



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลวิจัย

เรื่อง

แบบจำลองเชิงความเสี่ยงของ

เสถียรภาพการเปิดหน้างานชุดเจาะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

สง่า ตั้งชวาล

เมษายน ๒๕๕๓

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะกรรมการวิจัยเงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในโครงการวิจัย ที่กรุณาให้ข้อสังเกตและคำแนะนำที่ดีเป็นประโยชน์ต่อโครงการ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำมาปรับปรุงแก้ไขรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ให้ดียิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างจริงใจต่อเจ้าหน้าที่และวิศวกรในหลายองค์กรที่ให้ข้อมูลและช่วยให้คำปรึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบคุณต่อนายช่างศุภิกา จิรติภัส (วศ.บ. วิศวกรรมทรัพยากรธรณี จุฬาฯ) ฝ่ายวิศวกรรมและเทคนิค สำนักงานใหญ่ บริษัท SCG จำกัด และต่อความอนุเคราะห์ของนายช่างเอกชัย งามพิทักษ์จิตต์ (วศ.บ. วิศวกรรมทรัพยากรธรณี จุฬาฯ) วิศวกรประจำหน้าเหมือง สำนักงานแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ในเรื่องข้อมูลเพิ่มเติมกับภาพถ่าย และยังขอขอบคุณต่อ คุณสุรชัย ลิพหาเกียรติ (วศ.บ. วิศวกรรมโยธา จุฬาฯ) ผู้ช่วยวิจัยที่เป็นผู้เขียนโปรแกรมย่อย กับช่วยวาดรูปประกอบรายงาน

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และช่วยเหลืองานวิจัยเสร็จสิ้นได้แก่ คุณรัชณีพรรณ สลิลและสริตา ตั้งชवाल

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สง่า ตั้งชवाल
เมษายน 2553

ชื่อโครงการ แบบจำลองเชิงความถี่ของเสถียรภาพ

การเปิดหน้างานขุดเจาะ

ชื่อผู้วิจัย ศาสตราจารย์ ดร.สง่า ตั้งชวาล

เดือนและปีที่ทำวิจัยสำเร็จ เมษายน 2553

บทคัดย่อ

การวางแผนและการเปิดหน้างานขุดเจาะมวลดินหรือมวลหินโดยใช้เครื่องจักรกลหรือวัตถุระเบิด ปกติการประเมินผลโครงสร้างมวลสารใช้วิธีเชิงกำหนด เพื่อหาค่าความถี่เสถียรภาพของโครงสร้าง โดยใช้ตัวเลขดัชนีที่มีชื่อว่า “ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)” แต่มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้หลายกรณี เช่น การนำค่าคุณสมบัติเพียงค่าเดียวใช้ในการคำนวณ หรือการแปรผันเนื่องจากสถานะทางธรณีวิทยา ทำให้ค่า F.S. ที่คำนวณได้ไม่เคยถูกต้องแม่นยำ แนวทางใหม่เกี่ยวกับการตรวจสอบเสถียรภาพ ใช้ค่าดัชนีที่เรียกว่า “ค่าความเชื่อถือได้ (R) และค่าโอกาสการพังทลาย [p (f)]” มีความเหมาะสมกับสถานการณ์ของความไม่แน่นอนที่ดีกว่า ดังนั้นในการประเมินผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพจึงใช้วิธีเชิงกำหนดกับวิธีเชิงความเชื่อถือได้ควบคู่กันไป ข้อมูลภาคสนามสำหรับแนวทางของการหาค่าความเชื่อถือได้ มีการนำเสนอแบบจำลองเชิงความเชื่อถือได้ 3 รูปแบบ ชนิดของรูปแบบการจำลองอิงกับค่าขอบความปลอดภัย อิงกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด และอิงกับการใช้การจำลองข้อมูล ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเป็นไปได้ที่คำนวณจากแต่ละแบบจำลองมีการเปรียบเทียบกับวิธีเชิงกำหนด ความเสี่ยงในเรื่องการพังทลายมวลสารและผลกระทบเชิงสิ่งแวดล้อมมีการระบุค่าที่ชัดเจนกว่าเดิม และยังช่วยประเมินค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุดของงานก่อสร้างอีกด้วย

คำหลัก: การขุดเจาะพื้นผิวมวลสาร วิธีเชิงกำหนดและวิธีความเชื่อถือได้ การแจกแจงค่าข้อมูลสุ่ม ความเสี่ยงจากการพังทลาย แบบจำลองเชิงความเชื่อถือได้

Project Title Risk Models on the
Stability of Excavation Works

Name of Researcher Professor Dr. Sanga Tangchawal

Month and Year of Project Completion April 2010

ABSTRACT

Construction planning and excavation of soil or rock mass can be done by using the machinery or explosives. Assessment of these ground mass structures is normally done by the deterministic method. A quantitative indication of structure stability provides as an index term known “the factor of safety (F.S.)”. There are uncertain to some degree, such as only a single value of mass properties is used or variation in geologic conditions, computed values of F.S. are never absolutely precise. An alternative measurement of stability regarding use of index terms “reliability (R) and probability of failure [p (f)]” is to cope with the uncertainty better. Concurrent processes of stability assessment are done using both the deterministic and reliability methods. Field data on the reliability approach assumed to be either normal function or lognormal function distribution. Three types of reliability model are proposed. Modelling types are based on the safety margin, the most likely value of F.S., and data simulation, respectively. The probabilistic values obtained from each model, are compared with the deterministic method. The risk on mass failures and environmental impacts due to excavation, be better defined, and also achieved the optimized cost of construction excavation.

Key Words: ground mass excavation, deterministic and reliability methods, random data distribution, risk of failures, reliability models.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| ปกใน | i |
| คำนำ | iii |
| สารบัญ | iv |
| รายการรูป | x |
| รายการตาราง | xiv |
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. แนวทางหาค่าดัชนีความปลอดภัย | 5 |
| 2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด | 5 |
| 2.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรง | 6 |
| 2.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโมเมนต์ | 8 |
| 2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพลังงาน | 8 |
| 2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความเชื่อถือได้ | 10 |
| 2.2.1 ค่า Factor of Safety กับค่า Reliability | 11 |
| 2.2.2 ค่า Reliability กับค่า Probability of Failure | 12 |
| 2.3 แนวทางการใช้ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพมวลสาร | 13 |
| 2.3.1 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงกำหนด | 13 |
| 2.3.2 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงความเสี่ยง | 15 |
| 3. การวิเคราะห์ความเสี่ยงที่ใช้ในแบบจำลอง | 20 |
| 3.1 หลักการทั่วไปในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงสถิติ | 20 |
| 3.1.1 สมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ | 20 |
| 3.1.2 ค่าเฉลี่ยกับค่าการคาดหมาย | 20 |
| 3.1.3 ค่าความแปรปรวน | 22 |

| | หน้า |
|---|------|
| 3.1.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 23 |
| 3.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน | 23 |
| 3.1.6 ค่าความเบ้หรือสภาพไขว้ข้าม | 24 |
| 3.1.7 ค่าเคอร์โทซิสหรือภาวะยอดมน | 25 |
| 3.2 แนวทางในการจำลองข้อมูล | 26 |
| 3.2.1 รูปแบบที่ใช้ในการแจกแจงฟังก์ชันของสมบัติมวลสาร | 26 |
| 3.2.2 รูปแบบอื่นที่ใช้ในการแจกแจงฟังก์ชันของสมบัติมวลสาร | 27 |
| 3.3 แนวทางการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์การแปรผัน | 27 |
| 3.3.1 แนวทางแรก | 28 |
| 3.3.2 แนวทางที่สอง | 28 |
| 3.3.3 แนวทางที่สาม | 29 |
| 3.3.4 แนวทางที่สี่ | 29 |
| 3.4 วิธีประมาณค่าเป็นจุด | 31 |
| 3.4.1 วิธี PEM สำหรับฟังก์ชันต่อเนื่อง | 31 |
| 3.4.2 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องตัวแปรเดียว | 33 |
| 3.4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรเดียว | 34 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.1 | 36 |
| 3.4.4 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องสองตัวแปร | 37 |
| 3.4.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรสองค่า | 38 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.2 | 38 |
| 3.4.6 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องสามตัวแปร | 41 |
| 3.4.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรสามค่า | 42 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.3 | 43 |
| 3.5 วิธีประยุกต์อนุกรมเทย์เลอร์ | 45 |
| 3.5.1 อนุกรมเทย์เลอร์พื้นฐาน | 45 |
| 3.5.2 การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวแปรโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ | 46 |
| ก. ค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 46 |
| ข. ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด | 47 |
| ค. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน | 48 |
| ที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด | |

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.5.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมเทอร์สำหรับหลายตัวแปร | 49 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.4 | 49 |
| ข้อสรุปผลลัพธ์การวิเคราะห์ | 59 |
| 3.6 แนวทางการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้และค่าโอกาสการพังทลาย | 59 |
| 3.6.1 แนวทางแรก | 60 |
| 3.6.2 ตัวอย่างการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นของแนวทางแรก | 69 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.5 สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ | 70 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.6 สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ | 72 |
| 3.6.3 แนวทางที่สอง | 75 |
| 3.6.4 ตัวอย่างการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นของแนวทางที่สอง | 80 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 3.7 | 80 |
| ก. กรณีตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ | 82 |
| ข. กรณีตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ | 85 |
| 4. การสร้างแบบจำลองเชิงความเสี่ยง | 87 |
| 4.1 แบบจำลองของโครงการวิจัย | 87 |
| 4.2 แบบจำลองเชิงความเสี่ยงที่หาจากค่าขอบความปลอดภัย | 88 |
| ชั้นตอนที่ 1 | 88 |
| ชั้นตอนที่ 2 | 88 |
| ชั้นตอนที่ 3 | 92 |
| ชั้นตอนที่ 4 | 94 |
| ชั้นตอนที่ 5 | 95 |
| ชั้นตอนที่ 6 | 95 |
| 4.3 แบบจำลองเชิงความเสี่ยงที่หาจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย | 95 |
| ชั้นตอนที่ 1 | 97 |
| ชั้นตอนที่ 2 | 97 |
| ชั้นตอนที่ 3 | 97 |
| ชั้นตอนที่ 4 | 97 |
| ชั้นตอนที่ 5 | 97 |
| ชั้นตอนที่ 6 | 97 |

| | หน้า |
|--|------------|
| ชั้นตอนที่ 7 | 98 |
| ชั้นตอนที่ 8 | 98 |
| ชั้นตอนที่ 9 | 99 |
| ชั้นตอนที่ 10 | 100 |
| 4.4 แบบจำลองเชิงความเสี่ยงที่ใช้การจำลองข้อมูลของ Monte Carlo | 100 |
| 4.4.1 การแจกแจงฟังก์ชันในระบบ | 100 |
| 4.4.2 ค่าดัชนีความเสี่ยงในระบบ | 100 |
| 4.4.3 แผนภูมิหรือขั้นตอนของแบบจำลองความเสี่ยง ที่ใช้การจำลองวิธี Monte Carlo | 101 |
| ชั้นตอนที่ 1 | 101 |
| ชั้นตอนที่ 2 | 103 |
| ชั้นตอนที่ 3 | 103 |
| ชั้นตอนที่ 4 | 103 |
| ชั้นตอนที่ 5 | 103 |
| 5. การประเมินความเสี่ยงของการพังทลาย | 104 |
| จากการตัดความลาดและรูปแบบอื่น | |
| 5.1 การพังทลายของความลาดแบบระนาบยาวไม่จำกัด | 104 |
| 5.1.1 รูปแบบการลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ | 104 |
| 5.1.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์เสถียรภาพความลาดยาวไม่จำกัด โจทย์ตัวอย่างที่ 5.1 | 107 |
| 5.1.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายของความลาดยาวไม่จำกัด | 109 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 109 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย) | 109 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 110 |
| 5.2 การพังทลายของความลาดทั่วไปที่เป็นแบบระนาบ | 110 |
| 5.2.1 รูปแบบการลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ | 110 |
| 5.2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์เสถียรภาพความลาดทั่วไป โจทย์ตัวอย่างที่ 5.2 | 120 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 5.3 | 122 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายของความลาดที่ชั้นตะพักมีความเอียง | 123 |
| ก. กรณีที่รอยร้าวจากแรงดึงเกิดในหน้าความลาด | 123 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 124 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย) | 124 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 124 |
| ข. กรณีที่รอยร้าวจากแรงดึงเกิดในชั้นตะพักด้านบน | 125 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 125 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย) | 126 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 126 |
| 5.3 การพังทลายของความลาดแบบวงกลม | 126 |
| 5.3.1 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ที่ไม่มีค่าการยึดเกาะกัน | 127 |
| 5.3.2 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ที่ไม่มีค่าความเสียดทาน | 127 |
| 5.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์การพังทลายแบบวงกลม | 129 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 5.4 | 129 |
| 5.3.4 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาด | 132 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 132 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย) | 133 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 133 |
| 5.3.5 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์โดยวิธีการแบ่งส่วน | 134 |
| 5.3.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์การพังทลายด้วยวิธีแบ่งส่วน | 136 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 5.5 | 136 |
| 5.3.7 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาดด้วยวิธีแบ่งส่วน | 140 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 140 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย) | 141 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 141 |
| 5.3.8 การวิเคราะห์การแบ่งส่วนตามแนวคิดของ Bishop | 141 |
| 5.3.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์การพังทลายด้วยวิธี Bishop | 143 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 5.6 | 143 |
| 5.3.10 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาดด้วยวิธี Bishop | 145 |

| | หน้า |
|---|------------|
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 145 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย) | 145 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 146 |
| 5.4 การเสริมเสถียรภาพของมวลความลาด | 146 |
| 5.4.1 การเสริมเสถียรภาพด้วยโบลท์ | 147 |
| 5.4.2 การใช้โบลท์ในงานการตัดความลาด | 148 |
| โจทย์ตัวอย่างที่ 5.7 | 150 |
| 5.4.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายเพื่อการตัดสินใจเสริมเสถียรภาพ | 152 |
| 1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย) | 152 |
| 2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย) | 152 |
| 3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล) | 153 |
| 6. ผลสรุปในการประเมินค่าความเสี่ยง | 154 |
| 6.1 การประเมินความเสี่ยงจากการตัดความลาดมวลหิน | 154 |
| 6.1.1 ข้อมูลเฉพาะที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่างแรก | 154 |
| 6.2 การประเมินความเสี่ยงจากการตัดความลาดมวลดินเหนียวอ่อน | 158 |
| 6.2.1 ข้อมูลเฉพาะที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่างที่สอง | 158 |
| 6.3 ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการประเมินความเสี่ยง | 162 |
| 6.3.1 ตัวประกอบสำคัญที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอนในการประเมิน | 162 |
| 6.3.2 ปัญหาในการวิเคราะห์ผล โครงสร้างมวลหิน | 162 |
| 6.3.3 ปัญหาในการวิเคราะห์ผล โครงสร้างมวลดิน | 163 |
| 6.3.4 ปัญหาในการวิเคราะห์ผล โครงสร้างมวลดินสลับกับมวลหิน | 164 |
| 6.3.5 ปัญหาในการเลือกแบบจำลองในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ | 164 |
| เอกสารอ้างอิง – รายงานฉบับสมบูรณ์ | 166 |

รายการรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 | 2 |
| ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ในรูปแสดงกราฟ density (distribution) function | |
| รูปที่ 1.2 | 3 |
| ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ในรูปแสดงกราฟ cumulative distribution function | |
| รูปที่ 2.1 | 7 |
| การพังทลายของมวลสาร (ABC) ตามแนวระนาบเชิงเส้น (AB) | |
| รูปที่ 2.2 | 7 |
| การพังทลายของมวลสาร (ABCD) ตามแนวระนาบเชิงเส้นอาร์ค (AD) | |
| รูปที่ 2.3 | 9 |
| การใช้วงกลมเสียดทานหลายวงกลมรวมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ เชิงพลังงาน | |
| รูปที่ 2.4 | 16 |
| ตัวอย่างการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว (sensitivity) สำหรับการตัด ความลาดในเหมืองหิน | |
| รูปที่ 2.5 | 17 |
| ค่าตัวแปรเชิงกำลัง วัสดุเนื้อที่ตรวจสอบและระบุค่าพิสัย (range) ไว้ | |
| รูปที่ 2.6 | 17 |
| ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว ระหว่างความลาดแห่ง กับความลาดอ้อมตัวด้วยน้ำ | |
| รูปที่ 2.7 | 18 |
| ความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินต่อโครงการในงานก่อสร้างหลายรูปแบบ | |
| รูปที่ 3.1 | 21 |
| ระบบของแรงแนวตั้งที่ไม่ต่อเนื่องกัน แรงกระทำบนคานแข็งเกร็ง | |
| รูปที่ 3.2 | 25 |
| ค่าความเบ้หรือสภาพไขว้ข้าม (skewness) ของกลุ่มตัวอย่างที่ เป็นตัวแปรสุ่ม ก. ความเบ้บวก (positive skewness) ข. ความเบ้ลบ (negative skewness) | |
| รูปที่ 3.3 | 26 |
| ตัวแปรสุ่มที่สำคัญที่มีผลต่อการไหลเลื่อน ก. ภาพสเกตซ์การไหลเลื่อนบนระนาบหน้าความลาด ข. ฮิสโทแกรมของตัวแปรสุ่ม 2 ค่า | |
| รูปที่ 3.4 | 32 |
| แรงแนวตั้งที่แผ่กระจายอย่างต่อเนื่องบนคานที่แข็งเกร็ง ก. แรงปฏิกิริยาที่รองรับหนึ่งจุด ข. แรงปฏิกิริยาที่รองรับสองจุด | |

| | หน้า | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 3.5 | ฐานรากผนังหรือฐานรากแถบ (strip footing) รับโหลดปานกลาง | 35 |
| | ก. เป็นผัง (plan) | |
| | ข. เป็นรูปตั้ง (elevation) ของฐานรากเดี่ยว | |
| รูปที่ 3.6 | ภาพตัดขวางของฟุตดิงยาว | 38 |
| รูปที่ 3.7 | ภาพตัดขวางของความลาดมวดดิน ที่มีการพังทลายแนวระนาบ | 50 |
| รูปที่ 3.8 | แบบจำลองการหาอัตราส่วน ค่าความต้านการพังทลาย ที่เป็นฟังก์ชัน R ต่อค่าโหลด (น้ำหนักบรรทุก) ที่เป็นฟังก์ชัน Q | 60 |
| รูปที่ 3.9 | แบบจำลองของขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) มีพื้นที่เกิดขึ้นสามบริเวณ ได้แก่ พื้นที่เสถียร ($Z > 0$); พื้นที่สมมูลที่ขีดจำกัด ($Z = 0$); พื้นที่ที่เกิดการพังทลาย ($Z < 0$) | 62 |
| รูปที่ 3.10 | แบบจำลองของขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) ในสถานะขีดจำกัดสมมูลที่ลดค่าขนาดของตัวแปรสุ่มลง หรือ reduced limit state | 62 |
| รูปที่ 3.11 | ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_N) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขอบความปลอดภัย ($Z = 0$) ถึงตำแหน่งค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่ม, Z_{ave} | 65 |
| รูปที่ 3.12 | ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_{LN}) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขอบความปลอดภัย ($Z = 0$) ถึงตำแหน่งการคาดหมาย (expected value) ของค่าขอบความปลอดภัย, $E [Z]$ | 65 |
| รูปที่ 3.13 | ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_N) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขีดจำกัดอัตราส่วนปลอดภัย (F.S. = 1) ถึงตำแหน่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$ หรือประมาณเท่ากับค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม, $(F.S.)_{ave}$ | 77 |
| รูปที่ 3.14 | ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_N) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขีดจำกัดอัตราส่วนปลอดภัย (F.S. = 1) ถึงตำแหน่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$ | 77 |
| รูปที่ 3.15 | ภาพตัดขวางชั้นตะพักของหินปูนที่มีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ในหน้าความลาด | 80 |

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.1 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอน ของการจำลองแบบด้วยการอิงค่าขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย $[p(f)]$ กับค่ากลางของอัตราส่วนปลอดภัย | 89 |
| รูปที่ 4.2 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอน ของการจำลองแบบด้วยการอิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย $[p(f)]$ กับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$ | 96 |
| รูปที่ 4.3 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอน ของการจำลองแบบที่สาม การจำลองข้อมูลด้วยวิธี Monte Carlo เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย $[p(f)]_{SIM}$ กับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$ จากข้อมูลที่เกิดจากการจำลอง | 102 |
| รูปที่ 5.1 ความลาดยาวไม่จำกัดที่มวลบนพื้นผิวระนาบการพังทลายไม่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง | 106 |
| รูปที่ 5.2 ความลาดยาวไม่จำกัดที่มวลมีน้ำใต้ดินไหลซึมผ่านที่ระดับน้ำสูงเท่ากับ Z_w | 106 |
| รูปที่ 5.3 ความลาดยาวไม่จำกัด มีค่าแรงดันเกี่ยวข้อง ระดับน้ำสูงถึงพื้นผิวความลาด | 106 |
| รูปที่ 5.4 ความลาดของชั้นหินดินดาน ที่มีน้ำใต้ดินไหลผ่านขนานกับระนาบการพังทลาย | 108 |
| รูปที่ 5.5 ความลาดทั่วไปที่ระบุมิติความยาวกับความสูง (หรือความกว้าง) ได้ แนวแรงที่เป็นหัวลูกศรเส้นเต็ม คือค่าแรงจากน้ำหนักมวลสาร (W) กับแรงปฏิกิริยาที่ด้าน (R) ส่วนหัวลูกศรที่เป็นเส้นประ เป็นแรงจากอัดบนระนาบ (N_a) กับแรงปฏิกิริยาจากอัดที่ด้าน (N_r) และมีแรงเฉือนทำให้มวลไถลเลื่อน (S_a) กับแรงเฉือนที่ด้าน การไถลเลื่อน (S_r) เส้น $AB=L$ เป็นระยะเชิงเส้นของความยาวระนาบที่เกิดการพังทลาย | 111 |
| รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางความลาดทั่วไปที่มีรอยร้าวจากแรงดึง ที่อยู่ในชั้นตะกักด้านบน ในรูปแสดงสัญลักษณ์ของตัวแปรที่เป็นมิติระยะ ค่ามุม กับแนวแรงต่าง ๆ | 112 |
| รูปที่ 5.7 ภาพตัดขวางความลาดทั่วไปที่มีรอยร้าวจากแรงดึง ที่อยู่ในหน้าความลาดที่ตัดเอียง ในรูปแสดงสัญลักษณ์ของตัวแปรที่เป็นมิติระยะ ค่ามุม กับแนวแรงต่าง ๆ | 113 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 5.8 | แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 1 การพังทลายตามแนวระนาบของมวลสารแห้ง ไม่ปรากฏรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น | 115 |
| รูปที่ 5.9 | แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 2 การพังทลายตามแนวระนาบของมวลสารที่เปียก ไม่ปรากฏรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น | 115 |
| รูปที่ 5.10 | แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 3 การพังทลายตามแนวระนาบของมวลสาร รอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในชั้นตะกักด้านบน | 116 |
| รูปที่ 5.11 | แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 4 การพังทลายตามแนวระนาบของมวลสาร รอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในหน้าความลาด | 116 |
| รูปที่ 5.12 | การพังทลายแบบวงกลมของมวลดินที่ไม่มีค่าความเสียดทานภายใน | 128 |
| รูปที่ 5.13 | การตัดความลาดมวลดินเหนียวที่ไม่มีค่าความเสียดทานและมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น | 129 |
| รูปที่ 5.14 | ก. ภาพตัดขวางความลาดที่ถูกแบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ หลายเสี้ยว (slices) ข. ใต้อะแกรมแรงที่กระทำบนเสี้ยวที่ n ให้พื้นผิวฐานเป็นเส้นตรง | 134 |
| รูปที่ 5.15 | การตัดความลาดในดินเนื้อเดียวกัน และถูกแบ่งส่วนเป็น 8 เสี้ยว (slices) | 137 |
| รูปที่ 5.16 | แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของโบลท์ ที่แยกเป็น 2 sections | 147 |
| รูปที่ 5.17 | การเสริมเสถียรภาพมวลหินที่มีรอยแตกแยกในมวลความลาด ก. แนวทิศทางที่ใส่โบลท์แนวฉากกับพื้นผิวยอยแตกแยก (joint) ข. แนวทิศทางที่ใส่โบลท์แนวฉากกับพื้นผิวดิน (ground surface) | 148 |
| รูปที่ 5.18 | ปฏิกิริยาของแรงเสริมเสถียรภาพโครงสร้างบล็อกหินด้วยโบลท์ | 150 |
| รูปที่ 5.19 | ความลาดที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในหน้าความลาด และฝังโบลท์ในแนวราบ | 150 |
| รูปที่ 6.1 | การพังทลายตามแนวระนาบ (L) หน้าเหมืองหินปูนที่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดในชั้นตะกักด้านบน มีน้ำขังเต็มระดับรอยร้าว | 155 |
| รูปที่ 6.2 | การพังทลายตามแนวเส้นโค้ง BE ของความลาดดินเหนียวอ่อนที่เป็นดินเหนียวอิมตัวไม่มีค่าความเสียดทาน มีน้ำขังเต็มในรอยร้าวจากแรงดึง | 158 |

รายการตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตาราง 2.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเหนือนดินโคลนทะเล จาก San Francisco Bay, Marine County, California | 11 |
| ตาราง 2.2 เกณฑ์ในการพิจารณาอัตราส่วนปลอดภัย หรือค่า Factor of Safety | 14 |
| ก. กรณีปกติ ใช้ค่าตัวเลขดัชนีกับช่วงเวลาการใช้งานในการตัดสินใจ | |
| ข. กรณีปกติ ใช้ค่าตัวเลขดัชนีกับค่าซ่อมแซมโครงสร้างในการตัดสินใจ | |
| ตาราง 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสมบัตินดิน (หิน) ในงานก่อสร้างเชิงวิศวกรรมธรณี ค่าตัวเลขเหล่านี้เป็นค่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กับการทดสอบในที่ (in situ test) เพื่อหาพิสัยที่เป็นช่วงระหว่างค่าขีดจำกัดต่ำสุดกับสูงสุด | 30 |
| ตาราง 3.2 ค่าตัวประกอบของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุก strip footing ที่มีฐานขรุขระ (rough base) ใช้กับฐานรากที่วางตัวติดกับระดับน้ำใต้ดิน และมีความดันน้ำในโพรง (pore pressure) เกี่ยวข้องด้วย | 35 |
| ตาราง 3.3 ค่าตัวประกอบของ bearing capacity สำหรับ long footing ที่อิงกับค่า มุมเสียดทาน | 39 |
| ตาราง 3.4 ค่าที่กำหนดสำหรับปัจจัยตัวอย่างที่ 3.2 สำหรับตัวแปรสุ่มในระบบ | 39 |
| ตาราง 3.5 ค่าที่กำหนดสำหรับปัจจัยตัวอย่างที่ 3.3 ของตัวแปรสุ่มในระบบ 3 พจน์ตัวแปร | 43 |
| ตาราง 3.6 ค่าเชิงสถิติสำหรับตัวแปรสุ่มในระบบ 3 พจน์ตัวแปร | 50 |
| ตาราง 3.7 ค่าการคาดหมายกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของพจน์ตัวแปรสุ่ม ลอการิทึมปกติ | 72 |
| ตาราง 3.8 ค่าสมบัตินและค่ามิติตความลาดสำหรับตัวแปรสุ่มในระบบ | 81 |
| ตาราง 5.1 สมการต้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ การตัด ความลาดมีค่าความชันของชั้นตะกอนด้านบน แต่ไม่มีรอยร้าวจาก แรงดึงเกิดขึ้น พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.9 | 117 |

| | หน้า |
|--|---------|
| ตาราง 5.2 สมการต้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพท์เชิงเสถียรภาพ การตัด ความลาดมีค่าความชันของชั้นตะกอนด้านบน และมีรอยร้าวจาก แรงดึงเกิดขึ้นในชั้นตะกอนด้านบนกับในหน้าความลาด พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11 | 118 |
| ตาราง 5.3 การกำหนดสัญกรณ์ (notation) ที่เป็นภาษาอังกฤษกับภาษากรีก หน่วยที่ระบุอยู่ในระบบ S.I. และใช้กับสมการต้นแบบใน ตารางที่ 5.1 ถึงตาราง 5.2 | 119-120 |
| ตาราง 5.4 การคำนวณหาผลลัพท์ของแรงที่กระทำบนเสี้ยวแต่ละส่วน (8 เสี้ยว) | 139 |
| ตาราง 5.5 การหาผลลัพท์ด้วย modified Bishop method กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.15$ | 144 |
| ตาราง 5.6 การหาผลลัพท์ด้วย modified Bishop method กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.25$ | 144 |
| ตาราง 6.1 ค่าผลลัพท์เชิงเสถียรภาพของการตัดความลาดมวลหินปูน ที่ได้จากการใช้ วิธีเชิงกำหนด กับการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าความเสี่ยงของ การพังทลาย ที่ใช้แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบหาค่าผลลัพท์ | 157 |
| ตาราง 6.2 ค่าผลลัพท์เชิงเสถียรภาพของการตัดความลาดมวลดินเหนียวอ่อน ที่ได้จากการใช้วิธีเชิงกำหนด กับการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็นเพื่อหา ค่าความเสี่ยงของการพังทลาย ที่ใช้แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบหาค่าผลลัพท์ | 161 |

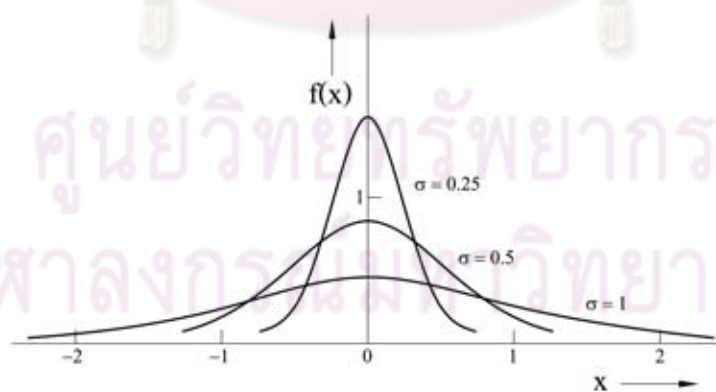
บทที่ 1

บทนำ

การวางแผนยุทธศาสตร์ของประเทศไทย มีโครงการหลายโครงการที่มีการพัฒนางานขุดเจาะเปิดหน้างานก่อสร้างในมวลสารที่เป็นดินหรือหินหลายอย่าง เช่น ทำถนนทางหลวง ตัดความลาดของคันดิน ขุดลอกเปิดหน้าดินเพื่อนำดินขุดใหม่มาถม หรือการเปิดหน้าเหมืองหินเพื่อนำชิ้นส่วนหินเป็นวัตถุดิบในงานอุตสาหกรรม และการเปิดหน้างานเหมืองหินเพื่อขุดย่อยชิ้นส่วนหินทำเป็นหินมวลรวม เป็นต้น การพัฒนาหน้างานการขุดเจาะดังกล่าวจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างมีระบบ เพื่อให้มีการใช้งานโครงสร้างที่เป็นมวลสาร (ดินหรือหิน) ได้อย่างเหมาะสม และปลอดภัย เทคนิคที่น่าเสนอในโครงการนี้ เป็นการนำความคิดใหม่ที่เป็นความรู้ของทฤษฎีเชิงความน่าจะเป็น (probability) ประยุกต์กับการใช้แนวทางเดิมที่หาค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ (stability) มาทำการเปรียบเทียบ กับใช้เป็นแนวทางหนึ่งประกอบในการตัดสินใจ

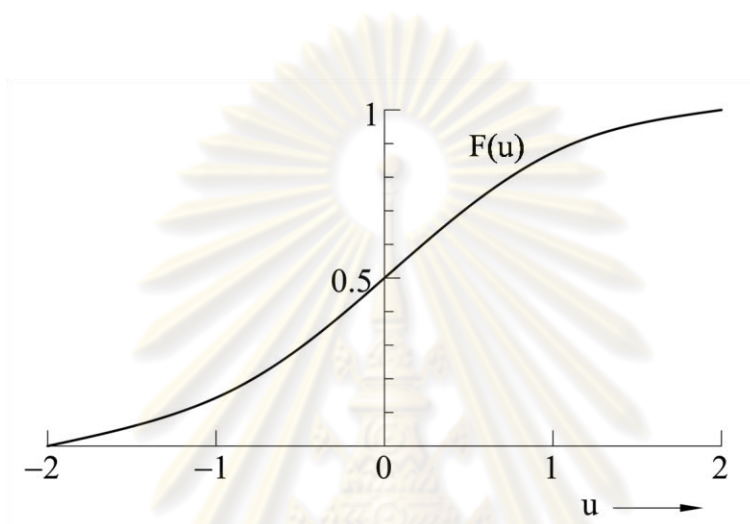
เมื่อมีการก่อสร้าง เช่น การตัดความลาด การตัดคันดิน สิ่งที่น่าใช้ทั่วไปในการวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสาร เป็นการหาค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ที่จัดเป็นการใช้วิธีเชิงกำหนด (deterministic method) หรือเรียกว่า conventional method การวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์แบบนี้ ใช้ค่าสมบัติ (property) ของมวลสารที่เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรืออาจได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม (ถ้าเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่) จากนั้นใช้ความรู้เชิงกลศาสตร์ของมวลดิน (หรือมวลหิน) หาค่าความสมดุลของแรงหรือโมเมนต์สำหรับมวลสารที่วางตัวบนระนาบที่เสี่ยงต่อการไถลเลื่อน ถ้าหากว่าค่าผลรวมแรงหรือโมเมนต์ต้านต่อการเลื่อนไถล สูงกว่า ค่าผลรวมแรงหรือโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน มวลสารที่มีลักษณะนี้จะไม่สมดุลมีการเคลื่อนที่ (หรือเคลื่อนตัว) ถ้าหากมวลสารที่มีการเคลื่อนที่บนระนาบเกิดมีความเร่งเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการพังทลายในที่สุด ในภาวะสมดุล หรือในกรณีที่ค่าผลรวมแรงหรือโมเมนต์ที่ต้านกับที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนมีค่า เท่ากัน กำหนดให้ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพมีตัวเลขเท่ากับ 1 (หนึ่ง) และเรียกชื่อเฉพาะของดัชนีเชิงเสถียรภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงกำหนดนี้ว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) อย่างไรก็ตาม ในสภาพธรรมชาติมีความแปรปรวนเกิดขึ้นสูง เช่น ตัวอย่างที่นำมาทดสอบค่าผลลัพธ์สมบัติดังกล่าว เพื่อหาค่าเฉพาะที่เป็นค่ากำลังวัสดุ หรือค่าความเสียดทาน อาจ

ไม่ใช่ค่าผลลัพธ์ที่แท้จริงของมวลสาร ผู้เก็บตัวอย่างอาจเลือกตัวอย่างดินหรือตัวอย่างหินที่ไม่มีรอยแตกร้าว หรือเลือกตัวอย่างที่เนื้อแน่นไม่มีระนาบบางที่ตัดผ่านแท่งตัวอย่าง เมื่อนำค่าสมบัติที่เป็นค่าผลลัพธ์ที่ดีเกินจริงดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณเชิงกลศาสตร์ ทำให้ได้ตัวเลขผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพที่ดีเกินไป หรือค่า F.S. สูงเกินกว่า 1 (หนึ่ง) ซึ่งในเชิงทฤษฎีไม่น่าจะเกิดการพังทลายได้แต่ในการปฏิบัติจริง ค่า F.S. ที่สูงกว่าหนึ่งไม่ใช่ค่าตัวเลขที่จะยืนยันถึงความมีเสถียรภาพได้อย่างแท้จริง ข้อมูลเชิงเทคนิค เช่น ค่าความเสียดทาน ค่าการยึดเกาะกัน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต้องทำการจำลอง (simulation) ว่ามีโอกาสของการແຈກແຈງฟังก์ชันในรูปแบบใด ในเชิงความน่าจะเป็น มีโอกาสเป็นไปได้หลายรูปแบบ แต่จากการที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้สรุปผลการคัดเลือกจะมีเพียง 2 รูปแบบ ที่การແຈກແຈງใกล้เคียงกับการแปรผันของข้อมูลจริงในภาคสนาม ได้แก่ การແຈກແຈງฟังก์ชันแบบปกติ (normal) และการແຈກແຈງฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ฟังก์ชัน พจน์ตัวแปรที่ต้องการทราบค่าทุกครั้ง ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (mean) หรือค่าการคาดหมาย (expected value) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard of deviation) ยกตัวอย่างรูป ที่ 1.1 การกระจายค่าของข้อมูลตัวแปรสุ่มแทนด้วยพื้นที่ใต้เส้นกราฟ การແຈກແຈງฟังก์ชันเชิงความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น [probability density (distribution) function, PDF] หรือเขียนสั้นๆ เป็น $f(x)$ แสดงเป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นที่อาจเกิดขึ้นในระบบ (probability of occurrence) ลักษณะความกว้างของเส้นโค้งที่พล็อตขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 S.D. (ค่าเฉลี่ย = 0) จะมีพื้นที่ใต้เส้นโค้งเท่ากับ 2/3 (หรือ 68%) แต่ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 2 S.D. จะมีพื้นที่เท่ากับ 95%



รูปที่ 1.1 ตัวแปรสุ่มที่มีการແຈກແຈງแบบปกติ ในรูปแสดงกราฟ density (distribution) function ฟังก์ชันความหนาแน่น, $f(x)$ ค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่ม x , หรือ $\mu = 0$ (ศูนย์)

ในทางกลับกัน จากรูปที่ 1.2 สามารถคำนวณหาค่าของตัวแปรสุ่มที่มีแจกแจงปกติ โดยระบุถึงค่าความน่าจะเป็นที่มีโอกาสจะเกิดขึ้น ในกรณีที่มีการแจกแจงฟังก์ชันมีค่าเฉลี่ย เป็น 0 (ศูนย์) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 S.D. (ค่าความแปรปรวน – variance = 1.0 ด้วย) การคำนวณค่าของ $F(u)$ ที่เป็นค่าการแจกแจงสะสม ต้องใช้ตารางประกอบ หรืออาจใช้วิธี link กับโปรแกรมแผ่นตารางทำการ (spreadsheet) หาค่าในฟังก์ชันที่กำหนดได้



รูปที่ 1.2 ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ในรูปแสดง
กราฟ cumulative distribution function
การแจกแจงฟังก์ชันสะสม, $F(u)$ ที่มีค่า $\mu = 0$ (ศูนย์)
และค่า variance = 1.0, $u =$ number of standard deviations
(คัดลอกจาก Kreyszig, 1993; หน้า 1185-1186)

ผู้วิจัยโครงการนี้ได้วิเคราะห์จากกรณีศึกษา (case histories) ที่มีนักวิจัยเขียนเป็นบทความลงในวารสารและในเอกสารสัมมนาการประชุมทางวิชาการ พบว่า เชื้อนดิน ถนน หรือคันดิน กับดินฐานรากของโครงสร้างที่เป็นตึก อาจเกิดการพังทลายของมวลสารก่อนทำการก่อสร้าง หรือโครงสร้างสิ่งก่อสร้างบนมวลสาร มีเสถียรภาพในช่วงระยะสั้น หรือในช่วงระยะยาว

ดังนั้นวิศวกรหรือผู้รับผิดชอบโครงการก่อสร้างในมวลสารที่เป็นดินหรือหิน จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ในแนวทางอื่นมาเปรียบเทียบกับกรวิเคราะห์หาค่าตัวเลขเสถียรภาพเชิงกำหนด เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาจะพัฒนาหน้างาน หรือในระหว่างการขุดจะเปิดหน้างาน ทั้งนี้

เพื่อให้เกิดความมั่นใจ และช่วยในการเพิ่มเสถียรภาพของมวลสาร ก็ยังมีผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มเติม เช่น การเคลียร์หน้างานหลังจากการพังทลายเกิดขึ้น

แนวความคิดของการใช้แบบจำลองเชิงความเสี่ยง (risk) ที่ผู้วิจัยโครงการนี้นำเสนอในหัวข้อ “แบบจำลองเชิงความเสี่ยงของเสถียรภาพการเปิดหน้างานขุดเจาะ” แนวคิดนี้อิงกับทฤษฎีเชิงความน่าจะเป็น (probability) ก่อนการนำข้อมูลเข้า (input data) มาทำการวิเคราะห์ผล จะต้องหาค่าการแปรผัน (variation) จากนั้นทำการคำนวณซ้ำ (iteration) จนได้ค่าความเสี่ยงที่เป็นค่าโอกาสการพังทลายที่มีชื่อเฉพาะว่า probability of failure ทำให้การพัฒนาเปิดหน้างานขุดเจาะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การทำงานมีความปลอดภัย และมีเหตุผลประกอบที่ดีขึ้นกว่าเดิมที่ตัดสินใจว่าควรทำการเสริมเสถียรภาพหรือไม่

การนำเสนอและดำเนินการวิจัยในโครงการนี้ มีการวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์ในเชิงกำหนดเปรียบเทียบกับกรณีเขียนโปรแกรมย่อยเพื่อหาค่าผลลัพธ์เชิงความเสี่ยง (หรือค่าผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น) ซึ่งมีการนำข้อมูลการขุดเจาะจริงในภาคสนาม เช่น การตัดความลาดของเหมืองหิน การใช้ดินถมเพื่อทำฐานรากของลานสนามบิน มาวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา นอกจากนี้ ในขั้นตอนสุดท้าย ผู้วิจัยขอเสนอการวางแผนหน้างานขุดเจาะในภาพรวม เพื่อแสดงผลลัพธ์ของความเสี่ยงต่อการพังทลายในบริเวณหน้างานที่แตกต่างกัน (เนื่องจากสภาพธรรมชาติของธรณีวิทยาของแต่ละตำแหน่งหน้างานขุดเจาะแตกต่างกัน) เป็นการวางแผนงานพัฒนาที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสะดวกต่อการพิจารณาผังหน้างานในภาพรวม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แนวทางการหาค่าดัชนีเชิงความปลอดภัย

การวางแผนเพื่อพัฒนาเปิดหน้างานก่อสร้างใน โครงสร้างมวลสารที่เป็นดินหรือหิน เช่น การตัดความลาดหน้าดินเพื่อทำถนน การปรับระดับให้มุมความชันของหน้าความลาดลดลง การตัดไหล่เขา การระเบิดหินที่เป็นเนินเขาให้เป็นชั้นตะพัก การปรับความลาดของคันเขื่อนดินหรือคันเขื่อนหินทิ้ง รวมทั้งการประเมินเสถียรภาพของมวลสารที่รองรับไหลลดน้ำหนักใต้ฐานราก งานพัฒนาเชิงวิศวกรรมที่กล่าวมาเหล่านี้ จำเป็นต้องมีการประเมินความปลอดภัยในระดับที่ยอมรับได้ และเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานพัฒนาอย่างเหมาะสม

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด

การหาเสถียรภาพความลาด (slope) หรือมวลสารที่รองรับไหลลดใต้ฐานราก (foundation) ด้วยวิธีเชิงกำหนด (deterministic method) นิยมระบุเป็นค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพของตัวเลขไร้มิติ มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ทั้งนี้ค่าตัวเลข F.S. = 1.0 แสดงว่า มวลสาร (ดินหรือหิน) ที่ตัดเป็นความลาดหรือรองรับไหลลดใต้ฐานราก อยู่ตรงตำแหน่งขอบต่อเนื่อง (boundary) ระหว่างความมีเสถียรภาพ (stability) กับความไม่มีเสถียรภาพ (instability) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่า F.S. = 1.0 แสดงว่า มวลสารอยู่ในภาวะสมดุลพอดี

เมื่อทำการคำนวณเสถียรภาพมวลสาร จากค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้ว ได้ค่า F.S. น้อยกว่า 1.0 แสดงถึงภาวะของมวลสารที่ถูกใช้งาน (เป็นความลาด หรือมวลรับไหลลดใต้ฐานราก) มีโอกาสเกิดการพังทลาย (failure) แต่ถ้าได้ค่า F.S. มากกว่า 1.0 แสดงถึงภาวะของมวลสารมีเสถียรภาพ (stable) วิศวกรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับมวลดินและมวลหิน นำข้อเสนอแนะในการหาค่าตัวเลขเสถียรภาพเชิงกำหนดไว้หลายแนวทาง และถูกใช้เป็นแนวทางประเมินเสถียรภาพมวลสารในภาคสนามอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน จนเรียกวิธีประเมินแบบ deterministic method เป็น conventional method

เมื่อกำหนดให้ ระบายการพังทลายเป็นแนวเชิงเส้นตรง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (หรือค่า F.S.) ที่กำหนดอย่างง่าย คือ

$$F.S. = \frac{\tan\phi}{\tan\psi_p} \quad (2.1)$$

พจน์ ϕ หมายถึง ค่ามุมความเสียดทานภายใน ส่วนพจน์ ψ_p หมายถึง มุมเอียง (มุมชัน) ของระนาบประาบางที่มีโอกาสที่มวลสารเกิดการพังทลายเมื่อมีการตัดความลาด

2.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรง

หลักการของการวิเคราะห์เชิงแรง จะกำหนดให้มวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายวางอยู่บนระนาบที่กำหนด มีชื่อเรียกระนาบดังกล่าวว่า ระบายการพังทลายหรือการพิบัติ (failure plane) ทั้งนี้ในธรรมชาติจะพบว่า ระบายอาจเป็นแนวเชิงเส้นตรง อาจเป็นแนวโค้งซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมรูปอาร์ค หรือเป็นรูปแบบผสมของระนาบหลายระนาบคล้ายลิ้ม และจากทฤษฎีการพังทลายของมวลสาร เช่น ทฤษฎีของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) กำหนดให้ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อ การพังทลาย คือ ค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลสาร ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพ จึงกำหนดนิยามของค่าอัตราส่วน ปลอดภัยเชิงแรงของมวลสารที่วางตัวบนระบายการพังทลาย เป็น

$$F.S. = \frac{\text{ค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลดิน (มวลหิน)}}{\text{ความเค้นเฉือน ที่ต้องการให้เกิดความสมดุล}} \quad (2.2)$$

หรือ

$$F.S. = \frac{\text{shear strength of the soil}}{\text{shear stress required for equilibrium}} \quad (2.3)$$

ในเชิงปฏิบัติ การคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของ F.S. ใช้วิธีหาจากผลรวมแรงต้านทานทั้งหมดบนระนาบ (เชิงเส้นตรง หรือเชิงเส้น โค้ง) ต่อ ผลรวมของแรงที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลสารที่ปกติเป็นการไถลเลื่อนเชิงเส้น (translation sliding)

ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.1 พจน์ตัวแปรที่เขียนเป็นภาษากรีก β คือ ค่ามุมความลาด ส่วนพจน์ ψ_p คือ ค่ามุมเอียงระบายการพังทลายเทียบกับแนวราบ พจน์ N_a , N_r คือ ส่วนประกอบแรง

ฉากที่กระทำบนระนาบกับแรงปฏิกิริยาฉากบนระนาบ พจน์ S_a, S_r คือ แรงเฉือนที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนกับแรงเฉือนที่ต้านการไถลเลื่อน พจน์ W, R_f คือ น้ำหนักของมวลสารกับแรงปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำหนัก และพจน์ H คือ ความสูงในแนวตั้งของการตัดความลาด

2.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโมเมนต์

หลักการของการวิเคราะห์เชิงโมเมนต์ นิยมใช้กับการพังทลายบนระนาบที่ไม่ใช่เส้นตรง ทั้งนี้กำหนดให้มีจุดศูนย์กลางของพื้นผิวการพังทลาย (อาร์กวงกลม) ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดพิคคหนึ่ง และการไถลเลื่อนเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุน (rotational motion) ดังนั้น การคำนวณหาค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพ จะเป็น

$$F.S. = \frac{\text{ผลรวมโมเมนต์ต้านการไถลเลื่อน}}{\text{ผลรวมโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน}} \quad (2.4)$$

หรือ

$$F.S. = \frac{\text{summation of stabilizing (demand) moment}}{\text{summation of disturbing (demand) moment}} \quad (2.5)$$

การคำนวณค่าผลลัพธ์ของ F.S. ใช้การหาจากผลรวมของโมเมนต์ที่ต้านทานการไถลเลื่อน หาค่าโดยใช้แขนโมเมนต์ (moment arm) คูณด้วยแรงเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวโค้งรูปอาร์ก และการหาผลรวมของโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน ก็ใช้วิธีการเดียวกัน ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของอาร์กวงกลม เป็นตำแหน่งที่ถูกเลือกจากการคำนวณ ที่เป็นตำแหน่งค่า F.S. ที่มีค่าต่ำ (น้อย) สุด ดังภาพแสดงของรูปที่ 2.2 จุด O เป็นจุดศูนย์กลางอาร์กที่ถูกเลือก พจน์ x_1 เป็น แขนของ โมเมนต์ พจน์ d เป็นค่าความยาวของอิลิเมนต์ที่กำหนด พจน์ N_r เป็น แรงปฏิกิริยาฉาก พจน์ S_r เป็น แรงเฉือนที่ต้านการไถลเลื่อนบนพื้นผิวโค้งรูปอาร์ก ส่วนพจน์ W เป็น น้ำหนักของมวลสารบนระนาบ และพจน์ r เป็นรัศมีของอาร์ก

2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพลังงาน

หลักการของการวิเคราะห์เชิงพลังงาน เป็นการประเมินผลลัพธ์จากตัวแปรหลัก 2 ตัวแปร ได้แก่ แรงกับความเร็ว ทั้งนี้กำหนดให้การที่มวลสารบนระนาบการพังทลายมีการเคลื่อนที่ได้โดยใช้ค่าความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) การวิเคราะห์ประเภทนี้ใช้กับพื้นผิวการพังทลายรูปวงกลม และเทหวัตถุเป็นมวลดินที่มีค่าการยึดเกาะกันหรือ โคฮีชัน เมื่อใช้วิธีการแบบใช้วงกลม

S_{eq} , S_e เป็นค่าแรงเฉือนต้านการเคลื่อนที่ ณ จุดจำกัดสมดุล กับแรงเฉือนที่เกิดมีผลให้เกิดการเคลื่อนที่ พจน์ r เป็นรัศมีของพื้นผิววงกลม พจน์ x_1 เป็นแกนของโมเมนต์ พจน์ O เป็นจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทาน ส่วนพจน์ R เป็นค่าระยะห่างจากจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทานเทียบกับตำแหน่งจุด K (เป็นจุดสมมุติให้เป็นจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทานที่กำหนดเพิ่ม) พจน์ F_ϕ เป็นค่าแรงลัพธ์เสียดทานที่พื้นผิววงกลม ส่วนพจน์ c_r เป็นแรงลัพธ์การยึดเกาะกัน (โคฮีชัน)

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความเชื่อถือได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงกำหนด ปกติระบุค่าขนาดตัวแปรสมบัติมวลสารเพียงค่าเดียว เช่น ค่ามุมเสียดทานมีค่า 25 องศา ค่ากำลังวัสดุเฉือน 24 กิโลพาสคัล ในสภาวะธรรมชาติ ค่าตัวแปรเหล่านี้ เมื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวอย่างเดียวกัน มีความแปรผัน (variation) ดังที่ผู้วิจัยได้คัดลอกค่าสมบัติดินในตารางที่ 2.1 ดินดังกล่าวเป็นดินโคลนทะเล (marine clay mud) ในอ่าวซานฟรานซิสโก รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Duncan and Buchignani, 1973; Duncan, 2000) การวิจัยใช้ตัวอย่างมาทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนแบบไม่ยอมให้น้ำออกระหว่างทำการเฉือนดิน ค่ากำลังวัสดุนี้ คือ “undrained shear strength” การทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนนี้ใช้วิธีการอัดสามทิศทาง (triaxial compression test) มีการแยกวิธีการทดสอบเป็น 2 วิธีย่อย วิธีแรก มีชื่อเรียกว่า UU Test ซึ่งหมายถึง Unconsolidated Undrained Test ในระหว่างการทดสอบแบบ UU นี้เป็นการทดสอบในสภาวะที่ไม่มีการยินยอมให้มีการขับน้ำออกจากมวลดินที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ และระหว่างการออกแรงอัดกดตัวอย่างดินที่ทดสอบมีการบังคับไม่ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างดินด้วย ส่วนวิธีที่สอง มีชื่อเรียกว่า CU Test ซึ่งหมายถึง Consolidated Undrained Test การทดสอบแบบ CU นี้ เป็นการทดสอบในสภาวะที่ยินยอมให้มีการขับน้ำออกจากมวลดิน และระหว่างการออกแรงอัดกดตัวอย่างดินที่ทดสอบ มีการบังคับไม่ให้น้ำสามารถไหลออก

เมื่อพิจารณาในเชิงสถิติ สำหรับผลการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนแบบ “undrained shear strength: τ_u ” ทั้ง 20 ค่า ที่ระบุในตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ย (mean, x_{ave}) = 0.22 t/ft² (21.07 kPa) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, S.D.) = 0.033 t/ft² (3.16 kPa) และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, C.O.V.) = 15 % จากผลการคำนวณได้ค่าเชิงสถิติ 3 ค่านี้ แสดงว่าข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติเชิงกำลังเฉือนของมวลดินโคลนทะเลมีการกระจายค่าสูง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเหนือนดิน โคลนทะเล จาก San Francisco Bay, Marine County, California (Duncan and Buchignani, 1973)

| depth (ft) | depth (m) | test | τ_u (t/ft ²) | τ_u (kPa) |
|------------|-----------|------|-------------------------------|----------------|
| 10.5 | 3.20 | UU | 0.25 | 23.94 |
| | | CU | 0.22 | 21.07 |
| 11.5 | 3.51 | UU | 0.23 | 22.02 |
| | | CU | 0.25 | 23.94 |
| 14.0 | 4.27 | UU | 0.20 | 19.15 |
| | | CU | 0.22 | 21.07 |
| 14.5 | 4.42 | UU | 0.15 | 14.36 |
| | | CU | 0.18 | 17.24 |
| 16.0 | 4.88 | UU | 0.19 | 18.19 |
| | | CU | 0.20 | 19.15 |
| | | UU | 0.23 | 22.02 |
| | | CU | 0.25 | 23.94 |
| 16.5 | 5.03 | UU | 0.15 | 14.36 |
| | | CU | 0.18 | 17.24 |
| 17.0 | 5.18 | UU | 0.23 | 22.02 |
| | | CU | 0.26 | 24.90 |
| 17.5 | 5.33 | UU | 0.24 | 22.98 |
| | | CU | 0.25 | 23.94 |
| 19.5 | 5.94 | UU | 0.24 | 22.98 |
| | | CU | 0.21 | 20.11 |

หมายเหตุ การแปลงผันหน่วย 1 ton (US) = 2000 lbs; 1 ft = 0.3048 m; 1 t/ft² = 95.76 kPa

