

การใช้ความน่าจะเป็นสำหรับเสถียรภาพของลาดหินในการพังทลายแนวระนาบ

Probabilistic Method for Rock Slope Stability of Plane Failure

สง่า ตั้งขวาล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

E-mail: sa-nga.t@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

แนวคิดในการหาเสถียรภาพเชิงกำหนดที่นิยมใช้กันทั่วไปยังมีข้อจำกัดในการประยุกต์ เกี่ยวกับความน่าเชื่อถือได้ของระบบ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของมวลสารแปรผันได้ หรือในบางกรณีวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สะท้อนถึงพฤติกรรมของมวลสารที่ถูกควบคุมโดยองค์ประกอบเชิงธรณีวิทยาที่หน้างานการขุดเจาะ บทความนี้นำเสนอแนวคิดในการหาเสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น ที่ให้ค่าเฉลี่ยของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยในระบบ นอกจากนี้การใช้ความน่าจะเป็นยังสามารถระบุค่าโอกาสการพังทลายแนวระนาบที่เป็นผลจากการแปรเปลี่ยนความดันน้ำที่ขังในรอยแตกแยกของมวลสาร วิธีการที่เสนอแนะนี้สามารถประยุกต์ใช้กับงานเชิงวิศวกรรมเหมืองแร่หรือวิศวกรรมโยธา

ABSTRACT

Concept on the deterministic method of stability analysis in which it is widely applied has some application limits for the reliability of system. Reasons are based on variations in mechanical properties of material, or in some cases this method of analysis does not reflect the behavior of material according to their geological control factors at the excavation face. This paper presents the concept on probabilistic method of stability analysis in which it determines the mean value of safety factor in the system. Also the probabilistic method can determine the chance of failure due to variations of water pressures in cracks of material. This suggested method can be applied for both mining engineering and civil engineering works.

1. หลักการและวิธีการเข้าสู่การวิเคราะห์

มวลสารที่เป็นหินหรือดินที่มีค่าแรงยึดเกาะติดกันระหว่างอนุภาค อาจเรียกว่าเป็นมวลสารที่มีค่าโคฮีชัน ปกติการพังทลายมีผลมาจาก ระบายรอยแตกแยกที่ตัดผ่าน ถ้าหากผลรวมของแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลตามแนวระนาบมีค่าสูงกว่าผลรวมหรือโมเมนต์ของความต้านทาน อัตราส่วนของผลรวมดังกล่าวนิยมเรียกว่า ปัจจัยของความปลอดภัย (factor of safety) เป็นตัวเลขที่กำหนดว่า มวลสารที่อยู่บนระนาบของรอยแตกแยก มีเสถียรภาพเพียงพอหรือไม่

2. การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดสำหรับการขุดเจาะเพื่อตัดความลาด

ในการตัดหินให้ลาดเอียง เพื่อทำเหมืองหินแบบขุดชันบันไดหรือการตัดไหล่ทางหลวงเป็นตะพักเชิงเขา โอกาสที่จะเกิดการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น มักกำหนดให้มีรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) เป็นแนวยาวในมวลสาร ลักษณะเชิงธรณีวิทยาที่เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติของรอยแตกมีได้ 2 รูปแบบ คือ เกิดในส่วนบนของพื้นผิวความลาดเอียง (upper slope surface) กับเกิดในส่วนผิวหน้าความลาดเอียง (slope face) เช่น ภายหลังการระเบิดหินที่มีการใช้วัตถุระเบิดบรรจุอัดเกินขนาดมวลสารส่วนหลังแนวระเบิดอาจเกิดการแตกร้าวเป็นร่องลึกเข้าไปในมวลสาร

2.1 เสถียรภาพเชิงกำหนดมวลความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง

รูปแบบเชิงเรขาคณิต กับวิธีการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่นำเสนอในที่นี้เนื่องจากข้อเสนอแนะในหนังสือ Rock Slope Engineering (Hoek and Bray, 1981) โดยผู้เขียนได้ดัดแปลงให้มีเงื่อนไขเพิ่มเติม ดังได้แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตไว้

ในรูปที่ 1 และ 2 เป็นภาพสเก็ชดังกล่าว มีการกำหนดให้พื้นที่ผิวส่วนบนของความลาดเอียงมีความชัน

ถ้าให้ ψ_f เป็นค่ามุมของระนาบรอยแตกแยกที่วัดเทียบกับแนวราบ และกำหนดให้ค่า ψ_f เริ่มต้นที่ค่าใดค่าหนึ่ง ตั้งแต่ 0 ถึงน้อยกว่า 90 องศา ในการปฏิบัติงานภาคสนาม การตัดพื้นที่ผิวส่วนบนของความลาดเอียง ให้อยู่ในแนวระดับราบพอดีเป็นเรื่องที่ปฏิบัติได้ยากและไม่นิยม ทั้งนี้ควรให้ความชันของพื้นที่ผิวตะพักด้านบนอยู่ระหว่าง 2-5 องศาจะทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนที่หรือปรับระดับพื้นที่ผิวส่วนบนของความลาดเอียงด้วยเครื่องจักรกล

