

บทที่ 5

การจำลองความลาดเอียงของมวลหิน

เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีและผลการจำลองความลาดเอียงของมวลหินเพื่อทดสอบศักยภาพของแท่นทดสอบที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งจะประกอบด้วย (1) การทดสอบเพื่อหามุมเสียดทานพื้นฐานของตัวอย่างหิน (2) การจำลองการพังทลายของความลาดเอียงของรอยแตกภายใต้สภาวะแห้ง เพื่อศึกษาการพังทลายทั้งแบบแผ่นระนาบและแบบพลิกคว่ำ (3) การจำลองการพังทลายของความลาดเอียงที่จมน้ำ เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำต่อเสถียรภาพของความลาดเอียงของมวลหิน และ (4) การทดสอบผลกระทบของคลื่นไหวสะเทือนต่อเสถียรภาพของความลาดเอียงของมวลหิน

5.1 การทดสอบเพื่อวัดมุมเสียดทานพื้นฐาน

วิธีการทดสอบแบบ Tilt Test ได้นำมาใช้เพื่อหามุมเสียดทานของผิวหินที่ถูกตัด โดยมีการผันแปรขนาดของตัวอย่างหินที่อยู่ด้านบน และมีการนำน้ำหนักของตัวอย่างหินมาใช้ในการคำนวณน้ำหนักกดทับในแนวตั้งฉาก ตัวอย่างหินแต่ละขนาดจะมีการทดสอบซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบ ซึ่งพบว่ามุมเสียดทานพื้นฐานมีค่าประมาณ 26° และค่าความเค้นยึดติดเท่ากับ 0.053 kPa ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบของ ฌูฟล เจ้มทอง (2549) ที่ได้เสนอผลว่าค่าความแข็งแรงในแกนเดียวของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานนี้มีค่า $72.37 \pm 8.53 \text{ MPa}$ และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่า $18.43 \pm 1.08 \text{ GPa}$ (Kemthong, 2006)

5.2 การทดสอบการพังทลายแบบไหลเลื่อนในแนวระนาบของรอยแตกภายใต้สภาวะแห้ง

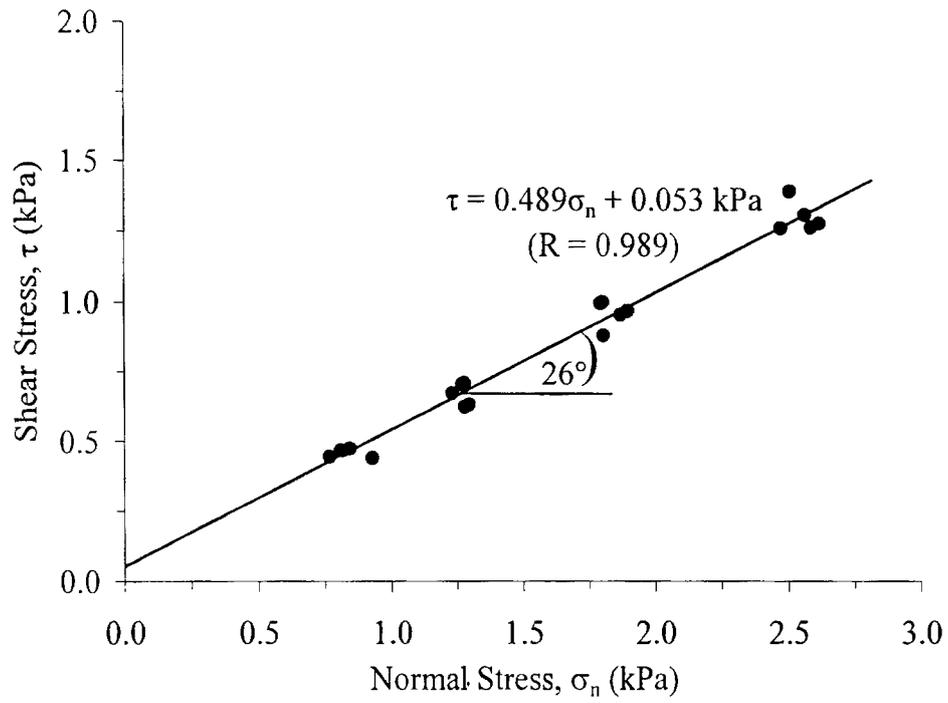
การวิเคราะห์การพังทลายแบบไหลเลื่อนในแนวระนาบใช้หลักการคำนวณการพังทลายของ Hoek and Bray (1981) จากนั้นนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพและจากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FLAC_Slope

5.2.1 การจำลองการพังทลายแบบแผ่นระนาบ

การจำลองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม จากตัวอย่างหิน 3 ขนาด คือ กลุ่มการทดสอบด้วยตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร กลุ่มการทดสอบด้วยตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และกลุ่มการทดสอบด้วยตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบจะผันแปรความสูงของความลาดเอียง มุมของระนาบที่ไหลเลื่อน และมุมที่ผิวหน้าความลาดเอียง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบ Tilt Test เพื่อหาค่ามุมเสียดทานพื้นฐานของผิวตัวอย่างหินทราย หมวดหิน
ภูพาน

Sample No.	Width (mm)	Length (mm)	Area (mm ²)	Weight (g)				ϕ_b (degrees)			
				1	2	3	avg.	1	2	3	avg.
1	43.35	43.50	1885.73	170.2	170.6	170.6	170.5	27	30	30	30
2	40.35	42.00	1694.70	177.1	177.2	177.4	177.2	25	27	24	25
3	41.85	41.85	1751.42	172.9	172.9	172.3	172.7	29	31	28	29
4	41.80	41.85	1749.33	167.7	167.9	168.3	168.0	30	30	29	30
5	41.15	41.20	1695.38	162	160.8	161.4	161.4	30	27	30	30
6	41.20	82.15	3384.58	500.6	500.7	500.6	500.6	29	32	29	29
7	40.75	82.10	3345.58	497.6	497.6	497.3	497.5	29	27	29	29
8	41.95	81.50	3418.93	496.2	495.8	495.9	496.0	29	26	26	26
9	42.70	82.15	3507.81	514.9	515.5	515.1	515.2	26	29	26	26
10	41.45	82.75	3429.99	489.9	490.2	490.7	490.3	30	29	27	29
11	40.25	81.30	3272.33	684.3	684.1	683.6	684.0	29	29	28	29
12	40.25	79.80	3211.95	656.7	657.1	657.1	657.0	27	25	26	26
13	38.80	80.00	3104.00	651.5	651.6	651.7	651.6	28	30	29	29
14	38.45	79.45	3054.85	662.5	662.2	662.7	662.5	29	27	27	27
15	38.40	80.80	3102.72	663.6	663.4	663.6	663.5	27	25	27	27
16	41.65	82.15	3421.55	999.3	999.2	999.3	999.3	29	28	29	29
17	40.70	82.30	3349.61	982.1	982.2	982.3	982.2	26	26	26	26
18	42.70	82.35	3516.35	994.6	994.1	994.2	994.3	28	27	26	27
19	42.30	81.25	3436.88	1007.2	1007.2	1007.1	1007.2	27	27	26	27
20	41.15	84.85	3491.58	1035.1	1035.2	1034.9	1035.1	27	26	25	26



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบ Tilt Test ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นแรงเฉือน

- 1) วัดการเอียงตัวของคานยกปรับระดับมุมเอียงที่จุดเริ่มต้น (ψ_{p0})
- 2) ทำการจัดเรียงตัวอย่างหินในแนวนอนบนคานยกปรับระดับ โดยเรียงตามความยาวของคานยก (ประมาณ 150 เซนติเมตร) ชั้นบนจะเรียงให้มีลักษณะเป็นความเอียงที่กำหนดมุมของผิวหน้าลาดเอียงเริ่มต้น (ψ_{p0}) ซึ่งสามารถผันแปรจาก 20° ถึง 51° และผันแปรความสูง กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างฐานและด้านบนสุดของความลาดเอียง (H) ตั้งแต่ 12 ถึง 61 เซนติเมตร
- 3) ปิดแบบจำลองด้วยแผ่นอะคลิลิก เพื่อป้องกันการพังทลายออกมาด้านนอก
- 4) หลังจากการเรียงหินเสร็จสิ้น ทำการหมุนรอกเพื่อยกระดับของคานเพื่อให้ตัวอย่างหินมีมุมเอียงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหินด้วยสายตาและบันทึกภาพการเคลื่อนที่ด้วยกล้องวิดีโอ
- 5) ทันทีกตัวอย่างหินเกิดการเคลื่อนตัว จะหยุดหมุนคานยก ซึ่ง ณ จุดนี้ถือว่าเป็นจุดวิกฤติ หินที่จัดเรียงจะเกิดรอยแตกและเกิดการพังทลายบริเวณด้านหน้าความลาดเอียง
- 6) ทำการวัดมุมเอียงของคานยก (ψ_p) จากนั้นคำนวณหาความสูงของความลาดเอียงที่จุดพังทลาย (H) และมุมของผิวหน้าลาดเอียงที่จุดพังทลาย (ψ_p)
- 7) นำค่าตัวแปรที่ได้มาคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัยตามกฎของ Hoek and Bray (1981)
- 8) เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณกับผลจากการสังเกตการณ์

5.2.2 การคำนวณเสถียรภาพของความลาดเอียงในแบบจำลอง

การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ของความลาดเอียงตามหลักการของ Coulomb คือ

$$FS = \frac{c \cdot A}{W \cdot \sin \psi_p} + \cot \psi_p \cdot \tan \phi \quad (5.1)$$

เมื่อ c คือ ความเค้นยึดติดของหิน A คือ พื้นที่ของผิวหน้าที่เกิดการไหลเลื่อน W คือ น้ำหนักของตัวอย่างหิน ψ_p คือ มุมเอียงของระนาบ และ ϕ คือ มุมเสียดทานของหิน

การคำนวณค่าน้ำหนัก (W) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนเพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ กล่าวคือ มีการคำนึงถึงน้ำหนักกดทับด้านบนของความลาดเอียง ดังนั้น น้ำหนักของมวลหินจึงหาได้จาก

$$W = W_1 + W_2$$

โดย
$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (\cot \psi_p - \cot \psi_1) \cdot t \quad (5.2)$$

$$\text{และ } W_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \left[\frac{H^2 (\cot \psi_p - \cot \psi_f)^2}{\cot(\alpha - \psi_p) + \cot \psi_p} \right] \cdot t \quad (5.3)$$

โดยที่ γ คือ หน่วยน้ำหนักของหิน ψ_f คือ มุมของความลาดเอียง H คือ ความสูงของความลาดเอียง α คือ มุมด้านหลังของแบบจำลอง และ t คือ ความหนาของมวลหิน ดังนั้น

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot t \cdot \left[(\cot \psi_p - \cot \psi_f) + \left(\frac{(\cot \psi_p - \cot \psi_f)^2}{\cot(\alpha - \psi_p) + \cot \psi_p} \right) \right] \quad (5.4)$$

สำหรับการให้พื้นที่ที่มีการไหลเลื่อน A (รูปที่ 3.2 ของบทที่ 3) สามารถคำนวณได้จาก

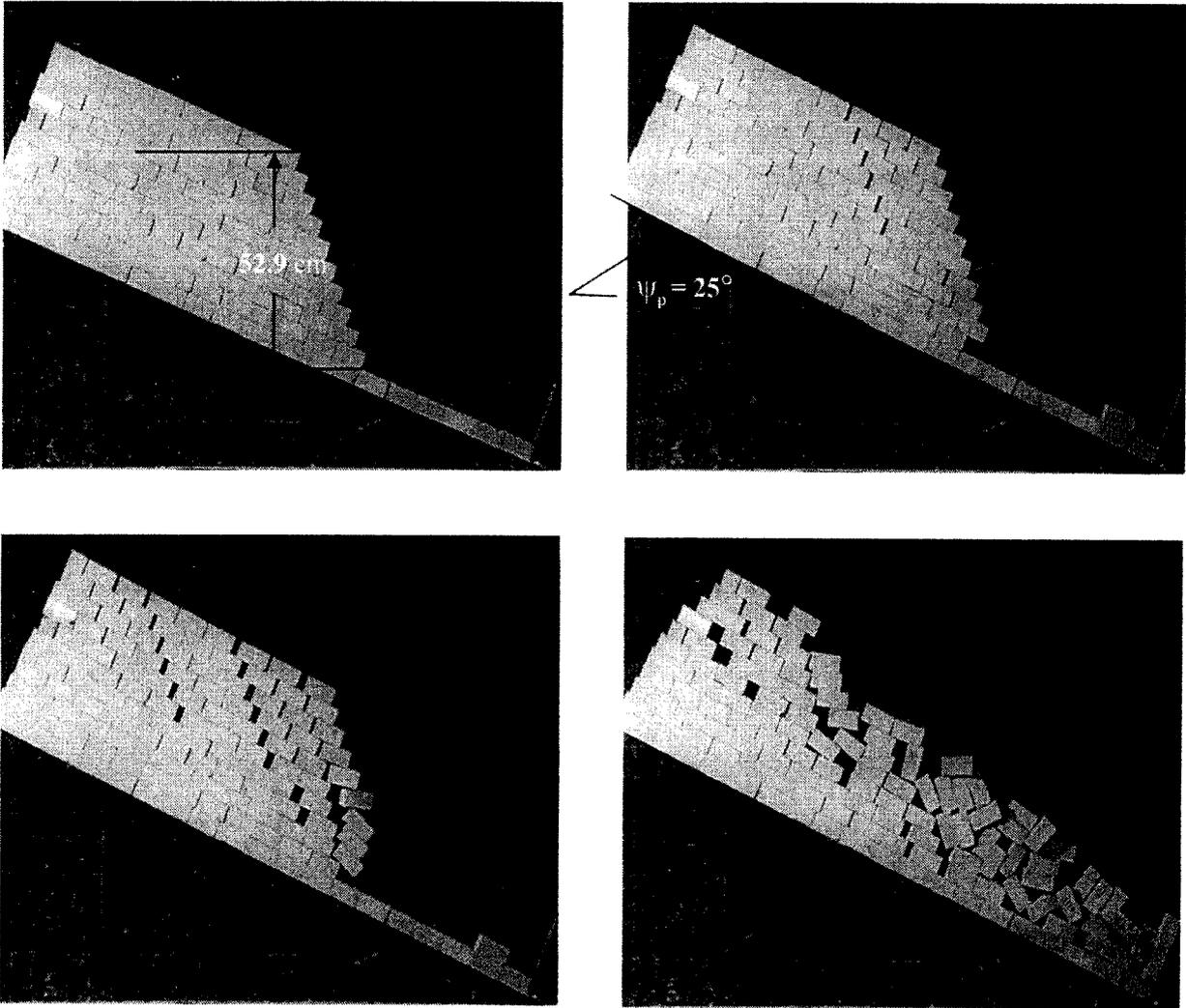
$$A = H \cdot t \cdot \operatorname{cosec} \psi_p \quad (5.5)$$