กล่าวอีกนัยหนึ่ง ข้อมูลมีความเอนเอียง (biased) สูง กรณีของค่าสัมประสิทธิ์ C.O.V. เป็นค่าไร้มิติ ถึงแม้ว่าผลการทดสอบมีกำลังวัสดุเหนือนของดิน โคลนทะเลสูงกว่านี้ สองเท่า แต่ค่า C.O.V. ยังคงที่ Duncan and Wright (2005) ระบุว่าค่า C.O.V. ต่ำสุดควรประมาณที่ 15 % และใช้สำหรับการทดสอบที่เครื่องมือและกระบวนการทดสอบมีประสิทธิภาพสูง ในการทดสอบคุณสมบัติกำลังวัสดุเหนือนมวลดิน มีผู้แนะนำว่าค่า C.O.V. สูงกว่านี้ เช่นอาจสูงถึง 40% (Harr, 1987)

2.2.1 ค่า Factor of Safety กับค่า Reliability

เมื่อทำการคำนวณค่า F.S. ของความลาดหรือมวลรับโหลดได้ฐานราก อย่างถูกต้องแม่นยำ วิศวกรได้ค่าของ F.S. = 1.1 หรือ = 1.01 ในเชิงทฤษฎีค่าดัชนีสองค่าเหล่านี้ควรยอมรับได้ว่า การดำเนินงานตัดความลาดหรืองานฐานรากมีความปลอดภัย แต่จากการที่ยกตัวอย่างของการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเหนือนที่ระบุในตารางที่ 2.1 มีผลทำให้ค่าตัวเลขอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณได้มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นในหลายโอกาส เมื่อคำนึงถึงความมั่นใจที่โครงสร้างมวลสารต้องไม่มีการพังทลายถ้าค่าดัชนีของ F.S. สูงกว่าหนึ่ง จึงทำให้มีการหามาตรการในเชิงสถิติเพิ่มเติม ที่มุ่งเฉพาะถึงความเชื่อถือได้ของข้อมูลกับค่าจากการคำนวณ ค่าดัชนีดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ค่าความเชื่อถือได้

หรือในบางครั้ง เรียกว่า ค่าความไว้วางใจได้ (reliability, R) วิธีการประยุกต์ค่าดัชนีนี้เนื่องจากสมมติฐานเชิงความน่าจะเป็น (probability) ถ้าให้โครงสร้างมวลสารไม่เกิดการพังทลายมีค่าเท่ากับ 1 ลบด้วยค่าความน่าจะเป็นของการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = 1 - p(f) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถเรียกค่าความเชื่อถือได้ (R) เป็นค่าโอกาสของการไม่เกิดการพังทลาย (probability of no failure) ค่าดัชนี R กับค่าดัชนี F.S. เป็นตัวเลขเชิงตรรกะ (logical numeral) เกี่ยวกับเสถียรภาพของมวลสาร แต่ในภาคสนาม ถึงแม้ว่ามวลความลาดหรือมวลใต้ฐานรากที่ประเมินได้ว่าค่าความน่าจะเป็นของการพังทลายเป็น 0 (ศูนย์) แต่มวลความลาดยังมีโอกาสที่จะเกิดการพังทลายได้ ในงานวิจัยโครงการนี้ จึงมักระบุค่าทั้งสองค่า ได้แก่ ค่า F.S. กับค่า R [หรือ ค่า $p(f)$] ไปพร้อมกัน และมีประโยชน์ช่วยในการตัดสินใจมากกว่าที่จะ ทราบค่าดัชนีค่าใดค่าหนึ่งเพียงค่าเดียว

2.2.2 ค่า Reliability กับค่า Probability of Failure

ค่าความเชื่อถือได้, R ที่คำนวณได้ มีผลมาจากระบบมีความไม่แน่นอน (uncertainty) ในหลายสถานะและในหลายสภาวะ เปรียบเสมือนว่า ค่าโอกาสความไม่แน่นอนมีค่าได้ทั้งค่าสูงหรือค่าต่ำ Harr (1987) ระบุนิยามของคำว่า Reliability ในเชิงวิศวกรรมว่า “reliability is the probability of an object (item or system) performing its required function adequately for a specified period of time under stated conditions” แสดงว่า ค่าดัชนีความเชื่อถือได้นี้ เป็นค่าตัวเลขเชิงความน่าจะเป็นที่ต้องกำหนดระยะเวลาที่ระบุ จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นถ้าหากนำมาใช้กับโครงสร้างมวลดิน (มวลหิน) ที่ใช้เป็นความลาด หรือใช้รองรับน้ำหนักบรรทุกจากฐานราก สามารถระบุได้ว่า ความเชื่อถือได้ของโครงสร้างมวลสารที่จะมีเสถียรภาพต้องออกแบบให้อยู่ในภาวะที่กำหนด (specified conditions) เช่น สภาวะของการก่อสร้างที่สิ้นสุด (end of construction) การที่น้ำลดอย่างรวดเร็ว (rapid drawdown) ขนาด (magnitude) ของการไหวสะเทือนจากปรากฏการณ์แผ่นดินไหว เป็นต้น

เมื่อทำการออกแบบความลาดหรือฐานราก อายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ปกติต้องการให้มีเสถียรภาพยาวนานเป็น 50 ปี หรือ 100 ปี เป็นต้น แต่สภาวะที่เกิดแผ่นดินไหวอาจทำให้ไม่สามารถใช้งานโครงสร้างมวลสารได้อีก ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จัดเป็นเหตุการณ์เชิงความน่าจะเป็น หรือระบุเป็น probabilistic function นักวิจัยหลายท่าน เช่น Christian

et al. (1994), Duncan (2000) ให้ความเห็นว่า ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่า Reliability ไม่ได้มีความแม่นยำถูกต้องมากหรือถูกต้องน้อยกว่าค่าของ Factor of Safety ที่คำนวณจากข้อมูลที่เป็นผลจากการทดสอบ (testing) ในห้องปฏิบัติการหรือในการทดสอบภาคสนาม ข้อมูลจากการพิจารณาวิเคราะห์ (judgment) และจากการประมาณ (approximation) แต่ดัชนีดังกล่าวช่วยเสริมความมั่นใจในเชิงการตัดสินใจ

2.3 แนวทางการใช้ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพมวลสาร

แนวทางเดิมของการวิเคราะห์เสถียรภาพใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ค่าตัวแปรเสริม (parameter) ที่สำคัญและมีผลต่อการคำนวณ ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกันกับค่าความเสียดทาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอย่างละเอียด ตัวแปรเสริมเชิงกำลังวัสดุ ยังมีความเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำในมวลสาร และยังเกี่ยวข้องกับความเค้นจากอัดที่กระทำต่อมวลสารบนระนาบการพังทลาย ถ้าหากมีการเสริมเสถียรภาพค่าตัวแปรเสริมของแรงที่ใช้เสริมเสถียรภาพ ต้องนำมาประกอบในการพิจารณาอีกด้วย แต่ถ้าจะให้มีความสมบูรณ์ ต้องมีการวิเคราะห์เชิงความเสี่ยงเพิ่มเติมอีกด้วย

2.3.1 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงกำหนด

ในงานก่อสร้างที่มีโครงสร้างเป็นมวลสารเปราะที่เป็นดินหรือหิน ควรมีเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับการกำหนดค่า F.S. ที่ต่ำสุด เมื่อโครงสร้างมวลสาร (ดินหรือหิน) มีการใช้งานเป็นมวลความลาด หรือใช้เป็นมวลรับโหลดจากฐานราก จึงต้องมีการกำหนดค่า F.S. ในสภาวะต่าง ๆ เช่น ขนาดของโครงสร้างมวลสาร อายุการใช้งาน สถานภาพที่เกิดในขณะที่มีการใช้งาน หรือก่อนการใช้งาน และภายหลังจากการใช้งานแล้ว

ตารางที่ 2.2 เป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้รวบรวมจากเอกสารที่เผยแพร่หลายแหล่ง ทั้งนี้มีการดัดแปลงปรับปรุงให้ข้อมูลที่ได้จากหลายแหล่ง จนจัดให้อยู่ในภาวะที่สามารถใช้แทนกันได้ (compatibility) กับทำให้มีความเหมาะสมกับเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ใช้ได้กับการพัฒนาหน้างานก่อสร้างในประเทศไทย เนื่องจากเอกสารหลักเป็นเอกสารของต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงใช้ภาษาอังกฤษเป็นภาษาหลักในตาราง แต่มีคำอธิบายสั้น ๆ ของผลสรุปจากตารางที่ 2.2 ที่พิมพ์ไว้ในกระดาษขนาด A3 (หน้าถัดไป) ทั้งนี้เป็นการระบุค่า F.S. ที่เป็นค่าต่ำสุด (minimum value) เมื่อมีการขุดเจาะเปิดหน้างาน (excavation) ในโครงสร้างมวลสารที่เป็นดินหรือหิน ผลสรุปของการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งก่อสร้างบนมวลสาร มีดังนี้

ตาราง 2.2 เกณฑ์ในการพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัย หรือค่า Factor of Safety

ตาราง 2.2 ก) กรณีปกติ ใช้เฉพาะค่าตัวเลขดัชนีกับช่วงเวลาการใช้งานในการตัดสินใจ

| Types of Slopes and Foundations | Required Factor of Safety | |
|---|---------------------------|---------------------|
| | Short-Term Stability | Long-Term Stability |
| Slopes of dams, levees, dikes, and other rock excavation or earthwork | 1.3 | 1.5 |
| Earth retaining , supporting soil (rock) structures | 1.5 | 2.0 |
| Soil and rock foundations | 2.0 | 3.0 |
| Underground openings | 4.0 | 8.0 |

ตาราง 2.2 ข) กรณีเฉพาะ ใช้ค่าตัวเลขดัชนีกับค่าซ่อมแซมโครงสร้างในการตัดสินใจ

| Cost and Consequence of Geo-material failures | Required Factor of Safety for Uncertainties | |
|---|---|------------------|
| | Small Uncertainty | Long Uncertainty |
| Cost of repair comparable to incremental cost to excavation | 1.25 | 1.50 |
| Cost of repair greater than incremental cost to excavation | 1.50 | 2.50 |

เอกสารอ้างอิง

1. CANMET (1976), Pit Slope Manual Chapter 1 Summary.
2. Duncan and Wright (2005), Soil Strength and Slope Stability.
3. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong (2000), Preliminary Quantitative Risk Assessment of Earthquake-Induced Landslides at Man-Made Slopes in Hong Kong.
4. Harr, M.E. (1987), Reliability – Based in Civil Engineering.
5. Obert and Duvall (1967), Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock.
6. U.S. Army Corps of Engineers (1970), Engineering and Design: Stability of Earth and Rock-Fill Dams.
7. Wyllie and Mah (2004), Rock Slope Engineering: Civil and Mining – Fourth Edition.

1. ถ้าโครงสร้างมีขนาดใหญ่' ควรกำหนดให้มีค่า F.S. สูงกว่าค่า F.S. ของโครงสร้างขนาดเล็ก ในกรณีที่ใช้มวลสารชนิดเดียวกันในงานก่อสร้าง
2. โครงสร้างมวลสารที่มีความต้องการใช้งานในระยะเวลาสั้น สามารถกำหนดค่า F.S. ให้มีค่าน้อยกว่าโครงสร้างมวลสารที่ต้องการใช้งานในระยะเวลาสั้น
3. โครงสร้างมวลสารบนพื้นผิวดิน สามารถกำหนดค่า F.S. ให้มีค่าน้อยกว่าโครงสร้างมวลสารที่อยู่ใต้พื้นผิวดิน
4. โครงสร้างมวลสารที่อาจมีการรับน้ำหนักเพิ่ม เช่น โหลดจากฐานรากของสิ่งก่อสร้างควรกำหนดค่า F.S. ให้สูงกว่าโครงสร้างมวลสารที่รับเพียงค่าน้ำหนักมวลสารอย่างเดียว (มวลดิน หรือ มวลหิน)
5. การประเมินค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถ้าหากยอมให้มีโอกาสเกิดการพังทลาย มีผลโดยตรงกับการกำหนดค่า F.S. กรณีที่ค่าซ่อมแซมสูง ค่า F.S. ควรอยู่ในระดับสูงด้วย

2.3.2 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงความเสี่ยง

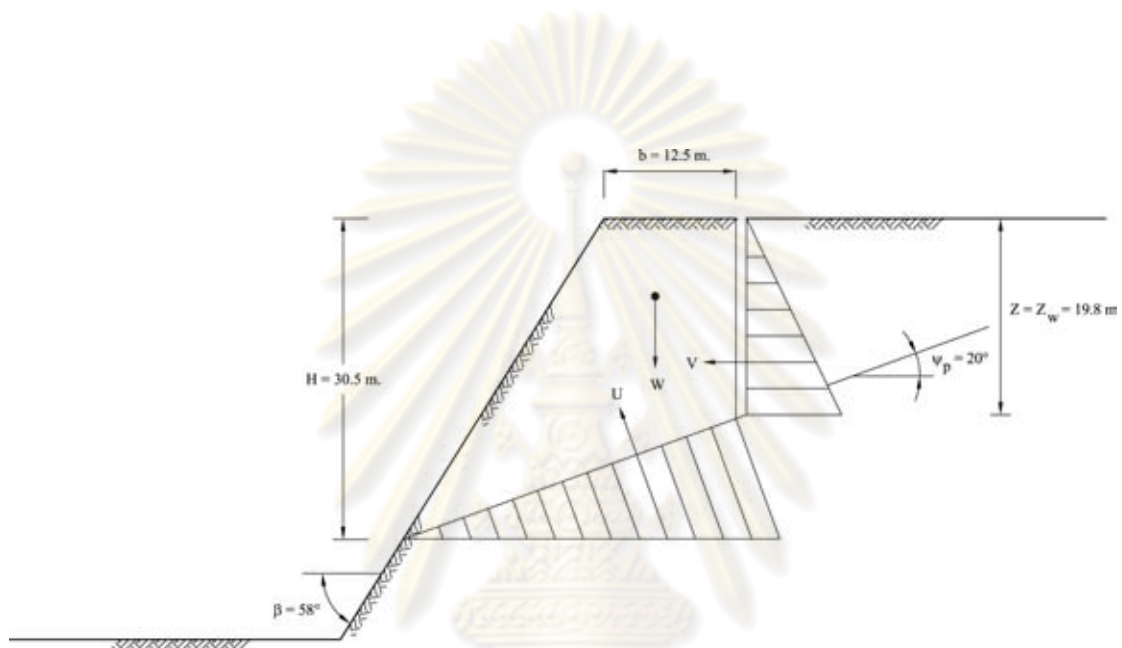
การพิจารณาเชิงความเสี่ยง (risk) ที่เกิดขึ้นในงานธรณีเทคนิคที่มีความเกี่ยวข้องกับมวลสารที่เป็นดินหรือหิน เป็นการใช้นโยบายการพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติ หาค่าความเป็นไปได้ของการลงทุนและค่าระดับขั้นของความปลอดภัย ตลอดจนเป็นการหาค่าความน่าจะเป็น (probability) หรือการกำหนดค่าดัชนีเชิงความเสี่ยงถือได้

ก. การวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหวหรือเชิงความแปรปรวนร่วมเกี่ยว

การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ อาจเรียกชื่อเป็น sensitivity analysis เป็นการศึกษาค่าผลกระทบของตัวแปรเสริมที่มีความอ่อนไหวต่อค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ในทำนองเดียวกัน อาจพิจารณาเป็นการวิเคราะห์ที่เรียกว่า covariance analysis ซึ่งเป็นการศึกษาถึงความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่มีตัวแปรเสริมร่วมกันเกี่ยวข้องกับการหาค่าผลเฉลย

ตัวอย่างของการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหวนี้ ผู้วิจัยได้คัดลอกจากหน้า 91-92 (Wyllie and Mah, 2004) ที่หาค่า F.S. ของเหมืองหินที่มีการตัดความลาดเป็นมุม 58 องศา และมีรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) อยู่ในตะพักชั้นบน ค่าระยะมิติของความลาด ระบุไว้ในรูปที่ 2.4 และตัวแปรเสริมเชิงกำลังวัสดุ ที่เป็นค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชันมีค่าพิสัย 75-125 กิโลพาสคัล ค่ามุมเสียดทานมีพิสัย 15-25 องศา (ดูรูปที่ 2.5) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าว (ดูรูปที่ 2.6 ประกอบ) เช่น ถ้าน้ำที่ขังในรอยร้าวถูกระบายออกหมด หรืออยู่ในภาวะที่ fully drained กำหนดให้เหมืองหินในรูป 2.6 นี้ สามารถระเบิดตัดหน้าความลาดสูงสุดเป็นค่ามุมจากได้ และยังมี

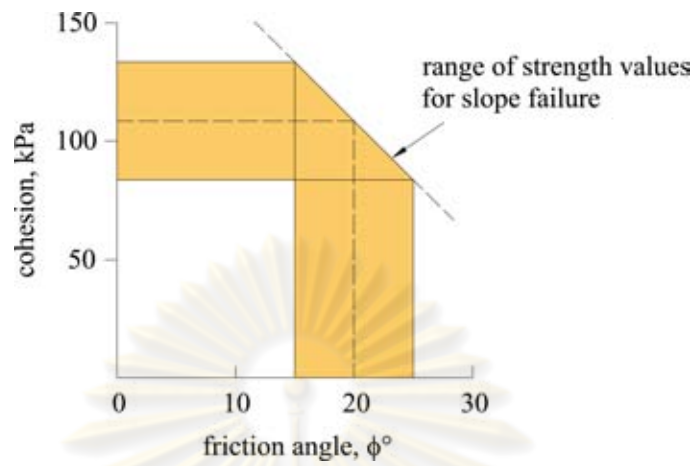
ค่า F.S. สูงกว่าหนึ่ง (มีเสถียรภาพ) ทั้งนี้ใช้ค่ามุมความเสียดทานระดับต่ำหรือที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุด (ที่ค่ามุม 15 องศา) แต่ในกรณีที่มีน้ำขังเต็มรอยร้าวหรืออยู่ในสภาวะอิ่มตัว (saturated) เหมือนหิน ในรูป 2.6 สามารถระเบิดให้ตัดความลาดได้ที่มุมความชันสูงสุดแค่มุม 60 องศา (ค่ามุมสูงกว่านี้ไม่ปลอดภัย) ถึงแม้ว่าจะกำหนดให้ค่ามุมความเสียดทานเพิ่มขึ้นถึงขีดจำกัดสูงสุด (ที่มุม 25 องศา)



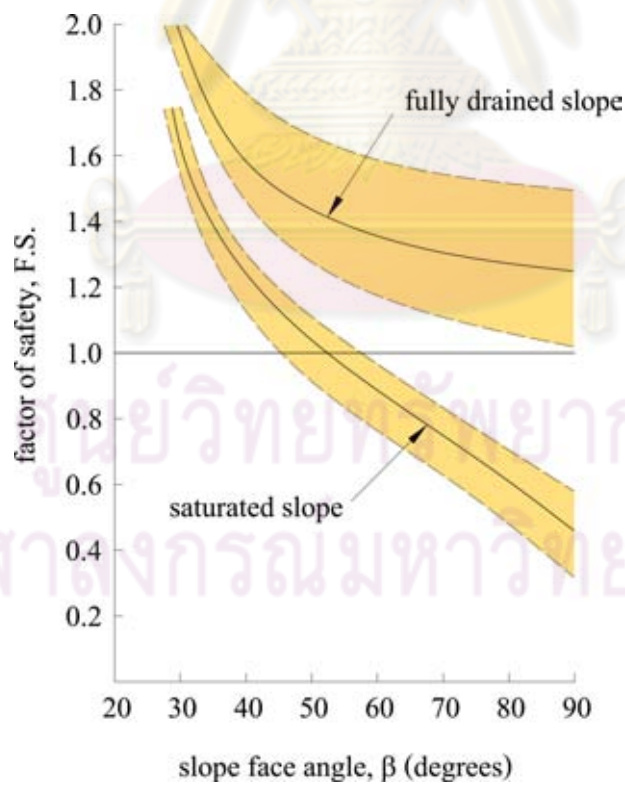
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว (sensitivity) สำหรับการตัดความลาด ในเหมืองหิน สัญลักษณ์ตัวแปรเสริมกับสมการเชิงประสพการณ์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) อธิบายไว้ในบทต่อไป

ข. การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ ได้อธิบายไว้บ้างแล้วในหัวข้อ 2.2 เป็นแนวทางวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น (probability analysis) ในช่วงแรกใช้กับโครงสร้างของเครื่องบินหรือจรวดอวกาศ แต่ในงานธรณีเทคนิค มีการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในช่วงแรก เกี่ยวข้องกับการตัดความลาด ในเหมืองเปิด (open pit slope) เป็นการหาค่าผลลัพธ์ที่เป็นค่าความเสี่ยงต่อการพังทลาย (risk of failure) ในระยะใกล้เคียงกัน มีการนำค่าความเสี่ยงต่อการพังทลายมาใช้ในการเสริมเสถียรภาพในงานถนน และในงานการป้องกันดินถล่ม

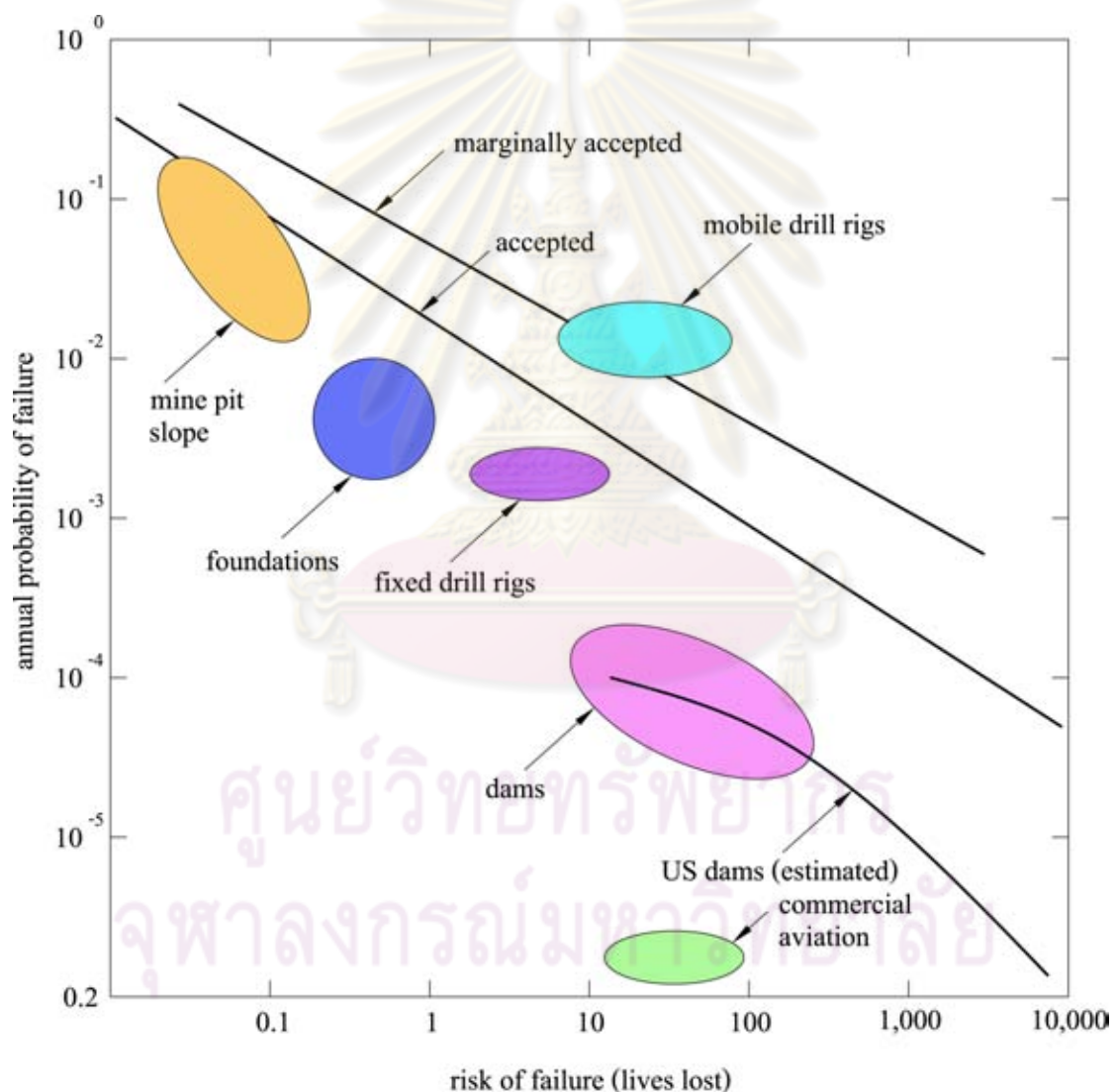


รูปที่ 2.5 ค่าตัวแปรเชิงกำลังวัสดุเฉือน ที่ตรวจสอบและระบุค่าพิสัย (range) ไว้



รูปที่ 2.6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว ระหว่างความลาดแห้งกับความลาดอ้อมตัวด้วยน้ำ เส้นเต็มหนาเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนเส้นประเป็นเส้นขีดจำกัด (ต่ำสุดกับสูงสุด)

สิ่งที่สำคัญของการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นในการพังทลายของมวลสาร (เมื่อขยายเพิ่มเติมในบทต่อไป) คือ การแปรผันของตัวแปรเสริมที่ใช้ในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ จึงต้องกำหนดให้มีการแจกแจงฟังก์ชันเชิงสถิติ และมีวิธีทำการคำนวณซ้ำ (iteration) จนกว่าได้ค่าผลลัพธ์จะมีความเชื่อถือได้ หรืออาจต้องใช้ผู้ชำนาญการช่วยในการตรวจสอบกับช่วยปรับแก้ก่อนนำค่าผลลัพธ์มาใช้งานจริง



รูปที่ 2.7 ความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินต่อ โครงการในงานก่อสร้างเชิงวิศวกรรมหลายรูปแบบ
โครงการขนาดใหญ่มีความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน มากกว่าโครงการขนาดเล็ก

ในเชิงการเปรียบเทียบ อาจมีการแสดงเป็นภาพกราฟิกส์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ผู้วิจัยโครงการนี้ได้คัดลอกมาจากเอกสารเกี่ยวกับ “Risk Evaluation and Uncertainty in Geotechnical Engineering” ที่ R.V. Whitman (1984, 2000) ได้ระบุไว้ว่า ค่าตัวแปรของการปฏิบัติงานในรูปที่ 2.7 เป็นการเปรียบเทียบ ระหว่าง ผลของการพังทลายที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตและทรัพย์สินจริง (actual lost) กับ ค่าตัวเลขความน่าจะเป็นต่อระยะเวลา 1 ปีของการทำงาน ภาพกราฟิกส์วงรีในรูปที่ 2.7 เป็นวิธีการทำงาน เช่น การตัดความลาดชันเหมือง (mine pit slope) การทำเขื่อน (dam) การทำฐานราก (foundation) เป็นต้น ความสัมพันธ์เชิงความน่าจะเป็น มีความแตกต่างในแต่ละงานก่อสร้าง เช่น งานตัดความลาดชันเหมือง ต้องมีการระวังเหตุอย่างใกล้ชิดต่อความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สิน หรือความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ หรือทำให้โอกาสที่จะเกิดการพังทลายจริงมีความเป็นไปได้น้อย (มีค่าตัวเลขแกนตั้งที่มีความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการเกิดการพังทลายสูง จึงต้องทำการควบคุมงานก่อสร้างให้มีค่าตัวเลขในแกนนอน ที่เป็นค่าความเสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายให้อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ) ในทางตรงกันข้าม งานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้างทำเขื่อน ค่าโอกาสของความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดพังทลายต่ำ แต่ถ้าหากเกิดอุบัติเหตุหรือมีการพังทลายเกิดขึ้น ความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินย่อมมีมาก (มีค่าตัวเลขผลลัพธ์ในแกนตั้งอยู่ในระดับต่ำ แต่ค่าตัวเลขผลลัพธ์ในแกนนอนอยู่ในระดับสูง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงความเสี่ยงที่ใช้ในแบบจำลอง

ข้อกำหนดที่สำคัญในการวางแผนเปิดหน้างานก่อสร้าง 'ได้แก่' ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการ ซึ่งต้องพิจารณาควบคู่กับความปลอดภัยของระบบงาน ทั้งนี้จัดเป็นหน้าที่กับความรับผิดชอบของวิศวกรและผู้ควบคุมหน้างานชุดเจาะ ที่จะต้องทำให้การปฏิบัติงานมีความเสี่ยงของโอกาสเกิดการพังทลายจากมวลสารน้อยสุด และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการป้องกันไม่สูงมากเกินไป อุปสรรคที่สำคัญในการวางแผนออกแบบหน้างานชุดเจาะ มักจะเป็นเรื่องข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่มีความครบถ้วนสมบูรณ์ ทำให้ความมั่นใจในเรื่องความเสี่ยงลดน้อยลงไป

3.1 หลักการทั่วไปในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลผลลัพธ์เชิงสถิติ สำหรับงานธรณีเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการเปิดหน้างานชุดเจาะ มีสมการหลักที่สำคัญเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงสถิติที่เป็นข้อมูลเข้าของตัวแปรสุ่ม กับการแจกแจงฟังก์ชันข้อมูลตัวแปรสุ่ม การวิเคราะห์ใช้ความรู้พื้นฐานในการหาค่าตัวแปรเชิงความน่าจะเป็น ก่อนนำมาใช้เป็นแนวทางในการสร้างต้นแบบของแบบจำลองเชิงความเสี่ยงต่อไป

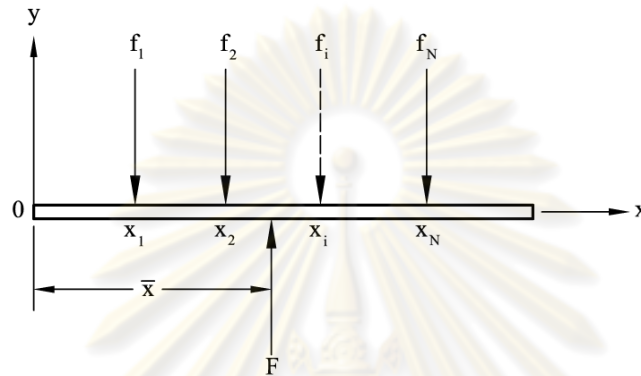
3.1.1 สมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

สมการพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ มีตัวแปรที่ต้องการหาค่าทั้งหมด 7 พจน์ แยกออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก จะเป็นพจน์ตัวแปรเชิงสถิติที่ต้องหาค่าเกือบทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ 'ได้แก่' ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าการคาดหมาย (expected value or expectation) ค่าความแปรปรวน (variance) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation) กลุ่มที่สอง เป็นพจน์ตัวแปรเชิงสถิติที่ไม่ได้ใช้บ่อย แต่มักใช้ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบผลของการแจกแจงฟังก์ชัน 'ได้แก่' ค่าความเบ้หรือสภาพไขว้ข้าม (skewness) กับค่าเคอร์โทซิสหรือเรียกว่าภาวะยอดมน (kurtosis)

3.1.2 ค่าเฉลี่ยกับค่าการคาดหมาย

การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น อิงตามหลักธรรมชาติว่า ค่าสมบัติของมวลสาร (mass properties) มีความแปรผันตลอดเวลา ค่าสมบัติมวลสาร เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ค่าการยึดเกาะกัน

หรือโคฮีชัน และค่ามุมความเสียดทาน เป็นต้น ค่าพจน์ตัวแปรสุ่มเหล่านี้ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ย (mean) หรือค่าการคาดหมาย (expected value) จากกลุ่มตัวอย่าง การเปรียบเทียบความแตกต่างของพจน์ 2 ค่านี้ เพื่อให้มีความหมายใกล้เคียงกันกับวิธีสมมุติเชิงกลศาสตร์ ดังรูปที่ 3.1 กำหนดให้มีแรงแนวขนานที่แยกอิสระไม่ต่อเนื่องกัน (discrete) มีค่าขนาดแรงตั้งแต่ f_1, f_2, \dots, f_N กระทำบนคานแข็งเกร็ง (rigid beam) ตรงตำแหน่งในแนวราบที่ x_1, x_2, \dots, x_N



รูปที่ 3.1 ระบบของแรงแนวตั้งที่ไม่ต่อเนื่องกัน แรงกระทำบนคานแข็งเกร็ง

จากความรู้เชิงสถิตยศาสตร์ หาค่าขนาดของแรงที่ทำให้สมดุล (ค่า F) ได้แก่

$$F = \sum_{i=1}^N f_i \quad (3.1)$$

ตำแหน่งที่แรง F กระทำบนคานในแนวราบ คือ จุด \bar{x} จากความสัมพันธ์เชิงโมเมนต์

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f_i}{F} \quad (3.2)$$

สมมุติให้แรงมีลักษณะแยกอิสระไม่ต่อเนื่องกัน (discrete force) ในรูปที่ 3.1 แสดงผลลัพธ์ของค่าโอกาสความน่าจะเป็นเท่ากับ N (N outcome occurrences) จากทฤษฎีเชิงความน่าจะเป็นทำให้ระบุผลลัพธ์ของ probability of outcome (ค่า P)

$$P[\text{success}] + P[\text{failure}] = 1 \quad (3.3)$$

เมื่ออิงตามสมการ 3.3 ขนาดของค่า $F = 1$ เป็นผลจากการเกิดความสมดุล (หรือเป็น unity) จึงกำหนดพจน์ตัวแปรที่ต้องการหาค่าเป็นพจน์ของการคาดหมาย ($E[x]$) เรียกชื่อภาษาอังกฤษเป็น expected value หรือ expectation ของตัวแปรสุ่ม x (ของรูปที่ 3.1) จัดเป็นค่าตรวจวัดการแจกแจงที่เป็นค่าแนวโน้มสู่ส่วนกลางกลาง (central tendency) แสดงเป็นสมการข้างล่าง

$$E[x] = \bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i f_i \quad (3.4)$$

ค่า $E[x]$ มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์ (arithmetic mean) ที่หาจากผลรวมของจำนวนทั้งหมด แต่ความแตกต่างของพจน์ทั้งสอง (mean and expected value) ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์ (arithmetic mean) เป็นการตรวจวัดค่ากลางของตัวอย่างที่สมมุติให้แต่ละตัวอย่างที่ตรวจสอบมีโอกาสความน่าจะเป็นของการเกิดเท่ากัน (equal probability of occurring) แต่ค่าการคาดหมาย (expected value) เป็นการตรวจวัดค่ากลางของตัวอย่างที่สมมุติให้แต่ละตัวอย่างที่ตรวจสอบโอกาสความน่าจะเป็นของแจกแจงฟังก์ชันตัวแปรสุ่ม (probability of distribution of a random variable) แตกต่างกัน ดังนั้น ในรูปที่ 3.1 จึงควรใช้ค่า $E[x]$ มากกว่าใช้ค่า \bar{x} ในการหาค่าความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องกับความถี่และโอกาสการพังทลาย ทั้งนี้เพราะว่าในความเป็นจริง ค่าสมบัติมวลสาร เช่น ความเสียดทาน ค่าการยึดเกาะกัน มีโอกาสของการเกิดแตกต่างกัน (different probabilities of occurring) ได้ตลอดเวลา

3.1.3 ค่าความแปรปรวน

เมื่อต้องการตรวจวัดการกระจายค่า (dispersion or scatter) ของการแจกแจงฟังก์ชันที่ไม่ต่อเนื่องของมวลสาร (discrete distribution of mass) ถ้าหากใช้รูป 3.1 เป็นต้นแบบ จากความรู้ในเรื่องกลศาสตร์ของวัสดุ ในระนาบ x - y หาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย (moment of inertia, I_y) ซึ่งเป็นค่าของโมเมนต์กลางที่สอง (second central moment) ได้เป็น

$$I_y = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 f_i \quad (3.5)$$

ในเรื่องของทฤษฎีเชิงความน่าจะเป็น (probability theory) มีวิธีตรวจวัดการกระจายค่าของฟังก์ชันตัวแปรสุ่ม (ที่อาจเป็นค่าสมบัติมวลสาร พจน์ใดพจน์หนึ่ง) เพื่อวัดความแปรปรวนที่เกิดใน

ระบบที่กำลังทำการตรวจสอบ มีชื่อเรียกเป็นค่าความแปรปรวน (variance, $V[x]$) กรณีของรูปที่ 3.1 ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม x_i มีค่าเป็น

$$V[x] = V[x_i] = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 f_i \quad (3.6)$$

หรือเขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง เป็น

$$V[x] = [S.D.]_x^2 = (\sigma[x])^2 = \frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.7)$$

ให้สังเกตว่า ตามทฤษฎีพิเศษของสมการ 3.7 ควรเป็น N 'ไม่ใช่' $(N-1)$ แต่สำหรับกรณีของจำนวนอันตะ (finite number) มีโอกาสที่จะเกิดความเอนเอียง (bias) ได้ จึงควรใช้ค่า $(N-1)$ แทนค่า N ถ้าหากจำนวนตัวแปรสุ่มในระบบที่ตรวจสอบมีจำกัด

3.1.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในเชิงสถิติ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, S.D.) เป็นดัชนีวัดการกระจายค่า (scattering) ของตัวแปรสุ่ม ถ้าหากตัวแปรมีความแตกต่างสูงในเรื่องของค่าขนาด ค่า S.D. (หรือใช้สัญลักษณ์เป็น σ_x) จะมีค่าสูงด้วย ในกรณีของรูปที่ 3.1 การกระจายค่าของตัวแปรสุ่ม x_i มีความแปรปรวนเป็นมิตยกำลังสองของตัวแปรสุ่ม ในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีค่าเท่ากับรากกำลังสองที่มีค่าบวก (positive square root) เขียนเป็นสมการ

$$[S.D.]_x = \sigma[x_i] = \sqrt{V[x_i]} \quad (3.8)$$

หรือเขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง เป็น

$$[S.D.]_x = \sigma[x_i] = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.9)$$

3.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน

ค่าดัชนีที่ตรวจวัดการกระจายค่า (scattering) ของตัวแปรสุ่ม x_i ที่มีประโยชน์มากที่สุดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, C.O.V.) ระบุหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่า C.O.V. ใช้วัดความเชื่อถือได้ของแนวโน้มสู่ส่วนกลาง (central tendency) แสดงเป็นสมการ

$$\text{C.O.V.} = \frac{\sigma[x_i]}{E[x_i]} \times 100 \quad (\%) \quad (3.10)$$

หรือเขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง เป็น

$$\text{C.O.V.} = \frac{\text{S.D.}}{\text{average value of } x} = \frac{(\text{S.D.})_{x_i}}{\bar{x}_{x_i}} \quad (3.11)$$

พจน์ S.D. เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม (random variables) พจน์ N เป็นจำนวนของตัวแปรสุ่ม x_i (ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินหรือหิน) และพจน์ \bar{x} หรือ x_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม ทั้งนี้หน่วยของ S.D. เป็นหน่วยเดียวกันกับค่าตัวแปรสุ่ม x_i ในส่วนของค่า C.O.V. ใช้หน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์

ถ้าหากเปรียบเทียบพจน์ระหว่าง mean, coefficient of variation, standard deviation สมมุติว่าตัวแปรสุ่มในระบบมีค่า $\bar{x} = 10$ และมีค่า C.O.V. = 10% แสดงว่ามีค่า S.D. = 1 ในขณะที่ถ้ามีค่า mean คงที่แต่ค่ามี C.O.V. = 20% จะได้ S.D. = 2 นั่นคือ ถ้าตัวแปรสุ่มในระบบมีค่า S.D. สูง (ค่า C.O.V. สูงด้วย) แสดงว่ากลุ่มตัวอย่างของตัวแปรสุ่ม มีการกระจายค่าขนาดสูงด้วย

3.1.6 ค่าความเบ้หรือสภาพไขว้ข้าม

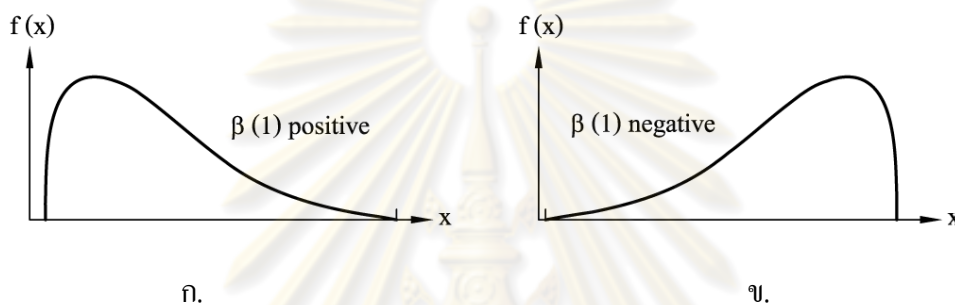
ค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่า ค่าความเบ้ (skewness) ใช้ตรวจวัดแนวโน้มของข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์เป็นข้อมูลที่มีลักษณะไม่สมมาตร (asymmetry of data) ที่เกิดรอบค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ ค่านี้เกิดจากโมเมนต์กลางที่สาม (third central moment) ค่าความเบ้เป็นค่าไร้มิติ มีความสัมพันธ์เป็น

$$\beta(1) = \beta_1 = \frac{E[(x_i - \bar{x})^3]}{(\sigma[x_i])^3} \quad (3.12)$$

หรือเขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง เป็น

$$\beta(1) = \beta_1 = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{[\text{S.D.}]^3} \quad (3.13)$$

พจน์ $\beta(1)$ หรือ β_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความเบ้ เกิดจากการหาจากค่ายกกำลังสามของค่าการคาดหมายต่อค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถ้าหากผลลัพธ์ของความเบ้เป็นค่าบวก แสดงว่าแนวของเส้นกราฟมีปลายยาว (long tail) ออกไปทางด้านขวาของค่าเฉลี่ย (รูปที่ 3.2 ก.) แต่ถ้าหากผลลัพธ์ของความเบ้เป็นค่าลบ แสดงว่า แนวของเส้นกราฟมีปลายยาวออกไปทางด้านซ้ายของค่าเฉลี่ย (รูปที่ 3.2 ข.) อนึ่งในกรณีที่ $\beta(1) = 0$ (ศูนย์) แสดงว่าการแจกแจงฟังก์ชันมีลักษณะเป็นสมมาตรสมบูรณ์ (perfect symmetry)



รูปที่ 3.2 ค่าความเบ้หรือสภาพไขว้ข้าม (skewness) ของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแปรสุ่ม
 ก. ความเบ้บวก (positive skewness) ข. ความเบ้ลบ (negative skewness)

3.1.7 ค่าเคอร์โทซิสหรือภาวะยอดมน

ค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่า ค่าเคอร์โทซิสหรือภาวะยอดมน (kurtosis) ใช้ตรวจวัดความแบน (flatness) หรือความโค้ง (sharpness) ของจุดยอดของการแจกแจงค่า (distribution peak) ค่าไร้มิติของเคอร์โทซิส หาจากค่ายกกำลังสี่ของค่าการคาดหมายต่อค่ายกกำลังสี่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\beta(2) = \beta_2 = \frac{E[(x_i - \bar{x})^4]}{(\sigma_{[x_i]})^4} \tag{3.14}$$

หรือเขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง เป็น

$$\beta(2) = \beta_2 = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{[S.D.]^4} \tag{3.15}$$

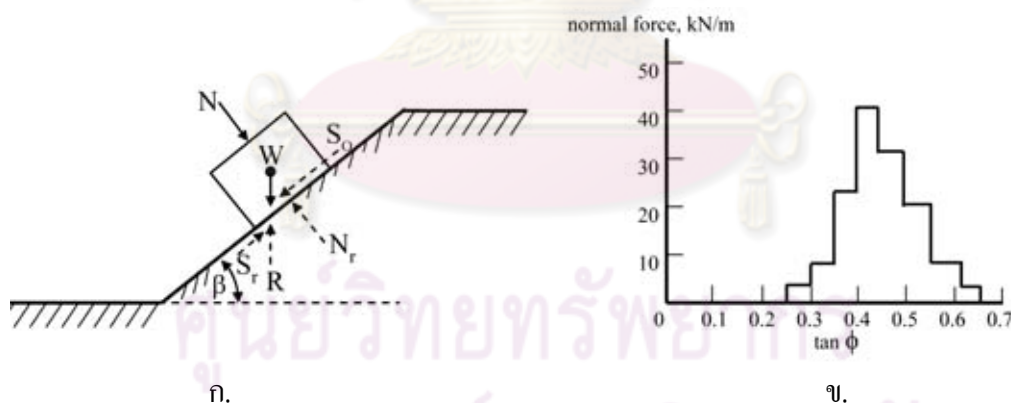
พจน์ β (2) หรือ β_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของค่าเคอร์โทซิส ถ้าหากผลลัพธ์ของค่าเคอร์โทซิส น้อยกว่า 3 แสดงว่าเส้นโค้งของการแจกแจงค่ามีความแบน (flattened curve) แต่ถ้าค่าเคอร์โทซิส มากกว่า 3 แสดงว่าเส้นโค้งของการแจกแจงค่ามีความโค้ง (sharply peaked curve) นั่นคือ ถ้าหากค่า $\beta(2) = 3$ แสดงว่าการแจกแจงค่าของฟังก์ชันเป็นแบบปกติ (normal distribution)

3.2 แนวทางการใช้วิธีการจำลองแบบข้อมูล

การจำลองแบบข้อมูล (data simulation) เป็นวิธีการที่สะดวกในการนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพซ้ำ หรือหาค่าความน่าจะเป็นในเชิงสถิติซ้ำ ในงานเชิงวิศวกรรมการจำลองแบบข้อมูลทำให้เกิดความมั่นใจต่อพฤติกรรม การตอบสนองของมวลสาร

3.2.1 รูปแบบที่ใช้ในการแจกแจงฟังก์ชันของสมบัติมวลสาร

แนวทางการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยตรง (direct statistical approach) ใช้การแจกแจงค่าตัวแปร เช่น กำหนดให้ตัวแปรมีการแจกแจง (distribution) ตัวแปรสุ่มในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่น ฟังก์ชันของตัวแปรเป็นแบบเอกรูป (uniform) เป็นแบบปกติ (normal) เป็นแบบลอการิทึมปกติ (lognormal or logarithmic normal) เป็นต้น



รูปที่ 3.3 ตัวแปรสุ่มที่สำคัญที่มีผลต่อการไถลเลื่อน

ก. ภาพสเกตซ์การไถลเลื่อน

บนระนาบหน้าความลาด

ข. ฮิสโทแกรมของตัวแปรสุ่ม 2 ค่า

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยตรง เช่น เมื่อต้องการหาโอกาสของการไถลเลื่อนบนระนาบมีตัวแปรสุ่ม 2 ค่าที่สำคัญ และมีความสัมพันธ์กัน ได้แก่ แรงแนวฉากที่กระทำต่อมวลบน

ระนาบ กับค่ามุมเสียดทานภายในที่บริเวณฐานบล็อกมวลสารที่วางบนระนาบที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน ถ้าทำการทดสอบหาค่าตัวแปรสุ่มทั้งสองในห้องปฏิบัติการสำหรับมวลดิน (หรือมวลหิน) เป็นจำนวนหลายค่า (ควรมากกว่า 10 ค่า) ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า shear box test หาค่ากำลังเฉือนโดยตรงด้วย แล้วนำมาพล็อตเปรียบเทียบด้วยฮิสโตแกรมหรือกราฟรูปแท่ง (histogram) ซึ่งทำให้สามารถสรุปผลได้ว่า การแจกแจงฟังก์ชันระหว่างค่าแรงฉาก (normal force) กับค่าความเสียดทาน ($\tan \phi$) มีสมมุติฐานของการแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มในรูปแบบของการแจกแจงปกติ (ดูรูปที่ 3.3)

นักวิจัยหลายคน มีแนวคิดว่า การแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มแบบปกติ (normal) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาเสถียรภาพมีความแปรผันสูง ทำให้ได้กราฟการแจกแจงเป็นแบบไม่สมมาตร (asymmetry) จึงเสนอแนะว่า การแก้ไขในเรื่องนี้ควรมีการแปลง (transformation) ตัวแปรสุ่มโดยการแทนตัวแปรสุ่ม x ด้วย $\ln x$ จึงทำให้ได้ ความน่าจะเป็นของการแจกแจงฟังก์ชันความหนาแน่น (probability density function: PDF) เป็นรูปแบบของลอการิทึมปกติ (lognormal) เอกสารที่ผู้วิจัยโครงการนี้ได้รวบรวมมาถึงปัจจุบัน เป็นกรณีที่ผู้วิจัยสมมุติให้ตัวแปรสุ่มมีฟังก์ชันการแจกแจงค่าเป็นแบบลอการิทึมปกติ ได้แก่ Lee et al. (1983, หน้า 65), Ang and Tang (1984, หน้า 285), Harr (1987, หน้า 138-141), Harrison and Hudson (2000, หน้า 330-332), Duncan and Wright (2005, หน้า 205-206)

3.2.2 รูปแบบอื่นของการแจกแจงฟังก์ชันของสมบัติมวลสาร

รูปแบบอย่างอื่นของการแจกแจงฟังก์ชัน เช่น แบบเอกรูป (uniform) แบบเลขชี้กำลัง (exponential) แบบเบตา (Beta) ยังไม่เหมาะสมกับค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างตัวแปรสุ่มที่เป็นค่าสมบัติมวลสารหรือเหมาะกับค่าขนาดมิติ (ความสูง ความกว้าง ความหนา) ของโครงสร้างมวลดิน (มวลหิน) จึงไม่มีการนำแนวคิดรูปแบบเหล่านี้มาใช้แพร่หลาย อาจมีการสมมุติเป็นแบบเอกรูปบ้าง แต่เป็นเฉพาะกรณี ไม่เหมือนกับการสมมุติการแจกแจงฟังก์ชันเป็นแบบปกติหรือเป็นลอการิทึมปกติ ที่นิยมใช้มากเกือบทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการตัดความลาด การรับโหลดจากฐานราก การทำคันดินถม การเสริมเสถียรภาพ ที่ใช้การสมมุติเป็นการแจกแจงฟังก์ชันทั้งสองแบบ

3.3 แนวทางการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน

ผู้วิจัยโครงการนี้ได้รวบรวมบทความวิจัยหลายโครงการ กับตำราหลายเล่มที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ตัวแปรเชิงงานวิศวกรรม ส่วนใหญ่ที่นักวิจัยเลือกใช้ค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ใช้เป็นต้นแบบของการสร้างแบบจำลอง โดยแยกออกเป็น 4 แนวทางหลัก

3.3.1 แนวทางแรก

จากเอกสารของ Duncan and Wright (2005) ใช้หลักเกณฑ์ 3 S.D. ที่กำหนดว่า ตัวแปรสุ่มที่กำหนดมีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution of random variables) นับเป็นจำนวน 99.73 % ของตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายค่า (dispersion) อยู่ในขีดจำกัดของ 3 S.D. ส่วนตัวแปรสุ่มที่เหลือเพียง 0.27% มีการกระจายค่านอกขีดจำกัดของ 3 S.D. แสดงว่า ค่าตัวแปรสุ่มอยู่ในขีดจำกัดที่สูงจากค่าเฉลี่ย หรือเรียกชื่อเฉพาะเป็น the highest conceivable value of the variable (ใช้พจน์ตัวย่อเป็น HCV) อยู่เหนือกว่าค่าเฉลี่ย \bar{x} หรือ x_{ave} เท่ากับ 3 S.D. ส่วนตัวแปรสุ่มอยู่ในขีดจำกัดที่ต่ำจากค่าเฉลี่ย หรือเรียกชื่อเฉพาะเป็น the lowest conceivable value of the variable (ใช้พจน์ตัวย่อเป็น LCV) อยู่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย \bar{x} หรือ x_{ave} เท่ากับ 3 S.D. เช่นเดียวกัน ทำให้สร้างสมการในรูปแบบที่เป็น 3 S.D. rule

$$S.D. = \frac{HCV - LCV}{6} \quad (3.16)$$

วิธีการใช้สมการ 3.16 สมมุติว่า ในการทดสอบดินภาคสนามด้วยวิธีทะลวงมาตรฐาน (standard penetration test, SPT) จากตัวอย่างดินทราย (sandy soil) ในการทดสอบ SPT ที่ blow count เท่ากับ 20 หรือ $N_{60} = 20$ ได้ค่าสูงสุดของมุมเสียดทาน เท่ากับ 45 องศา และได้ค่าต่ำสุดของมุมเสียดทาน เท่ากับ 25 องศา ส่วนค่าที่เหมาะสมที่สุด (most likely values, MLV) หรืออาจเรียกเป็นค่าเฉลี่ยที่น่าจะเป็นไปได้ เท่ากับ 35 องศา นำค่าที่กำหนดดังกล่าวไปแทนในสมการ 3.16 จะได้ $S.D. = 3.3$ องศา จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้มาแทนในสมการ 3.2 จะได้ $C.O.V. = 9$ เปอร์เซ็นต์

3.3.2 แนวทางที่สอง

จากเอกสารของ Harr (1987) สนับสนุนหลักเกณฑ์ 3 S.D. ว่าสามารถใช้ได้กับการที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าในรูปแบบอื่น เช่น แบบเอกรูป (uniform) แบบลอการิทึมปกติ (log-normal) เป็นต้น ต่อมา Christian and Baecher (2001) ทำการดัดแปลงหลักเกณฑ์ 3 S.D. โดยเริ่มจากการพิจารณาผลลัพธ์ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution of random variables) ถ้ามีจำนวนตัวแปรสุ่ม 20 ตัวแปรจะมีพิสัย (range) เท่ากับ $3.7 \times (S.D.)$ และเมื่อตัวแปรสุ่มมีจำนวนเป็น 30 ตัวแปร จะมีพิสัยเท่ากับ $4.1 \times (S.D.)$ ดังนั้น ถ้าทำการทดสอบตัวอย่างที่มีจำนวนตัวอย่าง ระหว่าง 20-30 ตัวอย่าง จะได้ค่าพิสัยระหว่าง HCV กับ LCV ที่สูงกว่า 3.7 และต่ำ

กว่า 4.1 Christian and Baecher จึงได้ปรับแก้ใหม่ให้ค่าใช้ตัวหารค่าพิสัยเท่ากับ 4 แทนที่จะเป็น 6 สมการที่ปรับค่าใหม่เป็น

$$S.D. = \frac{HCV - LCV}{4} \quad (3.17)$$

จากสมการ 3.17 ใช้ค่าเดียวกันกับแนวทางที่หนึ่ง หากค่าได้ S.D. = 5 องศา ส่วนค่าของ C.O.V. = 14 เปอร์เซ็นต์

3.3.3 แนวทางที่สาม

วิธีการนี้คือการวิเคราะห์ฟังก์ชันของนิพจน์ (expression) ที่ต้นฉบับรวบรวมมาจากเอกสารของ Rosenblueth (1975), Lee et al. (1983), Harr (1987) นักวิจัยดังกล่าวเสนอแนวทางที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า วิธีประมาณค่าเป็นจุด (point estimate method, PEM) โดยการทำให้ฟังก์ชันของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) ถูกตัดปลายให้สั้นลง และค่าข้อมูลเข้าของตัวแปรสุ่ม แสดงในรูปแบบของค่าการคาดหมายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ข้อเด่นของวิธี PEM นี้ใช้ความรู้เชิงสถิติพื้นฐานก็สามารถทำการคำนวณด้วยมือ (hand calculation) และไม่ต้องใช้การแจกแจงค่าที่สมบูรณ์ (หมายถึง ต้องมีข้อมูลที่วิเคราะห์หามากพอจึงได้ค่าการแจกแจงที่ดี) ข้อเสียของวิธี PEM เป็นการประมาณค่าหลายขั้นตอน ทำให้ผลลัพธ์สุดท้ายมีความแตกต่างจากวิธีแม่นยำตรง (exact method) จึงควรใช้ร่วมกับวิธีการอื่นเพื่อเปรียบเทียบ วิธีการของ PEM จะมีการอธิบายขั้นตอนอย่างละเอียด ในหัวข้อ 3.4 ของบทนี้ โดยแยกเป็นการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มเพียงค่าเดียว ตัวแปรสุ่มสองค่า และตัวแปรสุ่มสามค่า จำนวนตัวแปรสุ่มมากกว่าสามค่า ไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการนี้

3.3.4 แนวทางที่สี่

แนวทางที่สี่ที่ผู้วิจัยโครงการนี้อิงจากเอกสาร 2 แหล่ง ได้แก่ Harr (1987) กับ Duncan and Wright (2005) ที่เป็นการรวบรวมค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันจากเอกสารการวิจัยจำนวนมาก และการคัดแยก กับทำการตัดแปลงมาใช้กับงานทางธรณีเทคนิคเพื่อต้องการใช้สำหรับการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ในกรณีที่มีจำนวนตัวอย่างน้อย (น้อยกว่า 5 ตัวอย่าง) วิธีการเริ่มต้นเมื่อหาค่าเฉลี่ย (หรือกำหนดค่าเฉลี่ย) ของตัวแปรสุ่มแล้ว ให้กำหนดค่า C.O.V. ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้หาค่า S.D. ทั้งนี้ผู้วิจัยโครงการนี้ เสนอแนะให้ใช้ ค่า C.O.V. ต่ำสุดที่ 15% กับใช้ค่า C.O.V. สูงสุดที่ 40% ตามเหตุผลประกอบดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสมบัติดิน (หิน) ในงานก่อสร้างเชิงวิศวกรรมธรณี
ค่าตัวเลขเหล่านี้ เป็นค่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการทดสอบ
ในที่ (in situ test) เพื่อหาพิสัยที่เป็นช่วงระหว่างค่าขีดจำกัดต่ำสุดกับสูงสุด

| ตัวแปรค่าคุณสมบัติ | ค่าพิสัยของ C.O.V. (%) |
|--|------------------------|
| หน่วยน้ำหนัก (unit weight) | 3-10 |
| โพรงอากาศในดิน (air void of soil) | 16-30 |
| มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) | 2-13 |
| กำลังวัสดุเหนียว (shear strength) | 5-40 |
| การยึดเกาะกันหรือ โคฮีชัน (cohesion) | 15-40 |
| ความพรุน (porosity) | 8-10 |
| ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) | 2-4 |
| ปริมาณความชื้น (moisture content) | 13-20 |
| ระดับขั้นการอิ่มตัว (degree of saturation) | 10-15 |
| สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (coefficient of permeability) | ไม่สามารถระบุได้ |
| การทะลวงมาตรฐานของดิน (standard penetration test) | 15-45 |
| การทะลวงดิน โดยใช้กรวย (cone penetration test on soil) | 15-37 |
| กำลังวัสดุเหนียวดินอ่อน โดยใช้การบิด (vane shear test on soft soil) | 10-20 |
| ดัชนีการอัดของดิน (compression soil index) | 15-30 |

หมายเหตุ เอกสารอ้างอิงสำหรับข้อมูลในตารางที่ 3.1

1. Duncan (2000), Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering.
2. Duncan and Wright (2005), Soil Strength and Slope Stability.
3. Harr (1987), Reliability – Based in Civil Engineering.
4. Kulhawy (1992), On the Evaluation of Soil Properties.
5. Lacasse and Nadim (1997), Uncertainties in Characterizing Soil Properties.
6. Lee et al. (1983), Geotechnical Engineering.