2.1.1 เสถียรภาพลาดหินที่มีรอยแตกอยู่ในพื้นที่ผิวส่วนบน

ถ้าใช้วิธีการหาค่าความสมดุลของแรงที่กระทำบนลาดหิน (รูปที่ 1) ความสัมพันธ์ของสมการตัวแปรขนาดมิติเชิงเรขาคณิต สำหรับความยาว

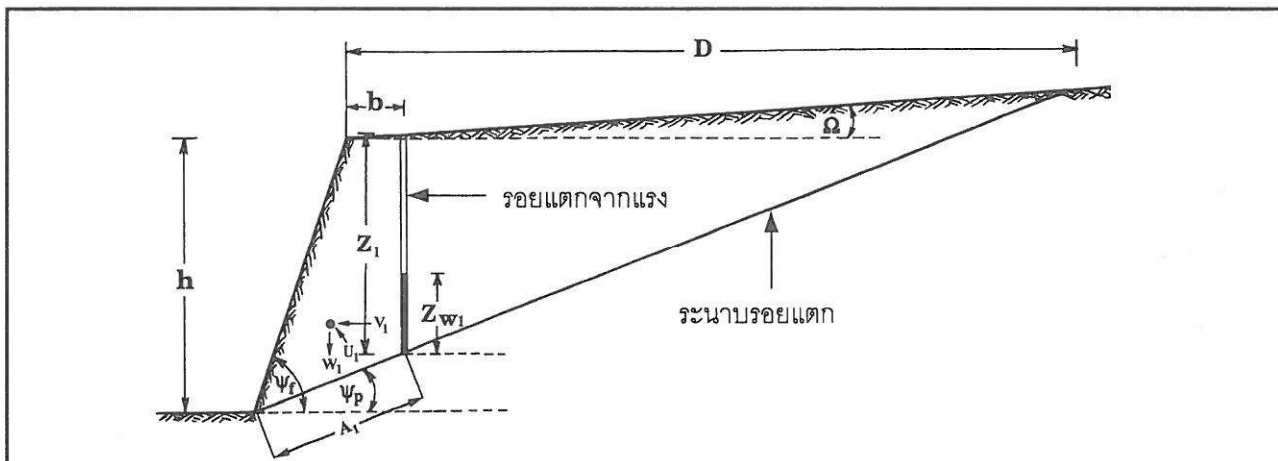
ของรอยแตกจากแรงดึง (Z) กับ ระยะความยาวของพื้นที่ระนาบการพังทลาย (A) เป็น

$$Z_1 = h + b \tan \Omega - (b + h \cot \psi_f) \tan \psi_p \quad (1)$$

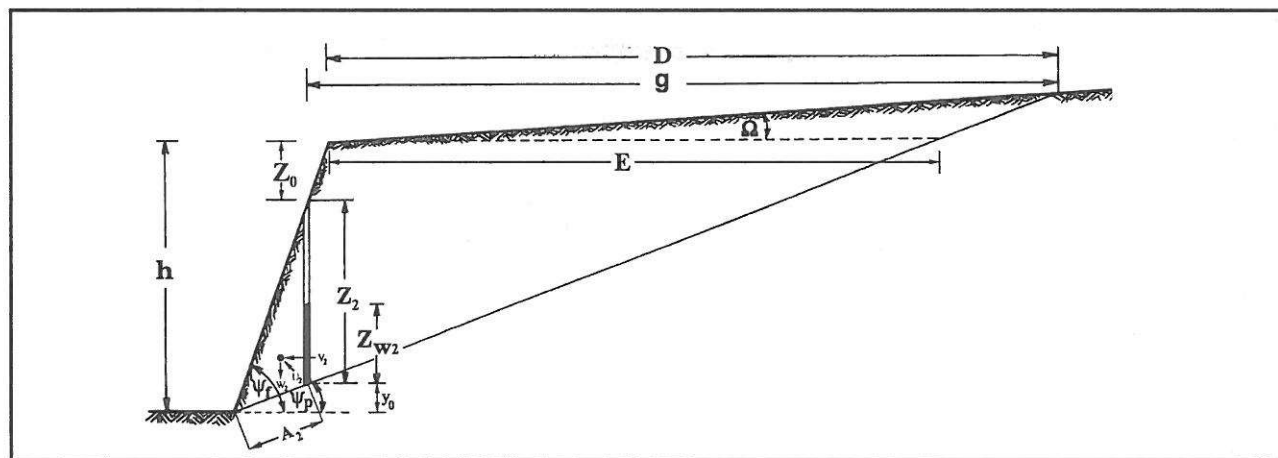
$$A_1 = (h \cot \psi_f + b) \sec \psi_p \quad (2)$$

จากนั้นหาค่าน้ำหนักมวลสารที่เกิดการพังทลายบนระนาบเชิงเส้น (W_1) ที่เป็นค่าน้ำหนักมวลที่อยู่ระหว่างระนาบแปรบางตัดกับรอยแตกจากแรงดึง

$$W_1 = 0.5 \gamma_R [h^2 \cot \psi_f + 2bh + b^2 \tan \Omega - (h \cot \psi_f + b)^2 \tan \psi_p] \quad (3)$$



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางรูปแบบเชิงเรขาคณิตของลาดหินที่มีค่าความชันของตะพักส่วนบนและพบรอยแตกจากแรงดึง ในส่วนของผิวลาดด้านบนด้วย เงื่อนไขเบื้องต้นที่กำหนดไว้สำหรับรูปนี้คือ ค่าระยะ b ต้องน้อยกว่า D



