนิยมแบบ BiPlane ส่วนเงื่อนไขบังคับอื่น ใช้ในทำนองเดียวกัน โดยมีเงื่อนไขตามสมการที่ 6.45 กับ 6.46 หน้า 150 แต่มีการเพิ่มเงื่อนไขบังคับให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีค่าน้อยเท่าที่จำเป็น (minimize F.S.) นั่นคือ

$$\text{F.S.} \leq 1 \quad (6.49)$$

นอกจากนี้ต้องมีการหาค่าฟังก์ชันเชิงความสัมพันธ์ ของกลุ่มข้อมูลตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ (correlated normals) ซึ่ง Low and Tang (1997) ได้อธิบายวิธีการที่ Solver tool คำนวณค่าสถิติเชิงนี้ความสัมพันธ์ไว้เป็นลำดับขั้นทั้ง 3 ขั้นตอน ตามตัวอย่างที่ 1 หน้า 750 ของบทความ

จากรูปที่ 6.19 ที่คัดลอกมาบทความของ Low and Tang หน้า 750 ค่าสถิติเชิงความสัมพันธ์ใช้ตัวอักษร MMULT แทนฟังก์ชันนี้ ขั้นตอนเริ่มต้นเป็นการหาค่าเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance matrix) ของตัวแปรสุ่ม ค่าเฉลี่ย กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ป้อนเข้ามา จากนั้นทำการสลับเปลี่ยนค่าเมทริกซ์ (transpose) จนถึงการคำนวณค่า minverse function จากโปรแกรมแผ่นตารางทำการที่มีการแก้ปัญหาในตัว (built-in solver) มีการทำการคำนวณค่าผลคูณเมทริกซ์ ซึ่งเรียกว่า MMULT function หรือค่า χ^2 ที่แสดงบนจอภาพในรูป 6.20

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \text{MMULT function} \\ &= [x - m]^T [C]^{-1} [x - m] \end{aligned} \quad (6.50)$$



รูปที่ 6.19 ผลเฉลยในการหาค่า χ^2 กับ β จาก Solver ในตัวโปรแกรม แผ่นตารางทำการ สำหรับกลุ่มข้อมูลตัวแปรสุ่มที่ทำให้การแจกแจงปกติ

เมื่อ Solver tool ทำการคำนวณค่า β ที่เป็นการหามาจากเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว ก็ทำการปฏิบัติการต่ออีก 2 ขั้นตอน ได้แก่ขั้นตอนแรกทำการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากความสัมพันธ์

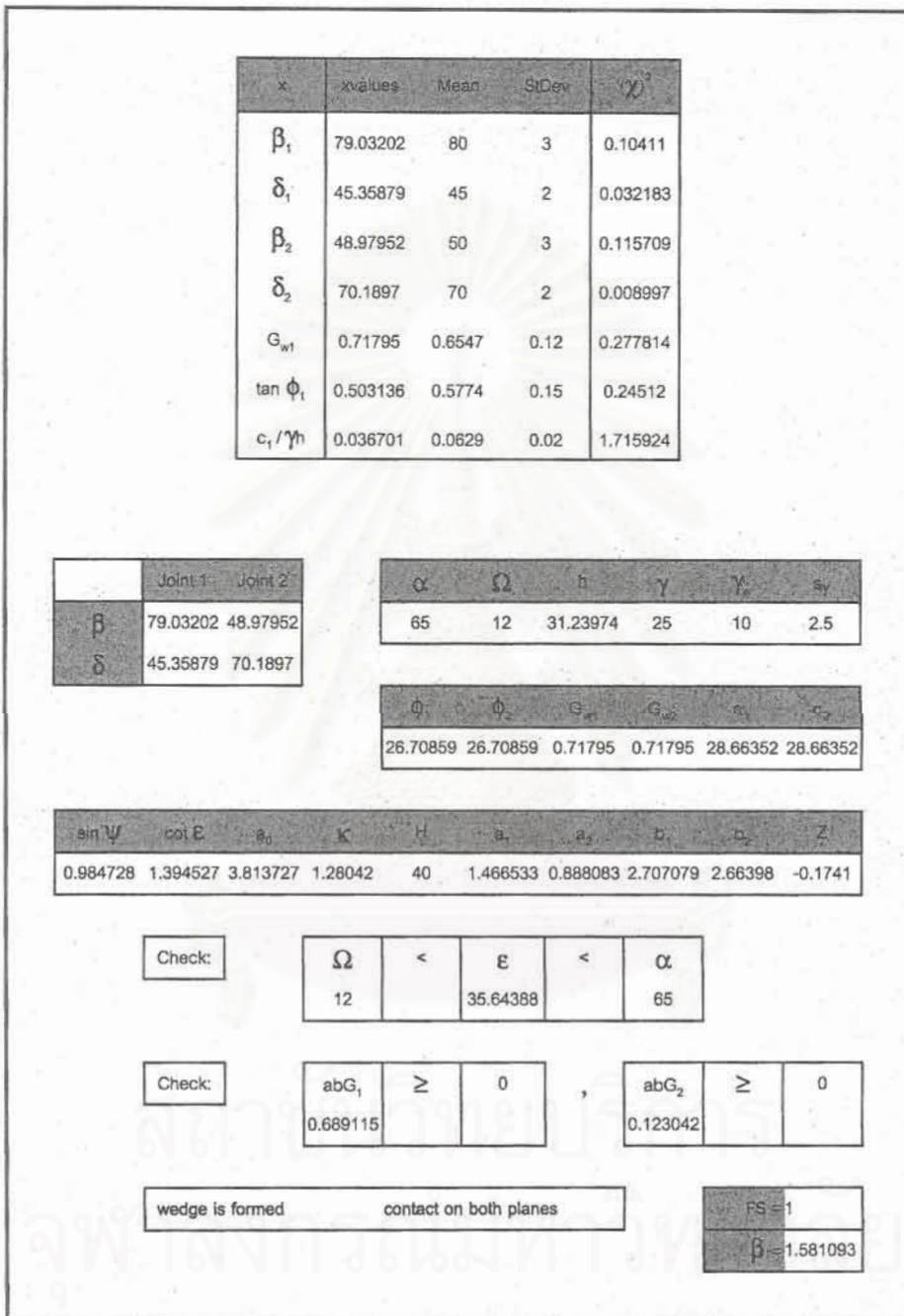
$$\beta = \sqrt{[x - m]^T [C]^{-1} [x - m]} \quad (6.51)$$

พจน์ β ข้างบนนั้น มีเงื่อนไขที่ฟังก์ชันสมรรถนะ $g(x) = [YZ - M]$ สำหรับค่า xvalues ถูกป้อนเข้าไปตามตัวอย่างในรูป 6.19

ขั้นตอนที่สอง Solver ถูกเรียกให้มาทำการลดค่า β ค่าสุด ซึ่งมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรสุ่ม, xvalues ตามเงื่อนไขที่ $g(x) = 0$ (ศูนย์)

2. ผลลัพธ์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของมวลรูปลิ้ม

สำหรับกรณีศึกษาของมวลรูปลิ้ม ข้อมูลเดิมที่แสดงบนหน้าจอของรูปที่ 6.17 หน้า 151 ถูกนำมาใช้ แต่มีการเพิ่มค่า xvalues ค่า Mean กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตารางที่ 6.4 หน้า 153 เข้าไปด้วย เนื่องจาก Solver ถูกเรียกมาใช้ ทำให้ค่าสถิติเชิงความสัมพันธ์, χ^2 ไม่เป็นศูนย์ เพราะมีการคำนวณจากข้อมูลที่ป้อนเข้า ตามขั้นตอนที่ระบุข้างต้น (รูปที่ 6.20) จนได้ค่า β เท่ากับ 1.581 เมื่อค่า FS = 1



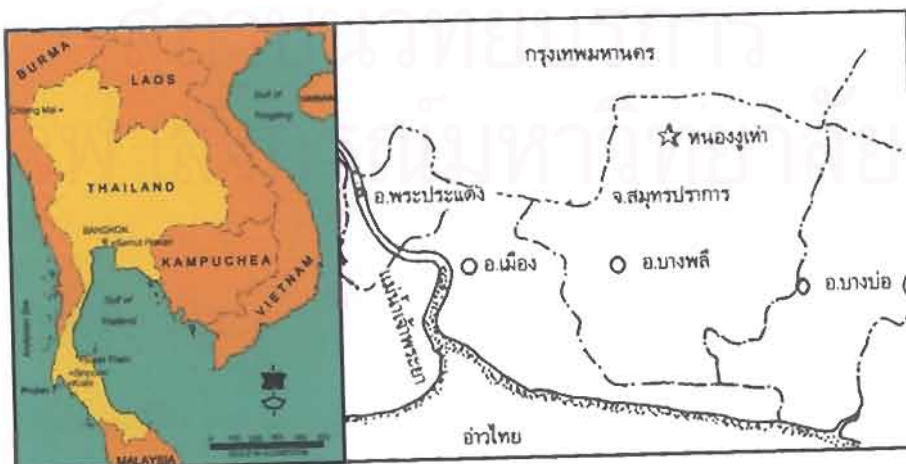
รูปที่ 6.20 การคำนวณค่าสถิติเชิงความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูล ผลลัพธ์สำหรับข้อมูลออกในการหาเสถียรภาพมวลรูปสี่เหลี่ยม แสดงเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้จากวิธีวงรีวิกฤต (FS = 1) สัมผัสกับพื้นที่การพังทลาย

6.4 กรณีศึกษาของการเสริมกำลังดินเหนียวอ่อนระหว่างการขุดเจาะ

ตัวอย่างที่ยกมาเป็นกรณีศึกษานี้ เป็นเรื่องของการพังทลายที่เกิดภายในมวลสารที่เป็นดิน และมีสถานะเป็นพลาสติกสูง (high plasticity) โดยมีการนำตัวอย่างของมวลดินในแอ่งเจ้าพระยา ซึ่งเป็นดินอายุใหม่อยู่ จัดในยุคควาเทอร์นารี (Quaternary period) ในลุ่มแอ่งเจ้าพระยาดอนล่างนี้โครงสร้างชั้นดินเป็นมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ชั้นดินส่วนล่างของกรุงเทพฯ (Bangkok subsoil) ที่ครอบคลุมพื้นที่ของกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง มีส่วนของชั้นดินที่เกิดบนบก (terrestrial soil) วางตัวเป็นชั้นบางหนาไม่เกิน 2 เมตร ทับบนชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดจากทะเล (soft marine clay) สลับกับกระเปาะดินเหนียวแข็งเนื้อแน่น (stiff clay) และกระเปาะดินทราย (sandy soil) ดังนั้นการก่อสร้างในเขต กทม. และปริมณฑล มักมีปัญหาที่ต้องแก้ไขอยู่เสมอเนื่องจากชั้นดินส่วนล่างของกรุงเทพฯ ฯ ที่ใช้เป็นฐานรองรับสิ่งก่อสร้างพรมีดินเหนียวอ่อนเกือบทุกแห่งเป็นอุปสรรคต่อการทำงานขุดเจาะมาก

6.4.1 สถานที่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาการขุดเจาะในดินอ่อนนี้

โครงการก่อสร้างสนามบินนานาชาติแห่งใหม่ เพื่อทดแทนสนามบินเดิมที่มีสถานที่ตั้งที่ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร มีการดำเนินงานการศึกษามานานเป็นเวลาเกิน 30 ปี ปัจจุบันรัฐบาลไทยได้มอบหมายให้ บริษัทท่าอากาศยานสากลแห่งใหม่ จำกัด เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินงานจัดสร้างสนามบินแห่งใหม่นี้ขึ้น มีชื่อเรียกว่า "ท่าอากาศยานสากลกรุงเทพฯ แห่งที่ 2" หรือ "สนามบินสุวรรณภูมิ" แต่มีกรู้จักในนามชื่อเดิม คือ "สนามบินหนองงูเห่า" ตั้งอยู่ในในเขตอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ (ดูรูปแผนที่ข้างล่าง) ห่างจากกรุงเทพมหานครไปทางตะวันออกเฉียงใต้ 28 กิโลเมตร



รูปที่ 6.21 ที่ตั้งสนามบินหนองงูเห่า ในเขตอำเภอบางพลี สมุทรปราการ

ธรณีวิทยาของชั้นดินในเขตบริเวณอำเภอบางพลี ลักษณะส่วนของชั้นดินส่วนบนในสถานที่ที่จะก่อสร้างสนามบิน ณ ตำบลหนองงูเห่า มวลดินมีการผุพังในระดับสูง ตั้งแต่ชั้นบนสุดถึงความลึก 15 เมตร ดินชั้นบนนี้เป็นดินเหนียวอ่อนนิ่มจนถึงแจ้งปานกลาง ซึ่งเป็นปัญหาเรื่องเป็นดินทะเลที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง ค่าเปอร์เซ็นต์ขีดจำกัดเหลว (liquid limit) สูงถึง 60 % และปริมาณความชื้น (moisture content) สูงถึง 70%

ส่วนดินที่ใช้เป็นฐานรากสิ่งก่อสร้าง อยู่ระดับต่ำกว่า 15 เมตรจากพื้นผิว เป็นดินเหนียวแข็งเนื้อแน่น (stiff clay) มีสีน้ำตาลเทา การศึกษาของผลกระทบของการขุดเจาะชั้นดินบริเวณสนามบินหนองงูเห่า มีหลายสถาบันในประเทศไทยที่เกี่ยวข้อง เริ่มดำเนินการตั้งแต่ก่อนปี พ.ศ. 2518 มีผลสรุปคล้ายคลึงกันคือ ต้องมีการถมดินทรายเป็นคันดินหนาเกือบ 4 เมตร ตลอดทั้งบริเวณเพื่อเสริมกำลังดิน และถ้าไม่เพียงพอก็ต้องใช้ใย (ยาง) สังกะหราะห์ที่มีชื่อทั่วไป เรียกว่า "Geotextile" วางปูเป็นชั้น จนค้ำกำลังวัสดุในชั้นดินเพียงพอที่รับน้ำหนักบรรทุก หรือเสถียรภาพของมวลสารที่คำนวณเป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยสูงในระดับที่ให้ความมั่นใจต่อวิศวกรผู้ออกแบบ

6.4.2 หลักการเสริมเสถียรภาพโดยใช้คันดินถม

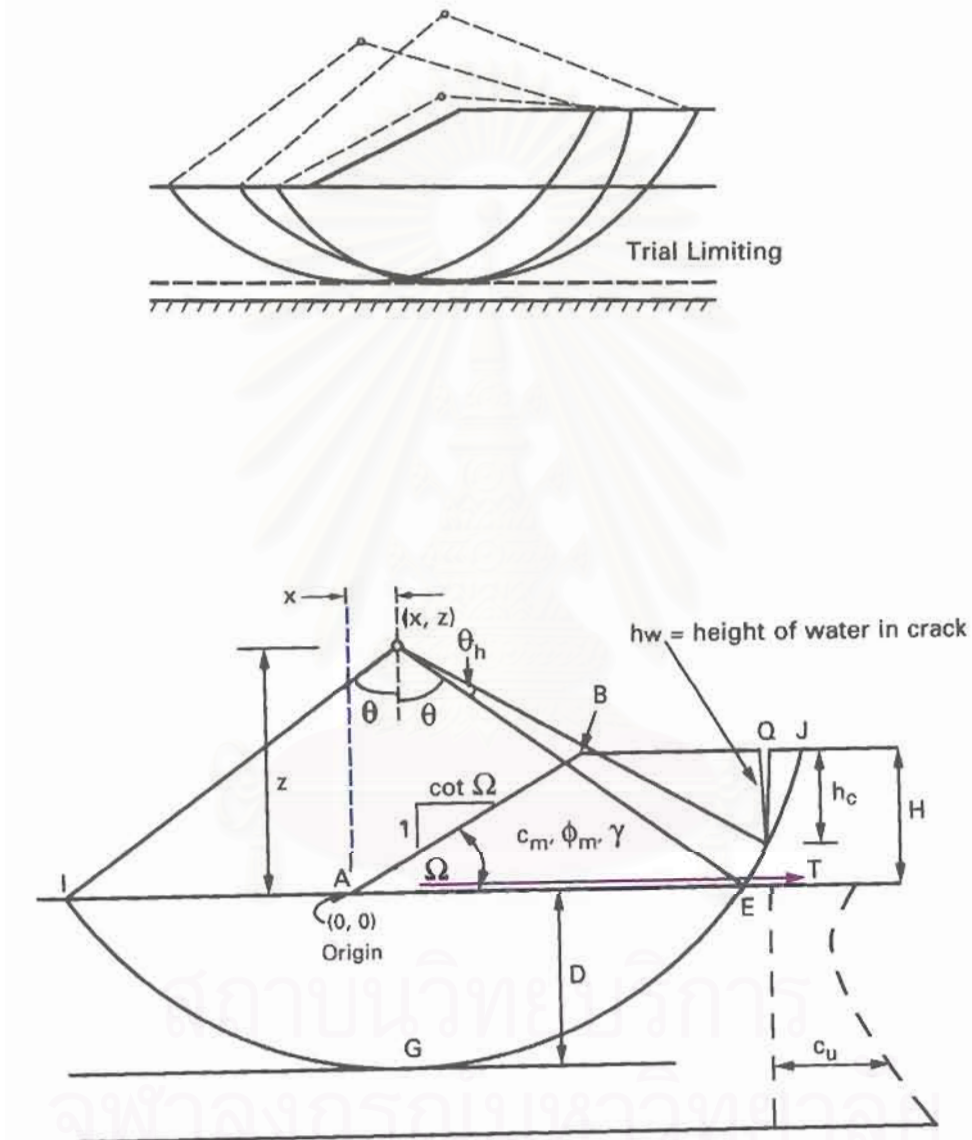
ปกติการก่อสร้างคันดินถม (embankment) บนชั้นดินอ่อนมักก่อให้เกิดการพังทลายได้พื้นผิวเป็นรูปแบบอาร์กวงกลม (circular slip surface) ดังนั้นวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงเป็นแบบลองดู-ผิด เพื่อหาค่าแห่งของจุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤต (critical circle) ดังรูปที่ 6.22 หน้าถัดไป ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนดจึงอิงกับโมเมนต์ของความต้านทาน กับโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ และในกรณีศึกษาเรื่องนี้เป็นการใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

6.4.3 สูตรเชิงประสมการณ์กับเงื่อนไขที่ใช้ในการหาค่าเชิงเสถียรภาพ

Low and Tang (1997 b) ได้เสนอแนะสูตรเชิงประสมการณ์ที่นำมาใช้กับโปรแกรมแผ่นตารางทำการ เงื่อนไขใช้เฉพาะดินเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous) และมวลดินฐานรากเป็นดินอ่อนนิ่มจึงให้ไม่มีความเสียดทาน สำหรับคันดินถมจะมีการเสริมแรงด้านข้างด้วยใยสังเคราะห์หรือไม่มี และมวลคันดินมีรอยแตกจากแรงดึงหรือไม่มี รวมทั้งมีแรงดันน้ำในรอยแตกแยกหรือไม่มีโดยการหาเสถียรภาพจากค่าความสมดุลเชิงโมเมนต์ ซึ่งมีสูตรที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า (ดูรูปที่ 6.22 ประกอบ) จำนวน 11 สมการ ดังนี้

$$l = H \cot \Omega \quad (6.52)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{z}{z + D} \right) \quad (6.53)$$



รูปที่ 6.22 การหาเสถียรภาพจากความสมดุลเชิงโมเมนต์ โดยใช้วงกลมวิกฤต รูปเล็กข้างบนเป็นวงกลมที่ทดลองหลายแนวให้สัมพันธ์กับจุดที่ระดับลึกที่ต้องการ รูปล่างเป็นแบบจำลองแสดงสัญกรณ์และเครื่องหมายพจน์ตัวแปรที่ใช้ในสมการเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพ

$$\theta_h = \cos^{-1} \left(\frac{z - H + h_c}{z + D} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{z}{z + D} \right) \quad (6.54)$$

$$M_o = \left[\frac{x}{2} \times (\ell - x) - \frac{\ell^2}{6} + (z + D) \times \left(D + \frac{H}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(D + \frac{H}{2} \right)^2 - \frac{H^2}{24} \right] \gamma H \quad (6.55)$$

$$\Delta M_o = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \times \left(z - H + h_c - \frac{h_w}{3} \right) - \frac{\gamma h_c^2}{2} \times \left(z - H + \frac{2}{3} h_c \right) \quad (6.56)$$

$$M_R = R \times (c_a \times 2R\theta) + R \times (c_m + \lambda \gamma H \tan \phi_m) \times \theta_h R \quad (6.57)$$

where $R = z + D$

$$c_a = \text{Equivalent average undrained shear strength within depth } D \quad (6.58)$$

$$= \frac{\text{(Numerical integration of variable } c_u \text{ along circular arc)}}{\text{(Length of circular arc in soft foundation)}}$$

c_a is a function of z, D and the depth - dependent c_u profile.

$$\lambda \equiv 0.19 + 0.02 \frac{\cot \Omega}{(D/H)} \quad (6.59)$$

$$M_T = T \times \text{Lever}, \text{ where Lever} = \frac{[(z + D) + z]}{2}, \text{ (or Lever} = z) \quad (6.60)$$

$$F_s = \frac{M_R + M_T}{M_o + \Delta M_o} = F_s(x, z, D, \dots) \quad (6.61)$$

or

$$F_s = \frac{M_R}{M_o + \Delta M_o - M_T} \quad (6.62)$$

นิยามของพจน์ตัวแปรในสมการทั้ง 11 สมการ และในรูป 6.22 มีการกำหนดให้ค่าระยะทางหน่วยเป็นเมตร ความดันปกติหน่วยกิโลนิวตันต่อคร.ม. แรงในแนวตั้งต่อความลึกหน่วยกิโลนิวตันต่อเมตร หน่วยน้ำหนัก กิโลนิวตันต่อลบ.ม.