ดังนั้น การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยจึงสามารถปรับเปลี่ยนได้เป็น

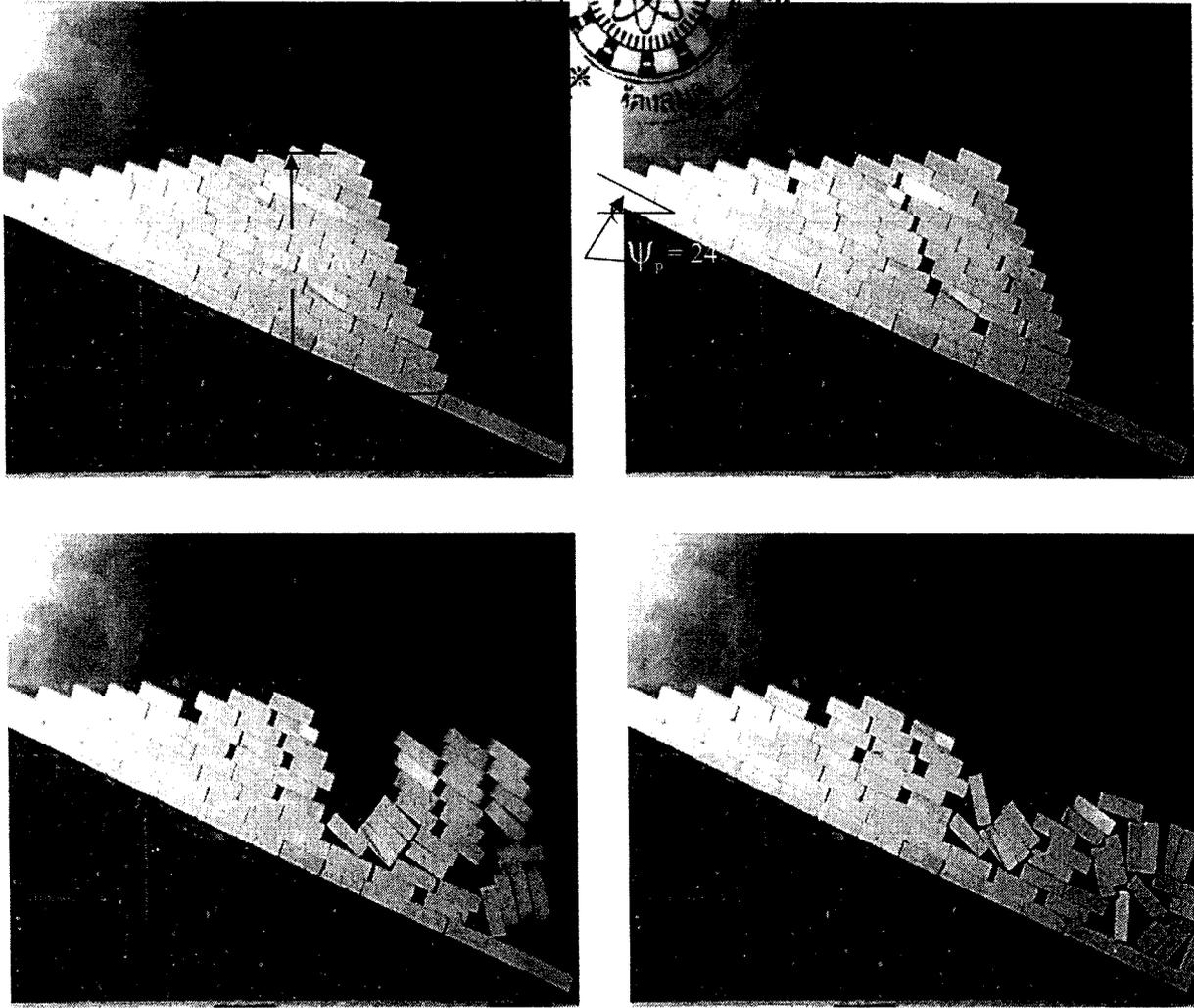
$$FS = 2 \cdot c / \left\{ \gamma \cdot H \cdot \sin^2 \psi_p \cdot \left[(\cot \psi_p - \cot \psi_f) + \left(\frac{(\cot \psi_p - \cot \psi_f)^2}{\cot(\alpha - \psi_p) + \cot \psi_p} \right) \right] \right\} + \frac{\tan \phi}{\tan \psi_p} \quad (5.6)$$

5.2.3 ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

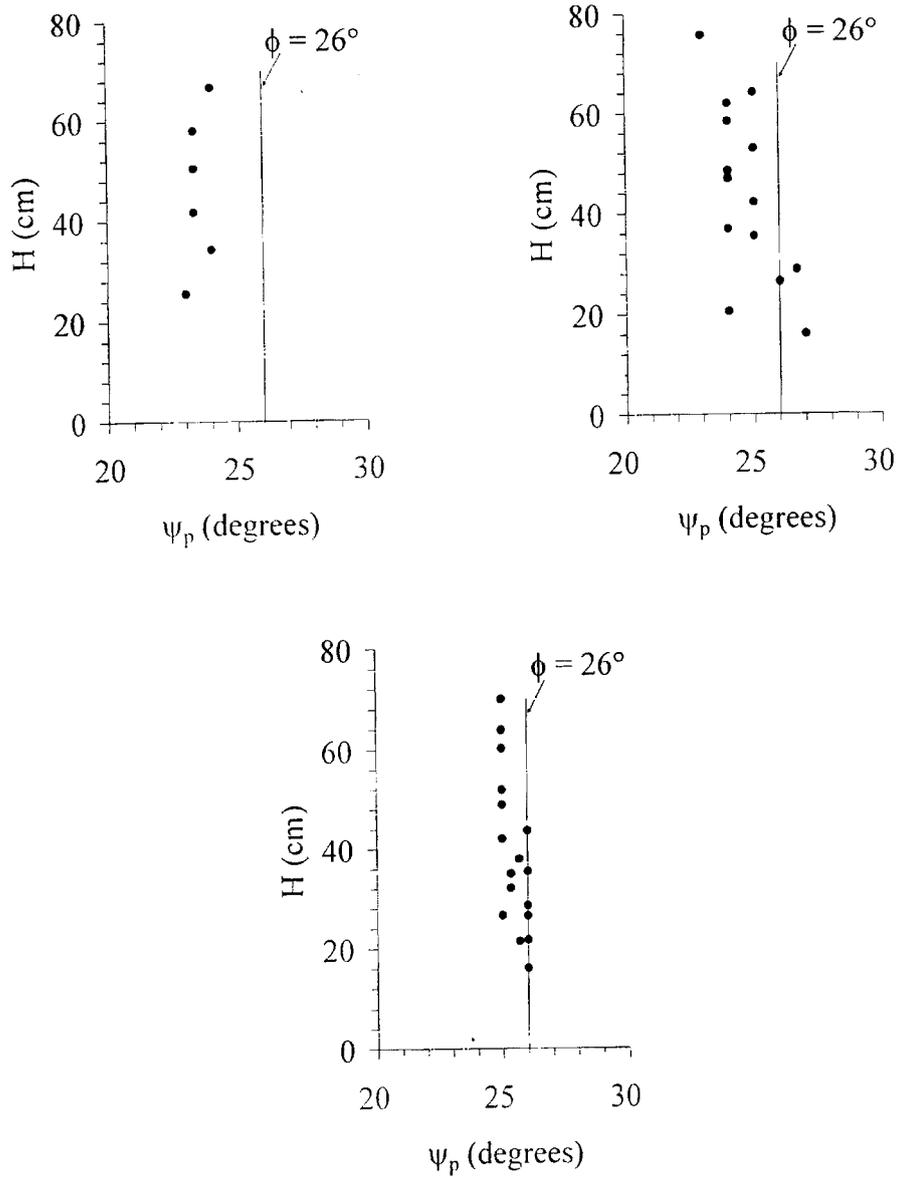
จากการทดสอบการพังทลายแบบไหลเลื่อนของความลาดเอียงในสถานะแห้ง จำนวน 38 ชุด โดยมีการผันแปรความสูงตั้งแต่ 16 ถึง 77 เซนติเมตร และมุมของผิวความลาดเอียงผันแปรตั้งแต่ 41° ถึง 73° แต่รูปร่างของความลาดเอียงประกอบด้วยตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากัน และทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง ผลการทดสอบได้แสดงโดยละเอียดในภาคผนวก ก ส่วนรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างการพังทลายแบบไหลเลื่อนสำหรับแบบจำลองที่ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 และ 4×4×12 เซนติเมตร รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของความลาดเอียงที่จุดพังทลายและมุมของระนาบที่มีการไหลเลื่อน เนื่องจากค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) ของหินที่ได้จากการทดสอบการเอียงตัวมีค่าต่ำและใกล้เคียงศูนย์ ส่งผลให้ค่ามุมเอียงของระนาบที่มีการไหลเลื่อนเท่ากับมุมเสียดทานของผิวของตัวอย่างหิน ดังนั้นจากการคำนวณด้วยกฎของ Hoek and Bray มุมของการไหลเลื่อนจึงขึ้นอยู่กับความสูงของความลาดเอียง จาก



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการจำลองการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ที่มุม $\psi_r = 72^\circ$



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการจำลองการพังทลายแบบไหลเลื่อน ของตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร ที่มุม $\psi_f = 68^\circ$



รูปที่ 5.4 การพังทลายแบบไหลเลื่อนของความลาดเอียงของตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร (a) $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร (b) และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร (c)

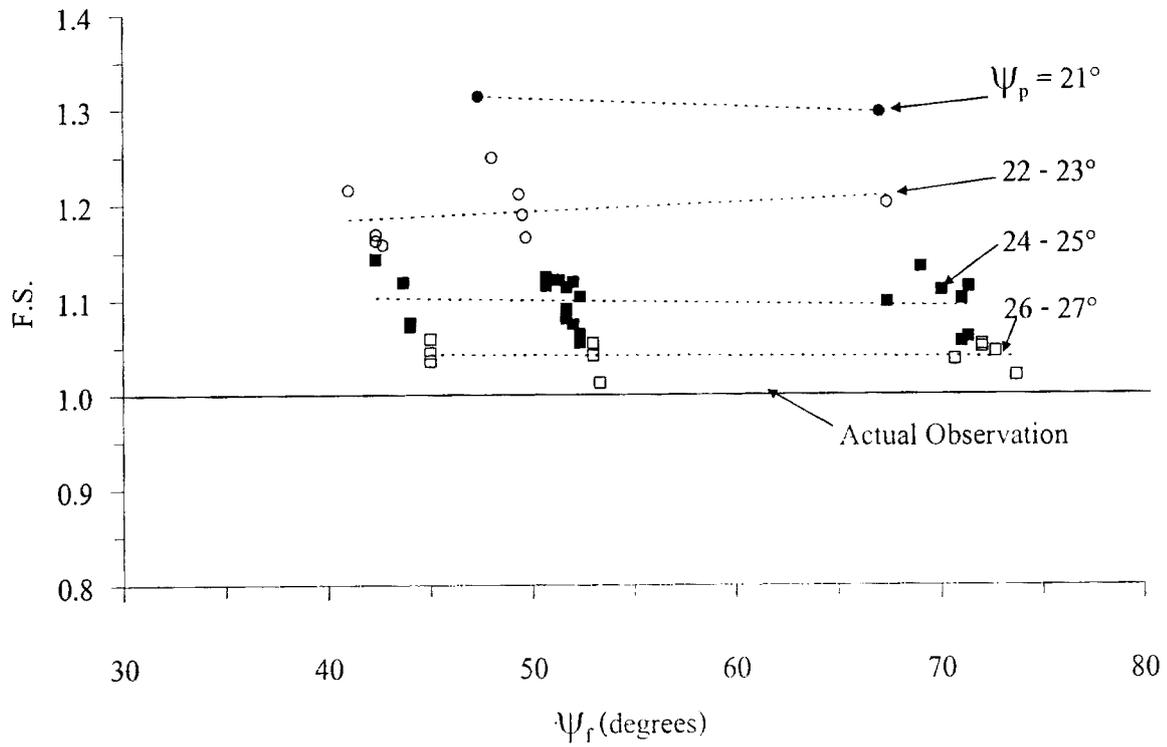
การทดสอบพบว่ามุมของระนาบที่มีการไหลเลื่อนมีแนวโน้มที่ต่ำกว่ามุมของระนาบที่มีการไหลเลื่อนที่คำนวณได้จากกฎของ Hoek and Bray (มุมของระนาบที่มีการไหลเลื่อนเท่ากับมุมเสียดทานที่ผิว) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำหนักกดทับในแนวตั้งฉากและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบที่มีการไหลเลื่อน จากรูปทรงที่ทำการทดสอบพบว่า แรงเฉือนสูงสุดจะเกิดใกล้กับส่วนปลายของฐานความลาดเอียง โดยน้ำหนักกดทับจะมีค่าสูงบริเวณตอนกลางของระนาบที่มีการไหลเลื่อน จึงเป็นไปได้ว่าการกระจายตัวของน้ำหนักกดทับอาจคล้ายกับสภาวะจริงของความลาดเอียงในภาคสนาม อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณตามกฎของ Hoek and Bray ได้สมมติให้น้ำหนักกดทับและแรงเฉือนมีค่าเท่ากันทุกจุดตามระนาบที่มีการไหลเลื่อน