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางรูปแบบเชิงเรขาคณิตของลาดหินที่มีค่าความชันของผิวลาดด้านบน แต่พบรอยแตกจากแรงดึง ในส่วนของผิวน้ำความลาด เงื่อนไขเบื้องต้นคือ ค่าของระยะ $(g - D)$ ต้องอยู่ระหว่าง 0 ถึง $h \cot \psi_f$

ถ้าหากมีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับคำนวณค่าแรงดันยกตัวของน้ำ (U_1) กับค่าแรงดันน้ำที่อยู่ในรอยแตก (V_1) ตามสมมุติฐานที่ให้การกระจายความดันน้ำเป็นรูปสามเหลี่ยม สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำทั้งสองแบบ คือ

$$U_1 = 0.5 \gamma_w Z_{w1} A \quad (4)$$

$$V_1 = 0.5 \gamma_w Z_{w1}^2 \quad (5)$$

ในส่วนของแรงอัดตั้งฉากประสิทธิผล (effective normal force: N'_1) ที่กระทำบนระนาบการพังทลายเชิงเส้น มีค่าเป็น

$$N'_1 = W \cos \psi_p - U_1 - V_1 \sin \psi_p \quad (6)$$

เมื่อใช้สมการสมดุลของแรงบนระนาบ จะหาค่าแรงที่ต้านการไถลเลื่อนที่เป็นผลมาจากกำลังวัสดุในมวลสาร (resistance force: R) กับแรงกระทำจากน้ำหนักมวลความลาดเอียงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล (loading force: Q) ตามสมการข้างล่าง

$$R = cA_1 + N'_1 \tan \phi \quad (7)$$

$$Q = W_1 \sin \psi_p + V_1 \cos \psi_p \quad (8)$$

ดังนั้นค่าปัจจัยความปลอดภัยด้วยวิธีเชิงกำหนด (FS) คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนระหว่าง R/Q เป็นตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลสาร

2.1.2 เสถียรภาพลาดหินที่มีรอยแตกอยู่ในผิวหน้าความลาด

จากรูปที่ 2 กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงตรงผิวหน้าของมวลความลาดเอียงทำให้หาค่าตัวแปรต่าง ๆ คล้ายคลึงกับหัวข้อ 2.1.1 โดยมีสมการวิเคราะห์ค่าเชิงเสถียรภาพเหมือนกันแต่มีความแตกต่างในเรื่องตัวแปรค่าขนาดมิติของมวลความลาดเอียงกับขนาดมิติของความยาวรอยแตกจากแรงดึง กับค่าน้ำหนักมวลสาร ดังนี้

$$Z_2 = h - Z_0 - y_0 \quad (9)$$

$$Z_0 = (g - D) \tan \psi_f \quad (10)$$

$$y_0 = [(h \cot \psi_f) - (g - D)] \tan \psi_p \quad (11)$$

$$A_2 = [(h \cot \psi_f) - (g - D)] \sec \psi_p \quad (12)$$

$$E = h (\cot \psi_p - \cot \psi_f) \quad (13)$$

$$W_2 = (0.5) \gamma_R [(h)(E) - (Z + Z_0) \cdot \{(g - D) + E\} + Z_0 (g - D)] \quad (14)$$

สมการอื่น ๆ การหาค่าตัวแปร กับหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยจะใช้สมการเดิมในเรื่องรอยแตกจากแรงดึงที่อยู่บนตะพักความลาดเอียงแทนค่าตัวแปรที่ต้องการหา

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นสำหรับการขุดเจาะเพื่อตัดลาดหิน

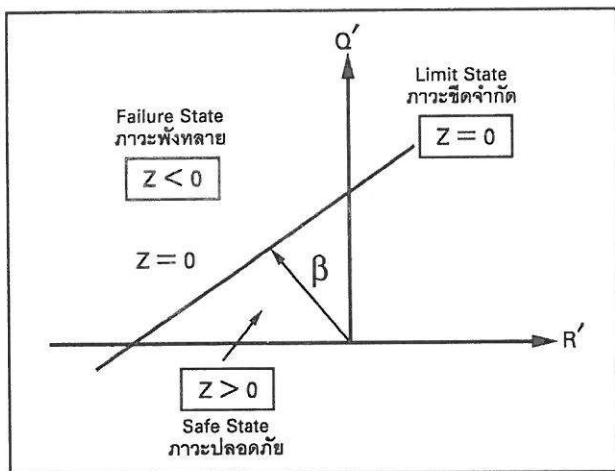
สภาพการไหลของน้ำในธรรมชาติอาจแทรกซึมผ่านมวลได้หลายวิธีการ เช่นฝนตกทำให้มวลเปียกหรือการที่น้ำแทรกซึมอยู่ในรอยแตกแยกของมวลหินก่อให้เกิดแรงดันน้ำที่มีผลต่อเสถียรภาพ ดังนั้นการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเพียงค่าเดียวอาจไม่ครอบคลุมถึงปัญหาที่แท้จริงในภาคสนาม