กลุ่มข้อมูลเข้า

- x = พิกัดที่หนึ่งที่เป็นระยะในแนวราบ จากจุดกำเนิด [เส้นแนวตั้งที่ลากผ่านจุดล่างสุด (toe) ของคันดินถม] ไปถึงจุดศูนย์กลางวงกลมใน $x-z$ plane
- z = พิกัดที่สองที่เป็นระยะในแนวตั้งจากจุดศูนย์กลางวงกลม ถึงตำแหน่งจุดกำเนิด [ที่เป็นจุดล่างสุดของคันดินถม] ใน $x-z$ plane หน่วยเป็น เมตร
- D = ความลึกในแนวตั้งจากพื้นผิวดินถึงจุดสัมผัสของวงกลมวิกฤต
- H = ความสูงในแนวตั้งของคันดินถม
- Ω = มุมเอียงเทของความลาดคันดินถม
- γ = หน่วยน้ำหนักดินถม
- γ_w = หน่วยน้ำหนักน้ำ
- c_m = ค่าโคฮีชันของมวลดินถม
- ϕ_m = มุมเสียดทานของมวลดินถม
- T = แรงเสริมเสถียรภาพด้านข้าง (จากใบสังเคราะห์) แนวราบ และหาโมเมนต์ของแรงด้านการพังทลาย เมื่อคูณกับ lever
- Lever = ค่าเฉลี่ยระยะของแขนโมเมนต์ที่เกิดจากแรงเสริมเสถียรภาพ
- h_c = ความลึกวิกฤตในแนวตั้งของรอยแตกจากแรงตั้ง
- h_w = ความลึกในแนวตั้งของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงตั้ง
- c_u = ค่าโคฮีชันต่อระยะความลึกของมวลดินอ่อน
(หาจากค่ากำลังวัสดุเฉือน, S_{uv} ที่ทดสอบโดย vane test)

กลุ่มข้อมูลออก

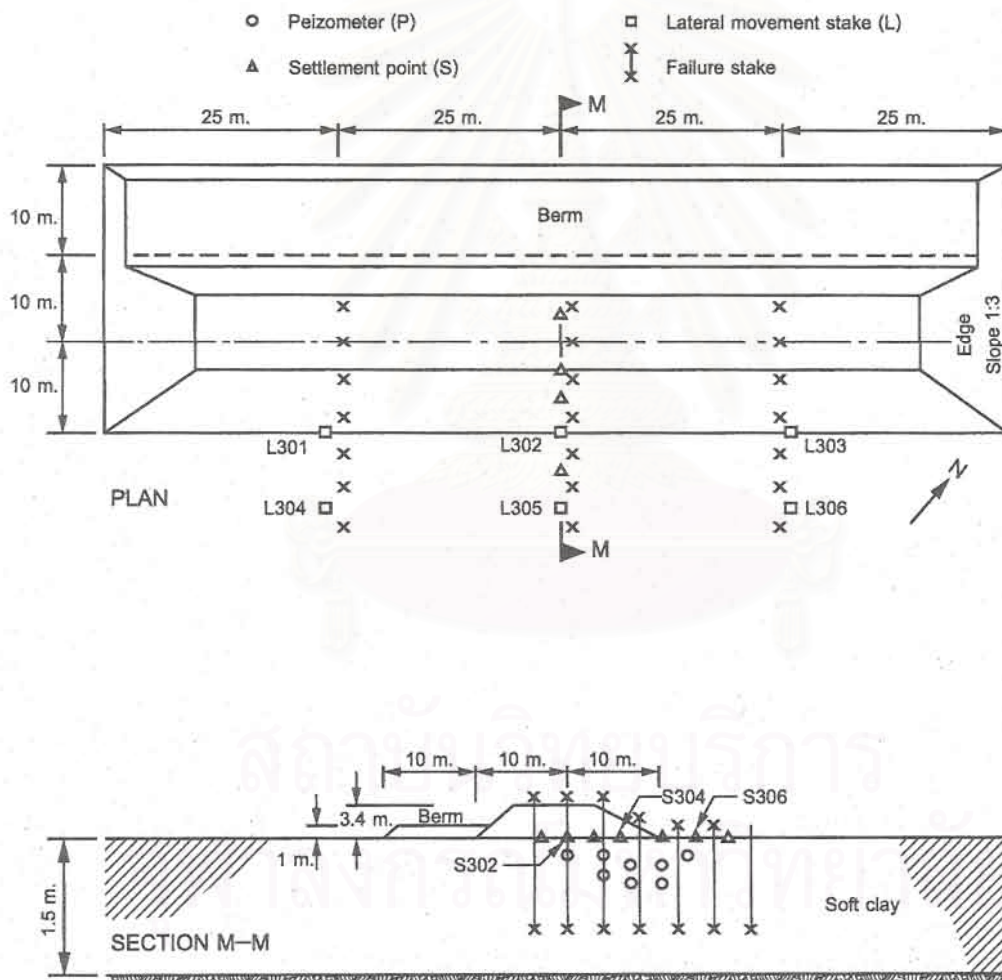
ข้อมูลออกมีหลายพจน์เป็นค่าตัวแปรเชิงรูปแบบ เรขาคณิตของความลาดเอียงคันดินถม รูปแบบเชิงเรขาคณิต ค่าสมมูล กับโมเมนต์ของแรงที่ด้าน โมเมนต์ของแรงที่ก่อเกิดการพังทลายโดยการพลิกคว่ำ (overturn) ค่าปัจจัยความปลอดภัย [ใช้สัญลักษณ์เป็น F_s]

เนื่องจากสมการทั้ง 11 ข้างต้น ถ้าหากมวลดินมีการระบายน้ำออก (drained) ค่าของหน่วยน้ำหนักดินถม (γ_d) ที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\gamma_d = \gamma - \gamma_w \quad (6.63)$$

6.4.4 ผลลัพธ์ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด

ตัวอย่างในกรณีนี้ เป็นการคำนวณเสถียรภาพของดินทรายที่ใช้ถมในบริเวณหนองงูเห่า คันดินที่ทดสอบรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดยาว 100 เมตร กว้าง 30 เมตร อัตราส่วนของความลาดด้านข้าง (side) = 1:2 ด้านขอบ (edge) 1:3



รูปที่ 6.23 แบบจำลองคันดินถมที่ใช้ทดสอบพฤติกรรมดิน บริเวณหนองงูเห่า ออกแบบโดยคณาจารย์สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียในปี 2518

ค่าคุณสมบัติดินทรายที่ถมได้แก่ หน่วยน้ำหนัก 18 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. มุมเสียดทานเท่ากับ 37.5 องศา ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง ส่วนค่าไคฮ์ชันต่อความลึกของมวลดินเหนียวที่ไม่มีการระบายน้ำออก (undrained cohesion; c_u) หากจากการทดสอบโดย vane test ซึ่ง Zou et al. (1995) เสนอแนะให้ใช้ค่า $c_u = 0.7 \times$ (กำลังวัสดุเหนียว, S_{uv}) มีค่าตามตารางที่ 6.5 ข้างล่าง

ตารางที่ 6.5 ค่าคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับความลึกจากผิว

ความลึกในแนวตั้งจากพื้นผิว (เมตร)	ค่าไคฮ์ชันที่มีการระบายน้ำออก (กิโลนิวตันต่อตร. ม.)
0	18.2
2	11.9
4	9.8
6	11.2
8	14.7
10	19.6

เมื่อทำการป้อนข้อมูล เข้าในโปรแกรมแผ่นตารางทำการที่มีการจัดหน้าจอ ดังรูปที่ 6.24 หน้าถัดไป ซึ่งได้แก่ค่า $x, z, D, H, \cot \Omega, \gamma, \gamma_w$, (ใช้ค่าเป็น γ_d) และค่าที่ต้องป้อนเพิ่มอีก 1 ค่า ได้แก่ค่า c_m นอกนั้นกำหนดให้ค่าที่เหลือเป็น 0 (ศูนย์)

ข้อมูลออกหน้าจอที่คำนวณได้มี 3 คอลัมน์ (จัดเป็น 2 แถว) คอลัมน์แรกมีพจน์ตัวแปรที่คำนวณได้ 8 ค่า (ค่าของ $h_w = 0$ เพราะไม่มีน้ำขังในรอยแตกจากแรงดึง) ส่วนคอลัมน์ที่สองเป็นค่า c_u ที่เป็นค่าที่พึงพิงกับค่า c_u และคอลัมน์สุดท้ายเป็นค่า F_s ที่เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเนื่องจากสมมูลเชิงโมเมนต์ที่หาจากวิธีการวิเคราะห์เชิงกำหนด ซึ่งมีค่าผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าหนึ่ง นั่นคือ $F_s = 0.987$

6.4.5 ผลลัพธ์ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อมีการเสริมเสถียรภาพ

จากการคำนวณเสถียรภาพของดินทรายที่ใช้ถมในบริเวณสนามบินหนองงูเห่า คำนวณเสถียรภาพค่ากว่าหนึ่ง จึงมีการทดสอบออกแบบใหม่ให้มีการเสริมเสถียรภาพโดยสมมุติให้ค่าเฉลี่ยแรงเสริมค้ำยันข้างในแนวราบ (T) = 200 กิโลนิวตันต่อเมตร โดยที่ให้ค่าของคุณสมบัติดินทรายที่ถมเป็นค่านิยมค่าคงที่ และยังคงให้ค่า c_u ของมวลดินเหนียวอ่อนแปรผันกับระดับความลึกเช่นเดิม วงกลมวิกฤตที่เกิดจากการคำนวณจะมีการเปลี่ยนทิศจากจุดเดิม (แต่ให้ค่า x คงที่) ดังภาพกราฟิกเปรียบเทียบของรูปที่ 6.25 และค่าปัจจัยความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้น เป็น $F_s = 1.41$ เมื่อให้ $T = 200$ กิโลนิวตันต่อเมตร

Deterministic analysis of an unreinforced test embankment at Nong Ngoo Hao

ข้อมูลเข้า

x	z	D
3.4	7.19	5.26

H	$\cot(\Omega)$	γ_w
3.4	2	10

γ	c_m	ϕ_m	T	lever	h_c
18	0	37.5	0	0	0

Depth	0	2	4	6	8	10
c_u	18.2	11.9	9.8	11.2	14.7	19.6

ข้อมูลออก

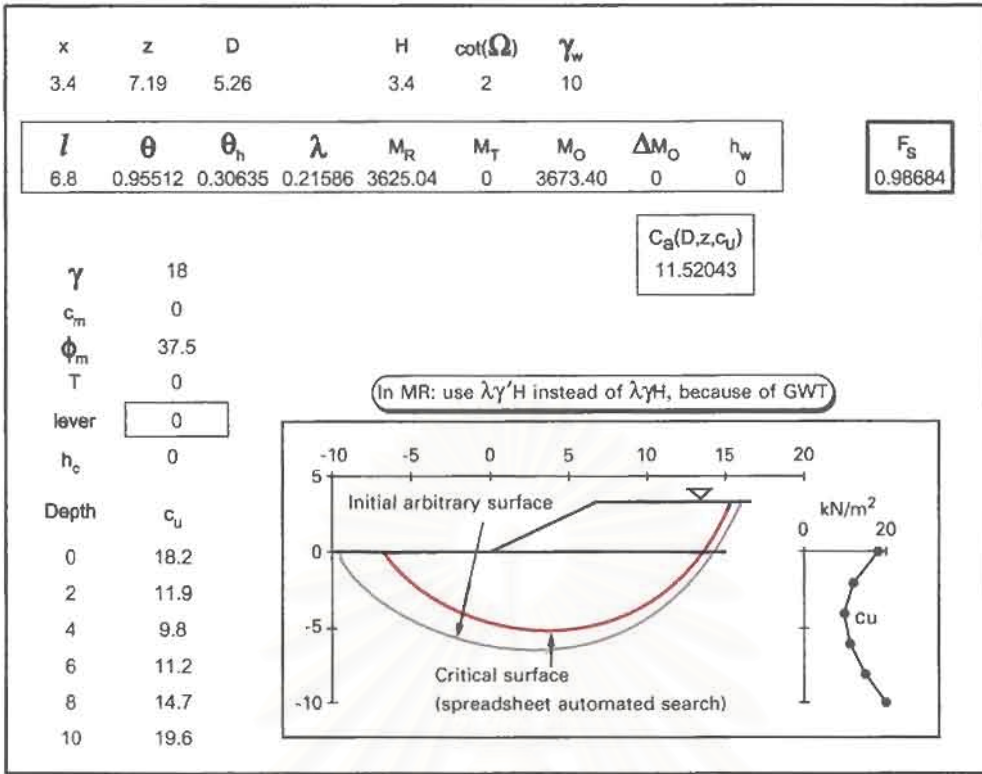
l	θ	θ_h	λ	M_R	M_T	M_O	ΔM_O	h_w
6.8	0.95511	0.30635	0.21586	3625.04	0	3673.40	0	0

F_s
0.98684

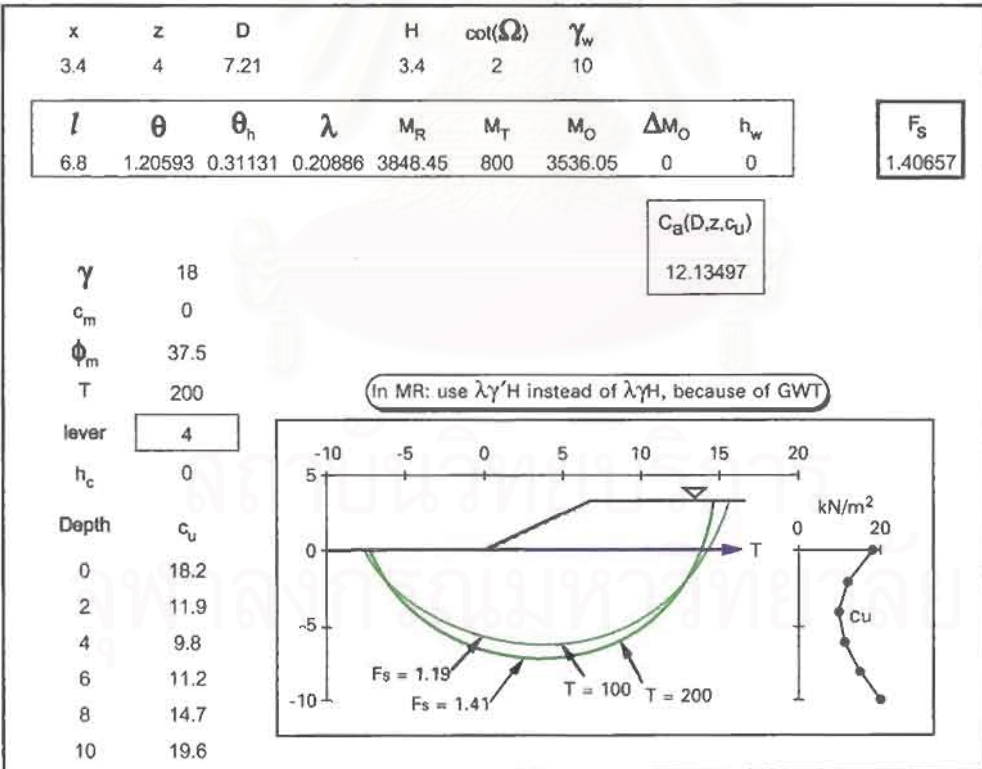
$C_a(D,z,c_u)$

11.5204

รูปที่ 6.24 หน้าจอแสดงส่วนของข้อมูลเข้ากับส่วนของข้อมูลออก ที่ใช้ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนดจากความสมดุลของโมเมนต์สำหรับคันดินทรายถมที่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึงบนชั้นดินเหนียวอ่อนของสนามบินหนองงูเห่า ที่กำหนดค่าคุณสมบัติไว้ตามตารางที่ 6.5



ก. พื้นผิวการพังทลายเมื่อยังไม่มีการเสริมเสถียรภาพ



ข. พื้นผิวการพังทลายเมื่อมีการเสริมเสถียรภาพค้ำข้าง

รูปที่ 6.25 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณ และพื้นผิวการพังทลายรูปแบบอาร์กวงกลม สำหรับกรณีที่ยังไม่มีการเสริมเสถียรภาพ (เส้นโค้งสีแดง) กับกรณีที่มีการเสริมเสถียรภาพแนวราบ (เส้นโค้งสีเขียว)

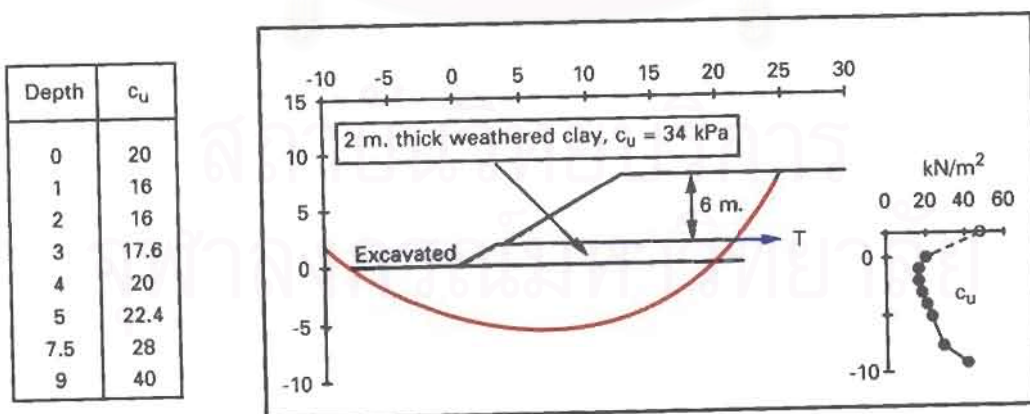
6.4.6 ค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อขุดดินอ่อนนุ่มและพุดอกแล้วเสริมเสถียรภาพ

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพขั้นต้น พบว่าค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันดินถนนดินเหนียวอ่อนนุ่มที่เป็นฐานรากของสนามบินหนองงูเห่า มีค่าต่ำมาก Bergado et al. (1994) ได้ทดลองทำแบบจำลองคันดินถมใหม่ใกล้กับแหล่งคันดินขนาดใหญ่เดิม แต่มีการเสริมเสถียรภาพโดยใช้แผ่นยางสังเคราะห์ที่เป็น nonwoven geotextile ที่ให้ค่ากำลังวัสดุถึง 200 กิโลนิวตัน/ เมตร/ แผ่น

