

บทที่ 5 การประเมินความเสี่ยงของการพังทลาย จากการตัดความลาด และในรูปแบบอื่น

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

มวลที่อึดตัวด้วยน้ำ (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) เป็นค่าดัชนีเสถียรภาพ ที่จุดสมดุล F.S. = 1

β = มุมเอียงของการตัดความลาด วัดเทียบกับแนวราบ = ψ_p (มุมเอียงระนาบ)

H = ความสูงในแนวตั้งของมวลสารที่วางบนระนาบ

c = ค่าการยึดเกาะกันหรือ โคฮีชัน (cohesion) ของมวลสารที่ไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง

c' = ค่าการยึดเกาะกันประสิทธิผลของมวลที่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง

ϕ = มุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) เป็นค่าสมบัติที่พื้นผิวระนาบมวลสารที่เกิดการพังทลาย ค่าความเสียดทานนี้ไม่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง

ϕ' = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของมวลสารที่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง

γ = หน่วยน้ำหนักมวลที่ไม่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง

γ' = หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของมวลที่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง = $\gamma_{sat} - \gamma_w$

γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักมวลอึดตัวด้วยน้ำ

u = ความดันยกตัวของน้ำ = หน่วยน้ำหนักน้ำ (γ_w) x ความสูงของระดับน้ำ (z_w)

ขั้นตอนที่สี่ ปกติข้อมูลชุดแรก หรือข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบนี้จะนำมาคำนวณค่าเชิงสถิติให้เป็นค่าเฉลี่ย (mean, x_{ave}) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยนี้ไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, C.O.V.) ต่อ ถ้าหากข้อมูลที่ทำกรทดสอบหาค่าสมบัติมวลสารแปราะ (ที่เป็นมวลดินหรือมวลหิน) มีจำนวนข้อมูลน้อยค่าเกินไป ไม่เพียงพอในการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาค่าการแปรผันเชิงความน่าจะเป็น จึงจำเป็นต้องกำหนดค่า C.O.V. ขึ้นมา ซึ่งในบทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้ผู้วิจัยได้สรุปจากเอกสารงานวิจัยอื่นหลายโครงการ 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 เมื่อต้องการหาค่าดัชนีที่เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัย ค่าโอกาสการพังทลายให้ใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันกับแบบจำลองที่หนึ่งซึ่งอิงค่าขอบความปลอดภัย ให้ดำเนินการตามขั้นตอนของหัวข้อ 4.2 ในส่วนของแบบจำลองที่สองที่อิงค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด ให้ดำเนินการตามขั้นตอนของหัวข้อ 4.3

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

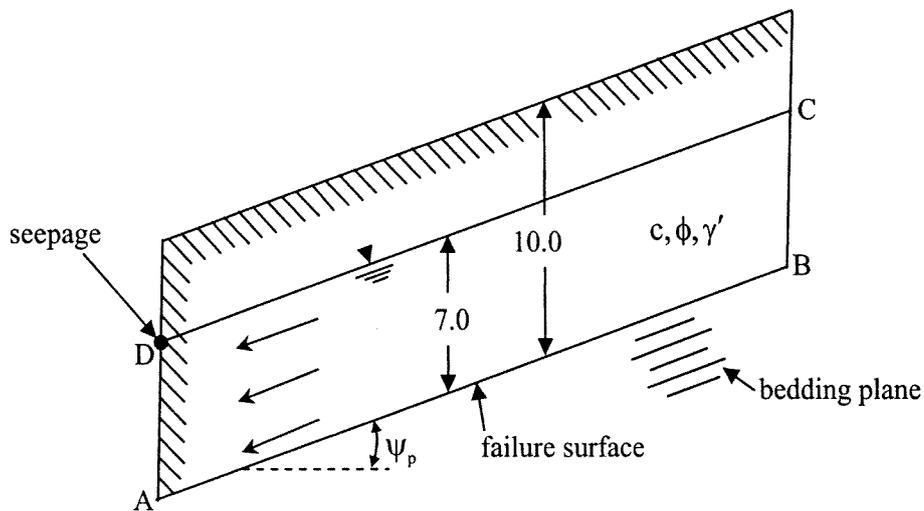
5.1.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพธ์เสถียรภาพความลาดยาวไม่จำกัด

ตัวอย่างในหัวข้อย่อยนี้ เป็นการตัดความลาดที่ยาวไม่จำกัดและยังมีน้ำในดินไหลซึมผ่านแต่ระดับน้ำในดินยังสูงไม่ถึงระดับพื้นผิว ในภาคสนามมีการปฏิบัติในลักษณะนี้บ่อย เช่น การเปิดหน้าดิน (หิน) ในบริเวณเชิงเขา ที่มีความลาดเอียงอยู่แล้ว

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

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

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

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

ตัวอย่างในหัวข้อย่อยนี้ 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 $p(f)$ ที่แตกต่างกัน $[p(f)]_{SIM}$

1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอบความปลอดภัย)

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

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

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 หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.1

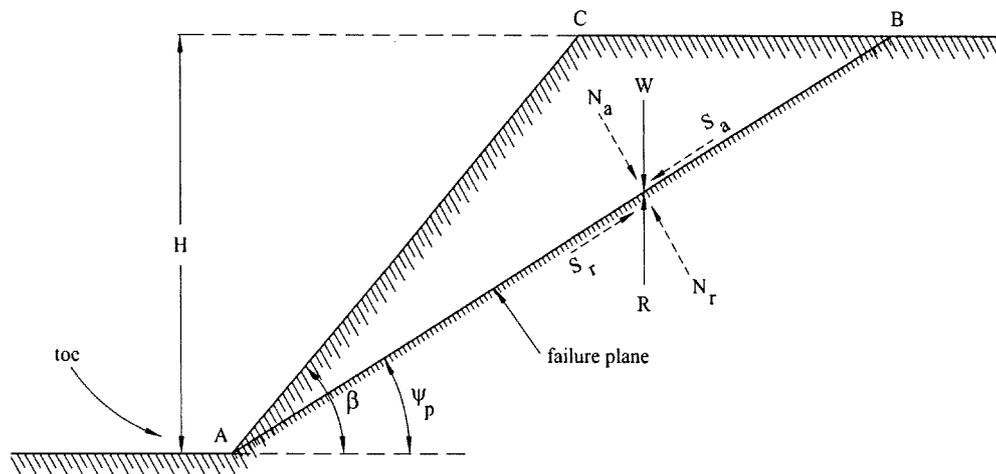
5.2 การพังทลายของความลาดทั่วไปที่เป็นแบบระนาบ

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

5.2.1 รูปแบบการลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ขั้นตอนแรกกับขั้นตอนที่สอง เป็นรูปแบบเดียวกันกับหัวข้อ 5.1.1 ในเรื่องของการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของการพังทลายแบบระนาบยาวไม่จำกัด ที่เป็นการจำแนกชุดข้อมูล กับการระบุสถานภาพของมวลสาร และเงื่อนไขประกอบอื่น เช่น แรงค้ำน้ำ เป็นต้น