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นในที่นี้ ถ้าหากประยุกต์ใช้กับมวลความลาดเอียงในรูปแบบเดิม (รูปที่ 1 - 2) กำหนดให้ มีสมมุติฐานตัวแปรสุ่มความดันน้ำที่อยู่ในรอยแตกจากแรงดึง มีการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) เพื่อนำมาหาค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย (central factor of safety: CFS) กับประเมินค่าความเชื่อถือได้รวมทั้งค่าของโอกาสการพังทลายเชิงความน่าจะเป็นดังสมการที่ผู้เขียน บทความได้ดัดแปลงมา ซึ่งหาค่ากลางของปัจจัยความปลอดภัย (CFS) กับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) ของระบบ กับค่าโอกาสของการพังทลาย [$p(f)$] ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น ดังนี้

$$CFS = \frac{R_{ave}}{Q_{ave}} \quad (15)$$

สำหรับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (β) นั้นเป็นค่าตัวเลขเชิงความ
ความปลอดภัยที่อิงตามวิธี Second Moment Reliability
หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Hasofer-Lind Method (เอกสารอ้างอิง 2)
ที่เป็นการหาระยะที่สั้นที่สุด (ดูรูปที่ 3) ใช้ในการกำหนดพื้นที่
การพังทลาย สำหรับตัวแปรสุ่มจำนวนสองตัวแปร (R' , Q') ที่ถูก
แปลงหรือถูก ลดทอน (reduced variables)

$$\beta = \frac{R_{ave} - Q_{ave}}{\sqrt{\sigma^2(R) + \sigma^2(Q)}} \quad (16)$$



รูปที่ 3 ดัชนีความเชื่อถือได้ที่หาจากวิธี Hasofer-Lind นั้น
กำหนดให้มีการลดทอนตัวแปรสองค่า และฟังก์ชันมีความสัมพันธ์เชิง
เส้น

พจน์ R_{ave} กับ Q_{ave} เป็นค่าเฉลี่ยของการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่ม
แรงต้านทานกับแรงที่ก่อให้เกิดการพังทลาย ส่วน $\sigma(R)$ กับ $\sigma(Q)$ เป็น
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงต้านทานกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำตาม
ลำดับ ทั้งนี้คำนวณมาจากค่าความแปรเปลี่ยนของระดับอัตราส่วนแรง
ดันน้ำ น้ำที่มีขังในรอยแตกจากแรงดึงหรือเป็นค่าอัตราส่วน Z_w / Z
(พจน์ Z_w เป็นระดับความสูงของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง ถ้า
เป็นกรณีแรก $Z_w = Z_{w1}$ กรณีสอง $Z_w = Z_{w2}$) ที่ค่าต่าง ๆ เช่น
0 (แสดงว่ามวลแห้ง), 1 (แสดงว่ามวลเปียก มีน้ำขังเต็มในรอยแตก)
เป็นต้นและในกรณีที่มวลมีน้ำซึมผ่านบางส่วน (partial seepage)
แต่ยังไม่เต็มในรอยแตกจะได้ค่าอัตราส่วน Z_w / Z จะมากกว่าศูนย์
แต่น้อยกว่าหนึ่ง

ในการหาค่าโอกาสการพังทลาย มีการใช้สมการประมาณ
(approximate equation) กำหนดให้ค่าโอกาสความปลอดภัย
[$p(f)$] มีค่าประมาณ เมื่อเทียบกับค่าดัชนีความปลอดภัย (β) เป็น

$$p(f) \approx 1 \times 10^{-\beta} \quad (17)$$

4. ตัวอย่างการหาค่าโอกาสการพังทลายของมวลที่มีรอยแตก จากแรงดึง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ในหัวข้อข้อย่อยนี้ ประยุกต์กับการหาเสถียรภาพ
มวลความลาดเอียง ที่มีทั้งระนาบประาบางตัดผ่าน และมีรอยแตกจาก
แรงดึง ปกติในการปฏิบัติงานขุดเจาะจริง การคั่นหน้าความลาดด้วยวิธี
เจาะระเบิดหิน หรือใช้เครื่องจักรกล ความสูงของหน้างาน (หน้าเหมือง
หรือไหล่เขาที่จะตัดตะพัก) มักเป็นค่าคงที่เนื่องจากสมรรถภาพของ
เครื่องจักรกลในแต่ละหน้างานมีจำกัด ขนาดมิติเชิงเรขาคณิตของมวล
ความลาดที่มีความเป็นไปได้จะแปรเปลี่ยนขนาดมิติ ได้แก่ค่ามุมความชัน
ของการตัดความลาด ดังนั้นการหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมที่สุดในการตัด
ความลาด จึงเป็นเป้าหมายหลักในการทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการ
ปฏิบัติงานภาคสนามได้มาก ทั้งนี้ในเชิงการวิเคราะห์ผลยังสามารถหาค่า
ดัชนีความเชื่อถือได้ และค่าโอกาสการพังทลายของมุมความชันหน้า
งานขุดเจาะตามเงื่อนไขที่แตกต่างกันไป

ตัวอย่างวิธีการคำนวณได้ระบุไว้ในหัวข้อข้อย่อย 1 และ 2 ที่แยกเป็น
2 กรณี โดยที่ กรณีแรกรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักส่วนบน กรณีที่
สองมีรอยแตกแยกในผิวหน้าความลาด