5.2.4 ผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย

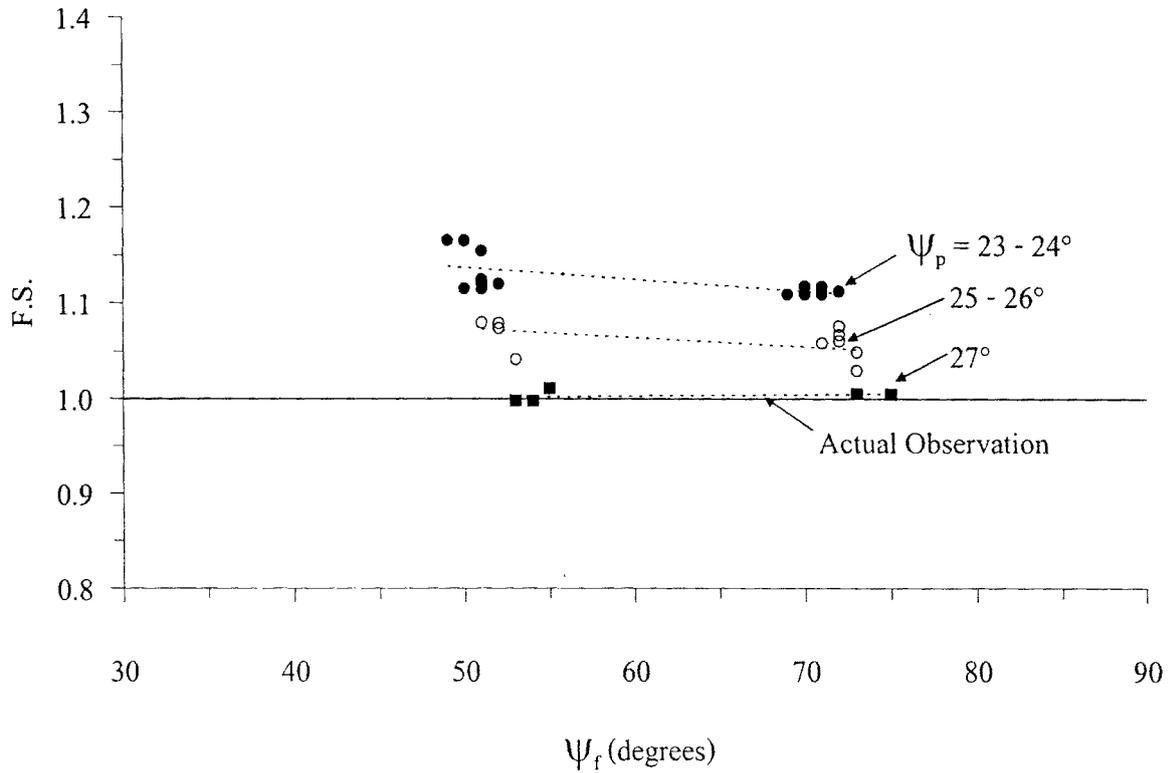
ผลจากการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยด้วยกฎของ Hoek and Bray ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้จากการจำลอง ณ จุดที่มีการพังทลายของความลาดเอียง (กำหนดให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยเท่ากับ 1.0) รูปที่ 5.5 ถึง 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบซึ่งระบุว่าวิธีการประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยตามกฎของ Hoek and Bray (1981) มีค่าที่สูงกว่าที่ทดสอบได้ โดยชุดของความลาดเอียงที่ประกอบด้วยตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร มีค่าปัจจัยความปลอดภัยจากการคำนวณสูงกว่าค่าจากการสังเกตการณ์ประมาณ 30% และชุดของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 และ 4x4x12 เซนติเมตร ประมาณ 10% ความแตกต่างนี้จะสูงขึ้นเมื่อมุมของระนาบที่มีความลาดเอียงมีค่าน้อย จากการเปรียบเทียบพบว่าตัวอย่างหินที่มีขนาดเล็ก (4x4x4 เซนติเมตร) มีแนวโน้มที่จะเกิดการไหลเลื่อนได้ง่ายกว่าตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่กว่า (4x4x8 และ 4x4x12 เซนติเมตร) หรือมีระยะห่างระหว่างรอยแตกสูงกว่า ความแตกต่างระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณและการสังเกตการณ์จะมีน้อย ถ้ามุมของระนาบที่มีการไหลเลื่อนมีค่าสูง ซึ่งในภาคผนวก ข จะเสนอผลการคำนวณโดยละเอียด

5.2.5 การวิเคราะห์ค่าปัจจัยความปลอดภัยด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข

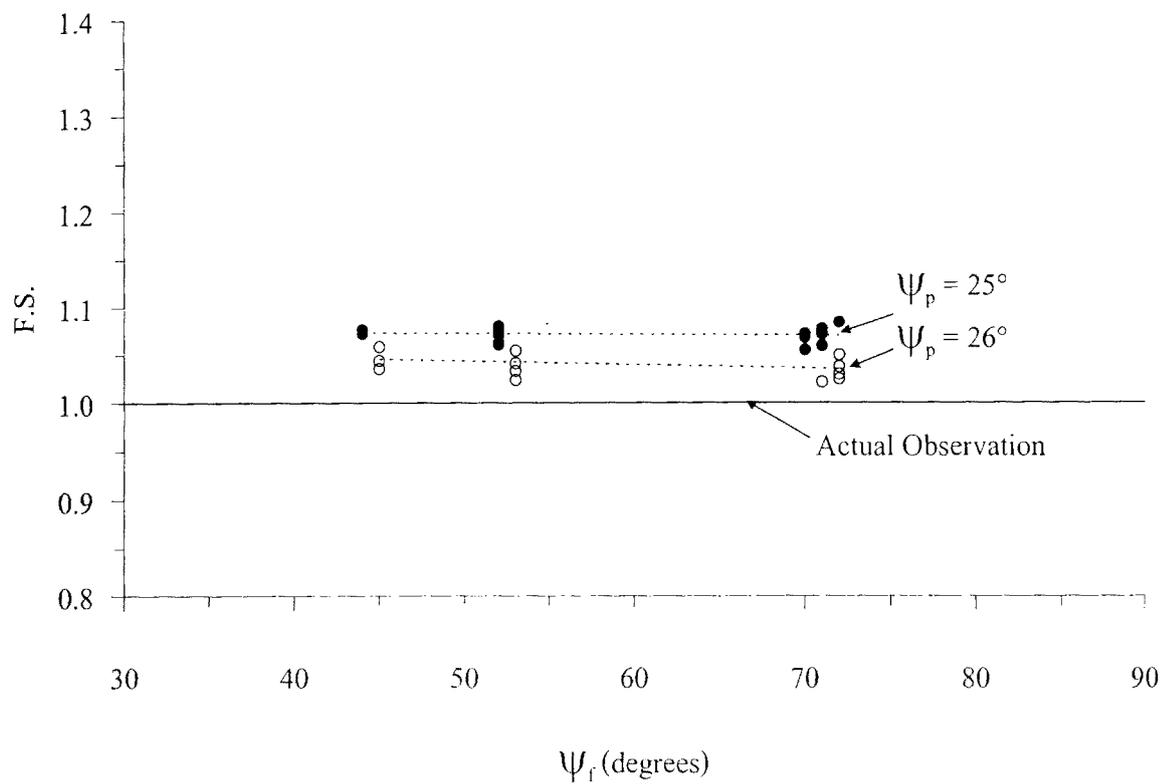
การศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการพังทลายของความลาดเอียงมวลหินโดยใช้โปรแกรม FLAC_Slope เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยนั้นได้กำหนดค่ามุมของความลาดเอียง มุมเอียงของระนาบ และความสูงของความลาดเอียงตามลักษณะของการจัดเรียงตัวอย่างหินที่ใช้ในการจำลองเชิงกายภาพ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope นั้นสามารถที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพและผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยตามกฎของ Hoek and Bray



รูปที่ 5.5 ผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยเปรียบเทียบกับสภาวะจริงของตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร ในช่วงของความชัน (ψ_r) ที่ต่างกัน โดยการทดสอบในสภาวะจริงค่า ψ_p มีค่าตั้งแต่ 21° ถึง 25° และค่า ψ_p แปรผันจาก 40° ถึง 52°



รูปที่ 5.6 ผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยเปรียบเทียบกับสถานะจริงของตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร ในช่วงของความชัน (ψ_p) ที่ต่างกัน โดยการทดสอบในสถานะจริงค่า ψ_p มีค่าตั้งแต่ 23° ถึง 27° และค่า ψ_f แปรผันจาก 49° ถึง 75°



รูปที่ 5.7 ผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยเปรียบเทียบกับสภาวะจริงของตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร ในช่วงของความชัน (ψ_r) ที่ต่างกัน โดยการทดสอบในสภาวะจริง ค่า ψ_p มีค่าตั้งแต่ 25° ถึง 26° และค่า ψ_r แปรผันจาก 44° ถึง 72°

รูปที่ 5.8 ถึง 5.10 แสดงตัวอย่างของผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope ร่วมกับแบบจำลองเชิงกายภาพ รูปที่ 5.11 ถึง 5.13 แสดงผลทั้ง 3 วิธี ซึ่งพบว่าผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองเชิงกายภาพมากกว่าผลที่ได้จากวิธีการประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยจากกฎของ Hoek and Bray

5.3 การจำลองการพังทลายแบบพลิกคว่ำ

การจำลองการพังทลายแบบพลิกคว่ำของตัวอย่างหิน ได้ใช้ตัวอย่างหินทั้งสามขนาดคือ 4×4×4 เซนติเมตร 4×4×8 เซนติเมตร และ 4×4×12 เซนติเมตร โดยเรียงตัวอย่างหินในแนวตั้งเพื่อให้อานแคบ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามกฎของ Hoek and Bray (1981)

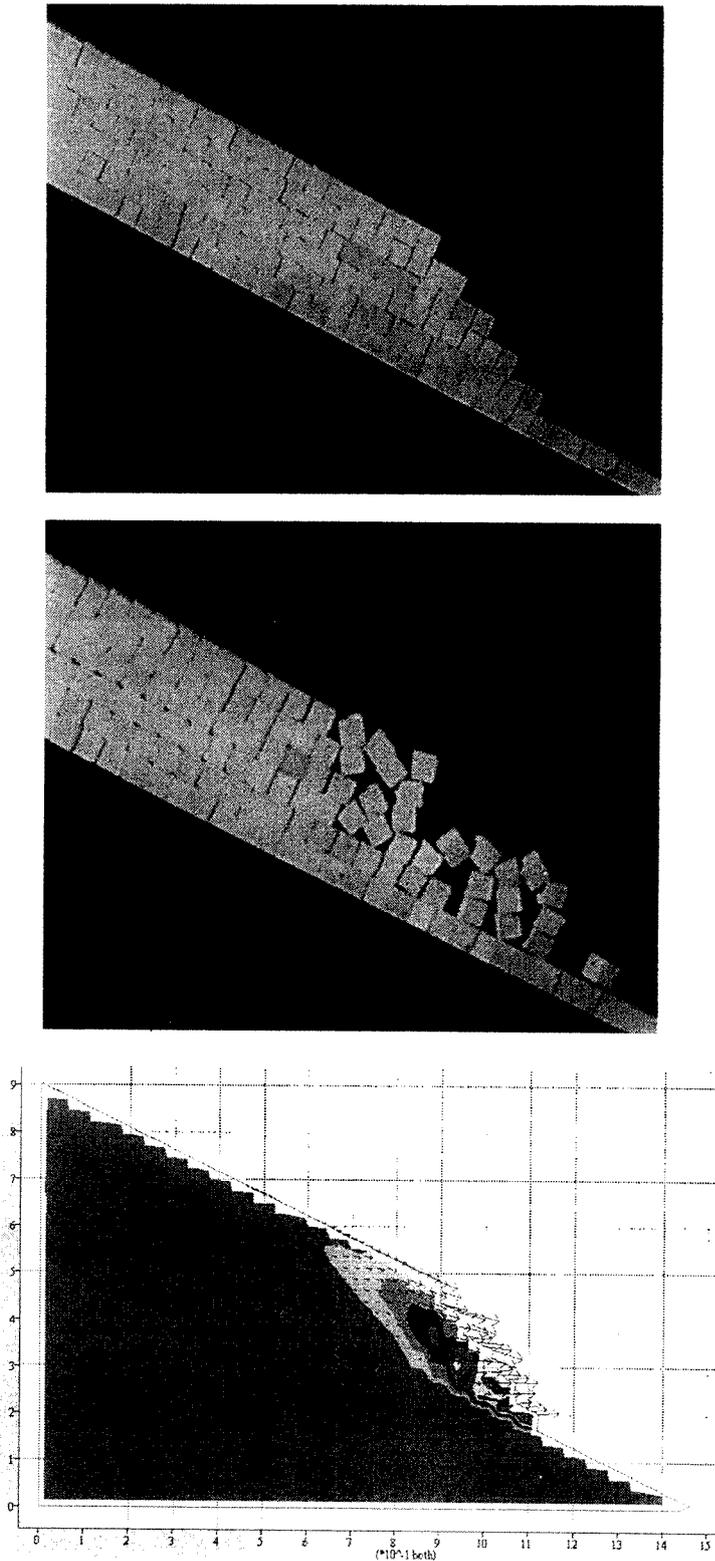
5.3.1 วิธีการจำลอง

การจำลองแบ่งเป็น 3 กลุ่ม เช่นเดียวกับการจำลองการพังทลายตามระนาบ ซึ่งจะเรียงตัวอย่างหินในแนวตั้งที่ผันแปรความสูงของความลาดเอียง มุมของความลาดเอียง และมุมเอียงของระนาบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