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



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

สมการ 5.4 กรณีที่มวลความลาดไม่มีค่าแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง 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)

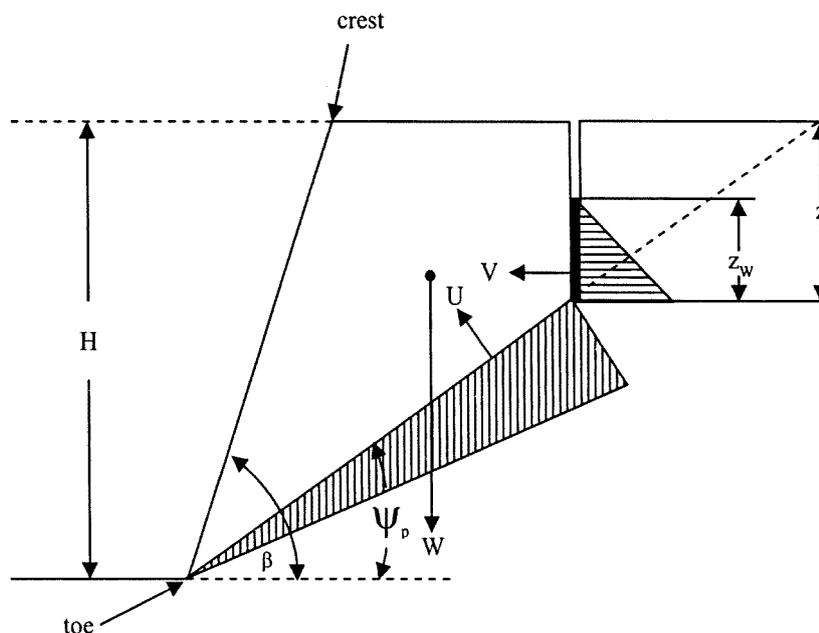
พจน์ ต่าง ๆ ในสมการ 5.4-5.5 (ดูรูปที่ 5.5-5.7 ประกอบ) มีความหมายดังนี้

F.S. = อัตราส่วนปลอดภัย (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 ค่ามุม กับแนวแรงต่าง ๆ

แนวระดับพื้นผิวดิน) เพื่อให้การใช้รถตักดินหรือคันหินไหลลงด้านล่างได้สะดวก ผู้วิจัยได้ปรับแต่งและแก้ไขวิธีการเชิงกำหนด (deterministic method) จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการพังทลายแนวระนาบจำนวนหลายรายการ ได้แก่ Hoek and Bray (1981), Khalokakaie (1999), Wyllie 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

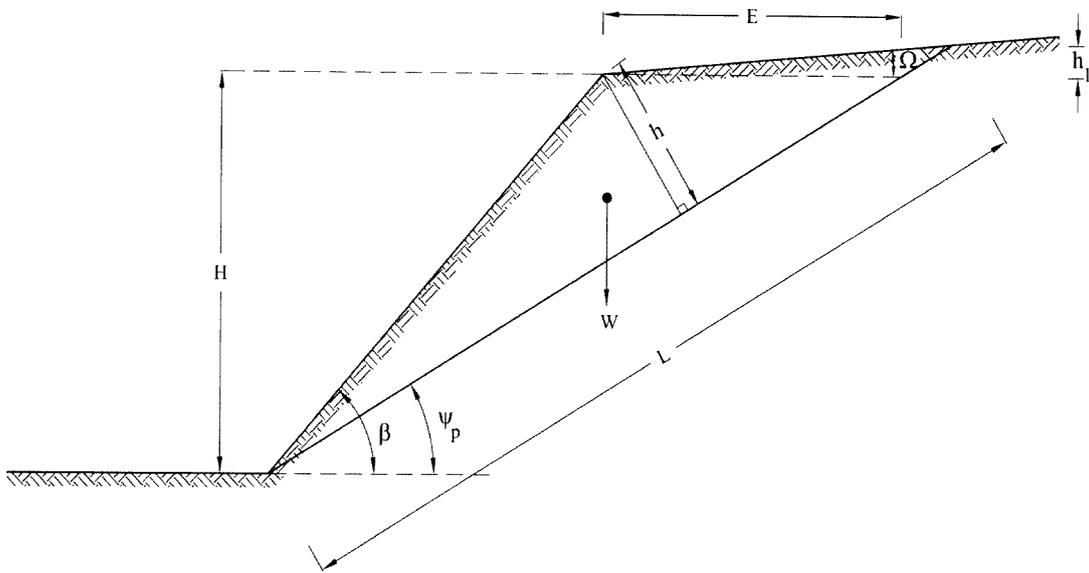
สัญลักษณ์ของตัวแปร กับขนาดมิติของพจน์ตัวแปรในรูปทั้งสี่ เหมือนกันกับตารางที่ 5.1 ถึง 5.2 ที่เป็นสมการต้นแบบ ตารางที่ 5.3 แสดงสัญลักษณ์ (notation) ที่ใช้สำหรับการระบุพจน์ตัวแปร รวมทั้งแสดงค่าหน่วยตัวแปรในระบบ S.I. อนึ่งในการใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็น เพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเสี่ยง สมการเชิงกำหนดที่หาค่า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

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

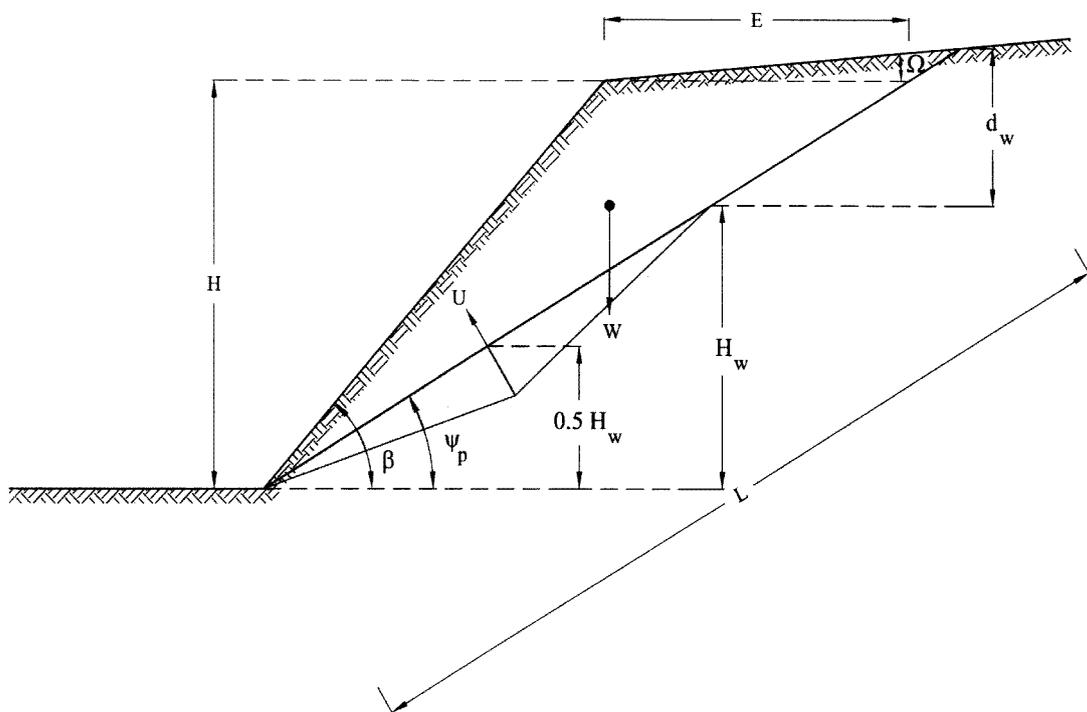
$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left\{ 1 - \frac{z^2}{H^2} \right\} \cdot (\cot \psi_p) - (\cot \beta) \right] + \frac{1}{2} b^2 \tan \Omega \quad (5.11)$$