คันดินถมที่มีการเสริมเสถียรภาพและยังไม่มียอบแตกแยกจากแรงดึงเกิดในดินถม มีการขุดดินเหนียวอ่อนที่มีการพุดอกสูงออก ระยะที่ขุดลึก 2 เมตร และใช้ดินถมให้เท่ากับระดับเดิม ที่เป็นตำแหน่งที่จะปูแผ่นยางสังเคราะห์ (ดูรูปที่ 6.26 ข้างล่าง) และเสริมคันดินเป็น fill soil สูงอีก 6 เมตร ได้ค่าความสูงทั้งหมด 8 เมตร ทำให้เกิดเป็นคันดินถม 2 ชั้น

คันดินถมใหม่นี้ถูกขุดเป็นร่องยาว (trench) ลึก 2 เมตร กว้าง 7.5 เมตร ที่ก้นบ่อที่เป็นร่องมีการขุดดินเป็นคัน ปรากฏว่าถ้าไม่มีการเสริมเสถียรภาพคันดินพังที่ระดับความสูง 4 เมตร แต่ถ้ามีการเสริมเสถียรภาพด้วยแผ่นยางสังเคราะห์ การพังทลายจะเกิดขึ้นที่ระดับความสูง 6 เมตร

สำหรับค่ากำลังวัสดุเฉือนดินเหนียวอ่อนนุ่ม ที่เป็นดินฐานรากนี้ Bergado et al. (1994) ได้ปรับค่าใหม่ให้ค่า $c_u = 0.8 S_{uv}$



รูปที่ 6.26 ภาพกราฟิกคันดินถมที่มีการขุดดินผิวหน้าที่พุดอกก่อนเสริมเสถียรภาพ

เนื่องจากการขุดดินเหนียวอ่อนนึ่งที่พุดอก 2 เมตร ดังนั้นใช้ค่าเฉลี่ยของไคซีรันดินฐานรากที่ถม 2 เมตร (ไม่ใช่ดินทรายแบบกรณีหัวข้อ 6.4.4) กับค่าเฉลี่ยของดินถมทั้งหมดที่สูง 8 เมตร คือ

$$\text{ไคซีรันดินฐานรากที่ถม} = \frac{(20 + 40)}{2} = 34 \text{ กิโลนิวตันต่อคร.ม.}$$

$$\text{ไคซีรันดินถม} = \frac{[(10 \times 6) + (34 \times 2)]}{8} = 16 \text{ กิโลนิวตันต่อคร.ม.}$$

ส่วนค่าของ c_u ที่แปรผันตามความลึกมีระบุในตารางเล็ก ๆ ของรูปที่ 6.24 เมื่อป้อนข้อมูลเข้าที่มีการปรับเปลี่ยนค่าจากเดิมเล็กน้อย ตามข้อเสนอแนะของ Bergado et al. และระบุไว้ในหน้าจอของรูปที่ 6.27 ข้างล่าง ผลการคำนวณได้ผลลัพธ์ค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนด, $F_s = 0.990$

x	z	D	H	cot(Ω)	γ_w
6	14.17	5.49	8	1.5	10

I	θ	θ_h	λ	M_R	M_T	M_O	ΔM_O	h_w	F_s
12	0.76591	0.48566	0.23372	17023.17	3183	20409.86	0	0	0.99002

	xvalue	Mean	σ	c.o.v	$C_a(D,z,c_u)$
γ	19.2	19.2	0.96	0.05	19.98285
c_m	16	16	2.4	0.15	
ϕ_m	30	30	3	0.1	
T	200	200	20	0.1	
lever	15.915	15.915	2.38725	0.15	
h_c	0	0	0	0.3	

Depth	c_u	Mean	σ	c.o.v
0	20	20	3	0.15
1	16	16	2.4	0.15
2	16	16	2.4	0.15
3	17.6	17.6	2.64	0.15
4	20	20	3	0.15
5	22.4	22.4	3.36	0.15
7.5	28	28	4.2	0.15
9	40	40	6	0.15

รูปที่ 6.27 หน้าจอของข้อมูลเข้ากับข้อมูลออก ในการคำนวณค่า F_s ที่มีการขุดหน้าดินที่พุดอก เสริมข้างสังเคราะห์ 1 ชั้น ค่าคุณสมบัติมวลสารและมิติเชิงเรขาคณิตของคันดินถม 2 ชั้น ถึง Bergado et al. (1994)

6.4.7 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้เมื่อมีการเสริมเสถียรภาพคั่นดินถม

แนวทางในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) ด้วยการใชโปรแกรมแผ่นตารางทำการและกำหนดเงื่อนไขบังคับ ก่อนทำปฏิบัติการหาค่าที่ด้วยเหมาะที่สุด ด้วยการใช GoalSeek กับ Solver ที่อยู่ในตัวโปรแกรม ก็ยังคงอิงหลักการวางรวิฤกฤต โดยมีการใช้สมการที่ 6.29 กับ 6.30 หน้าที่ 142 ของรายงานฉบับนี้ เป็นต้นแบบของการหา ระยะที่สั้นที่สุดที่วงรวิสัมพันธ์กับพื้นผิวการพังทลาย

1. ค่าสหสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขบังคับเฉพาะในเรื่องคั่นดินถม

ในการอธิบายแนวทางหาค่าสหสัมพันธ์ของภาวะต่อเนื่อง (continuity) ของมวลดินถม กับมวลดินอ่อนที่เป็นฐานด้านล่างนั้น สมการในการหาค่าระยะสั้นที่สุด (β) ถูกนำมาเขียนใหม่อีกครั้ง คือ

$$\beta = \sqrt{[x - m]^T [C]^{-1} [x - m]} \quad (6.64)$$

พจน์ตัวแปร $[R]^{-1}$ เป็นตัวผกผันของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ ซึ่งใช้ในโปรแกรมแผ่นตารางได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า การใช้พจน์ C ซึ่งเป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย (m_i) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_i) และเมทริกซ์สหสัมพันธ์ $[R]$ เป็นค่าที่ทราบและป้อนเข้าไปในโปรแกรม

ส่วนกรณีที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation) ก็หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) จากความสัมพันธ์

$$\sigma = (c.o.v.) (\text{mean}) \quad (6.65)$$

แต่ในการวิเคราะห์ผลเชิงความเชื่อถือได้นี้ มีเงื่อนไขบังคับเพิ่มอีก นั่นคือ

$$c_m > 0 \quad (6.66)$$

$$h_c \geq h_w > 0 \quad (6.67)$$

นั่นคือมวลดินคั่นถมต้องมีค่าโคฮีชัน และมีปรากฏการณ์ของรอยแตกจากแรงดึงเกิดขึ้นในมวลดินถม หรือมีแรงดันน้ำที่ขังในรอยแตก จึงจะสามารถทำการหาค่า β ค่าสุดได้

2. วิธีการและขั้นตอนของการทำปฏิบัติการหาค่า R.I. ค่าสุด

ในเชิงปฏิบัติการเมื่อใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการ ต้องมีการเซตช่องเล็ก ๆ หน้าจอใหม่ ให้สามารถรับข้อมูลเข้าค่าคุณสมบัติดินถม ที่เป็นค่า xvalues ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน

ส่วนข้อมูลเข้าค่าค่าคุณสมบัติดินฐานราก ที่เป็นค่า c_u ที่แปรผันตามความลึก ก็ต้องมีคอลัมน์ที่รับค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันด้วย

3. การวิเคราะห์ผลคั่นดินถมที่มีรอยแตกจากแรงดึงและเสริมเสถียรภาพ

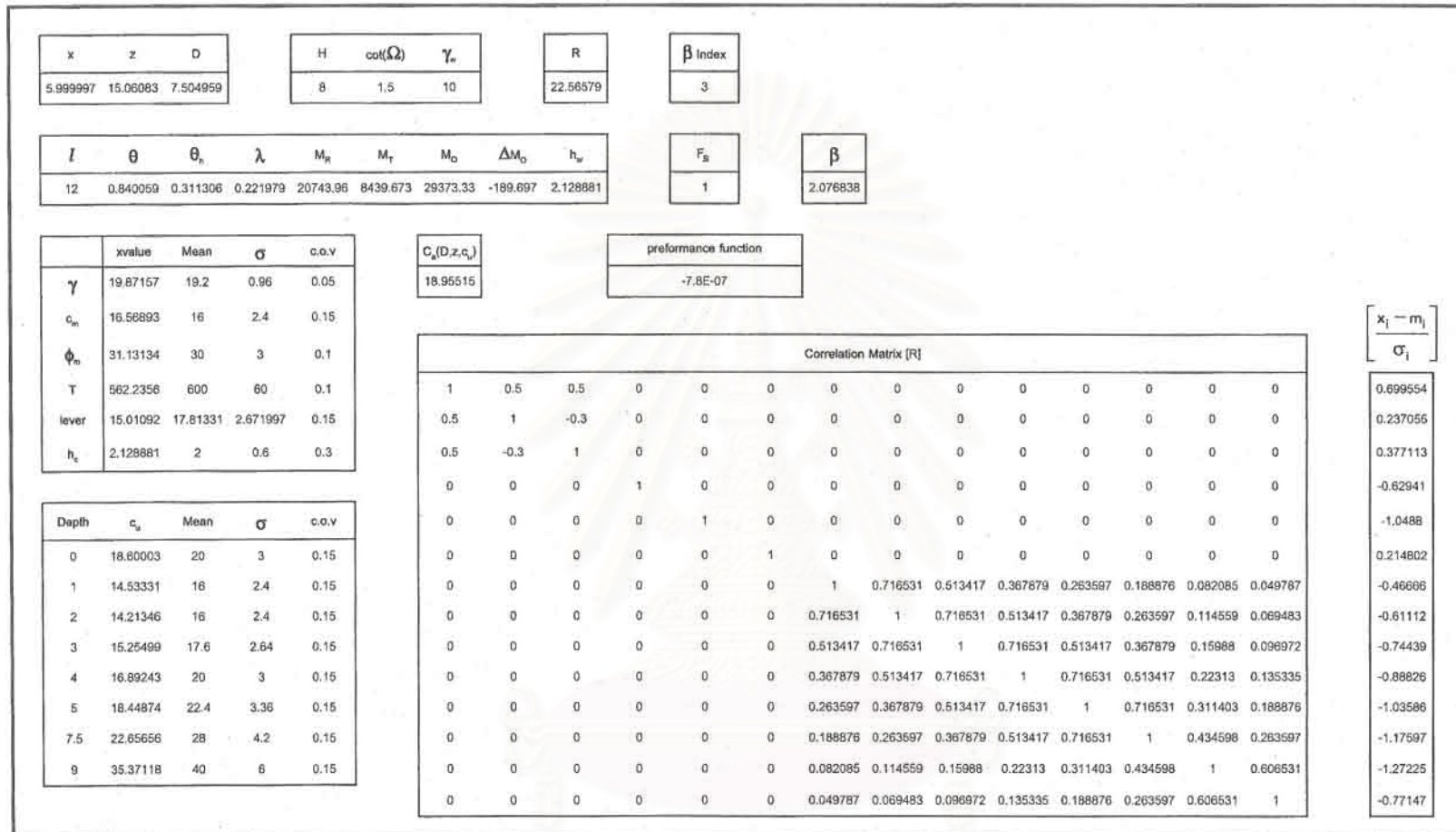
ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ข้อมูลเดิมของรูปที่ 6.25 หน้า 155 แต่กำหนดให้มีค่ารอยแตกจากแรงดึงที่มีน้ำแข็ง ให้ค่า $h_c = h_w = 2.00$ เมตร สำหรับสัมประสิทธิ์การแปรผันของดินถม กับของดินฐานราก กำหนดให้ c.o.v. ของหน่วยน้ำหนัก โคฮีชัน มุมเสียดทาน กับค่าอื่น ๆ แตกต่างกันไปตามที่ระบุตารางที่ 6.6 ข้างล่าง

ตารางที่ 6.6 ค่าเชิงสถิติของคุณสมบัติดินถมกับดินฐานราก ในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์เชิงความเชื่อถือได้ของคั่นดินถมสนามบินหนองงูเห่า

	xvalue	Mean	σ	c.o.v	Depth	c_u	Mean	σ	c.o.v
γ	19.2	19.2	0.96	0.05	0	20	20	3	0.15
c_m	16	16	2.4	0.15	1	16	16	2.4	0.15
ϕ_m	30	30	3	0.1	2	16	16	2.4	0.15
T	200	200	20	0.1	3	17.6	17.6	2.64	0.15
lever	15.915	15.915	2.38725	0.15	4	20	20	3	0.15
h_c	2	2	0.6	0.3	5	22.4	22.4	3.36	0.15
					7.5	28	28	4.2	0.15
					9	40	40	6	0.15

ถ้าให้แรงเสริมในแนวราบที่ระดับผิวดินที่ถมใหม่ เริ่มต้นให้ใช้ข้างสังเคราะห์ 1 ชั้น มีแรงเสริม = 200 กิโลนิวตันต่อเมตร เมื่อป้อนค่าข้อมูลเข้าต่าง ๆ เข้าไปโปรแกรมจะระบุค่าผลลัพธ์ของ F_s เชิงกำหนด = 0.9391 ซึ่งใกล้เคียงกับหนึ่งมาก แสดงว่าการเสริมเสถียรภาพที่ค่า T = 200 กิโลนิวตันต่อเมตร ยังไม่เพียงพอ

จากการที่ผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่มและปรับค่า T ปรากฏว่าจากข้อมูลเข้าเดิมแค่เปลี่ยนค่าของ T = 600 กิโลนิวตันต่อเมตร จะได้ค่า $F_s = 1.2531$ เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงกำหนดสำหรับคั่นดินถมที่มีรอยแตกจากแรงดึง ที่ยอมรับได้ในเชิงตัวเลขเสถียรภาพ แต่อาจไม่คุ้มค่าในเชิงค่าใช้จ่ายของการใช้ข้างสังเคราะห์ 3 ชั้นที่อาจสูงมาก



รูปที่ 6.28 หน้าจอโปรแกรมแผ่นตารางทำการที่ใช้ GoalSeek กับ Solver กำหนดให้ β index = 3.0 เมื่อให้ $F_B = 1.0$ เพื่อลดค่า β ตามข้อมูลเข้าที่ป้อนเข้ามาที่ระบุในตารางที่ 6.6 (เปลี่ยนค่า T เป็น 600) จากการทำซ้ำเพื่อหาผลเฉลย ได้ค่า β ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 2.0768

4. การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ตามเงื่อนไขคั่นดินถมที่มีรอยแตกจากแรงดึง

ในการใช้ GoalSeek กับ Solver นั้น Low and Tang (1997 b) ได้เสนอแนะขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ โดยใช้วงรีวิกฤต ดังนี้

ก) สูตรต่าง ๆ ถูกป้อนที่เข้าไปในเวกเตอร์คอลัมน์: $\left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]$ ที่แสดงไว้ในสมการหา β (สมการที่ 6.64 หน้า 156)

พจน์ x_i หมายถึง xvalues; m_i หมายถึง mean; σ_i หมายถึง standard deviation ของตัวแปรสุ่ม

ข) เซตค่า xvalues = mean โดยการ copy ค่า

ค) เลือกเมทริกซ์สหสัมพันธ์ และใช้เมนูคำสั่งนิยามชื่อ "crmatrix" กับนิยามเวกเตอร์คอลัมน์ $\left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]$ เป็น "nxvector"

ง) พิมพ์สมการที่ 6.64 ที่ใช้หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ พิมพ์ในเซลล์เป็น " $=\text{sqrt}(\text{mmult}(\text{transpose}(\text{nxvector}), \text{mmult}(\text{minverse}(\text{crmatrix}), \text{nxvector})))$ " จากนั้นกดแทนพิมพ์ "Enter" ในขณะที่กดค้างปุ่ม "Ctrl" และ "Shift" ไว้ [ปกติฟังก์ชันการคำนวณค่าเชิงเมทริกซ์จะสร้างให้อยู่ในตัวโปรแกรม]

จ) พิมพ์สูตรของฟังก์ชันสมรรถนะ: $g(x) = (M_R + M_T) - (M_O + \Delta M_O)$

ฉ) กำหนดค่าเริ่มต้น (initial values) ของพจน์ที่เป็นข้อมูลเข้าที่เป็นกลุ่มข้อมูลเข้า (x, z, D) โดยให้ $x = l/2$; $z = 2H$; $D = 1/2$ clay thickness

ช) จากนั้น Solver ถูกเรียกใช้เพื่อลดค่า β และตามข้อแนะนำของ Low and Tang (1997 b) ควรใช้ GoalSeek for $\beta = 0$ และก่อนทำปฏิบัติการด้วย Solver ให้มีเงื่อนไขบังคับที่ PerFunc = 0, $D \geq 0$ and $D \leq 9$ ซึ่งในการทำเจาะดินด้วยวิธี vane test เพื่อหาค่า c_u นั้นค่าที่ได้ระดับลึกที่สุดคือ 9 เมตร

ผลลัพธ์ของการใช้ Solver กับปัญหานี้ ปรากฏว่าได้ค่า $\beta = 2.0768$ ที่ $F_s = 1.0$ โดยแสดงหน้าจอที่เป็นข้อมูลเข้ากับข้อมูลออกไว้ พร้อมกับคอลัมน์ R กับเวกเตอร์คอลัมน์ $\left[\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right]$ ไว้ในรูปที่ 6.28 หน้า 158

บทสรุปส่งท้ายในหัวข้อกรณีศึกษา ก็คือ แนวทางการใช้ Solver หาค่าดัชนีทางสถิติที่เป็นการวิเคราะห์ค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงความน่าจะเป็นของวงรีวิกฤต จากผลเฉลยของสมการปิด จัดเป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็ว แทนการหาค่าปริพันธ์หรือการคำนวณหาค่าเฉพาะ (eigenvalues) ตามวิธีเดิม

บทที่ 7

บทสรุป แนวทางการจัดการ ความเสี่ยงเชิงการขุดเจาะ

การจัดการความเสี่ยงในการขุดเจาะ มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้ออกแบบมีความมั่นใจว่า โครงสร้างสิ่งก่อสร้างเหล่านั้นปลอดภัยไม่เกิดการพังทลาย และสามารถใช้งานได้นาน ดังนั้นในการจัดระบบผลการวิเคราะห์เชิงสถิติรูปภาพควรรให้อยู่ในรูปแบบที่บ่งปริมาณ เช่น เป็นตัวเลขความเสี่ยงของการปฏิบัติงานภาคสนาม

7.1 หลักการประเมินความเสี่ยงทั่วไป

แนวทางของการประเมินเพื่อสามารถระบุค่าความเสี่ยง ได้ดัดแปลงมาจากวิธีการ ประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (quantified risk assessment, QRA) กับวิธีการ ประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic risk assessment, PRA) การเปรียบเทียบหลักการทั้งสองโดยย่อ มีดังนี้

7.1.1 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ

การระบุความเสี่ยงด้วยวิธี QRA เป็นสิ่งที่นำมาใช้สำหรับการตัดสินใจในการควบคุม ระบบ ซึ่งเมื่อทำการประเมินตามขั้นตอนแล้ว ก็อาจนำค่าตัวเลขที่ได้จากสถานะของ เหตุการณ์หรือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์มาจัดอันดับความเสี่ยงได้ ขั้นตอนในการ ประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณมีดังนี้

ขั้นตอน 1 การพรรณนาระบบ (system description) ขั้นตอนเริ่มต้นนี้เป็น การรวบรวมข้อมูลเชิงเทคนิคและที่เกี่ยวข้องกับบุคคล

ขั้นตอน 2 การระบุเหตุเป็นภัย (hazard identification) เป็นขั้นตอนที่ สำคัญสุดเพื่อระบุความเสี่ยงในรูปแบบเป็นตัวเลขหรือเป็นค่าปริมาณได้ นอกจากนี้ก็ควรมี ค่าความถี่ (จำนวนครั้ง) ของเหตุเป็นภัย

ขั้นตอนที่ 3 การประมาณเหตุตามสถานะ (consequence estimation) เป็น การหาสาเหตุที่อาจเกิดความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน และหาความต่อเนื่องของเหตุการณ์

ขั้นตอนที่ 4 การประมาณค่าความเสี่ยง (risk estimation) เป็นลักษณะการตัดสินใจที่ใช้หาโอกาสของความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน โดยใช้ข้อมูลทั้งหมดทั้งในปัจจุบันและอดีตมาวิเคราะห์ร่วมกัน

