

มยพ. 1916-62

มาตรฐานประกอบการวิเคราะห์ความมั่นคงในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม

(Standard of Slope Stability Calculation for Safety in Landslide Risk Area)

มยพ. 1916-62

มาตรฐานประกอบการวิเคราะห์ความมั่นคงในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม
(Standard of Slope Stability Calculation for Safety in Landslide Risk Area)

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานประกอบการวิเคราะห์ความมั่นคงในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อการคำนวณค่าเสถียรภาพความมั่นคงของลาดเอียง (slope) ที่ทำการก่อสร้างอาคาร การขุดดินหรือถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและบริเวณลาดเชิงเขา โดยใช้วิธีสมดุลจำกัด (limit equilibrium) เป็นหลัก และสามารถวิเคราะห์โดยวิธีอื่น ๆ เพิ่มเติมได้

1.2 มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (International System Units) เป็นหลัก

2. นิยามและสัญลักษณ์

2.1 นิยาม

“อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.)” หมายถึง แรงหรือหน่วยแรงหรือโมเมนต์ต้านทานการวิบัติของดินหารด้วยแรงหรือหน่วยแรงหรือโมเมนต์ที่ออกแบบ

“ความชัน (slope)” หมายถึง ค่าตัวเลขซึ่งกำหนดเป็นสัดส่วนระหว่างระยะแนวตั้งต่อระยะแนวนราบหรือร้อยละของระยะแนวตั้งต่อระยะแนวนราบ หรือองศาของความลาดเอียงซึ่งวัดจากแนวนราบ

“งานขุดดินแบบชั่วคราว” หมายความว่า งานขุดดินที่ใช้เวลาไม่เกิน 6 เดือน แล้วทำการถมดินกลับให้อยู่ในสภาพเดิม

“งานขุดดินแบบถาวร” หมายความว่า งานขุดดินที่ใช้เวลาเกิน 6 เดือน หรืองานขุดดินที่ไม่มีการถมดินกลับให้อยู่ในสภาพเดิม

“งานถมดินแบบชั่วคราว” หมายความว่า งานถมดินที่ใช้เวลาไม่เกิน 6 เดือน แล้วทำการรื้อย้ายดินออกให้อยู่ในสภาพเดิม

“งานถมดินแบบถาวร” หมายความว่า งานถมดินที่ใช้เวลาเกิน 6 เดือน หรืองานถมดินที่ไม่มีการรื้อย้ายดินออกให้อยู่ในสภาพเดิม

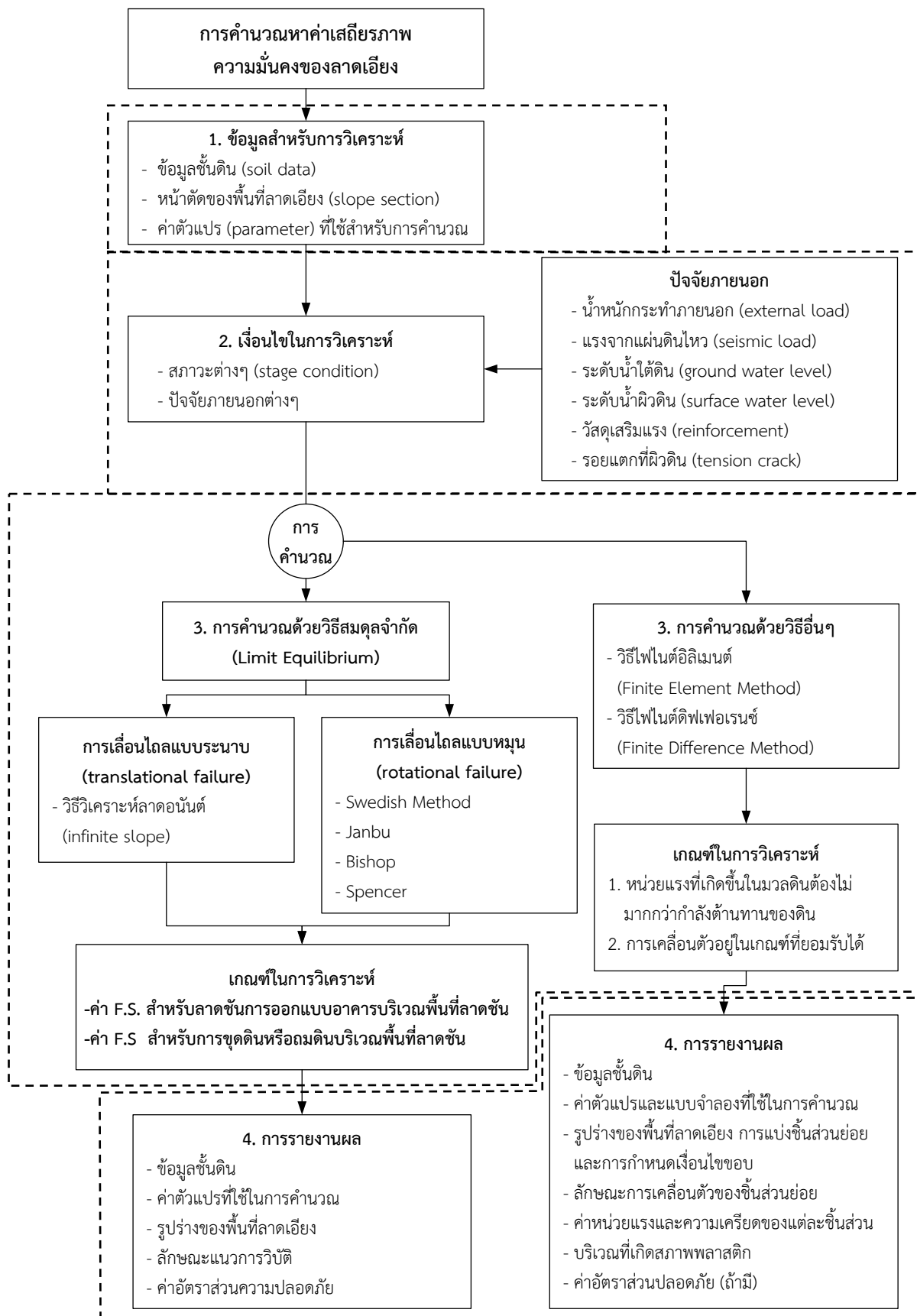
2.2 สัญลักษณ์

b_i = ความกว้างของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นเมตร

b_c = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับประเภทของดิน สำหรับ Janbu's Simplified Method

- C = แรงยึดเหนี่ยวของดิน มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร
(กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- C_u = แรงยึดเหนี่ยวของดินแบบหน่วยแรงรวม มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร
(กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- $\bar{c}$ = แรงยึดเหนี่ยวของดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผล
มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- $\bar{c}_i$ = แรงยึดเหนี่ยวของดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นมวลดินที่ i
มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- d = ระยะตั้งฉากที่ยาวที่สุด วัดจากเส้นบอกความยาว (L) ถึงแนวการวิบัติ มีหน่วยเป็นเมตร
- $F.S.$ = ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย
- f_0 = ค่าปรับแก้ซึ่งขึ้นกับสัดส่วนของความลึกและความยาวของการวิบัติ
สำหรับ Janbu's Simplified Method
- H = ความลึกของการขุด หรือความสูงของดินถม มีหน่วยเป็นเมตร
- h_i = ความสูงของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นเมตร
- h_w = ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน มีหน่วยเป็นเมตร
- i = ลำดับชั้นส่วนของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการเลื่อนไถลแบบหมุน
- l_i = ความยาวของระนาบไถลของชั้นมวลดินที่ i (หรือ $l_i = b_i / \cos \theta_i$) มีหน่วยเป็นเมตร
- L = ความยาวของการวิบัติ มีหน่วยเป็นเมตร
- n = จำนวนชั้นของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการเลื่อนไถลแบบหมุน มีหน่วยเป็นชั้น
- N_i = แรงกระทำตั้งฉากบนระนาบไถลของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร
(กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- N' = ค่าตัวเลขทะเลหะลงมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว
- R = รัศมีของระนาบส่วนโค้งเลื่อนไถลแบบหมุน มีหน่วยเป็นเมตร
- S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร
(กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- T_i = แรงเฉือนบนระนาบไถลของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร
(กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)

- U_i = แรงดันน้ำที่กระทำต่อชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- W_i = น้ำหนักของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (กิโลกรัมแรง)
- x_i = ระยะทางในแนวราบจากจุดกึ่งกลางของมวลดินที่ i ถึงจุดศูนย์กลางของผิวการวิบัติ มีหน่วยเป็นเมตร
- z = ความลึกของระนาบไถลจากผิวดิน สำหรับการเลื่อนไถลแบบระนาบ มีหน่วยเป็นเมตร
- ϕ = มุมเสียดทานภายในของดิน มีหน่วยเป็นองศา
- ϕ_u = มุมเสียดทานภายในแบบหน่วยแรงรวม มีหน่วยเป็นองศา
- $\bar{\phi}_i$ = มุมเสียดทานภายในแบบหน่วยแรงประสิทธิภาพของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นองศา
- θ_i = มุมวางตัวของระนาบไถลของชั้นมวลดินที่ i มีหน่วยเป็นองศา
- γ_t = หน่วยน้ำหนักของดินชั้น มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมแรงต่อลูกบาศก์เมตร)
- γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัว มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมแรงต่อลูกบาศก์เมตร)
- γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมแรงต่อลูกบาศก์เมตร)
- β = ความชันของแนวการวิบัติ มีหน่วยเป็นองศา
- S_r = ระดับความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
- E = โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
- ν = อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 ไม่มีหน่วย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียง

(ข้อ 4)

3. มาตรฐานและคู่มืออ้างอิง

3.1 มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1911-52 : มาตรฐานประกอบการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงที่ปลอดภัยในงานขุดดินและถมดิน

3.2 มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1249 : มาตรฐานการเจาะสำรวจดิน

3.3 มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 302-2551 : มาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าแรงแบบเฉือนตรง (direct shear test)

3.4 คู่มือการใช้มาตรฐานประกอบการปฏิบัติตามกฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดิน

หมายเหตุ : หากข้อกำหนดในมาตรฐานนี้มีความขัดแย้งกับมาตรฐานที่อ้างอิงในแต่ละส่วน ให้ถือข้อกำหนดในมาตรฐานนี้เป็นสำคัญ

4. การคำนวณหาค่าเสถียรภาพความมั่นคงของลาดเอียง (slope) ในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและบริเวณลาดเชิงเขา

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความมั่นคงของลาดเอียง เมื่อมีการก่อสร้างอาคาร การขุดดินและถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและบริเวณลาดเชิงเขา แสดงในรูปที่ 1 เนื้อหาบางส่วนเพิ่มเติมจาก มยผ.1911-52 : มาตรฐานประกอบการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงที่ปลอดภัยในงานขุดดินและถมดิน โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

- (1) การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์
- (2) การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์
- (3) การคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียง
- (4) การรายงานผล