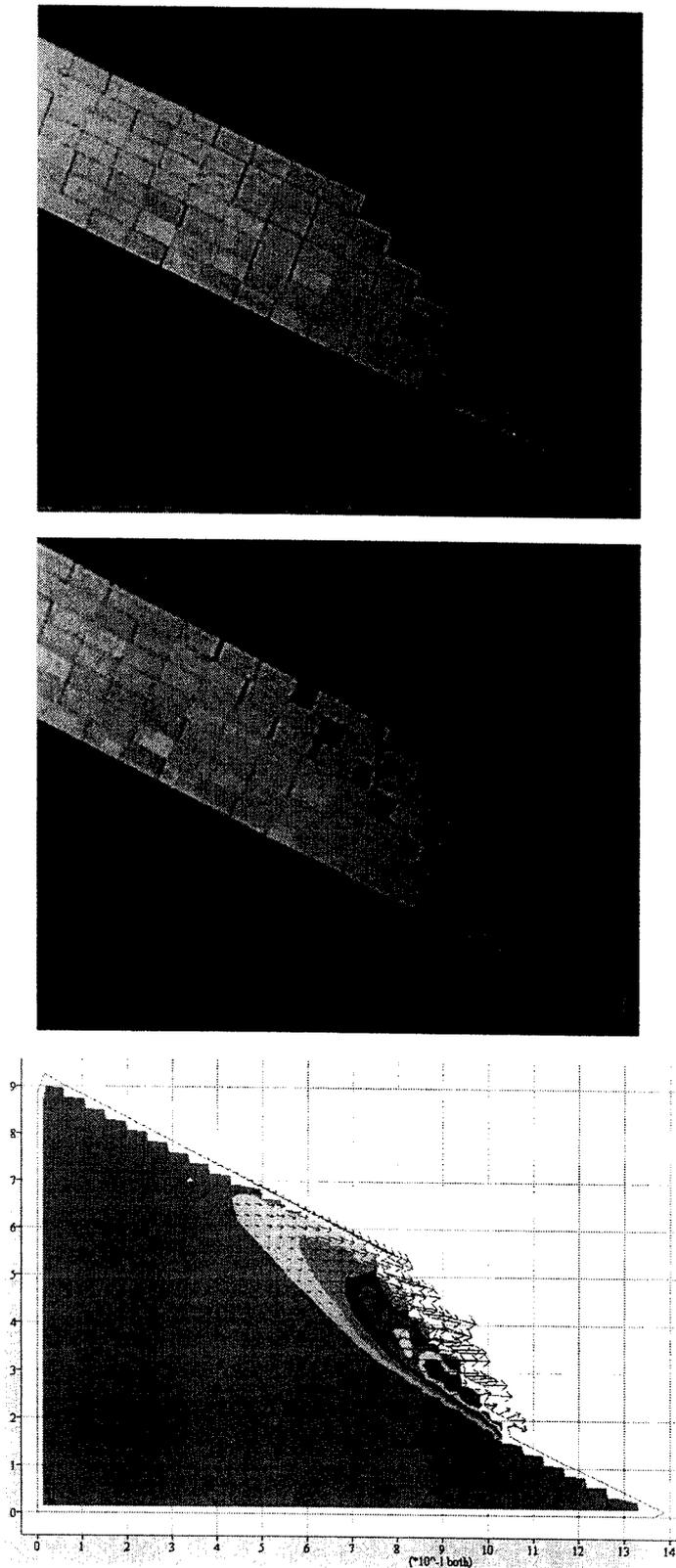
- 1) วัดการเอียงตัวของคานยกที่จุดเริ่มต้น
- 2) ทำการจัดเรียงตัวอย่างหินบนคานยกปรับระดับ (เรียงในแนวตั้ง) ตามความยาวของคานยก ชั้นบนจะเรียงให้มีลักษณะเอียง โดยมีมุมของความลาดเอียงเริ่มต้น (ψ_0) ที่สามารถผันแปรจาก 25° ถึง 76° และความสูง (H) ตั้งแต่ 12 ถึง 74 เซนติเมตร
- 3) ปิดแบบจำลองด้วยแผ่นอะคลิลิก เพื่อป้องกันการพังทลายออกมด้านนอก
- 4) หมุนคานยกปรับระดับอย่างช้า ๆ สังเกตการณ์ด้วยสายตาและบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของตัวอย่างหินในแบบจำลองด้วยกล้องวิดีโอ
- 5) ทันทีที่ตัวอย่างหินเกิดการเคลื่อนตัว จะหยุดหมุนคานยกปรับระดับ แล้วทำการวัดมุมเอียงของคานยก (ψ_p) เพื่อคำนวณความสูงและมุมของความลาดเอียงที่จุดพังทลาย และวิเคราะห์การพังทลายแบบพลิกคว่ำตามกฎของ Hoek and Bray (1981)
- 6) เปรียบเทียบผลการคำนวณตามกฎของ Hoek and Bray กับการจำลอง

5.3.2 การวิเคราะห์การพังทลายแบบพลิกคว่ำ

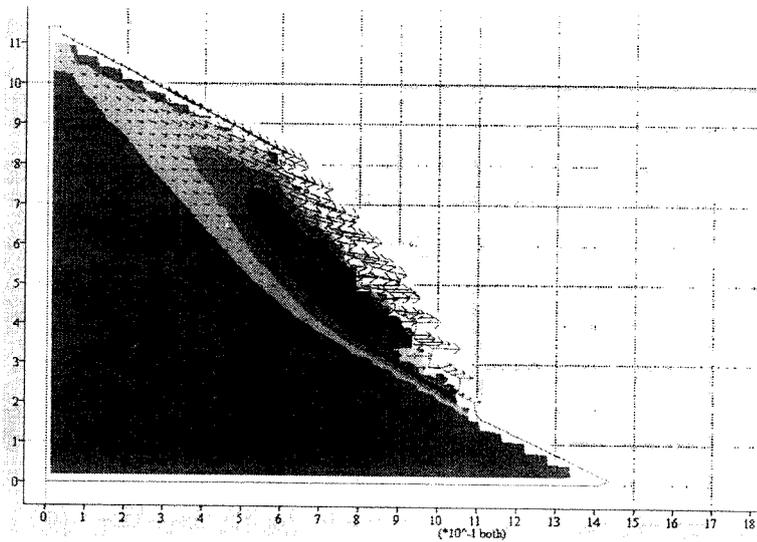
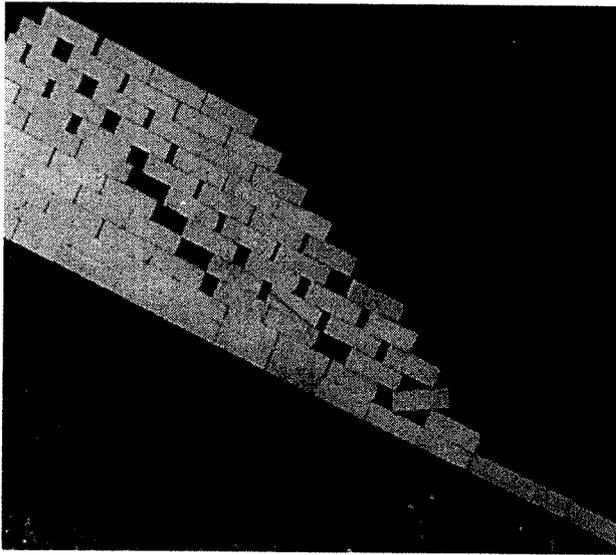
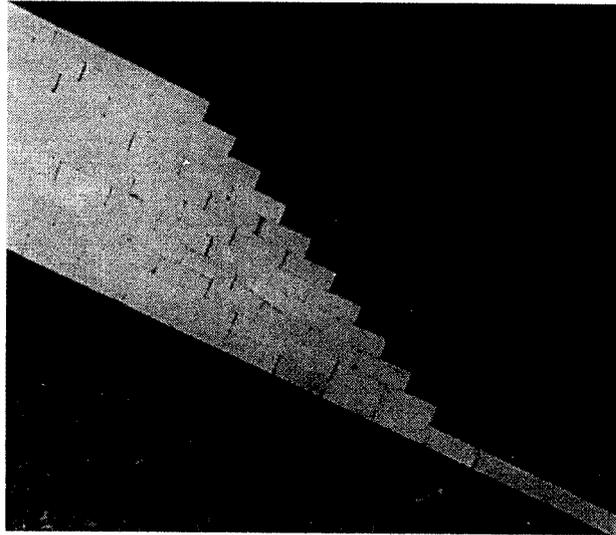
สง่า ตั้งชวาล (2538) อธิบายว่า การพลิกคว่ำของมวลหินจะเกิดขึ้นเมื่อคอลัมน์ของชั้นหินแข็งแยกออกจากกัน ซึ่งจะเกิดบริเวณที่มีระยะห่างของรอยแตกที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal joints) โดยคอลัมน์ที่สั้นกว่าที่อยู่บริเวณมุมของฐานความลาดเอียง (Slope toe) จะถูกดันไปข้างหน้าเนื่องจากน้ำหนักของคอลัมน์ที่มีการพลิกตัว (Overturning columns) ทางด้านหลังของความลาดเอียง และการไหลเลื่อนของมุมฐานของความลาดเอียง ก่อให้เกิดการพลิกคว่ำบริเวณตำแหน่งที่สูงขึ้น การพังทลายเป็นผลมาจากการตัดกันของรอยแตกที่ต่อเนื่องกัน



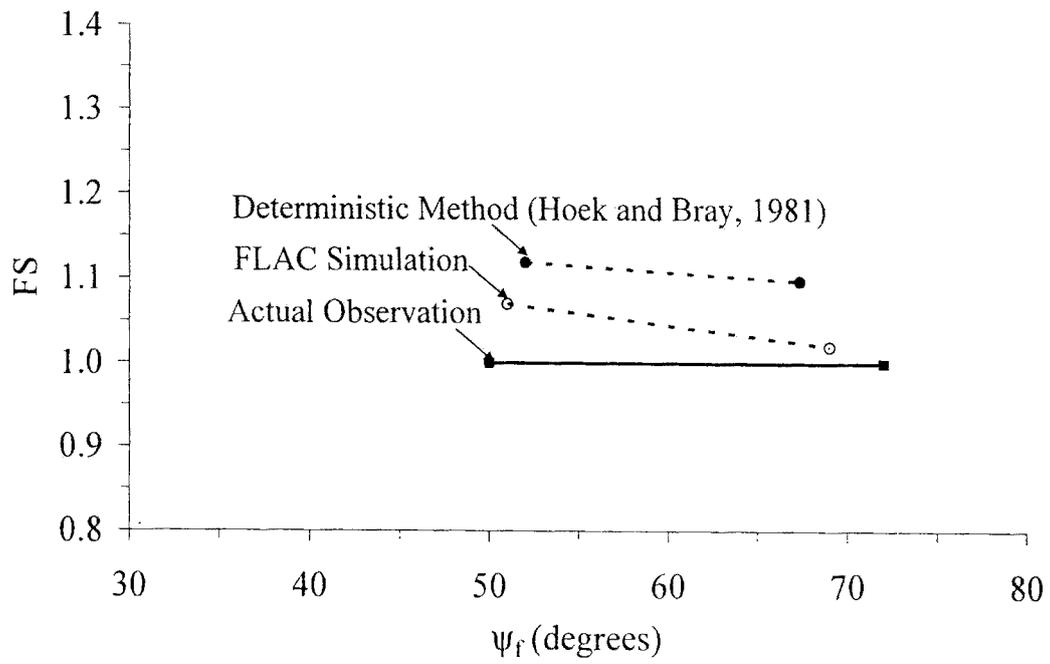
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope กับแบบจำลองทางกายภาพ สำหรับตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร ที่ $\psi_p = 25^\circ$ $\psi_f = 51^\circ$ ความสูงของความลาดเอียง = 36.2 เซนติเมตร และค่าปัจจัยความปลอดภัย = 1.07



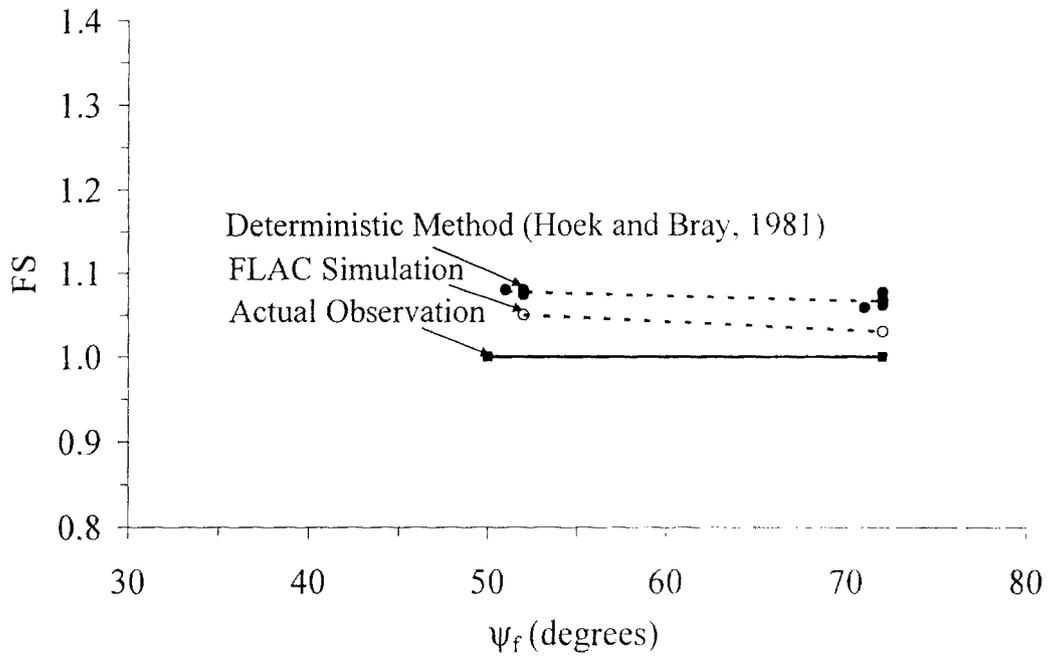
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพ สำหรับตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร ที่ $\psi_p = 25^\circ$ $\psi_f = 52^\circ$ ความสูงของความลาดเอียง = 41.6 เซนติเมตร และค่าปัจจัยความปลอดภัย = 1.05