7.1.2 การประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น

การประเมินในลักษณะนี้ใช้ความรู้เชิงสถิติมาหาค่าตัวแปรสุ่มต่าง ๆ แล้วใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาหาค่าโอกาสความเสี่ยงและเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพการขุดเจาะทั่วไป หลักการที่สำคัญ ได้แก่ การหาความเชื่อถือได้ของฟังก์ชันการพังทลาย (failure function) ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราเหตุเป็นภัย (hazard rate) และระยะเวลาเฉลี่ยการพังทลาย (mean time to failure) แนวทางของการสร้างแบบจำลองโดยใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

ถ้าหากสมมติว่าในระบบมีตัวแปรทั้งหมด เป็น N ค่า ที่เวลาจริง, t และหาค่าโอกาสปลอดภัยหรือพ้นจากเหตุเป็นภัย (survived) กับหาความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการพังทลายหรือล้มเหลว (failed) ได้สมการความสัมพันธ์เป็น

$$N = N_s(t) + N_f(t) \quad (7.1)$$

พจน์ $N_s(t)$ เป็นจำนวนตัวแปรที่ปลอดภัย (พ้นจากเหตุเป็นภัย) = $P_s(t)$
ส่วนพจน์ $N_f(t)$ เป็นจำนวนตัวแปรที่เกิดการพังทลาย (สูญเสีย) = $P_f(t)$ ที่จุดเริ่มต้นค่าพจน์นี้เท่ากับศูนย์

ถ้าให้ฟังก์ชันการแจกแจง $R(t)$ เป็นฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (7.2)$$

ถ้าให้ฟังก์ชันการแจกแจง $F(t)$ เป็นฟังก์ชันความไม่น่าเชื่อถือ

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N} \quad (7.3)$$

สมการที่ 7.3 เมื่อเขียนใหม่ในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่น

$$f(t) = \frac{1}{N} \left[\frac{d N_f(t)}{dt} \right] \quad (7.4)$$

เมื่อกำหนดให้พจน์ $z(t)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของอัตราเหตุเป็นภัย

$$z(t) = \frac{1}{N_s} \left[\frac{d N_f(t)}{dt} \right] \quad (7.5)$$

จากสมการที่ 7.1 ถึง 7.5 หาค่าเวลาเฉลี่ยของการพังทลาย, $(t_f)_{ave}$ เป็น

$$(t_f)_{ave} = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt \quad (7.6)$$

7.2 กลยุทธ์ในการจัดการข้อมูลดิบเพื่อประเมินความเสี่ยง

กลยุทธ์ที่สำคัญในการจัดการด้านความเสี่ยงที่มีระบบสิ่งแรกเป็นการสำรวจภาคสนามของตัวแปรสุ่มหลัก ที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพโครงสร้างมวลสาร จากนั้นใช้การประเมินผลเชิงสถิติในการจัดรูปแบบ (form) ข้อมูลดิบภาคสนามเชิง 3 มิติ ที่มีการปรับเปลี่ยนด้านมุมและทิศทาง (orientation) แล้วใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อช่วยในการจัดการให้การออกแบบหน้างานขุดเจาะเหมาะสมกับค่าใช้จ่าย และมีความเสี่ยงในระดับต่ำ

7.2.1 การสำรวจปัจจัยหลักที่มีผลต่อเสถียรภาพโครงสร้าง

ภายหลังจากการศึกษาตรวจสอบภูมิประเทศของแหล่ง ที่มีโครงการขุดเจาะในบริเวณแล้วยังต้องมีการศึกษาทางด้านเสถียรภาพมวลสารของหน้างานขุดเจาะ โดยอาศัยข้อมูลทางธรณีวิทยาทั่วไป กับการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผลจากตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักที่มีโอกาสก่อให้เกิดการพังทลาย เช่น รอยเลื่อน รอยแตกแยกไหมดิน เป็นต้น ทำให้ช่วยในการวางแผนหาแนวทางที่เหมาะสมในการเปิดหน้างานขุดเจาะ กับช่วยการวางแผนทางขนส่งลำเลียงวัสดุภายหลังจากการระเบิดหรือการใช้เครื่องจักรกลค้ำขุดมวลสาร

1. การศึกษาตัวประกอบที่ก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพ

เมื่อมีการขุดเจาะ ไหมดินที่เบ้ไหมดินเกือบทั้งหมด หรือเป็นชั้นดินหนาคลุมชั้นหินปัจจัยหลักที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย มี 2 แนวทาง

แนวทางแรกถ้าหากมวลหินหน้างานขุดเจาะมีเนื้อแน่น (massive) โอกาสของการพังทลายจะมีสาเหตุมาจากการตัดหน้าเหมืองให้มุมลาดเอียง (slope angle) สูงชันเกินกว่าค่ามุมเสถียรภาพในของมวลสารเอง ก่อให้เกิดความไม่สมดุลต่อมวลความลาดเอียงหน้าเหมือง เนื่องจากความต้านทานของกำลังวัสดุ (เจือิน) ไหมดินมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักของมวลความลาดเอียง มีผลทำให้เกิดการพังทลายได้

แนวทางที่สอง ระหว่างมีการขุดเจาะถ้าหากมวลสาร มีระนาบของรอยแตกแยกเกิดขึ้น เช่น ระนาบรอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding plane) รอยแตกแยกตามธรรมชาติ (joint) รอยเลื่อน (fault) เป็นต้น โอกาสที่จะเกิดการพังทลายตามระนาบความไม่ต่อเนื่องในมวลหินเหล่านี้เป็นไปได้สูง หรือบางทีระนาบความไม่ต่อเนื่องตั้งแต่ 2 ระนาบตัดกัน ทำให้มวลหินมีการไถลเลื่อนตามแนวเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน

2. ตัวประกอบอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพ

น้ำกับความชื้นเป็นตัวประกอบหลักที่มีผลต่อเสถียรภาพของงานการขุดเจาะ เนื้อหินหรือเนื้อดินจะมีค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์แตกต่างกันอย่างมาก ระหว่าง หินที่แห้งและสด (dry fresh rock) กับหินที่มีของเหลว (น้ำ) ชั่ง หรือระหว่างหินที่สดกับหินที่ผ่านกระบวนการผุพังมาแล้ว

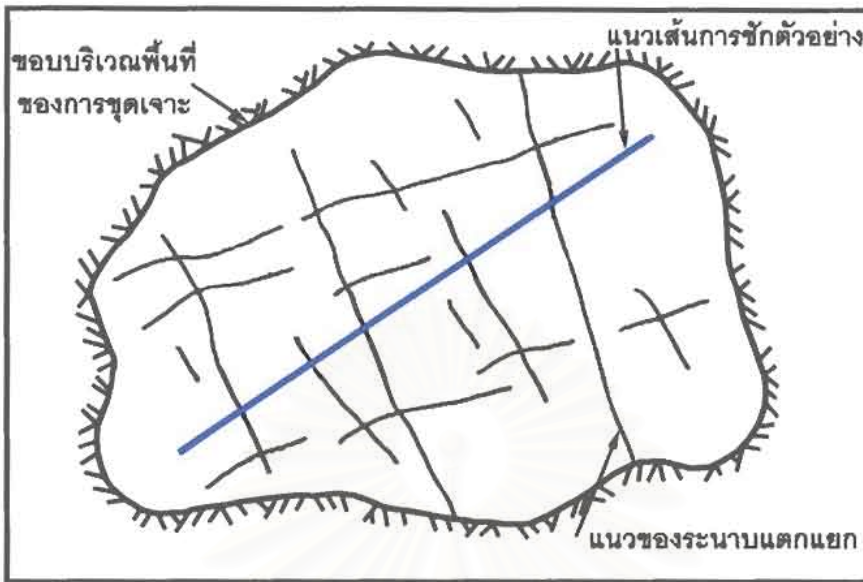
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่มีผลต่อกำลังวัสดุและเสถียรภาพของมวลสาร ถ้าเป็นมวลหิน ได้แก่ ค่าโคฮีชัน (cohesion) กับมุมเสียดทานภายใน (angle of internal friction) แต่ถ้าเป็นมวลหิน ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายใน โคฮีชัน กับกำลังวัสดุอัดแกนเดียว (uniaxial compressive strength)

7.2.2 แนวทางการบันทึกผลกับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงธรณีวิทยาในพื้นที่

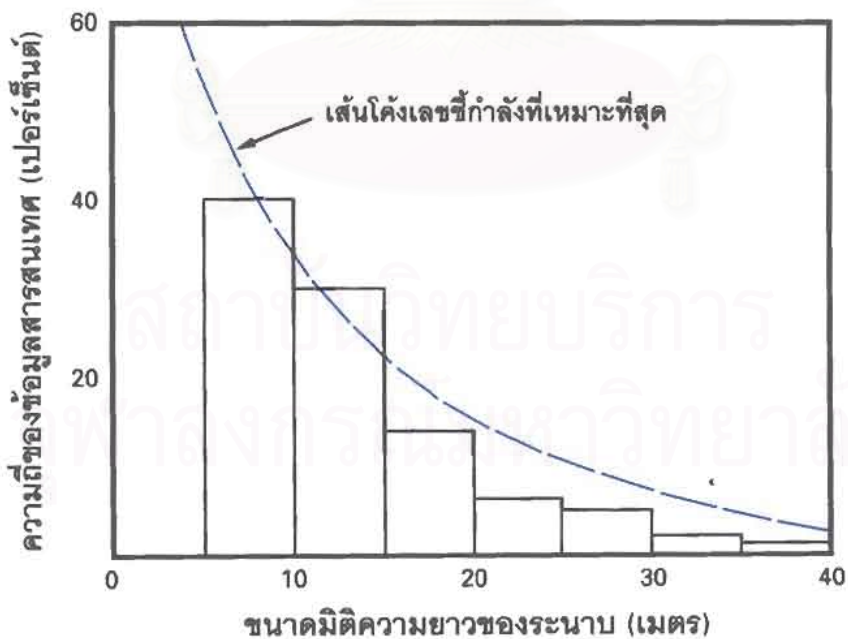
นอกจากมีการศึกษาสภาพภูมิประเทศกับสภาพธรณีวิทยาหน้างานทั่วไปแล้ว การที่จะสามารถกำหนดแนวทางการวางแผนเปิดหน้างานขุดเจาะในพื้นที่เชิงรูปแบบ pit layout ได้จำเป็นต้องมีการบันทึกผลข้อมูลกับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงธรณีวิทยาได้อย่างมีระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิง 3 มิติ จนระบุหรือแยกบริเวณหน้างานขุดเจาะที่ต้องให้ความสำคัญระมัดระวังหรือแก้ไข เช่น บริเวณเสี่ยงสูงที่ควรตัดมุมความลาดเอียงหน้างานให้มีความชันต่ำ หรือหลีกเลี่ยงบริเวณหน้างานขุดเจาะที่อาจเกิดอันตราย เมื่อมีการขุดย้ายวัสดุก่อสร้าง มวลหิน (แร่) ผ่านบริเวณนั้น เป็นต้น

ตัวอย่างในรูปที่ 7.1 เป็นการวางเส้นสำรวจเพื่อชักตัวอย่าง (sampling line) ในบริเวณพื้นที่ขุดเจาะ โดยมีการวางกรอบของพื้นที่ กับกำหนดทิศทางการชักข้อมูลดิบของระนาบความไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในที่นี้เป็นระนาบรอยแตกแยกในหิน (joint plane) จากนั้นก็มีการวิเคราะห์ เพื่อจัดกลุ่มหาค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเทียบกับแนวทิศทางการขุดเจาะนั้น

ขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ผลเพื่อให้ทราบผลว่า ข้อมูลที่เป็นปัจจัยหลักในการก่อให้เกิดความไม่เสถียรภาพในระบบนี้ มีการแจกแจงค่าแบบไหน ซึ่งเป็นพื้นฐานในการหาความน่าจะเป็นของฟังก์ชันค่าโอกาสของการพังทลายได้ อย่างไรก็ตามในบางครั้งการแจกแจงค่าของข้อมูลอาจไม่ชัดเจน การพล็อตกราฟหาเส้นโค้งที่เหมาะสมกับกลุ่มข้อมูลดิบ ดังรูปที่ 7.2 ช่วยให้เกิดความเข้าใจในรูปแบบของการแจกแจงมากขึ้น



รูปที่ 7.1 การกำหนดแนวขอบเขตของพื้นที่ กับเส้นชักตัวอย่างข้อมูลที่เป็นระนาบความไม่ต่อเนื่อง หรือเป็น Joint Planes



รูปที่ 7.2 การพล็อตกราฟหาเส้นโค้งที่เหมาะสมกับกลุ่มข้อมูลในรูปเป็นเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่เหมาะสมที่สุด กับกลุ่มข้อมูลที่เป็นมิติความยาวของระนาบ

7.3 แนวทางการประเมินผลความไม่แน่นอนเชิงการออกแบบ

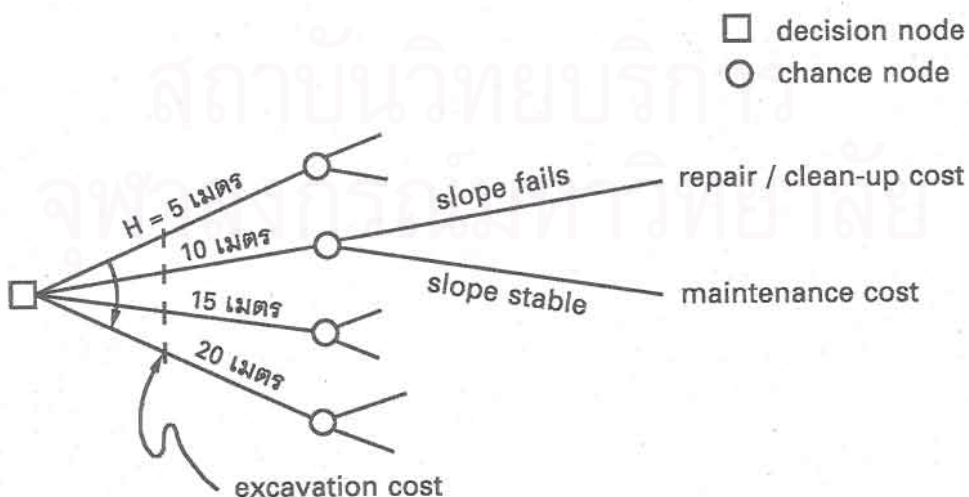
จากข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีการปรับค่าเชิงสถิติ ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขนาดมิติหรือคุณสมบัติของมวลสาร เมื่อวิศวกรออกแบบผังการขุดเจาะหน้างานก่อสร้างสิ่งทีผู้ออกแบบต้องประสบเป็นอันดับแรก ได้แก่ ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของระบบข้อเสนอแนะในที่นี้ ให้ใช้หลักการทฤษฎีของเบส์ (Bayes theorem) ที่แยกขั้นตอนของการตัดสินใจแบบรูปต้นไม้ (decision tree)

7.3.1 การประเมินผลจากข้อมูลสารสนเทศ

จากข้อมูลสารสนเทศ (information data) ที่ตรวจวัดในภาคสนามทั้งที่เป็นค่าคุณสมบัติมวลสาร หรือเป็นค่าขนาดระยะมิติเชิงเรขาคณิต ช่วยทำให้ตัดสินใจออกแบบเพื่อทำการแก้ไขให้มีเสถียรภาพดีขึ้น

เมื่อมีการขุดเจาะ เช่นตัดความลาดชันมันโค ปัจจุบันที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เป็นค่าระยะความสูงของหน้าความลาด กับมุมเอียงของความลาดเอียง ดังนั้นก่อนที่แผนงานขุดเจาะจะถูกนำมาใช้ ถ้าหากมีข้อมูลสารสนเทศที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมย่อมมีผลต่อการออกแบบซ้ำใหม่ (redesign) หรืออาจจำเป็นต้องหาข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม (gather more information)

วิธีการง่าย ๆ ใช้แนวทางของการตัดสินใจที่แตกแขนงคล้ายรูปกิ่งต้นไม้ รูปที่ 7.3 ข้างล่างเป็นการกำหนดแนวทางเลือกเพื่อใช้ในการตัดสินใจ 4 ทางเลือกสำหรับค่าระดับความสูงในแนวคิ่งของความลาดเอียงที่ระบุไว้ที่ค่า 5, 10, 15, 20 เมตร

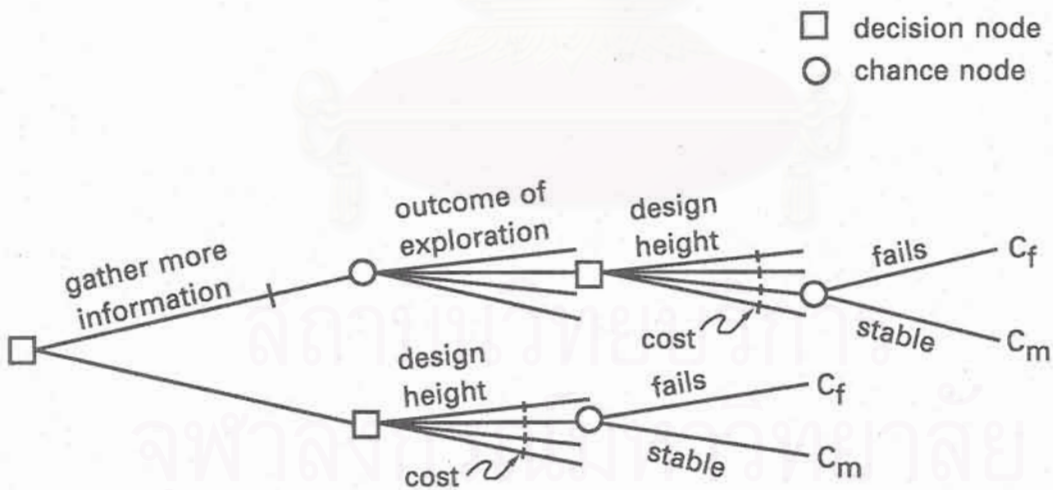


รูปที่ 7.3 ผังการตัดสินใจอย่างง่ายคล้ายกิ่งต้นไม้ สำหรับความสูงของความลาดเอียง

แต่ละจุดต่อ (node) มีสัญลักษณ์เป็นสี่เหลี่ยม หมายถึง จุดต่อของการตัดสินใจ (decision node) หรือมีสัญลักษณ์เป็นวงกลม หมายถึง จุดต่อของโอกาสความน่าจะเป็น (chance node) ในการตัดสินใจขั้นตอนสุดท้ายนั้น ค่าระยะความสูงควรอยู่ระหว่างค่า 5-20 เมตร

การออกแบบแต่ค่าระดับความสูง ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ (excavation cost) กับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (maintenance cost) มีการเปลี่ยนแปลง และยังมีผลต่อโอกาสการพังทลายของโครงสร้างความลาดเอียง ดังนั้นการออกแบบที่ดีที่สุดจึงเป็นการหาความสมดุลของตัวแปร 3 ค่า ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการขุดเจาะ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา กับความเสี่ยงต่อการพังทลายของโครงสร้างสิ่งก่อสร้าง

ตัวอย่างที่ช่วยในการตัดสินใจว่าสมควรหาข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม แสดงไว้ในรูปที่ 7.4 ใช้สัญลักษณ์เช่นเดียวกับรูปที่ 7.3 ก่อนที่ผู้ออกแบบจะตัดสินใจเลือกความสูงที่ระดับใดต้องหาผลลัพธ์ของการวิเคราะห์เบื้องต้น เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการใช้ข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม (มีค่าใช้จ่ายเพิ่มด้วย) ซึ่งอาจสามารถปรับค่าระดับความสูงที่เหมาะสมดีกว่าการวิเคราะห์เบื้องต้น



รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบการหาข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม เพื่อปรับเปลี่ยนค่าระดับความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง กับการวิเคราะห์เบื้องต้นที่ใช้ข้อมูลสารสนเทศที่มีอยู่ [พจน์ C_f หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมหรือเก็บกวาดวัสดุคูก้างหน้างาน ส่วนพจน์ C_m หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา]

ความสูงในแนวดิ่ง (H) ของหน้าความลาดหรือหน้าเหมือง ระบุเป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย เช่น แสดงเป็นนิพจน์ $H \leq H_0$ มวลสารจะเสถียร หรือเป็นนิพจน์ $H > H_0$ มวลสารจะพังทลาย