– ค่า C.O.V. ที่กำหนดให้มี ค่าต่ำสุด (หรือ LCV) เท่ากับ 15 % นั้น ค่าที่ 15 % นี้ ผู้วิจัย
โครงการนี้อิงจากเอกสารของ Duncan and Wright (2005) หน้า 203 ที่ระบุว่า สมบัติดินหลายค่า
นั้นค่ากำลังวัสดุเดือนมีความแปรผันสูงกว่าค่าสมบัติอื่นถ้าการทดสอบมีการควบคุมให้ได้มาตรฐาน
ค่า C.O.V. ควรอยู่ที่ระดับ 15% ในกรณีที่น่าค่า 15 % นี้มาใช้ จัดว่าเป็นความคิดเชิงอนุรักษ์
(conservative idea) ในทำนองเดียวกัน ถ้าตัวอย่างที่ทดสอบเป็นหิน ปกติหินมีความแปรผันเชิง
สมบัติมวลสารต่ำกว่าดิน เมื่อนำค่า C.O.V. ที่ 15 % นี้มาเป็นค่าต่ำสุด แสดงว่าเหมาะสมแล้ว

– ค่า C.O.V. ที่กำหนดให้มี ค่าสูงสุด (หรือ HCV) เท่ากับ 40 % นั้น ค่าที่ 40 % ผู้วิจัย
โครงการนี้อิงจากเอกสารในตาราง 1.8.1 หน้า 30-31 ของ Harr (1987) ที่ระบุว่า สมบัติดินจำนวน
หลายค่า นั้น ค่ากำลังวัสดุเดือนมีความแปรผันสูงได้ถึงที่ค่า C.O.V. เท่ากับ 40 % นอกจากนี้ใน
ตารางที่ 3.1 หน้า 30 ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้รวบรวมมาจากบทความวิจัยกับตำราหลายเล่ม โดยเลือก
เฉพาะตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับงานธรณีเทคนิค พบว่า ค่า C.O.V. ของสมบัติมวลสาร (ดินและหิน) มี
สมบัติบางชนิดที่น้อยมากที่พบค่า C.O.V. ที่สูงกว่า 40% ดังนั้น ค่าสมบัติของดินทั่วไปไม่ควรมีความ
แปรผัน สูงกว่านี้ ถ้าหากเป็น สมบัติหินความแปรผันยังไม่ควรมีค่า C.O.V. สูงกว่านี้เลย

3.4 วิธีประมาณค่าเป็นจุด

วิธีการประมาณค่าเป็นจุด (point estimate method, PEM) ดังอธิบายไว้ในหัวข้อนี้ ใช้
สำหรับการหาผลลัพธ์ของการแจกแจงฟังก์ชันต่อเนื่อง (continuous distribution function) ทั้งนี้ได้
แยกวิธีการวิเคราะห์เป็น 3 แบบ ขึ้นอยู่กับการสมมติจำนวนตัวแปรสุ่มในระบบ

3.4.1 วิธี PEM สำหรับฟังก์ชันต่อเนื่อง

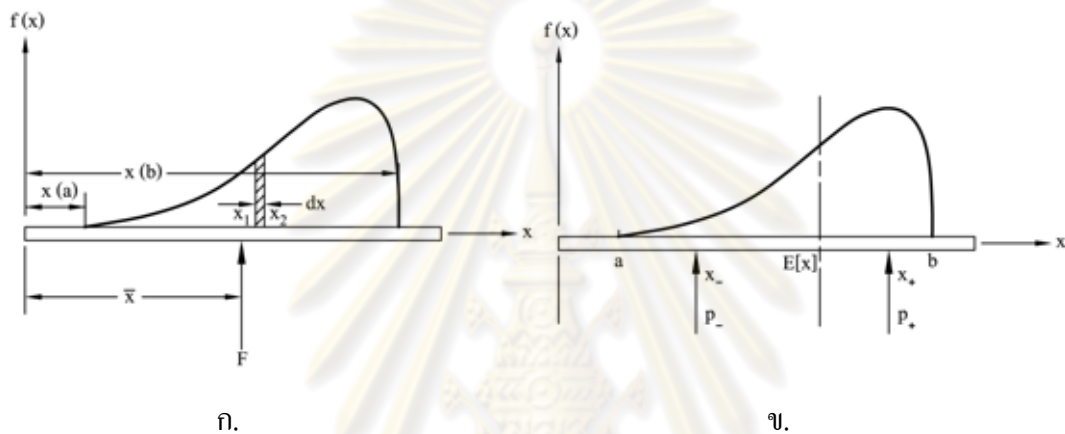
รูปที่ 3.4 แสดงแรงในแนวดิ่งที่แผ่กระจายต่อเนื่องบนคานแข็งเกร็ง ทั้งนี้รูปที่ 3.4 ก.
กำหนดให้คานมีที่รองรับเพียงตำแหน่งเดียว (single support) ในขณะที่คานในรูปที่ 3.4 ข. มีที่
รองรับสองตำแหน่ง (two supports) ดังนั้นจากแรงปฏิกิริยาที่กระทำบนคาน จึงแยกออกเป็นการ
ประมาณค่าเพียงจุดเดียวสำหรับรูปที่ 3.4 ก. และเป็นการประมาณค่าสองจุด สำหรับรูปที่ 3.4 ข.

ดังนั้นจากรูปที่ 3.4 ก. เมื่อแรงแนวดิ่งกระทำแผ่กระจายจากตำแหน่ง $x(a)$ ไปจนถึง $x(b)$
หาค่าขนาดของแรงปฏิกิริยา F ที่รองรับได้

$$F = \int_{x(a)}^{x(b)} f(x) dx \quad (3.18)$$

พื้นที่ภายใต้ $f(x)$ ระหว่าง $x(a)$ ถึง $x(b)$ มีความเป็นไปได้อย่างเดียว (uniqueness)

$$\int_{x(a)}^{x(b)} f(x) dx = 1 \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.4 แรงแนวตั้งที่แผ่กระจายอย่างต่อเนื่องบนคานที่แข็งเกร็ง

ก. แรงปฏิกิริยาที่รองรับหนึ่งจุด แรงปฏิกิริยา คือ F

ข. แรงปฏิกิริยาที่รองรับสองจุด แรงปฏิกิริยา คือ p_- และ p_+

จากรูปที่ 3.4 ก. ที่ตำแหน่งแรงปฏิกิริยากระทำ ระยะ \bar{x} จากจุดกำเนิด จะได้ค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่ม x มีค่าเป็น

$$E[x] = \bar{x} = \int_{x(a)}^{x(b)} x f(x) dx \quad (3.20)$$

ทำให้ได้ค่าความแปรปรวน ($V[x]$) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($[S.D.]^2$ หรือ $(\sigma[x])^2$)

$$V[x] = (\sigma[x])^2 = \int_{x(a)}^{x(b)} (x - \bar{x})^2 f(x) dx \quad (3.21)$$

เขียนในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$V[x] = E[x^2] - (E[x])^2 \quad (3.22)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนกับค่าการคาดหมายในสมการที่ 3.22 เป็นสมการหลักที่ใช้ในการประมาณค่าแบบเป็นจุด (วิธี PEM)

3.4.2 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องตัวแปรเดียว

ถ้าหากกำหนดให้ y เป็นผลรวมของจำนวนตัวแปรสุ่ม และพจน์ α_i เป็นสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสุ่ม x_i จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$y = \sum(\alpha_i)(x_i) \quad (3.23)$$

จากสมการ 3.23 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย (mean) กับค่าความแปรปรวน (variance)

$$\bar{y} = E[y] = \sum(\alpha_i)(\mu_{x_i}) \quad (3.24)$$

$$V[y] = (\sigma[y])^2 = \sum(\alpha_i)^2 (\sigma[x_i])^2 \quad (3.25)$$

พจน์ μ กับ σ เป็นสัญลักษณ์แสดงค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) ในกรณีของ y ที่เป็นผลคูณหรือเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อน (complicated function) ของตัวแปรสุ่ม x_i ทำให้ยากต่อการหาผลลัพธ์ Rosenblueth (1975) ใช้วิธีการประมาณค่าเชิงโมเมนต์ความน่าจะเป็น (probability moment) แทนวิธีการหาปริพันธ์เชิงตัวเลข (numerical integration)

ขั้นตอนของการคำนวณค่าประมาณ เริ่มต้นกำหนดให้ y เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเดียว (ที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ) นั่นคือ $y = y(x)$ หรือยกตัวอย่างในลักษณะของค่าสมบัติมวลสาร เช่น องค์กรประกอบของค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (bearing capacity) เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรที่เป็นค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) ของมวลสาร เพียงค่าเดียว ฟังก์ชันดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้รูปแบบ ดังนี้

$$x_+ = \bar{x} + \sigma[x] = \text{mean}_x + [\text{S.D.}] \quad (3.26)$$

$$x_- = \bar{x} - \sigma[x] = \text{mean}_x - [\text{S.D.}] \quad (3.27)$$

$$y_+ = y(x_+) \quad (3.28)$$

$$y_- = y(x_-) \quad (3.29)$$

จากสมการ 3.26-3.29 สามารถประมาณค่าที่เป็นค่าการคาดหมาย (ที่เท่ากับค่าเฉลี่ย) กับค่าความแปรปรวน ได้เป็น

$$E[y] = \mu_y = \bar{y} \approx P_+(y_+) + P_-(y_-) \quad (3.30)$$

$$V[y] = [\text{S.D.}]_y^2 = (\sigma[y])^2 \approx P_+(y_+^2) + P_-(y_-^2) - (\bar{y})^2 \quad (3.31)$$

เมื่อกำหนดพจน์ P เป็นพจน์ความน่าจะเป็นของผลลัพธ์ในระบบ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ P เป็น

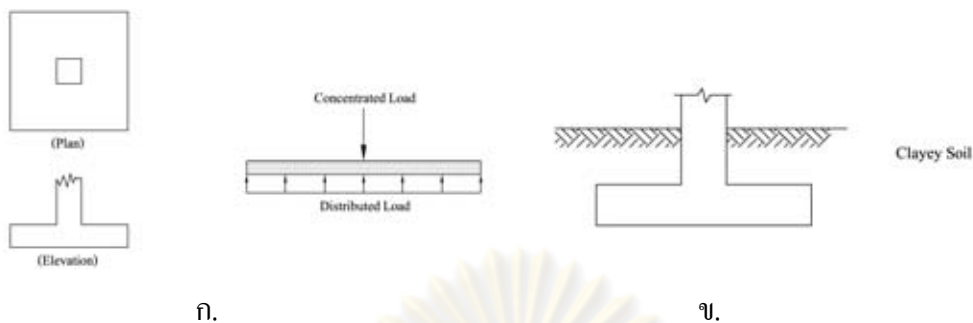
$$P_+ = P_- = 0.5 \quad (3.32)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ P ในสมการ 3.32 ใช้สำหรับตัวแปรสุ่มเพียงค่าเดียวในกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธี PEM

3.4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรเดียว

ตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อย่อนี้ ใช้กับฐานรากตื้น มีชื่อเฉพาะว่า ฐานรากผนังหรือฐานรากแถบ (strip footing) ที่ใช้กับบ้านที่อยู่อาศัยขนาด 2-3 ชั้น (ดูรูปที่ 3.5 หน้าที่ต่อไป)

กำหนดให้ค่าตัวประกอบ 3 ค่าของความสามารถรับโหลดจากฐานรากแถบ ได้แก่ N_c ที่ขึ้นอยู่กับค่าสมบัติของการยึดเกาะกัน (cohesion), N_q ที่ขึ้นอยู่กับค่าสมบัติความเสียดทาน กับค่า N_γ ที่ขึ้นอยู่กับค่าสมบัติของหน่วยน้ำหนักมวลสาร ที่อิงกับค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) ดังแสดงค่าตัวประกอบของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (bearing capacity) ไว้ในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 ฐานรากผนังหรือฐานรากแถบ (strip footing) รับโหลดปานกลาง
 ก. เป็นผัง (plan) ข. เป็นรูปตั้ง (elevation) ของฐานรากเดี่ยว

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวประกอบของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก strip footing ที่มีฐานขรุขระ (rough base) ใช้กับฐานรากที่วางตัวติดกับระดับน้ำใต้ดิน และมีความดันน้ำในโพรง (pore pressure) เกี่ยวข้องด้วย [คัดลอกจากหน้า 341 (Lee et al., 1983)]

| ϕ (degrees) | Bearing Capacity | | | $\tan \phi$ | $\cot \phi$ | $\frac{N_q}{N_c}$ |
|---------------------|------------------|-------|------------|-------------|-------------|-------------------|
| | Factors | | | | | |
| | N_c | N_q | N_γ | | | |
| 0 | 5.14 | 1.00 | 0.00 | 0 | ∞ | 0.19 |
| 5 | 6.5 | 1.6 | 0.07 | 0.08 | 11.4 | 0.23 |
| 10 | 8.5 | 2.5 | 0.37 | 0.18 | 5.67 | 0.28 |
| 15 | 11 | 4 | 1.13 | 0.27 | 3.73 | 0.37 |
| 20 | 15 | 6 | 2.87 | 0.37 | 2.75 | 0.40 |
| 25 | 21 | 10 | 6.77 | 0.47 | 2.14 | 0.47 |
| 30 | 30 | 17 | 15.6 | 0.58 | 1.73 | 0.56 |
| 35 | 46 | 33 | 37 | 0.70 | 1.43 | 0.65 |
| 40 | 75 | 64 | 93 | 0.84 | 1.19 | 0.80 |
| 45 | 134 | 134 | 262 | 1.00 | 1.00 | 0.90 |
| 50 | 267 | 320 | 873 | 1.19 | 0.84 | 1.20 |

โจทย์ตัวอย่างที่ 3.1

จากตารางที่ 3.2 หน้า 35 ค่าตัวประกอบ N_q เป็นฟังก์ชันของมุมความเสียดทาน ϕ ถ้ากำหนดให้ค่าการคาดหมายของ ϕ สำหรับฐานรากแถบ (strip footing) มีค่าเท่ากับ 30 องศา และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ จงคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ N_q

ผลเฉลย

จากหัวข้อ 3.1.4 ใช้สมการที่ 3.10 คำนวณหาค่า $\sigma[\phi]$ ได้เท่ากับ 3 องศา

จากหัวข้อ 3.4.2 ใช้สมการที่ 3.26 – 3.27 กับตาราง 3.2 ประกอบ เพื่อหาค่าประมาณของ ϕ ที่เป็นตัวแปรเดียว

$$\phi_+ = 30^\circ + 3^\circ = 33^\circ; N_{q_+} = 26.6$$

$$\phi_- = 30^\circ - 3^\circ = 27^\circ; N_{q_-} = 12.8$$

จากหัวข้อ 3.4.2 ใช้สมการที่ 3.30 หาค่าการคาดหมาย (ที่เท่ากับค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์)

$$\begin{aligned} E[N_q] &= \mu_{N_q} \approx P_+(N_{q_+}) + P_-(N_{q_-}) \\ &= 0.5(26.6) + 0.5(12.8) \\ &= 19.7 \end{aligned}$$

จากหัวข้อ 3.4.2 ใช้สมการที่ 3.31 หาค่าความแปรปรวน

$$\begin{aligned} [(S.D.)_{N_q}]^2 &= (\sigma_{N_q})^2 \approx P_+(N_{q_+})^2 + P_-(N_{q_-})^2 - (\mu_{N_q})^2 \\ &= 0.5(26.6)^2 + 0.5(12.8)^2 - (19.7)^2 \\ &= 47.6 \end{aligned}$$

นั่นคือ จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ $\sigma[N_q] = 6.899 = 6.9$

3.4.4 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องสองตัวแปร

ถ้าหากกำหนดให้ y เป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มของ x_1 และ x_2 ดังที่แสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 3.4 ข. หัวข้อ 3.4.1 ที่เป็นคานามีแรงปฏิกิริยารองรับสองตำแหน่ง นั่นคือ $y = y(x_1, x_2)$ ทำให้เขียนเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มสองค่า เป็น

$$y_{++} = y(x_{1+}, x_{2+}) \quad (3.33)$$

$$y_{+-} = y(x_{1+}, x_{2-}) \quad (3.34)$$

$$y_{-+} = y(x_{1-}, x_{2+}) \quad (3.35)$$

$$y_{--} = y(x_{1-}, x_{2-}) \quad (3.36)$$

ค่าการคาดการณืทั่วไป เมื่อหาที่ M^{th} moment มีค่าเป็น

$$E[y^M] = (P_{++}y_{++}^M) + (P_{+-}y_{+-}^M) + (P_{-+}y_{-+}^M) + (P_{--}y_{--}^M) \quad (3.37)$$

ในกรณีของสองตัวแปรสุ่มที่ไม่มีความสัมพันธ์กัน ค่า $E[y]$ กับ $V[y]$ เป็น

$$E[y] = \mu_y \approx (P_{++}y_{++}) + (P_{+-}y_{+-}) + (P_{-+}y_{-+}) + (P_{--}y_{--}) \quad (3.38)$$

$$V[y] = [\text{S.D.}]_y^2 = (\sigma[y])^2 \approx (P_{++}y_{++}^2) + (P_{+-}y_{+-}^2) + (P_{-+}y_{-+}^2) + (P_{--}y_{--}^2) \quad (3.39)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของความน่าจะเป็น P มีค่าเป็น

$$P_{++} = P_{--} = 0.25(1+\rho) \quad (3.40)$$

$$P_{+-} = P_{-+} = 0.25(1-\rho) \quad (3.41)$$

พจน์ตัวแปร ρ ที่อยู่ทางด้านขวาของสมการ 3.40-3.41 เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างตัวแปรสุ่ม x_1 และ x_2 และค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรสุ่ม เป็น

$$\bar{x}_1 = E[x_1]; \quad \bar{x}_2 = E[x_2] \quad (3.42)$$

ปกติค่าสัมประสิทธิ์ของ ρ จัดเป็นค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) มีค่าเป็นตัวเลขไร้มิติ มีเครื่องหมายเป็นบวก เครื่องหมายเป็นลบ หรือเป็นศูนย์ (แสดงว่า x_1 และ x_2 เป็นอิสระต่อกัน – independent ค่า ρ จึงเป็นศูนย์)

3.4.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรสองค่า

ตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อย่อนี้ ใช้กับการหาค่าโหลดสูงสุด ที่เป็นค่าความสามารถในการรับแรงแบกทานประลัย (ultimate bearing capacity, Q) ต่อหน่วยความยาวของฟุตติงยาว (long footing) ที่มีค่าตัวประกอบของความสามารถในการรับแรงแบกทานเป็น 3 ค่าระบุไว้ในตารางที่ 3.3

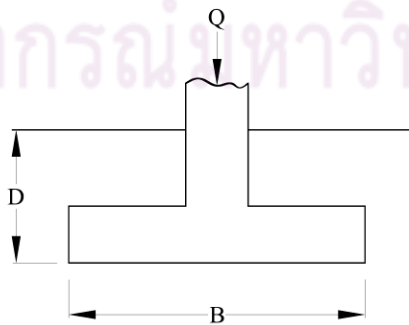
โจทย์ตัวอย่างที่ 3.2

ภาพตัดขวางของฟุตติงยาว ที่มีความกว้าง $B = 8$ ฟุต และฝังลึกใต้ระดับผิวดิน เท่ากับ $D = 4$ ฟุต (ดูรูปที่ 3.6) สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าโหลดสูงสุด Q ได้แก่

$$Q = \frac{\gamma B^2}{2} N_\gamma + \gamma D B N_q + c B N_c \quad (ก)$$

พจน์ γ เป็นค่าหน่วยน้ำหนักของดิน พจน์ c เป็นค่าการยึดเกาะกัน และพจน์ ϕ เป็นมุมเสียดทาน ค่าการคาดหมายกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวแปร แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 กำหนดให้สัมประสิทธิ์การแปรผัน $\rho(\phi, c) = -0.50$

จงหาค่าการคาดหมาย กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของความสามารถรับแรงแบกทาน Q



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของฟุตติงยาว

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวประกอบของ bearing capacity สำหรับ long footing ที่อิง
กับค่ามุมเสียดทาน [คัดลอกจากหน้า 214, (Harr, 1987)]

| ϕ degrees | N_γ | N_q | N_c |
|-------------------|------------|--------|--------|
| 0 | 0.00 | 1.00 | 5.14 |
| 5 | 0.45 | 1.57 | 6.49 |
| 10 | 1.22 | 2.47 | 8.34 |
| 15 | 2.65 | 3.94 | 10.98 |
| 20 | 5.39 | 6.40 | 14.83 |
| 25 | 10.88 | 10.66 | 20.72 |
| 30 | 22.40 | 18.40 | 30.14 |
| 35 | 48.83 | 33.30 | 46.12 |
| 40 | 109.41 | 64.20 | 75.31 |
| 42.5 | 170.25 | 91.90 | 99.20 |
| 45 | 271.75 | 134.87 | 133.87 |
| 50 | 762.86 | 319.06 | 266.88 |

ตารางที่ 3.4 ค่าที่กำหนดสำหรับโหนดตัวอย่างที่ 3.2 สำหรับ
ตัวแปรสุ่มในระบบ 3 พจน์ตัวแปร

| variable x | $E[x]$ | $\sigma[x]$ | x_+ | x_- |
|--------------------------|--------|-------------|-------|-------|
| $\gamma, \text{lb/ft}^3$ | 110 | 0 | 110 | 110 |
| $\phi, \text{degrees}$ | 35 | 5 | 40 | 30 |
| $c, \text{lb/ft}^2$ | 200 | 80 | 280 | 120 |

ผลเฉลย

จากหัวข้อ 3.4.2 ใช้สมการที่ 3.26-3.27 กับตารางที่ 3.4 เพื่อประมาณค่าของ ϕ ที่เป็นตัวแปรเดียว

$$\phi_+ = 35 + 5 = 40^\circ$$

$$\phi_- = 35 - 5 = 30^\circ$$

ในการทำงานเดียวกัน ใช้สมการ 3.26-3.27 และตารางที่ 3.3-3.4 จะหาตัวประกอบทั้ง 3 ค่าได้

$$N_{\gamma_+} = 109.41; N_{q_+} = 64.20; N_{c_+} = 75.31$$

$$N_{\gamma_-} = 22.40; N_{q_-} = 18.40; N_{c_-} = 30.14$$

เมื่อต้องการหาค่าโหลด Q ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ค่า ได้แก่ ϕ และ c (กำหนดให้หน่วยน้ำหนัก, γ เป็นค่าคงที่) หรือหาค่า $Q(\phi, c) = Q_{ij}$ หน่วยมีค่าเป็น ตัน (สั้น) = 2000 ปอนด์ต่อฟุต ก่อนใช้สมการ 3.38-3.39 เพื่อหาค่าการคาดหมาย หรือค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน ให้หาค่าประมาณของค่าฟังก์ชันต่อเนื่อง 2 ตัวแปร $y = y(x_1, x_2)$ โดยใช้สมการ 3.33-3.36 แยกเป็น 2 คอลัมน์ ดังนี้

| | Q_{ij} | $(Q_{ij})^2$ |
|----------|----------|--------------|
| Q_{++} | 389.90 | 152,022.63 |
| Q_{+-} | 341.70 | 116,760.53 |
| Q_{-+} | 105.56 | 11,143.93 |
| Q_{--} | 86.28 | 7,443.41 |

ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ที่จัดเป็น weighting function หาจากสมการ 3.40 – 3.41 แยกเป็น

| | |
|-----------------|-------|
| $\rho_{c,\phi}$ | -0.5 |
| P_{++} | 0.125 |
| P_{+-} | 0.375 |
| P_{-+} | 0.375 |
| P_{--} | 0.125 |

ใช้สมการ 3.38 หาค่าการคาดหมาย

$$\begin{aligned}
 E[y] &= (P_{++}y_{++}) + (P_{+-}y_{+-}) + (P_{-+}y_{-+}) + (P_{--}y_{--}) \\
 &= (0.125)(389.90) + (0.375)(341.70) + (0.375)(105.56) + (0.125)(86.28) \\
 &= 227.25 \text{ tons / ft}
 \end{aligned}$$

ใช้สมการ 3.39 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\begin{aligned}
 \sigma[y] &= \sqrt{(0.125)(152,022) + (0.375)(116,760) + (0.375)(11,144) + (0.125)(86.3)} \\
 &= 127.5 \text{ tons / ft}
 \end{aligned}$$

จากสมการ 3.10 หัวข้อ 3.1.5 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ของ Q

$$(C.O.V.)_Q = \frac{127.5}{227.25} \times 100 = 56.11\%$$

3.4.6 วิธี PEM สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องสามตัวแปร

ถ้าหากกำหนดให้ y เป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มของ x_1 , x_2 และ x_3 นั่นคือ $y = y(x_1, x_2, x_3)$ ทำให้เขียนเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มสามค่า เป็น

$$y_{+++} = y(x_{1+}, x_{2+}, x_{3+}) \quad (3.43)$$

$$y_{++-} = y(x_{1+}, x_{2+}, x_{3-}) \quad (3.44)$$

$$y_{+-+} = y(x_{1+}, x_{2-}, x_{3+}) \quad (3.45)$$

$$y_{+--} = y(x_{1+}, x_{2-}, x_{3-}) \quad (3.46)$$

$$y_{-++} = y(x_{1-}, x_{2+}, x_{3+}) \quad (3.47)$$

$$y_{-+-} = y(x_{1-}, x_{2+}, x_{3-}) \quad (3.48)$$

$$y_{--+} = y(x_{1-}, x_{2-}, x_{3+}) \quad (3.49)$$

$$y_{---} = y(x_{1-}, x_{2-}, x_{3-}) \quad (3.50)$$

ค่าการคาดหมายกรณีที่เป็น M^{th} expectation เขียนเป็นรูปแบบตัวแปรสามค่า ดังนี้

$$E[y^M] = (P_{+++}y_{+++}^M) + (P_{++-}y_{++-}^M) + \dots + (P_{---}y_{---}^M) \quad (3.51)$$

สมการ 3.49 มีทั้งหมด เท่ากับ $2^3 = 8$ พจน์ สำหรับวิธีเรียงสับเปลี่ยน (permutation) ของ เครื่องหมายบวกและลบ ค่าโอกาสความน่าจะเป็น P ของทั้ง 8 พจน์ แยกได้เป็น 4 สมการ

$$P_{+++} = P_{---} = \frac{1}{8}(1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (3.52)$$

$$P_{++-} = P_{--+} = \frac{1}{8}(1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (3.53)$$

$$P_{+-+} = P_{-+-} = \frac{1}{8}(1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (3.54)$$

$$P_{+--} = P_{-++} = \frac{1}{8}(1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (3.55)$$

พจน์ตัวแปรที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, ρ) ในสมการ 3.52-3.55 เขียนเป็นพจน์ทั่วไป ได้เป็น ρ_{ij} หมายถึง สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม x_i และ x_j การระบุเครื่องหมาย ใช้การคูณระหว่าง i กับ j

3.4.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธี PEM สำหรับตัวแปรสามค่า

โจทย์ตัวอย่างในกรณีใช้วิธี PEM สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ 3 ตัวแปรนี้ ใช้วิธีการสมมุติ จากคานเหล็กที่มีสภาพพลาสติกสูง (high plasticity)

โจทย์ตัวอย่างที่ 3.3

ค่าความสามารถของการต้านแรงดัด (flexural capacity) ของคานเหล็กที่มีสภาพพลาสติกสูง คือ $(y)(z)$ พจน์ y เป็นกำลังวัสดุที่จุดคราก (yield strength) และพจน์ z เป็นมอดูลัสหน้าตัด (section modulus) และโมเมนต์ของแรงดัด (bending moment) ของหน้าตัดที่กำหนด คือ m กำหนดให้มีค่าสถิติต่าง ๆ เชิงความน่าจะเป็น ดังตารางที่

ตารางที่ 3.5 ค่าที่กำหนด สำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 3.3 สำหรับ
ตัวแปรสุ่มในระบบที่มี 3 พจน์ตัวแปร

| variable | expected value | coefficient of variation |
|----------|--------------------|--------------------------|
| y | 40 ksi | 12.5% |
| z | 50 in ³ | 5% |
| m | 1000 in. (kips) | 20% |

กำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $\rho_{y,z} = 0.4$, $\rho_{y,m} = 0$, $\rho_{z,m} = 0$ จงหาค่าการคาดหมายกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของคานเหล็กนี้ หน่วยกำลังวัสดุ ksi = 1000 lbs/in²; หน่วยโมเมนต์ in. (kips) = inches x 1000 lbs

ผลเฉลย

จากหัวข้อ 3.4.2 ใช้สมการที่ 3.26-3.27 กับตารางที่ 3.5 เพื่อประมาณค่าของ y, z, m ที่เป็นตัวแปรเดี่ยว

$$y_+ = 40 + 5 = 45; \quad z_+ = 50 + 2.5 = 52.5; \quad m_+ = 1000 + 200 = 1200$$

$$y_- = 40 - 5 = 35; \quad z_- = 50 - 2.5 = 47.5; \quad m_- = 1000 - 200 = 800$$

เมื่อพิจารณาเรื่องแรงดัดในคานเหล็ก เมื่อสมมติให้พจน์ SM เป็นค่าขอบความปลอดภัย (safety margin) 'ได้แก่'

$$SM = yz - m$$

ใช้สมการของ 3.52-3.55 หาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของ P

$$P_{i,j,k} = \frac{1}{8}[1 + (i,j)(0.4)] = 0.175; i = j$$

$$= 0.075; i \neq j$$

ส่วนค่า P ค่าอื่นนั้น เนื่องจากโจทย์ระบุ $\rho_{y,m} = \rho_{z,m} = 0$

ข้างล่างนี้เป็นการแสดงคอลัมน์การคำนวณหาค่า $E[SM]$ กับค่า $E[SM^2]$ ดังนี้

| SM(y, z, m) | SM _{ijk} | P _{ijk} | SM _{ijk} P _{ijk} | SM _{ijk} ² (1×10 ⁶) | SM _{ijk} ² P _{ijk} (1×10 ⁶) |
|------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|---|--|
| S ₊₊₊ | 1162.5 | 0.175 | 203.44 | 1.351 | 0.237 |
| S ₊₊₋ | 1562.5 | 0.175 | 273.44 | 2.441 | 0.427 |
| S ₊₋₋ | 937.5 | 0.075 | 70.31 | 0.879 | 0.066 |
| S ₊₋ | 1337.5 | 0.075 | 100.31 | 1.789 | 0.134 |
| S ₋₊₊ | 637.5 | 0.075 | 47.81 | 0.406 | 0.030 |
| S ₋₊₋ | 1037.5 | 0.075 | 77.81 | 1.076 | 0.081 |
| S ₋₋₊ | 462.5 | 0.175 | 80.94 | 0.214 | 0.038 |
| S ₋₋₋ | 862.5 | 0.175 | 150.94 | 0.744 | 0.130 |
| | | E[SM] = | 1005.00 | E[SM ²] = | 1.143 × 10 ⁶ |

จากการที่สมมติให้การแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มทั้งสาม (y, z, m) เป็นแบบปกติ ใช้สมการที่ 3.22 หัวข้อ 3.4.1 หาค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของพจน์ SM ที่เป็น safety margin

$$\sigma[SM] = \sqrt{E[SM^2] - (E[SM])^2}$$

$$= \sqrt{1.143 \times 10^6 - (1005)^2} = 363.97$$

ใช้สมการ 3.10 หัวข้อย่อย 3.1.4 หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของ SM

$$(C.O.V.)_{SM} = \frac{\sigma[SM]}{E[SM]} \times 100 = \frac{363.97}{1005} \times 100 = 36.22\%$$

3.5 วิธีประยุกต์อนุกรมเทย์เลอร์

ปัญหาหลักในการประเมินเชิงความน่าจะเป็น 'ได้แก่' ในระบบที่ต้องตรวจสอบมีตัวแปรสุ่มหลายค่า ถ้าหากใช้วิธีประมาณค่าเป็นจุด จะมีความยุ่งยากมาก ทำนองเดียวกันถ้าหากใช้วิธีกำหนดให้ฟังก์ชันเป็นแบบหาปริพันธ์ซ้อน (iterated integration) ก็จะมี ความยุ่งยากมากในการแก้ปัญหา

3.5.1 อนุกรมเทย์เลอร์พื้นฐาน

อนุกรมเทย์เลอร์ หรือชื่อเต็มว่า "Taylor's series expansion" ปกติใช้กับฟังก์ชันที่ไม่มีลักษณะเชิงเส้น (linear) กำหนดให้การกระจายอนุกรม (series expansion) สำหรับทุกจำนวนอันตะ (all finite values) ของตัวแปรสุ่ม x เป็นแบบการลู่เข้า (convergence)

กำหนดให้ $y = f(x_N)$ ได้ค่าการประมาณเป็น

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (3.56)$$

ถ้าหากทุกค่าของตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง เช่น x_i จะเป็นอิสระ (independent) กับค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (\bar{x}_i) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [(S.D.) $_{x_i}$ หรือ $\sigma(x_i)$] Harr (1977) เสนอแนะว่าสามารถใช้การประมาณค่าจากอนุกรมเทย์เลอร์

$$\bar{y} = E[y] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_N) + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\partial^2 F}{\partial x_i^2} (\sigma[x_i])^2 \quad (3.57)$$

จากสมการ 3.54 เนื่องจากนิพจน์ที่สองของสมการทางด้านขวา สามารถละได้ (negligible) ทำให้ได้

$$\bar{y} = E[y] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_N) \quad (3.58)$$

ในการวิเคราะห์เชิงเทคนิค ค่าตัวแปรสุ่มหลายค่า เช่น ความเสียหาย ค่าการยึดเกาะกัน ค่าหน่วยน้ำหนัก สามารถหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน ในรูปแบบเดียวกันกับการหาค่าจากตัวแปรสุ่มเดียว

3.5.2 การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวแปรโดยใช้โปรแกรมทแยง

การวิเคราะห์ตัวแปรสุ่มโดยใช้โปรแกรมทแยงนี้ ผู้วิจัยโครงการนี้กำหนดให้ใช้กับการแจกแจงฟังก์ชัน 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบปกติ และรูปแบบลอการิทึมปกติ นอกจากนี้ยังมีสมการพื้นฐานหลายสมการที่เกี่ยวข้องกับการแจกแจงฟังก์ชัน ดังแสดงไว้ในหัวข้อย่อก่อนนำมาหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

ก. ค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

กรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ (normal) สมการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายกับค่าเชิงสถิติอื่น ๆ จะใช้สมการที่ 3.4 กับสมการ 3.9 - 3.10 ในบทนี้

Ang and Tang (1984, 2007) เสนอแนะสมการเชิงประจักษ์ (empirical equation) ในกรณีของตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) ถ้ากำหนดสัญลักษณ์พจน์ตัวแปรใหม่ ดังนี้

- μ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่มในการแจกแจงแบบปกติ
- σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มในการแจกแจงแบบปกติ
- λ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่มในการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ
- ζ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มในการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ

ค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่มแบบลอการิทึมปกติ คือ

$$\lambda_z = E[\ln Z] = \sum_{i=1}^N \lambda_{x_i} \quad (3.59)$$

$$\lambda_z = \ln[\mu_z] - \frac{1}{2}(\zeta_z)^2 \quad (3.60)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มแบบลอการิทึมปกติ คือ

$$(\zeta_z)^2 = \text{Variance of } \ln Z = \sum_{i=1}^N (\zeta_{x_i})^2 \quad (3.61)$$

$$(\zeta_z)^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_z}{\mu_z} \right)^2 \right] \quad (3.62)$$

ข. ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

ถ้าหากมีการแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม ที่อาจเป็นแบบปกติหรือเป็นแบบลอการิทึมปกติ แล้วค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีโอกาสเป็นค่านี้มากที่สุด หรือมีชื่อเรียกว่า “Most Likely Value of Factor of Safety, $(F.S.)_{MLV}$ ” ได้แก่ (Wolff, 1994; Duncan and Wright, 2005)

$$(F.S.)_{MLV} = \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-) + \dots + (F_N^+ + F_N^-)}{2(N)} \quad (3.63)$$

นิยามของพจน์ F_1^+ ในสมการ 3.63 เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากวิธีเชิงกำหนด (deterministic method) ที่ใช้ตัวแปรที่หนึ่ง และตัวแปรที่หนึ่งนี้ มีการเพิ่มขึ้นจากเดิม เท่ากับ 1 S.D. ในขณะที่นิยามของพจน์ F_1^- ในสมการ 3.63 เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากวิธีเชิงกำหนด (deterministic method) ที่ใช้ตัวแปรที่หนึ่ง และตัวแปรที่หนึ่งนี้ มีการลดลงจากเดิม เท่ากับ 1 S.D. เขียนค่าฟังก์ชันของตัวแปรที่หนึ่ง เป็น

$$x_1^+ = (\text{mean})_1 + 1(\text{S.D.})_1 \quad (3.64)$$

$$x_1^- = (\text{mean})_1 - 1(\text{S.D.})_1 \quad (3.65)$$

ค่านิพจน์ด้านขวาที่เป็น $(\text{mean})_1 + 1(\text{S.D.})_1$ ในสมการ 3.64 นำไปแทนค่าในสมการหาอัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้วิธีเชิงกำหนด ในขณะที่ค่าตัวแปรอื่นใช้ค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ปกติ ค่าผลลัพธ์ที่ได้ คือ F_1^+ ในทำนองเดียวกัน ค่านิพจน์ด้านขวาที่เป็น $(\text{mean})_1 - 1(\text{S.D.})_1$ ในสมการ 3.65 ในขณะที่ค่าตัวแปรอื่นใช้ค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ปกติ ค่าผลลัพธ์ที่ได้ คือ F_1^-

อนึ่งในความหมายของคำว่า mean ถ้าเป็นตัวแปรสุ่มปกติ จะใช้ค่าพจน์ μ แทนในสมการ 3.64-3.65 แต่ถ้าเป็นตัวแปรสุ่มลอการิทึมปกติ จะใช้ค่าพจน์ λ แทนในสมการ 3.64-3.65 ส่วนความหมายของคำว่า S.D. ถ้าเป็นตัวแปรสุ่มปกติ จะใช้ค่าพจน์ σ แทน แต่ถ้าเป็นตัวแปรสุ่มลอการิทึมปกติ จะใช้ค่าพจน์ ζ แทน

ใช้วิธีการเดียวกัน จะเขียนพจน์ของตัวแปรที่สอง จนถึงตัวแปรที่ N ได้

$$x_2^+ = (\text{mean})_2 + 1(\text{S.D.})_2 \quad (3.66)$$

$$x_2^- = (\text{mean})_2 - 1(\text{S.D.})_2 \quad (3.67)$$

$$x_3^+ = (\text{mean})_3 + 1(\text{S.D.})_3 \quad (3.68)$$

$$x_3^- = (\text{mean})_3 - 1(\text{S.D.})_3 \quad (3.69)$$

$$x_N^+ = (\text{mean})_N + 1(\text{S.D.})_N \quad (3.70)$$

$$x_N^- = (\text{mean})_N - 1(\text{S.D.})_N \quad (3.71)$$

สมการที่ 3.66 ถึงสมการ 3.71 ค่าตัวแปรสุ่ม x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) เป็นการสมมุติให้ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติหรือแบบลอการิทึมปกติ

ค. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่น่าจะเป็นมากที่สุด

วิธีการในหัวข้อย่อนี้ คัดลอกจากหน้า 205 (Duncan and Wright, 2005) ซึ่งเสนอแนะวิธีการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) กับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (C.O.V.) ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มแต่ละตัวแปร จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดหรือจากการตรวจสอบภาคสนาม ยกตัวอย่าง $(\text{S.D.})_1 =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มที่หนึ่ง (กำลังวัสดุเนื้อ); $(\text{S.D.})_2 =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มที่สอง (มุมเสียดทาน); $(\text{S.D.})_N =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มที่ N (หน่วยน้ำหนัก) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้มีความแปรผันกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ไม่ใช่กับตัวแปรสุ่มแรงต้าน หรือแรงไถลเลื่อน ชุดใดชุดหนึ่ง) จากสมการ

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_N}{2}\right)^2} \quad (3.72)$$

พจน์ $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3, \Delta F_N$ มีความหมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณมาจากการเพิ่มหรือลด 1 S.D. ที่ระบุวิธีไว้ในหัวข้อ ก. เขียนเป็นสมการดังนี้

$$\Delta F_1 = (F_1^+) - (F_1^-) \quad (3.73)$$

$$\Delta F_2 = (F_2^+) - (F_2^-) \quad (3.74)$$

$$\Delta F_3 = (F_3^+) - (F_3^-) \quad (3.75)$$

$$\Delta F_N = (F_N^+) - (F_N^-) \quad (3.76)$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันนี้มีความแปรผันกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย จากสมการ

$$(C.O.V.)_{FS} = \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \quad (3.77)$$

เมื่อทราบค่าของ $(F.S.)_{MLV}$ กับค่า σ_{FS} ทำให้สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ หรือนำไปใช้ในการหาค่าโอกาสการพังทลาย ซึ่งค่าทั้งสองค่านี้จะเป็นค่าที่มีความน่าจะเป็นไปได้มากที่สุด

3.5.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลมเทเลอร์สำหรับหลายตัวแปร

โจทย์ตัวอย่างนี้ ดัดแปลงมาจากโจทย์ตัวอย่างหน้า 468 (Liu and Evett, 1998) ที่เป็นการหาเสถียรภาพของความลาดที่มีระนาบประาะบางตัดผ่าน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเป็นฟังก์ชันกับตัวแปรสุ่มเพียง 3 ค่า ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกัน (cohesion, c) ค่ามุมเสียดทานภายใน (angle of internal friction, ϕ) ค่ามุมเอียงของระนาบการพังทลาย (failure plane angle, ψ_p) ส่วนตัวแปรอื่นกำหนดให้เป็นค่าคงที่

โจทย์ตัวอย่างที่ 3.4

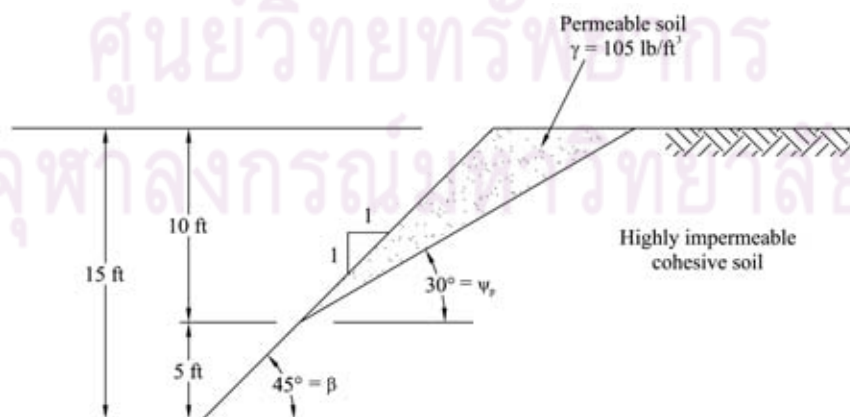
ในภาพตัดขวางของรูปที่ 3.7 แสดงความลาดของมวลดิน กำหนดสมการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย ดังนี้

$$\text{F.S.} = \frac{cL + W \cos \psi_p \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (\text{ก})$$

พจน์ β เป็นมุมความลาด = 45 องศา พจน์ ψ_p เป็นมุมระนาบการพังทลายในแนวระนาบเชิงเส้น (ระนาบ L ของสมการ ก) = 30 องศา พจน์ W เป็นน้ำหนักมวลดินที่เกิดการพังทลายแนวระนาบ ความสูงในแนวตั้งของมวลดินความลาดที่จะพัง = 10 ฟุต ความสูงชั้นตะกั่วทั้งหมด = 15 ฟุต ส่วนตัวแปร c เป็นค่าการยึดเกาะกัน และ ϕ เป็นมุมเสียดทาน กำหนดค่าเชิงสถิติของตัวแปร (c, ϕ, ψ_p) ที่ระบุในตาราง ที่ 3.6 ถ้าหน่วยน้ำหนักดิน, $\gamma = 105$ ปอนด์ต่อลบ.ฟุต ต้องการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของอัตราส่วนปลอดภัย ที่มีการแจกแจงฟังก์ชัน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบปกติ และแบบลอการิทึมปกติ

ตารางที่ 3.6 ค่าเชิงสถิติของตัวแปร c 3 พจน์ตัวแปร

| ตัวแปร | ค่าเฉลี่ย (μ_x) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_x) |
|------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| c , ปอนด์ ต่อ ตร.ฟุต | 150 | 10 |
| ϕ , องศา | 25 | 3 |
| ψ_p , องศา | 30 | 2 |



รูปที่ 3.7 ภาพตัดขวางของความลาดมวลดินที่มีการพังทลายแนวระนาบ

ผลเฉลย

ใช้ความรู้เชิงเรขาคณิต จะได้ค่าน้ำหนักมวล $W = 3843$ ปอนด์ต่อฟุต นำค่าที่ระบุไปแทนในสมการ (ก) ได้ค่ากลางของอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด $= 2.37$

ก. การแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

จากสมการ ก. มีตัวแปรสุ่ม 2 พจน์ กำหนดให้ c เป็นตัวแปรสุ่มที่หนึ่ง และ ϕ เป็นตัวแปรสุ่มที่สอง และมุม ψ_p เป็นตัวแปรที่สาม สมมุติกรณีแรกเป็นการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

$$c^+ = x_1^+ = (\text{mean})_1 + 1(\text{S.D.})_1 = [150 + 10] = 160 \text{ lb/ft}^2$$

$$c^- = x_1^- = (\text{mean})_1 - 1(\text{S.D.})_1 = [150 - 10] = 140 \text{ lb/ft}^2$$

$$\phi^+ = x_2^+ = (\text{mean})_2 + 1(\text{S.D.})_2 = [25 + 3] = 28 \text{ degrees}$$

$$\phi^- = x_2^- = (\text{mean})_2 - 1(\text{S.D.})_2 = [25 - 3] = 22 \text{ degrees}$$

$$\psi_p^+ = x_3^+ = (\text{mean})_3 + 1(\text{S.D.})_3 = [30 + 2] = 32 \text{ degrees}$$

$$\psi_p^- = x_3^- = (\text{mean})_3 - 1(\text{S.D.})_3 = [30 - 2] = 28 \text{ degrees}$$

นำไปแทนค่าในสมการ ก. จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$F_1^+ = 2.473 \quad F_1^- = 2.265 \quad \Delta F_1 = 0.208$$

$$F_2^+ = 2.482 \quad F_2^- = 2.261 \quad \Delta F_2 = 0.221$$

$$F_3^+ = 2.543 \quad F_3^- = 2.258 \quad \Delta F_3 = 0.285$$

ใช้สมการ 3.63 หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

$$(F.S.)_{MLV} = \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-)}{2(3)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(2.473 + 2.265) + (2.482 + 2.261) + (2.543 + 2.258)}{6} \\
 &= 2.380
 \end{aligned}$$

ใช้สมการที่ 3.72 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงฟังก์ชันปกติ สำหรับอัตราส่วนผลตอบแทนของระบบ

$$\begin{aligned}
 \sigma_{FS} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{0.208}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.221}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.285}{2}\right)^2} = 0.208
 \end{aligned}$$

ใช้สมการที่ 3.77 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของการแจกแจงฟังก์ชันปกติ สำหรับอัตราส่วนผลตอบแทนของระบบ

$$\begin{aligned}
 (C.O.V.)_{FS} &= \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \\
 &= \frac{0.208}{2.380} = 8.74\%
 \end{aligned}$$

ข. การแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

ใช้การแก้ปัญหาแบ่งออกเป็น 3 วิธี

วิธีแรก

เนื่องจากโจทย์กำหนดค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบของการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ จึงต้องใช้สมการ 3.59 และสมการ 3.62 มาหาค่าเชิงสถิติในรูปแบบการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ ได้ค่า

พจน์ตัวแปรที่หนึ่ง $(\zeta_1)^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_1^2}{\mu_1^2} \right]$

$$= \ln \left[1 + \frac{10^2}{150^2} \right] = 0.00443 \text{ [lb/ft}^2]^2$$

$$\zeta_1 = 0.067 \text{ lb/ft}^2$$

พจน์ตัวแปรที่หนึ่ง $\lambda_1 = \ln \left[(\mu_1) + \frac{1}{2} (\zeta_1)^2 \right]$

$$= \ln \left[150 + \frac{1}{2} (0.00443)^2 \right] = 5.011 \text{ lb/ft}^2$$

พจน์ตัวแปรที่สอง $(\zeta_2)^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_2^2}{\mu_2^2} \right]$

$$= \ln \left[1 + \frac{3^2}{25^2} \right] = 0.0143 \text{ [degrees]}^2$$

$$\zeta_2 = 0.120 \text{ degrees}$$

พจน์ตัวแปรที่สอง $\lambda_2 = \ln \left[(\mu_2) + \frac{1}{2} (\zeta_2)^2 \right]$

$$= \ln \left[25 + \frac{1}{2} (0.0143)^2 \right] = 3.219 \text{ degrees}$$

พจน์ตัวแปรที่สาม $(\zeta_3)^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_3^2}{\mu_3^2} \right]$

$$= \ln \left[1 + \frac{2^2}{30^2} \right] = 0.00443 \text{ [degrees]}^2$$

$$\zeta_3 = 0.067 \text{ degrees}$$

พจน์ตัวแปรที่สาม

$$\lambda_3 = \ln \left[(\mu_3) + \frac{1}{2} (\zeta_3)^2 \right]$$

$$= \ln \left[30 + \frac{1}{2} (0.00443)^2 \right] = 3.401 \text{ degrees}$$

นำค่า λ กับ ζ ไปแทนเพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีการเพิ่มกับลด 1 S.D.

$$c^+ = x_1^+ = (\text{mean})_1 + 1(\text{S.D.})_1 = [5.011 + 0.067] = 5.078 \text{ lb/ft}^2$$

$$c^- = x_1^- = (\text{mean})_1 - 1(\text{S.D.})_1 = [5.011 - 0.067] = 4.944 \text{ lb/ft}^2$$

$$\phi^+ = x_2^+ = (\text{mean})_2 + 1(\text{S.D.})_2 = [3.219 + 0.120] = 3.339 \text{ degrees}$$

$$\phi^- = x_2^- = (\text{mean})_2 - 1(\text{S.D.})_2 = [3.219 - 0.120] = 3.099 \text{ degrees}$$

$$\psi_p^+ = x_3^+ = (\text{mean})_3 + 1(\text{S.D.})_3 = [3.401 + 0.067] = 3.468 \text{ degrees}$$

$$\psi_p^- = x_3^- = (\text{mean})_3 - 1(\text{S.D.})_3 = [3.401 - 0.067] = 3.334 \text{ degrees}$$

นำไปแทนค่าในสมการ ก. จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

| | | | | | | | | |
|---------|---|-------|---------|---|-------|--------------|---|-------|
| F_1^+ | = | 1.120 | F_1^- | = | 1.115 | ΔF_1 | = | 0.005 |
| F_2^+ | = | 1.153 | F_2^- | = | 1.082 | ΔF_2 | = | 0.071 |
| F_3^+ | = | 1.096 | F_3^- | = | 1.140 | ΔF_3 | = | 0.044 |

ใช้สมการ 3.63 หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

$$\begin{aligned}
 (F.S.)_{MLV} &= \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-)}{2(3)} \\
 &= \frac{(1.120 + 1.115) + (1.153 + 1.082) + (1.096 + 1.140)}{6} \\
 &= 1.118
 \end{aligned}$$

ใช้สมการที่ 3.72 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงฟังก์ชันลอคการิทึมปกติ สำหรับอัตราส่วนปลอดภัยของระบบ

$$\begin{aligned}
 \sigma_{FS} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{0.005}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.071}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.044}{2}\right)^2} = 0.042
 \end{aligned}$$