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 สมการต้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพท์เชิงเสถียรภาพ การตัดความลาดมีค่าความชันของชั้นตะกอนด้านบน แต่ไม่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้น พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.9

Condition I – Dry slope without tension crack.	
$F.S. = \frac{c L + (W \cos \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p}$	(5.13)
$E = H(\cot \psi_p - \cot \beta)$	(5.14)
$h_1 = \frac{\sin \psi_p (\sin \Omega) E}{\sin(\psi_p - \Omega)}$	(5.15)
$L = \frac{H + h_1}{\sin \psi_p}$	(5.16)
$W = 0.5(L) \gamma H \left\{ \frac{\sin(\beta - \psi_p)}{\sin \beta} \right\}$	(5.17)
Condition II – Wet slope without tension crack.	
$F.S. = \frac{c L + (W \cos \psi_p - U) \tan \phi}{W \sin \psi_p}$	(5.18)
$E = H(\cot \psi_p - \cot \beta)$	(5.19)
$h_1 = \frac{\sin \psi_p (\sin \Omega) E}{\sin(\psi_p - \Omega)}$	(5.20)
$L = \frac{H + h_1}{\sin \psi_p}$	(5.21)
$W = 0.5(L) \gamma H \left\{ \frac{\sin(\beta - \psi_p)}{\sin \beta} \right\}$	(5.22)
$U = \frac{1}{4} \gamma_w H_w^2 \frac{1}{\sin \psi_p}$	(5.23)

ตารางที่ 5.2 สมการต้นแบบเชิงกำหนดในการหาผลลัพท์เชิงเสถียรภาพ การตัดความลาด
มีค่าความชันของชั้นตะกอนด้านบน และมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดขึ้นในชั้น
ตะกอนด้านบนกับในหน้าความลาด พจน์ตัวแปรอิงกับรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$= H - z_o - y_o$$

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

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

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

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

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

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

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

ตารางที่ 5.3 การกำหนดสัญกรณ์ (notation) ที่เป็นภาษาอังกฤษกับภาษากรีก หน่วยที่ระบุอยู่ในระบบ S.I. และใช้กับสมการค้นแบบในตาราง 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	=	ระยะเส้นตั้งฉากวัดจาก slope crest ถึง failure plane หน่วย m
h_1	=	ความสูงของชั้นตะกักด้านบน (วัดจาก slope crest ถึง failure plane ตัดกับชั้นตะกักด้านบน) หน่วย m
T_d	=	ความลึก (ระยะในแนวตั้ง) ของรอยร้าวจากแรงดึง หน่วย m
z	=	ระยะในแนวตั้ง จากระดับ crest ถึงจุดต่ำสุดของรอยแตกจากแรงดึง หน่วย m
z_w	=	ความลึก (ระยะในแนวตั้ง) 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	=	แรงค้ำยกตัวของน้ำบนระนาบการพังทลายที่เอียงเท (ความหนา 1 เมตร) หน่วย kN/m
V	=	แรงค้ำยกของน้ำในระนาบรอยร้าว (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

ตัวอย่างในหัวข้อย่อนี้ เป็นประเมินความลาดที่ชั้นตะพักด้านบนมีมุมเอียงกับมีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดในสองรูปแบบ

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.2

ใช้ภาพตัดขวางรูปที่ 5.9 ร่วมกับรูปที่ 5.11 เป็นความลาดที่มีรอยร้าวจากแรงดึงเกิดตรงหน้าความลาดและมีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง กำหนดค่าระยะมิติกับระบาค่าสมบัติ 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, Ω = 5°
- นิพจน์ $(g-D)$ = 4.76 เมตร

ผลเฉลย

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

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

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

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

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

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

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

นำค่าตัวแปรที่คำนวณได้ มาแทนหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย จากสมการที่ 5.28 ในตาราง

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

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.3

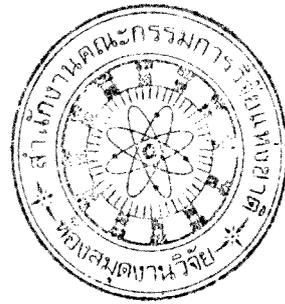
ในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.9 กับรูปที่ 5.10 เป็นการตัดชั้นตะพักโดยการจากการระเบิดหินแกรนิต ปรากฏว่ามีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในตะพักชั้นบนความลาด จากการตรวจสอบภาคสนามกับการนำตัวอย่างแท่งหิน (core) ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการมีข้อมูล ดังต่อไปนี้

- 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 หากความลึกของรอยร้าวจากแรงดึง (T_d) ค่าระยะความยาวของระนาบที่เกิดการไถลเลื่อน (L) แรงยกตัวจากแรงดันน้ำ (U) แรงผลักรากแรงดันน้ำในรอยร้าวจากแรงดึง (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

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

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. กรณีที่รอยร้าวจากแรงดึงเกิดในชั้นตะพักด้านบน

จากโจทย์ตัวอย่างที่ 5.3 ค่า F.S. = 1.06 เป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงกำหนด ถ้าหากต้องการหาเสถียรภาพมวลสารเชิงความน่าจะเป็น คำนำน้าหนักมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายบนระนาบ 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 (อิงค่าขอความปลอดภัย)

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

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

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

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

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

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

มวลดินที่สมมุตินี้เป็นดินเอกพันธ์ (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 (หรือมวลดินจมอยู่ใต้ระดับน้ำ) หน่วยน้ำหนักดินที่มีน้ำอยู่ในโพรง ระบุเป็น หน่วยน้ำหนักดินใต้ระดับน้ำ หรือหน่วยน้ำหนักดินจมน้ำ (submerged unit weight, γ_{sub}) กับในกรณีที่เป็นหน่วยน้ำหนักดินที่อยู่เหนือระดับน้ำ (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 สมมุติให้มวลดินเหนียวมีการไถลเลื่อนตามระนาบ ระนาบเป็นแนวเส้นโค้งวงกลม (เส้น AED) ที่มีรัศมี R และจุดศูนย์กลางวงกลมอยู่ที่จุด O จากนิยามค่า F.S. ในเชิงโมเมนต์ เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ของแรงต้านการไถลเลื่อน (resistant to sliding, M_R) เทียบกับค่าโมเมนต์ขับเคลื่อนการไถลเลื่อน (driving to sliding, M_D) ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย แสดงเป็น