7.3.2 การคาดหมายผลลัพธ์เชิงความเสี่ยง

การศึกษาพฤติกรรมของความลาดเอียงเพื่อหาความเชื่อถือได้ของระบบ จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เชิงความคาดหมาย (expectation) สำหรับข้อมูลสารสนเทศ เช่น กำหนดให้ความน่าจะเป็นของการออกแบบจำลองการขุดเจาะมีสมนัย (correspond) กับความถี่ของการตรวจวัดในระยะยาว หรือสามารถหาค่าความไม่แน่นอนภายในเวลาหนึ่งเหตุการณ์ (event) ซึ่งสมมุติฐานนี้ค่อนข้างเกินความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะว่าในการวิเคราะห์ผลเชิงความน่าจะเป็นมีกระบวนการเฟ้นสุ่ม (stochastic process) เกิดขึ้นได้หลายแนวทาง ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของข้อมูลคิบบมีผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง

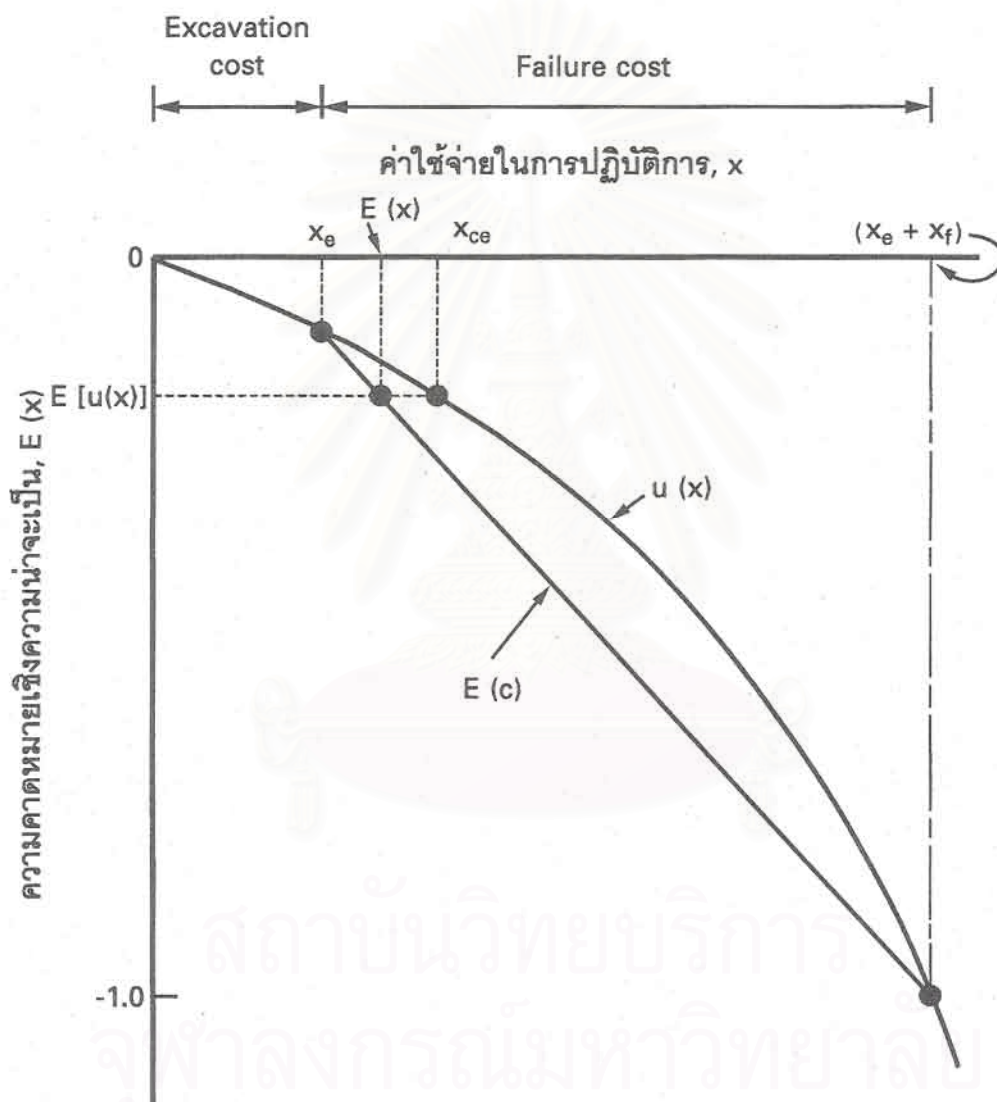
ในการหาความเสี่ยงของการพังทลายในมวลสาร (เช่นความลาดเอียง) มีตัวแปรของความคาดหมาย เป็น 1 คู่ ซึ่งผลคูณของตัวแปรทั้งสองเป็นค่าใช้จ่ายเชิงความคาดหมายของการพังทลาย จัดเป็นมาตราสเกลาร์เพื่อวัดระดับความเสี่ยง ตามนิยามในสมการที่ 7.7 ที่อิงตามทฤษฎีที่มีชื่อเรียกว่า Utility theory ปกติประยุกต์กับสัจพจน์ (axiom) ที่มีจำนวนจำกัด ในการระบุฟังก์ชันที่มีจุดมุ่งหมายช่วยในการตัดสินใจต่อทางเลือกหลายระดับความเสี่ยงของระบบ

กรณีของฟังก์ชันเฉพาะที่เรียก utility function ใช้สำหรับความคาดหมายในการลดความเสี่ยงในการออกแบบงานขุดเจาะ (การตัดความลาดชันมันได) ได้แสดงนิพจน์ในสมการข้างล่างประกอบกับกราฟความคาดหมายเหตุการณ์ (รูปที่ 7.5 หน้าถัดไป) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของการปฏิบัติการงานขุดเจาะ

$$E(c) = p(f) \{x_e + s_f\} + [1 - p(f)] x_c \quad (7.7)$$

นิยามของพจน์ในสมการข้างบน ได้แก่

- $E(c)$ = ค่าใช้จ่ายเชิงความคาดหมายเป็นสกุลเงิน
- x_c = ค่าใช้จ่ายของการขุดเจาะ
- s_f = ค่าใช้จ่ายของการซ่อมกับเก็บกวาดวัสดุเมื่อเกิดการพังทลาย
- $p(f)$ = เปรอร์เซ็นต์โอกาสความน่าจะเป็นเมื่อค่าเลือกคงไว้ที่ระดับ 10 เปรอร์เซ็นต์



รูปที่ 7.5 การพล็อตค่าใช้จ่ายในระบบ เปรียบเทียบกับค่าความคาดหมายเชิงการลดความเสี่ยง ในการออกแบบเพื่อตัดความลาดชันมั่นคง

ค่าใช้จ่ายเชิงความคาดหมายแสดงเป็นกราฟเส้นตรง มีค่าใช้จ่ายอยู่ระหว่างค่าของ $(x_e + x_f)$ กับค่า x_e ในกรณีที่โอกาสการพังทลายเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ จะหาค่าใช้จ่ายเชิงความคาดหมายในการลดความเสี่ยง ดังผลการคาดคะเนจากแกนตั้งที่ตรงจุด $E [u (x)]$ เล็งมาบนกราฟเส้นตรง $E (c)$ แล้วหาค่าบนแกนนอนเป็นจุด $E (x)$

ค่าใช้จ่ายอีกชนิดหนึ่งหาได้จาก utility function, $u (x)$ เป็นการพล็อตค่าใช้จ่ายที่ได้จากการคำนวณหรือมาจากค่าใช้จ่ายจริงที่บันทึกผลไว้ เมื่อมีความสูงของหน้าตัดความลาดเปลี่ยนแปลงไป กราฟคล้ายเส้นโค้งเลขชี้กำลังกว่า (หรือคล้ายกับพาราโบลา) จัดเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่แน่นอน (uncertain) ในระบบ ยิ่งค่า $u (x)$ มีค่าสูง ค่าความคาดหมายเชิงความน่าจะเป็นของความเสี่ยงต่อการพังทลายมีสูงขึ้น

ในกรณีที่ต้องการหาค่าสมมูลเชิงความไม่แน่นอน จากข้อกำหนดความน่าจะเป็นที่ระดับ 10 % ก็ต่อจุดเล็งมายังบนกราฟเส้นโค้ง แล้วเล็งมาบนแกนนอนได้จุด x_{ce} นิยามเป็นจุดคาดหมายค่าที่ไม่แน่นอน

เป้าหมายต่อไปเป็นการหาค่าที่ลดความเสี่ยง (risk averse) กำหนดให้มีนิพจน์

$$x_{ce} > E (x) \quad (7.2)$$

ดังนั้น ถ้าหากฟังก์ชัน $u (x)$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ค่าของ $x_{ce} = E (x)$ และ มีผลทำให้การตัดสินใจง่ายขึ้น แต่ถ้าหากเป็นกราฟเส้นโค้งเมื่อกราฟมีความโค้งนูนมาก ค่าการลดความเสี่ยงมีเปอร์เซ็นต์สูงขึ้น เมื่อกราฟเป็นเส้นตรงมีความเสี่ยงในระดับเป็นกลาง (risk neutral) มากขึ้น

ในการประมาณค่า $u (x)$ ถ้าให้ค่านี้เป็นตัวแปรค่าเดียวที่ใช้หาความเสี่ยงระบบ ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นนิพจน์สมการรูปแบบใหม่

$$E [u (x)] = u [x_{ave} + x_{ce}] \quad (7.3)$$

เนื่องจากการประมาณค่าของอนุกรม Taylor ปรากฏว่าอันดับที่สองของสมการมีค่าที่ละได้ ไม่ต้องนำมาคำนวณเพราะค่าน้อยมาก จึงให้ $x_{ave} = E [x]$ ดังนั้น

$$x_{ce} \approx E [x] + \frac{1}{2} R (x_{ave}) V(x) \quad (7.4)$$

พจน์ $R (x_{ave})$ เป็นฟังก์ชันการลดความเสี่ยง ส่วนพจน์ $V(x)$ เป็นค่าความแปรปรวนของค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน หน่วยเป็นสกุลเงิน

$$R(x_{ave}) = \frac{-\frac{d^2 u}{dx^2}}{\frac{du}{dx}} \quad (7.5)$$

และ

$$u(x) = a \{ \exp(-bx) \} \quad (7.6)$$

สมการที่ 7.6 ใช้ในการประมาณค่าแบบง่ายค่าฟังก์ชัน $u(x)$ ในรูปแบบสมการเลขชี้กำลัง เมื่อให้ค่า \exp เป็นเลขชี้กำลังมีจำนวนอตรรกยะ (irrational number) พจน์ a และ b เป็นค่าคงที่เชิงสเกลาร์บนแกน x ที่ช่วยในการประมาณค่าฟังก์ชันเชิงการลดความเสี่ยง

7.4 แนวทางการออกแบบหาผลลัพธ์ขนาดมิติที่เหมาะสมที่สุด

จากข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีการปรับค่าเชิงสถิติ ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลสารที่ทำการขุดเจาะ การที่จะหาจุดหรือตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดว่าขนาดมิติ (dimensional magnitude) ของตัวแปรหลักใดที่ใช้ในการออกแบบ เช่น เป็นความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง เป็นมุมเอียงเทของหน้าความลาด เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ เป็นต้น ขนาดมิติเหล่านี้เมื่อสมมุติให้เป็นตัวแปรเดียวในระบบ มีวิธีในการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุด (optimum dimension) ตามแนวคิด (concept) ดังนี้

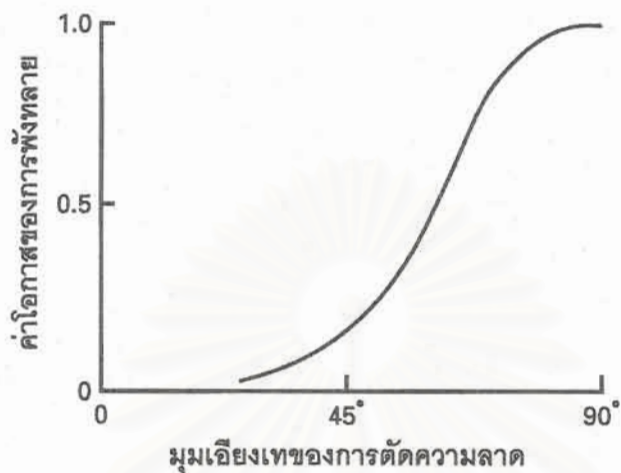
7.4.1 การวิเคราะห์หาข้อยุติในการออกแบบโดยรวม

จากข้อมูลพื้นฐานทั้งที่เป็นข้อมูลสารสนเทศภาคสนาม กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทำการแยกกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่มตัวแปรหลัก ได้แก่

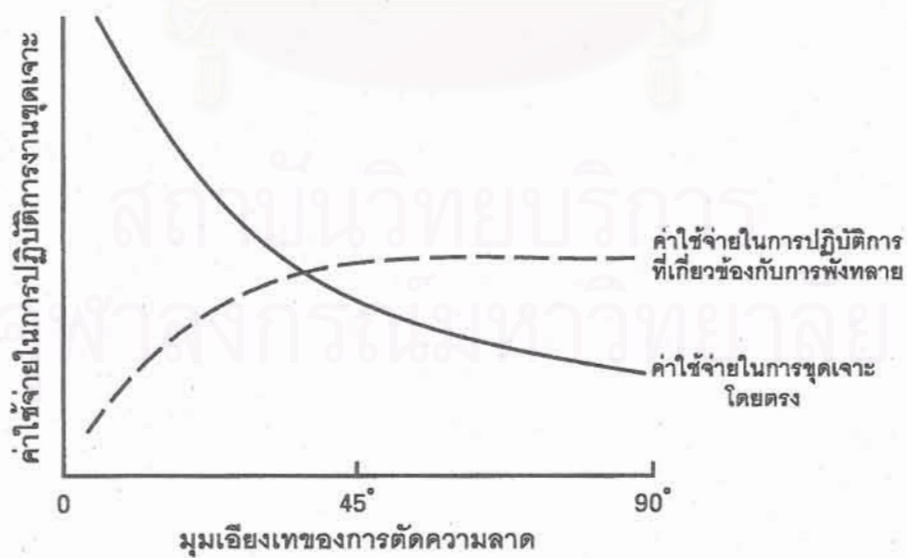
กลุ่มแรก เป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ความสูงของหน้าเหมือง มุมเอียงเทของความลาดชัน เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ เป็นต้น

กลุ่มที่สอง เป็นตัวแปรที่ใช้ในเป็นดัชนีเชิงสมรรถนะ เช่น โอกาสของการพังทลาย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเฉพาะอย่าง ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบ เป็นต้น

เนื่องจากมีความสัมพันธ์กันในหลายรูปแบบ ระหว่างมุมเอียงเทของหน้าความลาดกับค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย ดังกราฟแสดงไว้ในหน้าถัดไป (รูปที่ 7.6) หรือระหว่างมุมเอียงเทของหน้าความลาดกับมีความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่าย (ในการขุดเจาะหรือในการเก็บกวาดวัสดุที่เกิดพังทลาย) ดังกราฟของรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.6 ความแปรผันของค่าความเชื่อถือได้ในการออกแบบ
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าขนาดมิติของตัวแปรหลัก



รูปที่ 7.7 ความแปรผันของค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการของงานภาค
สนาม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดมิติของตัวแปรหลัก

ในขั้นตอนต่อไปของการวิเคราะห์ความเสี่ยงในระบบ เป็นการหาเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุด (optimal criterion) จากตัวแปรหลักที่กำหนด ถ้าใช้ตัวอย่างของรูปที่ 7.6 ถึง 7.7 เมื่อทดลองให้มีการแปรเปลี่ยนของค่ามุมเอียงของความลาดชันไปเรื่อย ๆ แล้วพล็อตค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะโดยตรง เรียกเป็น direct cost ซึ่งแปรผันโดยตรงกับมวลสารหน้างานขุดเจาะ

ถ้าหากเป็นมวลดินสามารถใช้เครื่องจักรกลธรรมดาเปิดหน้าดิน ขุดค้ำลำเสี่ยงไม่ได้ ค่าใช้จ่ายโดยตรงก็เป็นเพียงค่าวัสดุสิ้นเปลือง (น้ำมันเชื้อเพลิง ไล่กรอง น้ำมันหล่อลื่น) และค่าเงินเดือนพนักงาน ค่าจ้างคนงาน ในส่วนที่ประจำหน้างานขุดเจาะ

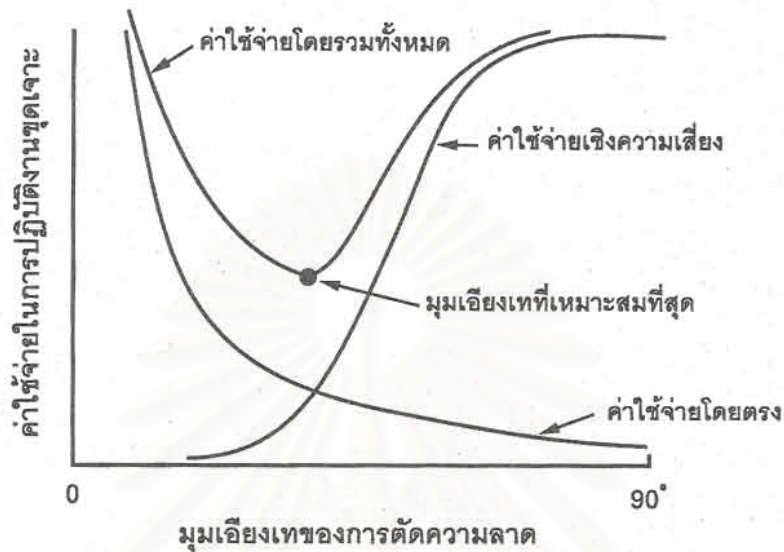
ในส่วนค่าใช้จ่ายโดยรวม ที่เรียกว่า total cost ในการขุดเจาะมวลดิน เป็นค่าใช้จ่ายโดยตรง รวมกับค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์กับเครื่องจักรกล และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานขุดเจาะ

ถ้าหากมวลสารหน้างานขุดเจาะ เป็นมวลดินปนหิน หรือเป็นมวลหินเกือบทั้งหมด อาจมีค่าใช้จ่ายโดยตรงที่เพิ่มขึ้น คือค่าเจาะหลุมระเบิดกับวัตถุระเบิดกับอุปกรณ์ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่าใช้จ่ายโดยรวม จะมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น จากการใช้อุปกรณ์กับเครื่องจักรกลที่เกี่ยวข้องกับการเจาะกับการระเบิด

อนึ่งการขนส่งลำเสี่ยงมวลดินจากหน้างานไปยังสถานที่ก่อสร้าง หรือการขนย้ายมวลสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง จัดเป็นค่าขนย้ายลำเสี่ยงมวลสาร หรือมีชื่อเฉพาะเรียกว่า loading and hauling cost ควรมีการนำไปคำนวณรวมกับค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ให้แปลงเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมดของงานขุดเจาะด้วย ทั้งนี้ในงานระเบิดหินส่วนใหญ่ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จะมากกว่าการผลิตหินเพื่อการก่อสร้างโดยการเจาะระเบิดเสียอีก

รูปที่ 7.8 เป็นค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่อิงกับกราฟเคิม (ของรูปที่ 7.6 และ 7.7) ซึ่งทำการพล็อตค่าใหม่ และกำหนดให้มวลสารที่ทำการขุดเจาะเป็นดิน ที่มีการยึดติดระหว่างเม็ดอนุภาคดินพอสมควร แต่สามารถใช้เครื่องจักรกลปกติทำการขุดค้ำปรับแต่งหน้างานขุดเจาะได้โดยไม่ต้องอาศัยการระเบิดช่วย ดังนั้นค่าใช้จ่ายดังกล่าวถ้าเทียบกับตัวแปรหลักที่เป็นมุมเอียงของความลาดชัน (เพียงค่าเดียว) สามารถที่จะหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของมุมที่ควรออกแบบในการตัดความลาด เรียกว่า optimum angle โดยใช้ค่าที่จุดต่ำสุดของกราฟเส้นโค้งรูปตัววี (Vee curve) ที่เป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมดในรูปที่ 7.8 หน้าถัดไป