4.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ประกอบด้วย

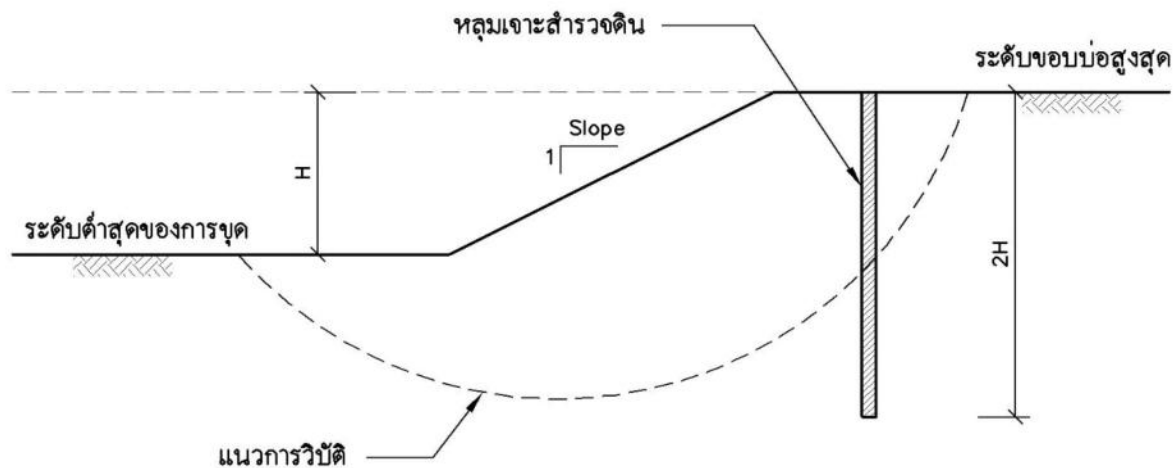
4.1.1 ข้อมูลชั้นดิน (soil data) และการแปลผล (interpretation) เป็นข้อมูลที่แสดงลักษณะและคุณสมบัติของดินในบริเวณที่จะทำการก่อสร้างอาคาร การขุดดินหรือถมดิน

4.1.1.1 ข้อมูลชั้นดินสามารถทราบได้จากข้อมูลที่มีอยู่แล้วหรือข้อมูลจากพื้นที่ข้างเคียงหรือการเจาะสำรวจดิน สามารถทำได้โดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การเจาะสำรวจโดยใช้เครื่องเจาะสว่าน (hand auger)
- การเจาะแบบฉีดล้าง (wash boring) หรือแบบ rotary drilling
- การขุดบ่อสำรวจ (test pits)

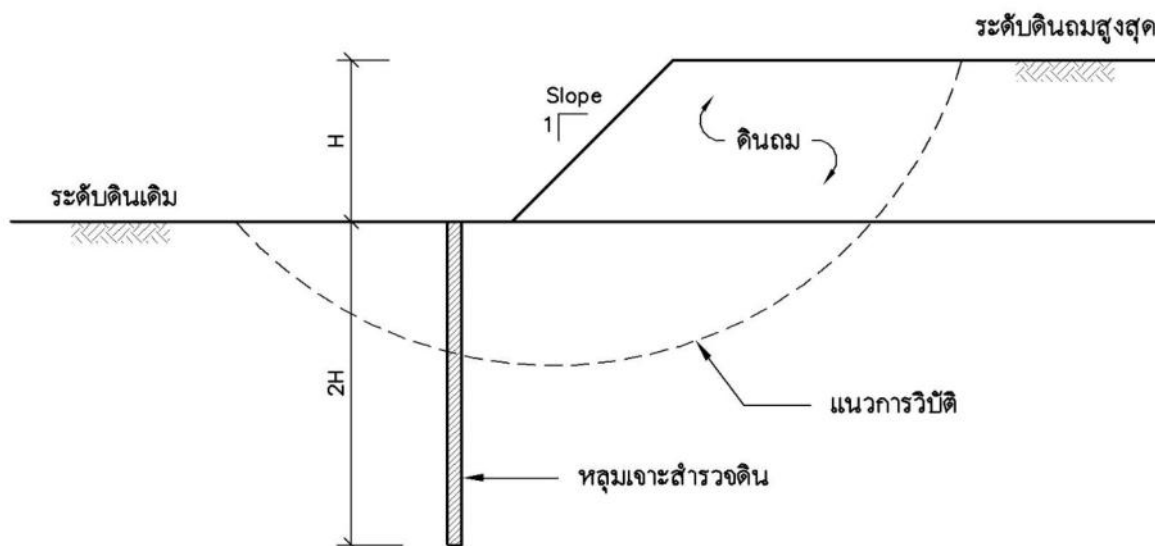
4.1.1.2 จำนวนหลุมเจาะสำรวจดินให้เป็นไปตามมาตรฐาน มยผ. 1249 : มาตรฐานการเจาะสำรวจดิน

4.1.1.3 การเจาะสำรวจสำหรับงานก่อสร้างอาคาร งานขุดดินและถมดิน ความลึกของการเจาะสำรวจ ต้องมากกว่า 2 เท่าของความลึกที่ระดับต่ำสุดของงานขุด และความสูงที่ระดับสูงสุดของงานถม ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากพบชั้นดินแข็งภายในระยะที่กำหนดดังกล่าว และมีความหนาเพียงพอต่อการรักษาเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียงอาจหยุดเจาะสำรวจก่อนถึงความลึกที่แนะนำไว้ได้



รูปที่ 2 ความลึกในการเจาะสำรวจดินสำหรับการขุดดิน

(ข้อ 4.1.1.3)



รูปที่ 3 ความลึกในการเจาะสำรวจดินสำหรับการถมดิน

(ข้อ 4.1.1.3)

4.1.1.4 การเจาะสำรวจดินต้องสามารถเก็บตัวอย่างดิน หรือทำการทดสอบในสนามเพื่อให้ได้คุณสมบัติดินที่เพียงพอต่อการคำนวณค่าเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียง แต่สำหรับพื้นที่ภูเขาหรือพื้นที่ลาดเชิงเขาการเจาะสำรวจดินอาจไม่สามารถทำได้หรือเกิดความยุ่งยากไม่สามารถเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ทดสอบได้ ซึ่งสามารถทำการขุดบ่อสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample) แทนได้

4.1.1.5 การขุดบ่อสำรวจ (test pit) เป็นวิธีที่ให้ข้อมูลชั้นดินการวางตัวของชั้นดิน ที่สมบูรณ์ที่สุดวิธีหนึ่ง และยังสามารถถ่ายภาพหรือเก็บข้อมูลลักษณะชั้นดินได้อย่างชัดเจน ขนาดหลุมมีความกว้างประมาณ 0.8-1.0 เมตร และลึกตามความเหมาะสมหรือจนกระทั่งถึงชั้นดินแข็ง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะการเปิดบ่อสำรวจดิน
(ข้อ 4.1.1.4)

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี (2549)

4.1.1.6 การเก็บตัวอย่างดินและหิน ดำเนินการเก็บตัวอย่างได้ 2 ลักษณะ คือตัวอย่างดินไม่คงสภาพ (disturbed sample) และตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample)

ตัวอย่างดินไม่คงสภาพนำมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties test) ของดิน เช่น การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน (water content) ขนาดของเม็ดดิน (sieve analysis) และหน่วยน้ำหนัก (unit weight) เป็นต้น

ตัวอย่างดินคงสภาพนำมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินในสนามที่ใช้โดยทั่วไปคือ tube sampling หรือ box sampling นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างดินและหินในพื้นที่ดินถล่มได้ เรียกว่า KU-miniature sampler

- tube sampling หรือ box sampling

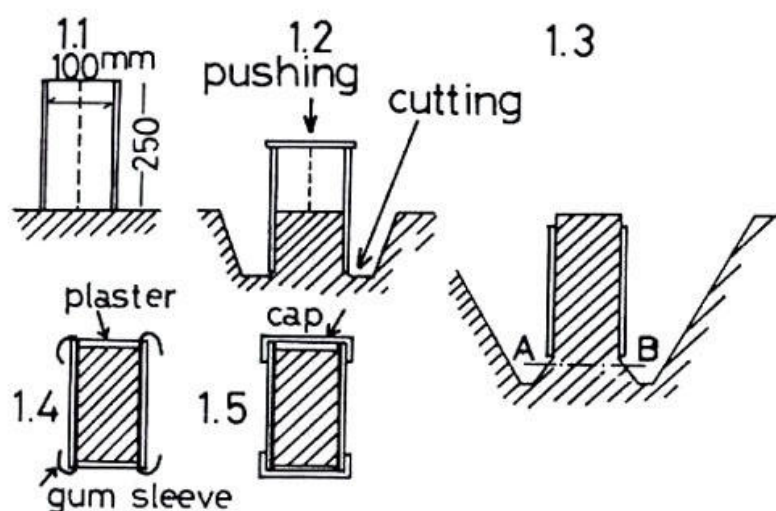
tube sampling หรือ box sampling เป็นการใช้ท่อ กล่องหรือแหวน ในการเก็บตัวอย่าง มักใช้กับดินที่มีความแข็งไม่มากประเภท highly weathered soil ซึ่งใช้ได้ผลดีกับดินที่มี ระดับผุพังมากและมีดินเหนียวปนอยู่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 250 มิลลิเมตร ผนังของกระบอกเก็บตัวอย่างหนา 3 มิลลิเมตร โดยกดลงในดินเพื่อเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 5

ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างให้นำลึงหรือกระบอกเก็บไปวางเหนือบริเวณก่อนดิน ที่จะทำการเก็บตัวอย่าง ตัดแต่งให้มีขนาดใหญ่กว่าและมีรูปร่างคล้ายลึง หรือกระบอกที่ใช้เก็บตัวอย่าง ต่อจากนั้นใช้เกรียง (แถบแผ่นเหล็กบาง) หรือมีดบางค่อย ๆ บรรจงปาดแต่งก่อนดินรอบ ๆ ลึงหรือกระบอก ออกอย่างประณีตจนสามารถสวมและกดลึงเก็บลงแทนที่ตัวอย่างดินด้านบนที่ถูกปาดแต่งออก ทำดังนี้ไปเรื่อย ๆ ลึกลงมาแต่ละครั้ง ๆ ละ 2-3 ซม. จนกระทั่งลึงเก็บสวมครอบตัวอย่างดินได้ครบตลอดความสูงของลึงเก็บตามที่ต้องการ จากนั้นใช้มีดหรือเกรียงตัดใต้ก่อนตัวอย่างให้ขาดออกจากชั้นดินเดิม ต่อไปแต่งผิวตัวอย่างดินกับลึงเก็บ พร้อมทั้งเทซีเมนต์ปิดหัว-ท้ายให้หนาและสนิท เพื่อป้องกันความชื้นระเหยออก หรืออาจใช้ฝาโลหะปิดหัวท้าย แล้วฉีกให้สนิท

- KU-miniature sampler

การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพโดยเครื่องมือเก็บตัวอย่าง KU-miniature นำไปใช้ในหลายพื้นที่ที่เกิดดินถล่ม รูปที่ 6 ตัวอย่างการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพในพื้นที่ลาดชัน ซึ่งเครื่องมือเก็บตัวอย่าง KU-miniature sampler แสดงดังรูปที่ 7 ประกอบด้วย