ใช้สมการที่ 3.77 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของการแจกแจงฟังก์ชันลอคการิทึมปกติ สำหรับอัตราส่วนปลอดภัยของระบบ

$$\begin{aligned}
 (C.O.V.)_{FS} &= \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \\
 &= \frac{0.042}{1.118} = 3.76\%
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ

เมื่อมีค่าพจน์ตัวแปรสุ่มของมุม ψ_p มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอคการิทึม ย่อมทำให้ค่ามิติ L กับค่าน้ำหนัก W ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$\text{ค่า } L \text{ กลาง} = 168.556 \text{ ft}; \quad \text{ค่า } L^+ = 165.314 \text{ ft}; \quad \text{ค่า } L^- = 171.950 \text{ ft}$$

$$\text{ค่า } W \text{ กลาง} = 83,089.974 \text{ lb/ft}; \quad \text{ค่า } W^+ = 81,382.824 \text{ lb/ft};$$

$$\text{ค่า } W^- = 84,875.340 \text{ lb/ft}$$

วิธีที่สอง

เนื่องจากโจทย์กำหนดค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบของการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ อาจใช้วิธีการประมาณ (approximate) ที่ผู้วิจัยโครงการนี้ นำเสนอมาเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีแรก ด้วยการทำให้ทุกพจน์ของตัวแปรสุ่ม อยู่ในรูปแบบของลอการิทึม ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่หนึ่ง} &= c = x_1 \\ &= \ln[150] \\ &= 5.0106 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่หนึ่ง ที่เพิ่ม 1 S.D.} &= c^+ = x_1^+ \\ &= \ln[150 + 10] \\ &= 5.075 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่หนึ่ง ที่ลดลง 1 S.D.} &= c^- = x_1^- \\ &= \ln[150 - 10] \\ &= 4.942 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สอง} &= \phi = x_2 \\ &= \ln[25] \\ &= 3.219 \text{ degrees} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สอง ที่เพิ่ม 1 S.D.} &= \phi^+ = x_2^+ \\ &= \ln[25 + 3] \\ &= 3.332 \text{ degrees} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สอง ที่ลดลง 1 S.D.} &= \phi^- = x_2^- \\ &= \ln[25 - 3] \\ &= 3.091 \text{ degrees} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สาม} &= \psi_p = x_3 \\
 &= \ln[30] \\
 &= 3.401 \text{ degrees}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สาม ที่เพิ่ม 1 S.D.} &= \psi_p^+ = x_3^+ \\
 &= \ln[30 + 2] \\
 &= 3.466 \text{ degrees}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าตัวแปรที่เป็นค่ากลางของตัวแปรกลุ่มที่สาม ที่ลดลง 1 S.D.} &= \psi_p^- = x_3^- \\
 &= \ln[30 - 2] \\
 &= 3.332 \text{ degrees}
 \end{aligned}$$

นำไปแทนค่าในสมการ (ก) จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$\begin{array}{lll}
 F_1^+ = 1.120 & F_1^- = 1.115 & \Delta F_1 = 0.005 \\
 F_2^+ = 1.154 & F_2^- = 1.080 & \Delta F_2 = 0.074 \\
 F_3^+ = 1.100 & F_3^- = 1.145 & \Delta F_3 = 0.045
 \end{array}$$

ใช้สมการ 3.63 หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

$$\begin{aligned}
 (F.S.)_{MLV} &= \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-)}{2(3)} \\
 &= \frac{(1.120 + 1.115) + (1.154 + 1.080) + (1.100 + 1.145)}{6} \\
 &= 1.119
 \end{aligned}$$

ใช้สมการที่ 3.72 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงฟังก์ชันลอการิทึมปกติ สำหรับอัตราส่วนปลอดภัยของระบบ

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.005}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.074}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.045}{2}\right)^2} = 0.043$$

ใช้สมการที่ 3.77 หัวข้อ 3.5.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของการแจกแจงฟังก์ชันลอกการิทึมปกติ สำหรับอัตราส่วนปลอดภัยของระบบ

$$\begin{aligned} (\text{C.O.V.})_{\text{FS}} &= \frac{\sigma_{\text{FS}}}{(\text{F.S.})_{\text{MLV}}} \\ &= \frac{0.043}{1.119} = 3.84\% \end{aligned}$$

หมายเหตุ

เมื่อมีค่าพจน์ตัวแปรสุ่มของมุม ψ_p มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอกการิทึม ย่อมทำให้ค่ามิติ L กับค่าน้ำหนัก W ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า } L \text{ กลาง} &= 168.566 \text{ ft}; & \text{ค่า } L^+ &= 165.409 \text{ ft}; & \text{ค่า } L^- &= 172.053 \text{ ft} \\ \text{ค่า } W \text{ กลาง} &= 83,089.974 \text{ lb/ft}; & \text{ค่า } W^+ &= 81,429.610 \text{ lb/ft}; \\ \text{ค่า } W^- &= 84,592.008 \text{ lb/ft} \end{aligned}$$

วิธีที่สาม

เนื่องจาก โจทย์กำหนดค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบของการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ อาจใช้วิธีการประมาณ (approximate) ที่ Duncan and Wright (2005, หน้า 206) เสนอแนะว่า ถึงแม้ว่า ตัวแปรสุ่มจะมีการแจกแจงแบบปกติ แต่เมื่อนำค่ามาใช้หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความจะเป็นมากที่สุด $(\text{F.S.})_{\text{MLV}}$ แสดงว่าค่า F.S. นั้นมีความน่าจะเป็นที่ใช้กับการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอกการิทึมปกติ เพราะเกิดจากการทำปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หลายครั้ง (บวก ลบ คูณ หาร)

ดังนั้น เมื่อกำหนดค่า $(\text{F.S.})_{\text{MLV}}$ จากสมการ 3.63 ในหัวข้อ ก. (ที่สมมุติให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ) ก็นำมาใช้หาค่า $(\text{F.S.})_{\text{MLV}}$ ที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอกการิทึมปกติด้วย (ใช้

เป็นค่าเดียวกัน) ซึ่งมีผลต่อมากคือ ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ที่หาจากสมการ 3.72 กับสมการ 3.77 ใช้กับการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติด้วย (ค่าเดียวกัน)

ข้อสรุปจากผลลัพธ์การวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ กับการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ ค่า $(F.S.)_{MLV} = 2.380$ ของการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติมีความใกล้เคียงกับการวิเคราะห์เชิงกำหนด $(F.S. = 2.370)$ แต่วิธีที่หนึ่งของการสมมติให้มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติค่า $(F.S.)_{MLV} = 1.118$ วิธีที่สองให้มีการแจกแจงแบบลอการิทึมค่า $(F.S.)_{MLV} = 1.119$ ของการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ แตกต่างกับค่า F.S. ที่ได้จากวิธีเชิงกำหนดมาก $(F.S. = 2.370)$

สรุปได้ว่า ในกรณีของโจทย์ตัวอย่างข้อนี้ควรใช้ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติ เป็นค่าผลลัพธ์ กับใช้การแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติในการ ออกแบบจำลอง และตัดค่าผลลัพธ์ของการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติออก เพราะความน่าเชื่อถือก่อนข้างต่ำ

ในส่วนของวิธีที่สามนั้นกำหนดให้ใช้ $(F.S.)_{MLV} = 2.380$ ได้ค่าเดียวกับกับวิธีที่หนึ่งของการแจกแจงแบบปกติ จึงควรใช้วิธีที่สาม (สำหรับการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกตินี้) ในการหาค่าเชื่อถือได้ในระบบกับใช้การแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติในการออกแบบจำลอง เช่นเดียวกัน

3.6 แนวทางการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้และค่าโอกาสการพังทลาย

การศึกษาความเชื่อถือได้หรือการตรวจวัดความไว้วางใจได้ (measure of reliability) เป็นการหาค่าดัชนี (ปกติเป็นตัวเลข) ที่แสดงถึงความปลอดภัยของระบบ คือ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index) และค่าโอกาส (ความน่าจะเป็น) ของการพังทลาย (probability of failure) ผู้วิจัยโครงการนี้ได้ค้นคว้าและอ้างอิงกับเอกสารหลายรายการ ที่สำคัญ ได้แก่ Lee et al. (1983), Whitman (1984) Ang and Tang (1975, 2007), Ang and Tang (1984), Harr (1987), Li and Lumb (1987), Christian (1996), Wolff (1996), Duncan (2000), Christian and Baecher (2001), Duncan and Wright (2005) โดยที่ผู้วิจัยโครงการขอสรุปวิธีการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นทั้งสองค่านี้ ออกเป็น 2 แนวทาง

3.6.1 แนวทางแรก

แนวทางแรกนี้ เป็นวิธีปกติที่ใช้กันแพร่หลาย ซึ่งการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็น จะอิงกับค่าของขอบความปลอดภัย (safety margin) หลักการสำคัญของแนวทางแรกนี้ มีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง

เป็นการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ซึ่งปกติกำหนดให้

$$FS = \frac{R}{Q} \quad (3.78)$$

พจน์ R เป็นค่าระบุ (nominal value) ของฟังก์ชันที่ด้านการพังทลาย เช่น เป็นค่ากำลังวัสดุของมวลสาร ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในมวลสาร เป็นต้น หรือเรียกว่าเป็นค่าฟังก์ชันกำลังความสามารถของมวลสาร (capacity function)

ในขณะที่พจน์ Q เป็นค่าระบุของฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดการพังทลาย หรือเรียกว่าเป็น ฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำในมวลสาร (demand function) เช่น เป็นค่าความเค้นที่เกิดจากโหลด (น้ำหนักบรรทุก) มากระทำต่อมวลสาร หรืออาจเป็นความเค้นที่เกิดจากแรงของแผ่นดินไหว ความเค้นจากแรงดันน้ำในมวลสาร และความเค้นเชิงพลศาสตร์อื่น



รูปที่ 3.8 แบบจำลองของการหาอัตราส่วน ค่าความต้านต่อการพังทลาย ที่เป็นค่าฟังก์ชัน R ต่อค่าโหลด (น้ำหนักบรรทุก) ที่เป็นฟังก์ชัน Q

ขั้นตอนที่สอง

เป็นการหาค่ากลาง (ค่าเฉลี่ย) ของอัตราส่วนความปลอดภัย โดยใช้เหตุผลที่ว่า ในระบบของการตรวจสอบมีการแปรปรวนของค่าสมบัติมวลสาร หรือมีความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดสอบ เมื่อต้องการหาค่าดัชนีที่เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัย ควรหาจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร หรือเรียกชื่อใหม่ว่า เป็นค่ากลางอัตราส่วนปลอดภัย เรียกชื่อค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นแบบนี้ว่า central factor of safety (CFS) แสดงเป็นสมการในรูปแบบใหม่คือ

$$CFS = \frac{R_{ave}}{Q_{ave}} \quad (3.79)$$

พจน์ Q_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันแจกแจงค่าตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย พจน์ R_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มที่ต้านการพังทลาย ส่วนรูปที่ 3.7 เป็นการแสดงฟังก์ชันการแจกแจงค่าของตัวแปรสุ่ม R และ Q

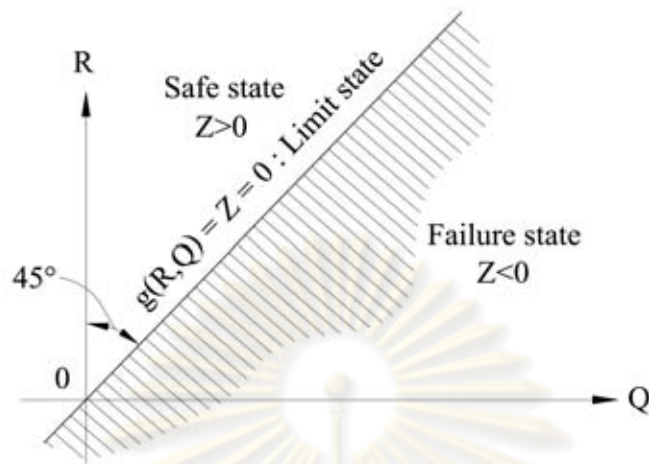
ขั้นตอนที่สาม

เป็นการหาค่าขอบของความปลอดภัย จากรูปที่ 3.8 จะได้ค่าสูงสุดของน้ำหนักบรรทุก หรือใช้สัญลักษณ์เป็น Q_{max} มีค่ามากกว่าค่าที่เป็นค่าต่ำสุดของกำลังความสามารถ หรือใช้สัญลักษณ์เป็น R_{min} ดังนั้นจึงมีพื้นที่เหลื่อมซ้อนเกิดขึ้น หรือได้บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่พื้นที่การพังทลายมีค่าไม่ใช่ศูนย์ (non-zero)

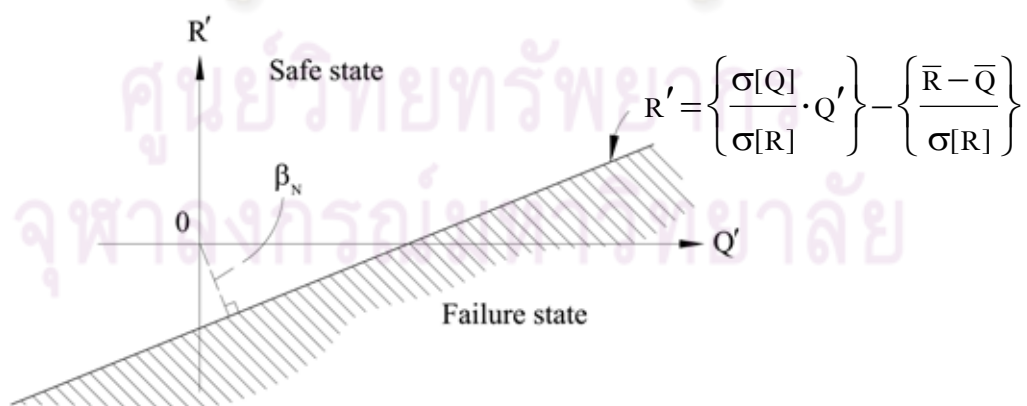
วิธีการที่สะดวกในการประเมินเชิงความน่าจะเป็น ได้แก่ การหาค่าความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันความต้านทาน หรือ resistance กับฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุก หรือ load เขียนเป็นสมการ

$$Z = R_{ave} - Q_{ave} \quad (3.80)$$

พจน์ Z เป็นค่าขอบของความปลอดภัย (safety margin) และค่า R และ Q เป็นค่าตัวแปรสุ่มของความต้านทานกับน้ำหนักบรรทุก ตามลำดับ ในสถานะจำกัด (limit state) ในรูปที่ 3.9 ถ้ากำหนดให้ $g(R, Q)$ เป็นฟังก์ชันแบบจำลองที่สถานะจำกัดพอดี การพังทลายเกิดขึ้นได้ เมื่อค่าของ Z น้อยกว่า 0 (ศูนย์)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) มีพื้นที่เกิดขึ้นสามบริเวณ ได้แก่พื้นที่เสถียร ($Z > 0$); พื้นที่สมดุลที่ขีดจำกัด ($Z = 0$); และพื้นที่ที่เกิดการพังทลาย ($Z < 0$)



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) ในสถานะขีดจำกัดสมดุลที่ลดค่าขนาดของตัวแปรสุ่มลง หรือ reduced limit state

ขั้นตอนที่สี่

เป็นการหาค่าดัชนีความปลอดภัยของตัวแปรสุ่ม ที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) ในขั้นตอนนี้ นักวิจัยได้นำเสนอเป็นรูปแบบหลากหลายแต่สิ่งทีระบุไว้ในรายงานฉบับนี้ได้คัดเลือก และสรุปเป็นแนวทางไว้โดยไม่ได้ทำการพิสูจน์อย่างละเอียดเหมือนเอกสารต้นฉบับ แต่จะมีระบุไว้ว่ามีการคัดลอกหรือใช้สมการต้นฉบับจากเอกสารฉบับใดบ้าง

จากรูปที่ 3.10 เป็นแบบจำลองในสภาวะที่ลดระดับขึ้นของขีดจำกัดลง หรือเรียกว่า reduced limit state โดยกำหนดให้ค่าฟังก์ชันของขีดจำกัด เป็น

$$g(R, Q) = Z = 0 \quad (3.81)$$

ในการปฏิบัติงานจริง ค่าขนาดกำลังความสามารถของมวลสารในการรับโหลด จะกำหนดให้มีค่าลดลงมาที่ระดับหนึ่ง (ค่าตัวแปรสุ่มกำลังความสามารถที่ลดลง เขียนเป็น R') และในทำนองเดียวกัน ค่าขนาดโหลดน้ำหนักบรรทุกทุกจะมีค่าที่ลดลงระดับหนึ่ง (ค่าตัวแปรสุ่มขนาดโหลดน้ำหนักที่ลดลง เขียนเป็น Q') ถ้าหากหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม R และ Q ได้ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$R' = R - \bar{R} \quad (3.82)$$

$$Q' = Q - \bar{Q} \quad (3.83)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าของ $g(R, Q)$ ลงในสมการที่ 3.82 และ 3.83 จะได้สมการเชิงเส้น คือ

$$Z = (R - Q) = \{\sigma[R]R'\} - \{\sigma[Q]Q'\} + \{\bar{R} - \bar{Q}\} = 0 \quad (3.84)$$

ทำการพิจารณาสมการ 3.84 พจน์ที่เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าคงที่ พจน์ที่เป็นผลลัพธ์ขนาดของค่ากลางลบกัน ก็เป็นค่าคงที่ ส่วนตัวแปรสุ่มลดขนาด เป็นค่าตัวแปรในสมการ เขียนเป็นสมการเชิงเส้นใหม่' (เปรียบเทียบกับสมการ 3.84)

$$ax + by + k = 0 \quad (3.85)$$

สมการ 3.85 นี้ สามารถใช้ความรู้เชิงเรขาคณิตวิเคราะห์ (analytic geometry) หาค่าระยะสั้นสุดจากจุดกำเนิดของพิกัด ไปยังตำแหน่งตรงขอบความปลอดภัย (ที่เป็นค่า β_N) เป็น

$$\text{Perpendicular distance from origin} = \text{line } \beta_N = \frac{k}{(a^2 + b^2)^{1/2}} \quad (3.86)$$

เขียนเป็นรูปแบบใหม่ที่อิงกับสมการ 3.85-3.86 และรูปที่ 3.10 เป็น

$$\beta_N = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma^2[R] + \sigma^2[Q]}} \quad (3.87)$$

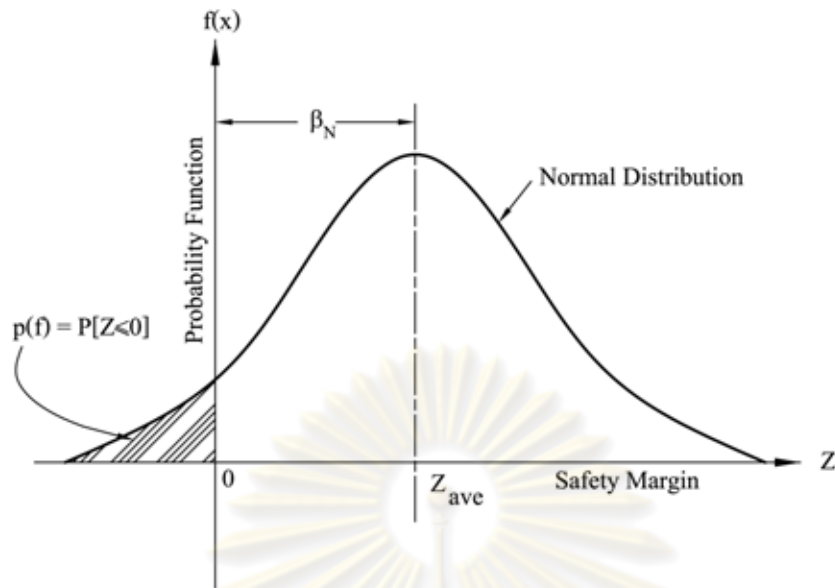
พจน์ β_N นี้เป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index) ของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ (normal distribution) และค่าตัวแปรสุ่ม R กับ Q เป็นตัวแปรสุ่มอิสระที่ค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นศูนย์ (ค่า $\rho = 0$) และสมการ 3.87 นี้ใช้กับการอิงค่าของค่าขอบความปลอดภัย (ดูรูปที่ 3.11 ประกอบ)

อนึ่งในบางสถานะ ตัวแปรสุ่มในระบบมีค่าสหสัมพันธ์กัน จึงต้องแปลงสมการ 3.87 เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่ค่าของ ρ ไม่เป็นศูนย์ เขียนเป็นสมการใหม่ [คัดลอกจาก Harr (1987) หน้า 133]

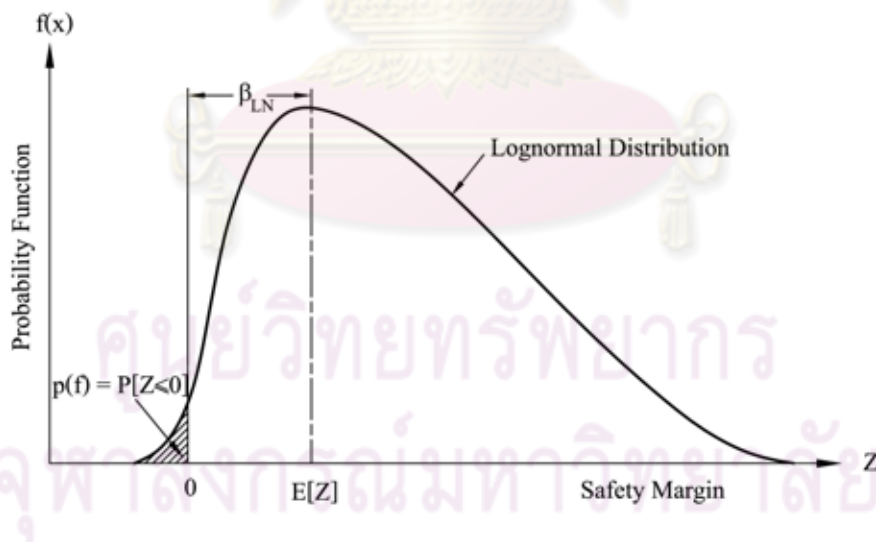
$$\beta_N = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma^2[R] + \sigma^2[Q] - (2\rho)(\sigma[R] \sigma[Q])}} \quad (3.88)$$

ขั้นตอนที่ห้า

เป็นการหาค่าดัชนีความปลอดภัยของตัวแปรสุ่ม ที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (lognormal distribution) จากการที่ตั้งสมมุติฐานไว้ว่า ถ้าพจน์ x เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ หรือเรียกชื่อสั้น ๆ ว่า normal variate ต่อมา กำหนดให้ $x = \ln(y)$ หรือเขียนเป็น $y = e^x$ แสดงว่าพจน์ y มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (หรือเรียกชื่อสั้น ๆ ว่า lognormal variate) ยกตัวอย่าง ถ้าให้ตัวแปรสุ่มที่เป็นน้ำหนักบรรทุกที่กำลังกระทำ (live load, L) เป็นตัวแปร



รูปที่ 3.11 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_N) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขอบความปลอดภัย ($Z = 0$) ถึงตำแหน่งค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม, Z_{ave}



รูปที่ 3.12 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_{LN}) สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ที่เป็นตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างตำแหน่งเส้นขอบความปลอดภัย ($Z = 0$) ถึงตำแหน่งค่าตัวแปรสุ่มที่เป็นค่าการคาดหมาย (expected value) ของค่าขอบปลอดภัย, $E[Z]$

กลุ่มแบบ lognormally distributed มีค่าเท่ากับ 40 กิโลพาสคัล ดังนั้น ถ้าจะหาค่าขนาดตัวแปรสุ่ม x แบบ normally distributed จะได้ค่าขนาด $x = \ln L = \ln 40 = 3.69$ กิโลพาสคัล

ความสัมพันธ์ของค่าเชิงสถิติของพจน์ x ตัวแปรสุ่มปกติ กับพจน์ y ตัวแปรสุ่มลอการิทึมปกตินี้ วิธีการแรก แยกแสดงเป็น 2 สมการ ตามที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อย่อย 3.5.2

$$\lambda_y = \ln \left[(\mu_x) + \frac{1}{2} (\zeta_y)^2 \right] \quad (3.89)$$

$$(\zeta_y)^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right] \quad (3.90)$$

สมการที่ 3.89 – 3.90 เป็นการหาค่าการคาดหมาย กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบของการแจกแจงฟังก์ชันลอการิทึม สำหรับ วิธีการที่สอง สมมติให้ทุกค่าอยู่ในรูปแบบของลอการิทึม (ใช้ในการเพิ่มหรือลด 1 S.D.)

$$E(y) = \ln[x] \quad (3.91)$$

$$E(y) \pm 1 \text{ S.D.} = \ln[x \pm \mu_x] \quad (3.92)$$

ดังนั้น ถ้าหากกำหนดให้ค่าฟังก์ชันของกำลังความสามารถมวลสาร R กับค่าฟังก์ชันของน้ำหนักบรรทุก Q เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (lognormal variates) แสดงว่าเมื่อกำหนดให้ x_1, x_2 เป็นตัวแปรสุ่มปกติ (normal variates) จะได้ค่า $x_1 = \ln R; x_2 = \ln Q$ หรือระบุอีกแบบได้ว่าพจน์ $\ln R$ กับ $\ln Q$ มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.90-3.91 และความรู้ในเรื่องการแจกแจงค่าของฟังก์ชัน สำหรับ discrete and continuous bivariate distributions

จากสมมุติฐานดังกล่าว ค่าของดัชนีความเชื่อถือได้ของฟังก์ชันการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ (ดัดแปลงจาก Harr, 1987 หน้า 139) มีค่าเป็น

$$\beta_{LN} = \frac{\ln\left\{\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right) \cdot \frac{[1 + \{(C.O.V.)_Q^2\}]}{[1 + \{(C.O.V.)_R^2\}]}\right\}}{\sqrt{\ln\{[1 + (C.O.V.)_R^2][1 + (C.O.V.)_Q^2]\} - (2\rho) \sqrt{\ln[1 + (C.O.V.)_R^2] \ln[1 + (C.O.V.)_Q^2]}}}} \quad (3.93)$$

พจน์ β_{LN} ใช้แทนค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของตัวแปรสุ่มในระบบที่ตรวจสอบ เนื่องจากตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบปกติ และค่าตัวแปรสุ่มดังกล่าว (ทั้งค่า R กับค่า Q) มีสหสัมพันธ์กันจัดเป็นตัวแปรแบบ correlated variables หรือค่าของ ρ ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าไม่เป็นศูนย์ (เป็นได้ทั้งค่าบวกกับค่าลบ)

การกำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีค่าสหสัมพันธ์กันนั้น มักมีข้อจำกัดหลายอย่าง ปกติการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น มักกำหนดให้ค่า $\rho = 0$ เพื่อให้ตัวแปรสุ่มเป็นแบบ uncorrelated variables ดังนั้น สมการทั่วไปของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่หาจากตัวแปรสุ่มลอการิทึมปกติ คือ

$$\beta_{LN} = \frac{\ln\left\{\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right) \cdot \frac{[1 + \{(C.O.V.)_Q^2\}]}{[1 + \{(C.O.V.)_R^2\}]}\right\}}{\sqrt{\ln\{[1 + (C.O.V.)_R^2][1 + (C.O.V.)_Q^2]\}}}} \quad (3.94)$$

ขั้นตอนที่หก

เป็นการหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ จากรูปที่ 3.11 การพังทลายจะเกิดขึ้นได้ เมื่อเทียบกับค่าขอบความปลอดภัย เขียนเป็นนิพจน์ของ conditional probability เป็น

$$p(f) = P(|R - Q| \leq 0) = P(|Z| \leq 0) \quad (3.95)$$

เนื่องจาก $Z = R - Q$ แสดงว่า สถานะของ $Z < 0$ เป็นสถานะของการพังทลาย ค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย เขียนใหม่เป็นความสัมพันธ์เชิงการแจกแจงค่าปกติ

$$p(f) = 1 - F(\beta_N) = 1 - F(u) \quad (3.96)$$

พจน์ β_N ในสมการ 3.96 เป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบปกติ พจน์ u เป็นจำนวนตัวเลขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ ที่ตัวแปรสุ่ม x มีระยะห่างจากค่าเฉลี่ยของ PDF [probability (density) function] ส่วนพจน์ $F(u)$ เป็นค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) สามารถระบุค่าได้จากตารางคณิตศาสตร์ทั่วไป

สมการ 3.96 เขียนในรูปแบบของแบบจำลองในรูปที่ 3.11 จะได้

$$p(f) = 1 - F \left[\frac{\ln \left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \right)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right] \quad (3.97)$$

ตัวแปรสุ่ม R และ Q เป็นตัวแปรสุ่มอิสระ มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ค่า Z จึงมีการแจกแจงค่าแบบปกติด้วย ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยของ Z คือ

$$\begin{aligned} (\text{mean})_Z &= (\text{mean})_R - (\text{mean})_Q \\ \mu_Z &= \mu_R - \mu_Q \end{aligned} \quad (3.98)$$

ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Z คือ

$$\begin{aligned} (\text{S.D.})_Z^2 &= (\text{S.D.})_R^2 + (\text{S.D.})_Q^2 \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \end{aligned} \quad (3.99)$$

จากสมการ 3.97 ได้ค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย ในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$p(f) = F \left(\frac{0 - Z_{\text{ave}}}{\sigma_Z} \right) = 1 - F \left(\frac{Z_{\text{ave}}}{\sigma_Z} \right) \quad (3.100)$$

ขั้นตอนที่เจ็ด

เป็นการหาค่าโอกาส ความน่าจะเป็นของการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ จากรูปที่ 3.12 การพังทลายจะเกิดขึ้นได้เมื่อเทียบกับค่าขอบความปลอดภัย ที่มีค่า $Z \leq 0$

จากการพิจารณาสมการ 3.93 - 3.94 เมื่อค่าพจน์ตัวแปรสุ่ม R กับ Q มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ (lognormal distribution) จะทำให้ค่า $\ln R$, $\ln Q$ และ β_{LN} มีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) จึงทำให้เขียนสมการแสดงโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลายในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$p(f) = 1 - F(\beta_{LN}) = 1 - F(u) \quad (3.101)$$

พจน์ β_{LN} เป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ พจน์ u เป็นจำนวนตัวเลขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ ที่ตัวแปรสุ่ม x มีระยะห่างจากค่าเฉลี่ยของ PDF (probability distribution function) ส่วนพจน์ $F(u)$ เป็นค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม จากสมการ 3.101 ได้ค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย ในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$p(f) = F\left(\frac{\ln(1.0) - E[Z]}{\zeta_Z}\right) = 1 - F\left(\frac{\lambda_Z}{\zeta_Z}\right) \quad (3.102)$$

พจน์ λ_Z และ ζ_Z เป็นค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขอบความปลอดภัย (ค่า Z หรือค่า safety margin) ที่กำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

3.6.2 ตัวอย่างการหาดัชนีเชิงความน่าจะเป็นของแนวทางแรก

ตัวอย่างในหัวข้อย่อนี้ เป็นการหาค่าเชิงสถิติหลายค่าจนถึงได้ค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย โดยแยกตัวอย่างออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ กรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และกรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

โจทย์ตัวอย่าง 3.5 สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

กำหนดให้โครงสร้างมวลหินบนพื้นผิวดิน มีลักษณะเป็นแท่งแบนหนาแบบคอลัมน์ (rock column) และต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่เป็นสิ่งก่อสร้างบนคอลัมน์หิน กับรับน้ำหนักแรงลมที่ปะทะกับแท่งคอลัมน์หิน ถ้าให้ T = โหลดที่เป็นน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเป็น

$$T = D + L + W$$

พจน์ T = total force, D = dead load (weight), L = live load (line force), W = wind force ค่าตัวแปรสุ่มทั้งสามดังกล่าวเป็นตัวแปรสุ่มอิสระ หรือ statistically independent และมีการแจกแจงค่าแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ย (เท่ากับค่าการคาดหมาย) กับค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้

$$(\text{mean})_D = 4.2 \text{ MN}; \quad (\text{S.D.})_D = 0.3 \text{ MN}$$

$$(\text{mean})_L = 6.5 \text{ MN}; \quad (\text{S.D.})_L = 0.8 \text{ MN}$$

$$(\text{mean})_W = 3.4 \text{ MN}; \quad (\text{S.D.})_W = 0.7 \text{ MN}$$

นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ค่ากำลังวัสดุที่เป็นค่ากำลังความสามารถมวลสาร เป็นตัวแปรสุ่มปกติ และมีค่าเฉลี่ยเป็น 1.5 เท่าของค่าเฉลี่ยแรงที่กระทำทั้งหมด กำหนดเพิ่มเติมให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (C.O.V.) กำลังวัสดุเท่ากับ 15% และเป็นตัวแปรสุ่มอิสระที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ

ผลเฉลย

จากการที่แรงผลลัพธ์ T มีการแจกแจงแบบปกติ จึงหาค่าเฉลี่ยได้เป็น

$$(\text{mean})_T = (\text{mean})_D + (\text{mean})_L + (\text{mean})_W \quad (\text{ก})$$

$$(\text{mean})_T = \mu_T = 4.2 + 6.5 + 3.4 = 14.1 \text{ MN}$$

ค่าเฉลี่ยการเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงผลลัพธ์ T มีค่าเป็น

$$(\text{S.D.})_T^2 = (\text{S.D.})_D^2 + (\text{S.D.})_L^2 + (\text{S.D.})_W^2 \quad (\text{ข})$$

$$(\sigma)_T^2 = (\sigma)_D^2 + (\sigma)_L^2 + (\sigma)_W^2$$

$$(S.D.)_T = (\sigma)_T = \sqrt{(0.3)^2 + (0.8)^2 + (0.7)^2} = 1.1 \text{ MN}$$

การพังทลายของคอลัมน์หิน จะเกิดขึ้นจากการที่ค่ากำลังวัสดุ, R มีค่าน้อยกว่าค่าโหลดที่กระทำ (applied load), Q หรือระบุเป็นค่าขอบความปลอดภัย, Z

$$Z = (R - Q) \quad (\text{ก})$$

เนื่องจากตัวแปรสุ่ม R และ Q เป็นตัวแปรสุ่มปกติ ดังนั้น Z เป็นตัวแปรสุ่มปกติด้วย และโจทย์ยังกำหนดให้ค่าความต้านทานเป็น 1.5 เท่าของค่าเฉลี่ยแรงกำลังความสามารถ

$$(\text{mean})_Z = (\text{mean})_R - (\text{mean})_Q \quad (\text{ง})$$

$$\begin{aligned} (\sigma)_Z &= (\sigma)_R - (\sigma)_Q \\ &= (1.5 \times 14.1) - (14.1) = 7.05 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$(S.D.)_Z = \sqrt{(S.D.)_R^2 + (S.D.)_Q^2} \quad (\text{จ})$$

$$\begin{aligned} (\sigma)_Z &= \sqrt{(\sigma)_R^2 + (\sigma)_Q^2} \\ &= \sqrt{\{(C.O.V.)_R^2 (\text{mean})_R\} + (S.D.)_Q^2} \\ &= \sqrt{(0.15 \times 21.15)^2 + (1.1)^2} = 3.36 \text{ MN} \end{aligned}$$

ค่าดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับตัวแปรสุ่มปกติ, β_N

$$\beta_N = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma^2[R] + \sigma^2[Q]}} \quad (\text{ช})$$

$$= \left(\frac{21.15 - 14.1}{3.36} \right) = 2.098 = 2.1$$

ค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย, $p(f)$

$$p(f) = 1 - F(\beta_N) = 1 - F(2.1) \quad (ก)$$

$= 1 - 0.982 = 0.018 = 1.8\%$ หรือระบุเป็นค่าโอกาสการพังทลาย
ประมาณ 2 ครั้งในเหตุการณ์ที่คาดหมายว่าจะเกิด 100 ครั้ง

โจทย์ตัวอย่าง 3.6 สำหรับตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

กำหนดให้การทรุดตัว (settlement) ของฐานรากระดับตื้น (shallow foundation) ที่มีชื่อ
เฉพาะว่าฟุตดิ้ง (footing) วางบนมวลดินทราย (sandy soil) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = \frac{QBI}{M}$$

พจน์ S หมายถึงการทรุดตัวของฟุตดิ้ง หน่วยเป็นฟุต พจน์ Q เป็นค่าเฉลี่ยของความดัน
บนฐานราก (bearing pressure) ที่กระทำบนมวลทราย หน่วยเป็น ตัน (สั้น) ต่อ ตร.ฟุต พจน์ B เป็น
ค่ามิติที่น้อยที่สุดของฟุตดิ้ง หน่วยเป็นฟุต พจน์ I เป็นค่าตัวประกอบของฟุตดิ้ง (ไม่มีหน่วย) ที่
มีอิทธิพลขึ้นอยู่กับลักษณะเชิงเรขาคณิตของฟุตดิ้ง ความลึกของฐานรากที่จมในดิน และความลึก
จนถึงชั้นดินแข็ง (hard stratum) พจน์ M เป็นค่ามอดุลัสของการกดอัด (compressibility) หน่วย
เป็น ตัน (สั้น) ต่อ ตร.ฟุต กำหนดให้แต่ละตัวแปรสุ่ม 'ได้แก่' Q, B, I, M เป็นตัวแปรอิสระ และมีการ
แจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ในส่วนของค่าเฉลี่ย $(\mu)_{xi}$ กับการเบี่ยงเบนมาตรฐาน $(\zeta)_{xi}$ ของ
ทั้งสี่พจน์ตัวแปรสุ่ม ระบุไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าการคาดหมายกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน
ของพจน์ตัวแปรสุ่มลอการิทึมปกติ

| ตัวแปรสุ่ม | (mean) _{xi} , μ_{xi} | (S. D.) _{xi} , σ_{xi} |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Q (t/ft ²) | 1.0 (t/ft ²) | 0.10 |
| B (ft) | 6.0 (ft) | 0.0 |
| I | 0.6 | 0.10 |
| M (t/ft ²) | 32.0 (t/ft ²) | 0.15 |

ก. จงหาค่าเฉลี่ย กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของการทรุดตัว สำหรับฟุตติง

ข. ถ้าหากค่าที่ยินยอมให้เกิดการทรุดตัวสูงสุด (maximum allowable settlement) มีค่าเท่ากับ 2.5 นิ้ว จงหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_{LN}) กับค่าความเชื่อถือได้ (R) ซึ่งในกรณีนี้คือค่าโอกาสความน่าจะเป็นที่จะไม่มีการทรุดตัวมากเกินไป

ผลเฉลย

จากการที่แรงผลลัพท์ S มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ จากสมการ 3.61 หาค่าความแปรผัน (variance) ได้เป็น

$$\begin{aligned}(S.D.)_S^2 &= (S.D.)_P^2 + (S.D.)_B^2 + (S.D.)_I^2 + (S.D.)_M^2 \\ (\zeta)_S^2 &= (\zeta)_P^2 + (\zeta)_B^2 + (\zeta)_I^2 + (\zeta)_M^2\end{aligned}\quad (ก)$$

เนื่องจากค่า $(S.D.)_B = 0$ (ศูนย์) ดังนั้นค่าความแปรปรวน — variance = $(S.D.)_B^2 = V [B] = 0$ ด้วย จากนั้นจึงนำค่าอื่นที่ระบุในตารางที่ 3.7 มาหาค่าการความแปรผันของการทรุดตัว, $(S.D.)_S^2$ หรือ $V [S]$

$$\begin{aligned}(S.D.)_S^2 &= (0.1)^2 + (0)^2 + (0.1)^2 + (0.15)^2 \\ V [S] &= (\zeta)_S^2 = 0.0425; \quad (S.D.)_S = (\zeta)_S = 0.206\end{aligned}$$

เนื่องจากตัวแปร P, B, I, M เป็นตัวแปรสุ่มแบบลอการิทึมปกติ จึงหาค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายจากการใช้สมการ 3.89

$$\begin{aligned}\lambda_P &= \ln (1.0) - \frac{1}{2}(0.1)^2 = -0.005 \\ \lambda_B &= \ln (6.0) - \frac{1}{2}(0)^2 = 1.792 \\ \lambda_I &= \ln (0.6) - \frac{1}{2}(0.1)^2 = -0.516 \\ \lambda_M &= \ln (32) - \frac{1}{2}(0.0225)^2 = 3.455\end{aligned}$$

ใช้สมการ 3.59 หัวข้อ 3.5.2 หาค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม S ที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ กำหนดให้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม M มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มอื่น (P, B, I)

$$\lambda_s = (-0.005 + 1.792 - 0.516) - (3.455) = - (2.184)$$

แต่เมื่อต้องการหาค่าเฉลี่ย S มีการแจกแจงปกติ (ค่าเฉลี่ย footing settlement) ใช้สมการ 3.62 จะได้

$$\begin{aligned}(\lambda)_s &= \ln [\mu]_s - \frac{1}{2} (\zeta)_s^2 \\ [\mu]_s &= \exp [(\lambda)_s + \frac{1}{2} (\zeta)_s^2] \\ &= \exp [- (2.184) + 0.0212] = 0.115 \text{ ฟุต}\end{aligned}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน Ang and Tang (1975, หน้า 185, 187) ของค่าผลลัพธ์ S ระบุให้มีค่าประมาณใกล้เคียง กับค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า S สมมติให้สัญลักษณ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ที่มีตัวแปรสุ่มเป็นแบบลอการิทึมปกติ เป็น $(C.O.V.)_s^2$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$(C.O.V.)_s \approx (S.D.)_s = 0.206$$

หรือ

$$(\delta)_s \approx (\zeta)_s = 0.206$$

ในกรณีที่จะหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ β_{LN} นั้นอิงตามสมการ 3.53 โดยที่ λ_{FS} หาจาก

$$(\lambda)_{FS} = E[R] - (\lambda)_s$$

พจน์ $E[R]$ คือ ค่าการคาดหมายที่เป็นค่าด้านการทรุดตัวของฟุตดิง จากการที่โจทย์ระบุให้เท่ากับ 2.5 นิ้ว หรือ $(2.5 / 12)$ ฟุต เนื่องจาก R เป็นค่าตัวแปรสุ่มที่มีค่าเดียว ทำให้ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0 (ศูนย์) จะได้

$$E[R] = \lambda_R = \ln[2.5/12]$$

นำค่าทั้งหมดมาแทนในสมการ 3.100

$$\beta_{LN} = \frac{\lambda_{FS}}{\zeta_S} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{0.206}$$

$$= \left(\frac{\ln[2.5/12] - (-2.184)}{0.206} \right) = 2.99$$

ตามนิยามของ reliability จะได้

$$\begin{aligned} \text{Reliability} &= F(u) = F(\beta_{LN}) = F(2.99) \\ &= 0.9986 \\ &= 99.86\% \text{ แสดงว่ามีเพียงประมาณ 14 ใน 10,000 ครั้ง} \\ &\text{ที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย} \end{aligned}$$

3.6.3 แนวทางที่สอง

แนวทางที่สองนี้ เป็นวิธีอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ทาง Wolff (1996) กับ U.S. Army Corps of Engineers (1998) เสนอแนะให้การหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็น ควรจะอิงกับค่าของอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) เพราะค่า F.S. ได้มาจากการแปรผันของหลายตัวแปรในระบบการที่จะประเมินความเสี่ยง ไม่ควรอิงกับค่าตัวแปรที่เป็นสมมติมวลสารอย่างเดียว ค่ามุมเอียงของระนาบการพังทลาย ค่ามุมการตัดความลาด หรือแรงดันน้ำในมวลสาร ต่างมีส่วนทำให้เกิดการแปรผันในระบบด้วย

หลักการสำคัญของแนวทางที่สองที่อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ดูรายละเอียดในหัวข้อ

3.5.2) มีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง

ถ้าหากมีการแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม ที่อาจเป็นแบบปกติหรือเป็นแบบลอการิทึมปกติ แล้วค่าอัตราส่วนปลอดภัยควรระบุใหม่ (Wolff, 1996; Duncan and Wright, 2005) ให้เป็นค่า F.S. ที่มีโอกาสเป็นค่านี้มากที่สุด ซึ่งมีชื่อเรียกว่า “Most Likely Value of Factor of Safety, (F.S.)_{MLV}” ได้แก่

$$(F.S.)_{MLV} = \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-) + \dots + (F_N^+ + F_N^-)}{2(N)} \quad (3.103)$$

นิยามของพจน์ F_N ในสมการ 3.101 เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากวิธีเชิงกำหนด (deterministic method) ที่ใช้ตัวแปรทั้งหมดเท่ากับ N ตัวแปร ส่วนตัวห้อยท้าย 1, 2, ..., N แสดงถึง พจน์ตัวแปรสุ่มที่หนึ่ง พจน์ตัวแปรสุ่มที่สอง และพจน์ตัวแปรที่ N ตามลำดับ พจน์ F_1^+ เป็นค่า อัตราส่วนปลอดภัยของตัวแปรที่หนึ่งที่มีเงื่อนไขมีการเพิ่มขึ้นจากเดิม เท่ากับ 1 S.D. และ พจน์ F_1^- มีการลดลงจากเดิม เท่ากับ 1 S.D. เขียนค่าฟังก์ชันอัตราส่วนปลอดภัย เป็น

$$\Delta F_1 = F_1^+ - F_1^- \quad (3.104)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\Delta F_2 = F_2^+ - F_2^- \quad (3.105)$$

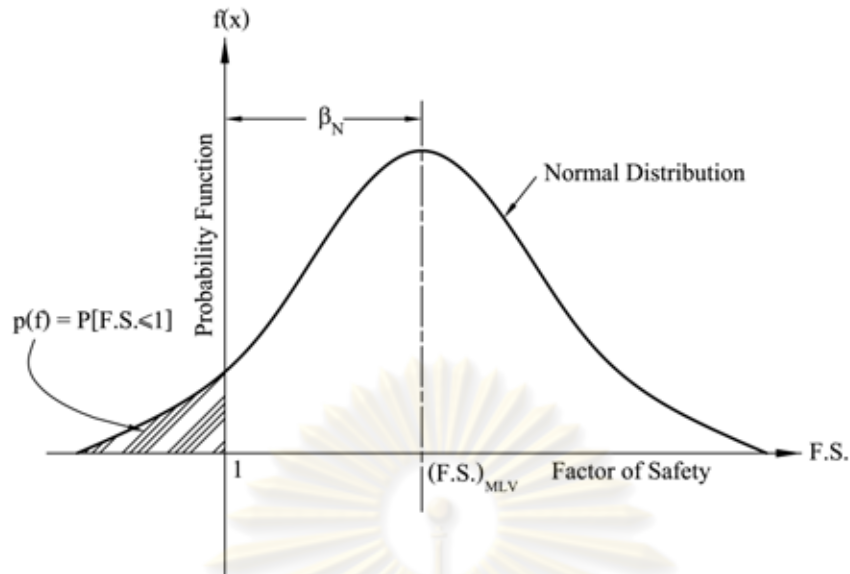
$$\Delta F_N = F_N^+ - F_N^- \quad (3.106)$$

ตัวอย่างของการคำนวณค่า $(F.S.)_{MLV}$ ถ้ากำหนดให้ค่าตัวแปรแรก $F_1^+ = 1.33$; ค่าตัวแปรแรก $F_1^- = 1.02$; ส่วนค่าตัวแปรที่สอง $F_2^+ = 1.08$; ค่าตัวแปรที่สอง $F_2^- = 1.28$; จะคำนวณค่า $(F.S.)_{MLV}$ เท่ากับ 1.17 เป็นต้น

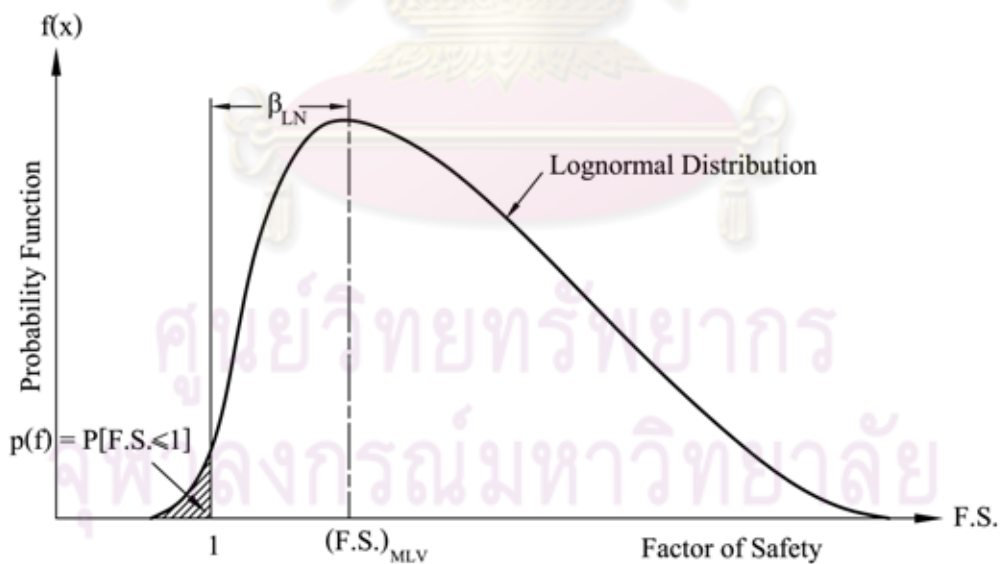
ขั้นตอนที่สอง

กำหนดให้ สมการที่ 3.107 - 3.108 เป็นพจน์ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด (Wolf, 1996; U.S. Army Corps of Engineers, 1998) ดังต่อไปนี้

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_N}{2}\right)^2} \quad (3.107)$$



รูปที่ 3.13 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_N) ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติที่เป็นค่าตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขีดจำกัดอัตราส่วนปลอดภัย ($F.S. = 1$) ถึงตำแหน่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$ หรือประมาณเท่ากับค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม, $(F.S.)_{ave}$



รูปที่ 3.14 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β_{LN}) ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติที่เป็นตัวเลขของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างตำแหน่งเส้นขีดจำกัด ($F.S. = 1$) ถึงตำแหน่งที่เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัย ที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, $(F.S.)_{MLV}$

$$(C.O.V.)_{FS} = \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \quad (3.108)$$

ตัวอย่างของการคำนวณค่า $(\sigma)_{FS}$ จากสมการ 3.107 กับค่า $(C.O.V.)_{FS}$ จากสมการ 3.108 โดยใช้ค่าตัวเลข ถ้าวัดค่า $(F.S.)_{MLV}$ เท่ากับ 1.17 กับค่าอื่นที่ทราบค่า (ดูในขั้นตอนที่หนึ่ง)

$$\Delta F_1 = |F_1 - F_1| = |1.33 - 1.02| = 0.31$$

$$\Delta F_2 = |F_2 - F_2| = |1.08 - 1.28| = 0.20$$

นั่นคือ

$$(\sigma)_{FS} = \sqrt{\left(\frac{0.31}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.20}{2}\right)^2} = 0.18$$

$$(C.O.V.)_{FS} = \frac{0.18}{1.17} = 0.16 = 16\%$$

ขั้นตอนที่สาม

ตามนิยามของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ระบุให้เป็นเลขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก $F.S. = 1.0$ (impending failure) จนถึง $(F.S.)_{MLV}$ ถ้าหากตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ หรือเป็น normal variates ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้ดัดแปลงจากสมการ 7.48 (Lee et al., 1983; หน้า 315) กับสมการ 3.2.8 (Harr, 1987; หน้า 133) และสมการ 3.4.1 (Harr, 1987; หน้า 138) โดยกำหนดให้พจน์ตัวแปรในระบบเป็น uncorrelated normal variables หรือค่า $\rho = 0$ (ศูนย์) จะได้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เป็น

$$\beta_N = \frac{[(F.S.)_{MLV} - (1)]}{(\sigma)_{FS}} \quad (3.109)$$

ถ้าหากมีค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($\rho \neq 0$) ระหว่างตัวแปรสุ่มในระบบที่มีการแจกแจงค่าแบบปกติ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้เป็น

$$\beta_N = \frac{[(F.S.)_{MLV} - (1)]}{\sqrt{(F.S.)_{MLV}^2 + [(1) - 2(\rho)(F.S.)_{MLV}]}} \quad (3.110)$$

แต่ถ้าตัวแปรสุ่มในระบบมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ อิงตามเอกสารของ Lee et al. (1983, หน้า 86, 315), Harr (1987, หน้า 138) และ Duncan and Wright (2005; หน้า 206) จะได้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เป็น

$$\beta_{LN} = \frac{\ln[(F.S.)_{MLV} \cdot \sqrt{\frac{1}{[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]} }]}{\sqrt{\ln[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \quad (3.111)$$

$$= \frac{\ln \left[\frac{(F.S.)_{MLV}}{\sqrt{[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \right]}{\sqrt{\ln[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}}$$

ถ้าหากมีค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($\rho \neq 0$) ระหว่างตัวแปรสุ่มในระบบที่มีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เป็น

$$\beta_{LN} = \frac{\ln[(F.S.)_{MLV}]}{\sqrt{2(1-\rho) \cdot \ln[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \quad (3.112)$$

ขั้นตอนที่สี่

เมื่อจะหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย นำค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในสมการ 3.109 หรือ สมการ 3.112 มาแทนค่า u ที่เป็นค่า standardized normal distribution

$$p(f) = 1 - F(u) = 1 - F(\beta) \quad (3.113)$$

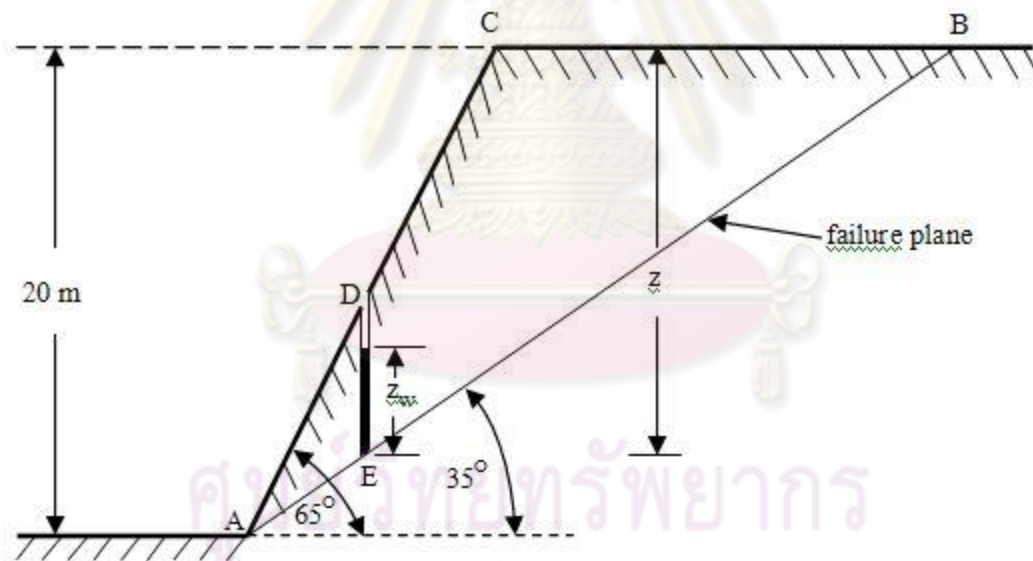
พจน์ β แทนค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ที่อาจมาจากสมการที่ 3.109-3.112 สมการใดสมการหนึ่ง ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม