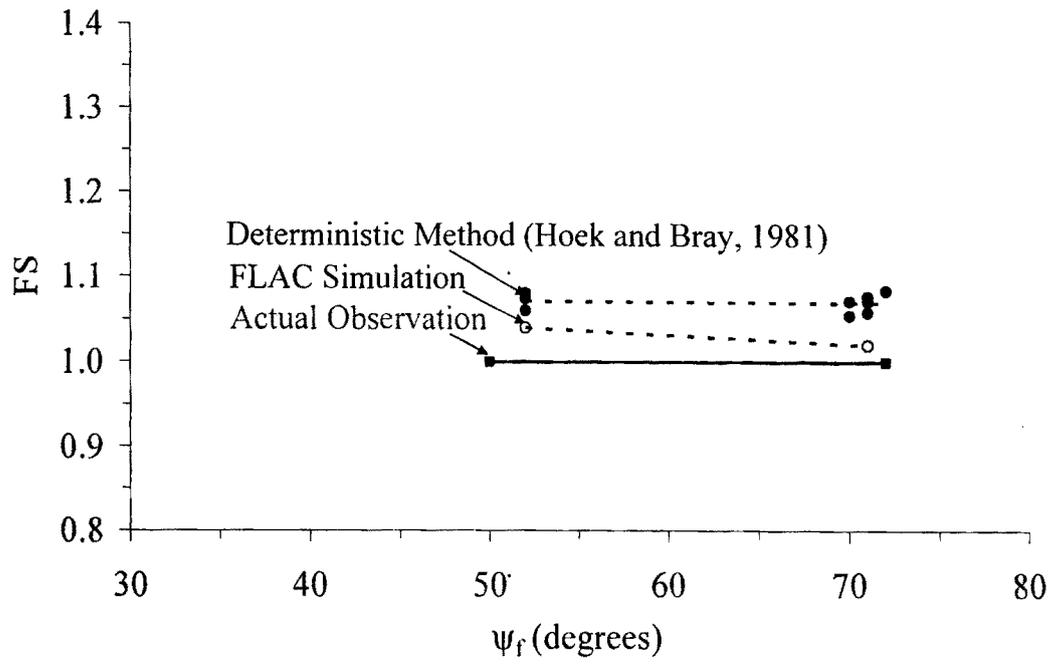
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC_Slope ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพ สำหรับตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร ที่ $\psi_p = 25^\circ$ $\psi_r = 52^\circ$ ความสูงของความลาดเอียง = 70 เซนติเมตร และค่าปัจจัยความปลอดภัย = 1.04



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้จาก 3 วิธี สำหรับการจำลองด้วยตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร โดยมีมุมของระนาบที่ไหลเลื่อนเท่ากับ 25°



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้จาก 3 วิธี สำหรับการจำลองด้วยตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร โดยมีมุมของระนาบที่ไหลเลื่อนเท่ากับ 25°



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ได้จาก 3 วิธี สำหรับการจำลองด้วยตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร โดยมีมุมของระนาบที่ไหลเลื่อนเท่ากับ 25°

การวิเคราะห์การพังทลายแบบพลิกคว่ำจะใช้วิธี Limit Equilibrium ตามกฎของ Hoek and Bray (1981) เมื่อพิจารณาสมดุลการหมุน (Rotational equilibrium) ของแรง P_{n-1} ที่สามารถป้องกันการพังทลายแบบพลิกคว่ำในระดับพอดีสมดุลจะได้

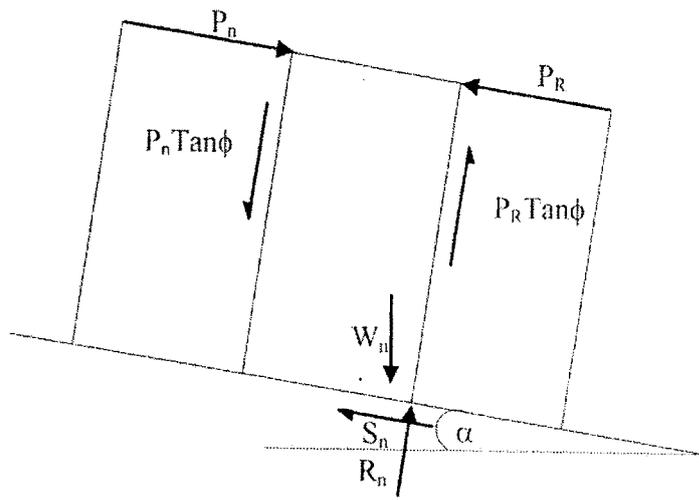
$$P_{n-1} = \frac{P_n(M_n - \Delta x \tan \phi) + (W_n / 2)(y_n \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha)}{L_n} \quad (5.7)$$

เมื่อ P_{n-1} คือ แรงที่สามารถป้องกันการพลิกคว่ำของก้อนที่ n ในระดับพอดีสมดุล P_n คือ แรงที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำของตัวอย่างหินที่ n ค่า M_n คือ ระยะระหว่างแรงที่ถูกชักนำให้เกิดการไหลเลื่อนและจุดเชื่อมต่อระหว่างตัวอย่างหินที่ n ค่า W_n คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ n ค่า y_n คือ ความสูงของตัวอย่างหินที่ n ค่า Δx คือ ความกว้างของแต่ละตัวอย่างหิน α คือ มุมในแนวระนาบของหินที่มีการพลิกคว่ำ และ L_n คือ ระยะระหว่างแรงของการไหลเลื่อนที่มีการป้องกันและจุดเชื่อมต่อระหว่างตัวอย่างหินที่ n

เนื่องจากแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการทดสอบการพังทลายแบบพลิกคว่ำนี้ไม่ได้มีลักษณะของการพลิกคว่ำแบบพื้นฐานที่เป็นระดับขั้น (Step base) แต่เป็นการพลิกคว่ำที่ต่อเนื่องในระดับเดียวกันดังรูปที่ 5.14 และไม่มีชุดของการพังทลายแบบไหลเลื่อนของตัวอย่างหินเกิดขึ้นในการทดสอบ ดังนั้น จากสมการ (5.7) จึงทำการปรับเปลี่ยนเป็น

$$P_{n,t} = \frac{(P_n M_n - P_n \Delta x \tan \phi) - (P_r L_n + P_r \Delta x \tan \phi) + \frac{y_n}{2} W_n \sin \alpha - \frac{\Delta x}{2} W_n \cos \alpha}{L_n} \quad (5.8)$$

เมื่อ $P_{n,t}$ คือ แรงที่ต้องการใช้ในการต้านทานการพลิกคว่ำของตัวอย่างหินที่ n และ P_r คือ แรงที่ต้องการใช้ในการต้านทานการพลิกคว่ำสะสม สมการ (5.8) ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของความลาดเอียง และประเมินแนวโน้มของบริเวณที่จะเกิดการพังทลายจากปลายฐานของความลาดเอียง ถ้า $P_{n,t}$ ของแต่ละตัวอย่างหินมีค่ามากกว่าศูนย์ แสดงว่าความลาดเอียงไม่มีเสถียรภาพ นั่นคือ ถ้าตัวอย่างหินที่อยู่ต่ำสุดหนึ่งก้อนในแนวคิ่งมีค่า $P_{n,t}$ มากกว่าศูนย์จะทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของทั้งแถวที่อยู่แนวคิ่งเดียวกัน เป็นเหตุให้ก้อนที่อยู่บนสุดหนึ่งก้อนเกิดการพลิกคว่ำ หลังจากนั้นก้อนอื่น ๆ ที่อยู่ต่ำลงมาจะไม่มีเสถียรภาพ เนื่องมาจากความสูงของแถวในแนวคิ่งลดลง อย่างไรก็ตามหากตัวอย่างหินที่อยู่ต่ำมีจำนวนมากกว่าหนึ่งก้อน เช่น สามหรือสี่ก้อน โดยทั้งหมดมีค่า $P_{n,t}$ มากกว่าศูนย์ จะคิ่งให้ตัวอย่างหินที่อยู่ด้านบนสุดจำนวนเท่ากันแนวคิ่งเดียวกันเกิดการพลิกคว่ำ หลังจากนั้นจะเกิดเสถียรภาพในตัวอย่างหินอื่น ๆ ที่อยู่ต่ำลงมา ในกรณีที่ L_n มีค่าเท่ากับศูนย์ (ตัวอย่างหินที่อยู่หน้าสุดของความลาดเอียง) จะถือว่าแรงที่ต้องการใช้ในการต้านทานการพลิกคว่ำของตัวอย่างหินที่ n มีค่ามากกว่าศูนย์ แม้ว่าในสมการ (5.8) จะหาค่าของแรงนี้ไม่ได้



รูปที่ 5.14 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการพลิกคว่ำ

5.3.3 ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

การทดสอบการพังทลายของความลาดเอียงแบบพลิกคว่ำได้ดำเนินการทั้งหมด 37 ชุด สำหรับตัวอย่างหินทุกขนาดภายใต้สภาวะแห้ง ความสูงของความลาดเอียงผันแปรตั้งแต่ 27 ถึง 85 เซนติเมตร และมุมของผิวหน้าความลาดเอียงมีค่าตั้งแต่ 43° ถึง 82° แต่ละชุดการทดสอบจะถูกทำซ้ำ 3 ครั้ง หรือจนกว่าจะได้ผลสรุปที่เหมือนกัน สำหรับตัวอย่างการพังทลายแบบพลิกคว่ำด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้นำเสนอไว้ในรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.17 สำหรับตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร ตามลำดับ รูปที่ 5.18 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของความลาดเอียงและมุมของระนาบการพังทลายแบบพลิกคว่ำ โดยพบว่าที่ความสูงเท่ากัน มุมของผิวหน้าความลาดเอียงจะมีค่ามากกว่ามุมของระนาบการพังทลายแบบพลิกคว่ำมีค่าต่ำ และความสูงของความลาดเอียงที่จุดพังทลายจะลดลงถ้ามุมของระนาบการพังทลายแบบพลิกคว่ำมีค่าเพิ่มขึ้น ความลาดเอียงที่ประกอบด้วยตัวอย่างหินที่มีความสูงและแคบจะทำให้ค่าของมุมระนาบที่จุดพังทลายมีค่าน้อย ซึ่งมีความเป็นเหตุเป็นผลอย่างค้ำกับกฎทางฟิสิกส์พื้นฐาน

5.3.4 ผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลจากแบบจำลองทางกายภาพดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 พบว่า ผลจากการคำนวณด้วยการปรับเปลี่ยนสมการของ Hoek and Bray (1981) สอดคล้องกับผลที่ได้จากการสังเกตการณ์เป็นอย่างดี ซึ่งในภาคผนวก ค ได้แสดงผลการคำนวณด้วยสมการของ Hoek and Bray (1981) โดยละเอียด

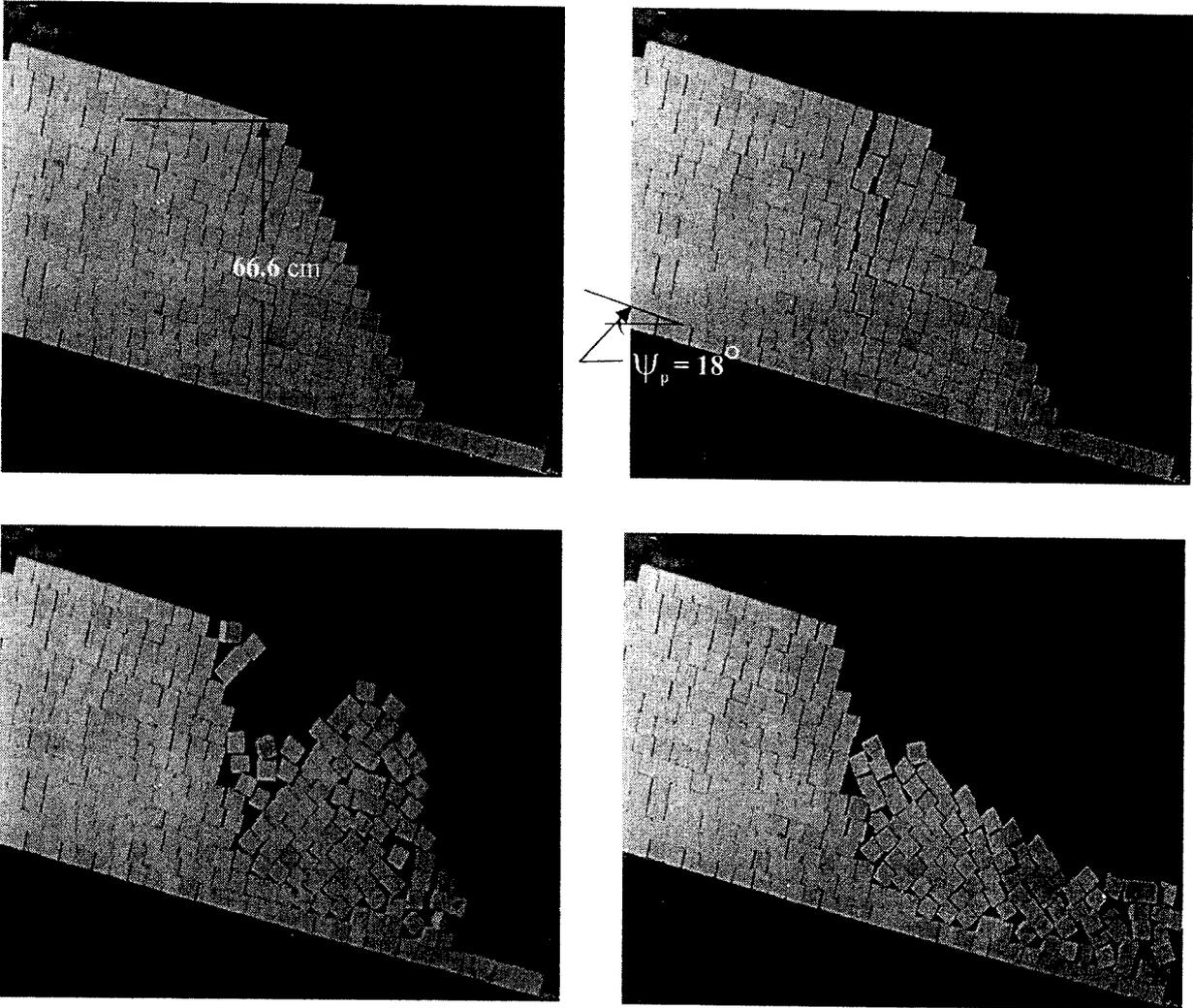
5.4 การจำลองการพังทลายตามแนวระนาบในสภาวะที่ความลาดเอียงจมน้ำ