- (1) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน KU-miniature sampler
- (2) แผ่นฟิล์มพลาสติก สำหรับห่อตัวอย่างดิน
- (3) กระดาษฟอยด์ (aluminium foil) สำหรับห่อตัวอย่างดิน
- (4) พลาสติกกันกระแทก
- (5) พาราฟิน และหม้อต้ม สำหรับเคลือบตัวอย่างป้องกันความชื้น



รูปที่ 5 การเก็บตัวอย่างแบบ tube sample ที่ดันกระบอกในตัวอย่างดิน
(ข้อ 4.1.1.6)

ที่มา : R.Yoshinaka and T.F.Onodera (1977)



รูปที่ 6 ตัวอย่างการเก็บตัวอย่างดินและหินโดยใช้ KU-miniature sampler ในบริเวณพื้นที่ลาดชัน
(ข้อ 4.1.1.6)

ที่มา : สุทธิศักดิ์ (2555)



รูปที่ 7 ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่าง KU-miniature sampler
(ข้อ 4.1.1.6)

ที่มา : วรากรและคณะ (2546,2547)

4.1.1.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงสำหรับการวิเคราะห์ด้านดินถล่ม

ลาดดินธรรมชาติที่เกิดการพังทลายมักเกิดจากการพังทลายของดินที่ผุสลายอยู่กับที่ (residual soil) โดยทั่วไปการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมีวิธีการทดสอบตามหลักการดังต่อไปนี้

(1) การทดสอบแรงเฉือนแบบเฉือนตรงปกติ (direct simple shear)

การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (direct shear test) ใช้มาตรฐานการทดสอบอ้างอิงจาก มยผ. 302-2551 (รูปที่ 8) สามารถดำเนินการทดสอบได้ทั้งการเฉือนแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ การทดสอบดังกล่าวสามารถกระทำได้ โดยการทดสอบตัวอย่างดินในสภาพไม่อิ่มตัวหรือสภาพที่สามารถกำหนดความชื้นของดินได้ตามความต้องการ เพื่อทราบกำลังรับแรงเฉือนที่ได้ ณ ความชื้นที่ทดสอบนั้น

(2) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (residual shear strength)

ในการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินโดยทั่วไปมักจะหยุดการทดสอบเมื่อค่ากำลังสูงสุด (peak strength) ได้ค่าที่ชัดเจนแล้ว แต่หากทำการเฉือนต่อไปจนเลยจุดซึ่งเป็นค่ากำลังเฉือนที่มากที่สุดจะพบว่า ค่าแรงต้านทานการเฉือนจะลดลง จนกระทั่งเหลือเป็นแรงต้านทานการเฉือนคงที่ ซึ่งเรียกว่า ค่ากำลังคงค้าง (residual strength) แสดงในรูปที่ 9 การทดสอบนี้เหมาะสำหรับบริเวณที่ลาดดินมีการพังทลายและคาดการณ์ว่ามีการสูญเสียกำลังไปแล้ว หรือบางกรณีที่ยืนยันได้ว่าการเคลื่อนตัวของลาดดินตามฤดูกาล การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันจึงควรพิจารณาใช้คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะคงค้างร่วมด้วย

(3) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป (KU-MDS shear test)

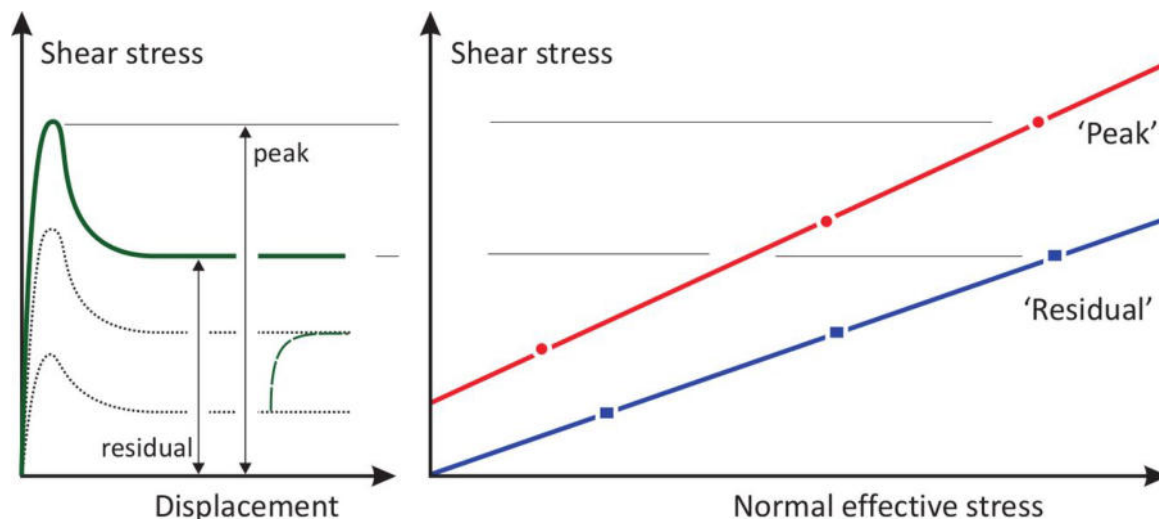
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (direct shear) ทั่วๆไป ใช้ตัวอย่างแบบไม่ถูกรบกวน (undisturbed sample) ในการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่ากำลัง (shear strength parameters, $(c, \bar{c}, \phi, \bar{\phi})$) จากความสัมพันธ์ของ Mohr-Coulomb's ซึ่งในกรณีที่ตัวอย่างเป็นดินที่ผสมทรายอยู่กับที่มีความแปรปรวนตามธรรมชาติ ส่งผลให้บ่อยครั้งที่ตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีลักษณะแตกต่างกัน จึงต้องทำการทดสอบหาค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้ตัวอย่างเพียงตัวอย่างเดียว โดยทำการทดสอบเฉือนตัวอย่างจนเกือบถึงจุดวิบัติของในแต่ละ normal load แล้วจึง unload เพื่อเพิ่ม normal load ใหม่ ซึ่งวิธีนี้ให้ค่ากำลังที่ต่ำเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติเมื่อทดสอบดิน residual soil วิธีนี้ยังเหมาะสมในกรณีที่มีตัวอย่างน้อย

นอกจากการทดสอบแรงเฉือนตามที่กล่าวข้างต้นเพื่อหาค่ากำลังของวัสดุแล้วยังสามารถหาด้วยวิธีการอื่นได้ เช่น การทดสอบแรงอัดสามแกน (triaxial test) เป็นต้น



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบ Direct Shear Test
(ข้อ 4.1.1.7)

ที่มา : www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/index.html



รูปที่ 9 กำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง

(ข้อ 4.1.1.7)

ที่มา : Fredlund and Morganstern (1977)

4.1.1.8 คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงของลาดเอียง

(1) ค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight, γ) ของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ

(2) ค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของวัสดุที่ใช้การคำนวณค่าเสถียรภาพ

ความลาดเอียงจะแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

- กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) แทนด้วยตัวแปร S_u ใช้สำหรับกรณีงานขุดดินและถมดินที่เป็นดินเหนียวอิ่มตัวและมีการก่อสร้างโดยเร็ว

- กำลังรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงรวม (Total Stress) แทนด้วยตัวแปร c_u และ ϕ_u ใช้สำหรับกรณีงานขุดดินและถมดินที่เป็นดินชั้นไม่อิ่มตัวและไม่ทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ดินบดอัดในขณะถมคันดิน เป็นต้น

- กำลังรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) แทนด้วยตัวแปร $\bar{c}$ และ $\bar{\phi}$ ใช้สำหรับกรณีงานขุดดินและถมดินที่เป็นดินอิ่มตัวและสามารถทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น การขุดดินหรือถมดินเสร็จนานแล้ว หรือมีน้ำไหลผ่านคงที่ เป็นต้น

4.1.1.9 การแปลผลการทดสอบ SPT ที่ได้จากการเจาะสำรวจ เป็นค่ากำลังรับแรงของดิน

การทดสอบตอกแบบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ผลการทดสอบที่ได้รับเป็นค่า N คือ ค่า blow count ที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน ซึ่งค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการตอกจากลูกตุ้มส่งถ่ายลงสู่ปลายก้านเจาะ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในการทดสอบ ดังนั้นผู้เจาะสำรวจควรต้องมีการปรับแก้ค่า N จากประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ทดสอบด้วยทุกครั้ง

ผลการทดสอบค่า SPT นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' กับความแข็งแรงของดินเหนียวและดินทรายได้ ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง N' กับความแข็งแรงของดินเหนียว

(ข้อ 4.1.1.9)

N' (blow/30 cm)	ความอ่อน-แข็งของดินเหนียว	cohesion, c (kN/m ²)
<2	อ่อนมาก (very soft)	< 12.5
2-4	อ่อน (soft)	12.5-25
4-8	แข็งปานกลาง (medium)	25-50
8-15	แข็ง (stiff)	50-100
15-30	แข็งมาก (very stiff)	100-200
>30	แข็งมากที่สุด (hard)	>200

ที่มา : Terzaghi และ Peck (1967)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N' กับความแข็งแรงของดินทราย

(ข้อ 4.1.1.9)

N' (Blow/30 cm)	ความหลวม-แน่นของดินทราย	angle of internal friction, ϕ (°)
0-4	หลวมมาก (very loose)	25-30
4-10	หลวม (loose)	27-32
10-30	แน่นปานกลาง (medium)	30-35
30-50	แน่น (dense)	35-40
>50	แน่นมาก (very dense)	38-45

ที่มา : Meyerhof (1956)

การปรับแก้ค่า N เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินสำหรับดินที่มีขนาดละเอียดมากหรือดินทรายตะกอนที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน สามารถปรับแก้ได้จากสมการที่ 1

$$N' = 15 + 0.5 (N - 15) \quad \text{เมื่อ } N > 15 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$= N \quad \text{เมื่อ } N < 15$$

โดย N' = ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว

หมายเหตุ : หากไม่สามารถทำการเจาะสำรวจเพื่อทดสอบหาค่า SPT ในสนามได้ อาจใช้วิธีการอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับทั่วไป เช่น การทดสอบ Kunzelstab penetration test หรือวิธี light ram sounding test เป็นวิธีการหยั่งทดสอบชั้นดินในสนาม โดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไป ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลัง และความหนาของชั้นดินได้

นอกจากนี้ได้มีการรวบรวมคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนจากผลการทดสอบตัวอย่าง ดินที่ผุดมาจากหิน ด้วยวิธี KU-MDS (variable degree of saturation multi stage direct shear test) ซึ่งผลที่ได้จะประกอบไปด้วยค่า cohesion (c) และ friction angle (ϕ) ของแต่ละระดับเปอร์เซ็นต์ ความอิ่มตัว ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผุดมาจากกลุ่มหินที่มีความอ่อนไหวต่อดินถล่ม
(ข้อ 4.1.1.9)

rock group	rock name	cohesion, c (kN/m ²)			internal friction angle, ϕ (degree)		
		Sr= 60%	Sr= 80%	Sr= 95%	Sr= 60%	Sr= 80%	Sr= 95%
G1	Granite	34.0	16.0	12.0	35.51	30.76	28.26
G2	Volcanic	61.0	32.0	19.0	34.10	28.92	22.91
G3	Sandstone and Siltstone	28.0	21.0	15.0	29.46	25.02	27.50
G4	Shale and Mudstone	43.0	21.0	14.0	36.83	31.34	25.99
G5	Interbedded Sedimentary	61.0	21.0	10.0	35.08	29.06	28.52
G6	Metamorphic	42.0	17.0	12.0	34.82	31.11	30.14
G9	Sedimentary rock on Khorat plateau	119.0	60.0	10.0	30.03	28.57	29.45