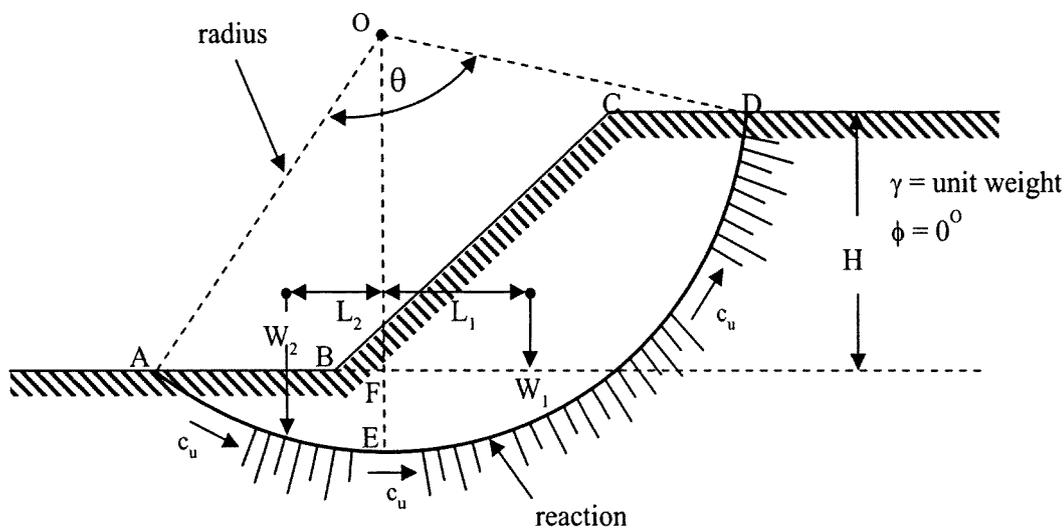
$$F.S. = \frac{M_R}{M_D} \tag{5.41}$$

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

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

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

$$M_D = W_1L_1 - W_2L_2 \tag{5.43}$$



รูปที่ 5.12 การพังทลายแบบวงกลมของมวลดินที่ไม่มีค่าความเสียดทานภายใน

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

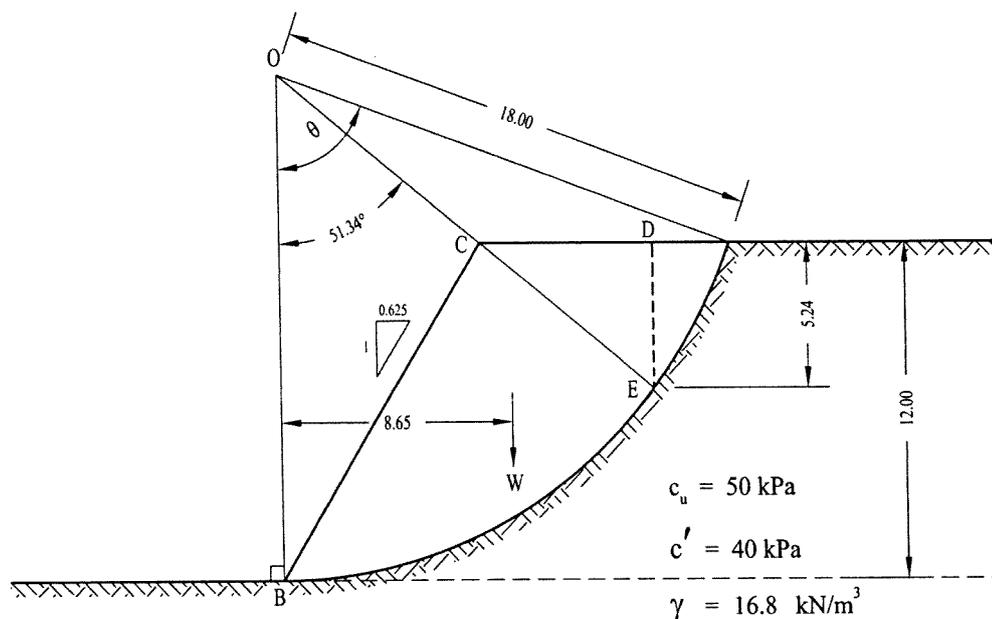
$$F.S. = \frac{\text{resisting moment}}{\text{disturbing moment}} = \frac{c_u}{c_d} \quad (5.44)$$

5.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลลัพท์การพังทลายแบบวงกลม

ตัวอย่างในหัวข้อย่อนี้ เป็นประเมินความลาดมวลสารที่เป็นดิน 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 ต้องหาระยะเส้นโค้งวงกลม และพื้นที่อื่นก่อน

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

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

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

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

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

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

ใช้สมการที่ 5.43 เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่อความหนาหนึ่งหน่วย ของกรณีแรกในข้อ (ก) มวลดินเหนียวไม่มีแรงดันน้ำจากรอยร้าวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยแทนค่าแรงโมเมนต์รอบจุด O ที่คำนวณได้

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

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

กรณีของการที่มีน้ำขังเต็มในส่วนที่เป็นรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) แสดงว่ามีแรงผลัดด้านข้างของแรงดันน้ำ (V) เกิดขึ้น ค่าแรงดันยกตัวเมื่อน้ำขังเต็ม เมื่อประมาณให้เป็นไดอะแกรมรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

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

ตำแหน่งแรงดันน้ำกระทำที่จุดต่ำจุด D ตรงจุดระยะ 2/3 ของ DE จะได้ระยะแขนโมเมนต์ (moment arm) รอบจุด O

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

จากการหาโมเมนต์จุด O กรณีที่มีแรงดันน้ำที่เกิดใน 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

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

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 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