การศึกษาการพังทลายตามแนวระนาบในสภาวะที่ความลาดเอียงจมน้ำจะนำผลมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบการพังทลายในสภาวะแห้งเพื่อประเมินผลกระทบของน้ำต่อความลาดเอียงของมวลหิน

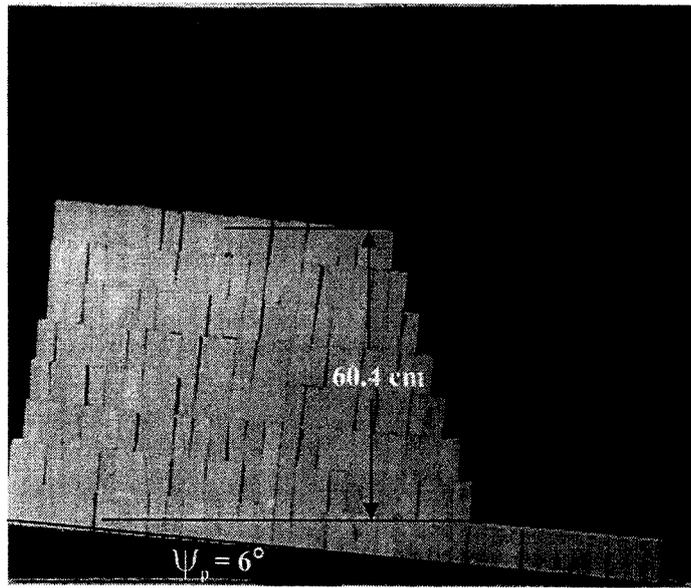
5.4.1 วิธีการจำลองการพังทลายของความลาดเอียงที่จมน้ำ

การจำลองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ด้วยตัวอย่างหิน 3 ขนาด คือ จำลองด้วยตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบจะผันแปรความสูงของระดับน้ำ ความสูงของความลาดเอียง มุมของระนาบที่ไหลเลื่อน และมุมที่ผิวหน้าความลาดเอียง ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

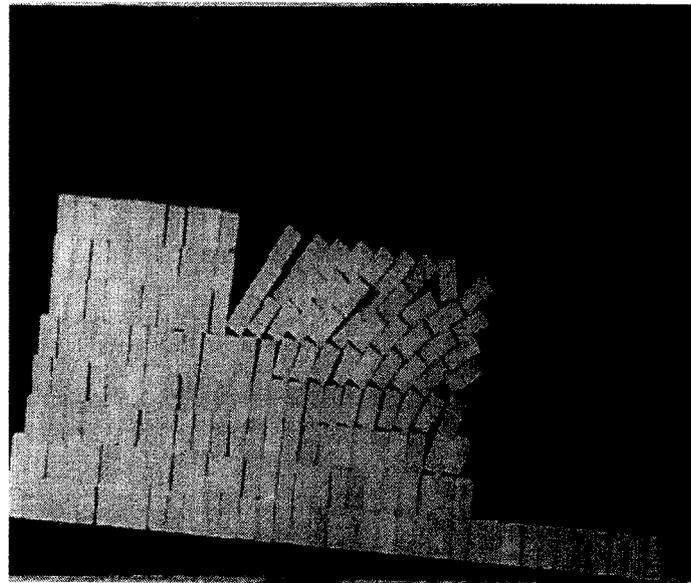
1) จัดเรียงตัวอย่างหินในแนวอนบนคานยกปรับระดับมุมเอียงให้มีลักษณะเช่นเดียวกับ การเรียงหินเพื่อทดสอบการพังทลายในแนวระนาบในสภาวะแห้ง



รูปที่ 5.15 การจำลองการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร ที่มุม $\psi_f = 63^\circ$



(a)

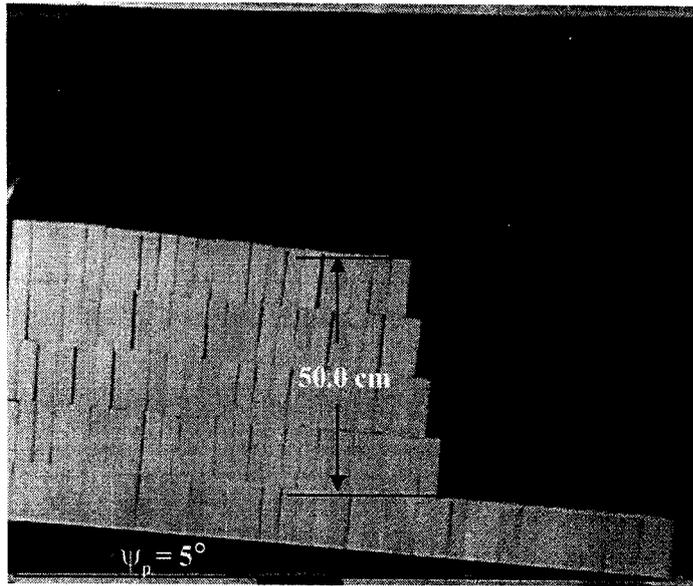


(b)

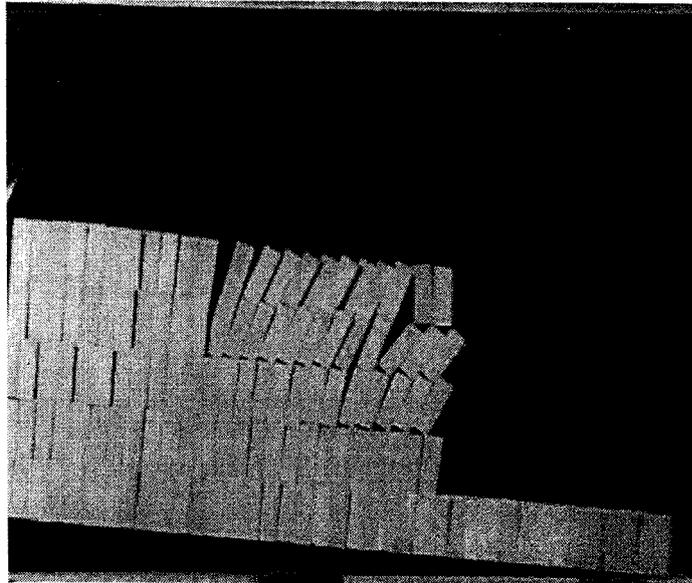


(c)

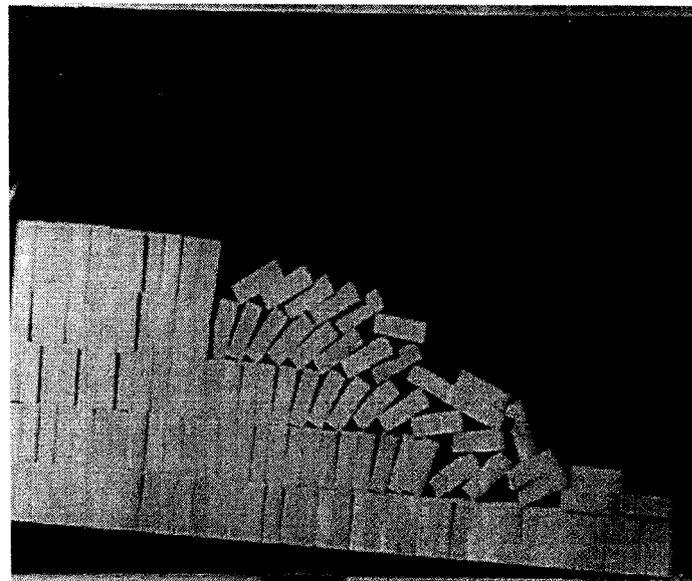
รูปที่ 5.16 การจำลองการพังทลายแบบพลิกคว่ำของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร (a) ระยะสุดท้ายก่อนที่จะมีการพังทลาย (ที่มุม $\psi_f = 72^\circ$) (b) ขณะพังทลาย (c) หลังการพังทลาย



(a)

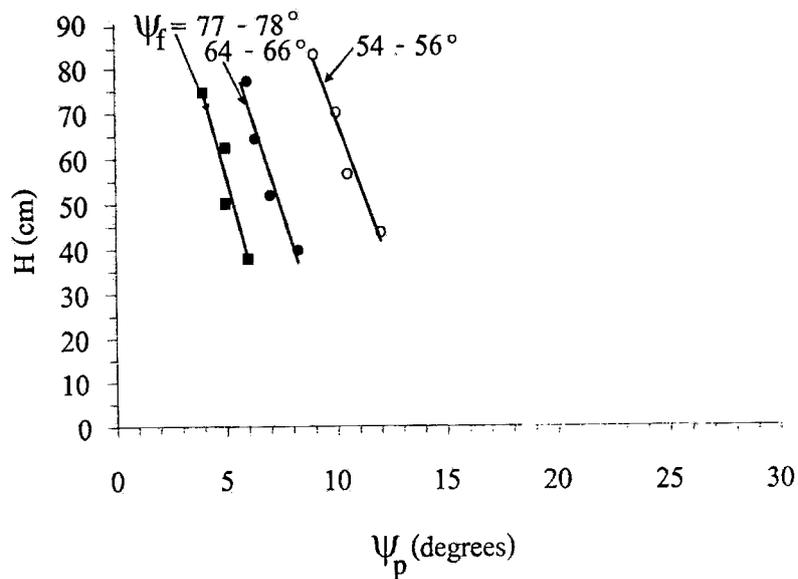
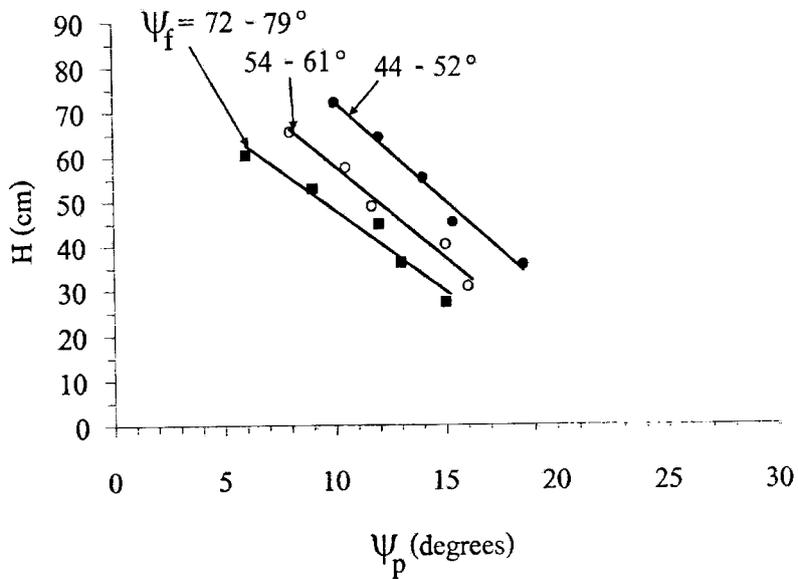
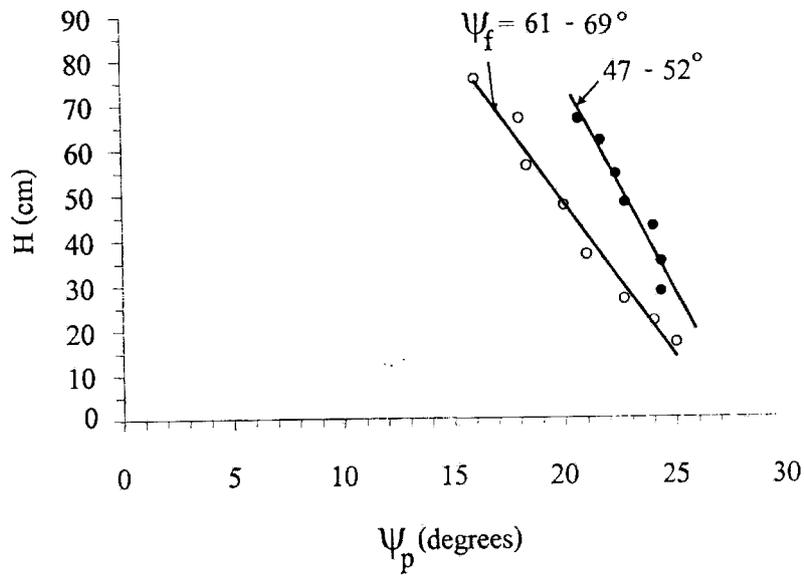


(b)