ที่มา : สุทธิศักดิ์และสุรย์ (2556), สุรย์ (2559)

หมายเหตุ : ค่ากำลังรับแรงของดินในตารางที่ 1 ถึง 3 เป็นเพียงคำแนะนำเท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคง ผู้ออกแบบต้องใช้ดุลพินิจในการคัดเลือกค่าที่เหมาะสม เนื่องจากการได้มาของค่ากำลังรับแรงของดินสามารถนำมาได้จากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบจะพิจารณาเลือกใช้

4.1.2 ตำแหน่งหน้าตัดของพื้นที่ลาดเอียงที่ใช้ในการวิเคราะห์ ให้พิจารณาจากหน้าตัดดังต่อไปนี้

(1) หน้าตัดทั่วไป (typical section)

(2) หน้าตัดวิกฤติ (critical section) ให้พิจารณาจาก

- หน้าตัดที่มีความลึกในการขุดมากที่สุด หรือมีความสูงในการถมมากที่สุด
- หน้าตัดบริเวณที่ชั้นดินมีกำลังต่ำที่สุด หรือชั้นดินอ่อนมีความหนามากที่สุด
- หน้าตัดที่มีความชันมากที่สุด หรือมีความชันในการถมมากที่สุด
- หน้าตัดที่มีน้ำหนักอาคารที่จะก่อสร้างตั้งอยู่

(3) หน้าตัดขณะขุดดินหรือถมดิน (temporary section during excavation or fill) สำหรับกรณีที่มีการแบ่งช่วงการขุดดินหรือถมดิน และมีหน้าตัดหรือแรงกระทำที่แตกต่างจากหน้าตัดทั่วไป

4.2 เงื่อนไขในการวิเคราะห์

ในการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงสำหรับงานก่อสร้างอาคาร งานขุดดินและถมดิน ต้องคำนึงถึงช่วงเวลาสำคัญและปัจจัยต่างๆ ทั้งในการก่อสร้างและการใช้งาน ดังนี้

4.2.1 ช่วงเวลาสำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

(1) ขณะทำการก่อสร้างอาคาร การขุดดินหรือถมดิน

(2) ขณะใช้งานปกติ

(3) สภาวะวิกฤติ เช่น กรณีปริมาณน้ำฝนและช่วงเวลาที่ฝนตกสะสมต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน ส่งผลให้กำลังรับแรงของดินหรือหินลดต่ำลงมาก เป็นต้น

4.2.2 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อเสถียรภาพของพื้นที่ลาดชัน

(1) น้ำหนักกระทำภายนอก (external load) คือ แรงกระทำที่เกิดจากเครื่องจักรในการก่อสร้าง การจราจร หรือสิ่งปลูกสร้าง อาคาร เป็นต้น โดยกำหนดให้น้ำหนักจากเครื่องจักรหรือการจราจรขณะขุดดินหรือถมดินมีค่าไม่น้อยกว่า 20 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (2,000 กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร) และน้ำหนักกระทำภายนอกขณะใช้งานไม่น้อยกว่า 10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (1,000 กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)

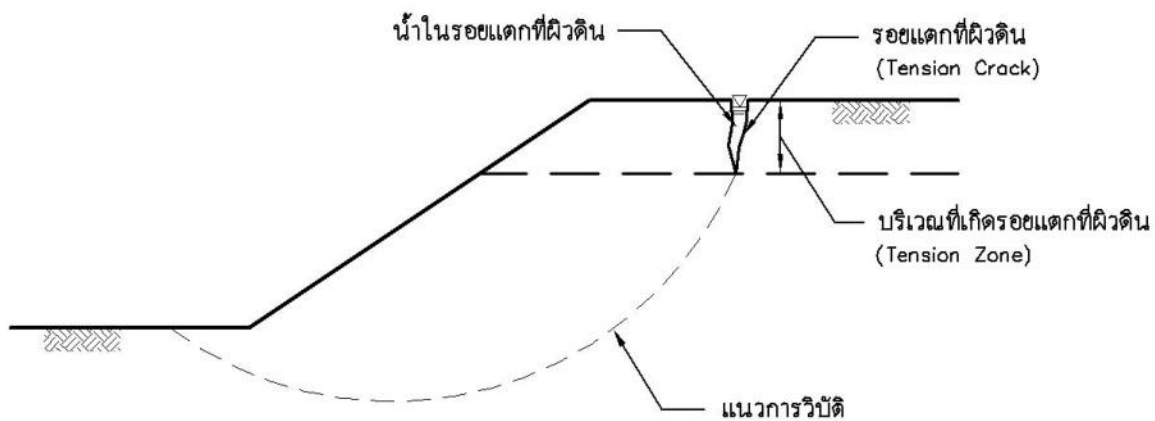
(2) แรงจากแผ่นดินไหว (seismic load) สามารถประยุกต์ใช้หลักการเสมือนสถิตย์ (pseudo static) โดยการใช้สัมประสิทธิ์ความสั่นสะเทือนคูณกับน้ำหนักของมวลดิน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย

(3) ระดับน้ำใต้ดิน (ground water level) เมื่อฝนตกจนทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นจนกระทั่งถึงผิวดิน

(4) ระดับน้ำผิวดิน (surface water level) คือ ระดับน้ำอิสระที่อยู่ด้านข้างพื้นที่ลาดเอียง เช่น แม่น้ำ หรืออ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

(5) วัสดุเสริมแรง (reinforcement) คือ วัสดุที่ใส่เข้าไปในดินเพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพ เช่น เสาเข็ม (pile) เสาเข็มดินซีเมนต์ (cement column) แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) ตาข่ายสังเคราะห์ (geogrid) หรือสลักยึดดิน (soil nail) เป็นต้น

(6) รอยแตกที่ผิวดิน (tension crack) คือ รอยแตกที่เกิดขึ้นบนผิวดินเนื่องจากการแห้งตัว (desiccation crack) หรือการเคลื่อนตัวเล็กน้อยทำให้เกิดแรงดึงบริเวณผิวดินของขอบการขุดดินหรือเนินดิน ซึ่งดินบริเวณที่เกิดรอยแตกจะไม่มีสัมผัสกันจึงไม่สามารถมีแรงต้านทานการวิบัติได้ ผิวดินจึงมักเริ่มต้นเกิดที่ปลายของรอยแตก และหากมีแรงดันน้ำเสริมในรอยแตกดังกล่าว จะทำให้เกิดการวิบัติได้ง่ายขึ้นอีกด้วย ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเกิดรอยแตกที่ผิวดินและแรงดันน้ำในรอยแตก
(ข้อ 4.2.2 (6))

4.3 การคำนวณค่าเสถียรภาพความลาดเอียงโดยวิธีสมมูลจำกัด

การคำนวณค่าเสถียรภาพความลาดเอียงโดยวิธีสมมูลจำกัด (limit equilibrium) เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดเอียง ขึ้นอยู่กับลักษณะการวิบัติ (mode of failure) ซึ่งสามารถแยกออกเป็น 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

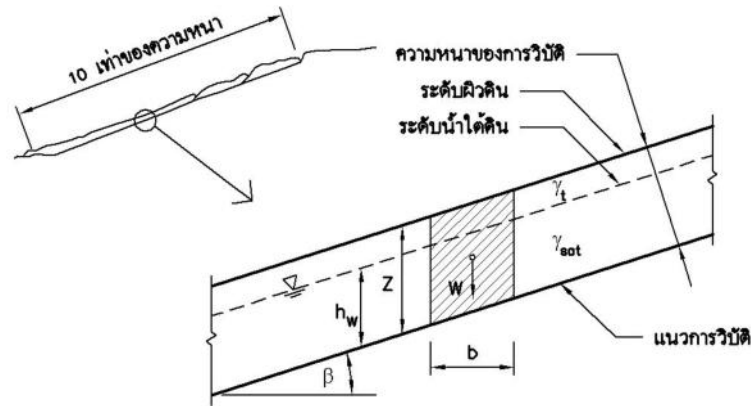
4.3.1 การเลื่อนไถลแบบระนาบ (translational failure)

4.3.1.1 ใช้สำหรับกรณีที่ผิวดินการวิบัติมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ เลื่อนลงตามผิวลาด ซึ่งส่วนใหญ่เกิดกับพื้นที่ลาดเอียงตามธรรมชาติ หรือพื้นที่ลาดเอียงที่มีผิวดินบ่งคับการวิบัติ เช่น ชั้นดินอ่อนซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง การวิบัติจะเกิดบริเวณรอยต่อของชั้นดินทั้งสอง เป็นต้น

4.3.1.2 การเลื่อนไถลแบบระนาบจะพิจารณาโดยเทียบจากสัดส่วนระหว่างความหนาของการวิบัติกับความยาวของระนาบการวิบัติต้องน้อยกว่า 1:10 ดังแสดงในรูปที่ 11

4.3.1.3 อัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อนไถลแบบระนาบสามารถคำนวณโดยสมการที่ 2

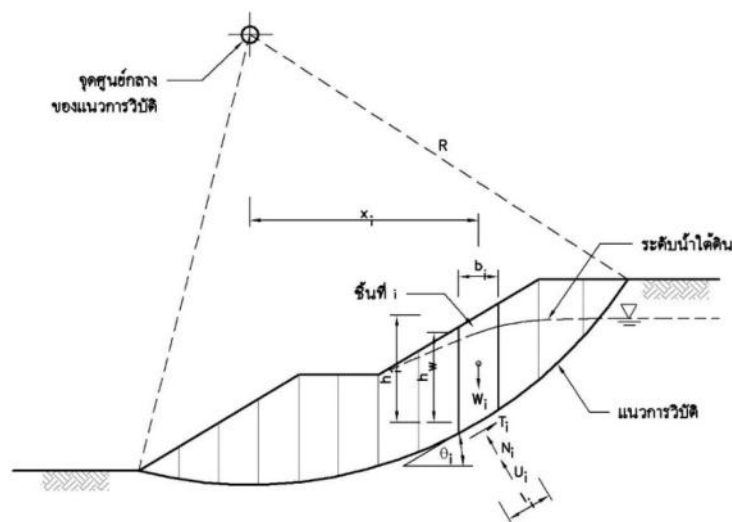
$$F.S. = \frac{\bar{c} + [(\gamma_{sat} - \gamma_w)h_w + \gamma_t(z - h_w)]\tan \bar{\phi} \cos^2 \beta}{[\gamma_{sat}h_w + \gamma_t(z - h_w)]\sin \beta \cos \beta} \dots\dots\dots (2)$$