4.1 ตัวอย่างการหาโอกาสความน่าจะเป็นสำหรับการพังทลาย ในกรณีแรก

กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักส่วนบน ค่าพจน์ที่ทราบ
จากการตรวจวัด กับค่าที่ได้จากการทดสอบมวลสารในภาคสนาม มีดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมือง (h) เท่ากับ 15 เมตร
- มุมชันระนาบความลาดเอียง (ψ_f) เท่ากับ 20 องศา
- มุมชันของตะพักส่วนบน (Ω) เท่ากับ 2 องศา
- มุมเสียดทานของระนาบประาบางที่เป็นมวลหินปูนเท่ากับ
30 องศา
- ระยะห่างในแนวราบ (b) วัดจากยอดความลาดเอียงถึง
รอยแตกที่อยู่บนตะพักเท่ากับ 3 เมตร
- หน่วงน้ำหนักมวลความลาดเอียงที่เป็นมวลหินปูน (γ_R)
เท่ากับ 25.14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (160 ปอนด์
ต่อลูกบาศก์ฟุต)

— หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) กำหนดให้เท่ากับ 9.81 กิโลนิวตันต่อ ลูกบาศก์เมตร (62.4 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

— โคอีชัน (c) ของหิน เท่ากับ 107.3 กิโลพาสคัล (2,000 ปอนด์ต่อ ตารางฟุต)

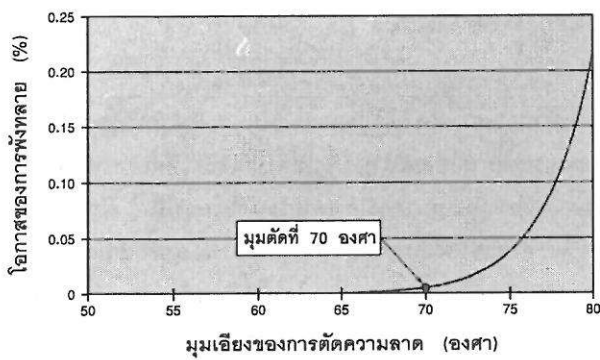
— อัตราส่วนของระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง มีค่าอัตรา ส่วนของ Z_{w1} / Z เท่ากับ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์กรณีแรก

การคำนวณค่า ควรใช้โปรแกรมแผ่นตารางทำการ (spread sheet) เพราะมีการใช้สมการหลายสมการและมีค่าที่ต้องหาหลายค่า และได้ค่าละเอียดถูกต้องมากกว่าการคำนวณด้วยมือ รูปที่ 4 เป็นผังการ คำนวณที่แสดงผลสำหรับการตัดความลาดที่มุม 70 องศา ส่วนรูปที่ 5 เป็นการพล็อตกราฟจากค่าที่คำนวณ โดยให้มีการตัดความลาดตั้งแต่ 55-80 องศา พล็อตเทียบกับค่าโอกาสการพังทลาย

Case 1 Crack in upper surface								
Known variables								Initial cut angle
h	b	ψ_p	Ω	γ_R	ϕ	γ_w	c	ψ_f
15	3	20	2	25.14	30	9.81	107.3	70
Calculated output values								
Z_1	W_1	R_{ave}	Q_{ave}	CFS	$\sigma(R)$	$\sigma(Q)$	β	p (f)
12.026	1,837.236	1,760.406	861.673	2.043	148.707	229.538	3.286	0.00052
Z_{w1}/Z	Z_{w1}	U_1	V_1	R	Q			
0.000	0.000	0.000	0.000	1,962.724	628.372			
0.10	1.203	53.102	7.094	1,930.665	635.038			
0.20	2.405	106.204	28.374	1,895.804	655.035			
0.30	3.608	159.307	63.842	1,858.142	688.364			
0.40	4.810	212.409	113.497	1,817.678	735.024			
0.50	6.013	265.510	177.338	1,774.413	795.015			
0.60	7.215	318.613	255.367	1,728.347	868.338			
0.70	8.418	371.715	347.583	1,679.479	954.993			
0.80	9.621	424.817	453.986	1,627.809	1,054.979			
0.90	10.823	477.920	574.576	1,573.338	1,168.297			
1.00	12.026	531.022	709.353	1,516.066	1,294.946			

รูปที่ 4 ผังการคำนวณของกรณีแรกที่ใช้ค่าการตัดมุมลาดที่ 70 องศา



รูปที่ 5 โอกาสการพังทลาย ที่มีค่ามุมการตัดมุมความลาดชันหลายค่า
กำหนดให้มวลความลาดเอียงมีรอยแตกจากแรงดึงในส่วนผิวลาดด้านบน

4.2 ตัวอย่างการหาโอกาสความน่าจะเป็นสำหรับการพังทลายในกรณีที่สอง

กำหนดให้รอยแตกจากแรงดึงอยู่ผิวหน้าความลาด ค่าพจน์ที่ทราบจากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการทดสอบมวลสารในภาคสนาม มีดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมือง (h) เท่ากับ 15 เมตร
- มุมชันระนาบความลาดเอียง (ψ_f) เท่ากับ 20 องศา
- มุมชันของตะพักส่วนบน (Ω) เท่ากับ 2 องศา
- มุมเสียดทานระนาบแประบางที่เป็นมวลหินปูนเป็น 30 องศา