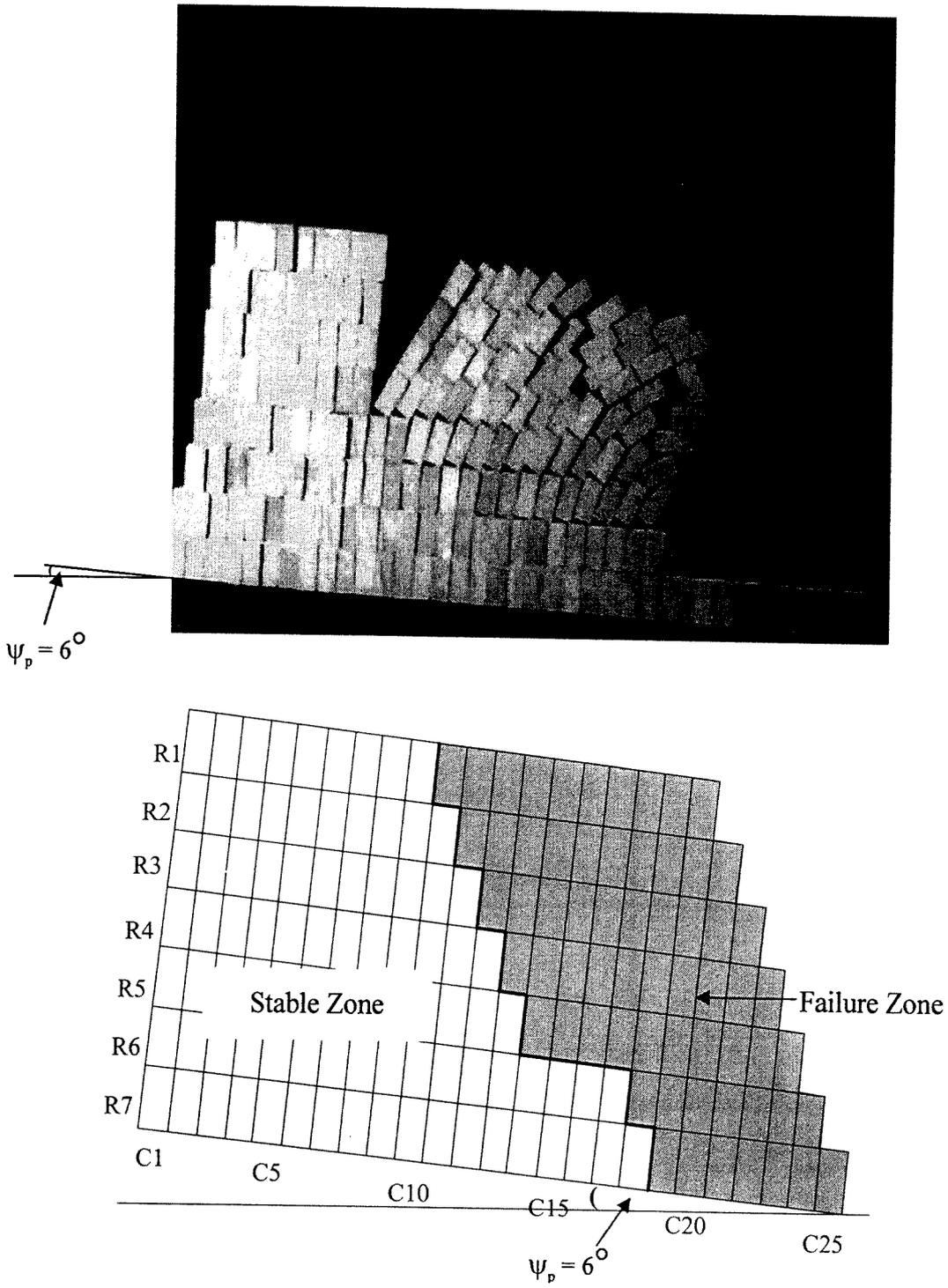


(c)

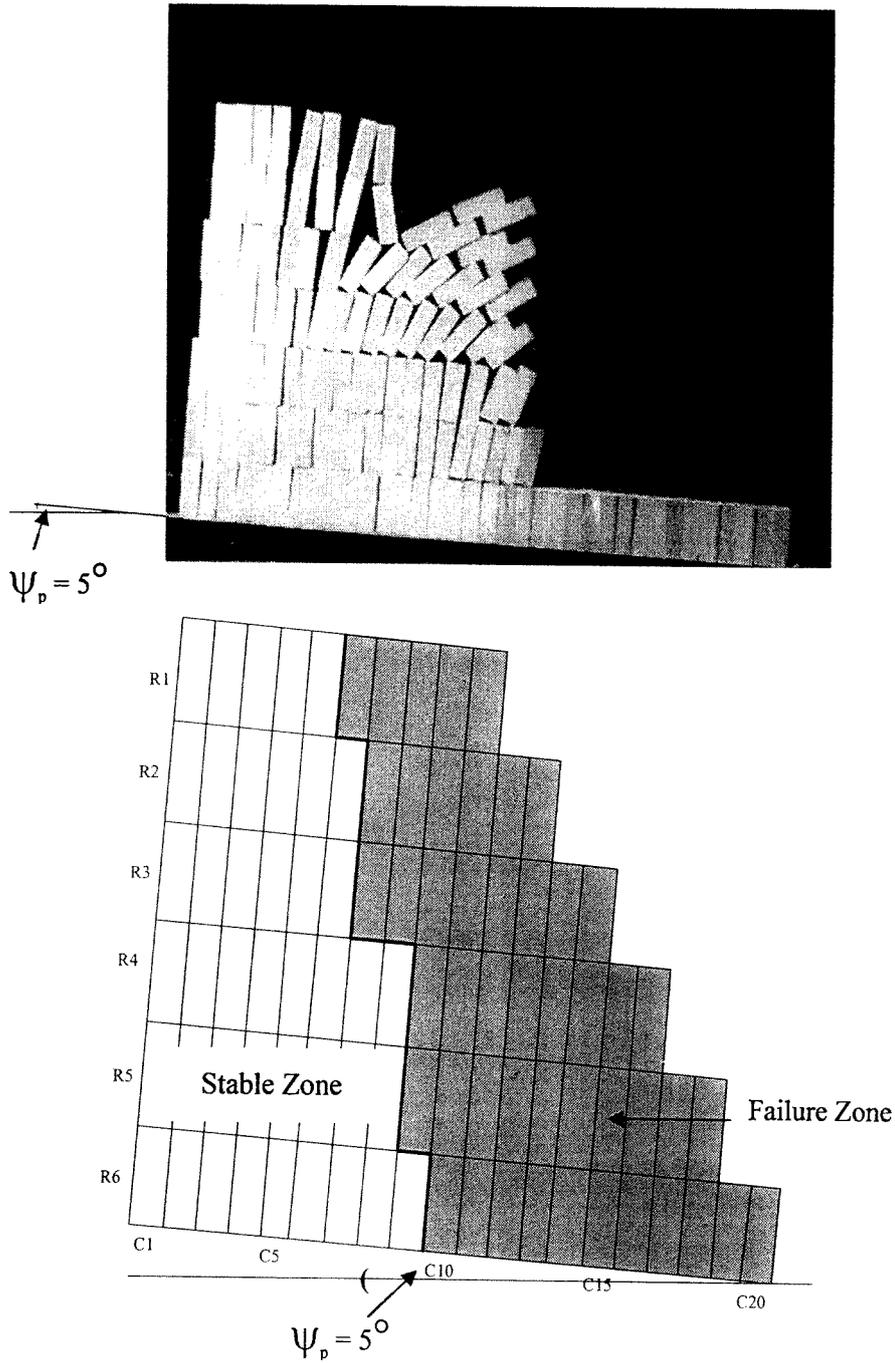
รูปที่ 5.17 การจำลองการพังทลายแบบพลิกคว่ำของตัวอย่างหินขนาด 4x4x12 เซนติเมตร (a) ระยะสุดท้ายก่อนที่จะมีการพังทลาย (ที่มุม $\psi_f = 77^\circ$) (b) ขณะพังทลาย (c) หลังการพังทลาย



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง (H) กับค่า Ψ_p สำหรับการพังทลายแบบพลิกคว่ำที่จำลองจาก ตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร (บน) $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร (กลาง) และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร (ล่าง)



รูปที่ 5.19 ผลการจำลอง (รูปบน) และการคำนวณ (รูปล่าง) ของการพังทลายแบบพลิกคว่ำสำหรับ ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร โดยการพังทลายเกิดขึ้นที่มุมของผิวหน้าความลาดเอียง เท่ากับ 72°



รูปที่ 5.20 ผลการจำลอง (รูปบน) และการคำนวณ (รูปล่าง) ของการพังทลายแบบพลิกคว่ำสำหรับ ตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร โดยการพังทลายเกิดขึ้นที่มุมของผิวหน้าความลาดเอียง เท่ากับ 63°

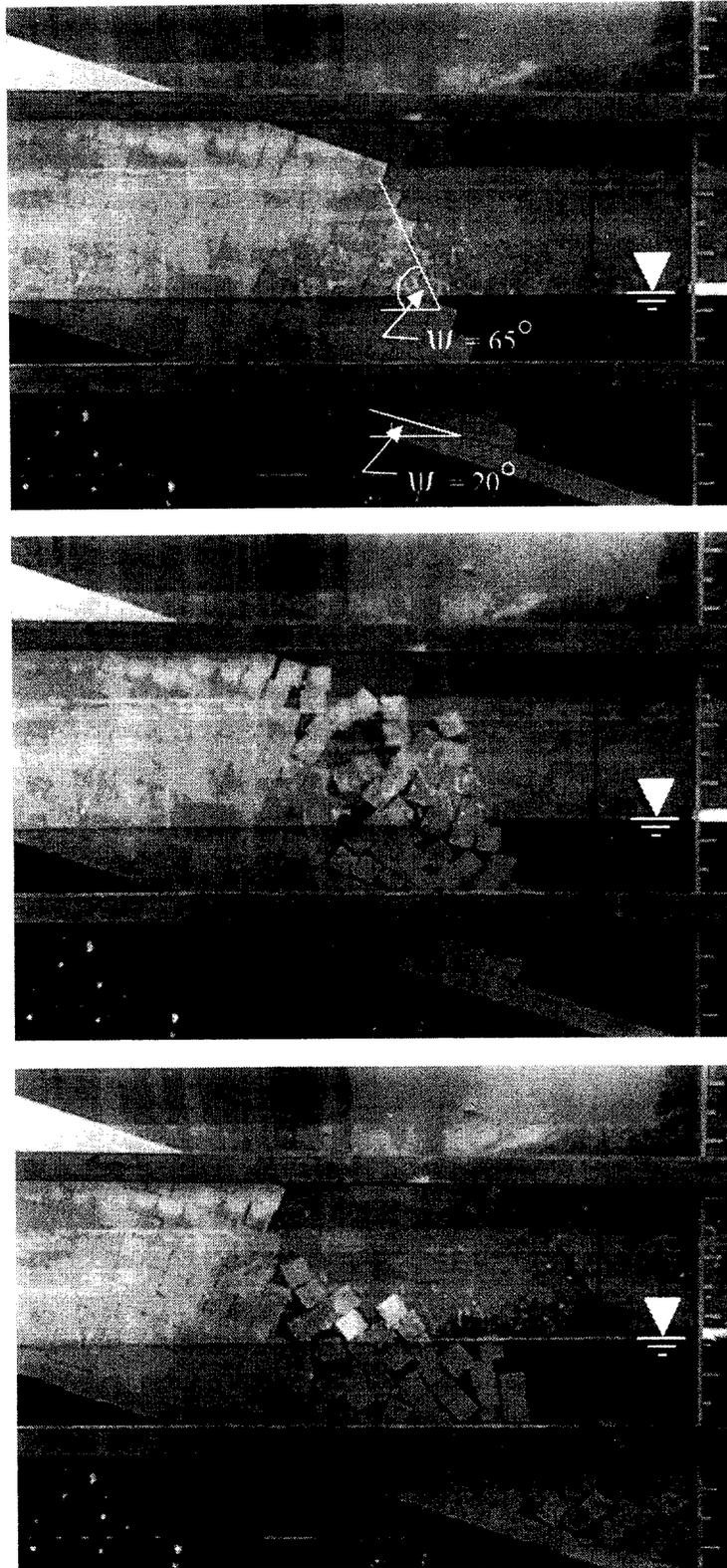
- 2) ปิดแบบจำลองด้วยแผ่นอะคลิลิก เพื่อป้องกันการพังทลายออกมาด้านนอก
- 3) ทำการหมุนรอกเพื่อยกระดับของคานเพื่อให้หินมีมุมเข้าใกล้มุมเอียงที่จุดพังทลายของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง ทำการวัดมุมเอียงของคานยก (ψ_p) โดยอาจจะต่ำกว่ามุมเอียงของคานในการทดสอบความลาดเอียงในสภาวะแห้งประมาณ 1° ถึง 3°
- 4) ปล่อน้ำเข้าด้านล่างของความลาดเอียงอย่างช้า ๆ
- 5) บันทึกภาพวิดีโอและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหินด้วยสายตาขณะให้น้ำกำลังเพิ่มสูงขึ้น
- 6) หยุดปล่อน้ำ และวัดระดับความสูงของน้ำ เมื่อตัวอย่างหินเกิดการเคลื่อนตัว
- 7) คำนวณหาความสูงของความลาดเอียงที่จุดพังทลาย (H) และมุมของผิวหน้าลาดเอียงที่จุดพังทลาย (ψ_f)
- 8) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในสภาวะแห้งและในสภาวะที่ความลาดเอียงจมน้ำ