3.6.4 ตัวอย่างการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นสำหรับแนวทางที่สอง

ใช้โจทย์การตัดความลาดที่ไม่มีค่าแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกัน ค่ามุมเสียดทาน ค่าหน่วยน้ำหนัก ค่ามุมเอียงของระนาบการพังทลาย ตัวแปรอื่นที่เป็นค่าสมบัตินับกับค่ามิติ กำหนดให้มีค่าคงที่

โจทย์ตัวอย่างที่ 3.7

ในภาพตัดขวางของรูปที่ 3.15 เป็นการตัดชั้นตะพักโดยการจากการระเบิดหินปูน ปรากฏว่ามีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ในหน้าของความลาด



รูปที่ 3.15 ภาพตัดขวางชั้นตะพักของหินปูนที่มีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ในหน้าความลาด

จากการตรวจสอบห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 8.3) และจากภาคสนาม มีข้อมูลดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมืองหินปูน, $H = 20$ เมตร
- มุมของความลาด, $\beta = 65^\circ$
- ระยะในแนวตั้งของรอยร้าวจากแรงดึง (DE) = 6.6 เมตร

- ความสูงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงดึง, $z_w = 5.5$ เมตร
- ระยะแนวตั้ง z จากจุดตัด E ถึงชั้นตะกอน = 16.8 เมตร

ต้องการหาค่าตัวเลขดัชนีเชิงความน่าจะเป็น จากการที่ตัวแปรสุ่ม 4 พจน์ มีการแจกแจงฟังก์ชัน ดังตารางที่ 3.8 ทั้ง 2 กรณี ในรูปแบบปกติและในรูปแบบลอการิทึมปกติ

ตารางที่ 3.8 ค่าสมบัติและค่ามีความลาดสำหรับตัวแปรสุ่มในระบบ

| ตัวแปรสุ่ม | ค่าเฉลี่ย (μ_x) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_x) |
|---|-----------------------|------------------------------------|
| ค่าการยึดเกาะกัน, c (kPa) | 45 | 5 |
| มุมเสียดทานภายใน, ϕ (degrees) | 25 | 2 |
| หน่วยน้ำหนักหิน, γ (kN/m^3) | 25.5 | 2.5 |
| มุมเอียงระนาบ, ψ_p (degrees) | 35 | 3 |

ผลเฉลย

หาความยาวของระนาบ (L) แรยยกตัวจากแรงดันน้ำ (U) แรยผลักจากแรงดันน้ำในรอยร้าวจากแรงดึง (V) และน้ำหนักของมวลหินปูนที่วางบนระนาบการพังทลาย จากวิธีเชิงกำหนด ได้ดังนี้

$$L = (H-z) \cos \psi_p \quad (ก)$$

$$= (20 - 16.8) \operatorname{cosec} 35^\circ = 5.579 \text{ เมตร}$$

กำหนดให้พจน์ γ_w เป็นค่าหน่วยน้ำหนักน้ำ

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

$$= \frac{1}{2} (9.81) (5.5) (20 - 16.8) \operatorname{cosec} 35^\circ$$

$$= 150.507 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}$$

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{2} \gamma_w (z_w)^2 & (ก) \\
 &= \frac{1}{2} (9.81)(5.5)^2 = 148.376 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}
 \end{aligned}$$

ส่วนค่าน้ำหนักของมวลหินในส่วนที่จะมีการเกิดการพังทลายในแนวระนาบ หาได้จากสมการเชิงประสพการณ์โดยใช้ความรู้เชิงตรีโกณมิติ

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z}{H} \right\}^2 (\cot \psi_p) \{ (\cot \psi_p \cdot \tan \beta) - 1 \} \right] & (ง) \\
 &= \frac{1}{2} (25.5) (20)^2 \left[\left(1 - \frac{16.8}{20} \right)^2 \cot 35^\circ (\cot 35^\circ \tan 65^\circ - 1) \right] \\
 &= 384.604 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}
 \end{aligned}$$

นำค่าตัวแปรที่คำนวณได้ มาแทนหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด จากสมการเชิงประสพการณ์

$$\begin{aligned}
 \text{F.S.} &= \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U - (V \sin \psi_p)] \tan \phi}{(W \sin \psi_p) + (V \cos \psi_p)} & (จ) \\
 &= \frac{(45)(5.58) + [(384.60 \cos 35^\circ) - 150.51 - (148.38 \sin 35^\circ)] \tan 25^\circ}{(384.60 \sin 35^\circ) + (148.38 \cos 35^\circ)} \\
 &= 0.842 \text{ (ต่ำกว่าหนึ่ง มวลไม่มีเสถียรภาพเกิดการไถลเลื่อน)}
 \end{aligned}$$

เมื่อต้องการหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นตามแนวทางที่สอง ต้องกำหนดให้มีการเพิ่มหรือลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนี้

ก. กรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

$$c^+ = x_1^+ = (\text{mean})_1 + 1(\text{S.D.})_1 = [45 + 5] = 50 \text{ kPa}$$

$$c^- = x_1^- = (\text{mean})_1 - 1(\text{S.D.})_1 = [45 - 5] = 40 \text{ kPa}$$

$$\phi^+ = x_2^+ = (\text{mean})_2 + 1(\text{S.D.})_2 = [25 + 2] = 27 \text{ degrees}$$

$$\phi^- = x_2^- = (\text{mean})_2 - 1(\text{S.D.})_2 = [25 - 2] = 23 \text{ degrees}$$

$$\gamma^+ = x_3^+ = (\text{mean})_3 + 1(\text{S.D.})_3 = [25.5 + 2.5] = 28 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma^- = x_3^- = (\text{mean})_3 - 1(\text{S.D.})_3 = [25.5 - 2.5] = 23 \text{ kN/m}^2$$

$$\psi_p^+ = x_4^+ = (\text{mean})_4 + 1(\text{S.D.})_4 = [35 + 3] = 38 \text{ degrees}$$

$$\psi_p^- = x_4^- = (\text{mean})_4 - 1(\text{S.D.})_4 = [35 - 3] = 32 \text{ degrees}$$

นำค่าตัวแปรสุ่มที่มีการเพิ่มและลดค่า S.D. ไปหาค่า F.S. ของแต่ละตัวแปร ได้ค่าดังนี้

$$F_1^+ = 0.924 \quad F_1^- = 0.761 \quad \Delta F_1 = 0.163$$

$$F_2^+ = 0.852 \quad F_2^- = 0.832 \quad \Delta F_2 = 0.020$$

$$F_3^+ = 0.832 \quad F_3^- = 0.854 \quad \Delta F_3 = 0.022$$

$$F_4^+ = 0.786 \quad F_4^- = 0.911 \quad \Delta F_4 = 0.125$$

นั่นคือ จะได้ค่า (F.S.)_{MLV} จากสมการ 3.103 ดังนี้

$$\begin{aligned} (\text{F.S.})_{\text{MLV}} &= \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + \dots + (F_4^+ + F_4^-)}{2(4)} \\ &= \frac{(0.924 + 0.761) + (0.852 + 0.832) + (0.832 + 0.854) + (0.786 + 0.911)}{8} \\ &= 0.844 \end{aligned}$$

ใช้สมการ 3.107 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราส่วนปลอดภัย

$$\begin{aligned}\sigma_{FS} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_4}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.163}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.002}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.022}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.125}{2}\right)^2} = 0.104\end{aligned}$$

จากสมการ 3.108 ทำให้หาค่าของสัมประสิทธิ์การแปรผันเป็น

$$\begin{aligned}(\text{C.O.V.})_{FS} &= \frac{\sigma_{FS}}{(\text{F.S.})_{MLV}} \\ &= \frac{0.104}{0.844} = 12.30\%\end{aligned}$$

นำค่าตัวแปรที่หาค่าได้ดังกล่าว มาหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ โดยใช้สมการ 3.109

$$\begin{aligned}\beta_N &= \frac{[(\text{F.S.})_{MLV} - (1)]}{(\sigma)_{FS}} \\ &= \frac{[0.844 - 1]}{0.104} = -1.503\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโอกาสการพังทลาย จะมีค่าเป็น

$$p(f) = 1 - F(\beta_N) = 1 - F(-1.503)$$

$$= 0.9336 \quad \text{หรือ} \quad = 93.36\% \quad \text{แสดงว่ามีโอกาสที่ไม่เกิดการพังทลายตาม}$$

แนวระนาบเพียง 6.64%

หมายเหตุ

เมื่อมีค่าพจน์ตัวแปรสุ่มของมุม ψ_p มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ ย่อมทำให้ค่ามิติ L กับค่าน้ำหนัก W ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$\text{ค่า } L \text{ กลาง} = 5.579 \text{ m} \quad \text{ค่า } L^+ = 5.198 \text{ m}; \quad \text{ค่า } L^- = 6.039 \text{ m}$$

$$\text{ค่า } U \text{ กลาง} = 150.507 \text{ kN/m} \quad \text{ค่า } U^+ = 140.220 \text{ kN/m}$$

$$\text{ค่า } U^- = 162.908 \text{ kN/m} \quad \text{ค่า } W \text{ กลาง} = 384.604 \text{ kN/m}$$

$$\text{ค่า } W^+ = 422.310 \text{ kN/m} \quad (\text{ค่า } \gamma \text{ เพิ่ม}) \quad \text{ค่า } W^- = 346.898 \text{ kN/m} \quad (\text{ค่า } \gamma \text{ ลด})$$

$$\text{ค่า } W^+ = 291.579 \text{ kN/m} \quad (\text{มุม } \psi_p \text{ เพิ่ม}) \quad \text{ค่า } W^- = 508.126 \text{ kN/m} \quad (\text{มุม } \psi_p \text{ ลด})$$

ข. กรณีที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

เนื่องจากในตารางที่ 3.8 โจทย์กำหนดเฉพาะค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ ใช้แนวทางการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่ระบุไว้เป็นวิธีที่สาม (โจทย์ตัวอย่างที่ 3.4 หัวข้อ 3.5.3)

วิธีที่สามดังกล่าวนี้กำหนดให้ $(F.S.)_{MLV}$ มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติด้วย ดังนั้นสามารถใช้ค่า σ_{FS} กับค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่คำนวณได้ในข้อ ก. มาหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{(F.S.)_{MLV}}{\sqrt{[1 + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \right]}{\sqrt{\ln[1 + (C.O.V.)_{FS}^2]}}$$

$$= \frac{\ln \left[\frac{0.884}{\sqrt{[1 + (0.123)^2]}} \right]}{\sqrt{\ln[1 + (0.123)^2]}}$$

$$= \frac{\ln \left[\frac{0.884}{100754} \right]}{\sqrt{\ln[1.01513]}} = \frac{-0.13082}{0.03875} = -3.87$$

ดังนั้น ค่าโอกาสการพังทลาย จะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} p(f) &= 1 - F(\beta_{LN}) = 1 - F(-3.87) \\ &= .9999 \text{ หรือ } = 99.99 \% \end{aligned}$$

หมายเหตุ

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของค่า $p(f)$ ในกรณีที่สมมุติให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ ค่า $p(f)$ จะต่ำกว่า ในกรณีที่สมมุติให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ ดังนั้นค่าที่ $p(f) = 99.99\%$ น่าจะเป็นค่าที่ถูกต้องมากกว่าค่าที่ $p(f) = 93.36\%$ ถ้าหากมีน้ำขังในรอยร้าวจากแรงดึงที่ระดับสูง 5.5 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองเชิงความเสี่ยง

การสร้างแบบจำลอง (model) เป็นการเลียนแบบสภาพธรรมชาติในภาคสนาม เพื่อหาค่าดัชนีเชิงความน่าจะเป็นของการพังทลายหรือการพิบัติในมวลสาร (ดินหรือหิน) แต่เนื่องจากในระบบของการออกแบบโครงสร้างมวลสาร ตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องมีภาวะของการแปรผันสูง การทดสอบหรือการตรวจวัดโครงสร้างมวลสารในภาคสนาม จึงจำเป็นต้องมีการทำซ้ำหลายครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด แต่การปฏิบัติการจริงสำหรับงานโครงการทำได้ยาก และค่าใช้จ่ายในภาคสนามสูง จึงต้องใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) แทนวิธีการตรวจวัดในภาคสนาม วิธีจำลองนี้ใช้คาดคะเนผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพเทียบกับผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น ทั้งนี้ใช้การเขียนโปรแกรมย่อยช่วย เพื่อนำมาคำนวณค่าผลลัพธ์ซ้ำ จนถึงระดับที่น่าพอใจ

4.1 แบบจำลองของโครงการวิจัย

การทำโครงการวิจัยนี้เป็นการหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ในการประเมินความเสี่ยงต่อการขุดเจาะเปิดหน้างานในโครงสร้างที่เป็นมวลดินหรือมวลหิน ผู้วิจัยใช้แนวทางที่ระบุไว้ในบทที่ 3 มาประกอบรวมกัน โดยมีการนำเสนอแบบจำลองทั้งหมด 3 รูปแบบ และแบบจำลองใช้ได้กับตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันเป็นแบบปกติหรือเป็นแบบลอการิทึมปกติ กับการคำนวณค่าผลลัพธ์สุดท้ายเชิงความเชื่อได้ ค่าดังกล่าวนี้ เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลายแบบจำลองที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ ทั้งนี้แบบจำลองที่หนึ่งและแบบจำลองที่สองเป็นแบบจำลองที่ใช้หาค่าโอกาสการพังทลายเชิงกำหนด (deterministic value of probability of failure) โดยอิงกับสมการเชิงความน่าจะเป็นที่ระบุในบทที่ 3 ค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้มีค่าเดียว ส่วนแบบจำลองที่สาม เป็นแบบจำลองที่ใช้หาค่าโอกาสการพังทลายในรูปแบบของการจำลองข้อมูล (simulated value of probability of failure) ทั้งนี้มีการก่อกำเนิดฟังก์ชัน และการสุ่มค่าของตัวแปรสุ่ม เพื่อทำการคำนวณค่าผลลัพธ์ซ้ำกันหลายครั้ง ค่าผลลัพธ์ที่เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย จะมีความแปรผันขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่มีการจำลองเพื่อทำการคำนวณซ้ำ ซึ่งค่า $p(t)$ ดังกล่าวใช้เทียบกับค่า F.S. ที่คำนวณตามปกติจากสมการเชิงกำหนดเพื่อให้เกิดความมั่นใจสูงขึ้น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสาร

4.2 แบบจำลองความเสียหายที่หาจากค่าขอบความปลอดภัย

แนวทางแรกของการสร้างแบบจำลองที่หนึ่ง ใช้วิธีการเขียนโปรแกรมย่อยเพื่อรับข้อมูลเข้ามาใช้ในการคำนวณ รูปแบบของแผนภูมิสายงาน (flow chart) ในการสร้างแบบจำลองที่อิงค่าขอบความปลอดภัย (safety margin) แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 สรุปแยกเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จำแนกข้อมูลเข้า (input data) ของแต่ละพจน์ตัวแปรสุ่มว่า มีการแจกแจงฟังก์ชันความน่าจะเป็นในรูปแบบใด เฉพาะงานวิจัยโครงการนี้ กำหนดให้เป็นแบบปกติ (normal) หรือแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) ยกตัวอย่าง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด มีการจำแนกกลุ่มตัวแปรสุ่มที่เป็นค่าตัวแปรสุ่มของแรงต้าน (R) กับค่าตัวแปรสุ่มของแรงก้อให้เกิดการไถลเลื่อน (Q) กำหนดให้

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

$$Q = Q(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) \quad (4.2)$$

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมาย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ของแต่ละตัวแปรสุ่มที่เป็นค่า R กับค่า Q

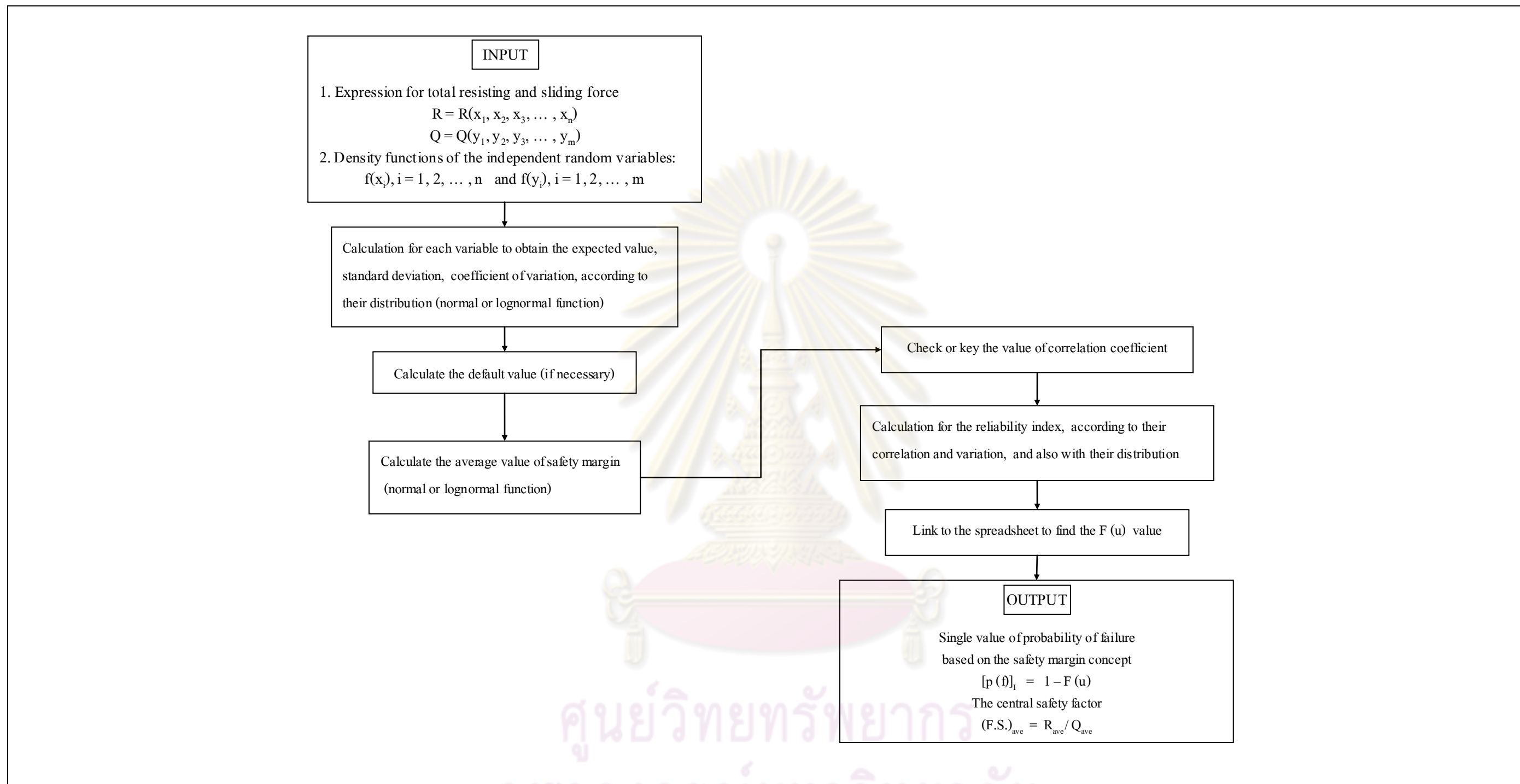
ค่า R มีทั้งหมด n ตัวแปรสุ่ม ส่วนค่า Q มีทั้งหมด m ตัวแปรสุ่ม ใช้สมการคำนวณค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามชนิดของการแจกแจงฟังก์ชัน ดังนี้

ก. กรณีตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

ค่าเฉลี่ย หรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่มแรงต้าน R_i ($i = 1, 2, \dots, n$), ตัวแปรสุ่มแรงไถลเลื่อน Q_i ($i = 1, 2, \dots, m$) ถ้าไม่ได้ระบุไว้ก็คำนวณจากสมการข้างล่าง

$$E[R_i] = \bar{R} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_i \quad (4.3)$$

$$E[Q_i] = \bar{Q} = \bar{y} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Q_i$$



รูปที่ 4.1 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอน ของการจำลองแบบด้วยการอิงค่าขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) เพื่อคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย $[p(t)]$ กับค่ากลางของอัตราส่วนปลอดภัย

อนึ่งในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.3 จะกำหนดค่า default ในระบบ โดยใช้การป้อนค่าเฉลี่ย (เพียงค่าเดียว) ของตัวแปรสุ่ม เข้าไปในช่องที่กำหนด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม ถ้าไม่ได้ระบุ ก็หาจากสมการข้างล่าง

$$\sigma [R_i] = \sigma [x_i] = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (4.4)$$

$$\sigma [Q_i] = \sigma [y_i] = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m (Q_i - \bar{Q})^2}$$

ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.4 จะกำหนดค่า default ในระบบ โดยให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าวมีค่า default = 1 (S.D.) หน่วย ที่หน่วยมีสภาพแทนกันได้ (compatible unit) เข้าไปในช่องที่กำหนด

กรณีที่มีการระบุค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน, (C.O.V.) กับระบุค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่าที่เหลือได้จากสมการข้างล่าง ในทางกลับกันถ้าทราบค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่า (C.O.V.) ได้

$$(C.O.V.)_{R_i} = (C.O.V.)_{x_i} = \frac{\sigma [x_i]}{\bar{x}} \times 100 = \frac{\sigma [R_i]}{\bar{R}} \times 100 \quad (4.5)$$

$$(C.O.V.)_{Q_i} = (C.O.V.)_{y_i} = \frac{\sigma [y_i]}{\bar{y}} \times 100 = \frac{\sigma [Q_i]}{\bar{Q}} \times 100$$

ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.5 จะกำหนดค่า default ในระบบให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าว มีค่า default จำนวนสองค่า ได้แก่ ค่า default ค่าแรก = 15 % กับค่า default ค่าที่สอง = 40 % [ต้องเลือกค่าใดค่าหนึ่ง ระหว่าง 15 % กับ 40 % ก่อนทำการคำนวณต่อเพราะผลลัพธ์สุดท้ายจะไม่เท่ากัน]

ข. กรณีตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

พจน์ตัวแปรสุ่มแบบลอการิทึมปกติ มี 2 แนวทางในการระบุค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมาย

วิธีแรก

ค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมายจะมีการระบุไว้แล้ว หรือกล่าวอีกทีว่าเป็นค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (ค่า mean หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ μ) รวมทั้งมีการระบุค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงฟังก์ชันลอการิทึมปกติ (ค่า S.D. แบบลอการิทึมปกติ หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ ζ) จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติดังสมการข้างล่าง

$$\lambda_{R_i} = \ln[\mu_{R_i}] - \frac{1}{2}(\zeta_{R_i})^2 \quad (4.6)$$

$$\lambda_{Q_i} = \ln[\mu_{Q_i}] - \frac{1}{2}(\zeta_{Q_i})^2$$

วิธีที่สอง

มีการระบุค่าพจน์ตัวแปรสุ่มเพียงค่าเดียว เมื่อกำหนดให้ X_i, Y_i เป็นพจน์ตัวแปรสุ่มของการคาดหมายแบบลอการิทึมปกติ จึงต้องทำให้พจน์ตัวแปรสุ่มที่ระบุ (มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ) ให้อยู่ในรูปของลอการิทึม

$$E [X_i] = \ln[R_i] \quad (4.7)$$

$$E [Y_i] = \ln[Q_i]$$

อนึ่งในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.6 หรือ 4.7 จะกำหนดค่า default ในระบบให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าวมีค่า default = $(\ln R_1 + \ln R_2 + \dots + \ln R_n) / n$ หรือ $= (\ln Q_1 + \ln Q_2 + \dots + \ln Q_n) / m$ หรือเป็นการป้อนค่า default ของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม R, Q เข้าไปในช่องที่กำหนด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ ถ้าไม่ได้ระบุ ก็หาจากสมการข้างล่าง (ซึ่งเป็นวิธีแรก)

$$(\zeta_{R_i}) = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_{R_i}^2}{\mu_{R_i}^2} \right) \right]} \quad (4.8)$$

$$(\zeta_{Q_i}) = \sqrt{\ln \left[(1) + \left(\frac{\sigma_{Q_i}^2}{\mu_{Q_i}^2} \right) \right]}$$

ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.8 จะกำหนดค่า default ในระบบโดยให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าว มีค่า default = 1 (S.D.) หน่วย ที่มีสภาพแทนกันได้ (compatible unit) เข้าไปในช่องที่กำหนด (ซึ่งเป็นวิธีที่สอง)

$$(\text{mean})_{R_i} \pm (\text{S.D.})_{R_i} = \ln [\mu_{R_i} \pm \sigma [R_i]] \quad (4.9)$$

$$(\text{mean})_{Q_i} \pm (\text{S.D.})_{Q_i} = \ln [\mu_{Q_i} \pm \sigma [Q_i]]$$

กรณีที่มีการระบุค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน, (C.O.V.) กับระบุค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่าที่เหลือได้จากสมการข้างล่าง ในทางกลับกันถ้าทราบค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่า C.O.V. ได้

$$(\text{C.O.V.})_{x_i} = (\text{C.O.V.})_{R_i} = \frac{\zeta_{R_i}}{\lambda_{R_i}} = \frac{(\text{S.D.})_{R_i}}{(\text{mean})_{R_i}} \quad (4.10)$$

$$(\text{C.O.V.})_{y_i} = (\text{C.O.V.})_{Q_i} = \frac{\zeta_{Q_i}}{\lambda_{Q_i}} = \frac{(\text{S.D.})_{Q_i}}{(\text{mean})_{Q_i}}$$

อนึ่ง ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวแปรสุ่มในสมการ 4.10 จะกำหนดค่า default ในระบบให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าวมีค่า default จำนวนสองค่า ค่าแรก = 15 % กับค่า default ค่าที่สอง = 40 % [ต้องเลือกค่าใดค่าหนึ่ง ระหว่างค่า 15 % กับค่า 40 % ก่อนทำการคำนวณต่อ เพราะผลลัพธ์สุดท้ายจะไม่เท่ากัน]

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่า Z ที่สมมุติให้เป็นค่าขอบความปลอดภัย ดังนั้นใช้สมการหลัก

$$\text{การแจกแจงปกติ } Z_{\text{ave}} = R_{\text{ave}} - Q_{\text{ave}} = \bar{R} - \bar{Q} \quad (4.11)$$

การแจกแจงลอการิทึมปกติ $\lambda_Z = \lambda_R - \lambda_Q$ (4.12)

ก. กรณีกำหนดให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

ค่าเฉลี่ย หรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่ม Z

$$E[Z] = \mu_Z = \mu_R - \mu_Q \quad (4.13)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม Z

$$(S.D.)_Z = \sigma(Z) = \sqrt{\sigma^2[R] - \sigma^2[Q]} \quad (4.14)$$

กรณีที่มีการระบุค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน, (C.O.V.) กับระบุค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่าที่เหลือได้จากสมการข้างล่าง (ในทางกลับกันถ้าทราบค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่า C.O.V. ได้)

$$(C.O.V.)_Z = \frac{\sigma[Z]}{\mu_Z} \times 100 \quad (4.15)$$

ข. กรณีกำหนดให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

ค่าเฉลี่ย หรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่ม Z

$$\lambda_Z = \lambda_R - \lambda_Q \quad (4.16)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม Z

$$\zeta_Z = \sqrt{(\zeta_R)^2 - (\zeta_Q)^2} \quad (4.17)$$

กรณีที่มีการระบุค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน, (C.O.V.) กับระบุค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่าที่เหลือได้จากสมการข้างล่าง (ในทางกลับกันถ้าทราบค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็สามารถหาค่า C.O.V. ได้)

$$(C.O.V.)_Z = \frac{\zeta_Z}{\lambda_Z} \times 100 \quad (4.18)$$

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อผ่านขั้นตอนที่ 3 แล้ว ตัวเลขค่าผลลัพธ์ดังกล่าว ใช้หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับตัวแปรสุ่ม (มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ หรือมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ) ดังนี้

ก. กรณีของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่มีการแจกแจงแบบปกติ
ถ้าตัวแปรสุ่ม R กับตัวแปรสุ่ม Q เป็นอิสระต่อกัน (independent)

$$\beta_N = \frac{(\bar{R} - \bar{Q})}{\sqrt{\sigma^2[R] + \sigma^2[Q]}} \quad (4.19)$$

ถ้าตัวแปรสุ่ม R กับตัวแปรสุ่ม Q มีความสัมพันธ์กัน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $\rho \neq 0$

$$\beta_N = \frac{(\bar{R} - \bar{Q})}{\sqrt{\sigma^2[R] + \sigma^2[Q] - (2)(\rho)\sigma[R]\sigma[Q]}} \quad (4.20)$$

ข. กรณีของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ
ถ้าตัวแปรสุ่ม R กับตัวแปรสุ่ม Q เป็นอิสระต่อกัน (independent)

$$\beta_{LN} = \frac{\ln\left\{\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right) \cdot \frac{[1 + \{(C.O.V.)_Q^2\}]}{[1 + \{(C.O.V.)_R^2\}]}\right\}}{\sqrt{\ln\{[1 + (C.O.V.)_R^2][1 + (C.O.V.)_Q^2]\}}} \quad (4.21)$$

ถ้าตัวแปรสุ่ม R กับตัวแปรสุ่ม Q มีความสัมพันธ์กัน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $\rho \neq 0$

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left\{ \left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \right) \cdot \frac{[1 + \{(C.O.V.)_Q^2\}]}{[1 + \{(C.O.V.)_R^2\}]} \right\}}{\sqrt{\ln\{[1 + (C.O.V.)_R^2][1 + (C.O.V.)_Q^2]\} - (2\rho) \sqrt{\ln[1 + \{(C.O.V.)_R^2\}] \ln[1 + \{(C.O.V.)_Q^2\}]}}}} \quad (4.22)$$

แต่ถ้า (C.O.V.) ของตัวแปรสุ่ม R กับ Q มีค่าเท่ากัน สมการ 4.22 จะแปลงเป็น

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \right]}{\sqrt{2(1 - \sigma) \ln [1 + (C.O.V.)^2]}} \quad (4.23)$$

ขั้นตอนที่ 5 ใช้ค่าของ β [จากสมการ 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, หรือสมการ 4.23] มาแทนค่าในสมการหาค่าโอกาสการพังทลายของโครงสร้างมวลสาร (ดินหรือหิน) ที่อิงกับค่าเฉลี่ยของค่าขอบความปลอดภัย

$$p(f) = 1 - F(\beta) = 1 - F(u) \quad (4.24)$$

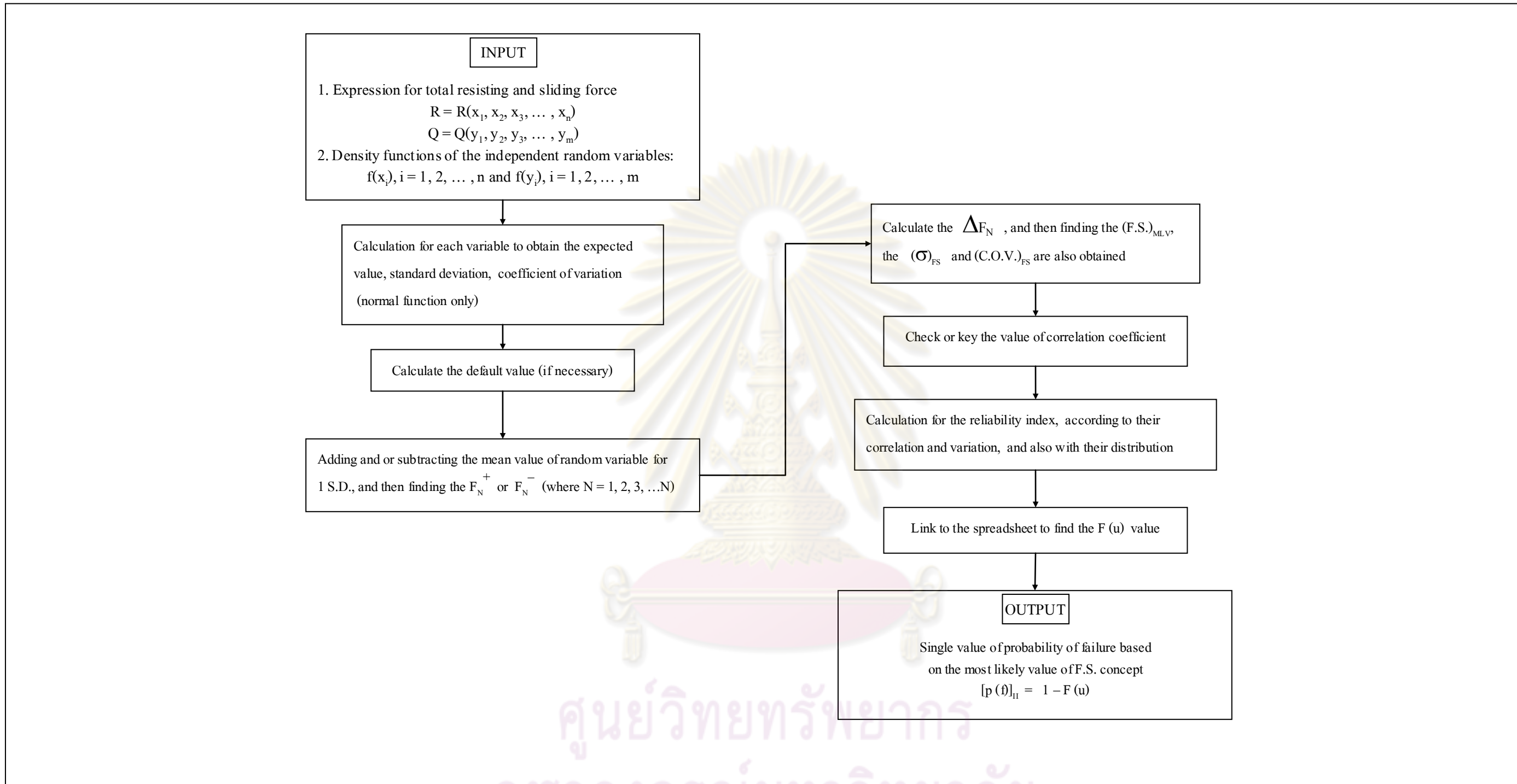
ใช้การ link กับ Microsoft Excel หาค่า standardized normal distribution ของ $F(u)$ เพื่อคำนวณหาค่าสุดท้ายของ $p(f)$

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าอัตราส่วนปลอดภัย ที่อิงกับค่าเฉลี่ยของค่าขอบความปลอดภัย โดยใช้ค่าที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2-3 ดังนี้

$$(F.S.)_{ave} = \text{Central Factor of Safety} = \frac{R_{ave}}{Q_{ave}} \quad (4.25)$$

4.3 แบบจำลองความเสี่ยงที่หาจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย

แนวทางที่สองของการเขียนโปรแกรมย่อยเพื่อรับข้อมูลเข้า มาทำการคำนวณ รูปแบบของแผนภูมิสาขางานในการสร้างแบบจำลองที่อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) สรุปแยกขั้นตอนที่สำคัญ (ดูรูปที่ 4.2 ประกอบ) ดังนี้



รูปที่ 4.2 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอน ของการจำลองแบบด้วยการอิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) เพื่อคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย [p(D)] กับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด, (F.S.)_{MLV}

ขั้นตอนที่ 1 จำแนกข้อมูลเข้า (input data) ของแต่ละพจน์ตัวแปรสุ่มว่า มีการแจกแจงฟังก์ชันความน่าจะเป็นในรูปแบบใด เฉพาะงานวิจัยโครงการนี้ กำหนดให้เป็นแบบปกติ (normal) หรือแบบลอการิทึมปกติ (lognormal)

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการหาค่าเฉลี่ย หรือค่าการคาดหมายของตัวแปรสุ่ม x_i , ($i = 1, 2, \dots, N$) ที่กำหนดให้มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ ใช้ค่าเดียวกันกับค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์

$$E[x_i] = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (4.26)$$

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการระบุสมการเชิงกำหนด เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากค่าเฉลี่ยปกติ (หรือใช้สมการหาอัตราส่วนปลอดภัยที่โจทย์กำหนด)

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการระบุจำนวนของตัวแปรสุ่มในระบบ ที่ต้องทำปฏิบัติการเพื่อการเพิ่มหรือลดค่า S.D. ถ้าหากโจทย์กำหนด ค่า S.D. ของแต่ละตัวแปรสุ่มสามารถนำไปใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไป หรือใช้ค่า default ที่เป็นค่า C.O.V. (ที่ 15% หรือ 40% ค่าใดค่าหนึ่ง) เพื่อนำมาหาค่า S.D. ของตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนของการเพิ่มหรือลดค่า S.D. จากค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ

พจน์ตัวแปร x_i ที่เพิ่มขึ้น 1 S.D.

$$x_i^+ = (\text{mean})_i + 1 (\text{S.D.})_i = \bar{x} + 1 (\text{S.D.})_i \quad (4.27)$$

พจน์ตัวแปร x_i ที่ลดลง 1 S.D.

$$x_i^- = (\text{mean})_i - 1 (\text{S.D.})_i = \bar{x} - 1 (\text{S.D.})_i \quad (4.28)$$

ขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนของการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีการเพิ่มหรือลดค่า S.D. จากค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ โดยกำหนดให้นิยามของพจน์ F_1^+

กับพจน์ F_1^- หมายถึง ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของตัวแปรสุ่มตัวที่หนึ่ง ที่ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มที่หนึ่งมีการเพิ่มค่าเท่ากับ 1 (S.D.) และที่มีการลดค่าเท่ากับ 1 (S.D.) ตามลำดับ การคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย ต้องทำแยกทีละครั้ง เช่น ค่าตัวแปรสุ่มที่หนึ่งที่เพิ่มขึ้น 1 S.D. ต้องใช้ค่ากลาง (ค่าเฉลี่ย) สำหรับตัวแปรสุ่มในการคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย ในขณะที่ค่าตัวแปรสุ่มพจน์อื่น (ตัวแปรสุ่มที่สอง, สาม, สี่) ใช้ค่าเฉลี่ยปกติ (ของแต่ละตัวแปรสุ่ม)

ขั้นตอนที่ 7 เป็นการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ของแบบจำลองที่สองนี้ และค่า F.S. นี้เป็นค่าที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด (most probable) หรือเรียกเป็น most likely values (ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ)

$$(F.S.)_{MLV} = \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + (F_3^+ + F_3^-) + \dots + (F_N^+ + F_N^-)}{2(N)} \quad (4.29)$$

พจน์ N หมายถึง จำนวนตัวแปรสุ่มในระบบ และไม่จำกัดว่ามีความเกี่ยวข้องกับแรงต้านหรือแรงไถลเลื่อน

ขั้นตอนที่ 8 เมื่อผ่านขั้นตอนที่ 7 แล้ว ตัวเลขค่าผลลัพธ์ดังกล่าว ใช้หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับค่า $(F.S.)_{MLV}$ กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผันสำหรับค่า $(F.S.)_{MLV}$

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_N}{2}\right)^2} \quad (4.30)$$

พจน์ ΔF_N , ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) หมายถึง

$$\Delta F_N = |F_N^+ - F_N^-| \quad (4.31)$$

จากนั้น หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่อิงกับค่าอัตราส่วน ปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด

$$(C.O.V.)_{FS} = \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \quad (4.32)$$

ขั้นตอนที่ 9 เป็นการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้สำหรับตัวแปรสุ่ม (มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ หรือมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ) ดังนี้

ก. กรณีของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่มีการแจกแจงแบบปกติ

ถ้าตัวแปรสุ่มเป็นอิสระต่อกัน หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, ρ) ที่อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ไม่ใช่กับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง) มีค่าเป็นศูนย์

$$\beta_N = \frac{[(F.S.)_{MLV} - (1)]}{(\sigma)_{FS}} \quad (4.33)$$

ถ้าตัวแปรสุ่มในระบบมีความสัมพันธ์ต่อกัน หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, ρ) ที่อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ไม่ใช่กับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง) ไม่เป็นศูนย์

$$\beta_N = \frac{[(F.S.)_{MLV} - (1)]}{\sqrt{(F.S.)_{MLV}^2 + [(1) - 2(\rho)(F.S.)_{MLV}]}} \quad (4.34)$$

ข. กรณีของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่มีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ

ถ้าตัวแปรสุ่มเป็นอิสระต่อกัน หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, ρ) ที่อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ไม่ใช่กับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง) มีค่าเป็นศูนย์

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{(F.S.)_{MLV}}{\sqrt{[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \right]}{\sqrt{\ln[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \quad (4.35)$$

ถ้าตัวแปรสุ่มในระบบมีความสัมพันธ์ต่อกัน หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, ρ) ที่อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ไม่ใช่กับตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่ง) ไม่เป็นศูนย์

$$\beta_{LN} = \frac{\ln[(F.S.)_{MLV}]}{\sqrt{2(1 - \rho) \cdot \ln[(1) + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \quad (4.36)$$

ขั้นตอนที่ 10 ใช้ค่าของ β (จากสมการ 4.33, 4.34, 4.35 หรือสมการ 4.36) มาแทนค่าในสมการหาค่าโอกาสการพังทลายของโครงสร้างมวลสาร (ดินหรือหิน) ที่อิงกับค่าเฉลี่ยของค่าขอบความปลอดภัย

$$p(f) = 1 - F(\beta) = 1 - F(u) \quad (4.37)$$

ใช้การ link กับ Microsoft Excel หาค่า standardized normal distribution ของ $F(u)$ เพื่อคำนวณหาค่าสุดท้ายของ $p(f)$

4.4 แบบจำลองเชิงความเสี่ยงที่ใช้วิธีการจำลองข้อมูลของ Monte Carlo

วิธีการจำลองข้อมูล (data simulation) ที่นิยมใช้ในการก่อกำเนิด (generate) ฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มที่สมมุติไว้ หรือตัวแปรที่ทราบค่าว่ามีการแจกแจงฟังก์ชันในรูปแบบใด จะนิยมวิธีการที่มีชื่อเรียกว่า มอนติคาร์โล (Monte Carlo) การตั้งชื่อวิธีการนี้ มีความเชื่อว่ามาจากนักวิทยาศาสตร์นายหนึ่ง (John von Neumann) ตั้งชื่อไว้สำหรับใช้ในงานราชการลับเกี่ยวกับระเบิดปรมาณู ในสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง วิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โล เป็นวิธีการจำลองในกระบวนการสุ่มถูก-ผิด (hit-or-miss procedure) ที่มีค่าผลลัพธ์เชิงกำหนด (deterministic) ในเชิงทฤษฎีการจำลองข้อมูลสามารถจะซ้ำ (repeat) ได้ไม่จำกัดจำนวน แต่ในเชิงปฏิบัติจริง มีข้อจำกัดในเรื่องเวลาการคำนวณและความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์

4.4.1 การแจกแจงฟังก์ชันในระบบ

ข้อมูลเชิงเทคนิค เช่น ความเสียดทาน ค่าการยึดเกาะกัน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต้องทำการจำลอง (simulation) ว่าควรมีการแจกแจงฟังก์ชันในรูปแบบใด ในเชิงความเป็นไปได้มีได้หลายรูปแบบ แต่จากการที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้สรุปผลการคัดเลือกไว้ในบทก่อนหน้า จะมีเพียง 2 รูปแบบ ที่การแจกแจงใกล้เคียงกับการแปรผันของข้อมูลจริงในภาคสนาม ได้แก่ การแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ (normal) และการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ (lognormal)

4.4.2 ค่าดัชนีความเสี่ยงในระบบ

ในหัวข้อ 3.6 บทที่ 3 ได้แสดงแนวทางในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ กับการหาค่าโอกาสความน่าจะเป็นจากการพังทลาย ค่าดัชนีทั้งสองดังกล่าวจัดเป็นค่าดัชนีความเสี่ยง (risk) ในระบบ จากแนวคิดในเรื่องขอบความปลอดภัย (safety margin) มีการกำหนดให้พจน์ตัวแปรที่เป็น

ฟังก์ชันความต้านทาน (R) กับฟังก์ชันก่อให้เกิดการพังทลาย (Q) เป็นอิสระต่อกัน หรือจัดเป็น uncorrelated variables เมื่อวิเคราะห์ต่อ จะพบว่า แรงต้านการพังทลาย มีผลมาจากค่ากำลังวัสดุ เฉือนในมวลสาร (กำลังวัสดุเฉือนด้านการไถลเลื่อนตามแนวระนาบ) ส่วนแรงต้านกับแรงที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ต่างเป็นฟังก์ชันกับน้ำหนักของมวลสาร และไม่ใช่เป็นฟังก์ชันอิสระ (มีค่า สหสัมพันธ์กัน)

จากสถานะที่กล่าวมาข้างต้น การใช้การจำลองของมอนติคาร์โล จึงเป็นสิ่งจำเป็น (Harr, 1977; Ang and Tang, 1984; Athanasiou-Grivas, 1979) โดยใช้วิธีการคำนวณค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] ของระบบ แนวทางการจำลองแบบที่ใช้วิธีการคำนวณค่า $p(f)$ ซ้ำ สามารถใช้กับการแจกแจงฟังก์ชันในรูปแบบอื่น (ที่ไม่ใช่รูปแบบปกติ) หรือในกรณีที่มีการผสมปนกัน เช่นตัวแปรตัวที่หนึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ ตัวแปรตัวที่สองมีการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ และยังไม่จำกัดว่าจะมีจำนวนตัวแปรเท่าไรในระบบ และตัวแปรอาจมีความสัมพันธ์กัน หรือมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.3 แผนภูมิหรือขั้นตอนของแบบจำลองที่สามที่ใช้การจำลองวิธี Monte Carlo

ขั้นตอนของแบบจำลองที่ใช้วิธีการจำลองข้อมูล (data simulation) ด้วยวิธีมอนติคาร์โล เป็นวิธีที่สะดวกในการนำข้อมูลมาคำนวณค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพซ้ำ เรียกรูปแบบของวิธีการทำซ้ำนี้ว่า iterative method หรือเรียกว่า iteration เพื่อต้องการหาค่า $(F.S.)_{\text{trial}}$ จนได้ค่าผลลัพธ์ที่น่าพอใจ แผนภูมิสายงาน (flow chart) ของแบบจำลองที่สามแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

ขั้นตอนที่ 1 จำแนกข้อมูลเข้า (input data) ของแต่ละพจน์ตัวแปรสุ่มว่า มีการแจกแจงฟังก์ชันความน่าจะเป็นในรูปแบบใด เฉพาะงานวิจัยโครงการนี้ กำหนดให้เป็นแบบปกติ (normal) หรือแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) นอกจากนี้ ยังจำแนกกลุ่มตัวแปรสุ่มที่เป็นค่าตัวแปรสุ่มของแรงต้าน (R) กับค่าตัวแปรสุ่มของแรงก่อให้เกิดการไถลเลื่อน (Q) กำหนดให้

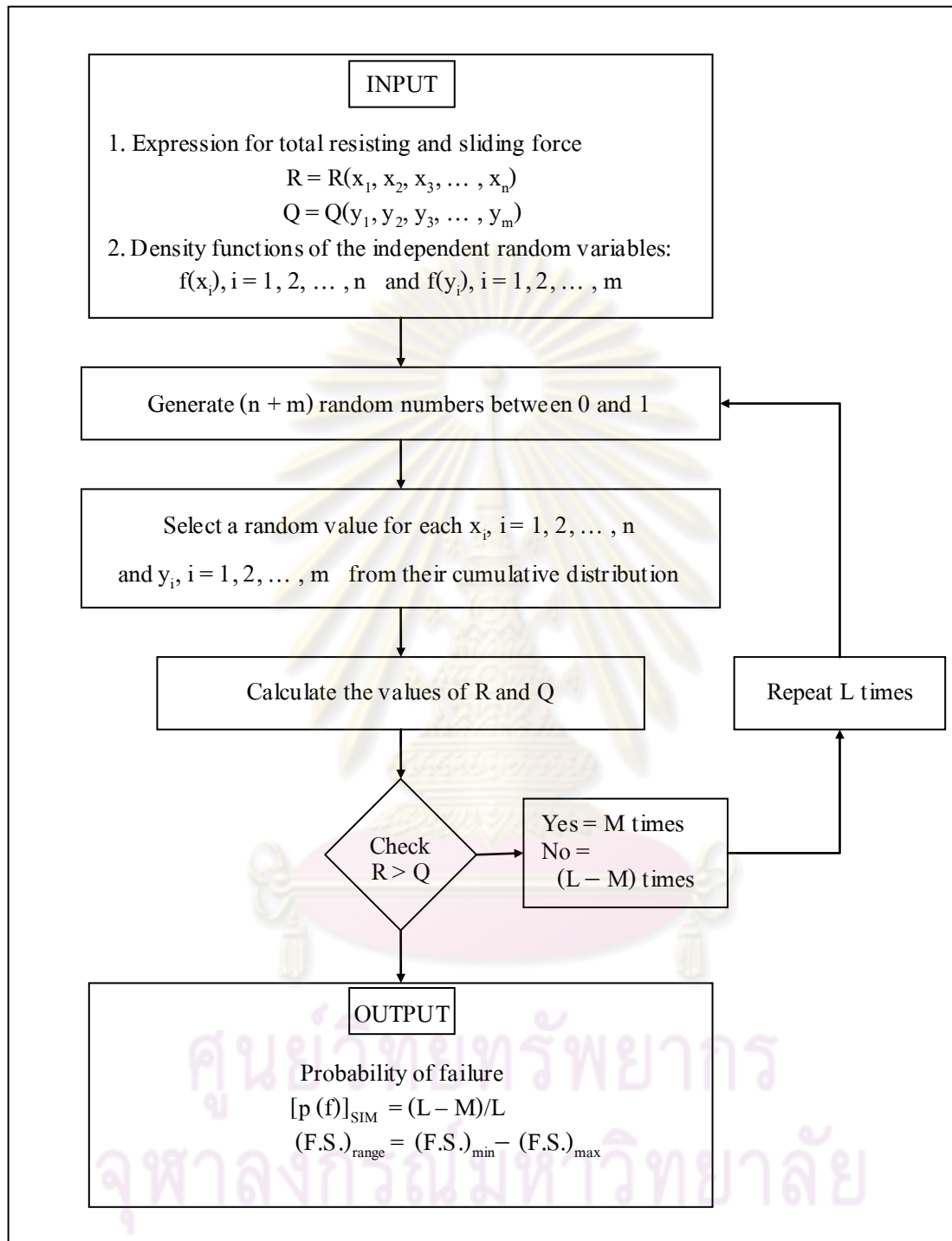
$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.38)$$

$$Q = Q(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) \quad (4.39)$$

จากนั้นกำหนดฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) ของตัวแปรสุ่มอิสระ

$$f(x_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (4.40)$$

$$\text{และ } f(y_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (4.41)$$



รูปที่ 4.3 แผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงลำดับขั้นตอนของแบบจำลองที่สามที่ใช้การจำลองข้อมูลด้วยวิธี Monte Carlo เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลายที่ได้จากการคำนวณค่าซ้ำ, $[p(f)]_{SIM}$ จากข้อมูลที่เกิดจากการจำลอง (แก้ไขดัดแปลงจาก Hasofer and Lind, 1974; Athanasiou-Grivas, 1979)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการก่อกำเนิด (generate) ค่าฟังก์ชันแต่ละตัวแปรสุ่ม ในรูปที่ 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงปกติของจำนวนตัวแปรสุ่ม ($n + m$) ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 [ซึ่งตัวแปรสุ่ม x_i มีจำนวน n ตัวแปร กับตัวแปรสุ่ม y_j มีจำนวน m ตัวแปร]

ในขั้นตอนนี้ มีการคัดเลือกตัวแปรสุ่มหนึ่งค่า จาก x_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) กับตัวแปรสุ่มหนึ่งค่าจาก y_j , ($j = 1, 2, \dots, m$) การคัดเลือกทำจากค่าของการแจกแจงฟังก์ชันสะสม

ขั้นตอนที่ 3 จากนิยามของค่าอัตราส่วนปลอดภัย ที่เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงต้านกับแรงไหลเลื่อน ทำการคำนวณค่าของแรงต้าน R กับแรงไหลเลื่อน Q และตรวจสอบค่าของแรงต้านมีค่ามาก (สูง) กว่าแรงไหลเลื่อนหรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าจะเป็นค่าข้อมูลออก (output data) เพื่อใช้ในการหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย หรือค่า $p(f)$

ขั้นตอนที่ 4 ในกรณีที่ผ่านการตรวจสอบว่า $R > Q$ มีจำนวน M ครั้ง จะใช้วิธีทำซ้ำเป็น L ครั้ง หรือระบุเป็นเงื่อนไขที่ $R < Q$ เท่ากับ $(L - M)$ การทำซ้ำเป็นการเลือกค่าตัวแปรสุ่มในระบบ (ที่เป็นขั้นตอนที่ 2) การคำนวณค่า $p(f)$ ในกระบวนการทำซ้ำ ใช้สัญลักษณ์เป็น $[p(f)]_{SM}$ หากจากค่าอัตราส่วนของ จำนวนครั้ง $(L - M)$ times ที่ไม่ผ่าน ($R < Q$) ต่อจำนวนครั้งที่ทำซ้ำ (L times)

$$[p(f)]_{SM} = \frac{(L - M)}{L} \quad (4.42)$$

พจน์ L เป็นจำนวนครั้งที่ในกระบวนการตรวจสอบผลลัพธ์ที่มีการคำนวณซ้ำ (ตัวเลข 101–10,000) ส่วนพจน์ M หมายถึง เป็นจำนวนครั้งที่ค่าของแรงต้านมีค่ามากกว่าค่าแรงที่ก่อให้เกิดการไหลเลื่อน (นั่นคือ คำนวณได้ค่า F.S. สูงกว่า 1.0)

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการหาค่าพิสัย (range) ของค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำสุดถึงค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่สูงสุด ค่าดังกล่าวเกิดจากการคำนวณซ้ำด้วยการจำลองข้อมูล ค่า $(F.S.)_{trial}$ ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง จะมีการเปรียบเทียบกัน ค่า F.S. ที่ต่ำสุดกับค่า F.S. ที่สูงสุดจากกระบวนการคำนวณซ้ำ จะระบุเป็นข้อมูลออก แสดงเป็นข้อมูลออกของพิสัย F.S.