เมื่อพิจารณาคูภาพรวม พบว่า ที่ระดับค่ามุมต่ำกว่ามุม optimum ค่าใช้จ่ายโดยรวมสูงกว่าค่าที่มุมนี้ ทำนองเดียวกันที่ระดับค่ามุมสูงกว่ามุม optimum ค่าใช้จ่ายโดยรวมก็สูงกว่าค่าที่มุมนี้ ปกติแล้วค่าใช้จ่ายโดยตรงจะลดลงเมื่อความชันของหน้างานสูงขึ้น แต่ก็ยังมีปัจจัยอื่น เข้ามาเกี่ยวข้องที่ต้องใช้ในการตัดสินใจ เช่น เมื่อความลาดชันสูงขึ้นมีความลำบากในการขุดค้ำมวลดินที่พื้นความลาด และมีระดับความเสี่ยงต่อการพังทลายสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องเลือกค่าที่ระดับความเสี่ยง ไม่สูงมาก เป็นจุดมุมตัดความลาดที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าว



รูปที่ 7.8 ผลการวิเคราะห์โดยภาพรวม เมื่อเปรียบเทียบมุมเอียงเทของการตัดความลาดชันแผ่นดิน กับค่าใช้จ่ายหลายชนิดเช่น ค่าใช้จ่ายโดยตรง ค่าใช้จ่ายเชิงความเสี่ยง กับค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมด

7.4.2 ตัวอย่างกรณีศึกษาของการหาข้อยุติจากการขุดเจาะโดยใช้วัตถุระเบิด

ในหัวข้อย่อนี้ ต้องการแสดงผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยงานขุดเจาะภาคสนามในเมืองหินในหลายบริเวณภายในประเทศไทย ข้อมูลรายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 6.4 หน้า 138 - 153 รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ เรื่อง "การวางแผนทั้งระบบในการเปิดหน้างานขุดเจาะโดยใช้วัตถุระเบิด (สง่า ตั้งชวาล, 2543) เป้าหมายหนึ่งของงานวิจัยดังกล่าวต้องการหาความเหมาะสมของผังหน้าระเบิดในเมืองหินปูน เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในหลายด้าน ตั้งแต่ ค่าเจาะหลุม ค่าระเบิด ค่าขนย้ายลำเลียง เพื่อให้ได้ข้อยุติว่าผังหน้าระเบิดใดจึงจะเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้มีการแยกตัวแปรหลักออกเป็น 2 ส่วนอิสระ ไม่เกี่ยวข้องกัน ระหว่างเมืองเปิดที่มีขนาดใหญ่ทำการระเบิดเพื่อใช้หินปูนเป็นวัตถุขุดในการทำซีเมนต์ กับเมืองเปิดที่มีขนาดเล็กจนถึงปานกลางทำการระเบิดเพื่อใช้หินปูนเป็นวัตถุขุดในการงานก่อสร้าง (เช่นทำพื้นถนน วัสดุผสมในคอนกรีต)

จากการสอบถามสัมภาษณ์ในหลายเมืองหิน ที่มีที่ตั้งเหมืองกับโรงไม่หินในพื้นที่หลายจังหวัด ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี สระบุรี และนครราชสีมา รวมทั้งการเก็บข้อมูล

จากตัวแทนบริษัทที่จำหน่ายเครื่องจักรกลและวัสดุระเบิด ได้ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัยสำคัญที่ใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ของค่าใช้จ่ายหลักต่อการผลิตหิน ได้ผลลัพธ์ดังนี้

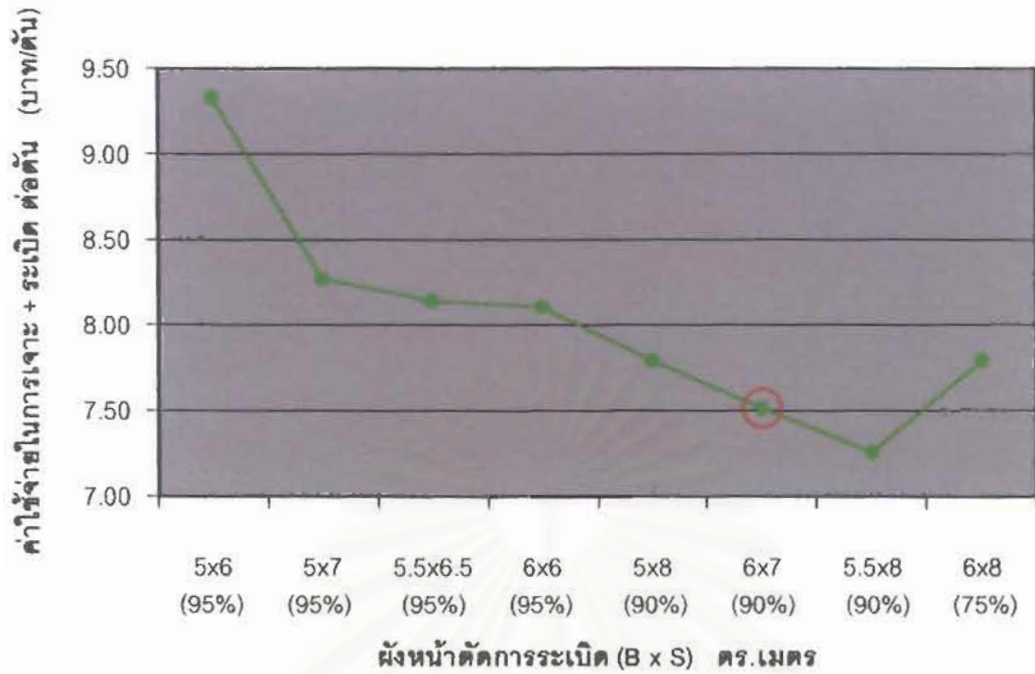
- ก. เหมืองหินเปิดขนาดใหญ่ที่มีผนังหน้าตัด 6 x 7 คร.เมตร
- ค่าใช้จ่ายในการเจาะต่อตัน เท่ากับ 2.49 บาทต่อตัน
 - ค่าใช้จ่ายในการระเบิดต่อตัน เท่ากับ 5.03 บาทต่อตัน
 - ค่าใช้จ่ายในการขุดคักกล้าเสียงหินต่อตัน เท่ากับ 11.52 บาทต่อตัน
- ข. เหมืองหินเปิดขนาดเล็กถึงปานกลางที่มีผนังหน้าตัด 2 x 3 คร.เมตร
- ค่าใช้จ่ายในการเจาะต่อตัน เท่ากับ 5.42 บาทต่อตัน
 - ค่าใช้จ่ายในการระเบิดต่อตัน เท่ากับ 4.77 บาทต่อตัน
 - ค่าใช้จ่ายในการขุดคักกล้าเสียงหินต่อตัน เท่ากับ 26.77 บาทต่อตัน

ภายหลังจากการจำลองแบบ (simulation) จากต้นแบบในข้อ ก. กับข้อ ข. โดยนำตัวเลขค่าใช้จ่ายจริง (ที่เป็นค่าเฉลี่ยจากหลายเหมืองรวมกัน) นำมาปรับแต่งกับผนังหน้าตัดที่ทำการคำนวณหรือออกแบบซ้ำใหม่อีกหลายผนัง จนได้ข้อมูลค่าใช้จ่ายที่มีจำนวนเพียงพอจะหาผลลัพธ์สุดท้ายในการออกแบบผนังงานระเบิดหิน ที่นำมาเปรียบเทียบขนาดของเหมืองเปิด ดังกราฟรูปที่ 7.9 - 7.10 เป็นการเปรียบเทียบในเหมืองหินเปิดขนาดใหญ่ ส่วนรูปที่ 7.11 - 7.12 เป็นการเปรียบเทียบในเหมืองขนาดเล็กถึงปานกลาง

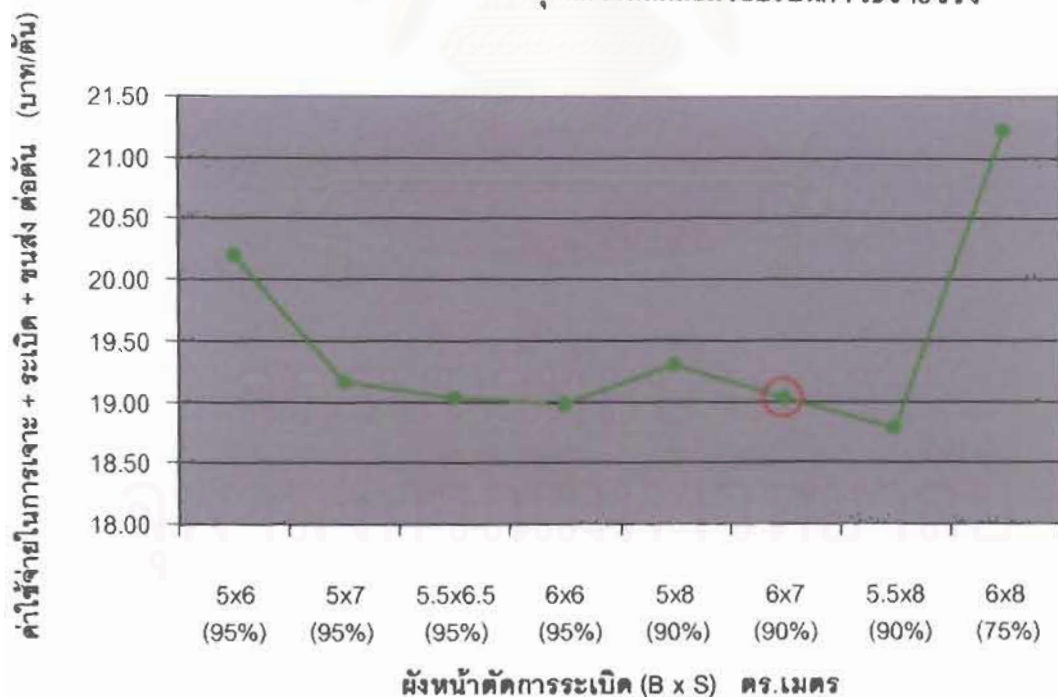
สำหรับผลลัพธ์ของผนังหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดนั้น ต้องคำนึงในเรื่องประสิทธิภาพของการทำงานหน้าเหมือง กับในเรื่องความเหมาะสมพอดีของขนาดมวลหินที่ต้องผ่านปากไม้ด้วย

กรณีเหมืองเปิดขนาดใหญ่ ค่าใช้จ่ายในการเจาะกับระเบิดสำหรับผนังหน้าตัดแบบ 5.5 X 8 คร.เมตร ได้ค่าต่ำสุด และเมื่อรวมค่าการขนส่งเข้าไปด้วย ก็ได้ผลลัพธ์ทำนองเดียวกัน แต่ถ้าคำนวณขนาดของหินแตกหักและเหมาะสมกับปากไม้แล้ว มีความใกล้เคียงกับขนาดของหินที่แตกหักจากการใช้ผนังหน้าตัดแบบ 6 x 7 คร.เมตร ดังนั้นค่าของผลลัพธ์สุดท้ายน่าจะเป็นได้ 2 กรณี คือใช้ผนังหน้าตัดทั้ง 2 แบบดังกล่าว ตามแต่สภาพลักษณะภูมิประเทศกับธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวย

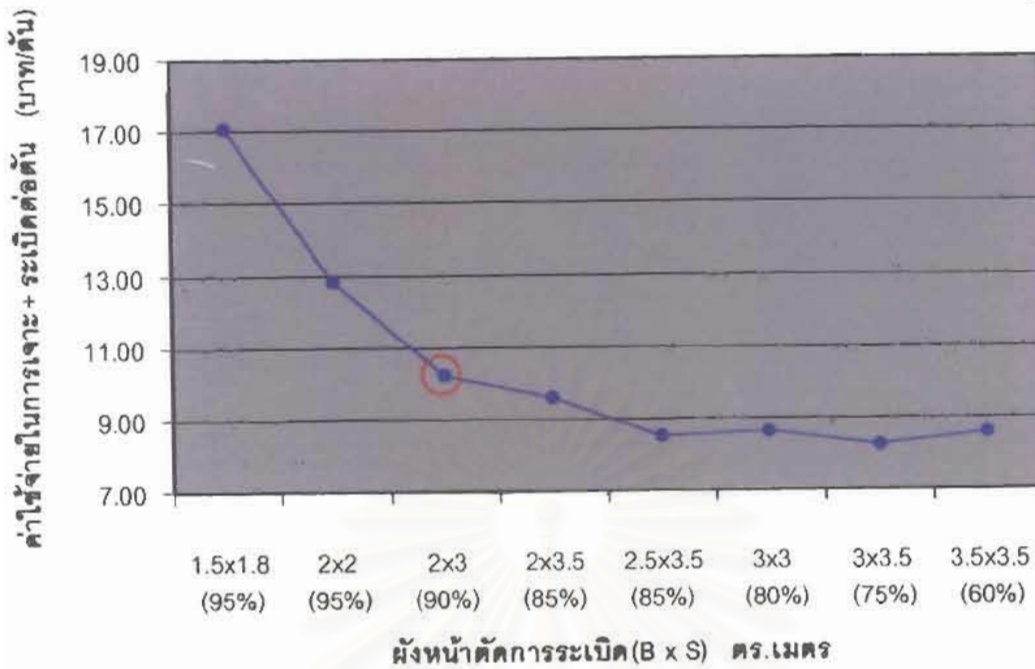
กรณีเหมืองเปิดขนาดเล็กถึงปานกลาง ค่าใช้จ่ายในการเจาะกับระเบิดสำหรับผนังหน้าตัดแบบ 2.5 X 3.5 คร.เมตร ไม่ได้ค่าต่ำสุด แต่ก็แตกต่างจากค่าต่ำสุดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรวมค่าการขนส่งเข้าไปด้วย ก็ได้ผลลัพธ์ผนังหน้าตัดแบบ 2 X 3 คร.เมตร มีค่าใกล้เคียง ในขณะที่ผนังหน้าตัดอื่นจะมีความแตกต่างสูง ดังนั้นค่าของผลลัพธ์สุดท้ายน่าจะเป็นได้ 2 กรณี คล้ายคลึงกับกรณีของเหมืองเปิดขนาดใหญ่ คือใช้ผนังหน้าตัดทั้ง 2 แบบตามแต่สภาพลักษณะภูมิประเทศกับธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวย



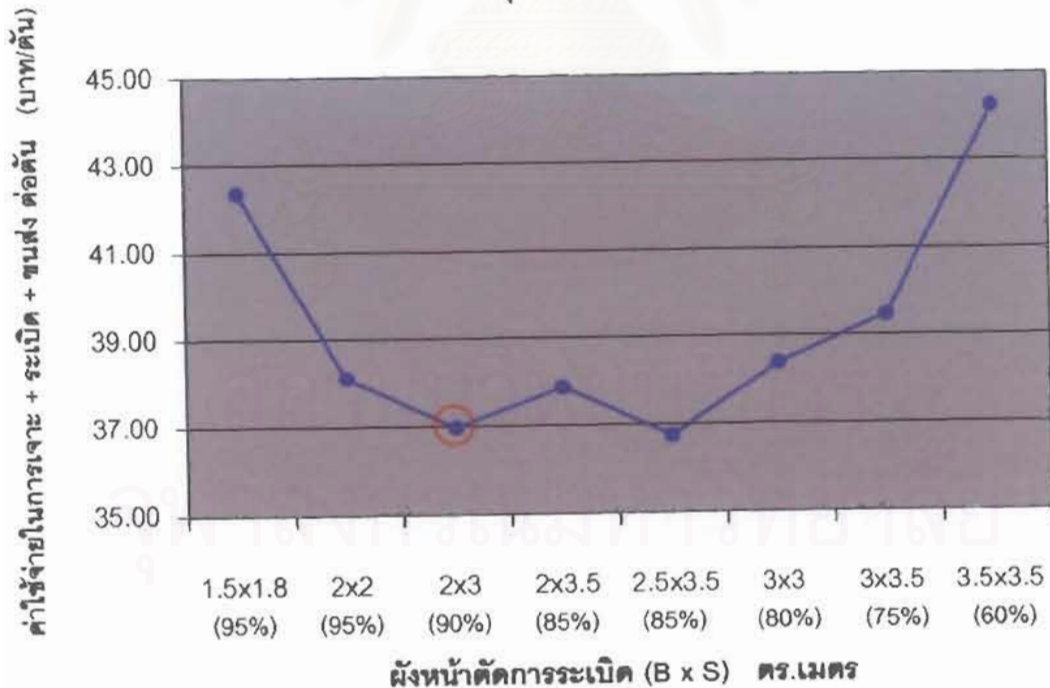
รูปที่ 7.9 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังก้อนระเบิดของเหมืองขนาดใหญ่ ตัวเลขแนวตั้งเป็นค่าเจาะกับค่าระเบิด ส่วนตัวเลขแนวนอน เป็นรูปแบบผังก้อนตัด กับค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของงาน จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง



รูปที่ 7.10 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังก้อนระเบิดของเหมืองขนาดใหญ่ ใช้แนวทางเดียวกับรูปข้างบน แต่มีค่าการขนส่งรวมอยู่ด้วย จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง



รูปที่ 7.11 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดเล็ก ตัวเลขแนวตั้งเป็นค่าเจาะกับค่าระเบิด ส่วนตัวเลขแนวนอน เป็นรูปแบบผังหน้าตัด กับค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของงาน จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง



รูปที่ 7.12 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการวางแผนสำหรับผังหน้าระเบิดของเหมืองขนาดเล็ก ใช้แนวทางเดียวกับรูปข้างบน แต่มีค่าการขนส่งรวมอยู่ด้วย จุดที่มีวงกลมล้อมรอบเป็นค่าใช้จ่ายจริง

7.5 แนวทางสรุปผลในการประเมินความเสี่ยงของงานชุดเจาะ

การที่จะหาค่าความเสี่ยงในงานการชุดเจาะ วิธีการที่ดีที่สุด ได้แก่ การระบุค่าเป็นตัวเลขเพื่อสามารถจัดอันดับได้ เช่นอาจกำหนดให้ตัวเลขเป็นค่ามาตราส่วนระดับของความเสี่ยงตั้งแต่เลขต่ำไปถึงเลขสูง เช่น หมายเลข 1, 2, ..., 8 เป็นต้น นักวิจัยบางท่านก็กำหนดให้เลขค่าเป็นสภาวะของระบบที่มีระดับความเสี่ยงสูง แต่บางท่านกำหนดให้เลขค่าเป็นสภาวะของระบบที่มีระดับความเสี่ยงต่ำ