รูปที่ 11 การเลื่อนไถลแบบระนาบ
(ข้อ 4.3.1.2)

4.3.2 การเลื่อนไถลแบบหมุน (rotational failure)

4.3.2.1 ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous soil) โดยสมมุติว่าแนวการวิบัติเป็นส่วนโค้ง ดังรูปที่ 12 ซึ่งอาจจะเป็นส่วนโค้งวงกลม (circular arc) หรือไม่ใช่ส่วนโค้งวงกลม (non-circular)



รูปที่ 12 การเลื่อนไถลแบบหมุน
(ข้อ 4.3.2.1)

4.3.2.2 อัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อนไถลแบบหมุนสามารถคำนวณโดยวิธีการต่างๆ เช่น Swedish Method, Janbu's Simplified Method และ Bishop's Simplified Method ตามสมการที่ 3 ถึง 8

(1) Ordinary Method of Slices หรือ Swedish Method (Fellenius, 1927)

$$F.S. = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\bar{c}_i L_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - U_i) \cdot \tan \bar{\phi}_i}{\sum_{i=1}^n [W_i \cdot \sin \theta_i]} \right] \dots\dots\dots (3)$$

(2) Janbu's Simplified Method (1954)

$$F.S. = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n \left[\frac{\bar{c}_i b_i + b_i (\gamma_t h_i - \gamma_w \cdot h_{wi}) \cdot \tan \bar{\phi}_i}{\cos \theta_i M_\theta} \right]}{\sum_{i=1}^n \gamma_t b_i \cdot h_i \cdot \tan \theta_i} \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ $M_\theta = \cos \theta_i + \frac{(\sin \theta_i \tan \bar{\phi}_i)}{F.S.} \dots\dots\dots (5)$

โดยที่

f_0 คือ ค่าปรับแก้ซึ่งขึ้นกับสัดส่วนของความลึก (d) และความยาว (L) ของการวิบัติดังรูปที่ 13 สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$f_0 = 1 + b_\ell \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (6)$$

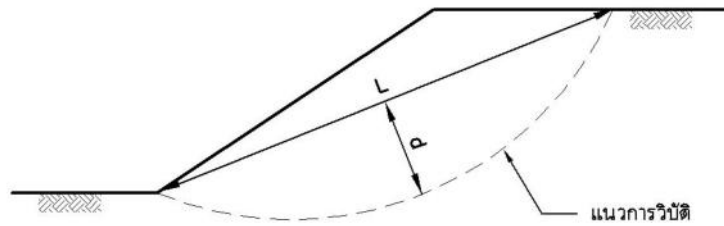
b_ℓ คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับประเภทของดิน ดังนี้

- กรณี $\phi = 0$ ให้ใช้ $b_\ell = 0.69$
- กรณี $c = 0$ ให้ใช้ $b_\ell = 0.31$
- กรณี $\phi > 0$ และ $c > 0$ ให้ใช้ $b_\ell = 0.50$

(3) Bishop's Simplified Method (Bishop, 1955)

$$F.S. = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\bar{c}_i b_i + b_i (\gamma_t h_i - \gamma_w \cdot h_{wi}) \cdot \tan \bar{\phi}_i}{M_\theta} \right]}{\sum_{i=1}^n \gamma_t b_i \cdot h_i \cdot \sin \theta_i} \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ $M_\theta = \cos \theta_i + \frac{(\sin \theta_i \tan \bar{\phi}_i)}{F.S.} \dots\dots\dots (8)$



รูปที่ 13 ความลึกและความยาวของการวิบัติสำหรับ Janbu's Simplified Method

(ข้อ 4.3.2.2(2))

4.3.2.3 วิธีการวิเคราะห์การเลื่อนไถลแบบหมุน

- (1) วาดรูปร่างของพื้นที่ลาดเอียงที่ต้องการวิเคราะห์ พร้อมทั้งกำหนดคุณสมบัติดินและปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่กระทำกับพื้นที่ลาดเอียง
- (2) กำหนดจุดศูนย์กลาง และรัศมี เพื่อสร้างส่วนโค้งของวงกลมแทนลักษณะผิวการวิบัติที่มีโอกาสเกิดหรือเกิดการวิบัติแล้ว
- (3) คำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย
- (4) เปลี่ยนจุดศูนย์กลาง และรัศมีของการวิบัติที่น่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ จนพบค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด จะเป็นลักษณะการวิบัติที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด

4.3.2.4 เกณฑ์สำหรับการวิเคราะห์

โดยทั่วไปการวิเคราะห์เสถียรภาพเสถียรภาพความมั่นคงของลาดชัน ควรวิเคราะห์ทั้งลาดชันที่ตัดหรือถมใหม่ (new slope) ลาดชันเดิมที่เคยตัดหรือถมไว้ก่อน (temporary work) และลาดชันตามธรรมชาติ (natural slope) เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามสภาพลาดชันนั้นๆ

หมายเหตุ: ทุกลาดชันตามธรรมชาติไม่ได้ปลอดภัยเพียงพอในทุกกรณี โดยทั่วไปลาดชันตามธรรมชาติจะเกิดการพังพิบัติช่วงฤดูมรสุม แม้ว่าจะไม่มีการทำกิจกรรมใด ๆ ก็ตาม เช่น การตัดต้นไม้ หรือการพัฒนาพื้นที่รอบๆ พื้นที่ลาดชันตามธรรมชาติ ดังนั้นเสถียรภาพของลาดชันตามธรรมชาติและบริเวณใกล้เคียงพื้นที่โครงการควรประเมินร่วมด้วย โดยปกติไม่ควรเปลี่ยนแปลงสภาพของลาดชันตามธรรมชาติ และทำลายต้นไม้หรือพืชคลุมดินเพราะลาดชันเพิ่งปรับสภาพให้มีความเสถียรมั่นคงขึ้นเพียงเล็กน้อย กรณีที่ลาดชันมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไม่เพียงพอ ไม่ควรก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างทั้งหลายบนพื้นที่ที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดชันตามธรรมชาติในบริเวณข้างเคียง

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ที่แนะนำสำหรับการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเชิงเขาที่มีการก่อสร้างอาคาร หรือการขุดดินและถมดินในกรณีการใช้งานปกติด้วยวิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method, LEM) แสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในช่วงเวลาสำคัญอื่น ๆ (ตามข้อ 4.2.1) สามารถปรับลดลงได้ร้อยละ 15-20 หรือตามความเหมาะสม

ตารางที่ 4 อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเชิงเขา
ที่มีการก่อสร้างอาคาร ในกรณีการใช้งานปกติ
(ข้อ 4.3.2.4)

ประเภทอาคาร	อัตราส่วนความปลอดภัยขั้นต่ำ
(ก) อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน เช่น สถานพยาบาล ที่รับผู้ป่วยไว้ค้างคืน สถานีดับเพลิง อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย อาคารศูนย์สื่อสาร ท่าอากาศยาน โรงไฟฟ้า โรงผลิตและเก็บน้ำประปา	1.80
(ข) อาคารเก็บวัตถุอันตราย เช่น วัตถุระเบิด วัตถุไวไฟ วัตถุมีพิษ วัตถุแก๊สมันตรึงสีหรือวัตถุที่ระเบิดได้	1.80
(ค) อาคารสาธารณะ เช่น โรงมหรสพ หอประชุม หอศิลป์ พิพิธภัณฑ์สถาน หอสมุด ศาสนสถาน สนามกีฬา อัฒจันทร์ ตลาด ห้างสรรพสินค้า ศูนย์การค้า สถานีรถ โรงแรม สถานบริการ และอาคารจอดรถ	1.50
(ง) สถานศึกษา	1.50
(จ) สถานรับเลี้ยงเด็กอ่อน	1.50
(ฉ) อาคารที่มีผู้ใช้อาคารได้ตั้งแต่ห้าพันคนขึ้นไป	1.50
(ช) อาคารที่มีความสูงตั้งแต่สิบห้าเมตรขึ้นไป	1.50
(ซ) สะพานหรือทางยกระดับที่มีช่วงระหว่างศูนย์กลางตอม่อยาวตั้งแต่สิบเมตรขึ้นไป	1.50
(ณ) เขื่อนเก็บกักน้ำ เขื่อนทดน้ำหรือฝายทดน้ำ ที่ตัวเขื่อนหรือตัวฝายมีความสูงตั้งแต่สิบเมตรขึ้นไป	1.50
(ญ) ถนนสายหลัก ทางหลวงสายหลัก	1.50
(ฎ) โกดังเก็บสินค้า อาคารเก็บของ พืชผลทางการเกษตร (ไม่มีผลกระทบต่อชีวิต)	1.30
(ฏ) พื้นที่โล่ง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่การเกษตร ลานจอดรถ ถนนสายรอง (ไม่มีผลกระทบต่อชีวิต)	1.30

ตารางที่ 5 อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเชิงเขา
ที่มีการขุดดินหรือถมดิน ในกรณีการใช้งานปกติ
(ข้อ 4.3.2.4)

ประเภทงานขุดดินหรือถมดิน	อัตราส่วนความปลอดภัยขั้นต่ำ
งานขุดดินแบบถาวร และมีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียงที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตหรือทรัพย์สิน	1.80
งานขุดดินแบบถาวร และไม่มีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียง	1.50
งานขุดดินแบบชั่วคราว และมีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียงที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตหรือทรัพย์สิน	1.50
งานขุดดินแบบชั่วคราว และไม่มีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียง	1.30
งานถมดินแบบถาวร และมีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียงที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตหรือทรัพย์สิน	1.80
งานถมดินแบบถาวร และไม่มีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียง	1.50
งานถมดินแบบชั่วคราว และมีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียงที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตหรือทรัพย์สิน	1.50
งานถมดินแบบชั่วคราว และไม่มีสิ่งก่อสร้างในระยะใกล้เคียง	1.30

4.4 การรายงานผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเอียง

การรายงานผลการคำนวณค่าเสถียรภาพความลาดเอียงต้องแสดงข้อมูลอย่างน้อย ดังนี้

- (1) รายงานข้อมูลชั้นดิน
- (2) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ
- (3) ลักษณะรูปร่างของพื้นที่ลาดเอียง
- (4) ลักษณะแนวการวิบัติ
- (5) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

5. การคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงโดยวิธีอื่นๆ

การคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงโดยวิธีอื่นๆ นอกจากวิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method, LEM) เพื่อต้องการหาปริมาณการเคลื่อนตัวหรือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลาดเอียง สามารถคำนวณโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งวิธีที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน คือวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method, FDM) ทั้งนี้ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขมีความยุ่งยากซับซ้อน ส่วนใหญ่จึงต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ทั้งนี้การเตรียมข้อมูลและเงื่อนไขในการวิเคราะห์ให้เป็นไปตามข้อ 4.1 และข้อ 4.2 ตามลำดับ

5.1 เกณฑ์สำหรับการวิเคราะห์

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ต้องสามารถนำมาประเมินว่า

(1) สถานะหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นในมวลดินต้องไม่มากกว่ากำลังต้านทานของดิน (mobilized strength of soil) จนส่งผลให้บริเวณที่เกิดสภาพพลาสติก (plastic zone) ขยายตัวไปเป็นระนาบวิบัติ (failure plane)