บทที่ 5 การประเมินความเสี่ยงของการพังทลาย จากการตัดความลาด และในรูปแบบอื่น

การเกิดพังทลายในงานวิศวกรรมดินหรือวิศวกรรมหิน แบ่งการพังทลายออกเป็นสองรูปแบบหลัก ได้แก่ การพังทลายเนื่องจากการตัดความลาด และการพังทลายของมวลสารใต้ฐานราก เนื่องจากการแบกรับน้ำหนักเกินขีดพิสัย การประเมินความเสี่ยงในรูปแบบของความน่าจะเป็น เช่น การหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการพังทลาย จำเป็นต้องใช้สมการเชิงกำหนดที่เหมาะสม เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของโครงสร้างมวลสาร จากนั้นจึงใช้วิธีการแจกแจงฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม รวมทั้งการจำลองข้อมูลเพื่อทำการคำนวณซ้ำ ค่าผลลัพธ์ที่ได้ถูกระบุในรูปแบบของความเสี่ยงจากการพังทลาย ใช้ในการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนปลอดภัย ที่คำนวณด้วยวิธีเชิงกำหนด ทำให้การประเมินเสถียรภาพงานก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หัวข้อย่อยในบทนี้ เป็นการทบทวนสมการเชิงประสบการณ์ที่ใช้อ้างอิงในงานการตัดความลาด หรือในงานการเสริมเสถียรภาพ และระบุถึงความมีเสถียรภาพของมวลสารที่ใช้เป็นโครงสร้างสิ่งก่อสร้าง

5.1 การพังทลายของความลาดแบบระนาบยาวไม่จำกัด

ในกรณีที่มีการตัดความลาด เพื่อให้มวลหน้าความลาดมีขนาดความยาวไม่จำกัด (infinite) มักกระทำในบริเวณเชิงเขา หรือเนินดิน ขนาดมิติความลาดนี้ มีค่าขนาดความกว้าง (ความหนา) กับความสูงน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความยาว ค่าความหนาของมวลความลาดเป็นหนึ่งหน่วยมิติ

5.1.1 รูปแบบการลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ขั้นตอนแรก การวิเคราะห์ผลลัพธ์ต้องแยกลำดับข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ข้อมูลชุดที่เป็นขนาดมิติของความลาด กับข้อมูลชุดที่เป็นค่าสมบัติของมวลสาร (มวลดินหรือมวลหิน) ทั้งนี้กำหนดให้ในแนวตัดขวางของความลาดมีความหนาเป็นหนึ่งหน่วยมิติ

ขั้นตอนที่สอง รูปแบบการวิเคราะห์ลำดับถัดมา เป็นการระบุสถานภาพของมวลสาร กำหนดให้เป็นมวลแห้ง หรือกำหนดให้มีการไหลของน้ำในดินซึม (seepage) ผ่านมวลสาร กับให้

มวลที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (มีระดับน้ำใต้ดินสูงถึงพื้นผิว หรืออยู่ใต้ระดับน้ำ) รวมทั้งจัดประเภทของมวลสาร ได้แก่ มวลดิน (หรือมวลหิน) ที่มีค่าความเสียดทาน (friction) อย่างเดียว (ไม่มีค่าการยึดเกาะกัน – cohesion) กับมวลที่มีทั้งค่าความเสียดทานกับค่าการยึดเกาะกัน เพื่อให้สะดวกในการแทนค่าสมบัติมวลสาร

ขั้นตอนที่สาม สมการของการวิเคราะห์ผลลัพท์เชิงกำหนด เพื่อหาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) แบ่งออกเป็น 3 สมการตามเงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ กรณีที่มวลไม่มีค่าแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง (สมการ 5.1) กรณีที่มวลมีน้ำใต้ดินไหลซึมผ่านแต่ความสูงของระดับน้ำยังไม่ถึงพื้นผิวความลาด (สมการ 5.2) กับกรณีที่มวลมีค่าแรงดันน้ำเกี่ยวข้องเพราะมีน้ำใต้ดินไหลผ่านมวลสารและระดับน้ำสูงกว่าหรืออยู่บนระดับที่พื้นผิวความลาด (สมการ 5.3)

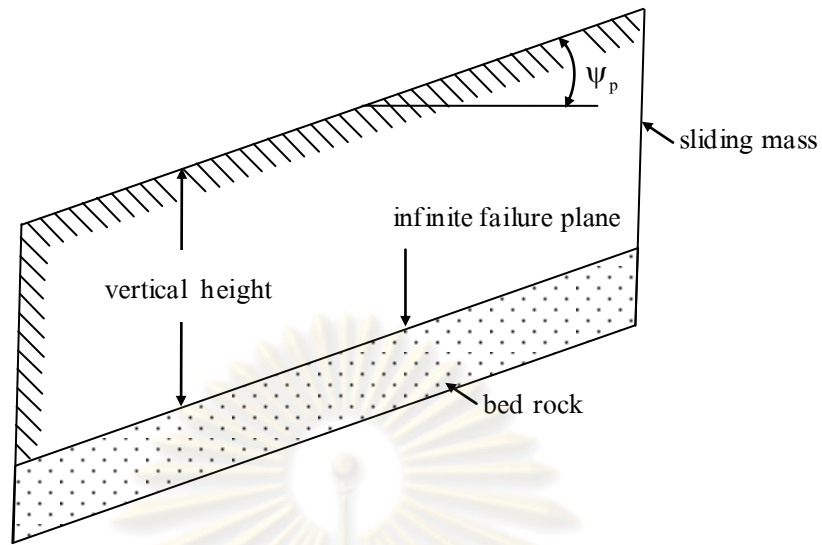
$$F.S. = \frac{c}{(\gamma H) \cos \beta \sin \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (5.1)$$

$$F.S. = \frac{c' + (\gamma' H - u) \cos^2 \beta \tan \phi'}{(\gamma' H) \cos \beta \sin \beta} \quad (5.2)$$

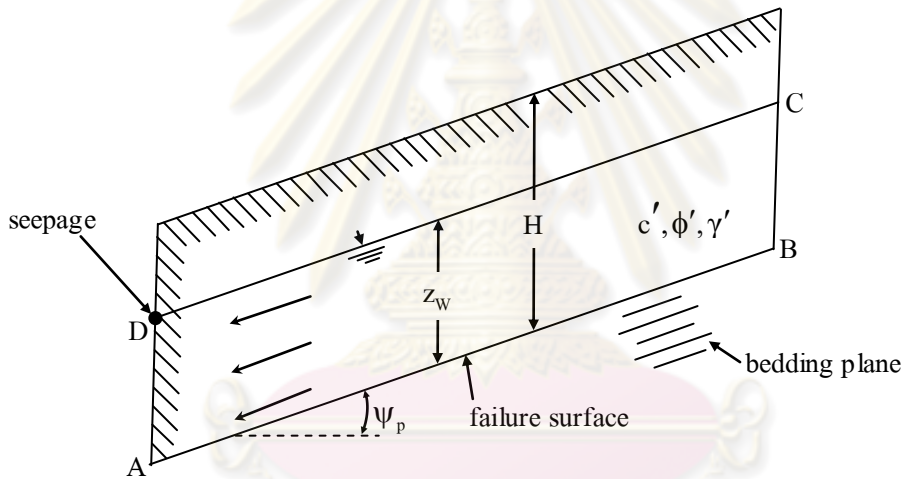
$$F.S. = \frac{c'}{(\gamma_{sat} H) \cos \beta \sin \beta} + \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \cdot \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (5.3)$$

พจน์ต่าง ๆ ในสมการ 5.1-5.3 มีความหมายดังนี้

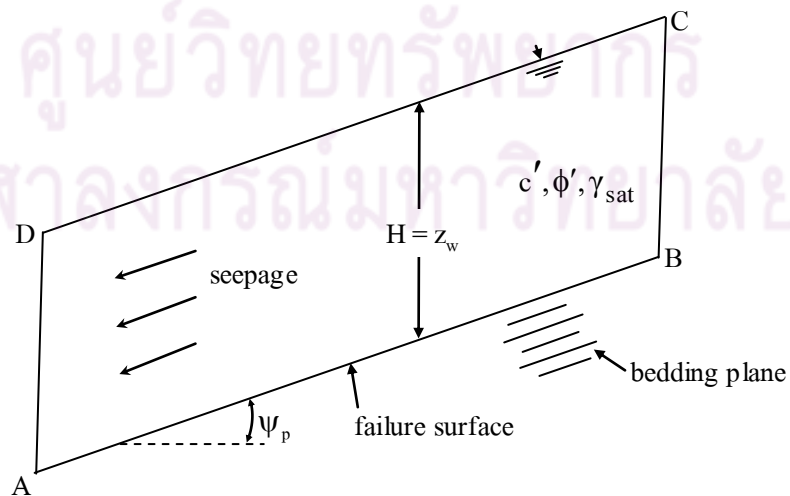
- F.S. = อัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) เป็นค่าดัชนีเสถียรภาพที่จุดสมดุล F.S. = 1
- β = มุมเอียงของการตัดความลาด วัดเทียบกับแนวราบ = ψ_p (มุมเอียงระนาบ)
- H = ความสูงในแนวตั้งของมวลสารที่วางบนระนาบ
- c = ค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชัน (cohesion) ของมวลสารที่ไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง
- c' = ค่าการยึดเกาะกัน ประสิทธิผลของมวลที่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง
- ϕ = มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) เป็นค่าสมบัติที่พื้นผิวระนาบมวลสารที่เกิดการพังทลาย ค่าความเสียดทานนี้ไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง
- ϕ' = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของมวลสารที่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง
- γ = หน่วยน้ำหนักมวลที่ไม่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง
- γ' = หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของมวลที่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง = $\gamma_{sat} - \gamma_w$
- γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักมวลอิ่มตัวด้วยน้ำ
- u = ความดันยกตัวของน้ำ = หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) x ความสูงของระดับน้ำ (z_w)



รูปที่ 5.1 ความลาดยาวไม่จำกัดที่มวลบนพื้นผิวระนาบการพังทลายไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง



รูปที่ 5.2 ความลาดยาวไม่จำกัดที่มวลมีน้ำใต้ดินไหลซึมผ่านที่ค่าระดับน้ำสูงเท่ากับ z_w



รูปที่ 5.3 ความลาดยาวไม่จำกัด มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง ระดับน้ำสูงถึงพื้นผิวความลาด

ขั้นตอนที่สี่ ปกติข้อมูลชุดแรก หรือข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบนี้จะนำมาคำนวณค่าเชิงสถิติให้เป็นค่าเฉลี่ย (mean, x_{ave}) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยนี้ไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, C.O.V.) ต่อ ถ้าหากข้อมูลที่ทำกรทดสอบหาค่าสมบัติมวลสารเปราะ (ที่เป็นมวลดินหรือมวลหิน) มีจำนวนข้อมูลน้อยค่าเกินไป ไม่เพียงพอในการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาค่าการแปรผันเชิงความน่าจะเป็น จึงจำเป็นต้องกำหนดค่า C.O.V. ขึ้นมา ซึ่งในบทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้ ผู้วิจัยได้สรุปจากเอกสารงานวิจัยอื่นหลายโครงการ ระบุให้ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ the lowest conceivable value of the parameter – LCV) เป็น 15 % และให้ค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ the highest conceivable value of the parameter – HCV) เป็น 40 %

ขั้นตอนที่ห้า เมื่อต้องการหาค่าดัชนีที่เป็น ค่าอัตราส่วนปลอดภัย ค่าโอกาสการพังทลาย ให้ใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันกับแบบจำลองที่หนึ่งที่ต้องค่าขอบความปลอดภัย ให้ดำเนินการตามขั้นตอนของหัวข้อ 4.2 ในส่วนของแบบจำลองที่สองที่ต้องค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด ให้ดำเนินการตามขั้นตอนของหัวข้อ 4.3

ขั้นตอนที่หก เป็นการใช้แบบจำลองที่สามที่มีขั้นตอนของการจำลองแบบข้อมูล (data simulation) วิธีการที่สะดวกเป็นการนำข้อมูลมาคำนวณค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพซ้ำ วิธีการที่นิยมใช้ในการจำลองแบบข้อมูลเพื่อหาค่า $p(f)$ ที่ได้จากการคำนวณซ้ำ ใช้วิธี Monte Carlo simulation และได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.4 บทที่ 4

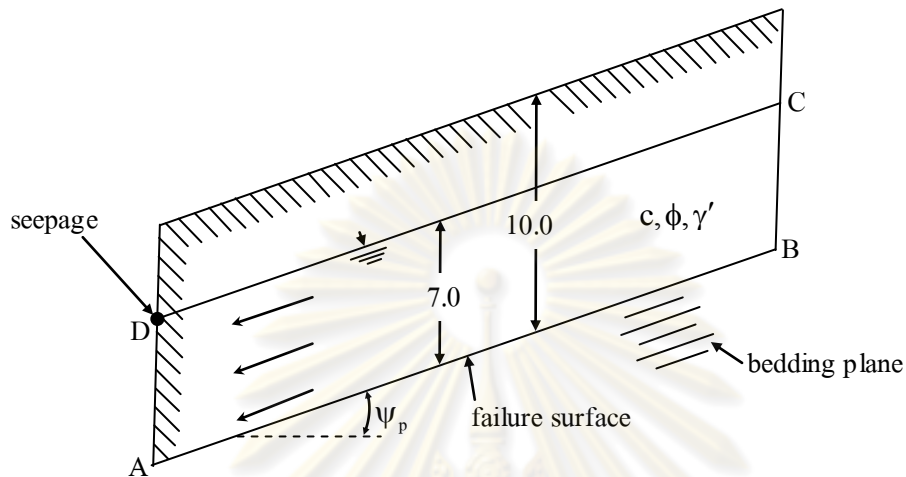
5.1.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์เสถียรภาพความลาดยาวไม่จำกัด

ตัวอย่างในหัวข้อย่อยนี้ เป็นการตัดความลาดที่ยาวไม่จำกัดและยังมีน้ำในดินไหลซึมผ่านแต่ระดับน้ำในดินยังสูงไม่ถึงระดับพื้นผิว ในภาคสนามมีการปฏิบัติในลักษณะนี้บ่อย เช่น การเปิดหน้าดิน (หิน) ในบริเวณเชิงเขาที่มีความลาดเอียงอยู่แล้ว

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.1

ในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.4 กำหนดให้มวลของหินดินดาน มีค่ามุมเอียงปรากฏ (apparent dip) ของชั้นหิน เท่ากับ 16 องศา ซึ่งเป็นมุมเอียงความลาดที่ยาวมากและหน้าความลาดขนานกับระนาบที่เกิดการพังทลาย มีความสูงในแนวตั้ง 10 เมตร ในภาคสนามมีน้ำใต้ดินไหลขนานกับระนาบของการพังทลายที่จุด D เป็นตำแหน่งสูงสุดที่พบน้ำไหลซึมออกในแนวตั้งเทียบกับระนาบการพังทลาย เท่ากับ 7.0 เมตร ค่าสมบัติหินดินดานในภาวะที่เปียก (wet condition) ได้แก่ หน่วย

น้ำหนักประสิทธิผล, $\gamma' = 20 \text{ kN/m}^3$ ค่าการยึดเกาะกันประสิทธิผล, $c' = 15 \text{ kN/m}^2$ และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล, $\phi' = 20^\circ$



รูปที่ 5.4 ความลาดของชั้นหินดินดาน ที่มีน้ำใต้ดินไหลผ่านขนานกับระนาบการพังทลาย

ผลเฉลย

สมการที่ 5.2 ใช้หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยด้วยวิธีเชิงกำหนด สำหรับกรณีของโจทย์ตัวอย่างนี้ที่มีน้ำใต้ดินไหลผ่านบางส่วน

$$\text{F.S.} = \frac{c' + (\gamma'H - u) \cos^2 \psi_p \tan \phi'}{(\gamma'H) \sin \psi_p \cos \psi_p} \quad (\text{ก})$$

$$U = \gamma_w z_w = 9.81 \times 7 \\ = 68.67 \text{ kN/m}^2$$

นำค่าตัวแปรทั้งหมด มาแทนในสมการ (ก)

$$\begin{aligned} \text{F.S.} &= \frac{15 + [(20 \times 10) - 68.67] \cos^2 16^\circ \tan 20^\circ}{(20 \times 10) \sin 16^\circ \cos 16^\circ} \\ &= \frac{59.17}{52.99} \\ &= 1.12 \end{aligned}$$

5.1.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายของความลาดยาวไม่จำกัด

ตัวอย่างในหัวข้อย่อนี้ เป็นการตัดความลาดที่ยาวไม่จำกัด และยังมีแรงดันน้ำร่วมด้วย ค่า $F.S. = 1.12$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ถ้าหากต้องการเสถียรภาพมวลสารเชิงความน่าจะเป็น กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 3 ตัวแปร ได้แก่ มุมเสียดทานประสิทธิผล (ϕ') ค่าการยึดเกาะกันประสิทธิผล (c') และหน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (γ') ทั้งนี้ ตัวแปรสุ่มทั้งสามตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{SM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.12; \quad \beta_N = 0.696; \quad [p(f)]_I = 24.3\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.12; \quad \beta_N = 0.261; \quad [p(f)]_I = 39.7\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 1.12; \quad \beta_N = 0.734; \quad [p(f)]_{II} = 23.1\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 1.11; \quad \beta_N = 0.267; \quad [p(f)]_{II} = 39.5\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{range}} = 0.75 - 1.72; \quad [p(f)]_{\text{SIM}} = 19.0\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{range}} = -10.55 - 3.46; \quad [p(f)]_{\text{SIM}} = 45.5\%$$

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่เนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.1

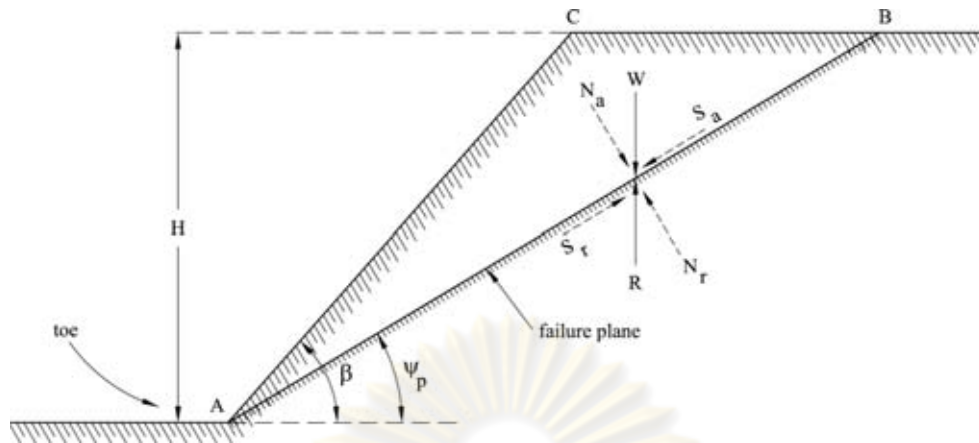
5.2 การพังทลายของความลาดทั่วไปที่เป็นแบบระนาบ

ปกติการตัดความลาดในมวลดินหรือมวลหิน สามารถกำหนดระยะความยาวของหน้าความลาดได้ รวมทั้งกำหนดระยะมิติอื่นให้มีค่าจำกัดหรือวัดได้ (finite) การระบุมุมหน้าความลาดระบุเป็นองศาหรือระบุเป็นค่าอัตราส่วนระยะในแนวราบต่อระยะในแนวตั้ง ทั้งนี้ให้ ค่าระยะในแนวตั้งเท่ากับ 1 ส่วน รูปแบบความลาดทั่วไป แสดงไว้ในรูปที่ 5.5

5.2.1 รูปแบบการลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ขั้นตอนแรกกับขั้นตอนที่สอง เป็นรูปแบบเดียวกันกับหัวข้อ 5.1.1 ในเรื่องของการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการพังทลายแบบระนาบยาวไม่จำกัด ที่เป็นการจำแนกชุดข้อมูล กับการระบุสถานภาพของมวลสาร และเงื่อนไขประกอบอื่น เช่น แรงดันน้ำ เป็นต้น

ขั้นตอนที่สาม ใช้สมการของการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงกำหนด เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ของความลาดทั่วไป ที่สามารถกำหนดระยะมิติของความกว้างกับความสูง แบ่งออกเป็น 2 สมการ ได้แก่ สมการ 5.4 กับสมการ 5.5



รูปที่ 5.5 ความลาดทั่วไปที่ระบุมิติความสูงกับความยาว (หรือความกว้าง) ได้
 แนวแรงที่เป็นหัวลูกศรเส้นเต็ม คือค่าแรงจากน้ำหนักมวลสาร (W)
 กับแรงปฏิกิริยาที่ด้าน (R) ส่วนหัวลูกศรที่เป็นเส้นประ เป็นแรงจาก
 อัดบนระนาบ (N_a) กับแรงปฏิกิริยาจากอัดที่ที่ด้าน (N_r) และมีแรง
 เชือนทำให้มวล ไถลเลื่อน (S_a) กับแรงเชือนที่ด้านมวลไถลเลื่อน (S_r)
 เส้น $AB = L$ เป็นระยะเชิงเส้นของความยาวระนาบที่เกิดการพังทลาย

สมการ 5.4 กรณีที่มวลความลาด ไม่มีค่าแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนสมการ 5.5 ใช้
 กับความลาดทั่วไปที่มีค่าแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง

$$F.S. = \frac{(cL) + (W \cos \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (5.4)$$

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U - (V \sin \psi_p)] \tan \phi}{(W \sin \psi_p) + (V \cos \psi_p)} \quad (5.5)$$

สมการที่ 5.5 ใช้ได้กับมวลความลาดที่มีรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) เกิดขึ้นหรือไม่มี
 รอยร้าวจากแรงดึง (น้ำซึมมาตามระนาบการพังทลาย)

พจน์ ต่าง ๆ ในสมการ 5.4-5.5 (ดูรูปที่ 5.5-5.7 ประกอบ) มีความหมายดังนี้

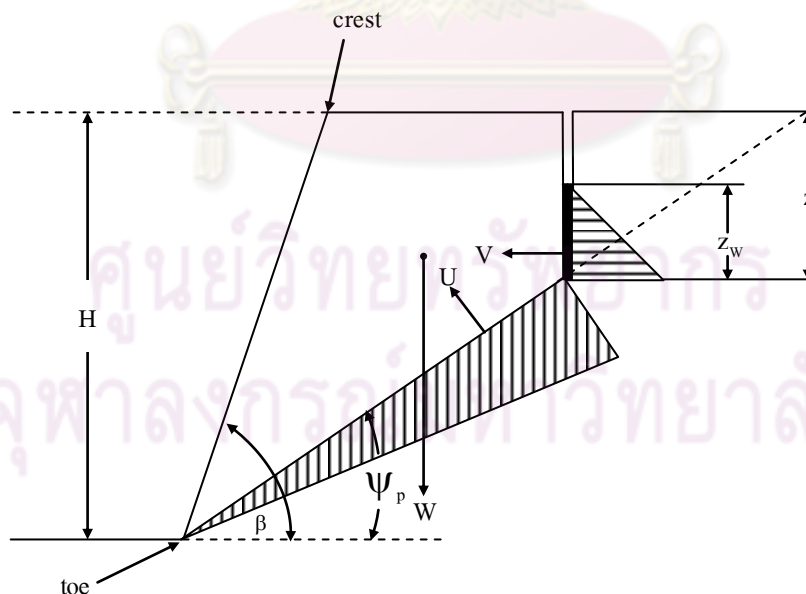
F.S. = อัตราส่วน ปลอดภัย (factor of safety) เป็นค่าดัชนีเสถียรภาพ ที่จุดสมดุล F.S. = 1

β = มุมเอียงของการตัดความลาด วัดเทียบกับแนวราบ

- ψ_p = มุมเอียงของระนาบการพังทลาย (ความยาว L) วัดเทียบกับแนวราบ
 W = น้ำหนักมวลสารที่วางบนระนาบ (ความยาว L) และมีโอกาสไถลเลื่อน
 U = แรงดันน้ำ (ต่อหน่วยความยาว) ที่ทำให้เกิดการยกตัวของมวลสาร
 V = แรงดันน้ำ (ต่อหน่วยความยาว) ในรอยร้าวของมวลสาร ที่ทำให้เกิดแรงดันข้างเสริมการไถลเลื่อน
 ϕ = มุมเสียดทานภายใน ที่พื้นผิวระนาบมวลสารที่เกิดการพังทลาย

ผลจากการที่รอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในมวลความลาด ตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวมีผลต่อการคำนวณค่าน้ำหนักของมวลที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย (ดูรูปที่ 5.6-5.7) กรณีที่มวลความลาดมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในชั้นตะพักด้านบน (upper bench) ดังรูปที่ 5.6 หรือเรียกว่า ชั้นพื้นผิวความลาดด้านบน (upper slope surface) การคำนวณค่าน้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายของกรณีนี้ใช้สมการ 5.6 ที่ดัดแปลงมาจากหน้า 154 (Hoek and Bray, 1981)

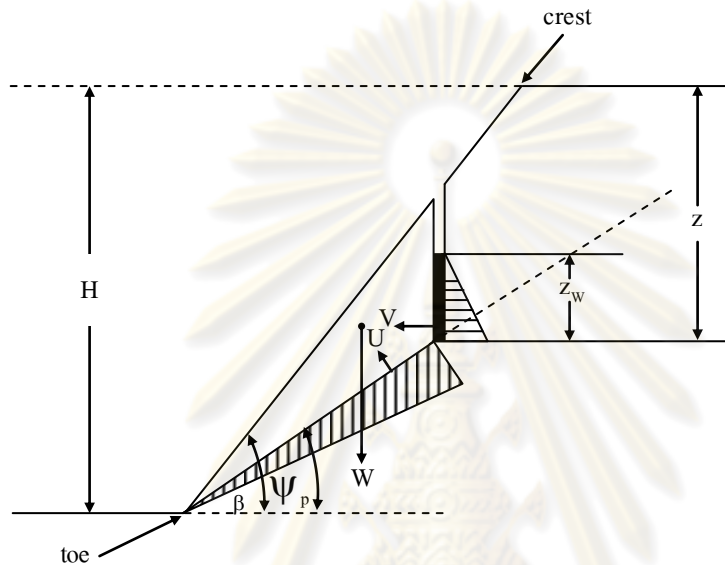
$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z^2}{H^2} \right\} \cdot (\cot \psi_p) - (\cot \beta) \right] \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวาง ความลาดทั่วไปที่มีรอยร้าวจากแรงดึง ที่อยู่ในชั้นตะพักด้านบน ในรูปแสดงสัญลักษณ์ของตัวแปรที่เป็นมิติระยะ คำนวณ กับแนวแรงต่าง ๆ

แต่ถ้าตำแหน่งรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในหน้าความลาด (slope face) หรือเรียกว่า พื้นผิวความลาด (slope surface) ดังรูปที่ 5.7 การคำนวณค่าน้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายของกรณีนี้ใช้สมการ 5.7 ที่ดัดแปลงมาจากหน้า 154 (Hoek and Bray, 1981)

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z}{H} \right\}^2 (\cot \psi_p) \{ (\cot \psi_p \cdot \tan \beta) - 1 \} \right] \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.7 ภาพตัดขวาง ความลาดทั่วไปที่มีรอยร้าวจากแรงดึง ที่อยู่ในหน้าความลาดที่ตัดเอียง ในรูปแสดงสัญลักษณ์ของตัวแปร ที่เป็นค่าระยะ ค่ามุม กับแนวแรงต่าง ๆ

ขั้นตอนที่สี่ ในการคำนวณค่าพจน์ตัวแปรจำนวน 3 ค่า ของสมการ 5.8-5.9 ได้แก่ ค่าระยะความยาวของระนาบ (L) แรงดันน้ำที่เกิดการยกตัว (U) กับสมการ 5.10 หากค่าแรงดันน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงดึงที่ทำให้เกิดแรงผลักดันข้าง (V) แยกเป็น 3 สมการย่อย

$$L = (H - z) \cos \text{ec } \psi_p \quad (5.8)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H - z) \text{cosec } \psi_p \quad (5.9)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w (z_w)^2 \quad (5.10)$$

ขั้นตอนที่ห้า ในการปฏิบัติงานภาคสนามจริงมีการตัดชั้นตะพักส่วนบน (upper bench) หรือเรียกว่า ชั้นความลาดด้านบน (upper slope) ให้มีค่ามุมลาดเอียงเทออกด้านนอก (ไม่ขนานกับ

แนวระดับพื้นผิวดิน) เพื่อให้การใช้รูดตัดคันดินหรือคันหินไหลลงด้านล่างได้สะดวก ผู้วิจัยได้ปรับแต่งและแก้ไขวิธีการเชิงกำหนด (deterministic method) จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการพังทลายแนวระนาบจำนวนหลายรายการ ได้แก่ Hoek and Bray (1981), Khalokakaie (1999), Wylie and Mah (2004), สง่า ตั้งชวาล (2544, 2546) เพื่อเสนอแนะเป็นวิธีที่ปรับปรุงใหม่ กำหนดสภาพของการตัดความลาดแยกไว้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การพังทลายแบบที่หนึ่งถึงแบบที่สอง ไม่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในความลาดที่มีค่าเอียงมุมของชั้นตะพักด้านบน (ใช้ภาพตัดขวาง รูปที่ 5.8-5.9) กับการพังทลายแบบที่สามถึงแบบที่สี่ (ใช้ภาพตัดขวางรูปที่ 5.10-5.11) มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในมวลความลาด แต่ตำแหน่งรอยร้าวแตกต่างกัน สมการต้นแบบจึงมีการแยกจัดเป็นกลุ่มไว้ 4 รูปแบบดังนี้

- รูปแบบที่ 1 การพังทลายของมวลความลาดที่แห้ง (dry slope) แต่ไม่มีรอยร้าวจากแรงดึง
- รูปแบบที่ 2 การพังทลายของมวลความลาดที่เปียก (wet slope) แต่ไม่มีรอยร้าวจากแรงดึง
- รูปแบบที่ 3 การพังทลายของมวลความลาด ที่มีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ด้านบนของพื้นผิวดินชั้นตะพักด้านบน (upper bench) หรือบนพื้นผิวดินความลาดด้านบน (upper slope surface)
- รูปแบบที่ 4 การพังทลายของมวลความลาด ที่มีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ในหน้าของพื้นผิวดิน

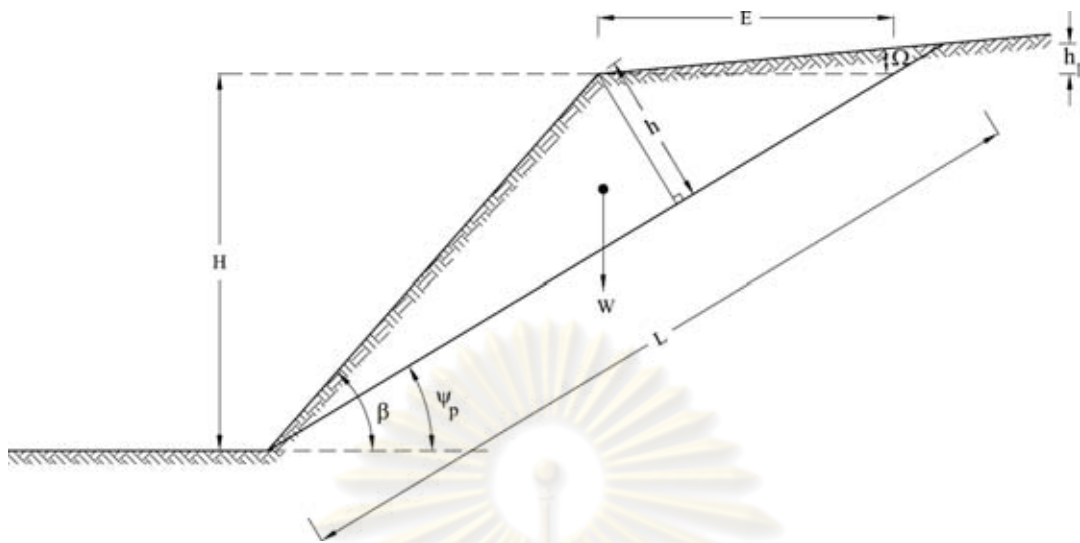
สัญลักษณ์ของตัวแปร กับขนาดมิติของพจน์ตัวแปรในรูปทั้งสี่ เหมือนกันกับตารางที่ 5.1 ถึง 5.2 ที่เป็นสมการต้นแบบ ตารางที่ 5.3 แสดงสัญกรณ์ (notation) ที่ใช้สำหรับการระบุพจน์ตัวแปร รวมทั้งแสดงค่าหน่วยตัวแปรในระบบ S.I. อนึ่งในการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็น เพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเสี่ยง สมการเชิงกำหนดที่หาค่า W ที่เป็นค่าน้ำหนักมวลสารที่เกิดจากการพังทลายที่ระบุไว้ในตาราง 5.1-5.2 ต้องปรับเปลี่ยนใหม่ใช้เป็นสมการต้นแบบในการวิเคราะห์เชิงสถิติ ดังนี้

กรณีที่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดในชั้นตะพักด้านบน (upper bench) ดังรูปที่ 5.6 (แต่มีมุมเอียงของตะพักด้านบน ให้ใช้สมการที่ 5.11 หาค่าน้ำหนักมวล (W))

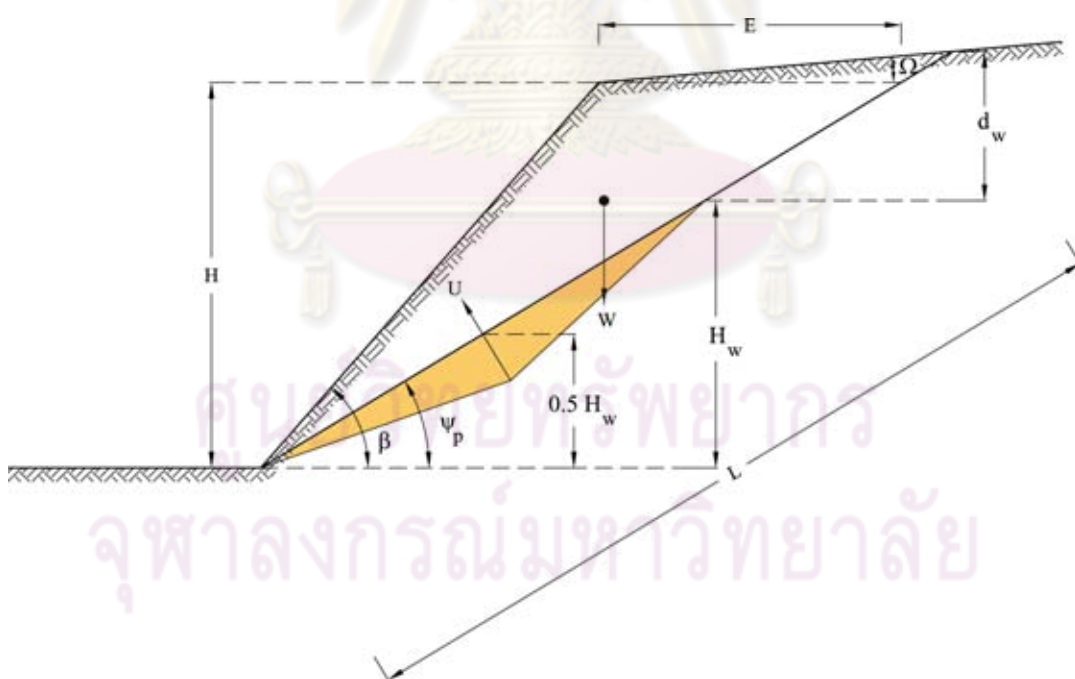
$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z^2}{H^2} \right\} \cdot (\cot \psi_p) - (\cot \beta) \right] + \frac{1}{2} b^2 \tan \Omega \quad (5.11)$$

กรณีที่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดในหน้าความลาด (slope face) ดังรูปที่ 5.7 (แต่มีมุมเอียงของตะพักด้านบน ให้ใช้สมการที่ 5.12 หาค่าน้ำหนักมวล (W))

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z}{H} \right\}^2 (\cot \psi_p) \{ (\cot \psi_p \cdot \tan \beta) - 1 \} \right] \quad (5.12)$$



รูปที่ 5.8 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 1 การพังทลายตามแนว
ระนาบของมวลสารแห้ง ไม่ปรากฏรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น



รูปที่ 5.9 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตเฉพาะแบบที่ 2 การพังทลายตามแนว
ระนาบของมวลสารที่เปียก ไม่ปรากฏรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น

ตารางที่ 5.1 สมการค้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพท์เชิงเสถียรภาพ การตัดความลาดมีค่าความชันของชั้นตะพักด้านบน แต่ไม่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.9

Condition I – Dry slope without tension crack.

$$F.S. = \frac{c.L + (W \cdot \cos \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (5.13)$$

$$E = H(\cot \psi_p - \cot \beta) \quad (5.14)$$

$$h_1 = \frac{\sin \psi_p (\sin \Omega) E}{\sin(\psi_p - \Omega)} \quad (5.15)$$

$$L = \frac{H + h_1}{\sin \psi_p} \quad (5.16)$$

$$W = 0.5(L) \gamma H \left\{ \frac{\sin(\beta - \psi_p)}{\sin \beta} \right\} \quad (5.17)$$

Condition II – Wet slope without tension crack.

$$F.S. = \frac{c L + (W \cdot \cos \psi_p - U) \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (5.18)$$

$$E = H(\cot \psi_p - \cot \beta) \quad (5.19)$$

$$h_1 = \frac{\sin \psi_p (\sin \Omega) E}{\sin(\psi_p - \Omega)} \quad (5.20)$$

$$L = \frac{H + h_1}{\sin \psi_p} \quad (5.21)$$

$$W = 0.5(L) \gamma H \left\{ \frac{\sin(\beta - \psi_p)}{\sin \beta} \right\} \quad (5.22)$$

$$U = \frac{1}{4} \gamma_w H_w^2 \frac{1}{\sin \psi_p} \quad (5.23)$$

ตารางที่ 5.2 สมการต้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ การตัดความลาด
มีค่าความชันของชั้นตะกอนด้านบน และมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในชั้น
ตะกอนด้านบนกับในหน้าความลาด พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11

Condition III – Natural slope with tension crack : crack in the upper slope face.

$$F.S. = \frac{cL + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (5.24)$$

$$T_d = H + b \tan \Omega - (b + H \cot \beta) \tan \psi_p \quad (5.25)$$

$$L = (H \cot \beta + b) \sec \psi_p \quad (5.26)$$

$$W = 0.5 \gamma \left[H^2 \cot \beta + 2bH + b^2 \tan \Omega - (H \cot \beta + b)^2 \tan \psi_p \right] \quad (5.27)$$

$$U = 0.5 \gamma_w z_w L \quad (5.28)$$

$$V = 0.5 \gamma_w z_w^2 \quad (5.29)$$

Condition IV – Natural slope with tension crack : crack in the slope face.

$$F.S. = \frac{cL + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (5.30)$$

$$T_d = [H - (g - D) \tan \beta] - [(H \cot \beta) - (g - D)] \tan \psi_p \quad (5.31)$$

$$= H - z_o - y_o$$

$$z_o = (g - D) \tan \beta \quad (5.32)$$

$$y_o = [H \cot \beta - (g - D) \tan \psi_p] \quad (5.33)$$

$$E = H (\cot \psi_p - \cot \beta) \quad (5.34)$$

$$L = [H \cot \beta - (g - D)] \sec \psi_p \quad (5.35)$$

$$W = 0.5 \gamma \left[(H)(E) - \{T_d + (g - D) \tan \beta\} \cdot \{(g - D) + E\} + \{(g - D)^2 \tan \beta\} \right] \quad (5.36)$$

$$U = 0.5 \gamma_w z_w L \quad (5.37)$$

$$V = 0.5 \gamma_w z_w^2 \quad (5.38)$$

ตารางที่ 5.3 การกำหนดสัญกรณ์ (notation) ที่เป็นภาษาอังกฤษกับภาษากรีก หน่วยที่ระบุอยู่ในระบบ S.I. และใช้กับสมการต้นแบบในตาราง 5.1 ถึงตาราง 5.2

| | | |
|------------|---|--|
| F.S. | = | ตัวเลขค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) |
| c | = | โคฮีชัน (cohesion) ที่เป็นแรงต่อพื้นที่ที่มีการเกาะยึดติดกันในมวลสาร หน่วย kN/m^2 |
| ϕ | = | มุมเสียดทานภายในของมวลสาร หน่วย องศา |
| ψ_p | = | มุมเอียงเทของระนาบการพังทลาย หน่วย องศา |
| β | = | มุมความชันของการตัดความลาดหน้าเหมือง หน่วย องศา |
| Ω | = | มุมความชันของชั้นตะกักด้านบนความลาด หน่วย องศา |
| γ | = | หน่วยน้ำหนักของมวลสารที่เป็นดินหรือหิน หน่วย kN/m^3 |
| γ_w | = | หน่วยน้ำหนักของน้ำ หน่วย kN/m^3 |
| d_w | = | ความลึก (วัดจากตะกักด้านบนถึงจุดสูงสุดของระดับน้ำใต้ดิน) หน่วย m |
| H | = | ความสูง (วัดจาก slope toe ถึง slope crest ของความลาด) หน่วย m |
| h | = | ระยะเส้นตั้งจากวัดจาก slope crest ถึง failure plane หน่วย m |
| h_1 | = | ความสูงของชั้นตะกักด้านบน (วัดจาก slope crest ถึง failure plane ตัดกับชั้นตะกักด้านบน) หน่วย m |
| T_d | = | ความลึก (ระยะในแนวดิ่ง) ของรอยร้าวจากแรงดึง หน่วย m |
| z | = | ระยะในแนวดิ่ง จากระดับ crest ถึงจุดต่ำสุดของรอยแตกจากแรงดึง หน่วย m |
| z_w | = | ความลึก (ระยะในแนวดิ่ง) ของน้ำที่ขังในรอยร้าว หน่วย m |
| H_w | = | ความสูง (วัดจากตะกักด้านล่างถึงจุดสูงสุดของระดับน้ำใต้ดิน) หน่วย m |
| L | = | ระยะของบล็อกมวลสารที่ไถลเลื่อน (ความหนา 1 เมตร) หน่วย m |
| W | = | น้ำหนักของบล็อกมวลสารที่ไถลเลื่อน (ความหนา 1 เมตร) หน่วย kN/m |
| U | = | แรงดันยกตัวของน้ำบนระนาบการพังทลายที่เอียงเท (ความหนา 1 เมตร) หน่วย kN/m |
| V | = | แรงดันของน้ำในระนาบรอยร้าว (ความหนา 1 เมตร) หน่วย kN/m |

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) การกำหนดสัญกรณ์ (notation) ที่เป็นภาษาอังกฤษกับภาษากรีก หน่วยที่ระบุอยู่ในระบบ S.I. และใช้กับสมการต้นแบบในตาราง 5.1 ถึงตาราง 5.2

| | | |
|---|---|--|
| E | = | ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึง failure plane หน่วย m |
| b | = | ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึง tension crack ที่อยู่ในพื้นที่ผิวด้านบนของชั้นตะพัก หน่วย m |
| g | = | ระยะในแนวราบที่วัดจาก tension crack ที่อยู่ในหน้าความลาดถึงตำแหน่งที่ failure plane ตัดชั้นตะพักด้านบน หน่วย m |
| D | = | ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึงตำแหน่งที่ failure plane ที่ตัดชั้นตะพักด้านบน หน่วย m |

5.2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์เสถียรภาพความลาดทั่วไป

ตัวอย่างในหัวข้อย่อยนี้ เป็น ประเมินความลาดที่ชั้นตะพักด้านบนมีมุมเอียงกับมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดในสองรูปแบบ

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.2

ใช้ภาพตัดขวางรูปที่ 5.9 ร่วมกับรูปที่ 5.11 เป็นความลาดที่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดตรงหน้าความลาดและมีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง กำหนดค่าระยะ มิตกับระบุดำสมบัติ เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของความลาด ดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมืองหินปูน = 20 เมตร
- มุมความลาดของชั้นตะพัก = 65°
- มุมเอียงของระนาบที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย = 35°
- ความสูงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงดึง, $z_w = 5.5$ เมตร
- ระยะแนวตั้ง z จากจุดต่ำสุดของรอยร้าวถึงหน้าความลาด = 16.8 เมตร
- หน่วยน้ำหนักของหินปูน = 25.5 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร
- ค่าการยึดเกาะกันของระนาบชั้นหิน = 45 กิโลนิวตันต่อตร.เมตร
- มุมเสียดทานภายในของระนาบ = 25°
- มุมความชันของชั้นตะพักด้านบน, $\Omega = 5^\circ$
- นิพจน์ $(g-D) = 4.76$ เมตร

ผลเฉลย

จากรูปที่ 5.9 ร่วมกับรูปที่ 5.11 หาความลึกของรอยร้าวจากแรงดึง (T_d) ค่าระยะแนวราบที่เป็นค่า E ค่าระยะความยาวของระนาบที่เกิดการไถลเลื่อน (L) แรยยกตัวจากแรงดันน้ำ (U) แรยผลักจากแรงดันน้ำในรอยร้าวจากแรงดึง (V) และน้ำหนักของมวลหินปูน (W) ที่วางบนระนาบการพังทลาย ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_d &= [H - (g - D) \tan \beta] - [(H \cot \beta) - (g - D)] \tan \psi_p \\ &= [20 - (4.76) \tan 65^\circ] - [(20 \cot 65^\circ) - (4.76)] \tan 35^\circ \\ &= 6.60 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= H (\cot \psi_p - \cot \beta) \\ &= 20 (\cot 35^\circ - \cot 65^\circ) = 19.24 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= [H \cot \beta - (g - D)] \sec \psi_p \\ &= [20 \cot 65^\circ - (4.76)] \sec 35^\circ = 5.58 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= 0.5 \gamma_w z_w L \\ &= 0.5 \times 9.81 \times 5.5 \times 5.58 = 150.53 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 0.5 \gamma_w z_w^2 \\ &= 0.5 \times 9.81 \times 5.5^2 = 148.38 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= 0.5 \gamma \left[\frac{(H)(E) - \{T_d + (g - D) \tan \beta\}}{\cdot \{(g - D) + E\} + \{(g - D)^2 \tan \beta\}} \right] \\ &= 0.5 \times 25.5 \left[\frac{(20)(19.24) - \{6.6 + (4.76) \tan 65^\circ\}}{\cdot \{(4.76) + 19.24\} + \{(4.76)^2 \tan 65^\circ\}} \right] \\ &= 384.62 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

นำค่าตัวแปรที่คำนวณได้ มาแทนหาอัตราส่วนปลอดภัย จากสมการที่ 5.28 ในตารางที่ 5.2

$$\begin{aligned}
 \text{F.S.} &= \frac{c.L + (W \cdot \cos \Psi_p - U - V \sin \Psi_p) \tan \phi}{W \cdot \sin \Psi_p + V \cos \Psi_p} \\
 &= \frac{45 \times 5.58 + (384.62 \cdot \cos 35^\circ - 150.53 - 148.38 \sin 35^\circ) \tan 25^\circ}{384.62 \sin 35^\circ + 148.38 \cos 35^\circ} \\
 &= 0.842 \text{ (ต่ำกว่าหนึ่ง มวลไม่มีเสถียรภาพ เกิดการไถลเลื่อน)}
 \end{aligned}$$

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.3

ในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.9 กับรูปที่ 5.10 เป็นการตัดชั้นตะพักโดยการจากการระเบิดหินแกรนิต ปรากฏว่ามีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักชั้นบนความลาด จากการตรวจสอบภาคสนามกับการนำตัวอย่างแท่งหิน (core) ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการมีข้อมูล ดังต่อไปนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมืองหินแกรนิต = 30.5 เมตร
- มุมของความลาด = 58°
- มุมความชันของชั้นตะพักด้านบน, $\Omega = 5^\circ$
- มุมเอียงของระนาบที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย = 20°
- ระยะในแนวตั้งของรอยร้าวจากแรงดึงถึงชั้นตะพักด้านบน = 20.11 เมตร
- ความสูงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงดึง, $z_w = 20.11$ เมตร
- หน่วยน้ำหนักของหินโคโลไมต์ = 25.1 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร
- ค่าการยึดเกาะกันของระนาบชั้นหิน = 110 กิโลนิวตันต่อตร.เมตร
- มุมเสียดทานภายในของระนาบ = 20°
- ระยะราบจากจุดยอดของความลาดถึงตำแหน่งที่เกิดรอยร้าว = 12.50 เมตร

ผลเฉลย

จากรูปที่ 5.9 กับรูปที่ 5.10 หาความลึกของรอยร้าวจากแรงดึง (T_d) ค่าระยะความยาวของระนาบที่เกิดการไถลเลื่อน (L) แรงยกตัวจากแรงดันน้ำ (U) แรงผลักจากแรงดันน้ำในรอยร้าวจากแรงดึง (V) และน้ำหนักของมวลหินปูน (W) ที่วางบนระนาบการพังทลาย ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T_d &= H + b \tan \Omega - (b + H \cot \beta) \tan \Psi_p \\
 &= 30.5 + 12.5 \tan 5^\circ - (12.5 + 30.5 \cot 58^\circ) \tan 20^\circ \\
 &= 20.11 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L &= (H \cot \beta + b) \sec \psi_p \\
 &= [30.5 \cot 58^\circ + 12.5] \sec 20^\circ = 33.58 \text{ เมตร} \\
 U &= 0.5 \gamma_w z_w L \\
 &= 0.5 \times 9.81 \times 20.11 \times 33.58 = 3,312.32 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร} \\
 V &= 0.5 \gamma_w z_w^2 \\
 &= 0.5 \times 9.81 \times 20.11^2 = 1,983.64 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร} \\
 W &= 0.5 \gamma \left[H^2 \cot \beta + 2bH + b^2 \tan \Omega - (H \cot \beta + b)^2 \tan \psi_p \right] \\
 &= 0.5 \times 25.1 \left[\begin{array}{l} 30.5^2 \cot 58^\circ + 2 \times 12.5 \times 30.5 + 12.5^2 \tan 5^\circ \\ -(30.5 \cot 58^\circ + 12.5)^2 \tan 20^\circ \end{array} \right] \\
 &= 12,486.78 \text{ กิโลนิวตันต่อเมตร}
 \end{aligned}$$

นำค่าตัวแปรที่คำนวณได้ มาแทนหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย จากสมการที่ 5.22

$$\begin{aligned}
 \text{F.S.} &= \frac{c.L + (W \cdot \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \cdot \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \\
 &= \frac{110 \times 33.58 + (12,486.78 \cdot \cos 20^\circ - 3,312.32 - 1,983.64 \sin 20^\circ) \tan 20^\circ}{12,486.78 \sin 20^\circ + 1,983.64 \cos 20^\circ} \\
 &= 1.06 \text{ (มากกว่าหนึ่ง มวลมีเสถียรภาพ ไม่เกิดการไถลเลื่อน)}
 \end{aligned}$$

5.2.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายของความลาดที่ชันตะพักด้านบนมีความเอียง

ก. กรณีที่รอยร้าวจากแรงดึงเกิดในหน้าความลาด

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.2 ค่า $\text{F.S.} = 0.842$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ถ้าหากต้องการหาเสถียรภาพมวลสารเชิงความน่าจะเป็น คำนวณน้ำหนักมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายบนระนาบ ต้องใช้สมการ 5.12 เป็นสมการต้นแบบ (ไม่ใช่สมการ 5.36) กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 4 ตัวแปร ได้แก่ มุมเสียดทาน (ϕ) ค่าการยึดเกาะกัน (c) และหน่วยน้ำหนักหิน (γ) และมุมเอียงของระนาบการพังทลาย (ψ_p) ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสี่ตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มี

ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จึงทำให้ได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{SIM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 0.842; \quad \beta_N = -1.25; \quad [p(f)]_I = 89.4\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 0.842; \quad \beta_N = -0.47; \quad [p(f)]_I = 68.0\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 0.848; \quad \beta_N = -0.961; \quad [p(f)]_{II} = 83.2\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 0.889; \quad \beta_N = -0.244; \quad [p(f)]_{II} = 59.6\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{range} = 0.29-1.80; \quad [p(f)]_{SIM} = 80.1\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{range}} = -21.9 - 23.4 ; \quad [p(f)]_{\text{SIM}} = 50.7\%$$

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.2

ข. กรณีที่อยู่ราวจากแรงดึงเกิดขึ้นตะพักด้านบน

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.3 ค่า F.S. = 1.06 เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ถ้าหากต้องการหาเสถียรภาพมวลสารเชิงความน่าจะเป็น คำนวณน้ำหนักมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายบนระนาบ ต้องใช้สมการ 5.11 เป็นสมการต้นแบบ (ไม่ใช่สมการ 5.27) กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 4 ตัวแปร ได้แก่ มุมเสียดทาน (ϕ) ค่าการยึดเกาะกัน (c) และหน่วยน้ำหนักหิน (γ) และมุมเอียงของระนาบการพังทลาย (ψ_p) ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสี่ตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า (C.O.V.)_{FS} ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{\text{SIM}}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{AVE}} = 1.06; \quad \beta_N = 0.386; \quad [p(f)]_1 = 35.0\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{AVE}} = 1.06; \quad \beta_N = 0.145; \quad [p(f)]_1 = 44.2\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 1.06; \quad \beta_N = 0.532; \quad [p(f)]_{II} = 29.7\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 1.08; \quad \beta_N = 0.245; \quad [p(f)]_{II} = 40.3\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{range} = 0.73 - 1.48; \quad [p(f)]_{SIM} = 27.9\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{range} = -0.53 - 4.11; \quad [p(f)]_{SIM} = 38.8\%$$

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การพังทลายของความลาดแบบวงกลม

การเกิดการพังทลายหรือการพิบัติแบบวงกลมไม่ค่อยพบในมวลหินแข็ง แต่พบบ่อยมากในมวลดินอ่อนหรือมวลดินปนหินทั่วไป ในภาพตัดขวางระนาบการพังทลายแบบนี้เป็นรูปโค้งวงกลม (circular arc) หรือเป็นรูปวงกลม (circle) หรือในรูปแบบอื่นที่ใกล้เคียง แต่ไม่ใช่เป็นแนว

เส้นตรง ในการประเมินเสถียรภาพมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายประเภทนี้ กำหนดให้เป็นมวลดินทั้งหมด แต่อาจแยกชนิดดินตามความแตกต่างของพฤติกรรมมวลดินต่อแรงเฉือนที่กระทำ เช่น ดินที่มีค่าการยึดเกาะกัน กับดินที่ไม่มีค่าการยึดเกาะกัน ดินที่มีความเสียดทานภายใน กับดินที่ไม่มีค่าการเสียดทานภายใน เป็นต้น แนวทางวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของการพังทลายแบบวงกลมมีหลากหลาย ผู้วิจัยโครงการนี้ได้เลือกแสดงการหาผลลัพธ์ไว้ 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์ดินที่มีสมบัติเกี่ยวข้องกับค่าการยึดเกาะกันกับมีค่าความเสียดทาน การวิเคราะห์แบบแบ่งส่วนตามปกติ และการวิเคราะห์แบบแบ่งส่วนด้วยวิธีของ Bishop

5.3.1 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ที่ไม่มีค่าการยึดเกาะกัน

มวลดินที่สมมุติเป็นดินเอกพันธ์ (homogeneous) มีเนื้อเดียวกันตลอด มวลดินที่ไม่มีแรงยึดเกาะกัน แต่ยังมีค่าความเสียดทานระหว่างอนุภาคแร่ในมวลดิน ตัวอย่างดินทราย (sandy soil) ดินประเภทนี้ขนาดเม็ดอนุภาคหยาบ ประมาณขนาดเม็ดทราย [sand size (0.05 – 2.0 มม.)] แต่ถ้าอนุภาคใหญ่กว่านี้จะเป็นเม็ดกรวด (gravel) มวลสารชนิดนี้เกิดการไถลเลื่อนได้ ถ้าหากค่ามุมความลาด (β) ของมวลดินแห้ง สูงเกินกว่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของอนุภาคเม็ดทราย นั่นคือค่าอัตราส่วนปลอดภัย