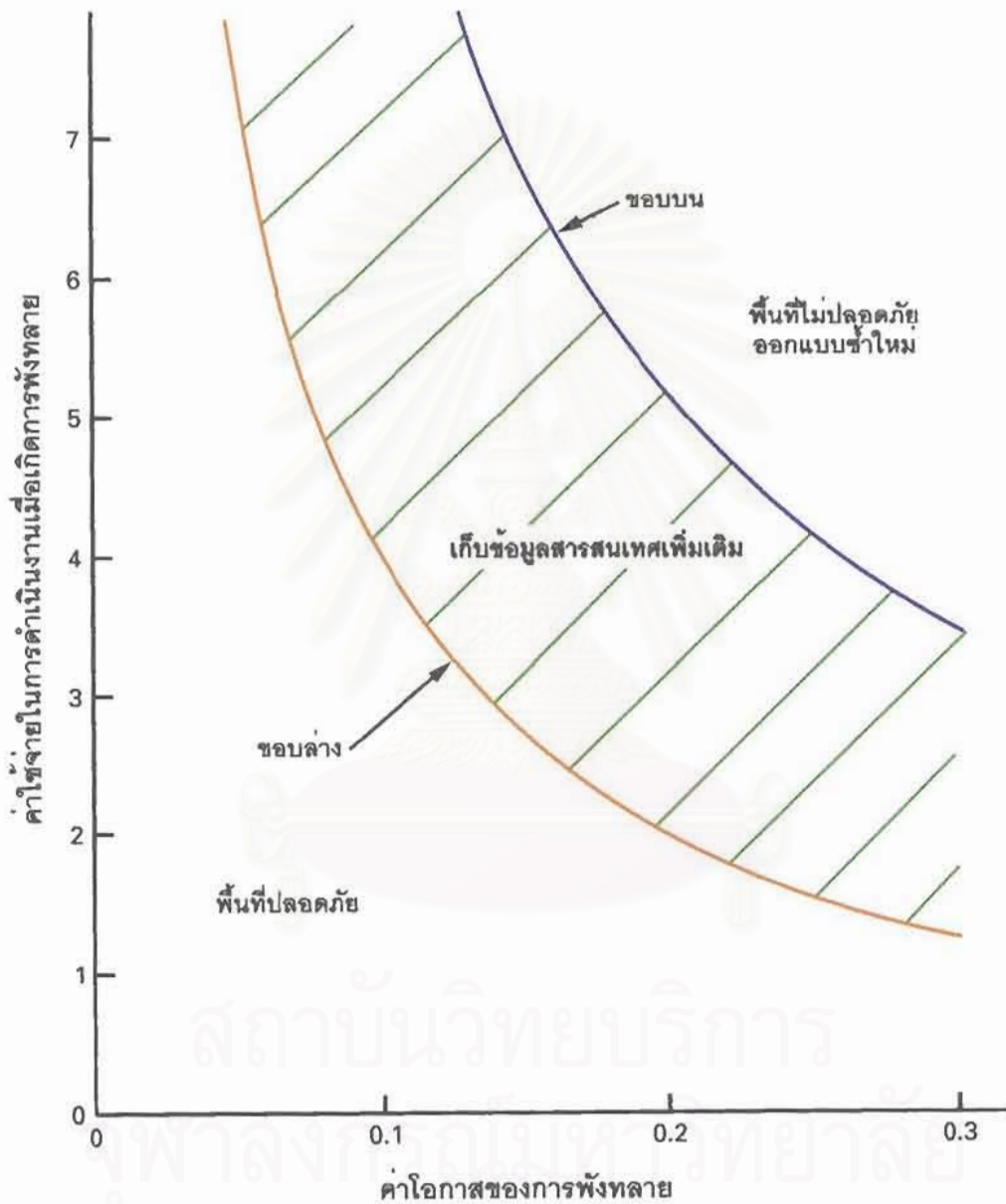
7.5.1 การประเมินความเสี่ยงในรูปแบบเหตุการณ์ที่น่าจะเป็น

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบมักมีผลเชื่อมโยงที่คล้องจองตามมา ดังนั้นในการบรรยายหรือบันทึกผลความต่อเนื่องของเหตุการณ์ อาจใช้หลักการหาความน่าจะเป็นตามทฤษฎีบทของเบส์ (Bayes theorem) เขียนแผนผังเพื่อวิเคราะห์เหตุการณ์รูปแบบคล้ายต้นไม้ (event tree analysis) และใส่ค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นตลอดวิถี (path) ที่เหตุการณ์เกิดขึ้น ข้อคืออีกอย่างหนึ่งก็คือ การวิเคราะห์ตามแผนผังรูปต้นไม้แบบนี้ช่วยให้การออกแบบได้มากเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่อาจปรากฏในแนววิถีใดวิถีหนึ่ง การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลายหน้างานจะเป็นระบบและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

วิธีการที่ดีเพื่อกำหนดค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการสำรวจกับการออกแบบ ควรแสดงเป็นแผนภูมิ (chart) ของการพล็อตค่าผลลัพธ์เป็นกราฟสำเร็จรูป แต่ละค่าผลลัพธ์ได้จากการตรวจสอบในภาคสนามกับที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสูตรเชิงประสบการณ์ จนสามารถกำหนดขอบเขตของพื้นที่บนกราฟ ที่เป็นพื้นที่ปลอดภัย (safe) พื้นที่ไม่ปลอดภัย (unsafe) และพื้นที่ที่อยู่กึ่งกลาง ระบุไม่ได้ชัดเจน จำเป็นต้องมีข้อมูลสารสนเทศเพิ่มขึ้น

ตัวอย่างของการประเมินความเสี่ยงในรูปแบบความน่าจะเป็น ได้แสดงเป็นกราฟแผนภูมิไว้ในรูปที่ 7.13 หน้าถัดไป โดยให้แกนพิกัดที่หนึ่ง (แนวนอน) เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพังทลายของมวลสารที่มีการชุดเจาะ กับให้แกนพิกัดที่สอง (แนวตั้ง) เป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต้องใช้ ถ้ามีเหตุการณ์การพังทลายมวลสารเกิดขึ้น โดยมีการพล็อตค่าไว้ 2 ขอบ (boundary) จำนวนตัวเลขค่าใช้จ่ายที่เป็นขอบบน (เส้นโค้งสีม่วง) เป็นค่าใช้จ่ายในระดับสูงสุดถ้ามีการพังทลายเกิดขึ้น ส่วนจำนวนตัวเลขค่าใช้จ่ายที่เป็นขอบล่าง (เส้นโค้งสีส้ม) เป็นค่าใช้จ่ายในระดับต่ำสุดถ้ามีการพังทลายเกิดขึ้น

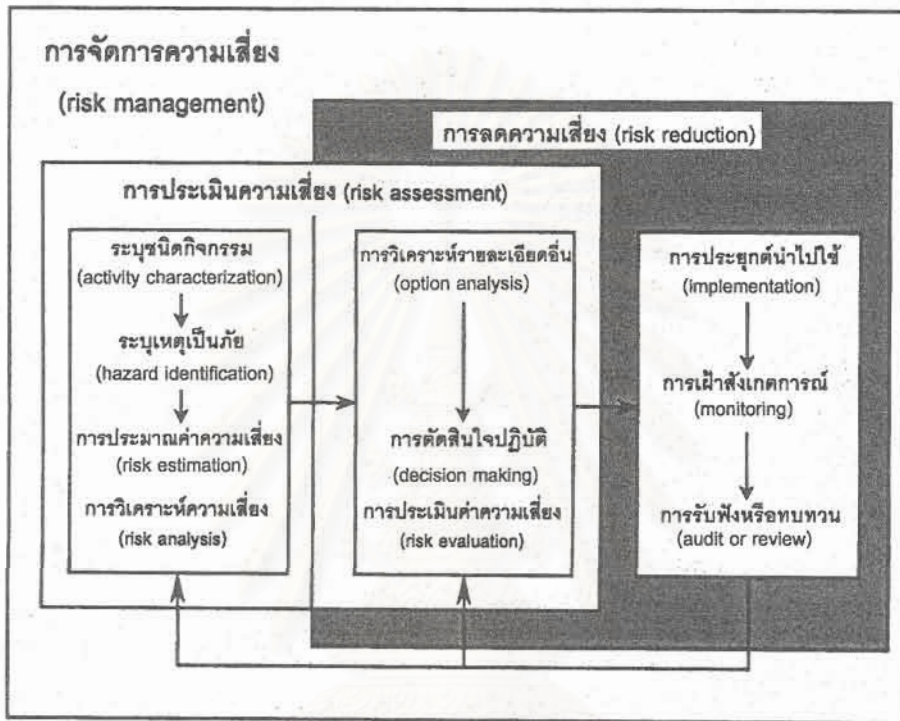
ดังนั้น พื้นที่อยู่เหนือ เส้นโค้งสีม่วงจัดเป็นบริเวณอันตรายที่มีโอกาสของการพังทลายน่าจะเกิดขึ้นในระดับสูงมีชื่อเรียกว่า พื้นที่ไม่ปลอดภัย (unsafe) พื้นที่อยู่ใต้ เส้นโค้งสีส้มจัดเป็นบริเวณปกติที่มีโอกาสของการพังทลายน่าจะเกิดขึ้นในระดับต่ำ เรียกว่า พื้นที่ปลอดภัย (safe) ส่วนพื้นที่ระหว่างขอบ เส้นโค้งทั้งสอง ต้องมีข้อมูลสารสนเทศเพิ่มจึงจะตัดสินใจได้



รูปที่ 7.13 ตัวอย่างกราฟแผนภูมิความเสี่ยง ในการออกแบบงานชุดเจาะเฉพาะอย่าง ที่ใช้ในการตัดสินใจ ระหว่างขอบเขตของความปลอดภัยกับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการพังทลาย โดยหาขอบบนและขอบล่างจากค่าโอกาสความน่าจะเป็น

7.5.2 ผังแผนภูมิการจัดการเชิงความเสี่ยงในระบบ

การจัดการเชิงความเสี่ยง (risk management) เป็นสิ่งที่จำเป็นในการวางแผนปฏิบัติงานจริงภาคสนาม ผังแผนภูมิจากล่าง (รูปที่ 7.14) เป็นแบบแสดงแนวทางทั่วไปของการวางแผนจัดการ ที่แยกระบบการทำงานของแต่ละสาขาแตกต่างกันไป



รูปที่ 7.14 การวางแผนในการจัดการเชิงความเสี่ยงของระบบ

ส่วนแรกของการจัดการความเสี่ยง มีการแยกขั้นตอนที่เกิดจากการกระทำร่วมกันของขั้นตอนการหาความเสี่ยงเชิงวิเคราะห์ (risk analysis) กับการประเมินความเสี่ยง (risk evaluation) หลังจากที่ทราบผลลัพธ์ความเสี่ยงก็ใช้ส่วนหลังของการจัดการความเสี่ยงที่มีขั้นตอนร่วมกันระหว่างการประเมินค่าเชิงปริมาณ (ของส่วนแรก) กับการปฏิบัติงานเพิ่มเติม ซึ่งเป็นขั้นตอนส่วนที่สองการลดความเสี่ยง (risk reduction) ได้แก่การประยุกต์นำไปใช้ (implementation) การเฝ้าสังเกตการณ์ (monitoring) กับการทบทวนและรับฟังความคิดเห็น หรือการทำประชาพิจารณ์

ข้อสรุปสุดท้ายของการประเมินความเสี่ยงก็คือ ในกรณีของผู้ประกอบการต้องการความคุ้มครองในการชุก จะปฏิบัติตามงานก่อสร้าง แต่ไม่อาจจะเลยในเรื่องผลกระทบกับความปลอดภัยในการทำงานภาคสนามไปได้ ต้องมีการหาจุดเหมาะสมพอดีของระบบก่อนมีเริ่มดำเนินงานโดยใช้ข้อมูลสารสนเทศที่เพียงพอ ใช้การวิเคราะห์ผลที่ก้าวหน้าและทันสมัย

บรรณานุกรม

1. สง่า ตั้งชวาล (2538)
 "การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน" รายงานฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยเงินทุนอุดหนุนสิ่งประดิษฐ์ มิถุนายน 2538 กองส่งเสริมและประสานงาน
 วิจัย ฝ่ายวิจัย สำนักงานอธิการบดี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 244 หน้า
2. สง่า ตั้งชวาล และ ฉดับ ปัทมสุต (2539)
 "ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหิน ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน"
รายงานฉบับสมบูรณ์ เงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ธันวาคม 2539 สถาบันวิจัยและพัฒนา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 191 หน้า
3. สง่า ตั้งชวาล (2541)
 "เสถียรภาพของการขุดเจาะ" พฤศจิกายน 2541 จัดพิมพ์โดยสำนักพิมพ์แห่ง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จัดจำหน่ายโดยศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน
 228 หน้า
4. สง่า ตั้งชวาล (2543)
 "การวางแผนทั้งระบบในการเปิดหน้างานขุดเจาะโดยใช้วัตถุระเบิด" รายงาน
ฉบับสมบูรณ์ เงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน กันยายน 2543 สถาบันวิจัยและพัฒนา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 171 หน้า
5. A-Grivas, D. and A. Asoka (1982)
 "Slope Safety Prediction under Static and Seismic Loads,"
Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Paper
 No. 17052, Vol. 108, No. GT5, May 1982, pp. 713-729.
6. A-Grivas, D. and K. Harrop-Williams (1979)
 "Joint Distribution of the Component of Soil Strength,"
 Proceedings, The Third International Conference on the

Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, pp. 189-197.

7. Alonso, E. E. (1973)

"Application of Random Function Theory to Settlement Problems in Soil Engineering," Ph. D. Dissertation, Northwestern University, USA, 333 pp.

8. Alonso, E. E. (1979)

"Risk Analysis of Slopes and Its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays," Geotechnique, London, Vol. 26, No. 3, pp. 453-472.

9. Ang, A. H-S. and W.H. Tang (1975)

"Probability Concepts in engineering Planning and Design: Vol. I - Basic Principles," John Wiley & Sons, New York, 409 pp.

10. Ang, A. H-S. and W.H. Tang (1984)

"Probability Concepts in engineering Planning and Design: Vol. II - Decision, Risk, and Reliability," John Wiley & Sons, New York, 562 pp.

11. Bergado, D.T., P.V. Long, C.H. Lee, K.H. Loke and G. Werner (1994)

"Performance of Reinforced Embankment on Soft Bangkok Clay with High-Strength Geotextile Reinforcement," International Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 13, pp. 403-420.

12. Bieniawski, Z.T. (1984)

"Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling," A.A. Balkema, Rotterdam, 272 pp.

13. Bishop, A.W. (1955)

"The Use of the Slip Circle in the stability Analysis of Slopes," Geotechnique, London, Vol. 5, pp. 7-17.

14. Bray, J.W. and E.T. Brown (1976)

"Technical Note: A Short Solution for the Stability of a Rock Slope Containing a Tetrahedral Wedge," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 13, No. 7, pp. 227-229.

15. Canada Centre for Mineral and Energy Technology (1979)

"Pit Slope Manual: Chapter 5 Design," CANMET Pit Slope Project, Report No. 77-5, Canadian Government Publishing Centre, Quebec, 126 pp.

16. Chae, Y.S. (1967)

"On the Stability of Clay Masses: How safe are the "Factor of Safety" ?, Proceedings the Third Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp. 255-270.

17. Chen, W.F. (1975)

"Limit Analysis and Soil Plasticity," Developments in Geotechnical Engineering: Vol. 7, Elsevier, Amsterdam, 638 pp.

18. Chen, Zu-Yu and N.R. Morgenstern (1983)

"Extensions to the Generalized Method of slices for Stability Analysis," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 1, pp. 104-119.

19. Chowdhury R. N. (1987)

"Practical Aspects of Probabilistic Studies for Slopes," Proceedings of an Extension Course on Soil Slope Instability and Stabilisation, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 299-304.

20. Chowdhury R. N. and D. A-Grivas (1982)

"Probabilistic Model for Progressive Failure of Slopes," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Paper No. 17150, Vol. 108, No. GT6, June 1982, pp. 803-819.

21. Cox, S.J. and N.R.S. Tait (1991)
"Reliability Safety and Risk Management: An Integrated Approach," Butterworth-Heinemann, Ltd., Oxford, 289 pp.
22. Einstein, H. H., G.B. Baecher, D. Vanziano, H.C. Chan, W.S. Dershowitz, E.F. Glynn, J.L. Galzi, N.A. Lannay, K. O' Reilly, W.S. Scull, and P. Yip (1979)
"Reliability Analysis of Rock Slope Stability," Part III of the Project Titled: Risk Analysis for Rock Slopes in Open Pit Mines, U.S. Bureau of Mines: Open File Report, No. 46 (3)-81, 348 pp.
23. Einstein, H. H. and Others (1979)
"Field Exploration to determine Rock Mass Properties," Part IV of the Project Titled: Risk Analysis for Rock Slopes in Open Pit Mines, U.S. Bureau of Mines: Open File Report, No. 46 (4) -81, 170 pp.
24. Einstein, H. H. and G.B. Baecher (1983)
"Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology Specific Methods and Examples, Part I: Exploration, Rock Mechanics and Rock Engineering, New York, Vol. 16, No. 1, February 1983, pp. 39-72.
25. Fellenius, W. (1936)
"Calculation of the Stability of Earth Dams," Transactions of the Second Congress on Large Dams, Vol. 4, pp. 445-465.
26. Fisher, R. (1953)
"Dispersion on a Sphere," Proceedings, Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 127, pp. 295-305.

27. Fredlund, D.G. and J. Krahn (1977)
"Comparison of Slope Stability Methods of Analysis,"
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 3, pp. 429-439.
28. Goodman, R.E. (1995)
"Block Theory and Its Application," Thirty-fifth Rankine
Lecture, Geotechnique, London, Vol. 45, No. 3, pp. 383-423.
29. Haines, Y.Y. (1998)
"Risk Modeling, Assessment, and Management," A
Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York,
726 pp.
30. Haldar, A. and S. Mahadevan (1995)
"First-Order and Second-Order Reliability Methods," In
Chapter 3, Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory
and Industrial Applications, Editor C. Sundararajan, Chapman
& Hall, New York, pp. 27-52.
31. Harr, M.E. (1975)
"Reliability-Based Design in Civil Engineering,"
McGraw-Hill, New York, 290 pp.
32. Hasofer, A.M. and N.C. Lind (1974)
"Exact and invariant Second-Moment Code Format," Journal of
the Engineering Mechanics Division, ASCE, Paper No. 10376,
Vol. 100, No. EM1, February 1974, pp. 111-121.
33. Hoek, E., J.W. Bray and J.M. Boyd (1973)
"The Stability of a Rock Containing a Wedge Resting on Two
Intersecting Discontinuities," Quarterly Journal of Engineering
Geology, London, Vol. 6, No. 1, pp. 1-55.

34. Hoek, E. and J.W. Bray (1981)
"Rock Slope Engineering: Revised Third Edition,"
Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.
35. Hoek, E. and E.T. Brown (1980)
"Underground Excavations in Rock," Institution of Mining
and Metallurgy, London, 527 pp.
36. Hudson, J.A. (1992)
"Rock Engineering Systems: Theory and Practice," Ellis
Horwood Limited, Chichester, 185 pp.
37. Janbu, N. (1954)
"Application of Composite Slip Surfaces for Stability
Analysis," Proceedings, European Conference on Stability of
Earth Slopes, Vol. 3, pp. 43-49.
38. Janbu, N. (1973)
"Slope Stability Computations," In Embankment Dam
Engineering, Edited by R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, John
Wiley & Sons, New York, pp. 47-86.
39. Johnson, R.A. and D.W. Wichern (1992)
"Applied Multivariate Statistical Analysis: Third Edition,"
Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, 642 pp.
40. Lee, I.K., W. White, O.G. Ingles (1983)
"Geotechnical Engineering," Pitman Publishing Inc., Boston,
508 pp.
41. Li, K.S. and P. Lumb (1987)
"Probabilistic Design of Slopes," Canadian Geotechnical
Journal, Vol. 24, No. 4, pp. 520-535.

42. Li K.S. and W. White (1987)

"Reliability Index of slopes," Proceedings, The Fifth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil & Structural Engineering, Vol. 2, pp.755-762.

43. Low, B.K. (1989)

"Stability Analysis of Embankment on Soft Ground," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Paper No. 23189, Vol. 115, No. 2, February 1989, pp. 211-227.

44. Low, B.K. (1996)

"Practical Probabilistic Approach Using Spreadsheet," Proceedings of Uncertainty '96, Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, Vol. 2, pp. 1284-1302.

45. Low, B.K. (1997)

"Reliability Analysis of Rock Wedges," Journal of Geotechnical and Geoenvironment, ASCE, Paper No. 10544, Vol. 123, No. 6, June 1997, pp. 498-505.

46. Low, B.K. and H.H. Einstein (1992)

"Simplified Reliability Analysis for Wedge Mechanisms in Rock Slopes," Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 499-507.

47. Low, B.K. and W.H. Tang (1997 a)

"Efficient Reliability Evaluation Using Spreadsheet," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Paper No. 10929, Vol. 123, No. 7, July 1997, pp. 749-752.

48. Low, B.K. and W.H. Tang (1997 b)

"Reliability Analysis of Reinforced Embankments on Soft Ground," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, No. 5, pp. 672-685.

49. Low, B.K., R.B. Gilbert, S.G. Wright (1998)

"Slope Reliability Analysis Using Generalized Method of Slices," Journal of Geotechnical and Geoenvironment, ASCE, Paper No. 15615, Vol. 124, No. 4, April 1998, pp. 350-362.

50. Mahtab, M.A. and P. Grasso (1992)

"Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock," Developments in Geotechnical Engineering: Vol. 72, Elsevier, Amsterdam, 250 pp.

51. Melchers, R.E. (1987)

"Structural Reliability Assessment and Human Error," Proceedings, The Fifth International Conference on the Application of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Vol. 1, pp. 46-54.

52. Mostyn, G.R. and K.S. Li (1993)

"Probabilistic Slope Analysis-State-of-Play," Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, A.A. Balkema, pp. 89-109.