Case 2 Crack in slope face

Input variables

h	$g-D$	ψ_p	Ω	γ_R	ϕ	γ_w	c
15	1	20	2	25.14	30	9.81	107.3

Initial cut angle

ψ_f
70

Calculated output values

Z_2	W_2	R_{ave}	Q_{ave}	CFS	$\sigma(R)$	$\sigma(Q)$	β	$p(f)$
10.629	595.847	722.757	386.059	1.872	84.286	179.327	1.549	0.02828

Z_{w2}/Z	Z_{w2}	U_2	V_2	R	Q
0.00	0.000	0.000	0.000	832.486	203.792
0.10	1.063	24.743	5.542	817.106	208.999
0.20	2.126	49.486	22.167	799.537	224.622
0.30	3.189	74.229	49.877	779.781	250.660
0.40	4.252	98.972	88.670	757.835	287.114
0.50	5.315	123.715	138.546	733.701	333.982
0.60	6.378	148.458	199.507	707.378	391.266
0.70	7.441	173.201	271.551	678.866	458.966
0.80	8.504	197.944	354.678	648.166	537.080
0.90	9.566	222.687	448.890	615.277	625.610
1.00	10.629	247.430	554.185	580.199	724.555

รูปที่ 6 ผังการคำนวณของกรณีที่สองให้ค่าการตัดมุมลาดที่ 70 องศา

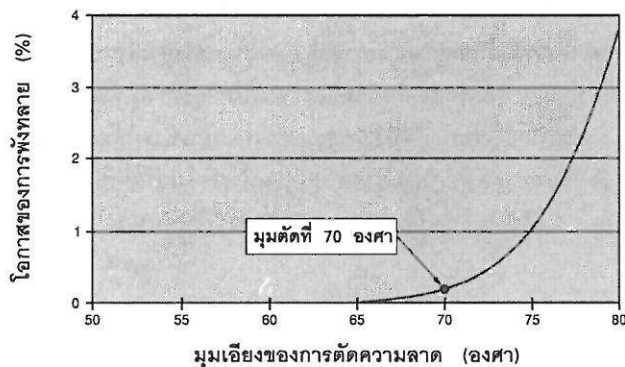
— ระยะแนวราบที่เป็นผลต่างของค่า g กับค่า D หรือเขียนเป็น $[g - D]$ เท่ากับ 1 เมตร [ค่า g วัดในแนวราบจากตำแหน่งของรอยแตกจากแรงดึงไปยังจุดตัดของระนาบการพังทลายกับตะพักด้านบน ส่วนค่า D วัดในแนวราบจากยอดความลาดเอียงถึงจุดตัดของระนาบการพังทลายกับตะพักด้านบน]

— หน่วยน้ำหนักมวลความลาดเอียงที่เป็นหินปูน (γ_R) เท่ากับ 25.14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (160 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

— หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) กำหนดให้เท่ากับ 9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (62.4 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

— โคฮีชัน (C) ของหิน เท่ากับ 107.3 กิโลพาสคัล (2,000 ปอนด์ต่อตารางฟุต)

— อัตราส่วนของระดับน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง มีค่าอัตราส่วนของ Z_{w2} / Z เท่ากับ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 ตามลำดับ



รูปที่ 7 โอกาสการพังทลาย ที่มีค่ามุมการตัดมุมความลาดชันหลายค่า กำหนดให้มวลความลาดเอียง มีรอยแตกจากแรงดึงในผิวหน้าความลาด

การผลวิเคราะห์กรณีที่สอง

วิธีการคำนวณคล้ายคลึงกับกรณีแรก รูปที่ 6 เป็นผังการคำนวณที่แสดงผลสำหรับการตัดความลาดที่มุม 70 องศา ส่วนรูปที่ 7 เป็นการพล็อตกราฟจากค่าที่คำนวณ โดยให้มีการตัดความลาดตั้งแต่ 55-80 องศา และพล็อตเทียบกับค่าโอกาสการพังทลาย

5. การประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น

การประเมินในลักษณะนี้ใช้ความรู้เชิงสถิติ เพื่อหาค่าตัวแปรสุ่มต่าง ๆ แล้ว ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาหาค่าโอกาสความเสี่ยงและ

เหตุอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพการขุดเจาะทั่วไป

กลยุทธ์ที่สำคัญในการจัดการด้านความเสี่ยงอย่างมีระบบสิ่งแรกคือการสำรวจภาคสนามของตัวแปรสุ่มหลัก ที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพโครงสร้างมวลสาร จากนั้นใช้การประเมินผลเชิงสถิติในการจัดรูปแบบ เพื่อช่วยในการจัดการการออกแบบหน้างานขุดเจาะให้เหมาะสมกับค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้และมีความเสี่ยงในระดับต่ำ