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (5.39)$$

ในกรณีที่ดินไม่มีค่าการยึดเกาะกันนี้ มีปรากฏการณ์น้ำไหลผ่าน (หรือมวลดินจมอยู่ในระดับน้ำ) หน่วยน้ำหนักดินที่มีน้ำอยู่ในโพรง ระบุเป็น หน่วยน้ำหนักดินใต้ระดับน้ำ หรือหน่วยน้ำหนักดินจมน้ำ (submerged unit weight, γ_{sub}) กับในกรณีที่ป็นหน่วยน้ำหนักดินที่อยู่เหนือระดับน้ำ (เป็นมวลดินเปียก) แต่มักสมมุติให้มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับมวลดินในสภาพธรรมชาติปกติ (natural unit weight, γ) และใช้ค่ามุมเสียดทานเพียงค่าเดียว นั่นคือ ค่าอัตราส่วนปลอดภัย

$$F.S. = \frac{\gamma_{sub} (\tan \phi)}{\gamma (\tan \beta)} \quad (5.40)$$

5.3.2 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ที่ไม่มีค่าความเสียดทาน

กำหนดให้เป็นมวลดินเอกพันธ์ (เนื้อเดียว) ตลอด อนุภาคแร่ในมวลดิน ไม่มีค่าความเสียดทาน (แต่ยังมีแรงเกาะยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค) ยกตัวอย่างดินเหนียว (clayey soil or clay soil) ดินประเภทนี้ ขนาดเม็ดอนุภาคเล็กละเอียด ประมาณขนาดดินเหนียว [clay size (น้อยกว่า 0.002

มม.)] ค่าการยึดเกาะกันของดินเหนียวในภาวะนี้ เป็นแบบที่ระบายน้ำออกจากมวลดิน (undrained condition) หรือเป็นค่า c_u

จากรูปที่ 5.12 สมมติให้มวลดินเหนียวมีการไถลเลื่อนตามระนาบ ระนาบเป็นแนวเส้นโค้งวงกลม (เส้น AED) ที่มีรัศมี R และจุดศูนย์กลางวงกลมอยู่ที่จุด O จากนิยามค่า F.S. ในเชิงโมเมนต์ เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ของแรงต้านการไถลเลื่อน (resistant to sliding, M_R) เทียบกับค่าโมเมนต์ขับเคลื่อนการไถลเลื่อน (driving to sliding, M_D) ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยแสดงเป็น

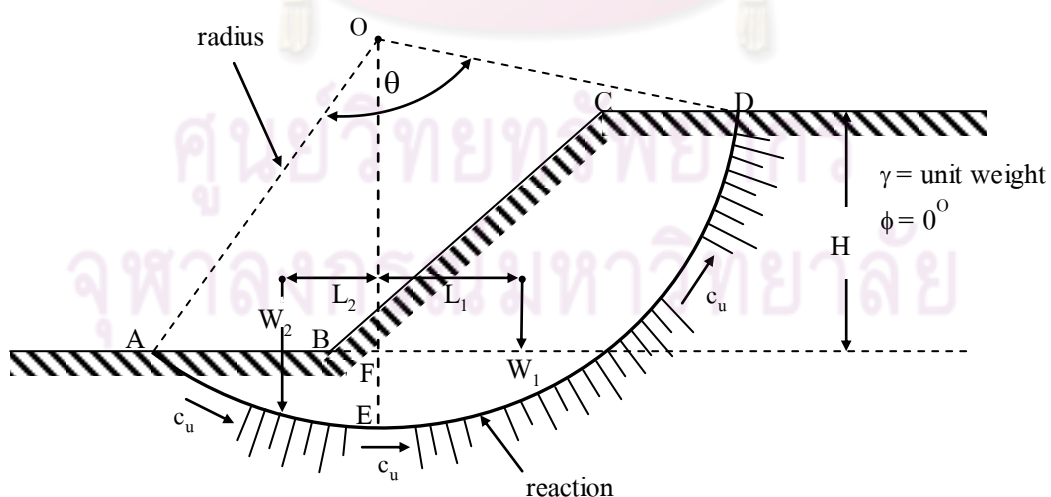
$$F.S. = \frac{M_R}{M_D} \quad (5.41)$$

พจน์ M_R ในสมการ 5.41 เป็นค่าของโมเมนต์ต้านการไถลเลื่อน หาจากความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต เมื่อให้มุม θ เป็นมุมโค้งวงกลมรองรับรูปที่ 5.12 และค่า $c_u = c$ จะได้

$$M_R = c(\text{length of arc})R = c(R)^2 \theta \quad (5.42)$$

พจน์ M_D ในสมการ 5.41 เป็นค่าของโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน จากจุดศูนย์กลางวงกลม เมื่อลากเส้นจากแนวตั้ง (เส้น OE) แบ่งมวลสารในภาพตัดขวาง ได้ค่าความสัมพันธ์ของโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยความหนา เป็น

$$M_D = W_1 L_1 - W_2 L_2 \quad (5.43)$$



รูปที่ 5.12 การพังทลายแบบวงกลมของมวลดินที่ไม่มีค่าความเสียดทานภายใน

ถ้าหากจัดรูปแบบสมการที่ 5.43-5.45 ใหม่ เมื่อให้ค่าการยึดเกาะกันไม่ระบายน้ำ, $c_u =$ undrained cohesion และค่าการยึดเกาะกันที่ขับเคลื่อนการไหลเลื่อน, $c_d = (c/F.S.)$ จะได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย เป็น

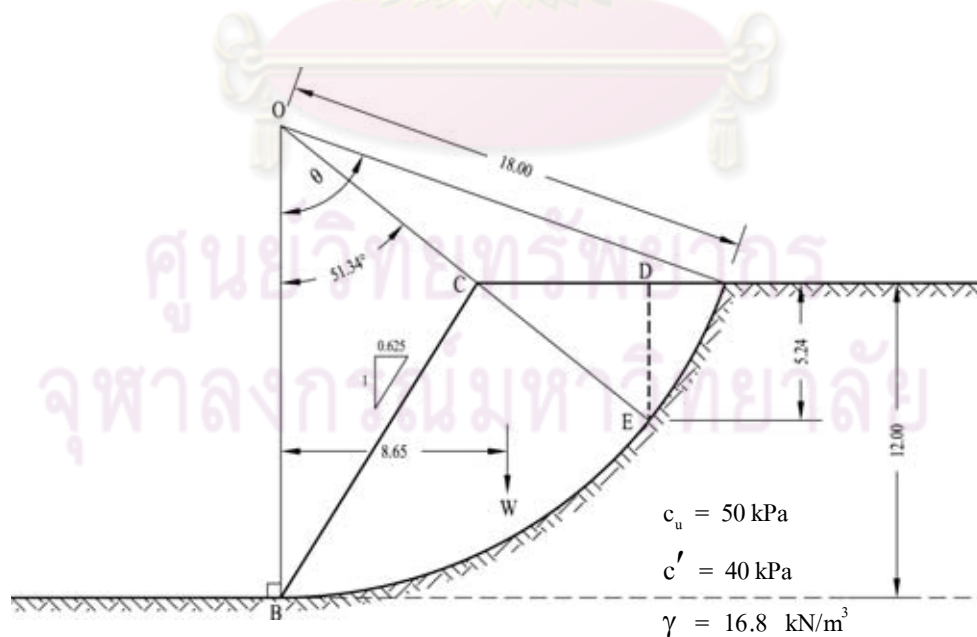
$$F.S. = \frac{\text{resisting moment}}{\text{disturbing moment}} = \frac{c_u}{c_d} \quad (5.44)$$

5.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพท์การพังทลายแบบวงกลม

ตัวอย่างในหัวข้อข้อยนี้ เป็น ประเมินความลาดมวลสารที่เป็นดิน และมีระนาบการพังทลายเป็นรูปวงกลม

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.4

ในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.13 กำหนดให้มวลสารเป็นดินเหนียวที่ไม่มีค่าความเสียดทาน เมื่อทำการตัดความลาด เป็นค่าอัตราส่วนของ ระยะในแนวราบต่อระยะในแนวตั้ง = 0.625:1 มวลดินเหนียวอยู่ในภาวะที่ไม่ระบายน้ำออก มีค่าการยึดเกาะกัน $c_u = 50$ kPa



รูปที่ 5.13 การตัดความลาดมวลดินเหนียวที่ไม่มีค่าความเสียดทานและมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น

กำหนดให้ หน่วยน้ำหนักของมวลดินเหนียว = 16.8 kN/m^3 ตำแหน่งจุด O เป็นจุดศูนย์กลางของโค้งวงกลม และมีรัศมีเท่ากับ 18.0 m จุด B เป็นตำแหน่งเชิงของความลาด (toe) และเส้น OB ตั้งฉากกับระยะในแนวราบ ระยะ L ที่เป็นระยะในแนวราบผ่านจุดศูนย์กลางมวล (centroid) ที่น้ำหนักมวลดิน = 8.65 m ระยะในแนวตั้งของชั้นความลาด = 12 m ระยะรอยร้าวจากแรงดึงในแนวตั้งคือ $DE = 5.30 \text{ m}$ และมุม θ ของโค้งวงกลม = 70.53° กับมุม $\widehat{BOE} = 51.34^\circ$ จงหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของการพังทลายแบบโค้งวงกลม 2 กรณี

- กรณีรอยร้าวจากแรงดึงไม่มีน้ำขังในรอยแตกแยก
- กรณีรอยร้าวจากแรงดึงมีน้ำขังเต็มรอยแตก [ค่าการยึดเกาะกันประสิทธิผล – effective cohesion, $c' = 40 \text{ kPa}$]

ผลเฉลย

การแก้ปัญหาของโจทย์ข้อนี้ ความยากอยู่ที่การหาพื้นที่ของมวลดินเหนียว BCDE ที่เป็นมวลที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ต้องหาระยะเส้นโค้งวงกลมและพื้นที่อื่นก่อน

$$\text{หาค่าระยะโค้ง BE เมื่อทราบค่า } \widehat{BOE} = (51.34/180) (\pi \times 18.0) = 16.13 \text{ m}$$

$$\text{พื้นที่ของ sector BOE} = (1/2)(\text{radius})^2(\theta) = (1/2)(18.0)^2(51.34^\circ \times \pi \times 18.0) = 145.16 \text{ m}^2$$

$$\text{มุมความลาด} = \arctan\left(\frac{1}{0.625}\right) = 58^\circ$$

$$\text{พื้นที่ของสามเหลี่ยม BOC} = \frac{1}{2}(\text{OB})(12 \times \tan 32^\circ) = 67.486 \text{ m}^2$$

$$\text{พื้นที่ของสามเหลี่ยม CDE} = \frac{1}{2}(\text{DE})(\text{CD}) = \frac{1}{2}(5.24)(6.556) = 17.177 \text{ m}^2$$

$$\text{ดังนั้น พื้นที่ของ BCDE มีค่า} = 145.16 - 67.486 + 17.177 = 94.851 \text{ m}^2$$

ใช้สมการที่ 5.43 เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่อความหนาหนึ่งหน่วย ของกรณีแรกในข้อ (ก) มวลดินเหนียวไม่มีแรงดันน้ำจากรอยร้าวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยแทนค่าแรงโมเมนต์รอบจุด O ที่คำนวณได้

$$\text{F.S.} = \frac{M_R}{M_D} \quad (\text{ก})$$

$$\begin{aligned}
 F.S. &= \frac{c(BE)(R)}{\gamma(BCDE \text{ area})(L)} \\
 &= \frac{[50(16.13)(18.0)]}{[16.8(94.851)(8.65)]} \\
 &= \frac{14517.00}{13783.75} = 1.053 \text{ (มีเสถียรภาพ)}
 \end{aligned}$$

กรณีของการที่มีน้ำขังเต็มในส่วนที่เป็นรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) แสดงว่ามีแรงผลัดกันข้างของแรงคั้นน้ำ (V) เกิดขึ้น ค่าแรงคั้นยกตัวเมื่อน้ำขังเต็ม เมื่อประมาณให้เป็นไดอะแกรมรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแรงผลัดจากน้ำ } V &= \frac{1}{2}(\gamma_w)(DE)^2 \\
 &= \frac{1}{2}(9.81)(5.24)^2 \\
 &= 134.680 \text{ kN (per unit thickness)}
 \end{aligned} \tag{ข}$$

ตำแหน่งแรงคั้นน้ำกระทำที่จุดต่ำสุด D ตรงจุดระยะ $\frac{2}{3}$ ของ DE จะได้ระยะแขนโมเมนต์ (moment arm) รอบจุด O

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าของระยะแขนโมเมนต์} &= (OB - 12.0) + \frac{2}{3}(DE) \\
 &= (18.0 - 12.0) + \frac{2}{3}(5.24) = 9.493 \text{ m}
 \end{aligned}$$

จากการหาโมเมนต์จุด O กรณีที่มีแรงคั้นน้ำที่เกิดใน tension crack กระทำร่วมด้วยย่อมทำให้เสถียรภาพของมวลความลาดลดลง ค่าโมเมนต์ต้าน (M_R) จะมีค่าเปลี่ยนไป เนื่องจากผลของน้ำขังในจากรอยแตก ทำให้ค่าการยึดเกาะประสิทธิผล (c')

$$\begin{aligned}
 M_R &= (c')(BE)(R) \\
 &= (40)(16.13)(18.0) \\
 &= 11613.60 \text{ kN-m}
 \end{aligned}$$

ค่าโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน (M_D) จะมีค่าเปลี่ยนไปเช่นเดียวกัน โดยมีค่าของแรงโมเมนต์ของแรงดันน้ำเพิ่ม

$$\begin{aligned} M_D &= [\{ (\gamma) (\text{BCDE area}) (L) \} \\ &\quad + \{ \text{moment of water pressure} \}] \\ &= [\{ (16.8)(94.851)(8.65) \} + \{ (134.680)(9.493) \}] \\ &= 15062.26 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

เมื่อนำค่าดังกล่าวแทนค่าลงในสมการ ก. ในเรื่องการหาเสถียรภาพเชิงแรงโมเมนต์ จะได้

$$\text{F.S.} = \frac{11613.60}{15062.26} = 0.77 \quad (\text{มวลเกิดการไถลเลื่อน})$$

5.3.4 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาด

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.4 ในกรณีที่มีน้ำขังเต็ม ค่า $\text{F.S.} = 0.77$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ถ้าหากต้องการหาเสถียรภาพของมวลสารความน่าจะเป็น กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกัน (c) และหน่วยน้ำหนักหิน (γ) ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสองตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 %

อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(\text{C.O.V.})_{\text{FS}}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{\text{SIM}}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า $\text{C.O.V.} = 15\%$ จะได้

$$\text{ค่า } (\text{F.S.})_{\text{AVE}} = 0.77; \quad \beta_N = -1.977; \quad [p(f)]_1 = 97.6\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 0.77; \quad \beta_N = -0.741; \quad [p(f)]_I = 77.1\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 0.78; \quad \beta_N = -1.415; \quad [p(f)]_{II} = 92.2\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 0.81 ; \quad \beta_N = -0.421; \quad [p(f)]_{II} = 66.3\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{range} = 0.35 - 1.68 ; \quad [p(f)]_{SIM} = 89.4\%$$

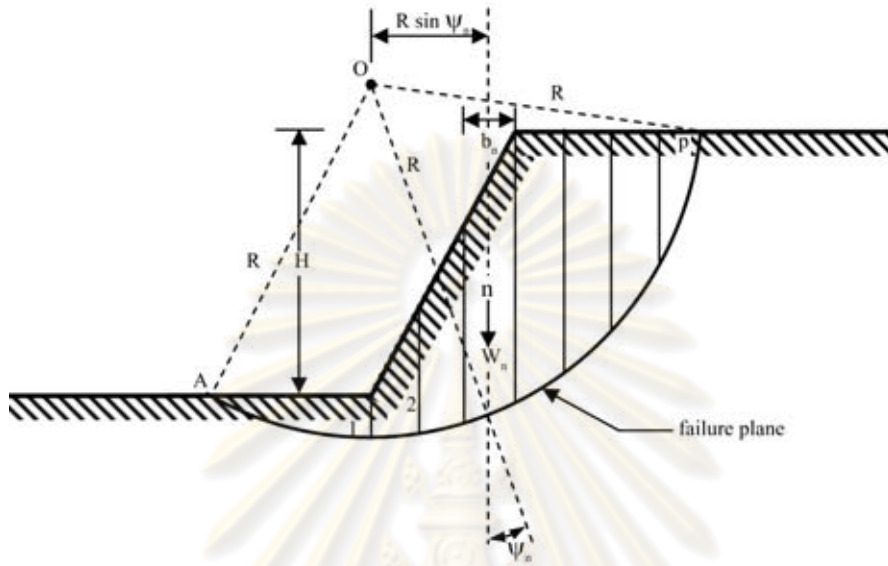
ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{range} = -21.1 - 23.8 ; \quad [p(f)]_{SIM} = 70.5\%$$

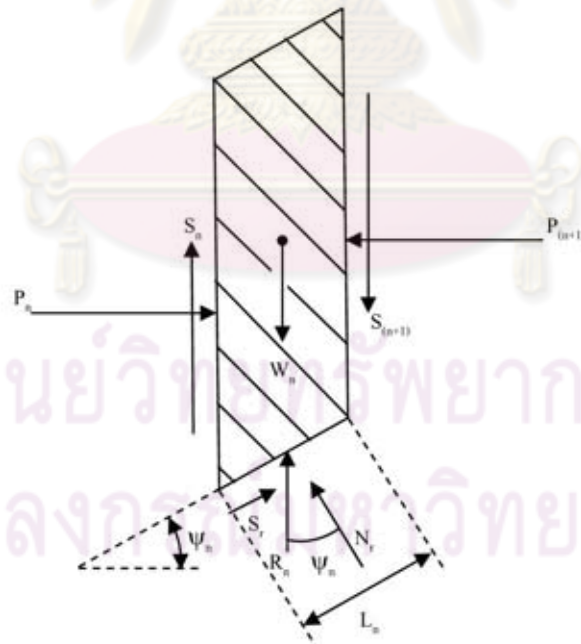
หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.4

5.3.5 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ โดยวิธีการแบ่งส่วน

ปัญหาของการวิเคราะห์การพังทลายหรือการพิบัติแบบวงกลม ที่เห็นได้ค่อนข้างชัดเจน คือ เกิดความคลาดเคลื่อนในเรื่องของพื้นที่การพังทลายที่พื้นผิวมีรูปเส้นโค้ง



ก.



ข.

รูปที่ 5.14 ก. ภาพตัดขวางความลาดที่ถูกแบ่งเป็นส่วนเล็กๆ หลายเสี้ยว (slices)

ข. ไคอะแกรมแรงที่กระทำบนเสี้ยวที่ n ให้พื้นผิวฐานเป็นเส้นตรง

วิธีการแก้ไขโดยการแบ่งส่วนมวลสาร ให้เป็นพื้นที่หน้าตัดในภาพตัดขวางเป็นส่วนเล็กๆ ในแนวตั้งหลายส่วน แต่ละส่วนหรือที่เรียกว่าเสี้ยว (slice) โดยที่ไม่จำเป็นต้องกำหนดให้มีความกว้างของรูปทรงสี่เหลี่ยมเท่ากันทุกส่วน การแบ่งส่วนเพื่อนำมาคำนวณหาพื้นที่ย่อยก่อนที่จะรวมเป็นพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด มักนิยมแบ่งเป็น 6–10 ส่วน (ถ้าหากใช้การคำนวณด้วยเครื่องคิดเลข) ในหัวข้อย่อยนี้แสดงวิธีการคำนวณด้วยวิธีของ Fellenius นำเสนอในปี ค.ศ. 1936 ที่นิยมเรียกว่า ordinary method of slices หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Swedish method of slices, or Fellenius method

1. ขั้นตอนที่ 1 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วน เป็นการแยกการวิเคราะห์เฉพาะหนึ่งเสี้ยว (slice) กำหนดให้พื้นผิวฐานของเสี้ยวเป็นเส้นตรงและเอียงลาดเป็นมุม ψ กำหนดค่าแรงน้ำหนัก (W) ของแต่ละส่วน กับแรงอื่นที่กระทำกับเสี้ยวเพียงส่วนเดียว จากรูปที่ 5.14 ก. และ 5.14 ข. พจน์ L_n กับ b_n หมายถึง ค่าระยะความยาวด้านฐาน กับค่าระยะความกว้างของแต่ละเสี้ยว (slice) ตามลำดับ พจน์ N_r กับ S_r เป็นแนวแรงจากกับแรงเฉือนบนพื้นผิวฐาน ส่วน พจน์ W_n กับ R_n เป็นค่าแนวแรงน้ำหนักกับค่าแรงปฏิกิริยาของน้ำหนักในแนวตั้ง พจน์ P_n กับ $P_{(n+1)}$ เป็นแรงจากที่มีแนวตั้งฉากกับผิวด้านข้างของเสี้ยวส่วนที่ n กับส่วนที่ $(n+1)$ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน พจน์ S_n กับ $S_{(n+1)}$ เป็นแรงเฉือนที่มีแนวขนานกับผิวด้านข้างของ slice ส่วนที่ n กับส่วนที่ $(n+1)$ ตามลำดับ

2. ขั้นตอนที่ 2 หาค่าแรงแนวฉากที่ฐานของเสี้ยว (slice) ที่ n เมื่อกำหนดให้ W_n เป็นน้ำหนักของเสี้ยวที่เอียงลาดทำมุม ψ_n ได้ความสัมพันธ์ เป็น

$$N_r = W_n (\cos \psi_n) \quad (5.45)$$

3. ขั้นตอนที่ 3 หาค่าแรงเฉือนที่ฐานของเสี้ยวที่ n เมื่อกำหนดให้ L_n เป็นความยาวของด้านฐาน ได้ความสัมพันธ์ เป็น

$$S_r = \frac{\tau(L_n)}{F.S.} = \frac{[c + \sigma_n (\tan \phi)] L_n}{F.S.} \quad (5.46)$$

4. ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์เสถียรภาพความลาด โดยทำการหาโมเมนต์รอบจุด O ของรูปที่ 5.14 ก. ได้ความสัมพันธ์แรงที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน กับแรงที่ต้านการไถลเลื่อน เมื่อคำนวณค่าผลลัพธ์ต่อหนึ่งหน่วยความหนาของความลาด เป็น

$$F.S. = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c(L_n) + W_n (\cos \psi_n) \tan \phi]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \quad (5.47)$$

สมการที่ 5.47 ใช้กับในกรณีที่มีมวลแห้งไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือเป็นการวิเคราะห์เชิง total stress analysis ถ้าความลาดมีน้ำไหลผ่านมีผลทำให้เกิดความดันยกตัว (uplift pressure, u) เขียนสมการใหม่ในเชิงการวิเคราะห์ความเค้นประสิทธิผล (effective stress analysis) เป็น

$$F.S. = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c'(L_n) + \{W_n \cos \psi_n - u(L_n)\} \tan \phi']}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \quad (5.48)$$

5. ขั้นตอนที่ 5 มุม ψ_n อาจมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ ขึ้นอยู่กับแนวการเอียงเทไปในทิศทางเดียวกับแนวความลาดโดยรวม หรือสวนทางกับแนวความลาดโดยรวม วิธีการแบ่งส่วนแบบ ordinary slice method ยังใช้ได้กับมวลดินที่มีอนุภาคแร่หลายชนิดอยู่รวมกัน ไม่จำเป็นต้องเป็นเนื้อเอกพันธุ์ หรือสมบัติของมวลดินอาจมีค่าหน่วยน้ำหนัก (γ) ค่าความเสียดทาน (ϕ) ค่าการยึดเกาะกัน (c) ไม่เท่ากันก็ได้ ยกตัวอย่างมวลดินวิวิธพันธุ์ หมายถึงมวลดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ได้แก่ ดินทรายเชิงดินเหนียว หรือเรียกว่าดินทรายปนดินเหนียว (clayey sand) กับดินทรายปนทรายแป้ง หรือเรียกว่าดินทรายปนซิลต์ (silty sand) เป็นต้น

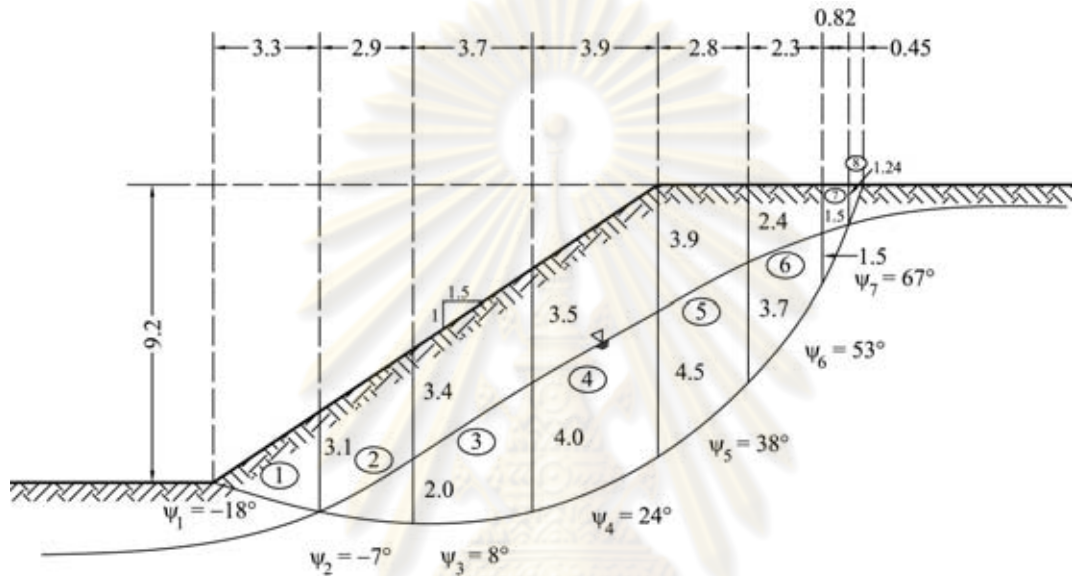
5.3.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาผลลัพท์การพังทลายด้วยวิธีแบ่งส่วน

การหาค่าผลลัพท์ของการพังทลายแบบวงกลม โดยใช้แนวทางการแบ่งส่วนของมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย ได้แสดงตัวอย่างไว้ในหัวข้อย่อนี้

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.5

เมื่อทำการตัดความลาดในมวลดินที่มีเนื้อเอกพันธุ์ (homogeneous soil) ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการแบ่งส่วนของมวลดินเป็นทั้งหมด 7 เลี้ยว ดังแสดงในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.15 ค่าระยะ มีติมีหน่วยเป็นเมตร กับแสดงค่ามุมลาดของแต่ละส่วน ความลาดนี้มีน้ำใต้ดินไหลผ่านในบางส่วน และมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของความลาด = 9.2 เมตร
- หน้าตัดความลาด มีอัตราส่วน ระยะในแนวราบต่อระยะในแนวตั้ง = 1.5 : 1
- หน่วยน้ำหนักดินปกติ ที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน, $\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$
- หน่วยน้ำหนักดินประสิทธิผล ที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน, γ_{sub} หรือ $\gamma' = 19.2 \text{ kN/m}^3$
- ค่าการยึดเกาะประสิทธิผล (effective cohesion, c') = 14.5 kPa
- ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผล (effective friction angle, ϕ') = 20°



รูปที่ 5.15 การตัดความลาดในดินเนื้อเดียวกัน และถูกแบ่งส่วนเป็น 8 เลี้ยว (slices)

จงหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในภาวะแรงดันน้ำใต้ดิน มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของความลาดในมวลดินเนื้อเอกพันธ์นี้

ผลเฉลย

การหาผลเฉลยควรใช้โปรแกรมแผ่นตารางคำนวณ (spreadsheet) หรือถ้าใช้เครื่องคิดเลข ทั้งนี้มีลำดับขั้นตอน เริ่มจากการหาค่าน้ำหนักของแต่ละเลี้ยว (slice) จากนั้นหาค่าแรงดันยกตัวของแต่ละเลี้ยว ก่อนนำค่าของตัวแปรที่รู้ค่าดังกล่าว ทำการคำนวณตัวแปรดังกล่าวในตารางโดยใช้ค่าระยะมิติ ค่ามุม และสมบัติของมวลดินที่เรียงลำดับจากส่วนที่ 1 จนถึงส่วนที่ 8

ค่าน้ำหนัก [(หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (ของความหนาเลี้ยว - slice)]

$$W_1 = 3.3 (3.1/2) 16.8 = 85.932 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = 2.9 [(3.1 + 3.4)/2] 16.8 + 2.9 (2.0/2) 19.2 = 214.02 \text{ kN/m}$$

$$W_3 = 3.7 [(3.4 + 3.5)/2] 16.8 + 3.7 [(2.0 + 4.0)/2] 19.2 = 427.572 \text{ kN/m}$$

$$W_4 = 3.9 [(3.5 + 3.9)/2] 16.8 + 3.9 [(4.0 + 4.5)/2] 19.2 = 560.664 \text{ kN/m}$$

$$W_5 = 2.8 [(3.9 + 2.4)/2] 16.8 + 2.8 [(4.5 + 3.7)/2] 19.2 = 368.592 \text{ kN/m}$$

$$W_6 = 2.3 [(2.4 + 1.5)/2] 16.8 + 2.5 [(3.7 + 1.5)/2] 19.2 = 190.164 \text{ kN/m}$$

$$W_7 = 2.3 [(1.5 + 1.24)/2] 16.8 + 2.5 [1.5/2] 19.2 = 30.681 \text{ kN/m}$$

$$W_8 = 0.45 [1.24/2] 16.8 = 4.687 \text{ kN/m}$$

ค่าความดันน้ำที่ยกตัว [(หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตร.เมตร (ของความหนาเสี้ยว – slice)]

หมายเหตุ กรณีที่เป็นค่าตัวแปรความดันยกตัว จะใช้สัญลักษณ์เป็น u เพื่อให้แตกต่างจากแรงดันยกตัว ที่ใช้สัญลักษณ์เป็น U

$$u_1 = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$u_2 = (2.0/2) 9.81 = 9.810 \text{ kN/m}^2$$

$$u_3 = [(2.0 + 4.0)/2] 9.81 = 29.430 \text{ kN/m}^2$$

$$u_4 = [(4.0 + 4.5)/2] 9.81 = 41.693 \text{ kN/m}^2$$

$$u_5 = [(4.5 + 3.7)/2] 9.81 = 40.221 \text{ kN/m}^2$$

$$u_6 = [(3.7 + 1.5)/2] 9.81 = 25.506 \text{ kN/m}^2$$

$$u_7 = [1.5/2] 9.81 = 7.358 \text{ kN/m}^2$$

$$u_8 = 0 \text{ kN/m}^2$$

หาค่าผลรวมของตัวแปรแรง [หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (ของความหนาเสี้ยว)]

ตารางที่ 5.4 เป็นตารางที่ใช้คำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ จากเสี้ยวที่ 1 (แถวแรก) ถึงเสี้ยวที่ 8 (แถวที่ 8) ค่าผลรวมของแรง (Σ) บนระนาบการพังทลายวงกลม อยู่ในแถวที่ 9 ในแต่ละคอลัมน์

คอลัมน์ 1 เป็นหมายเลขที่เป็นจำนวนเลี้ยว (slice number) คอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าน้ำหนัก slice/thickness (W) คอลัมน์ที่ 3 เป็นมุมเอียงของแต่ละเลี้ยว (ψ) คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของโคฮีชันประสิทธิผล (c') คอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานประสิทธิผล (ϕ') คอลัมน์ที่ 6 เป็นความดันยกตัว (u) คอลัมน์ที่ 7 เป็นความยาวเชิงเส้นของด้านฐานเลี้ยว (L) คอลัมน์ที่ 8 เป็นความผลรวมของแรงต้านในแต่ละเลี้ยว (Σ_{resist}) คอลัมน์ที่ 9 เป็นความผลรวมของแรงไถลเลื่อนในแต่ละเลี้ยว (Σ_{slide})

ตารางที่ 5.4 การคำนวณหาผลลัพท์ของแรงที่กระทำบนเลี้ยวแต่ละส่วน (ทั้งหมด 8 เลี้ยว)

| slice (No.) | W (kN/m) | ψ (deg) | c' (kPa) | ϕ' (deg) | u (kPa) | L (m) | Σ_{resist} (kN/m) | Σ_{slide} (kN/m) |
|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|------------|----------|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | 85.932 | -18 | 14.5 | 20 | 0 | 3.470 | 80.061 | -26.554 |
| 2 | 214.020 | -7 | 14.5 | 20 | 9.810 | 2.922 | 109.252 | -26.082 |
| 3 | 427.572 | 8 | 14.5 | 20 | 29.430 | 3.736 | 168.262 | 59.507 |
| 4 | 560.664 | 24 | 14.5 | 20 | 41.693 | 4.269 | 183.542 | 228.043 |
| 5 | 368.592 | 38 | 14.5 | 20 | 40.221 | 3.553 | 105.222 | 226.928 |
| 6 | 190.164 | 53 | 14.5 | 20 | 25.506 | 3.822 | 61.592 | 151.872 |
| 7 | 30.681 | 67 | 14.5 | 20 | 7.358 | 2.099 | 29.178 | 28.242 |
| 8 | 4.687 | 67 | 14.5 | 20 | 0 | 1.152 | 17.371 | 4.315 |
| $\Sigma =$ | | | | | | | 754.480 | 646.271 |

หาค่าตัวเลขดัชนีเชิงเสถียรภาพ

จากสมการที่ 5.48 นำค่าผลรวมของแรงต้านบนระนาบการพังทลายเชิงวงกลม ต่อแรงที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนตามระนาบเชิงวงกลม ได้ค่า

$$\begin{aligned}
 F.S. &= \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c'(L_n) + \{(W_n \cos \psi_n) - u(L_n)\} \tan \phi']}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \\
 &= \frac{754.480}{646.271} = 1.167
 \end{aligned}$$

ค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้แสดงว่า ความลาดที่กำหนดนี้มีเสถียรภาพถึงแม้จะมีน้ำใต้ดินไหลผ่าน ถ้าหากเปรียบเทียบการหาค่าความดันน้ำของน้ำใต้ดิน กับการระบุหน่วยน้ำหนักดินทั้งในส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินกับหน่วยน้ำหนักดินในส่วนที่ได้ระดับน้ำใต้ดิน (ที่ใช้ในโจทย์ข้อนี้) มีความใกล้เคียงถูกต้องตามความสภาวะในภาคสนามของระดับน้ำใต้ดิน ที่เกิดเป็นแนวเส้นโค้งตามธรรมชาติ

5.3.7 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาดด้วยวิธีแบ่งส่วน

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.5 ค่า $F.S. = 1.167$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนดที่ใช้วิธีแบ่งส่วนปกติ สำหรับมวลเปียกมีแรงดันน้ำกระทำร่วมด้วย ถ้าหากต้องการหาค่าเสถียรภาพของมวลสารเชิงความน่าจะเป็น กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะ ประสิทธิภาพ (effective cohesion, c') ค่ามุมเสียดทาน ประสิทธิภาพ (effective friction angle, ϕ') และหน่วยน้ำหนักดิน [ทั้งหน่วยน้ำหนักดินปกติ (γ) กับหน่วยน้ำหนักดินประสิทธิภาพ (γ')] ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสามตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{SM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.167; \quad \beta_N = 0.956; \quad [p(f)]_I = 16.9\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.167; \quad \beta_N = 0.359; \quad [p(f)]_I = 36.0\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{MLV} = 1.17; \quad \beta_N = 1.247; \quad [p(f)]_{II} = 10.6\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{MLV} = 1.157; \quad \beta_N = 0.439; \quad [p(f)]_{II} = 33.0\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = 0.73 - 1.39; \quad [p(f)]_{SIM} = 10.9\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = 0.14 - 3.68; \quad [p(f)]_{SIM} = 29.7\%$$

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.5

5.3.8 การวิเคราะห์วิธีการแบ่งส่วนตามแนวคิดของ Bishop

การวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลมโดยการแบ่งส่วน ในหัวข้อ 5.3.7 มีการปรับแก้โดย Bishop (1955) ข้อแตกต่างจากแนวทางวิเคราะห์เดิม ได้แก่

1. ในแต่ละเสี้ยว แรงเฉือนที่เกิดบนพื้นผิวของด้านในแนวโค้ง มีค่าเท่ากันทั้ง 2 ด้าน
2. ในแต่ละเสี้ยว แรงฉากที่เกิดบนพื้นผิวของด้านในแนวโค้ง มีลักษณะอยู่ในแนวร่วมเส้นตรงเดียวกัน เป็น collinear แต่ไม่จำเป็นต้องมีค่าขนาดของแรงฉากเท่ากัน

การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Bishop จัดเป็นวิธีที่นักวิจัยนิยมใช้มากที่สุด เพราะข้อดีของวิธี ordinary slices เกิดความคลาดเคลื่อนของตัวเลขดัชนีเชิงเสถียรภาพค่อนข้างสูง ถ้าหากมุมเอียงของเสี้ยวค่อนข้างชัน (มากกว่า 45 องศา) กับการกำหนดค่าขนาดแรงฉากที่ฐานของเสี้ยว ค่อนข้างต่ำ จึงมีผลทำให้ค่าตัวเลข F.S. ที่คำนวณจากวิธี ordinary slices มักต่ำกว่าการใช้วิธีอื่น สมการของ Bishop มีการแก้ไขเพิ่มเติมในภายหลัง จนได้สมการทั่วไปที่เรียกเป็น modified Bishop equation (ดูรูปที่ 5.14 ประกอบ) สมการที่ใช้วิเคราะห์ในเชิงความเค้นทั้งหมด (total stress)

$$F.S. = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \left[\{(c)(b_n)\} + \{(W_n) \tan \phi\} \right] \cdot \left[\frac{1}{M_n} \right]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \quad (5.49)$$

พจน์ b_n คือ ความกว้างของแต่ละส่วนแบ่งเป็นเสี้ยว (slice) ส่วนพจน์ M_n เป็นพจน์ตัวแปรที่กำหนดขึ้นมา เพื่อให้เป็นพจน์ค่าปรับแก้ (correct value term) สำหรับสมการที่ 5.49 ซึ่งค่า M_n อาจหาจากแผนภูมิ (chart) ในตำรามาตรฐานทั่วไป หรืออาจใช้สมการข้างล่างหาค่าได้

$$M_n = \left[(\cos \psi_n) + \left\{ \frac{\sin |\psi_n| (\tan \phi)}{(F.S.)_{\text{trial}}} \right\} \right] \quad (5.50)$$

พจน์ $(F.S.)_{\text{trial}}$ ของสมการ 5.50 สามารถกำหนดขึ้นมาแบบสุ่ม เช่น อาจให้ค่า F.S. ตั้งต้นเป็น 1.2, 1.3, 1.4 เป็นต้น ค่ามุมที่เป็น $[\cos \psi_n]$ เป็นไปได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ แต่ค่ามุม $[\sin \psi_n]$ มีค่าเป็นบวกอย่างเดียว

ในกรณีที่ความลาดมีน้ำไหลผ่าน การวิเคราะห์ใช้สมการในรูปแบบของความเค้นประสิทธิผล (effective stress) นั่นคือ

$$F.S. = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \left[\{(c')(b_n)\} + \{W_n - u(b_n)\} \tan \phi' \right] \cdot \left[\frac{1}{M_n} \right]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \quad (5.51)$$

สมการที่ 5.49 – 5.51 ซึ่งเป็น modified Bishop method สามารถใช้การคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขธรรมดา เพราะไม่ใช่ผลเฉลยในรูปแบบปิด (closed-form solution) แต่สามารถหาผลเฉลยได้ง่ายขึ้นถ้าหากใช้โปรแกรมแผ่นตารางคำนวณ (spreadsheet)

5.3.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาผลลัพท์การพังทลายด้วยวิธี Bishop

ตัวอย่างที่แสดงไว้ในหัวข้อย่อนี้ ใช้โจทย์เดิมที่คำนวณด้วยวิธีแบ่งส่วน แต่นำมาคำนวณใหม่โดยใช้วิธีการคำนวณของ Bishop

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.6

ใช้โจทย์ตัวอย่างที่ 5.5 แต่ให้ใช้การผลเฉลยด้วย modified Bishop method

ผลเฉลย

จากการหาผลเฉลยด้วย ordinary slice method ได้ค่า F.S. = 1.167 แสดงว่าถ้าใช้การหาผลเฉลยด้วย modified Bishop method ค่าตัวเลขผลลัพท์ของ F.S. ควรใกล้เคียงค่านี้หรือมีค่าสูงกว่า กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trail}}$ ครั้งแรก มีค่า $(F.S.)_{\text{trail}} = 1.15$ ใช้ค่านี้ในการหาค่า M_n ที่อยู่ในคอลัมน์ที่ 8 ของตารางที่ 5.5 ความแตกต่างระหว่างตารางที่ 5.5 ของโจทย์ข้อนี้ กับตารางที่ 5.4 ของโจทย์ตัวอย่างที่ 5.5 ได้แก่ จำนวนคอลัมน์ของตารางที่ 5.5 มีเพิ่มมาอีก 1 คอลัมน์ และตัวแปรในคอลัมน์ 1–6 กับในคอลัมน์ที่ 10 ของตารางที่ 5.5 เหมือนกับตารางที่ 5.4

จากตารางที่ 5.5 หาผลรวมของแรงต้าน = 812.825 kN/m และผลรวมของแรงที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน = 646.270 kN/m แสดงค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพ มีค่า F.S. = 1.258 ซึ่งค่าที่คำนวณได้นี้สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ที่ 1.15 ดังนั้น จึงทดสอบตัวเลขดัชนีใหม่กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trail}}$ ครั้งที่สอง มีค่า $(F.S.)_{\text{trail}} = 1.25$ ใช้ค่าการหาค่า M_n ที่อยู่ในคอลัมน์ที่ 8 ตารางที่ 5.6

ผลลัพท์จากการสุ่มทดสอบค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพจากตารางที่ 5.6 อีกครั้ง ได้ผลรวมของแรงต้าน = 822.197 kN/m และผลรวมของแรงที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน = 646.270 kN/m นั่นคือ ได้ค่า F.S. = 1.272 ซึ่งสูงกว่าที่กำหนดไว้ครั้งที่สอง (1.25) ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพที่ใกล้เคียงความเป็นจริง ควรมีค่า F.S. = 1.27 (ถ้าทดสอบอีกครั้ง และเป็นค่าตอบสุดท้าย) การคำนวณที่แสดงเป็นตัวอย่างนี้ใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาเพื่อทำการหาผลเฉลยเพียง 2 ครั้ง ก็น่าจะ

เพียงพอ ยกเว้นในกรณีที่ค่าที่ได้ทั้ง 2 ครั้งมีความแตกต่างอยู่สูง จึงต้องทำการสุ่มใช้ค่าของ $(F.S.)_{\text{trail}}$ ใหม่เป็นครั้งที่สาม (ค่าตัวเลข F.S. ที่สุ่มจะสูงขึ้นหรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ครั้งที่สอง)

ตารางที่ 5.5 การหาผลลัพธ์ด้วย modified Bishop method กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trail}} = 1.15$

| slice (No.) | W (kN/m) | ψ (deg) | c' (kPa) | ϕ' (deg) | u (kPa) | b (m) | M_n | Σ_{resist} (kN/m) | Σ_{slide} (kN/m) |
|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|------------|----------|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 85.932 | -18 | 14.5 | 20 | 0.000 | 3.3 | 1.049 | 75.431 | -26.554 |
| 2 | 214.020 | -7 | 14.5 | 20 | 9.810 | 2.9 | 1.031 | 106.297 | -26.082 |
| 3 | 427.572 | 8 | 14.5 | 20 | 29.430 | 3.7 | 1.034 | 164.062 | 59.507 |
| 4 | 560.664 | 24 | 14.5 | 20 | 41.693 | 3.9 | 1.042 | 193.313 | 228.043 |
| 5 | 368.592 | 38 | 14.5 | 20 | 40.221 | 2.8 | 0.983 | 136.080 | 226.928 |
| 6 | 190.164 | 53 | 14.5 | 20 | 25.506 | 2.3 | 0.855 | 94.985 | 151.872 |
| 7 | 30.681 | 67 | 14.5 | 20 | 7.358 | 0.82 | 0.682 | 30.588 | 28.242 |
| 8 | 4.687 | 67 | 14.5 | 20 | 0.000 | 0.45 | 0.682 | 12.069 | 4.314 |
| $\Sigma =$ | | | | | | | | 812.825 | 646.27 |

ตารางที่ 5.6 การหาผลลัพธ์ด้วย modified Bishop method กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trail}} = 1.25$

| slice (No.) | W (kN/m) | ψ (deg) | c' (kPa) | ϕ' (deg) | u (kPa) | b (m) | M_n | Σ_{resist} (kN/m) | Σ_{slide} (kN/m) |
|----------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|------------|----------|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 85.932 | -18 | 14.5 | 20 | 0.000 | 3.3 | 1.041 | 76.010 | -26.554 |
| 2 | 214.020 | -7 | 14.5 | 20 | 9.810 | 2.9 | 1.028 | 106.607 | -26.082 |
| 3 | 427.572 | 8 | 14.5 | 20 | 29.430 | 3.7 | 1.031 | 164.540 | 59.507 |
| 4 | 560.664 | 24 | 14.5 | 20 | 41.693 | 3.9 | 1.032 | 195.186 | 228.043 |
| 5 | 368.592 | 38 | 14.5 | 20 | 40.221 | 2.8 | 0.967 | 138.332 | 226.928 |
| 6 | 190.164 | 53 | 14.5 | 20 | 25.506 | 2.3 | 0.834 | 97.377 | 151.872 |
| 7 | 30.681 | 67 | 14.5 | 20 | 7.358 | 0.82 | 0.659 | 31.655 | 28.242 |
| 8 | 4.687 | 67 | 14.5 | 20 | 0.000 | 0.45 | 0.659 | 12.490 | 4.314 |
| $\Sigma =$ | | | | | | | | 822.197 | 646.27 |

5.3.10 การหาค่าโอกาสการพังทลายแบบวงกลมของความลาดด้วยวิธี Bishop

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.6 ค่า $F.S. = 1.27$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนดที่ใช้วิธีของ Bishop สำหรับมวลเปียกมีแรงดันน้ำกระทำร่วมด้วย ถ้าหากต้องการหาค่าเสถียรภาพของมวลสารเชิงความน่าจะเป็น กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะ ประสิทธิผล (effective cohesion, c') ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผล (effective friction angle, ϕ') และหน่วยน้ำหนักดิน [ทั้งหน่วยน้ำหนักดินปกติ (γ) กับหน่วยน้ำหนักดินประสิทธิผล (γ')] ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสามตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{SM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.28; \quad \beta_N = 1.439; \quad [p(f)]_I = 7.5\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.28; \quad \beta_N = 0.539; \quad [p(f)]_I = 29.5\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{MLV} = 1.28; \quad \beta_N = 1.806; \quad [p(f)]_{II} = 3.5\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{MLV} = 1.27; \quad \beta_N = 0.667; \quad [p(f)]_{II} = 25.2\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{range}} = 0.87 - 1.85; \quad [p(f)]_{SIM} = 3.5\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{\text{range}} = 0 - 7.13; \quad [p(f)]_{SIM} = 22.1\%$$

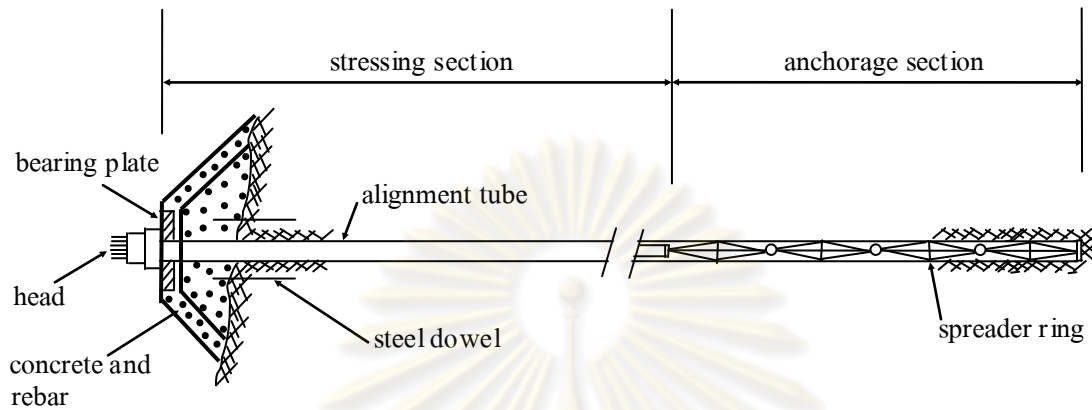
หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.6

5.4 การเสริมเสถียรภาพของมวลความลาด

โครงสร้างมวลสารเปราะที่เป็นมวลดินหรือมวลหินเกิดอยู่ในภาคสนาม ถ้าหากสามารถรับโหลดที่กระทำบนมวลสารเปราะ จัดเป็นโครงสร้างมวลสารที่ค้ำยันตนเอง (self-supporting) แต่ถ้าหากโครงสร้างมวลหินหรือมวลดินไม่สามารถรับโหลดที่กระทำได้ ต้องมีการเสริมเสถียรภาพโครงสร้างมวลสาร โดยใช้สิ่งที่มีมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เรียกเป็นศัพท์เฉพาะว่า artificial support ทำให้มวลสารเดิมมีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกหรือความเค้นที่กระทำได้สูงขึ้น รวมทั้งเป็นการเพิ่มค่าของมุมเสียดทานภายในระหว่างระนาบเปราะบาง ทำให้หลุดแยกออกจากมวลสารเดิมยากขึ้นหรือในบางกรณีเป็นการเสริมเสถียรภาพเพื่อลดค่าระยะแอนของชั้นดิน (ชั้นหิน) ให้ต่ำกว่าเดิม

การใช้สิ่งประดิษฐ์ที่เป็นวัสดุเสริมเสถียรภาพ เช่น ทำการเจาะรูมวลหินที่ต้องการเสริมเสถียรภาพไปจนถึงหินสมานแน่น แล้วใส่แท่งเหล็กยาว พร้อมทั้งขันหัวนอตด้านหน้ากับมีสมอยึดติดกับหินสมานแน่นอยู่ตรงปลาย นิยมเรียกวัสดุที่เป็นสิ่งประดิษฐ์นั้นว่า สลักเกลียว (ยึด) หรือใช้ศัพท์ว่า bolt อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ทำมีหลายชนิด ตั้งแต่เหล็กธรรมดา เหล็กผสม ยางเรซิน หรือวัตถุเชิงเคมี และด้านปลายของแท่งวัสดุก็มีรูปร่างหลายรูปแบบ เช่น อาจเป็นรูปกลม หรือเป็นด้านปลาย

มีรูปแบบอื่นที่สามารถขยายหัว (expansion) ด้านปลายให้แยกเป็นแฉกได้ เป็นต้น นอกจากนี้ คำว่า สลักเกลียวยึดไม่ครอบคลุมที่ใช้แทนกับวัสดุสังเคราะห์ประเภทนี้ จึงนิยมเรียกทับศัพท์ว่า โบลท์ (bolt) แทน



รูปที่ 5.16 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของโบลท์ ที่แยกเป็น 2 sections

5.4.1 การเสริมเสถียรภาพด้วยโบลท์

งานเสริมเสถียรภาพด้วยโบลท์ในมวลหินมีประสิทธิภาพสูงกว่าในมวลดิน การเปิดหน้างานก่อสร้างมวลสารบนพื้นผิวดินหรือใต้ผิวดิน ถ้ามีการเสริมเสถียรภาพด้วยโบลท์ หน้าตัดโบลท์มี 2 รูปแบบ (ดูรูปที่ 5.16 ประกอบ) คือ หน้าตัดส่วนหนึ่งจะเป็นส่วนที่รับความเค้นรอบ ๆ (stressing section) หน้าตัดส่วนหนึ่งทำหน้าที่ยึดติดกับมวลหินสมานแน่น (หรือยึดติดกับชั้นหินอื่น) เรียกว่า ส่วนสมอยึดติด (anchorage section) แนวทางการใช้โบลท์เสริมเสถียรภาพเชิงธรณีเทคนิค (ดูรูปที่ 5.17-5.18 ประกอบ) แบ่งออกเป็น 3 แนวทางหลัก ได้แก่

1. เพิ่มขนาดความหนาของมวลสาร มวลสารที่เป็นชั้นหินบาง ๆ มีความสามารถที่ทนรับความเค้นที่กระทำได้น้อย แต่ถ้าหากยึดติดชั้นหินบาง 2 ชั้นให้เหลือเพียงชั้นเดียว ค่าขนาดความหนาชั้นหินมากขึ้น ทำให้กำลังวัสดุมวลสารของชั้นหินทนต่อความเค้นจากอัด ความเค้นเฉือนที่กระทำได้สูงขึ้น นอกจากนี้ ถ้าเป็นชั้นหินที่เป็นส่วนหลังคาอุโมงค์ เมื่อมีการยึดติดด้วยโบลท์ค่าระยะ โกงแอนด์คดน้อยลง ปรากฏการณ์เชิงธรณีเทคนิคประเภทนี้ ถ้าเป็นกรณีของหลังคาอุโมงค์ มีชื่อเรียกว่า beam building ใช้แทนลักษณะของการเพิ่มขนาดความหนาของคาน (จากการยึดติด) ที่เป็นส่วนของหลังคาอุโมงค์

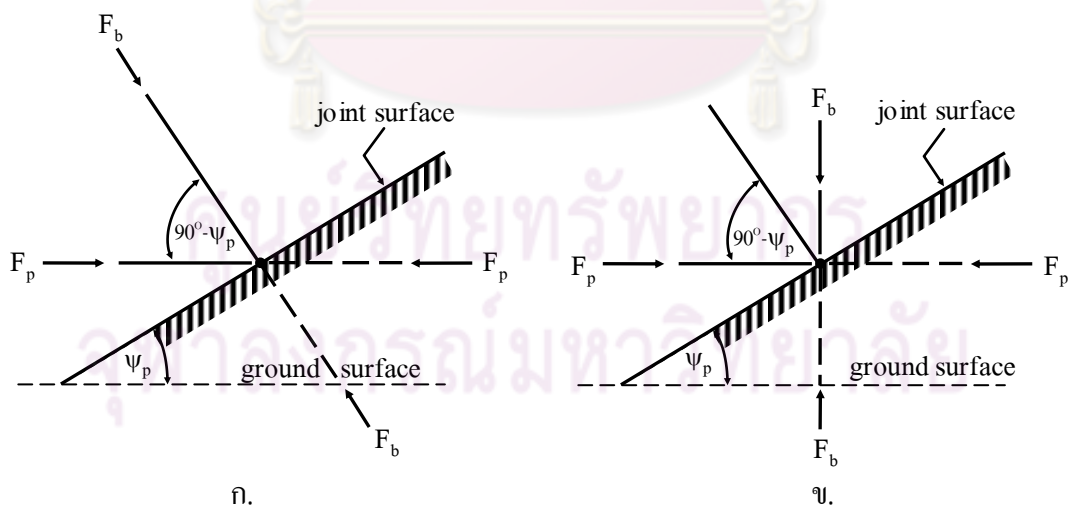
2. การแขวนชั้นหินบาง มวลสารที่เป็นชั้นหินบาง หรือชั้นหินที่มีแนวแตกแยกในเนื้อหิน ทำให้มีโอกาสเกิดการเลื่อนไถล หรือหลุดแตกแยกออกจากมวลสารเดิม เป็นไปได้ง่าย การเจาะใส่

โบลท์ที่ไปยึดติดกับมวลเนื้อแน่น เป็นการใช้แรงของโบลท์ช่วยยึดมวลสารเปราะบาง ให้อยู่กับที่ในลักษณะของการแขวนโครงสร้างหิน หรือเรียกว่า suspension

3. การยึดบล็อกหินที่จำเป็นต้องเสริมเสถียรภาพ มวลหินที่มีรอยแตก หรือมีแนวแตกในธรรมชาติ มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักหรือรับความเค้นที่กระทำลดน้อยลง หรือบางทีมวลหินแตกเป็นบล็อกหินหลายบล็อก ดังนั้น การเสริมเสถียรภาพจึงต้องเลือกบล็อกหินที่มีโอกาสสูงที่จะเกิดการพังทลาย การใส่โบลท์เป็นการเพิ่มวัสดุเชื่อมของมวลสารที่ถูกเสริมเสถียรภาพ เพราะวัสดุที่เป็นโบลท์ทำให้แรงในแนวฉากเพิ่มขึ้น หรือเป็นการเพิ่มความเค้นอัดรอบบริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำ เพื่อให้กำลังวัสดุเชื่อมของมวลสารบริเวณนั้นที่โบลท์ยึดติดมีค่าสูงขึ้น การเสริมเสถียรภาพประเภทนี้ เรียกว่า holding key blocks in place เป็นการลดระยะของการเลื่อนไถลให้น้อย (ต่ำ) ลง

5.4.2 การใช้โบลท์ในงานการตัดความลาด

ถ้าหากบริเวณหน้างานตัดความลาดแห่งหนึ่ง มีโอกาสที่มวลบนระนาบของการพังทลาย จะเกิดการไถลเลื่อน ด้วยแรงจากน้ำหนักของมวลสารเอง เมื่อมีการใช้โบลท์ยึดติดกับมวลหินเนื้อแน่นที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและปริมาตร เป็นการเพิ่มแรงจากอัดต่อมวลสารที่มีโอกาสพังทลาย จึงทำให้ความมีเสถียรภาพโดยรวมของหน้างานก่อสร้างนั้นสูงขึ้น แยกเป็น 2 กรณี



รูปที่ 5.17 การเสริมเสถียรภาพมวลหินที่มีรอยแตกแยกในมวลความลาด

ก. แนวทิศทางที่ใส่โบลท์แนวฉากกับพื้นผิวรอยแตกแยก (joint)

ข. แนวทิศทางที่ใส่โบลท์แนวฉากกับพื้นผิวดิน (ground surface)

กรณี ก. เมื่อมีระนาบแนวแตกมีโอกาสเกิดการพังทลาย สามารถทำการเสริมความลาดโดยใช้โบลท์ในแนวฉากกับระนาบการพังทลาย ดังรูปที่ 5.17 ก. กรณี ข. เมื่อมีระนาบแนวแตกมีโอกาสเกิดการพังทลาย ทำการเสริมเสถียรภาพความลาดใช้โบลท์ในแนวฉากกับระนาบแนวราบของพื้นผิวดินที่เป็นระดับเดียวกันกับชั้นตะกอนด้านล่าง ดังรูปที่ 5.17 ข.