53. Peck R.B., W.E. Hanson, T.H. Thornburn (1974)

"Foundation Engineering: Second Edition," Wiley International Edition, John Wiley & Sons, New York, 514 pp.

54. Pine, R.J. (1992)

"Risk Analysis Design Applications in Mining Geomechanics," Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, London, Section A: Mining Industry, Vol. 101, September - December 1992, pp. A 149 - A 158.

55. Priest, S.D. (1985)

"Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics," George Allen & Unwin, London, 124 pp.

56. Sarma, S.K. (1973)
"Stability Analysis of Embankments and Slopes,"
Geotechnique, London, Vol. 23, No. 3, pp. 423-433.
57. Shinozuka, M. (1983)
"Basic Analysis of Structural Safety," Journal of
Structural Engineering, ASCE, Paper No. 17815, Vol. 109, No. 3,
March 1983, pp. 721-740.
58. Smith, G.N. (1986)
"Probability and Statistics in Civil Engineering: An
Introduction," Collins Profess. and Tech. Books, London, 244 pp.
59. Shuk, T. (1970)
"Optimization of Slope Designed in Rock," Proceedings,
Second Congress International Society for Rock Mechanics, Vol. 3,
Section 7-2, pp. 275-280.
60. Tangchawal, S. (1999)
"Simulation on Slope and Shallow Foundation Excavations,"
Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand:
Towards the Year 2000, Chulalongkorn University, pp. 318-327.
61. Watson, G.S. (1966)
"The Statistics of Orientation Data," The Journal of
Geology, The University of Chicago Press, Vol. 74, pp. 786-797.
62. Yucemen, M.S. (1973)
"A Probabilistic Study of Safety and Design of Earth
Slopes," Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-
Champaign, USA, 205 pp.
63. Zou, J-Z., D. J. Williams and W.-L. Xiong (1995)
"Search for Critical Slip Surfaces based on Finite Element
Method," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, pp. 233-246.

63. Whittlestone, A.P., J.D. Johnson, M.E. Rogers and R.J. Pine (1995)

"Probabilistic Risk Analysis of Slope Stability," Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, London, Section A: Mining Industry, Vol. 104, January - April 1995, pp. A 19 - A 24.

64. Yucemen, M.S. (1973)

"A Probabilistic Study of Safety and Design of Earth Slopes," Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 205 pp.

65. Zou, J-Z., D. J. Williams and W.-L. Xiong (1995)

"Search for Critical Slip Surfaces based on Finite Element Method," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, pp. 233-246.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. ตารางสถิติค่าเบี่ยงเบนปกติ

สมมติฐานตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง นิยมให้มีการแจกแจงค่าแบบปกติ โดยมีชื่อเรียกทั่วไปว่า "normal distribution" หรือ "Gaussian distribution" ฟังก์ชันความหนาแน่น เขียนเป็น

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (ก-1)$$

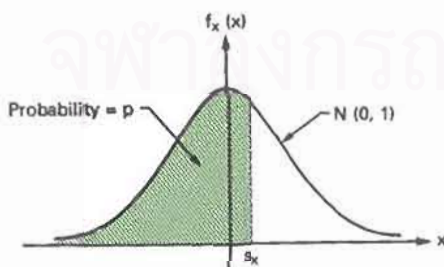
พจน์ μ และ σ หมายถึงค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามลำดับ แต่เพื่อความสะดวก จะเขียนสัญกรณ์สำหรับการแจกแจงเป็น $N(\mu, \sigma)$

ตามทฤษฎีความน่าจะเป็น ค่าแจกแจงปกติที่มี $\mu = 0$ และ $\sigma = 1$ หรือเขียนเป็นสัญกรณ์พจน์ $N(0, 1)$ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า standard normal deviation เขียนเป็นรูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่น

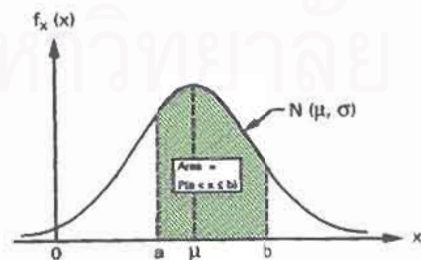
$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)x^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (ก-2)$$

แต่ในตำราทางสถิติทั่วไป จะมีรูปกราฟประกอบและใช้เครื่องหมาย $\Phi(x)$ เป็นการแทนเครื่องหมายการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน จากรูป A.1 ก. ข้างล่าง กำหนดให้ได้

$$\Phi(x) = f_x(x) \quad \text{Where } X \text{ has } N(0,1) \quad (ก-3)$$



ก. PDF เมื่อ $N(0, 1)$



ข. PDF เมื่อ $N(\mu, \sigma)$

รูปที่ A.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน

ดังนั้นจากรูปที่ A.1 หน้า 202 จะได้ความสัมพันธ์ฟังก์ชันการแจกแจงเป็น

$$\Phi(s_x) = p \quad (\text{ก-4})$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน ในเชิงสถิติจะเขียนในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม เป็น

$$s_x = \Phi^{-1}(p) \quad (\text{ก-5})$$

ฟังก์ชันการแจกแจงของ $\Phi(x)$ จะระบุไว้ในตารางที่ A.1 มีความยาว 3 หน้า ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในตารางจะใช้ได้เฉพาะกรณีที่เป็ค่าบวก ทั้งนี้เพราะว่า ความน่าจะเป็นของการแจกแจงฟังก์ชัน (probability of distribution function: PDF) ที่มีสมมาตรรอบค่าที่ศูนย์ ถ้าหากจะเขียนการแจกแจงสำหรับค่าลบ ได้แก่

$$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x) \quad (\text{ก-6})$$

ในรูปแบบเดียวกัน ถ้าหากจะหาค่า x มีความน่าจะเป็น (p) น้อยกว่า 0.5 [$p < 0.5$] ก็คือ

$$x = \Phi^{-1}(p) = -\Phi^{-1}(1 - p) \quad (\text{ก-7})$$

ตามตาราง ก-1 ที่ระบุค่า $\Phi(x)$ ความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มใด ๆ เช่น กรณีตัวแปร X มีการแจกแจงเป็น $N(\mu, \sigma)$ ตามรูป A.1 ข. ฟังก์ชันความหนาแน่นคือ

$$P(a < X \leq b) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (\text{ก-8})$$

จากสมการข้างบนนั้น ถ้าให้

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad \text{and} \quad dx = \sigma dz \quad (\text{ก-9})$$

มีผลทำให้ได้

$$P(a < X \leq b) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{(a-\mu)/\sigma}^{(b-\mu)/\sigma} e^{-(1/2)z^2} dz \quad (\text{ก-10})$$

$$P(a < X \leq b) = \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right) \quad (\text{ก-11})$$

ตาราง A.1 (ก.) ค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มแบบมาตรฐาน

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0.00	0.500000	0.50	0.691462	1.00	0.841345
0.01	0.503989	0.51	0.694974	1.01	0.843752
0.02	0.507978	0.52	0.698468	1.02	0.846138
0.03	0.511967	0.53	0.701944	1.03	0.848495
0.04	0.515953	0.54	0.705402	1.04	0.850830
0.05	0.519939	0.55	0.708840	1.05	0.853141
0.06	0.523922	0.56	0.712260	1.06	0.855428
0.07	0.527903	0.57	0.715661	1.07	0.857690
0.08	0.531881	0.58	0.719043	1.08	0.859929
0.09	0.535856	0.59	0.722405	1.09	0.862143
0.10	0.539828	0.60	0.725747	1.10	0.864334
0.11	0.543795	0.61	0.729069	1.11	0.866500
0.12	0.547758	0.62	0.732371	1.12	0.868643
0.13	0.551717	0.63	0.735653	1.13	0.870762
0.14	0.555670	0.64	0.738914	1.14	0.872857
0.15	0.559618	0.65	0.742154	1.15	0.874928
0.16	0.563559	0.66	0.745373	1.16	0.876978
0.17	0.567495	0.67	0.748571	1.17	0.878999
0.18	0.571424	0.68	0.751748	1.18	0.881000
0.19	0.575345	0.69	0.754903	1.19	0.882977
0.20	0.579260	0.70	0.758037	1.20	0.884930
0.21	0.583166	0.71	0.761148	1.21	0.886860
0.22	0.587064	0.72	0.764238	1.22	0.888767
0.23	0.590954	0.73	0.767305	1.23	0.890651
0.24	0.594835	0.74	0.770350	1.24	0.892512
0.25	0.598706	0.75	0.773373	1.25	0.894350
0.26	0.602568	0.76	0.776373	1.26	0.896165
0.27	0.606420	0.77	0.779350	1.27	0.897958
0.28	0.610261	0.78	0.782305	1.28	0.899727
0.29	0.614092	0.79	0.785236	1.29	0.901475
0.30	0.617911	0.80	0.788145	1.30	0.903199
0.31	0.621719	0.81	0.791030	1.31	0.904902
0.32	0.625516	0.82	0.793892	1.32	0.906582
0.33	0.629300	0.83	0.796731	1.33	0.908241
0.34	0.633072	0.84	0.799546	1.34	0.909877
0.35	0.636831	0.85	0.802338	1.35	0.911492
0.36	0.640576	0.86	0.805106	1.36	0.913085
0.37	0.644309	0.87	0.807850	1.37	0.914656
0.38	0.648027	0.88	0.810570	1.38	0.916207
0.39	0.651732	0.89	0.813267	1.39	0.917736
0.40	0.655422	0.90	0.815940	1.40	0.919243
0.41	0.659097	0.91	0.818589	1.41	0.920730
0.42	0.662757	0.92	0.821214	1.42	0.922196
0.43	0.666402	0.93	0.823814	1.43	0.923641
0.44	0.670031	0.94	0.826391	1.44	0.925066
0.45	0.673645	0.95	0.828944	1.45	0.926471
0.46	0.677242	0.96	0.831472	1.46	0.927855
0.47	0.680822	0.97	0.833977	1.47	0.929219
0.48	0.684386	0.98	0.836457	1.48	0.930563
0.49	0.687933	0.99	0.838913	1.49	0.931888

ตาราง A.1 (ข.) ค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มแบบมาตรฐาน

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1.50	0.933193	2.00	0.977250	2.50	0.993790
1.51	0.934478	2.01	0.977784	2.51	0.993963
1.52	0.935744	2.02	0.978308	2.52	0.994132
1.53	0.936992	2.03	0.978822	2.53	0.994297
1.54	0.938220	2.04	0.979325	2.54	0.994457
1.55	0.939429	2.05	0.979818	2.55	0.994614
1.56	0.940620	2.06	0.980301	2.56	0.994766
1.57	0.941792	2.07	0.980774	2.57	0.994915
1.58	0.942947	2.08	0.981237	2.58	0.995060
1.59	0.944083	2.09	0.981691	2.59	0.995201
1.60	0.945201	2.10	0.982136	2.60	0.995339
1.61	0.946301	2.11	0.982571	2.61	0.995473
1.62	0.947384	2.12	0.982997	2.62	0.995603
1.63	0.948449	2.13	0.983414	2.63	0.995731
1.64	0.949497	2.14	0.983823	2.64	0.995855
1.65	0.950529	2.15	0.984222	2.65	0.995975
1.66	0.951543	2.16	0.984614	2.66	0.996093
1.67	0.952540	2.17	0.984997	2.67	0.996207
1.68	0.953521	2.18	0.985371	2.68	0.996319
1.69	0.954486	2.19	0.985738	2.69	0.996427
1.70	0.955435	2.20	0.986097	2.70	0.996533
1.71	0.956367	2.21	0.986447	2.71	0.996636
1.72	0.957284	2.22	0.986791	2.72	0.996736
1.73	0.958185	2.23	0.987126	2.73	0.996833
1.74	0.959071	2.24	0.987455	2.74	0.996928
1.75	0.959941	2.25	0.987776	2.75	0.997020
1.76	0.960796	2.26	0.988089	2.76	0.997110
1.77	0.961636	2.27	0.988396	2.77	0.997197
1.78	0.962462	2.28	0.988696	2.78	0.997282
1.79	0.963273	2.29	0.988989	2.79	0.997365
1.80	0.964070	2.30	0.989276	2.80	0.997445
1.81	0.964852	2.31	0.989556	2.81	0.997523
1.82	0.965621	2.32	0.989830	2.82	0.997599
1.83	0.966375	2.33	0.990097	2.83	0.997673
1.84	0.967116	2.34	0.990358	2.84	0.997744
1.85	0.967843	2.35	0.990613	2.85	0.997814
1.86	0.968557	2.36	0.990863	2.86	0.997882
1.87	0.969258	2.37	0.991108	2.87	0.997948
1.88	0.969946	2.38	0.991344	2.88	0.998012
1.89	0.970621	2.39	0.991575	2.89	0.998074
1.90	0.971284	2.40	0.991802	2.90	0.998134
1.91	0.971933	2.41	0.992024	2.91	0.998193
1.92	0.972571	2.42	0.992240	2.92	0.998250
1.93	0.973197	2.43	0.992451	2.93	0.998305
1.94	0.973810	2.44	0.992656	2.94	0.998359
1.95	0.974412	2.45	0.992857	2.95	0.998411
1.96	0.975002	2.46	0.993053	2.96	0.998462
1.97	0.975581	2.47	0.993244	2.97	0.998511
1.98	0.976148	2.48	0.993431	2.98	0.998559
1.99	0.976705	2.49	0.993613	2.99	0.998605

ตาราง A.1 (ค.) ค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มแบบมาตรฐาน

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$1 - \Phi(x)$
3.00	0.998650	3.50	0.999767	4.00	3.168603E-05
3.01	0.998694	3.51	0.999776	4.05	2.562172E-05
3.02	0.998736	3.52	0.999784	4.10	2.068872E-05
3.03	0.998777	3.53	0.999792	4.15	1.653346E-05
3.04	0.998817	3.54	0.999800	4.20	1.335410E-05
3.05	0.998856	3.55	0.999807	4.25	1.069569E-05
3.06	0.998893	3.56	0.999815	4.30	8.546021E-06
3.07	0.998930	3.57	0.999821	4.35	6.812080E-06
3.08	0.998965	3.58	0.999828	4.40	5.416953E-06
3.09	0.998999	3.59	0.999835	4.45	4.297236E-06
3.10	0.999032	3.60	0.999841	4.50	3.400803E-06
3.11	0.999064	3.61	0.999847	4.55	2.684918E-06
3.12	0.999096	3.62	0.999853	4.60	2.114643E-06
3.13	0.999126	3.63	0.999858	4.65	1.661495E-06
3.14	0.999155	3.64	0.999864	4.70	1.302316E-06
3.15	0.999184	3.65	0.999869	4.75	1.018328E-06
3.16	0.999211	3.66	0.999874	4.80	7.943527E-07
3.17	0.999238	3.67	0.999879	4.85	6.181473E-07
3.18	0.999264	3.68	0.999883	4.90	4.798695E-07
3.19	0.999289	3.69	0.999888	4.95	3.716262E-07
3.20	0.999313	3.70	0.999892	5.00	2.871050E-07
3.21	0.999336	3.71	0.999896	5.10	1.701223E-07
3.22	0.999359	3.72	0.999900	5.20	9.963440E-08
3.23	0.999381	3.73	0.999904	5.30	5.802207E-08
3.24	0.999402	3.74	0.999908	5.40	3.339612E-08
3.25	0.999423	3.75	0.999912	5.50	1.903640E-08
3.26	0.999443	3.76	0.999915	5.60	1.074622E-08
3.27	0.999462	3.77	0.999918	5.70	6.007653E-09
3.28	0.999481	3.78	0.999922	5.80	3.326052E-09
3.29	0.999499	3.79	0.999925	5.90	1.823579E-09
3.30	0.999517	3.80	0.999928	6.00	9.901219E-10
3.31	0.999533	3.81	0.999930	6.10	5.323753E-10
3.32	0.999550	3.82	0.999933	6.20	2.834714E-10
3.33	0.999566	3.83	0.999936	6.30	1.494721E-10
3.34	0.999581	3.84	0.999938	6.40	7.80490E-11
3.35	0.999596	3.85	0.999941	6.50	4.03579E-11
3.36	0.999610	3.86	0.999943	6.60	2.06652E-11
3.37	0.999624	3.87	0.999946	6.70	1.04786E-11
3.38	0.999638	3.88	0.999948	6.80	5.26157E-12
3.39	0.999650	3.89	0.999950	6.90	2.61613E-12
3.40	0.999663	3.90	0.999952	7.00	1.28808E-12
3.41	0.999675	3.91	0.999954	7.10	6.28053E-13
3.42	0.999687	3.92	0.999956	7.20	3.03202E-13
3.43	0.999698	3.93	0.999958	7.30	1.44995E-13
3.44	0.999709	3.94	0.999959	7.40	6.86118E-14
3.45	0.999720	3.95	0.999961	7.50	3.21965E-14
3.46	0.999730	3.96	0.999963	7.60	1.49880E-14
3.47	0.999740	3.97	0.999964	7.70	6.88338E-15
3.48	0.999749	3.98	0.999966	7.80	3.10862E-15
3.49	0.999758	3.99	0.999967	7.90	1.50000E-15

ภาคผนวก ข.
ตารางการแปลงหน่วย



ตาราง A.2 หน่วยที่แปลงจากระบบ S.I. เป็น Imperial หรือกลับกัน

	S.I.	Equal to Imperial	Imperial	Equal to S.I.
Length	1 km.	0.6214 mile	1 mile	1.609 km.
	1 m.	3.2808 ft.	1 ft.	0.3048 m.
	1 mm.	0.0394 in.	1 in.	25.4 mm.
Area	1 km ² .	0.3861 mile ²	1 mile ²	2.59 km ²
	1 m ² .	0.0002 acre	1 acre	4046.9 m ²
	1 m ² .	10.7639 ft ²	1 ft ² .	0.0929 m ²
	1 mm ² .	15.50 in ² .	1 in ² .	645.16 mm ²
Volume	1 m ³ .	1.3079 yd ³	1 yd ³ .	0.7646 m ³
	1 m ³ .	35.3147 ft ³ .	1 ft ³ .	0.0283 m ³
	1 mm ³ .	2.2×10^{-7} Imperial gallon	1 Imperial gallon	4.546×10^6 mm ³
	1 mm ³ .	2.6×10^{-7} U.S. gallon	1 U.S. gallon	3.785×10^6 mm ³
	1 mm ³ .	6.10×10^{-5} in ³ .	1 in ³ .	1.639×10^9 mm ³
Mass	1 ton.(metric)	0.9842 ton. (long)	1 ton. (long)	1.016 ton.(metric)
	1 kg.	2.2046 lb.	1 lb.	0.4536 kg.
	1 gm.	0.0353 oz.	1 oz.	28.349 gm.
Density	1 kg/m ³ .	0.0624 lb/ft ³ .	1 lb/ft ³ .	16.018 kg/m ³ .
Unit Weight	1 kN/m ³ .	6.3654 lb f/ft ³ .	1 lb f/ft ³ .	0.1571 kN/m ³ .
Force	1 kN.	0.1004 ton f. (long)	1 ton f. (long)	9.964 kN.
	1 N.	0.2248 lb f.	1 lb f.	4.448 N.
Pressure or Stress	1 Mpa.	0.0648 ton f/in ² .	1 ton f/in ² .	15.44 MPa.
	1 kPa.	0.0093 ton f/ft ² .	1 ton f/ft ² .	107.3 kPa.
	1 kPa.	0.1450 lb f/in ² .	1 lb f/in ² .	6.895 kPa.
	1 kPa.	20.8854 lb f/ft ² .	1 lb f/ft ² .	0.04788 kPa.
	1 kPa.	0.0102 standard atmosphere	1 standard atmosphere	98.07 kPa.
	1 bar (0.987 atm.)	14.5038 lb f/in ² .	1 lb f/in ² .	0.06895 bar
	1 kPa.	0.3346 ft. water	1 ft. water	2.989 kPa.
1 kPa.	0.2953 in. mercury	1 in. mercury	3.386 kPa.	
Moment	1 Nm.	0.7376 lbf ft.	1 lbf ft.	1.3558 Nm.
Energy	1 J.	0.7376 ft lbf.	1 ft lbf.	1.3558 J.
Frequency	1 Hz.	1 cycle/sec.	1 cycle/sec.	1 Hz.