(2) ปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในมวลดิน จะต้องอยู่ในเกณฑ์ใช้งานที่ยอมรับได้ (serviceability) โดยไม่ส่งผลต่อการใช้งานของอาคาร สิ่งก่อสร้าง และโครงสร้างพื้นฐานข้างเคียง

5.2 การรายงานผล

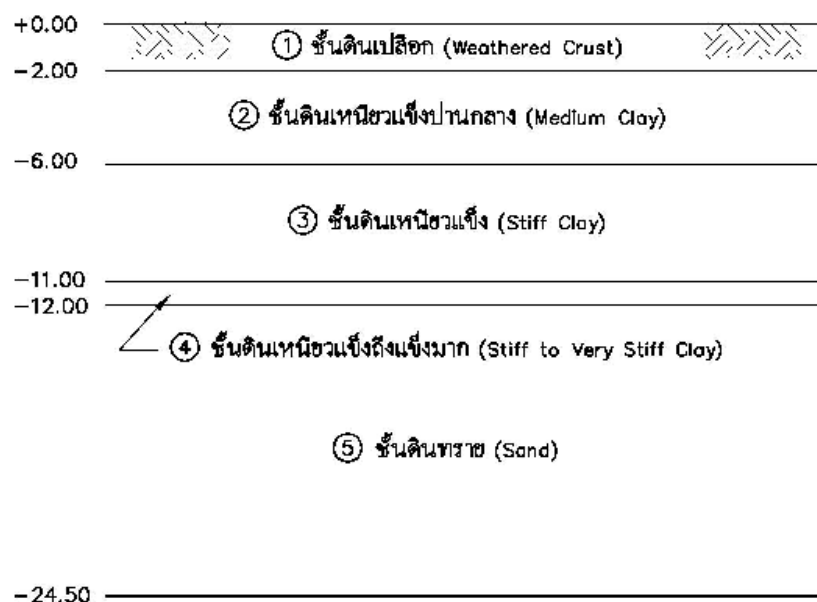
การรายงานผลอาจจะแสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟิก และ/หรือรูปแบบตารางตัวเลข ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลอย่างน้อย ดังนี้

- (1) ข้อมูลชั้นดิน
- (2) ค่าตัวแปรและแบบจำลอง (model) ที่ใช้ในการคำนวณ
- (3) รูปร่างของพื้นที่ลาดเอียง การแบ่งชิ้นส่วนย่อย (mesh generation) และการกำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition)
- (4) ลักษณะการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนย่อย (mesh deformation)
- (5) ค่าหน่วยแรงและความเครียดของแต่ละชิ้นส่วนย่อย
- (6) บริเวณที่เกิดสภาพพลาสติก (plastic zone)
- (7) ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (ถ้ามี)

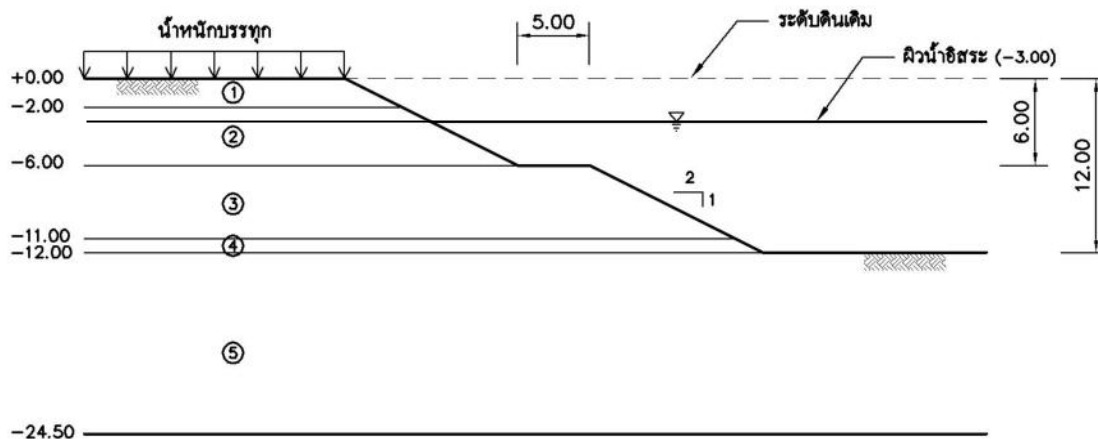
6. ตัวอย่างการคำนวณเสถียรภาพความลาดชัน

ตัวอย่างรายละเอียดการคำนวณเสถียรภาพความลาดชันได้มีการจัดทำไว้ในคู่มือการใช้มาตรฐานประกอบการปฏิบัติ ตามกฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดินอย่างละเอียด ซึ่งในส่วนของมาตรฐานนี้จะนำเสนอบางส่วน เพื่อเป็นตัวอย่างสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ขั้นตอนการคำนวณเสถียรภาพความลาดชัน เริ่มจากการสำรวจสภาพพื้นที่โครงการ เจาะสำรวจชั้นดิน แปรผลสภาพชั้นดินและลักษณะของชั้นดิน รูปที่ 14 และตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างลักษณะชั้นดินที่ได้จากการแปรผลข้อมูลจากการเจาะสำรวจและการทดสอบ รูปที่ 15 ลักษณะหน้าตัดที่จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพ ความลาดชัน พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์



รูปที่ 14 ตัวอย่างลักษณะของชั้นดินที่ใช้ในการคำนวณ
(ข้อ 6)



รูปที่ 15 ตัวอย่างลักษณะหน้าตัดสำหรับการคำนวณค่าเสถียรภาพ

(ข้อ 6)

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของดินที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีสมมูลจำกัด

(ข้อ 6)

ลำดับ	ชั้นดิน	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	γ (kN/m^3)	E (kN/m^2)	ν
1	ดินเปลือก	50.0	10.0	17.7	12,000	0.3
2	ดินเหนียวแข็งปานกลาง	27.9	0.0	15.2	6,696	0.3
3	ดินเหนียวแข็ง	44.4	0.0	23.1	10,656	0.3
4	ดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก	79.3	0.0	16.2	19,032	0.3
5	ดินทราย	0.0	38.5	19.3	30,000	0.3

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ด้วยวิธีสมมูลจำกัดใช้ค่า c , ϕ และ γ เท่านั้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ค่า c , ϕ , γ , E และ ν

6.1 ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีสมมูลจำกัดโดยใช้ตาราง

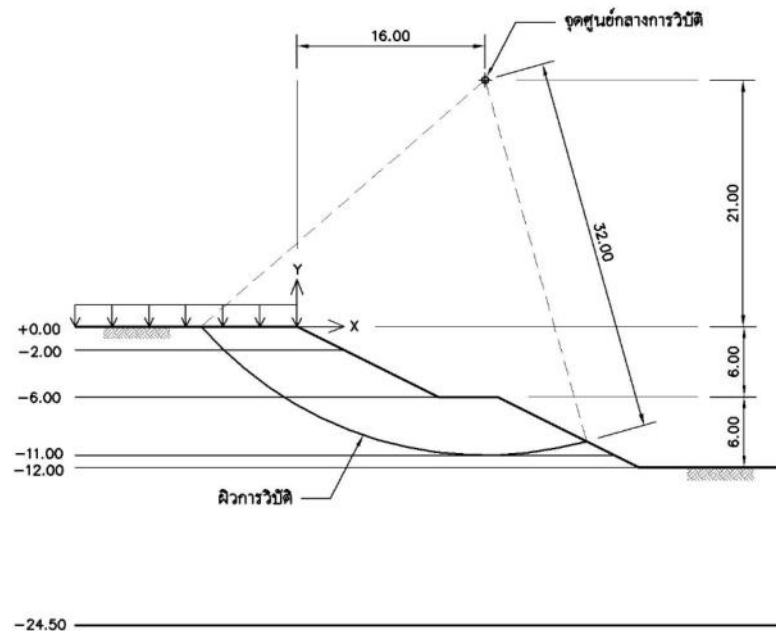
การคำนวณโดยใช้ตารางคำนวณสามารถทำได้ ดังนี้

(1) วาดรูปหน้าตัดที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วกำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางและรัศมีเพื่อเป็นตัวแทนของวงการวิบัติ ดังรูปที่ 16

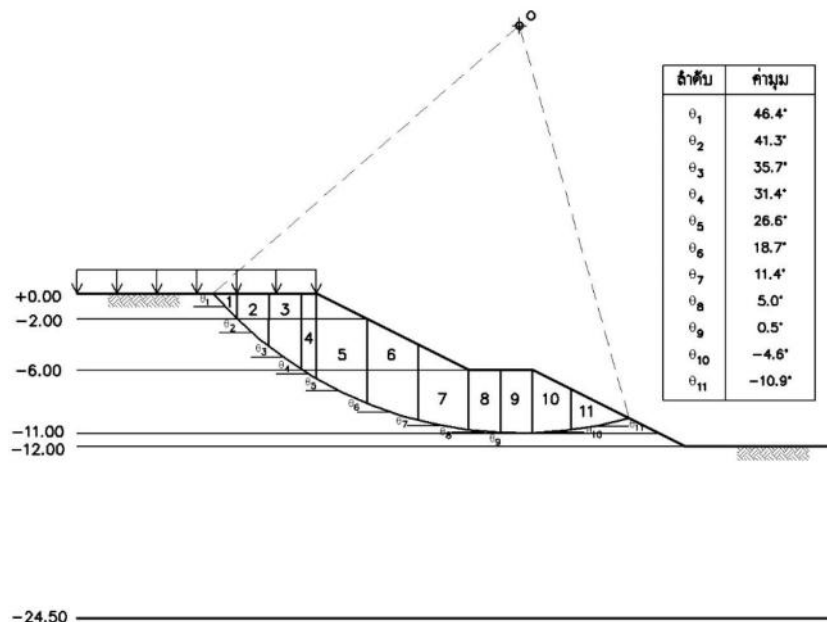
(2) แบ่งชั้นส่วนมวลดินตามแนวดิ่งให้มีความกว้างเท่าๆ กัน และแบ่งเพิ่มเติมบริเวณที่เป็นจุดเปลี่ยนความชัน และบริเวณที่วงการวิบัติตัดกับชั้นดิน ดังรูปที่ 17

(3) วัดความกว้างของแต่ละชั้นส่วน คำนวณน้ำหนัก และหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบริเวณที่วางการวิบัติตัดผ่าน แล้วนำผลใส่ในตารางคำนวณ

(4) คำนวณค่าต่างๆ ในตารางโดยวิธี Simplified Bishop ดังตารางที่ 7 ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการวิบัติที่กำหนดเท่ากับ 2.06



รูปที่ 16 การกำหนดจุดศูนย์กลางและรัศมีสำหรับการวิเคราะห์
(ข้อ 6)



รูปที่ 17 การแบ่งชั้นส่วนมวลดินตามแนวดิ่ง
(ข้อ 6)