จากรูปที่ 5.17 กำหนดให้ พจน์ F_b เป็นโบลด์ของโบลท์ (bolt load) หรือเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ (ของความยาวที่มีความหนาหนึ่งหน่วยในภาพตัดขวาง) ที่โบลท์กระทำในแนวฉากบนระนาบที่กำหนด ได้แก่รูปที่ 5.17 ก. โบลท์กระทำในแนวฉากบนระนาบของพื้นผิวแนวแตก (joint surface) กับรูปที่ 5.17 ข. ในแนวฉากกับพื้นผิวดิน (ground surface) และพจน์ F_p เป็นแรงที่โบลท์กระทำแนวขนานกับระนาบพื้นผิวดิน (ต่อหน่วยพื้นที่เดียวกัน) ที่เป็นแนวระดับเดียวกันกับตะกอนด้านล่างของความลาด ค่ามุม ψ_p เป็นมุมเอียงระนาบการพังทลายที่ขนานกับพื้นผิวแนวแตก และมุม ϕ เป็นค่ามุมความเสียดทานภายในของระนาบแนวแตกแยก ความสัมพันธ์ของแรงเชิงเสถียรภาพในรูปที่ 5.17 ก. กับรูปที่ 5.17 ข. แสดงเป็นสมการที่ 5.52 กับ 5.53 ตามลำดับ

$$\frac{[F_b \cos \psi_p]}{[F_b + F_p \sin(90^\circ - \psi_p)]} < \tan \phi \quad (5.52)$$

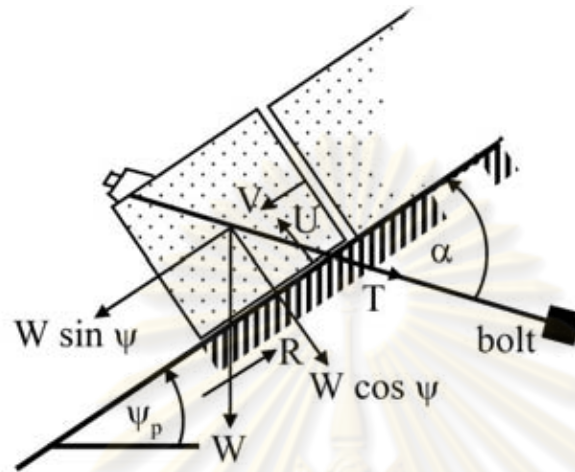
$$\frac{[(F_p \cos \psi_p) - F_b \cos(90^\circ - \psi_p)]}{[F_p \cos(90^\circ - \psi_p) + F_b \cos \psi_p]} < \tan \phi \quad (5.53)$$

ถ้าหากมวลบล็อกหินหรือระนาบชั้นหินที่อยู่บนความลาด ดังรูปที่ 5.18 มีแรงดันน้ำและความลาดมีรอยแตกจากแรงดึงเกิดขึ้น จะได้ความสัมพันธ์ของแรงเชิงเสถียรภาพ ดังสมการที่ 5.54

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U + (T \sin \alpha)]}{[(W \sin \psi_p) + V - (T \cos \alpha)]} \tan \phi \quad (5.54)$$

กำหนดให้ความหนาของภาพตัดขวางรูปที่ 5.18 มีค่าหนึ่งหน่วย พจน์ T ของสมการ 5.54 เป็นค่าแรงเสริมเสถียรภาพต่อหน่วยความยาว (reinforced force per unit length) มีความหมายคล้ายคลึงกันกับพจน์ F_b หรือ F_p เพียงแต่พจน์ T ใช้ในกรณีทั่วไปไม่ได้ระบุมุมเอียง (α) ที่แน่นอน เทคนิคการใช้โบลท์ช่วยทำให้ลดแรงแผ่กระจาย (distributed force) ที่กระทำในแนวทาลงไปในระนาบที่บล็อกมวลสารวางตัวอยู่หรือทำให้เพิ่มแรงจากอัดกับค่าความเสียดทานฐานบล็อกมวลสารที่วางบนระนาบการพังทลาย ค่ามุม α เป็นมุมที่แนวเอียงของโบลท์กระทำกับแนว

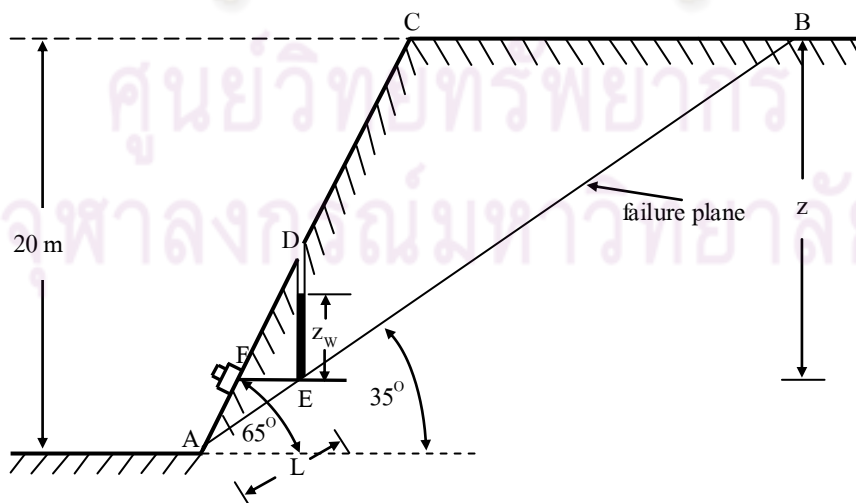
ระนาบการพังทลาย (หรือระนาบหน้าความลาด) ส่วนพจน์อื่นทั้งสามพจน์ใช้ในความหมายเดียวกันกับสมการที่ 5.5 หัวข้อ 5.2.1 ที่เป็นแรงต่อหน่วยความยาว ได้แก่ U – แรงยกตัว, V – แรงดันน้ำ, W – น้ำหนักมวลสาร ส่วนมุม ψ_p เป็นมุมเอียงของระนาบการพังทลาย



รูปที่ 5.18 ปฏิกริยาของแรงเสริมเสถียรภาพโครงสร้างมวลบล็อกหินด้วยโบลท์

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.7

ในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.19 เป็นการตัดชั้นตะกั่วจากการระเบิดหินปูน ปรากฏว่ามีรอยร้าวจากแรงดึงอยู่ในหน้าของความลาด



รูปที่ 5.19 ความลาดที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในหน้าความลาด และฝังโบลท์ในแนวราบ

ข้อมูลที่ตรวจสอบในภาคสนาม และที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีดังต่อไปนี้

- ความสูงในแนวดิ่งของหน้าเหมืองหินปูน = 20 เมตร
- มุมของความลาด = 65°
- มุมเอียงของระนาบที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย = 35°
- ระยะในแนวดิ่งของรอยร้าวจากแรงดึง (DE) = 6.6 เมตร
- ความสูงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงดึง, $z_w = 5.5$ เมตร
- ระยะแนวดิ่ง z จากจุดตัด E ถึงชั้นตะกอน = 16.8 เมตร
- หน่วยน้ำหนักของหินปูน = 25.5 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร
- ค่าการยึดเกาะกันของระนาบชั้นหิน = 45 กิโลนิวตันต่อตร.เมตร
- มุมเสียดทานภายในของระนาบ = 25°

ผลเฉลย

จากผลเฉลยของตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้สมการ 5.7-5.10 ในหัวข้อ 5.2.1 ได้ค่าดังนี้ $L = 5.58$ เมตร, $U, V, W = 150.51, 148.38, 384.60$ กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ นำค่าตัวแปรดังกล่าว มาแทนค่าสมการที่ 5.52 กับกำหนดค่า $F.S. = 1.2$

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U + (T \sin \alpha)]}{[(W \sin \psi_p) + V - (T \cos \alpha)]} \tan \phi \quad (ก)$$

$$1.2 = \frac{(45)(5.58) + [(384.60 \cos 35^\circ) - 150.51 + (T \sin 35^\circ)]}{(384.60 \sin 35^\circ) + 148.38 - (T \cos 35^\circ)} \tan 25^\circ$$

$T = 91.96$ กิโลนิวตันต่อเมตร (tension) นั่นคือ ใช้โบลท์ที่ให้แรงกระทำต่อระยะความยาว (ของความหนาหนึ่งหน่วย) มากกว่า หรือเท่ากับค่า T

เมื่อต้องการหาค่าโอกาสการพังทลาย, $p(f)$ ต้องกำหนดให้ $F.S. = 1$ และให้พจน์ T เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำการแทนค่าใหม่ในสมการ (ก)

$$1.0 = \frac{(45)(5.58) + [(384.60 \cos 35^\circ) - 150.51 + (T \sin 35^\circ)]}{(384.60 \sin 35^\circ) + 148.38 - (T \cos 35^\circ)} \tan 25^\circ$$

$T = 38.08$ กิโลนิวตันต่อเมตร (tension)

ทำให้หาสมการเชิงกำหนด ในรูปแบบใหม่ที่มีค่า $T = 91.96$ กิโลนิวตันต่อเมตร ดังนี้

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U + (91.96)(\sin \alpha)]}{[(W \sin \psi_p) + V - (91.96)(\cos \alpha)]} \tan \phi \quad (\text{ข})$$

5.4.3 การหาค่าโอกาสการพังทลายเพื่อการตัดสินใจเสริมเสถียรภาพ

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.7 ค่า $F.S. = 1.2$ เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนดที่ใช้การเสริมเสถียรภาพด้วยโบลท์ (สมการ ก. ของโจทย์ตัวอย่างที่ 5.7) โดยมีเงื่อนไข ที่ค่า $T = 91.96$ กิโลนิวตันต่อเมตร เป็นค่าคงที่ (constant) ถ้าหากต้องการหาค่าเสถียรภาพของมวลสารเชิงความน่าจะเป็น กำหนดให้ตัวแปรสุ่มในระบบมี 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะ (c) ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) มุมเอียงของระนาบการพังทลาย (ψ_p) และหน่วยน้ำหนักดิน (γ) ทั้งนี้ตัวแปรสุ่มทั้งสี่ตัวแปรมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ C.O.V. (หรือ LCV) เป็น 15 % และค่าสูงสุดของ C.O.V. (หรือ HCV) เป็น 40 % อนึ่งค่า C.O.V. ที่กำหนดให้นี้ ไม่ใช่ค่า $(C.O.V.)_{FS}$ ที่เกิดจากการคำนวณตามสมการเชิงกำหนดของแบบจำลองที่สอง จะได้ค่าโอกาสการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β_N) ของแบบจำลองที่หนึ่งและที่สองแบ่งเป็น 2 ชุด ส่วนค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สาม มีการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง จะได้ค่า $p(f)$ ที่แตกต่างกันเป็น $[p(f)]_{SIM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.20; \quad \beta_N = 1.111; \quad [p(f)]_I = 13.3\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.20; \quad \beta_N = 0.417; \quad [p(f)]_I = 33.8\%$$

2. แบบจำลองที่สอง (อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัย)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{MLV} = 1.21; \quad \beta_N = 1.298; \quad [p(f)]_{II} = 9.7\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{MLV} = 1.27; \quad \beta_N = 0.594; \quad [p(f)]_{II} = 27.6\%$$

3. แบบจำลองที่สาม (อิงกับการจำลองข้อมูล)

ชุดแรก ที่ระดับสถานะต่ำสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (lowest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 15 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = 0.69 - 2.06; \quad [p(f)]_{SIM} = 8.5\%$$

ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = -93.6 - 23.9; \quad [p(f)]_{SIM} = 24.1\%$$

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ผลสรุปในการประเมินค่าความเสี่ยง

งานวิจัยในโครงการนี้มีจุดประสงค์หลัก เพื่อช่วยวางแผนพัฒนาเปิดหน้างานก่อสร้างในภาคสนาม แนวทางปกติก่อนเริ่มการพัฒนาหน้างานชุดเจาะ ต้องมีการประเมินเสถียรภาพของมวลสารเพื่อประกันความปลอดภัยของการทำงานในระดับที่ยอมรับได้ รวมทั้งการควบคุมค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเปิดหน้างานเพื่อไม่ให้สูงเกินไป ผลสรุปที่ผู้วิจัยนำเสนอในโครงการวิจัยนี้เพื่อแสดงผลลัพธ์ของความเสี่ยงต่อการพังทลายในบริเวณหน้างานที่แตกต่างกัน (เนื่องจากสภาพธรรมชาติของธรณีวิทยาของแต่ละตำแหน่งหน้างานชุดเจาะแตกต่างกัน) เป็นการวางแผนงานพัฒนาที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสะดวกต่อการพิจารณาผังหน้างานในภาพรวม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอข้ออุปสรรคในการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น เพื่อนำมาใช้กับโครงสร้างมวลสารที่เป็นดินหรือหิน

6.1 การประเมินความเสี่ยงจากการตัดความลาดมวลหิน

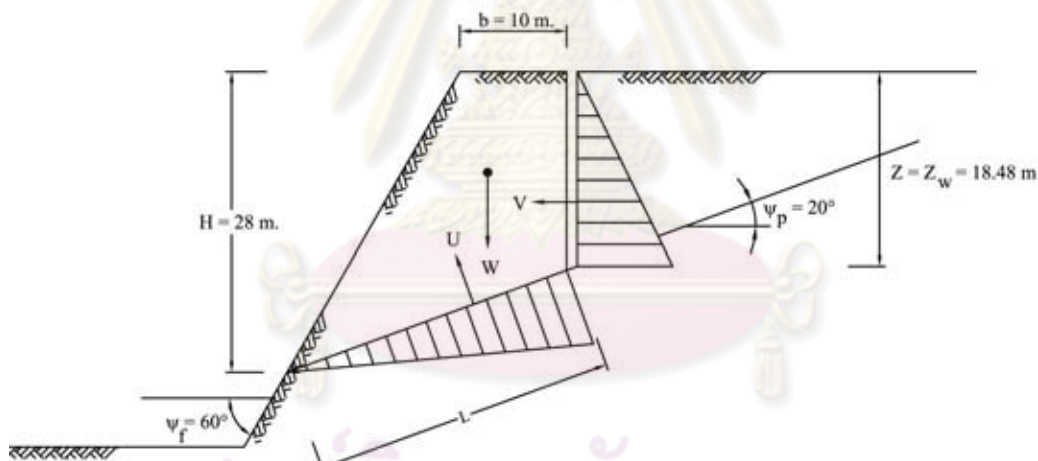
กรณีตัวอย่างรูปแบบแรกเป็นการตัดความลาดในเหมืองหินปูนขนาดใหญ่ เพื่อนำหินปูนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ข้อมูลเบื้องต้น เช่น สมบัติของมวลสาร (หินปูน) ขนาดของมิติในการตัดความลาด เป็นต้น มีความใกล้เคียงกับการทำงานพัฒนาหน้าเหมืองหินในภาคสนาม

6.1.1 ข้อมูลเฉพาะที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่างแรก

กำหนดให้มีการพัฒนาตัดความลาด การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการพัฒนาหน้างานเป็นไปในรูปแบบเชิงกำหนด กับในรูปแบบเชิงความน่าจะเป็น โดยมีข้อมูลเฉพาะกับภาพตัดขวางของรูปที่ 6.1 ดังนี้

ก. ค่าสมบัติและค่ามิติของความลาดมวลหิน

- ความสูงหน้าเหมืองหินจากตำแหน่งรอยแตกตัดผ่านถึงจุดยอดความลาด (crest) เท่ากับ 28 เมตร
- มุมหน้าความลาด เท่ากับ 60 องศา
- ระบายของรอยแตกเฉียงเข้าหาหน้างาน เป็นมุม 20 องศา
- รอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) เกิดในแนวตั้ง ห่างจากจุดยอดความลาด ถึงจุดที่เกิดรอยร้าว ในแนวราบ เท่ากับ 10 เมตร
- ความลึกของรอยร้าวจากแรงดึง เท่ากับ 18.48 เมตร มีน้ำขังเต็มระดับ
- หน่วยน้ำหนักหินปูน เท่ากับ 25.1 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร
- มุมเสียดทานภายใน เท่ากับ 20 องศา
- ค่าการยึดเกาะ กันหรือโคฮีชัน เท่ากับ 100 กิโลพาสคัล



รูปที่ 6.1 การพังทลายตามแนวระนาบ (L) หน้าเหมืองหินปูนที่มีรอยร้าวจากแรงดึง เกิดในชั้นตะกอนด้านบน มีน้ำขังเต็มระดับรอยร้าว พจน์ H เป็นความสูงหน้าเหมืองที่เกิดการพังทลาย พจน์ ψ_f เป็นความชันของหน้าเหมือง พจน์ ψ_p เป็นมุมเอียงระนาบรอยร้าว พจน์ Z เป็นความสูงรอยร้าว และ Z_w เป็นความลึกของน้ำที่ขัง ส่วนพจน์ U เป็นแรงยกตัว พจน์ V เป็นแรงผลักของน้ำ พจน์ W เป็นน้ำหนักมวลที่เกิดการพังทลาย และพจน์ b เป็นระยะแนวราบจากจุดยอดถึงรอยร้าว

ข. ค่าเชิงสถิติเพื่อหาค่าโอกาสของความเสี่ยงจากการพังทลาย

- พจน์ตัวแปรสุ่มในระบบ มี 4 พจน์ตัวแปร ได้แก่ ค่ามุมเอียงของระนาบ ค่าหน่วยน้ำหนักหิน ค่ามุมเสียดทานภายใน ค่าการยึดเกาะกัน
- สมมุติให้ตัวแปรสุ่ม มีการแจกแจงฟังก์ชันทั้งในรูปแบบปกติ และในรูปแบบลอการิทึมปกติ
- พจน์ตัวสุ่มในระบบ ที่มีการแจกแจงฟังก์ชันทั้งสองรูปแบบ มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์

ผลเฉลย

วิธีเชิงกำหนด ในการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยการพังทลายแนวระนาบ ในกรณีที่มีแรงดันน้ำยกตัว (uplift force, U) แรงผลักดันน้ำด้านข้าง (thrust force, V) ตามแนวระนาบยาว L ใช้สมการ

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U - (V \sin \psi_p)] \tan \phi}{(W \sin \psi_p) + (V \cos \psi_p)} \quad (ก)$$

เมื่อแทนค่าที่กำหนด ในสมการ (ก) ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ที่จัดเป็น Conventional F.S. = 1.02 ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 6.1

ในกรณีที่จะวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยง ใช้ค่าเชิงสถิติที่กำหนดมาให้ โดยแยกการวิเคราะห์เป็นการใช้แบบจำลอง 3 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งอิงค่าขอบความปลอดภัย (safety margin) รูปแบบที่สองอิงค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น่าจะเป็นมากที่สุด (the most likely value of factor of safety) ส่วนรูปแบบที่สามเป็นการจำลองข้อมูล โดยเริ่มจากตัวแปรสุ่มระหว่าง 0-1.0 ถูกก่อกำเนิด (generated) และมีการสุ่มตัวแปรฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, PDF) ที่อยู่ระหว่าง -4 (S.D.) ถึง $+4$ (S.D.) เพื่อหาค่าโอกาสการพังทลายจากการจำลองข้อมูล ที่มีการคำนวณซ้ำจำนวน 1000 ครั้ง ผลลัพธ์จากการหาค่าโอกาสการพังทลายทั้ง 3 รูปแบบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพของการตัดความลาดมวลหินปูน ที่ได้จากการใช้วิธีเชิงกำหนดกับการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าความเสี่ยงของการพังทลาย ที่ใช้แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบหาค่าผลลัพธ์

| CONVENTIONAL F.S. = 1.02 | | |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| RISK MODEL I | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = 0.114$ | $[p(f)]_I = 45.48\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = -0.001$ | $[p(f)]_I = 50.03\%$ |
| RISK MODEL II | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = 0.168$ | $[p(f)]_{II} = 43.34\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = 0.050$ | $[p(f)]_{II} = 48.01\%$ |
| RISK MODEL III | | |
| Normal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.66 - 1.45$ | $[p(f)]_{SIM} = 42.70\%$ |
| Lognormal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.65 - 1.66$ | $[p(f)]_{SIM} = 44.60\%$ |

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหาค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 6.1

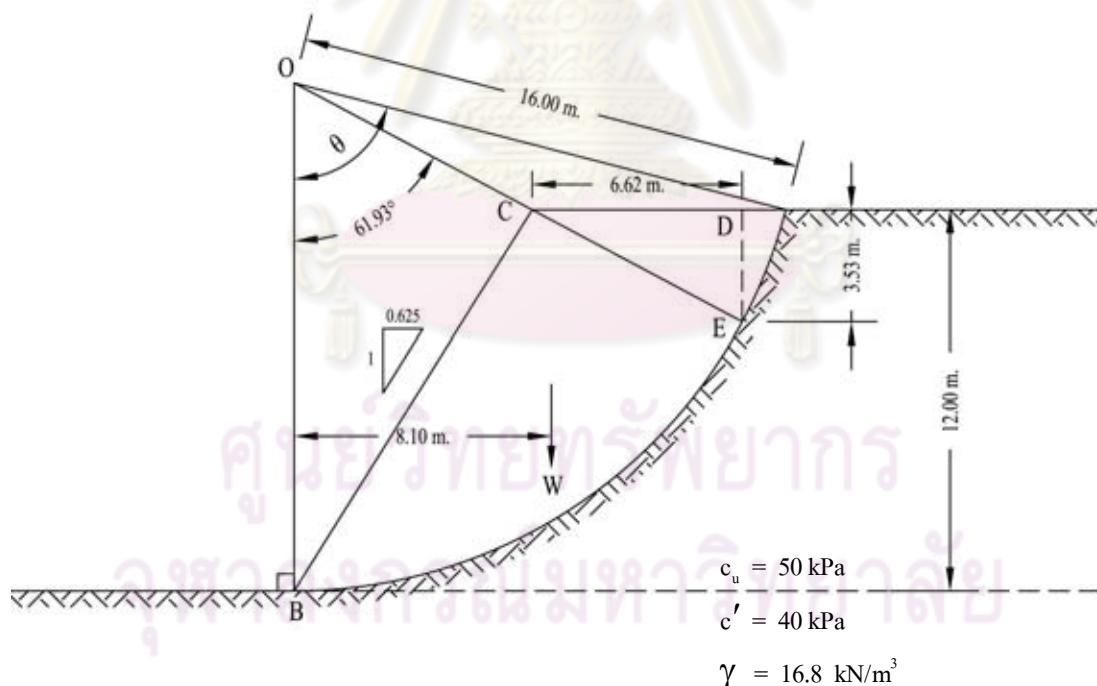
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 การประเมินความเสี่ยงจากการตัดความลาดมวลดินเหนียวอ่อน

กรณีตัวอย่างรูปที่สองเป็นการตัดความลาดในหน้างานดิน มวลดิน ที่ยกเป็นกรณีตัวอย่างคือดินเหนียวอ่อน (soft clay soil) ที่มีน้ำอยู่ในมวลดินจนมีลักษณะอิ่มตัว (saturated soil) และมวลดินไม่มีค่าความเสียดทาน (frictionless soil) สมบัติมวลดินดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับชั้นดินฐานรากของสิ่งก่อสร้างในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียง นั่นคือ มวลดิน มีสภาพกึ่งพลาสติกที่เปลี่ยนรูปและปริมาตรได้ง่าย

6.2.1 ข้อมูลเฉพาะที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่างที่สอง

กำหนดให้มีการพัฒนาตัดความลาด การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการพัฒนาหน้างานเป็นไปทั้งในรูปแบบเชิงกำหนด กับในรูปแบบเชิงความน่าจะเป็น โดยมีข้อมูลเฉพาะกับภาพตัดขวางของรูปที่ 6.2 ดังนี้



รูปที่ 6.2 การพังทลายรูปวงกลมตามแนวเส้นโค้ง BE ของความลาดดินเหนียวอ่อน ที่เป็นดินเหนียวอิ่มตัวไม่มีค่าความเสียดทาน มีน้ำขังเต็มในรอยร้าวจากแรงดึง พจน์ θ เป็นมุมจุดศูนย์กลางวงกลม ส่วนสมบัติดินกับมิติต่าง ๆ ระบุไว้ด้วย

ก. ค่าสมบัติและค่ามิติของความลาดมวลดิน

- ความสูงหน้าความลาดจากตำแหน่งระดับพื้นถึงจุดยอดความลาด (crest) เท่ากับ 12 เมตร
- มุมหน้าความลาด เท่ากับ 58 องศา (ระยะราบต่อระยะตั้ง = 0.625:1)
- ระบายของรอยแตกเฉียงเข้าหาหน้างาน เป็นแนวเส้นโค้งรูปอาร์ก
- รอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) เกิดในแนวตั้งที่จุด D ห่างจากจุดยอดความลาด ถึงจุดที่เกิดรอยร้าว ในแนวราบ เท่ากับ 6.62 เมตร
- ความลึกของรอยร้าวจากแรงดึง (DE) เท่ากับ 3.53 เมตร มีน้ำขังเต็มระดับ
- หน่วยน้ำหนักดินเหนียวอ่อน เท่ากับ 16.8 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร
- ค่าการยึดเกาะกันที่ไม่มีการระบายน้ำออกจากมวล (undrained cohesion, c_u) เท่ากับ 50 กิโลพาสคัล
- ค่าการยึดเกาะกันประสิทธิผล (effective cohesion, c') เท่ากับ 40 กิโลพาสคัล
- ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลม ที่ใช้วิธีสุ่ม อยู่สูงจากระดับพื้นผิว เท่ากับ 16 เมตร (ซึ่งเท่ากับรัศมีของวงกลม) และห่างจากจุดยอดในแนวราบ เท่ากับ 8.10 เมตร รัศมีวงกลมที่ผ่านจุดล่างสุด (toe) และผ่านจุดยอด (crest) กับตำแหน่งล่างสุดของ รอยร้าว (จุด E) ทำมุมเท่ากับ 61.93 องศา

ข. ค่าเชิงสถิติเพื่อหาค่าโอกาสของความเสียหายจากการพังทลาย

- พจน์ตัวแปรสุ่มในระบบ มี 2 พจน์ตัวแปร ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกัน และหน่วยน้ำหนักดินเหนียวอ่อน
- สมมุติให้ตัวแปรสุ่ม มีการแจกแจงฟังก์ชันทั้งในรูปแบบปกติ และในรูปแบบลอการิทึมปกติ
- พจน์ตัวแปรสุ่มในระบบ ที่มีการแจกแจงฟังก์ชันทั้งสองรูปแบบ มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์

ผลเฉลย

การแก้ปัญหาของโจทย์ข้อนี้ ต้องหาพื้นที่ของมวลดินเหนียว BCDE ที่เป็นมวลที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ต้องหาระยะเส้นโค้งวงกลม และพื้นที่อื่นก่อน จากนั้นใช้สมการ (ก) เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่อความหนาหนึ่งหน่วย

$$\text{F.S.} = \frac{M_R}{M_D} \quad (\text{ก})$$

กรณีแรกกำหนดให้ มวลดินเหนียวไม่มีแรงดันน้ำจากรอยร้าวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยแทนค่าแรงโมเมนต์รอบ จุด O ที่คำนวณได้ค่า Conventional F.S. (dry) = 1.13 ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 6.2

กรณีที่สองมีน้ำขังเต็มในส่วนที่เป็นรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) เมื่อประมาณให้เป็นไดอะแกรมแรงดันน้ำเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แทนค่าแรงโมเมนต์รอบ จุด O ที่คำนวณได้ค่า Conventional F.S. (wet) = 0.88 ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 6.2

ในกรณีที่วิเคราะห์หาค่าความเสี่ยง ใช้ค่าเชิงสถิติที่กำหนดมาให้ โดยแยกการวิเคราะห์เป็นการใช้แบบจำลอง 3 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งอิงค่าขอบความปลอดภัย (safety margin) รูปแบบที่สองอิงค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น่าจะเป็นมากที่สุด (the most likely value of factor of safety) ส่วนรูปแบบที่สามเป็นการจำลองข้อมูล (data simulation) โดยเริ่มจากตัวแปรสุ่มระหว่าง 0-1.0 ถูกก่อกำเนิด (generated) และมีการสุ่มตัวแปรฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, PDF) ที่อยู่ระหว่าง -4 (S.D.) ถึง $+4$ (S.D.) เพื่อหาค่าโอกาสการพังทลายจากการจำลองข้อมูล ที่มีการคำนวณซ้ำจำนวน 1000 ครั้ง ผลลัพธ์จากการหาค่าโอกาสการพังทลายทั้ง 3 รูปแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพของการตัดความลาดมวดดินเหนียวอ่อน ที่ได้จากการใช้วิธีเชิงกำหนดกับการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าความเสี่ยงของการพังทลาย ที่ใช้แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบหาค่าผลลัพธ์

| | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| CONVENTIONAL F.S. (dry) = 1.13 | | |
| CONVENTIONAL F.S. (wet) = 0.88 | | |
| RISK MODEL I (for dry case) | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = 0.763$ | $[p(f)]_I = 22.3\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = 0.740$ | $[p(f)]_I = 23.0\%$ |
| RISK MODEL I (for wet case) | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = -0.948$ | $[p(f)]_I = 82.8\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = -0.968$ | $[p(f)]_I = 83.3\%$ |
| RISK MODEL II (for dry case) | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = 0.569$ | $[p(f)]_{II} = 28.5\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = 0.536$ | $[p(f)]_{II} = 29.6\%$ |
| RISK MODEL II (for wet case) | | |
| Normal Distribution | $\beta_N = -0.638$ | $[p(f)]_{II} = 73.8\%$ |
| Lognormal Distribution | $\beta_{LN} = -0.703$ | $[p(f)]_{II} = 75.9\%$ |
| RISK MODEL III (for dry case) | | |
| Normal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.45 - 2.51$ | $[p(f)]_{SIM} = 28.0\%$ |
| Lognormal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.55 - 2.19$ | $[p(f)]_{SIM} = 28.6\%$ |
| RISK MODEL III (for wet case) | | |
| Normal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.37 - 1.83$ | $[p(f)]_{SIM} = 75.4\%$ |
| Lognormal Distribution | $(F.S.)_{range} = 0.43 - 1.77$ | $[p(f)]_{SIM} = 73.9\%$ |

หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหาค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 6.2

6.3 ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการประเมินความเสี่ยง

กระบวนการประเมินผลลัพธ์ความเสี่ยงในระบบ มีโอกาสเกิดความไม่แน่นอน (uncertainty) ระหว่างประเมินได้ ต้นเหตุและการแก้ปัญหาความไม่แน่นอนที่แยกออกเป็นหลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับวิธีการขุดเจาะเปิดหน้าดินในงานวิศวกรรมโยธาหรือวิธีการขุดเจาะเปิดหน้าดินในงานวิศวกรรมเหมืองแร่ รวมทั้งตัวประกอบอื่นในสนาม ผู้วิจัยแยกการประเมินความไม่แน่นอน ดังต่อไปนี้

6.3.1 ตัวประกอบสำคัญที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอนในการประเมิน

ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงกำหนดหรือเชิงความน่าจะเป็น อิทธิพลของตัวประกอบหลัก (important factors) ที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอน มีความเป็นไปได้ในหลายรูปแบบ ทั้งจากสภาพภูมิประเทศในธรรมชาติ สภาพทางธรณีวิทยาของบริเวณ อิทธิพลของตัวแปรสุ่มในมวลสาร และอิทธิพลของตัวแปรสุ่มภายนอก เมื่อต้องการหาค่าโอกาสการพังทลาย ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยหรือค่าการคาดหมาย กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างจะทราบแล้ว แต่ยังมีปัญหาในเรื่องการสมมุติฟังก์ชันการแจกแจง (distributed function) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าผลลัพธ์เชิงความเสี่ยง กลุ่มผู้วิจัย Mostyn and Li (1993) ระบุไว้ในบทความ (หน้า 100) ว่าจากการศึกษาเชิงความเสี่ยงของการพังทลายของคันดินถม (soil embankment) เมื่อทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ได้ค่า $F.S. = 2.0$ และการหาค่าเชิงสถิติของกลุ่มตัวอย่าง มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation) = 20% แต่เมื่อเลือกใช้ค่าฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ถ้าการแจกแจงแบบปกติ (normal) ค่าโอกาสการพังทลายหรือ $p(f) = 2 \times 10^{-3}$ แต่ถ้าการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) ได้ค่า $p(f) = 2 \times 10^{-4}$ หรือถ้าการแจกแจงแบบแกมมา (gamma) ได้ค่า $p(f) = 2 \times 10^{-4}$

6.3.2 ปัญหาในการวิเคราะห์ผลโครงสร้างมวลดิน

การพังทลายในรูปแบบวงกลมของมวลดินในงานวิศวกรรมโยธา การหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤต (วงกลมที่ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุดหรือน้อยสุด) การแก้ปัญหาแยกดินเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ กรณีของดินที่ไม่มีค่าการยึดเกาะกันอย่างบริสุทธิ์ (purely cohesionless soil) กับกรณีของดินที่มีค่าการยึดเกาะกันอย่างเดียว (purely cohesive soil)

ดินประเภทแรก มีสมบัติที่ไม่มีค่าการยึดเกาะ นั่นคือ ค่า c (ไม่มีแรงดันน้ำเก็งข้อง) = 0 หรือ c' (มีแรงดันน้ำเก็งข้อง) = 0 แต่เป็นดินที่มีค่าความเสียดทาน เมื่อทำการตัดความลาดในมวลดิน ประเภทนี้ พื้นผิวที่มีโอกาสไถลเลื่อน หรือจัดเป็น critical slip surface ระบายของพื้นผิว

จะขนานกับหรือร่วมกัน (coincident) กับพื้นผิวของความลาด (slope surface) ทำให้ได้รัศมีวงกลมเป็นค่าอนันต์ หรือ infinite radius วงกลมวิกฤตมีความชันมากและค่ารัศมีกว้าง (หรือใหญ่) มาก ทำให้ได้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลม อยู่ในเส้นตรงที่ลากจากจุดกึ่งกลาง (midpoint) ของเส้นหน้าความลาด โดยลากเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับพื้นผิวความลาด

ดินประเภทที่สอง มีสมบัติที่ไม่มีค่าความเสียดทาน นั่นคือ ค่า ϕ (ไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง) = 0 หรือ ϕ' (มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง) = 0 แต่เป็นดินที่มีค่าการยึดเกาะ เมื่อทำการตัดความลาดในมวลดินประเภทนี้ วงกลมวิกฤตมีโอกาสอยู่ในระดับลึกมากที่สุดเท่าที่จะลึกได้ (as deep as possible) ในกรณีนี้จุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤตจะอยู่ในเส้นตรงที่ลากจากจุดกึ่งกลางของเส้นหน้าความลาด โดยลากเป็นเส้นตรงในแนวตั้งตั้งฉากกับระดับพื้นผิวดิน แต่มีเงื่อนไขเพิ่มเติมที่ค่าของมุมความลาด (slope angle) มีค่าน้อยกว่า 53 องศา

6.3.3 ปัญหาในการวิเคราะห์ผลโครงสร้างมวลหิน

ในการวิเคราะห์ผลลัพท์มวลหินมักสมมุติให้รอยแตกแยก (joint) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหินมีผลให้มวลเกิดการพังทลายในแนวระนาบนั้น แต่หินที่เกิดในที่ (in situ rock) มีรอยแตกแยกในธรรมชาติ ทำให้มีโอกาสความเป็นไปได้ของการพังทลายในหลายรูปแบบ เมื่อมีการตัดความลาดในงานวิศวกรรมเหมืองแร่ ถ้าหากมีระนาบตั้งแต่สองระนาบขึ้นไปเกิดในโครงสร้างหินระนาบทั้งสองเกิดการตัดกัน ในลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยม (wedge) แยกมวลหินออกเป็น 2 บล็อก การคำนวณเชิงเสถียรภาพต้องใช้วิธีแรงหลายเหลี่ยม (force polygon) บล็อกด้านบนของความลาด (ที่ผ่านจุดยอดความลาด) มีผลก่อให้เกิดการไถลเลื่อน ส่วนบล็อกด้านล่าง (ที่ผ่านจุดยอดความลาด) มีผลก่อให้เกิดการด้านการไถลเลื่อน ดังนั้นการคำนวณผลลัพท์จะแตกต่างจากการพังทลายตามแนวระนาบเดียว จำเป็นต้องหาผลลัพท์ของแรงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสร่วมของบล็อกทั้งสอง ก่อนที่จะได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมที่สุด ความคลาดเคลื่อน (error) ที่เกิดจากกระบวนการหาผลลัพท์นั้นเป็นเพราะว่าในภาคสนาม การตรวจวัดค่าระยะหรือมิติของความยาวของระนาบ มีความไม่ต่อเนื่องของแนวระนาบ (ซึ่งในการคำนวณจะสมมุติให้ความยาวระนาบต่อเนื่องกันตลอด) นอกจากนี้ การคำนวณค่าพื้นที่มีโอกาสเกิดความเอนเอียง (biased) เพราะในการตรวจวัดมักใช้วิธีการประมาณค่าการวางตัวของระนาบ (เช่น แนว strike มุม dip ของระนาบ) ปกติในธรรมชาติ รอยแตกแยก 1 เซตจะไม่ค่อยพบว่า มีค่าการวางตัวของระนาบในเซตเท่ากัน ในอีกกรณีหนึ่ง ที่มีการระบุให้แรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องในมวลหินเมื่อมีฝนตกในช่วงระยะเวลาหนึ่งระดับน้ำใต้ดินย่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ในธรรมชาติ ผลกระทบของแรงดันน้ำไม่คงที่ เช่น ความเร็วระดับน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงฝนตกหนักกับช่วงฝนตกเล็กน้อย

6.3.4 ปัญหาในการวิเคราะห์ผลโครงสร้างมวลดินสลับกับมวลหิน

ชั้นดินและชั้นหินที่มีลักษณะของความสัมพันธ์ร่วมกัน (interface) ต้องใช้ลักษณะเชิงธรณีวิทยาของแต่ละบริเวณ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการแก้ปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ได้ ผู้วิจัยแยกแนวทางในการประเมินกรณีที่มีชั้นดินสลับชั้นหิน ดังนี้

ก. กรณีที่ชั้นดินมีความหนาแน่นและวางตัวบนชั้นหินแข็ง ในกรณีนี้ ค่าความเสียดทานเป็นผลมาจากชั้นหินที่รองรับด้านล่าง ถ้าหากชั้นดินมีค่ามิตินความยาวมากเมื่อเทียบกับค่ามิตินความหนาหรือความสูงของชั้นหินที่รองรับ การวิเคราะห์ใช้รูปแบบของ infinite slope ตามตัวอย่างที่ระบุในหัวข้อ 5.1.1 บทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ถ้าหากมวลดินไม่มีเนื้อเดียวกัน หรือเป็นดินวิวิธพันธุ์ (heterogeneous soil) การพังทลายจะมีลักษณะเป็น แผ่นชั้นบางไถลเลื่อน มีชื่อเรียกเฉพาะว่า slab slide (Hutchinson, 1968) การเกิดการไถลเลื่อนอาจใช้เวลานาน ค่าตัวเลขผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากวิธีการปกติ มีความผิดพลาดได้ง่าย เพราะเป็นปัญหาของ composite surfaces ค่าความเสียดทานไม่ได้เกิดจากชั้นหินแข็งที่รองรับเพียงอย่างเดียว

ข. กรณีที่ชั้นดินมีความหนามากและวางตัวบนชั้นหินแข็ง ในกรณีนี้ ควรเกิดการพังทลายเป็นแบบวงกลม หรือ circular failure ชั้นหินที่รองรับด้านล่างจะเป็นฐานล่างหรือ base ถ้าหากมวลดินเป็นดินวิวิธพันธุ์ (heterogeneous soil) การวิเคราะห์ต้องใช้ค่าคุณสมบัติแต่ละส่วน ดังนั้นการหาผลลัพธ์ด้วย analytical method จึงควรใช้การแบ่งส่วนออกเป็นหลายเสี้ยว (slice method) ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.3.6-5.3.7 หรือใช้วิธีของ Bishop (หัวข้อ 5.3.8-5.3.10)

ค. กรณีที่ชั้นดินสลับชั้นหินแข็งหลายครั้ง ในกรณีนี้ จะต้องพิจารณาเฉพาะปัญหาของรูปแบบการสลับกันระหว่างชั้นดินกับชั้นหิน ถ้าปลอกของมวลที่เกิดการพังทลายมีชั้นหินคั่นอยู่ตรงกลาง โอกาสการพังทลายของชั้นดินอ่อนที่อยู่บนชั้นหินแข็ง จะเป็นแบบวงกลม โดยวงกลมวิบัติจะมีรัศมีสัมผัสกับชั้นหินแข็ง และอาจไม่มีการพังทลายของชั้นดินที่อยู่ด้านล่างใต้ชั้นหินแข็ง อย่างไรก็ตาม ถ้าหากมีระดับน้ำใต้ดินสูงหรือเกิดฝนตกหนัก ชั้นดินส่วนล่างที่อยู่ใต้ชั้นหินแข็งอาจเกิดการไถลเลื่อนในแนวเชิงเส้นตามลักษณะของ translation slide ได้เป็นรูปแบบของ slab slide

6.3.5 ปัญหาในการเลือกแบบจำลองในการวิเคราะห์ผลลัพธ์

การเลือกแบบจำลองแบบไหน เป็นหัวข้อวิจัยหลักที่ผู้วิจัยโครงการนี้นำเสนอในรายงานวิจัยฉบับนี้ที่เป็นกรณีตัวอย่างที่ 6.1 กับ 6.2 แสดงว่า ค่าผลลัพธ์แต่ละรูปแบบมีค่าไม่เท่ากัน จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรผู้วางแผนที่จะต้องตัดสินใจเลือก และให้ความเชื่อถือค่าผลลัพธ์วิธีไหน ปกติค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนดจะเป็นสิ่งแรกที่ใช้พิจารณา จากนั้นการทำการวิเคราะห์ความเสี่ยง

ด้วยแบบจำลองทั้งสามรูปแบบที่งานวิจัยโครงการนี้นำเสนอเพื่อเป็นส่วนประกอบช่วยตัดสินใจ หาเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงานภาคสนาม

ในกรณีที่ปัญหาค่อนข้างสลับซับซ้อน เช่น ในการหาผลลัพธ์จากการพังทลายของมวลดิน การทดลองผิด-ถูก ด้วยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์กลางและรัศมีวงกลม ปกติใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเลื่อนตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลม ในแนวราบและดิ่ง หรือในแนวราบอย่างเดียว หรือในแนวดิ่งอย่างเดียว แต่มีข้อจำกัดที่ต้องให้วงกลมตัดผ่านชั้นดินที่มีสมบัติและข้อมูลเชิงมิติที่กำหนด ถ้าพิกัดของจุดศูนย์กลาง มีรัศมีวงกลมใหญ่เกินไปอาจไม่มีประโยชน์ ดังนั้นในช่วงของการค้นหาเพื่อปรับเปลี่ยนพิกัดจุดศูนย์กลางและรัศมีนั้น ชั้นดินที่มีความหนาน้อยสุด (thinnest layer) ต้องปรากฏในภาพตัดขวางด้วย ตามเกณฑ์ทั่วไปหรือ rule of thumb การเพิ่มค่า (พิกัดจุดศูนย์กลาง หรือรัศมี) แต่ละช่วงการค้นหาควรเพิ่มจาก $0.1 H - 0.01 H$ ($H = \text{slope height}$) ซึ่งค่าดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อเวลาในการคำนวณ (computation time) ของคอมพิวเตอร์

ในภาพรวมผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ผล มีโอกาสที่จะได้ค่าดัชนีของตัวเลขอัตราส่วนปลอดภัยที่ระบุว่ามีค่าต่ำสุดหลายค่าหรือได้วงกลมวิกฤตตัดผ่านหน้าตัดชั้นดินได้หลายวงกลม ผู้วิเคราะห์ ต้องพิจารณาวงกลมดังกล่าวว่า วงกลมไหนสมควรจัดให้เป็นตัวแทนวงกลมวิกฤตในการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด หรือเป็นตัวแทนหาค่าความเสี่ยงของการพังทลายมวลสาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REFERENCES – FINAL REPORT

1. สง่า ตั้งชवाल (2541)
 “เสถียรภาพของการขุดเจาะ”, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อม
 แผ่นโปรแกรม STABILEX.E หลังปก 228 หน้า
2. สง่า ตั้งชवाल (2544)
 “การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพของงานขุดเจาะบนพื้นผิวดินและ
 ใต้ผิวดิน”, รายงานฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ส่วนส่งเสริมและพัฒนาวิจัย
 สำนักบริหารวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 207 หน้า
3. สง่า ตั้งชवाल (2546)
 “บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน”, รายงานวิจัย
 ฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยเลขที่ 62G-MN-2545 ฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย พร้อมแผ่นโปรแกรม Slope Cut Design 254 หน้า
4. สง่า ตั้งชवाल (2551)
 “ธรณีเทคนิคเชิงวิเคราะห์”, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 555 หน้า
5. Ang, A. H-S. and W.H. Tang (1975)
 “Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Vol. I Basic Principles”,
 John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A., 409 pages.
6. 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 Inc., New York, U.S.A., 562 pages.

7. Ang, A. H-S. and W.H. Tang (2007)

“Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering: 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 406 pages.

8. Athanasiou-Grivas, D. (1979)

“Probabilistic Evaluation of Safety of Soil Structures”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No. GT9, pp. 109-115.

9. Balasubramaniam, A.S. and Others (1989)

“Excavations in Bangkok Sub-Soils” Thirteenth Southeast Asian Geotechnical Conference, Asian Institute of Technology, Thailand.

10. 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 Geotextile and Geomembranes”, Vol. 13, pp. 403-420.

11. Canada Centre for Mineral and Energy Technology (1976)

“Pit Slope Manual: Chapter 1 Summary”, CANMET Report 76-22, Mines and Resources Canada, Ministry of Supply and Services Canada, Ottawa, Canada., 65 pages.

12. Christian, J.T. (1996)

“Reliability Methods for Stability of Existing Slopes”, Proceedings of Uncertainty '96: Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, Madison, WI., [Also in ASCE Geotechnical Special Publication 58], pp. 409-418.

13. Christian, J. T., C. C. Ladd and G. B. Baecher (1994)

“Reliability Applied to Slope Stability Analysis”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 120, No. GT 12, pp. 700-702.

14. Christian, J.T. and G.B. Baecher (2001)

Discussion on “Factor of safety and Reliability in Geotechnical Engineering” by J.M. Duncan, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 8, pp. 700-702.

15. Duncan, J. M. (2000)

“Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 307-316.

16. Duncan, J. M. and A. L. Buchignani (1973)

“Failure of Underwater Slope in San Francisco Bay”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM 9, pp. 687-703.

17. Duncan, J. M. and S. G. Wright (2005)

“Soil Strength and Slope Stability”, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, U.S.A., 297 pages.

18. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong (2000)

“Preliminary Quantitative Risk Assessment of Earthquake-Induced Landslides at Man-Made Slopes in Hong Kong”, Geo Report No. 98, By H.N. Wong and K.K.S. Ho, Government Publication Centre, Hong Kong., 69 pages.

19. Harr, M.E. (1977)

“Mechanics of Particulate Matter – A probabilistic Approach”, McGraw-Hill Inc., New York, U.S.A., 543 pages.

20. Harr, M.E. (1987)

“Reliability– Based Design in Civil Engineering”, McGraw-Hill Inc., New York, U.S.A., 290 pages.

21. Harrison, J.P. and J.A. Hudson (2000)

“Engineering Rock Mechanics; Part 2: Illustrative Worked Examples” Pergamon, An Imprint of Elsevier Science, Oxford, United Kingdom, 506 pages.

20. Hasofer, A.M. and N.C. Lind (1974)

“Exact and Invariant Second-Moment Code Format”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM 1, pp. 111-121.

21. Hoek, E. and J. Bray (1981)

“Rock Slope Engineering: Revised Third Edition”, The Institution of Mining and Metallurgy, London, United Kingdom. 358 pages.

22. Hudson, J.A and J.P. Harrison (1997)

“Engineering Rock Mechanics; An Introduction to the Principles” Pergamon, An Imprint of Elsevier Science, Oxford, United Kingdom, 444 pages.

23. Hutchinson, J.N. (1968)

“Mass Movement”, in Encyclopedia of Geomorphology, R.W. Fairbridge (Editor), Reinhold Book Corporation, New York, U.S.A., pp. 688-696.

24. Khalokakaie, R. (1999)

“Computer-Aided Optimal Open Pit Design with Variable Slope Angles”, Ph. D. Dissertation, University of Leeds, United Kingdom, 300 pages.

25. Knezevic, J. (1993)

“Reliability, Maintainability and Supportability: A Probabilistic Approach”, McGraw-Hill International (U.K.) Limited, London, United Kingdom. With the Software Package, 291 pages.

26. Komljenovic D. (2008)

“Development of Risk-Informed, Performance-Base Asset Management in Mining”, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Taylor & Francis Group, Vol.22, No.2, pp. 146-153.

27. Kulhawy, F.H. (1992)

“On the Evaluation of Soil Properties”, Geotechnical Special Publication No. 31, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp. 95-115.

28. Lacasse, S. and F. Nadim (1997)

“Uncertainties in Characterizing Soil Properties”, Publication No. 21, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway., pp. 49-75.

29. Lambe, T.W. and R.V. Whitman (1979)

“Soil Mechanics, S.I. Version”, John Wiley and Sons Inc., New York, U.S.A., 553 pages.

30. Lee, I. K., W. White, O.G. Ingles (1983)

“Geotechnical Engineering”, Pitman Publishing Inc., Boston, Massachusetts, U.S.A., 508 pages.

31. Li, K.S. and P. Lumb (1987)

“Probabilistic Design of Slopes”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, No. 4, pp. 520-535.

32. Liu, C. and J.B. Evett (1998)

“Soils and Foundations: Fourth Edition”, Prentice Hall Inc., New Jersey, U.S.A., 504 pages.

33. 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, The Netherlands, pp. 89-109.

34. Obert, L. and W. I. Duvall (1976)

“Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock”, John Wiley and Sons Inc., New York, U.S.A., 650 pages.

35. Rosenblueth, E. (1975)

“Point Estimates for Probability Moments” Proceedings of the National Academy of Science, U.S.A., Vol. 72, No. 10, pp. 3812-3814.

36. Singh, V.P., S.K. Jain, A. Tyagi (2007)

“Risk and Reliability Analysis: A Handbook for Civil and Environmental Engineers”, ASCE Press, Reston, Virginia, U.S.A., 785 pages.

37. U.S. Army Corps of Engineers (1970)

“Engineering and Design: Stability of Earth and Rock-Filled Dams”, Engineering Manual No. 1110-2-1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Office the Chief of Engineers, Washington, D.C., U.S.A.

38. U.S. Army Corps of Engineers (1998)

“Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies”, Engineering Circular No. 1110-2-554, Department of the Army, Corps of Engineers, Office the Chief of Engineers, Washington, D.C., U.S.A.

39. U.S. Bureau of Mines (1991)

“Rotational Fracture Mechanisms Using Multiple Friction Circles for Stability Analysis”, By D.A. Crum, USBM Report of Investigations No. 9352, U.S. Department of the Interior, Washington D.C., U.S.A., 50 pages.

40. U.S. Bureau of Reclamation (2001)

“Engineering Geology Field Manual: Second Edition”, U.S. Department of the Interior, Washington D.C., U.S.A., Vol. I – 472 pages, Vol. II – 535 pages.

41. Vose, D. (2005)

“Risk Analysis: A Quantitative Guide: Second Edition (Fifth Reprinted)”, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom., 418 pages.

42. Whitman, R. V. (1984)

“Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 110, No. GT2, pp. 145-188.

43. Whitman, R. V. (2000)

“Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. GT 7, pp. 470-475.

44. Wolff, T.F. (1994)

“Evaluating the Reliability of Existing Levees” Report on Research Project: Reliability of Existing Levees, Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, Vicksburg, MS., U.S.A.

45. Wolff, T.F. (1996)

“Probabilistic Slope Stability in Theory and Practice” Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp. 419-433.

46. Wyllie, D.C. and C.W. Mah (2004)

“Rock Slope Engineering, Civil and Mining: 4th Edition”, Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York, 431 pages.

47. Yucemen, M.S. (1973)

“A Probabilistic Study of Safety and Design of Earth Slopes”, Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, U.S.A., 205 pages.