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

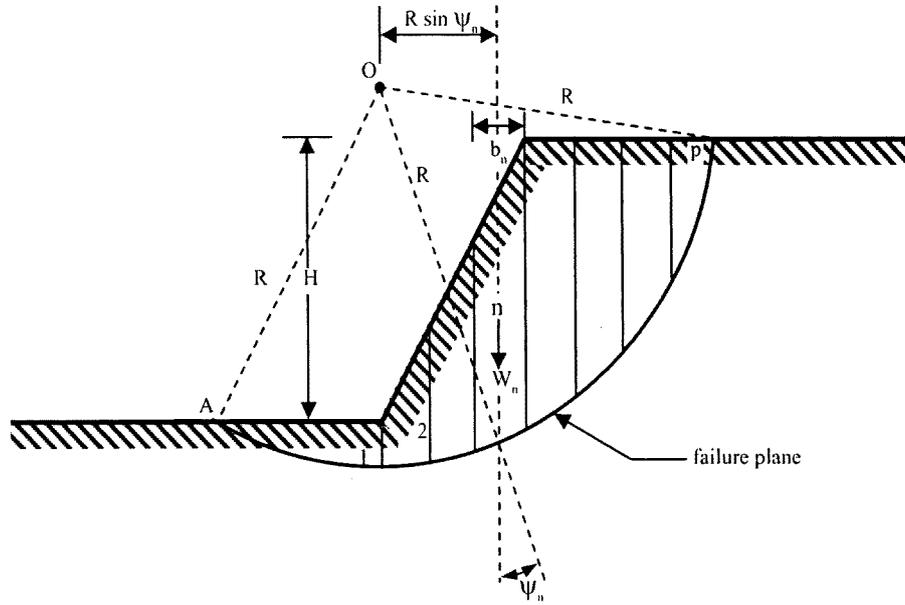
ชุดสอง ที่ระดับสถานะสูงสุดของขีดจำกัดการพังทลาย (highest limit of failure state) หรือที่ค่า C.O.V. = 40 % จะได้

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

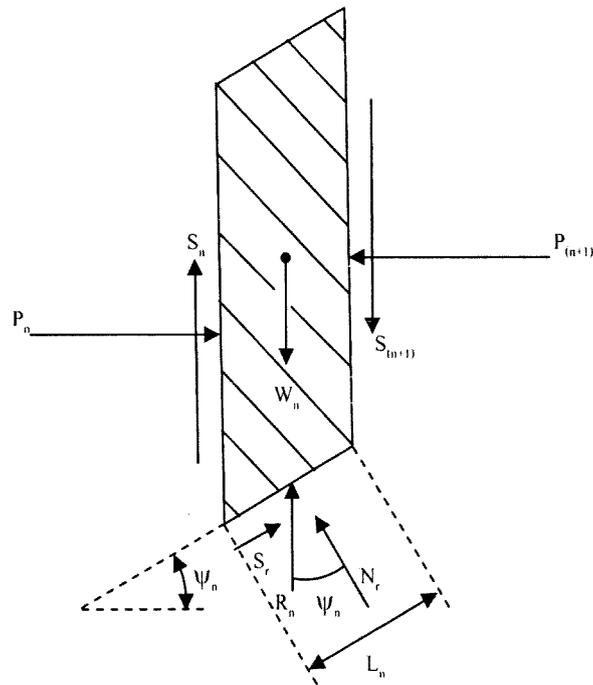
หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการดัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง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

5.3.5 การวิเคราะห์ดินเอกพันธ์ โดยวิธีการแบ่งส่วน

ปัญหาของการวิเคราะห์การพังทลายหรือการบีบอัดแบบวงกลม ที่เห็นได้ค่อนข้างชัดเจน คือ เกิดความคลาดเคลื่อนในเรื่องของพื้นที่การพังทลายที่พื้นผิวมีรูปเส้นโค้ง



ก.



ข.

รูปที่ 5.14 ก. ภาพตัดขวางความลาดที่ถูกแบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ หลายเสี้ยว (slices)

ข. ไดอะแกรมแรงที่กระทำบนเสี้ยวที่ n ให้พื้นผิวฐานเป็นเส้นตรง

วิธีการแก้ไขโดยการแบ่งส่วนมวลสาร ให้เป็นพื้นที่หน้าตัดในภาพตัดขวางเป็นส่วนเล็ก ๆ ในแนวตั้งหลายส่วน แต่ละส่วนหรือที่เรียกว่าเสี้ยว (slice) โดยที่ไม่จำเป็นต้องกำหนดให้มีความกว้างของรูปทรงสี่เหลี่ยมเท่ากันทุกส่วน การแบ่งส่วนเพื่อนำมาคำนวณหาพื้นที่ที่ย่อยก่อนที่จะรวมเป็นพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด 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 คำนวณค่าแรงน้ำหนัก (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 เป็นแนวแรงฉากกับแรงเฉือนบนพื้นผิวฐาน ส่วน พจน์ W_n กับ R_n เป็นค่าแนวแรงน้ำหนักกับค่าแรงปฏิกิริยาของน้ำหนักในแนวตั้ง พจน์ P_n กับ $P_{(n+1)}$ เป็นแรงฉากที่มีแนวตั้งฉากกับผิวด้านข้างของเสี้ยวส่วนที่ 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 ได้ความสัมพันธ์เป็น

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

3. ขั้นตอนที่ 3 หาค่าแรงเฉือนที่ฐานของเสี้ยวที่ n เมื่อกำหนดให้ L_n เป็นความยาวของด้านฐาน ได้ความสัมพันธ์เป็น

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

4. ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์เสถียรภาพความลาด โดยทำการหาโมเมนต์รอบจุด O ของรูปที่ 5.14 ก. ได้ความสัมพันธ์แรงที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน กับแรงที่ต้านการไถลเลื่อน เมื่อกำหนดค่าผลลัพธ์ต่อหนึ่งหน่วยความหนาของความลาด 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 ขึ้นอยู่กับแนวการเฉียงเทไปในทิศทางเดียวกับแนวความลาดโดยรวม หรือสวนทางกับแนวความลาดโดยรวม วิธีการแบ่งส่วนแบบ ordinary slice method ยังใช้ได้กับมวลดินที่มีอนุภาคแร่หลายชนิดอยู่รวมกัน ไม่จำเป็นต้องเป็นเนื้อเอกพันธ์ หรือสมบัติของมวลดินอาจมีค่าหน่วยน้ำหนัก (γ) ค่าความเสียดทาน (ϕ) ค่าการยึดเกาะกัน (c) ไม่เท่ากันก็ได้ ยกตัวอย่างมวลดินวิวิธพันธ์ หมายถึงมวลดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ได้แก่ ดินทรายเชิงดินเหนียว หรือเรียกว่าดินทรายปนดินเหนียว (clayey sand) กับดินทรายปนทรายแป้ง หรือเรียกว่าดินทรายปนซิลต์ (silty sand) เป็นต้น