ตารางที่ 7 ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีสมดุลจำกัด โดยใช้ตารางคำนวณ (ข้อ 6)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)				(12)	(13)			
Slice No.	c (kN/m ²)	ϕ (deg.)	b _i (m)	θ _i (deg.)	h _i (m)	tanϕ	c.b _i (kN)	γ.h _i .b _i (kN)	I(T)+(8))* (9) (kN)	M _θ				(10)/M _θ				(9)*sinθ _i
										T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	
										T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	
1	50	10	1.90	46.44	1.05	0.18	94.84	37.15	101.39	0.77	0.75	0.75	0.75	130.94	134.98	134.37	135.00	26.92
2	27.9	0	2.53	41.27	3.05	0.00	70.46	132.23	70.46	0.75	1.00	0.75	0.75	93.74	70.56	93.74	93.74	87.22
3	27.9	0	2.55	35.67	5.00	0.00	71.08	208.90	71.08	0.81	1.00	0.81	0.81	87.49	71.35	87.49	87.49	121.81
4	44.40	0	1.18	31.41	6.31	0.00	52.20	122.69	52.20	0.85	0.99	0.85	0.85	61.16	52.51	61.16	61.16	63.94
5	44.40	0	4.00	26.56	6.78	0.00	177.60	475.02	177.60	0.89	0.99	0.89	0.89	198.55	178.85	198.55	198.55	212.40
6	44.40	0	4.00	18.67	6.44	0.00	177.60	496.46	177.60	0.95	0.99	0.95	0.95	187.46	178.73	187.46	187.46	158.93
7	44.40	0	4.00	11.44	5.54	0.00	177.60	474.00	177.60	0.98	1.00	0.98	0.98	181.20	178.43	181.20	181.20	94.01
8	44.40	0	2.50	5.05	4.88	0.00	111.00	281.82	111.00	1.00	1.00	1.00	1.00	111.43	111.40	111.43	111.43	24.81
9	44.40	0	2.50	0.46	5.00	0.00	111.00	288.75	111.00	1.00	1.00	1.00	1.00	111.00	111.42	111.00	111.00	2.32
10	44.40	0	3.08	-4.61	4.11	0.00	136.75	292.42	136.75	1.00	1.00	1.00	1.00	137.20	137.10	137.20	137.20	-23.50
11	44.40	0	4.55	-10.94	1.88	0.00	202.02	197.60	202.02	0.98	1.00	0.98	0.98	205.76	202.13	205.76	205.76	-37.50
Σ										1505.95	1427.47	1509.37	1510.01	731.35				

F.S. = SUM of COL.(12)/SUM of COL.(13)

Trial No.	T1	T2	T3	T4
Assumed F	1.500	2.059	1.952	2.064
Calculated F	2.059	1.952	2.064	2.065
Difference of F	-0.559	0.107	-0.112	-0.001

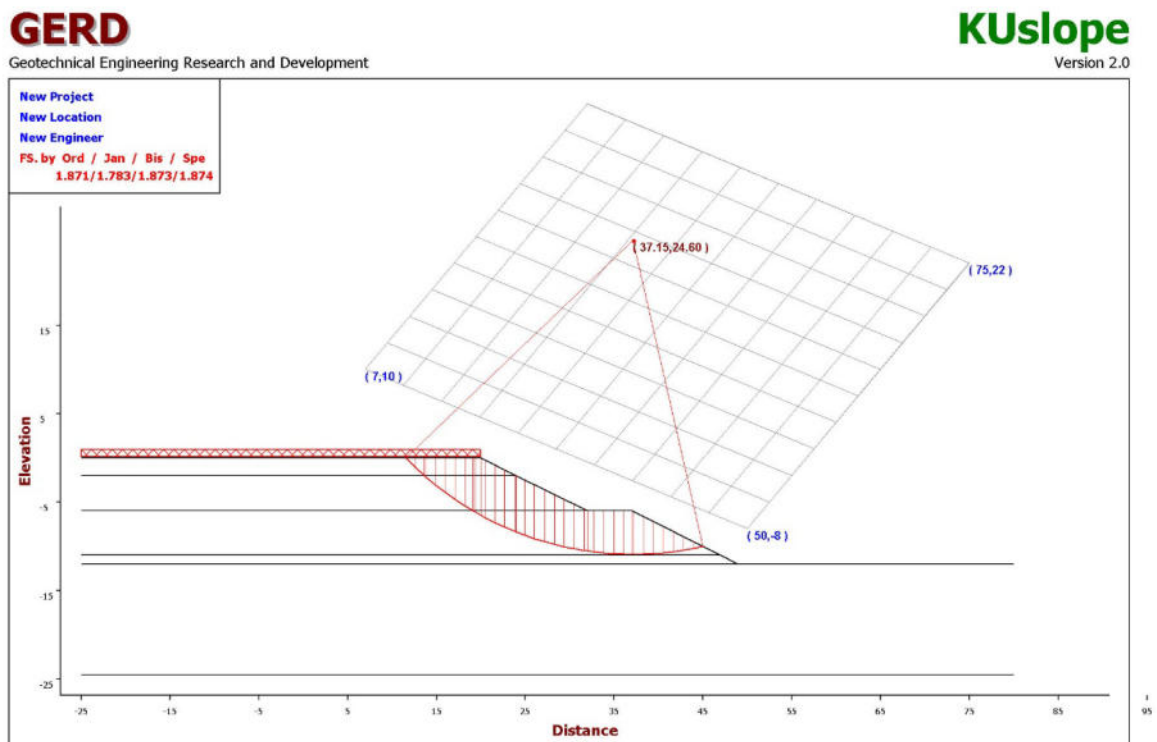
6.2 ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีสมมูลจำกัดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถทำได้ ดังนี้

- (1) ป้อนข้อมูลคุณสมบัติดินและข้อมูลรูปร่างของชั้นดิน
- (2) กำหนดวิธีการค้นหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุด

การคำนวณเสถียรภาพลาดชันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้หลายโปรแกรม เช่น KUslope 2.0 ,Slope-W, Slide เป็นต้น ตัวอย่างผลการคำนวณใช้โปรแกรม KUslope 2.0 แสดงดังรูปที่ 18 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ลาดชันมีความปลอดภัยเพียงพอทั้งในระหว่างการก่อสร้างและใช้งาน คือในระหว่างการก่อสร้างมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.87-1.96 (มากกว่า 1.30) และในช่วงการใช้งานมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.56-2.46 (มากกว่า 1.50)



รูปที่ 18 ตัวอย่างผลการคำนวณโดยโปรแกรม KUslope 2.0
(ข้อ 6)

6.3 ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถทำได้ ดังนี้

การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม Plaxis, Midas เป็นต้น ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีหลักการที่คล้ายกัน ซึ่งอาจมีรายละเอียดการใช้งานที่แตกต่างกันบ้าง โดยทั่วไปมีหลักการดังนี้

(1) กำหนดคุณสมบัติชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

(2) กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

(3) แบ่งชิ้นส่วนย่อย (mesh generation) สำหรับแต่ละกรณีการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 19

(4) กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ เช่น หน่วยแรง ระดับน้ำ เป็นต้น

(5) วิเคราะห์หน่วยแรงในมวลดิน ลักษณะการเคลื่อนตัว และบริเวณที่เกิดสภาพพลาสติก (plastic zone) ผลการวิเคราะห์สำหรับแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 20 ถึง 22 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 สรุปผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

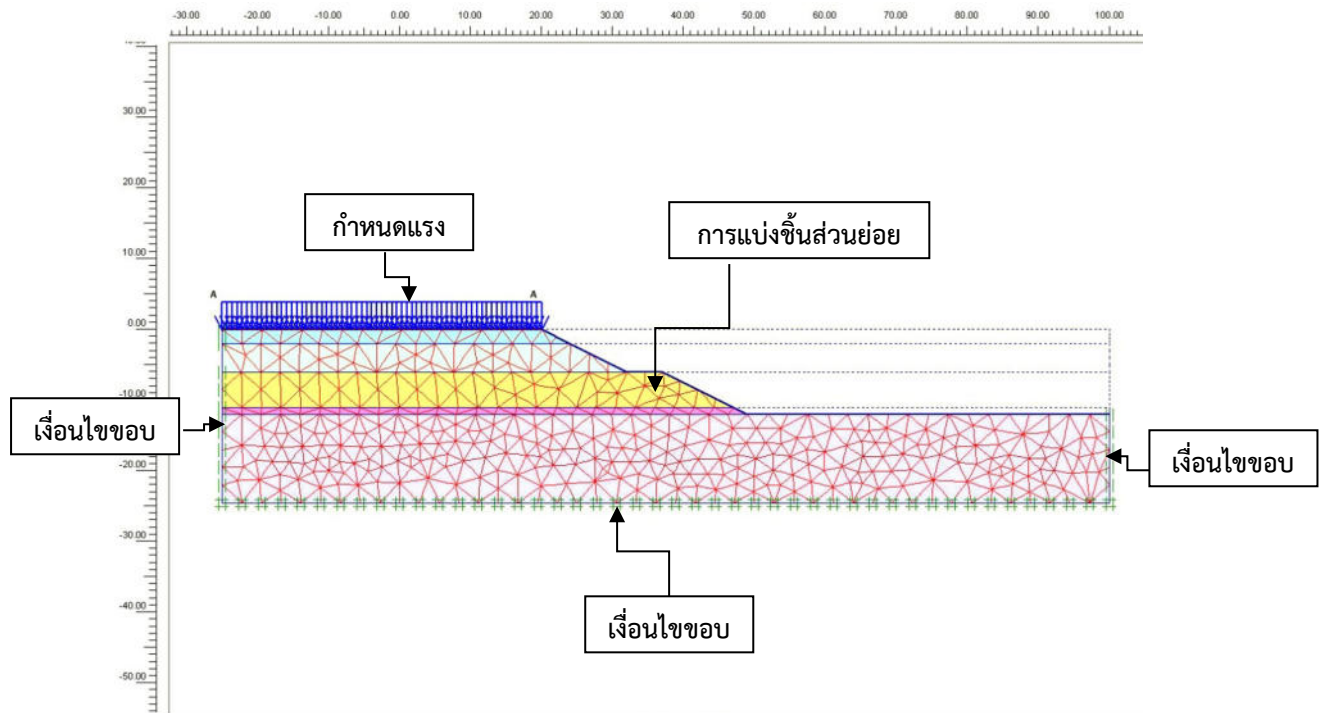
(ข้อ 6)

ลำดับ	กรณี	Live Load (kN/m ²)	F.S.	ระยะการเคลื่อน ตัวในแนวราบ (cm.)
1	กรณีทำการขุดดินที่ความลึกไม่เกิน 6 เมตร	20	2.32	5.5
2	กรณีทำการขุดดินที่ความลึกไม่เกิน 12 เมตร (ต่อจากกรณี 1)	20	2.04	7.1
3	กรณีหลังจากขุดดินแล้วเสร็จ และมีน้ำในบ่อขุดดิน	10	2.92	5.0
4	กรณีระดับน้ำในบ่อลดระดับอย่างรวดเร็ว	10	1.90	7.4