5.1 การสำรวจปัจจัยหลักที่มีผลต่อเสถียรภาพโครงสร้าง

หลังจากการศึกษาดูตรวจสอบภูมิประเทศของแหล่งที่มีโครงการขุดเจาะในบริเวณแล้วยังต้องมีการศึกษาด้านเสถียรภาพมวลสารของหน้างานขุดเจาะด้วยโดยอาศัยข้อมูลทางธรณีวิทยาทั่วไปกับการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผลจากตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักที่มีโอกาสก่อให้เกิดการพังทลายในแนวระนาบ เช่น รอยเลื่อน รอยแตกแยกในมวลหิน เป็นต้น เป็นการช่วยในการวางแผนหาแนวทางที่เหมาะสมในการเปิดหน้างานขุดเจาะ กับช่วยวางแผนหาแนวทางในการขนส่งลำเลียงวัสดุภายหลังการระเบิด หรือการใช้เครื่องจักรกลตักขุดหิน

5.2 แนวทางการบันทึกผลกับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงธรณีวิทยาในพื้นที่

นอกจากการศึกษาสภาพภูมิประเทศและสภาพธรณีวิทยาน้ำงานทั่วไปแล้ว การที่จะสามารถกำหนดแนวทางการวางแผนเปิดหน้างานขุดเจาะในพื้นที่เชิงรูปแบบ pit layout ได้จำเป็นต้องมีการบันทึกผลข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงธรณีวิทยาได้อย่างมีระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลลัพท์เชิง 3 มิติ จนสามารถระบุหรือแยกบริเวณหน้างานขุดเจาะที่ต้องให้ความระมัดระวังหรือแก้ไข เช่น บริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่ควรตัดมุมความลาดเอียงหน้างานให้มีความชันต่ำ หรือหลีกเลี่ยงบริเวณหน้างานขุดเจาะที่อาจเกิดอันตราย เมื่อมีการขนย้ายวัสดุก่อสร้าง มวลหิน (แร่) ผ่านบริเวณนั้น เป็นต้น

6. บทสรุปการประเมินผลความไม่แน่นอนของระบบ

จากข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีการปรับค่าเชิงสถิติส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขนาดมิติ หรือคุณสมบัติของมวลสาร เมื่อวิศวกรออกแบบผังการขุดเจาะหน้างานก่อสร้าง สิ่งที่ต้องออกแบบต้องประสบเป็นอันดับแรก ได้แก่ ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของระบบข้อเสนอแนะในที่นี้คือให้ใช้หลักการทฤษฎีของเบย์ (Bayes theorem) ที่ มีการแยกขั้นตอนของการตัดสินใจแบบรูปต้นไม้ (decision tree)

6.1 การประเมินผลจากข้อมูลสารสนเทศ

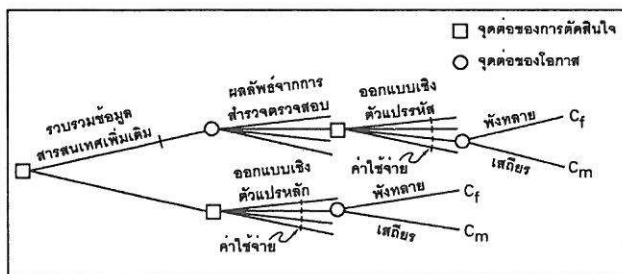
จากข้อมูลสารสนเทศ (information data) ที่ตรวจวัด ได้ในภาคสนาม ทั้งที่เป็นค่าคุณสมบัติมวลสาร หรือค่าขนาดระยะมิติเชิง

เราคาดคิดว่า จะช่วยให้การตัดสินใจออกแบบเพื่อทำการแก้ไขมีเสถียรภาพดีขึ้น

เมื่อมีการขุดเจาะ เช่นตัดความลาดชันบนดิน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างคือ ค่าระยะความสูงของหน้าความลาดชันมุมเอียงเทของความลาดเอียงดังนั้นก่อนที่แผนงานขุดเจาะจะถูกนำมาใช้งาน ถ้าหากมีข้อมูลสารสนเทศที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ย่อมมีผลต่อการออกแบบซ้ำใหม่ (redesign) หรืออาจจำเป็นต้องหาข้อมูลสารสนเทศเพิ่มเติม (gather more information)

วิธีการง่าย ๆ คือ ใช้แนวทางการตัดสินใจที่แตกแขนงคล้ายรูปกิ่งต้นไม้ รูปที่ 8 เป็นการกำหนดทางเลือกเพื่อใช้ในการตัดสินใจ 4 ทางเลือกสำหรับค่าระดับความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียงที่ระบุไว้หลายจำนวน

จุดต่อแต่ละจุด (node) มีสัญลักษณ์เป็นสี่เหลี่ยม หมายถึง จุดต่อการตัดสินใจ (decision node) หรือมีสัญลักษณ์เป็นวงกลม หมายถึง จุดต่อของโอกาสความน่าจะเป็น (chance node) ในการตัดสินใจขั้นตอนสุดท้ายนั้น ค่าระยะความสูงควรอยู่ระหว่างค่าพิสัยที่กำหนด การออกแบบแต่ละระดับความสูง ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ (excavation cost) และ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (maintenance cost) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง และยังมีผลต่อโอกาสการพังทลายของโครงสร้างความลาดเอียง ดังนั้นการออกแบบที่ดีที่สุดจึงเป็นการหาความสมดุลของตัวแปร 3 ค่า ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา กับความเสี่ยงต่อการพังทลายของโครงสร้างสิ่งก่อสร้าง