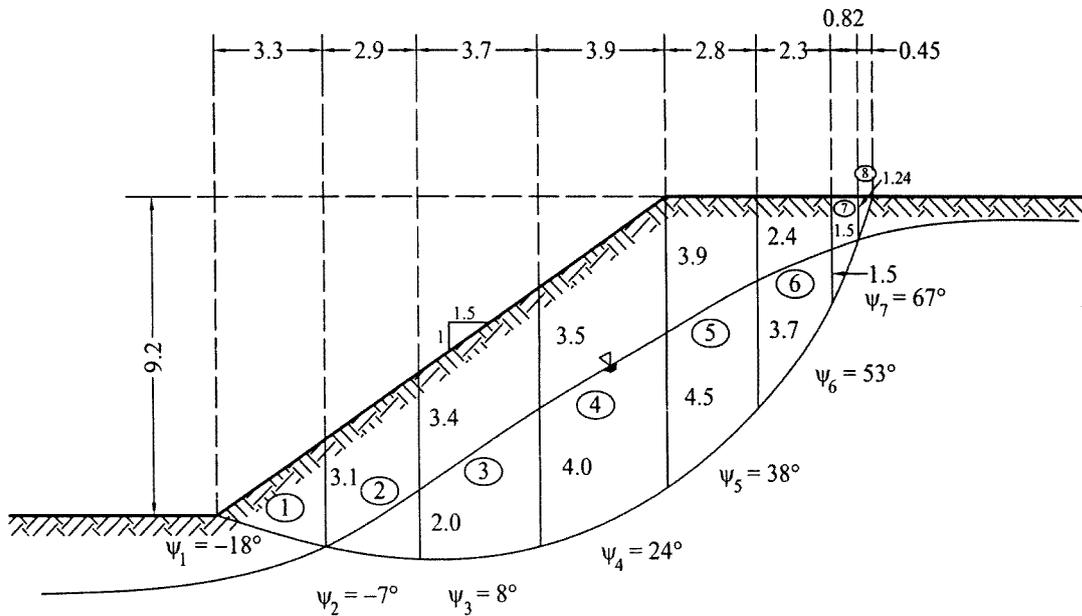
5.3.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาผลลัพธ์การพังทลายด้วยวิธีแบ่งส่วน

การหาค่าผลลัพธ์ของการพังทลายแบบวงกลม โดยใช้แนวทางการแบ่งส่วนของมวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลาย ได้แสดงตัวอย่างไว้ในหัวข้อย่อนี้

โจทย์ตัวอย่างที่ 5.5

เมื่อทำการตัดความลาดในมวลดินที่มีเนื้อเอกพันธ์ (homogeneous soil) ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการแบ่งส่วนของมวลดินเป็นทั้งหมด 7 เสี้ยว ดังแสดงในภาพตัดขวางของรูปที่ 5.15 ค่าระยะมิติมีหน่วยเป็นเมตร กับแสดงค่ามุมลาดของแต่ละส่วน ความลาดนี้มีน้ำใต้ดินไหลผ่านในบางส่วน และมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

- ความสูงในแนวตั้งของความลาด = 9.2 เมตร
- หน้าตัดความลาด มีอัตราส่วนระยะในแนวราบต่อระยะในแนวตั้ง = 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 เสี้ยว (slices)

จงหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยในภาวะแรงดันน้ำใต้ดิน มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของความลาดในมวลดินเนื้อเอกพันธ์นี้

ผลเฉลย

การหาผลเฉลยควรใช้โปรแกรมแผ่นตารางคำนวณ (spreadsheet) หรือถ้าใช้เครื่องคิดเลข ทั้งนี้มีลำดับขั้นตอน เริ่มจากการหาค่าน้ำหนักของแต่ละเสี้ยว (slice) จากนั้นหาค่าแรงดันยกตัวของแต่ละเสี้ยว ก่อนนำค่าของตัวแปรที่รู้ค่าดังกล่าว ทำการคำนวณตัวแปรดังกล่าวในตารางโดยใช้ค่าระยะมิติ ค่ามุม และสมบัติของมวลดินที่เรียงลำดับจากส่วนที่ 1 จนถึงส่วนที่ 8

ค่าน้ำหนัก [(หน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (ของความหนาเสี้ยว - 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

คอลัมน์ที่ 1 เป็นหมายเลขที่เป็นจำนวนเลี้ยว (slice number) คอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าน้ำหนัก slice/thickness (W) คอลัมน์ที่ 3 เป็นมุมเอียงของแต่ละเลี้ยว (ψ) คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของโคฮีชันประสิทธิภาพ (c') คอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานประสิทธิภาพ (ϕ') คอลัมน์ที่ 6 เป็นความดันยกตัว (u) คอลัมน์ที่ 7 เป็นความยาวเชิงเส้นของด้านฐานเลี้ยว (L) คอลัมน์ที่ 8 เป็นความผลรวมของแรงต้านในแต่ละเลี้ยว (Σ_{resist}) คอลัมน์ที่ 9 เป็นความผลรวมของแรงไถลเลื่อนในแต่ละเลี้ยว (Σ_{slide})

ตารางที่ 5.4 การคำนวณหาผลลัพธ์ของแรงที่กระทำบนเลี้ยวแต่ละส่วน (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

$$\begin{aligned}
 \text{F.S.} &= \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c'(L_n) + \{(W_n \cos \psi_n) - u(L_n)\} \tan \phi']}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n (\sin \psi_n)} \\
 &= \frac{754.480}{646.271} = 1.167
 \end{aligned}$$

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 ค่าการยึดเกาะประสิทธิผล (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 $[p(f)]_{SIM}$

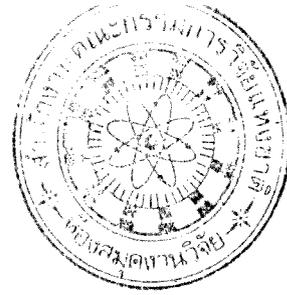
1. แบบจำลองที่หนึ่ง (อิงค่าขอความปลอดภัย)

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

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.167; \quad \beta_N = 0.956; \quad [p(f)]_1 = 16.9\%$$

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

$$\text{ค่า } (F.S.)_{AVE} = 1.167; \quad \beta_N = 0.359; \quad [p(f)]_1 = 36.0\%$$



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 เพื่อใช้เป็นพจน์ค่าปรับแก้ (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

ตัวอย่างที่แสดงไว้ในหัวข้อย่อหน้านี้ 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 $(F.S.)_{\text{trial}}$ ครั้งแรก มีค่า $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.15$ 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 จึงทดสอบตัวเลขดัชนีใหม่ กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trial}}$ ครั้งที่สอง มีค่า $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.25$ 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 และเป็นคำตอบสุดท้าย) การคำนวณที่แสดงเป็นตัวอย่างนี้ใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาเพื่อทำการหาผลเฉลยเพียง 2 ครั้ง ก็น่าจะ

เพียงพอ ยกเว้นในกรณีที่ได้ทั้ง 2 ครั้งมีความแตกต่างอยู่สูง จึงต้องทำการสุ่มใช้ค่าของ $(F.S.)_{\text{trial}}$ ใหม่เป็นครั้งที่สาม (ค่าตัวเลข F.S. ที่สุ่มจะสูงขึ้นหรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ครั้งที่สอง)

ตารางที่ 5.5 การหาผลลัพธ์ด้วย modified Bishop method กำหนดให้ $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.15$

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 $(F.S.)_{\text{trial}} = 1.25$

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 ค่าการยึดเกาะประสิทธิผล (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 $[p(f)]_{SIM}$

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

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = 0.87 - 1.85; \quad [p(f)]_{SIM} = 3.5\%$$