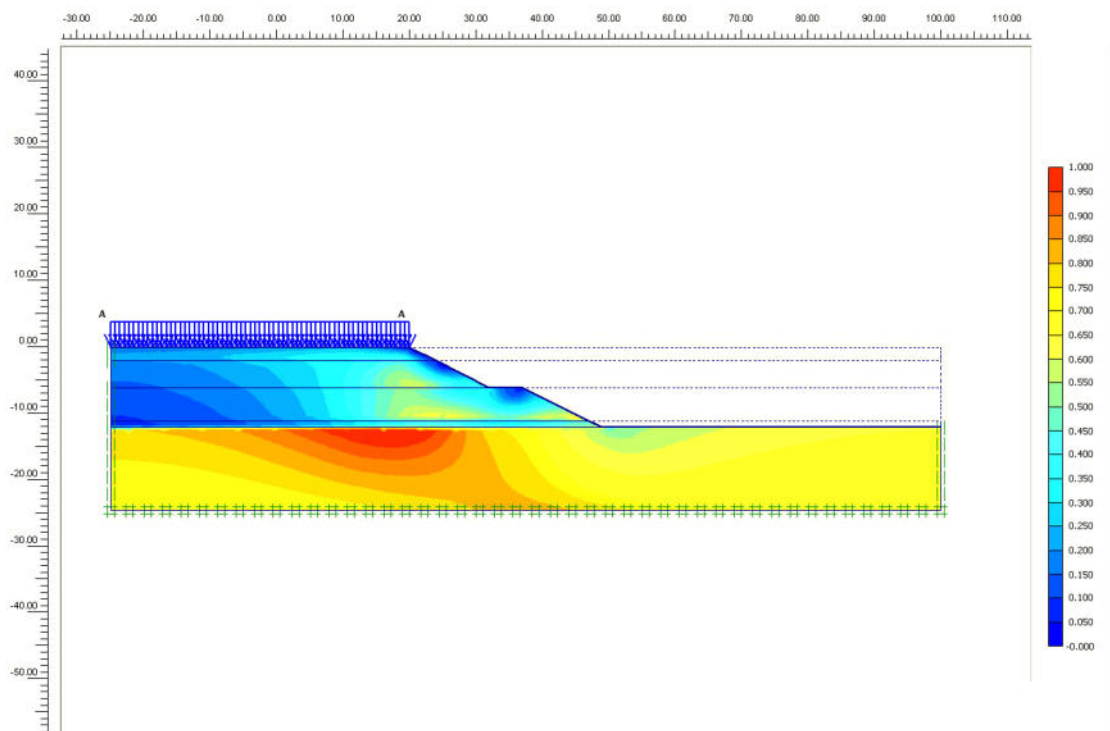
หมายเหตุ : การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้าง เช่น ทำการขุดดินที่ความลึก 6 เมตร ขั้นตอนต่อมาทำการขุดต่อจากเดิม 6 เมตร ขุดต่อไปถึง 12 เมตร หลังจากนั้นเติมน้ำเต็มบ่อ และสมมติกรณีน้ำลดอย่างรวดเร็ว เป็นต้น

6.4 การออกแบบป้องกันการพังทลายของพื้นที่ลาดเอียง

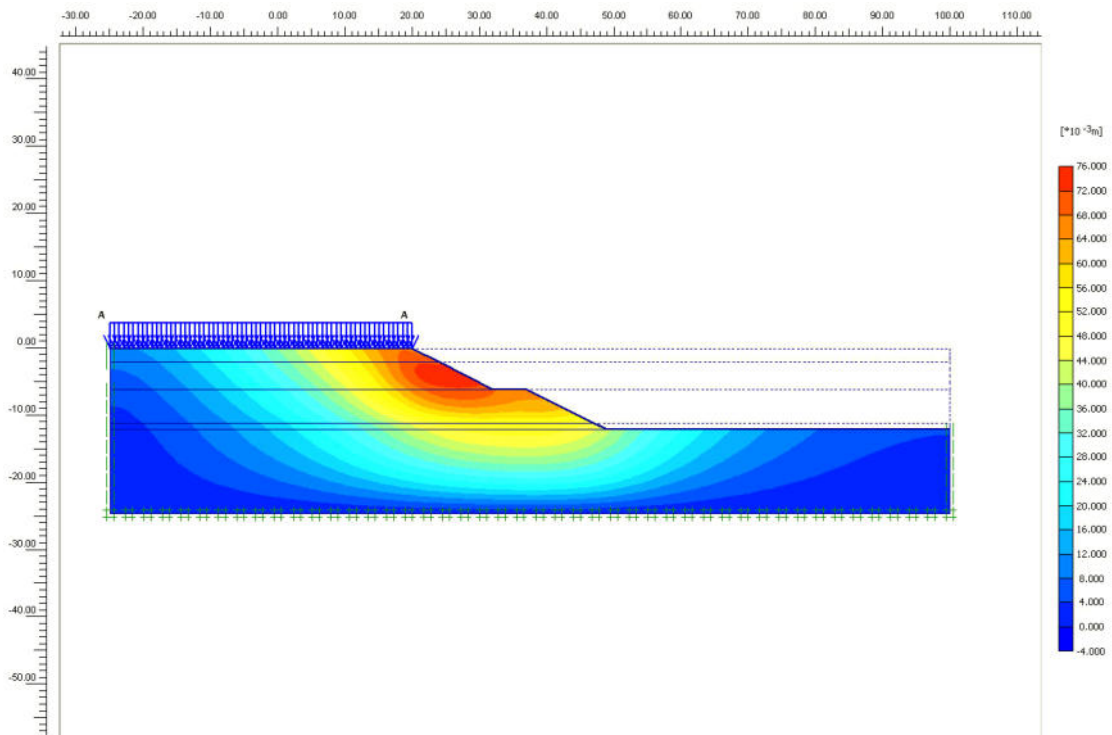
สำหรับตัวอย่างการออกแบบป้องกันการพังทลายของพื้นที่ลาดเอียงด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การเสริมแรงด้วย เสาเข็ม เข็มพืด เข็มสมอ เป็นต้น แสดงรายละเอียดในคู่มือการใช้มาตรฐานประกอบการปฏิบัติ ตามกฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดิน



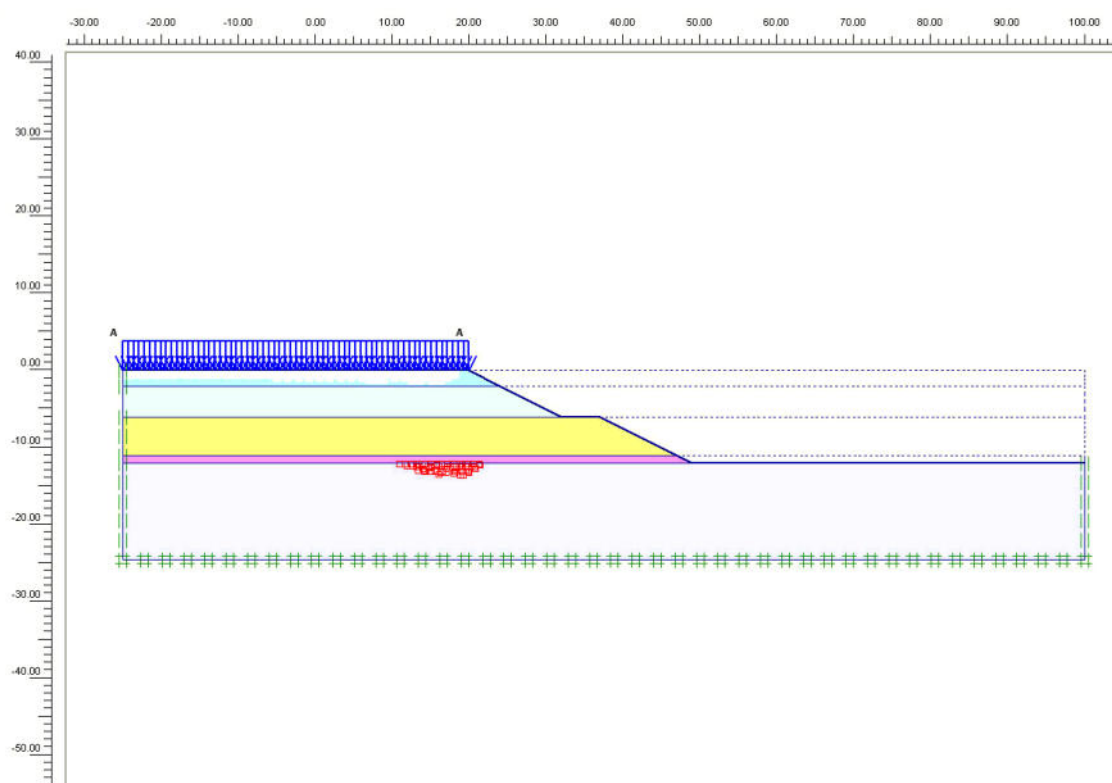
รูปที่ 19 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนย่อยและการกำหนดเงื่อนไขขอบ
(ข้อ 6)



รูปที่ 20 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในมวลดิน
(ข้อ 6)



รูปที่ 21 ตัวอย่างลักษณะการเคลื่อนตัว
(ข้อ 6)



รูปที่ 22 ตัวอย่างบริเวณที่เกิดสภาพพลาสติก
(ข้อ 6)

7. เอกสารอ้างอิง

- 7.1 รายงานการศึกษาพฤติกรรมการเกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม ในพื้นที่ต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับกำหนดเกณฑ์และวิธีการในการเตือนภัย, 2551. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 7.2 วรากร ไม้เรียงและบรรพต กุลสุวรรณ, 2548. การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 7.3 วรากร ไม้เรียงและนางลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์, 2546. เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 7.4 สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2555. สารคดีภาพ วิศวกรรมปฐพี ชุด ธรณีภัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. หจก. พรวิ้น, กรุงเทพฯ.
- 7.5 สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และ สุรย์ พัฒนาประทีป, 2556. “คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ผุพังมาจากหินแกรนิตยุคครีเตเชียสในประเทศไทยสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินโอกาสในการเกิดดินถล่ม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18. โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่. ระหว่างวันที่ 8-10 พฤษภาคม 2556 จัดโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- 7.6 สุรย์ พัฒนาประทีป, 2559. การวิเคราะห์โอกาสเกิดดินถล่มด้วยวิธีความน่าจะเป็นที่มีผลจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 7.7 Bishop, A.W., 1955. “The use of the slip circle in the stability analysis of slopes”, Geotechnique Vol. 5(1).
- 7.8 Fellenius, W., 1927. “Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion und unter Annahme kres-zylindrische Gleitflächen“, Ernst, Berlin.
- 7.9 Fredlund and Morganstern, 1997. Stress State Variables for Unsaturated Soils. Cited by D.G. Fredlund and H. Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Son, INC., New York.
- 7.10 Janbu, N., 1954. "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis", Proceedings, European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm.
- 7.11 Meyerhof, G.C., 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.82, No.SM1, 1-19 pp.
- 7.12 Terzaghi, K., R.B. Peck and G. Mesri., 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3rd , John Wiley & Sons, Singapore, 549 p.

7.13 Yoshinaka, R. and T.F.Onodera. 1997. Undisturbed sampling of decomposed granite soil and its mechanical properties. Soil sampling paper presented at the specialty session 2 internal conference on soil mechanical and foundation engineering, Tokyo.