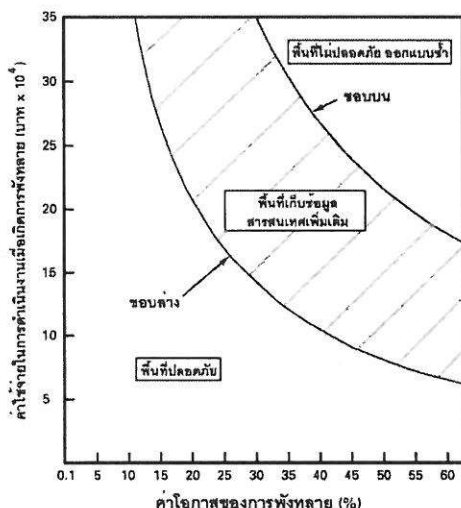


รูปที่ 8 ผังการตัดสินใจอย่างง่ายคล้ายกิ่งต้นไม้ สำหรับความสูงของความลาดเอียง

6.2 การประเมินความเสี่ยงแบบเหตุการณ์เชิงความน่าจะเป็น

วิธีการที่ดีเพื่อกำหนดค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการสำรวจกับการออกแบบ ควรแสดงเป็นแผนภูมิ (chart) ของการพล็อตค่าผลลัพธ์เป็นกราฟสำเร็จรูป ผลลัพธ์แต่ละค่าที่ได้จากการตรวจสอบในภาคสนาม และที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสูตรเชิงประสบการณ์ จนสามารถกำหนดขอบเขตของพื้นที่บนกราฟ ที่เป็นพื้นที่ปลอดภัย (safe) พื้นที่ไม่ปลอดภัย (unsafe) และพื้นที่ที่อยู่กึ่งกลางระบุไม่ได้ชัดเจน จำเป็นต้องมีข้อมูลสารสนเทศเพิ่มมากขึ้น

ตัวอย่างของการประเมินความเสี่ยง ในรูปแบบความน่าจะเป็น ได้แสดงเป็นกราฟแผนภูมิไว้ในรูปที่ 9 โดยให้แกนพิกัดแนวนอนเป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพังทลายของมวลหินที่มีการขุดเจาะกับให้แกนพิกัดแนวตั้งเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต้องใช้ ถ้ามีเหตุการณ์การพังทลายมวลสารเกิดขึ้น โดยมีการพล็อตค่าไว้ 2 ขอบ (boundary) จำนวนตัวเลขค่าใช้จ่ายที่เป็นขอบบนเป็นค่าใช้จ่ายในระดับสูงสุดถ้ามีการพังทลายเกิดขึ้น ส่วนจำนวนตัวเลขค่าใช้จ่ายที่เป็นขอบล่างเป็นค่าใช้จ่ายในระดับต่ำสุดถ้ามีการพังทลายเกิดขึ้น ดังนั้น พื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นโค้งบนจึงจัดเป็นบริเวณอันตรายที่มีโอกาสของการพังทลายจะเกิดขึ้นในระดับสูงมีชื่อเรียกว่าพื้นที่ไม่ปลอดภัย (unsafe) พื้นที่ที่อยู่ใต้เส้นโค้งล่างจัดเป็นบริเวณปกติที่มีโอกาสของการพังทลายจะเกิดขึ้นในระดับต่ำ เรียกว่า พื้นที่ปลอดภัย (safe) ส่วนพื้นที่ระหว่างขอบเส้นโค้งทั้งสอง จำเป็นต้องมีข้อมูลสารสนเทศเพิ่มขึ้นจึงจะตัดสินใจได้



รูปที่ 9 กราฟแผนภูมิแสดงความเสี่ยง ในการออกแบบงานขุดเจาะเฉพาะอย่าง

วิศวกรและผู้ปฏิบัติงานภาคสนามควรคำนึงอยู่ตลอดเวลาว่า ความปลอดภัยต้องเป็นเกณฑ์อันดับแรกที่ใช้ในการออกแบบ ต้องพยายามไม่ให้มีเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดความสูญเสีย บุคลากรกับเครื่องจักรกล ดังนั้นการตัดสินใจดำเนินการหน้างานชุดเจาะจึงเป็นการหาความเหมาะสมของการออกแบบในระบบ ควบคู่กับค่าใช้จ่ายและเวลาในการปฏิบัติงาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะกรรมการวิจัย เงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนการเงินประกอบกับคำแนะนำและข้อคิดในการทำวิจัยโครงการ ผู้เขียนขอขอบคุณต่อผู้ช่วยวิจัย คุณสุรัช ลิขหาเกียรติ วศบ. (โยธา) ที่ช่วยงานโปรแกรมกับงานจัดพิมพ์รายงานวิจัยกับบทความ

เอกสารอ้างอิง

1. สง่า ตั้งขวาล (2544) รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช โครงการ "การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพ ของงานการเจาะบนพื้นผิวดินและใต้พื้นผิวดิน" สำนักบริหารวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 207 หน้า
2. 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. 11-121.
3. Hoek, E. and J.W. Bray (1981) "Rock Slope Engineering: Revised Third Edition" The Institution of Mining and Metallurgy, London.
4. Pine, R.J. (1992) "Risk Analysis Design Applications in Mining Geomechanics," Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry), Vol. 101, pp. A149-A158.
5. Whitman, R.V. (2000) "Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 583-593.