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

$$\text{ค่า (F.S.)}_{range} = 0 - 7.13; \quad [p(f)]_{SIM} = 22.1\%$$

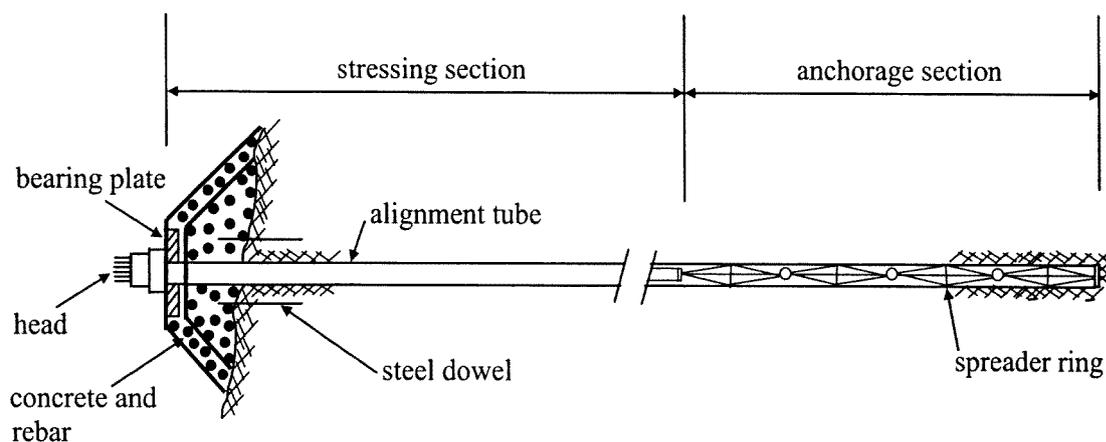
หมายเหตุ การคำนวณเพื่อหา ค่า F.S. ค่า $p(f)$ และค่า β_N ใช้โปรแกรม EXCEL หรือโปรแกรมสำเร็จรูปที่แนบมาหลังปกรายงาน ที่ใช้กับแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ (ในบทที่ 4) แต่มีการตัดแปลงบ้างเล็กน้อย (เพื่อใช้กับกรณีโจทย์ข้อนี้) ทำให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่า วิธีการคำนวณเป็นอย่างไร ผู้วิจัยได้ทำการลำดับขั้นตอนเป็นไฟล์ตัวอย่าง และบันทึกไว้ในแผ่น CD ใน Folder 5.6

5.4 การเสริมเสถียรภาพของมวลความลาด

โครงสร้างมวลสารเปราะที่เป็นมวลดินหรือมวลหินเกิดอยู่ในภาคสนาม ถ้าหากสามารถรับโหลดที่กระทำบนมวลสารเปราะ จัดเป็นโครงสร้างมวลสารที่ค้ำยันตนเอง (self-supporting) แต่ถ้าหากโครงสร้างมวลหินหรือมวลดินไม่สามารถรับโหลดที่กระทำได้ ต้องมีการเสริมเสถียรภาพโครงสร้างมวลสาร โดยใช้สิ่งที่มีมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เรียกเป็นศัพท์เฉพาะว่า artificial support ทำให้มวลสารเดิมมีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกหรือความเค้นที่กระทำได้สูงขึ้น รวมทั้งเป็นการเพิ่มค่าของมุมเสียดทานภายในระหว่างระนาบเปราะบาง ทำให้หลุดแยกออกจากมวลสารเดิมยกขึ้นหรือในบางกรณีเป็นการเสริมเสถียรภาพเพื่อลดค่าระยะแอนของชั้นดิน (ชั้นหิน) ให้ต่ำกว่าเดิม

การใช้สิ่งประดิษฐ์ที่เป็นวัสดุเสริมเสถียรภาพ เช่น ทำการเจาะรูมวลหินที่ต้องการเสริมเสถียรภาพไปจนถึงหินสมานแน่น แล้วใส่แท่งเหล็กยาว พร้อมทั้งขันหัวนอตด้านหน้ากับมีสมอยึดติดกับหินสมานแน่นอยู่ตรงปลาย นิยมเรียกวัสดุที่เป็นสิ่งประดิษฐ์นั้นว่า สลักเกลียว (ยึด) หรือใช้ศัพท์ว่า bolt อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ทำมีหลายชนิด ตั้งแต่ เหล็กธรรมดา เหล็กผสม ยางเรซิน หรือวัตถุเชิงเคมี และด้านปลายของแท่งวัสดุก็มีรูปหลายรูปแบบ เช่น อาจเป็นรูปลิ้น 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 หน้าโบลท์มี 2 รูปแบบ (ดูรูปที่ 5.16 ประกอบ) คือ หน้าในส่วนหนึ่งจะเป็นส่วนที่รับความเค้นรอบ ๆ (stressing section) หน้าในส่วนหนึ่งทำหน้าที่ยึดติดกับมวลหินสมานแน่น (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 ทำให้กำลังวัสดุมวลสารของชั้นหินทนต่อความเค้นฉกฉัด ความเค้นเฉือนที่กระทำได้สูงขึ้น นอกจากนี้ ถ้าเป็นชั้นหินที่เป็นส่วนหลังคาอุโมงค์ เมื่อมีการยึดติดด้วยโบลท์ค่าระยะโค้งแอ่นลดน้อยลง ปรากฏการณ์เชิงธรณีเทคนิคประเภทนี้ ถ้าเป็นกรณีของหลังคาอุโมงค์ มีชื่อเรียกว่า beam building ใช้แทนลักษณะของการเพิ่มขนาดความหนาของคาน (จากการยึดติด) ที่เป็นส่วนของหลังคาอุโมงค์

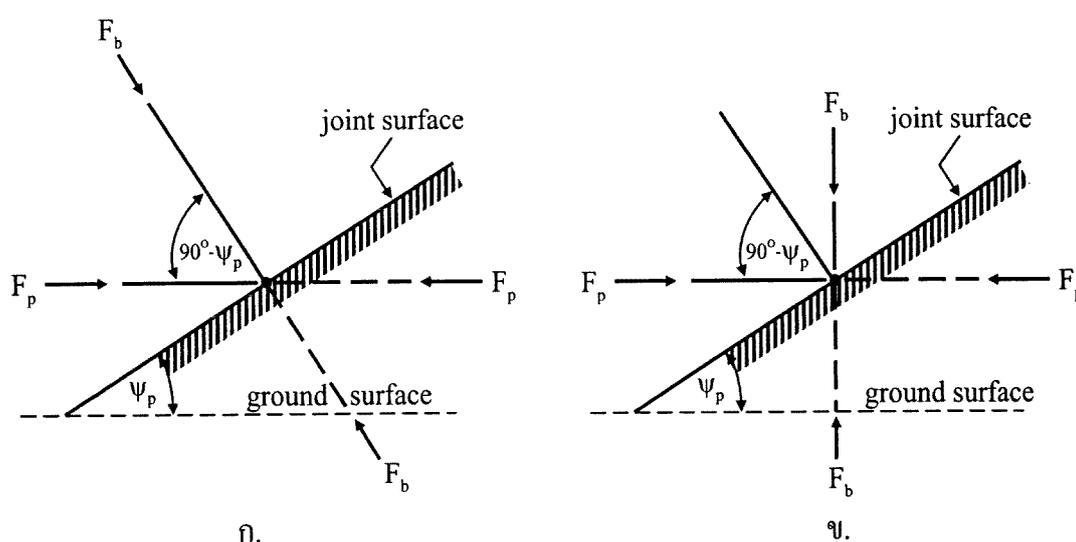
2. การแขวนชั้นหินบาง มวลสารที่เป็นชั้นหินบาง หรือชั้นหินที่มีแนวแตกแยกในเนื้อหิน ทำให้มีโอกาสเกิดการเลื่อนไถล หรือหลุดแตกแยกออกจากมวลสารเดิม เป็นไปได้ง่าย การเจาะใส่

โบลท์ที่ยึดติดกับมวลเนื้อแน่น เป็นการใช้แรงของโบลท์ช่วยยึดมวลสารเปราะบาง ให้อยู่กับที่ในลักษณะของการแขวน โครงสร้างหิน 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 จะเกิดการไถลเลื่อนด้วยแรงจากน้ำหนักของมวลสารเอง เมื่อมีการใช้โบลท์ที่ยึดติดกับมวลหินเนื้อแน่นที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและปริมาตร 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 ทำการเสริมเสถียรภาพความลาดใช้โบลท์ในแนวฉากกับระนาบแนวราบของพื้นผิวดินที่เป็นระดับเดียวกันกับชั้นตะพักด้านล่าง ดังรูปที่ 5.17 ข.

จากรูปที่ 5.17 กำหนดให้ พจน์ F_b เป็นโบลด์ของโบลท์ (bolt load) หรือเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ (ของความยาวที่มีความหนาหนึ่งหน่วยในภาพตัดขวาง) ที่โบลท์กระทำในแนวฉากบนระนาบที่กำหนด ได้แก่ รูปที่ 5.17 ก. โบลท์กระทำในแนวฉากบนระนาบของพื้นผิวแนวแตก (joint surface) กับรูปที่ 5.17 ข. ในแนวฉากกับพื้นผิวดิน (ground surface) และพจน์ F_p เป็นแรงที่โบลท์กระทำแนวขนานกับระนาบพื้นผิวดิน (ต่อหน่วยพื้นที่เดียวกัน) ที่เป็นแนวระดับเดียวกันกับตะพักด้านล่างของความลาด ค่ามุม ψ_p เป็นมุมเอียงระนาบการพังทลายที่ขนานกับพื้นผิวแนวแตก และมุม ϕ เป็นค่ามุมความเสียดทานภายในของระนาบแนวแตกแยก ความสัมพันธ์ของแรงเชิงเสถียรภาพในรูปที่ 5.17 ก. กับรูปที่ 5.17 ข. แสดงเป็นสมการที่ 5.52 กับ 5.53 ตามลำดับ

$$\frac{[F_b \cos \psi_p]}{[F_b + F_p \sin(90^\circ - \psi_p)]} < \tan \phi \quad (5.52)$$

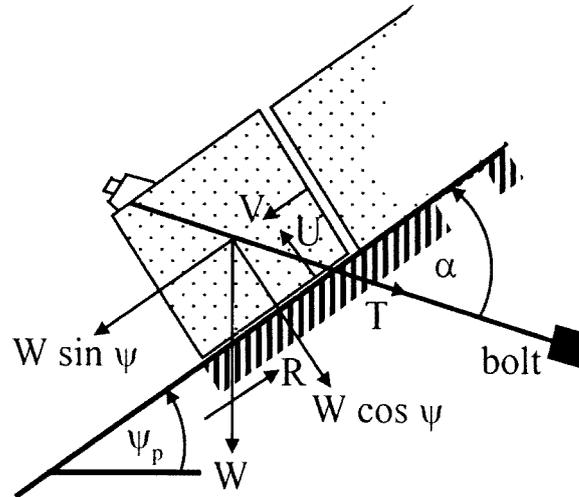
$$\frac{[(F_p \cos \psi_p) - F_b \cos(90^\circ - \psi_p)]}{[F_p \cos(90^\circ - \psi_p) + F_b \cos \psi_p]} < \tan \phi \quad (5.53)$$

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

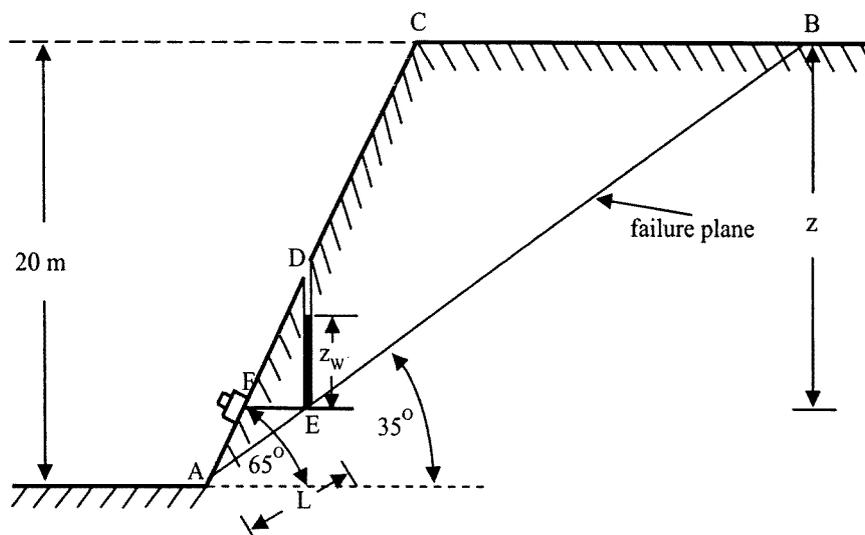
ระนาบการพังทลาย (หรือระนาบหน้าความลาด) ส่วนพจน์อื่นทั้งสามพจน์ใช้ในความหมายเดียวกันกับสมการที่ 5.5 หัวข้อ 5.2.1 ที่เป็นแรงต่อหน่วยความยาว ได้แก่ U – แรงยกตัว, V – แรงค้ำน้ำ, W – น้ำหนักมวลสาร ส่วนมุม ψ_p เป็นมุมเอียงของระนาบการพังทลาย



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°
- ระยะในแนวดิ่งของรอยร้าวจากแรงค้ำ (DE) = 6.6 เมตร
- ความสูงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าวจากแรงค้ำ, $z_w = 5.5$ 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 ในรูปแบบใหม่ที่ค่า $T = 91.96$ กิโลนิวตันต่อเมตร ดังนี้

$$F.S. = \frac{(cL) + [(W \cos \psi_p) - U + (91.96)(\sin \alpha)]}{[(W \sin \psi_p) + V - (91.96)(\cos \alpha)]} \tan \phi \quad (๗)$$

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 $p(f)$ ที่แตกต่างกัน $[p(f)]_{SIM}$

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