5.4.2 การศึกษาผลการพังทลายของความลาดเอียงที่จมน้ำ

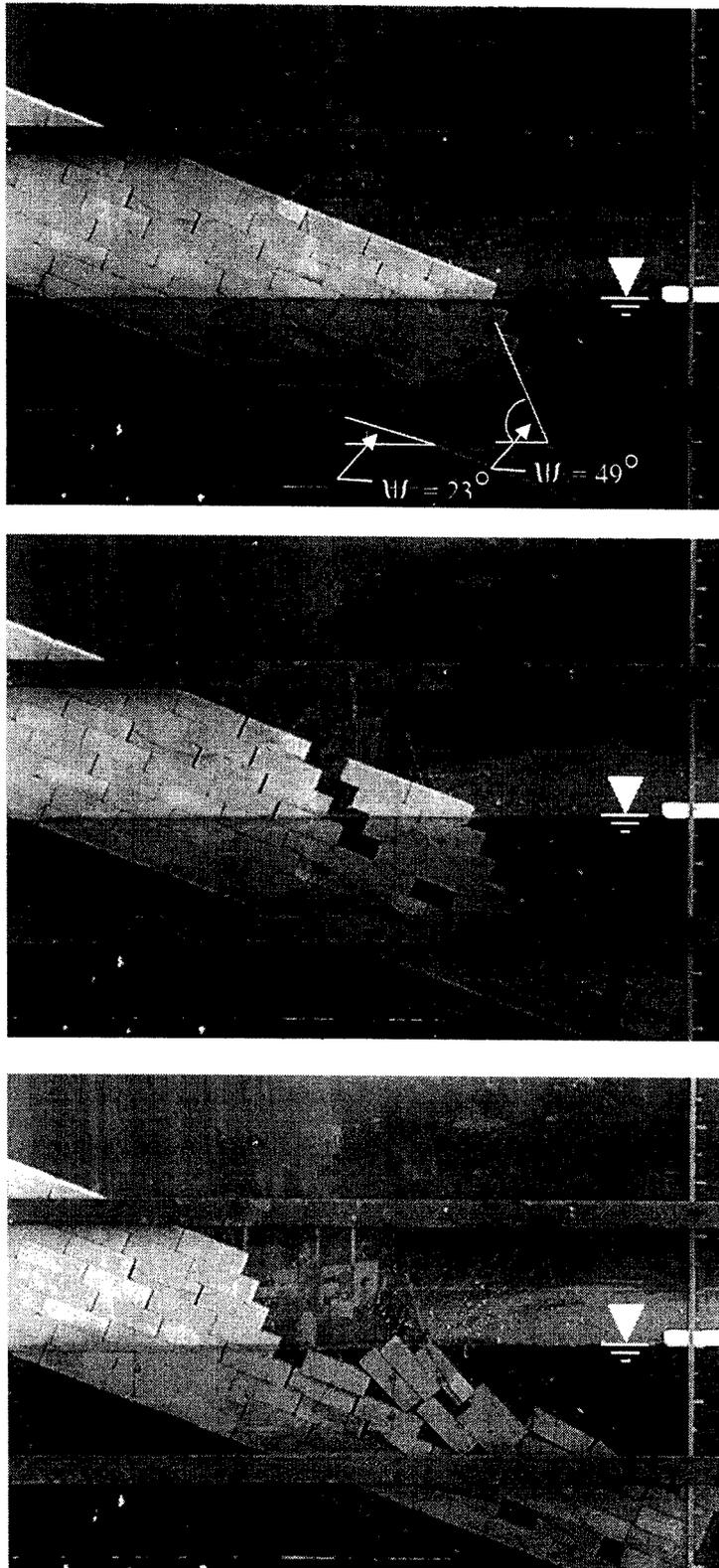
การจำลองการพังทลายแบบไหลเลื่อนของความลาดเอียงที่จมน้ำมีทั้งหมด 30 ชุด โดยมีการผันแปรความสูงตั้งแต่ 21 ถึง 91 เซนติเมตร และมุมของผิวความลาดเอียงตั้งแต่ 40° และ 70° แต่ลักษณะรูปทรงของความลาดเอียงประกอบด้วยตัวอย่างหินที่มีขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร และทำการจำลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง ตัวอย่างการจำลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.21 และ 5.22 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่า มุมของระนาบที่พังทลายเนื่องจากการไหลเลื่อนของความลาดเอียงที่จมน้ำมีค่าต่ำกว่าในสภาวะแห้ง (รูปที่ 5.23) เนื่องจากลดน้ำหนักของก้านตัวอย่างหินที่ส่วนล่างของความลาดเอียง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น นอกจากนั้นตัวอย่างหินที่มีขนาดเล็ก ($4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร) มีแนวโน้มที่จะเกิดการไหลเลื่อนได้ง่ายกว่าตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่กว่า ($4 \times 4 \times 8$ และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร)

5.4.3 การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข

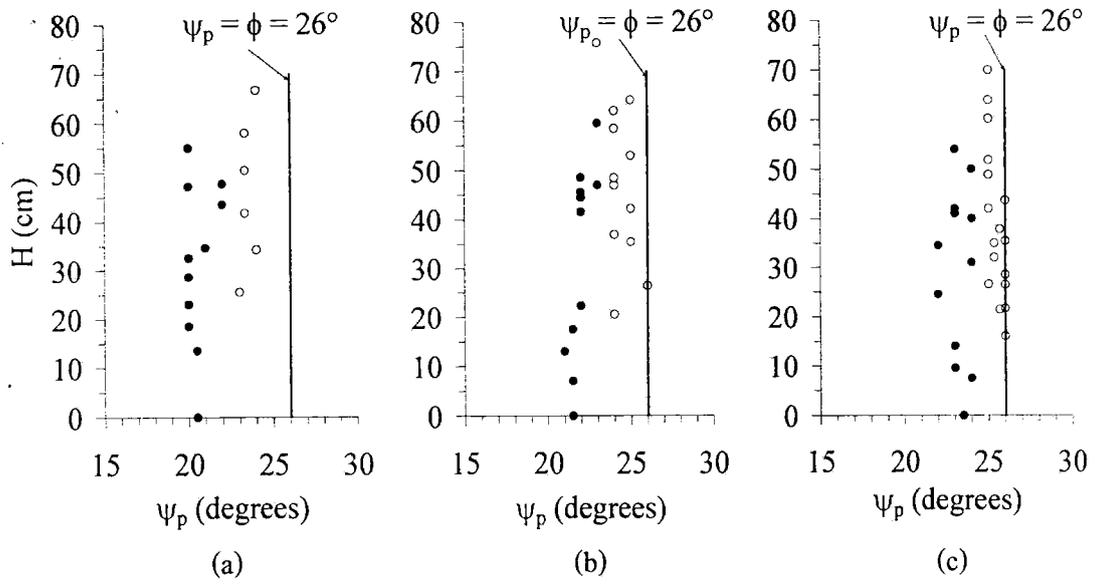
การจำลองการพังทลายของความลาดเอียงมวลหินที่จมน้ำด้วยโปรแกรม FLAC_Slope มีจุดประสงค์เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยโดยมีการกำหนดค่ามุมของความลาดเอียง มุมเอียงของระนาบ และความสูงของความลาดเอียงตามลักษณะของการจัดเรียงตัวอย่างหินที่ใช้ในการจำลองเชิงกายภาพ รูปที่ 5.24 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FLAC_Slope เมื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองเชิงกายภาพ รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบค่า FS ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งพบว่าผลการคำนวณให้ค่าที่ต่ำกว่ากับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพเพียงเล็กน้อย



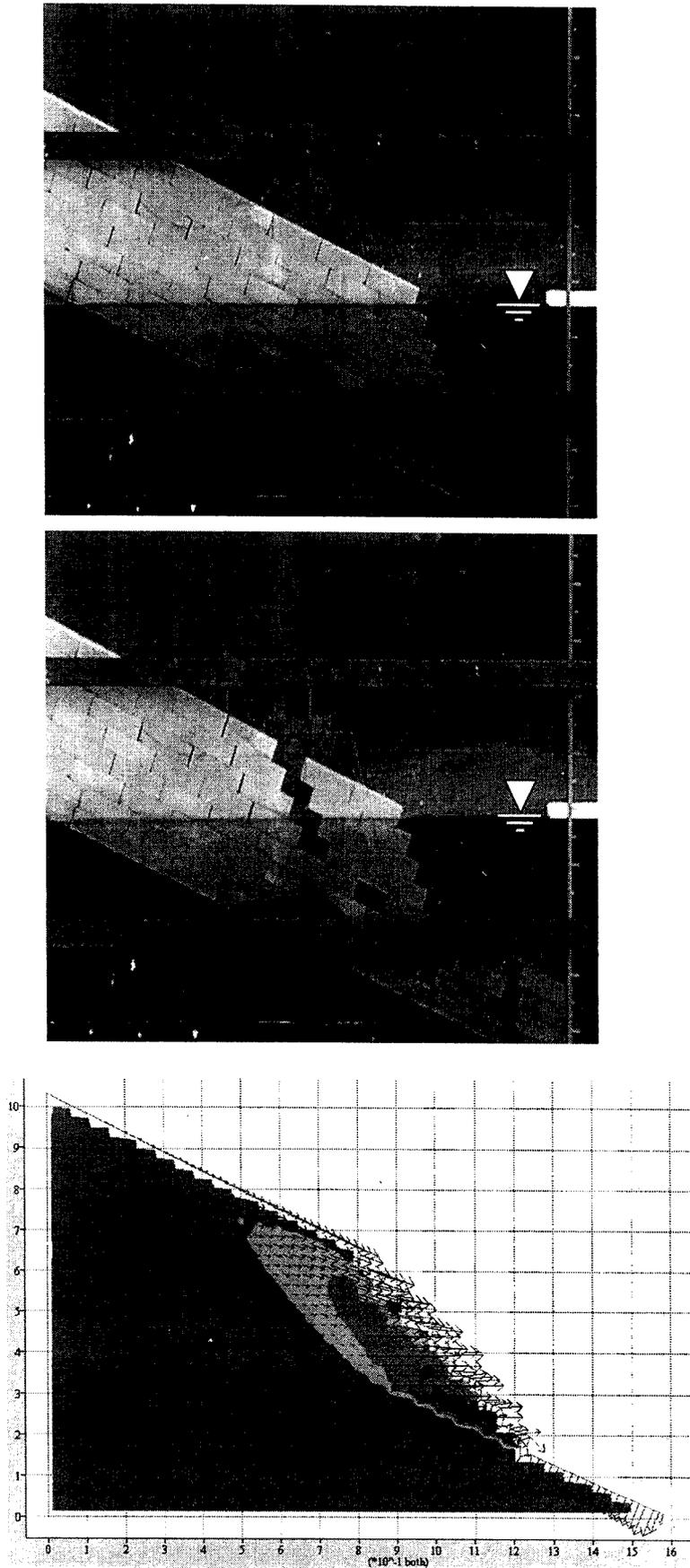
รูปที่ 5.21 ตัวอย่างของการจำลองการพังทลายของความลาดเอียงที่จมน้ำของตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร ที่ความสูงของความลาดเอียงเท่ากับ 57.3 เซนติเมตร



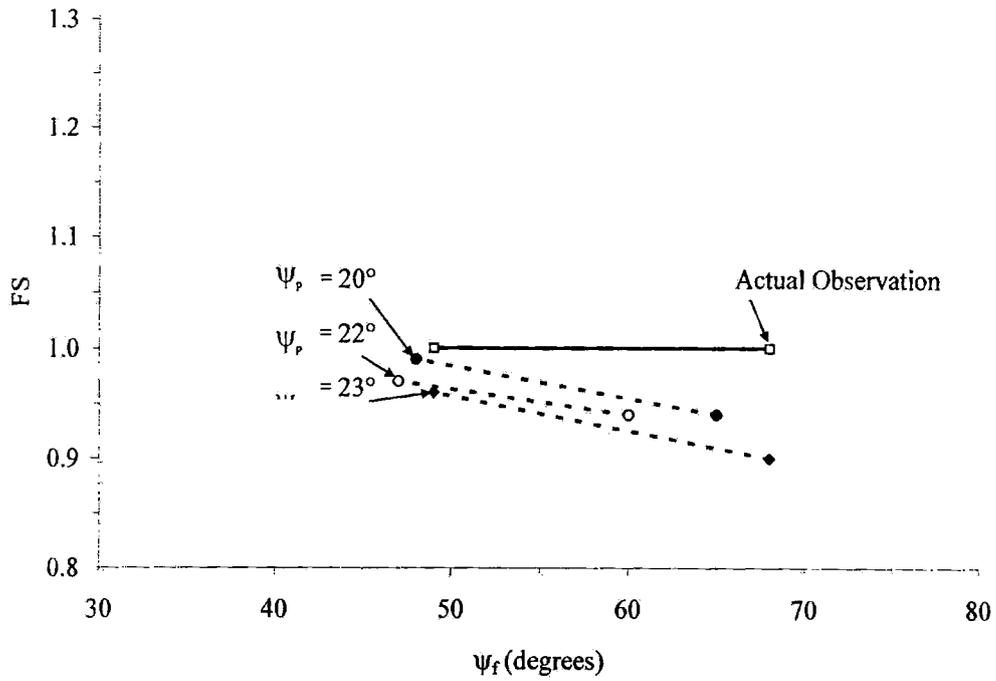
รูปที่ 5.22 ตัวอย่างของการจำลองการพังทลายของความลาดเอียงที่จมน้ำของตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร ที่ความสูงของความลาดเอียงเท่ากับ 55.6 เซนติเมตร



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง (H) กับมุม ψ_p สำหรับการพังทลายแบบไหลเลื่อนของความลาดเอียงที่จมน้ำ (วงกลมทึบ) และความลาดเอียงที่แห้ง (วงกลมโปร่ง) ของตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร (a) $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร (b) และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร (c)



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบผลของการจำลองการพังทลายด้วยโปรแกรม FLAC_Slope กับผลการจำลองทางกายภาพของตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร ที่มีมุม $\psi_p = 23^\circ$ $\psi_f = 49^\circ$ ความสูงของความลาดเอียงเท่ากับ 55.6 เซนติเมตร และความสูงของระดับน้ำคือ 56 เซนติเมตร



รูปที่ 5.25 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม FLAC_Slope (เส้นประ) ของความลาดเอียงที่จมน้ำ ณ จุดที่เกิดการพังทลาย

5.5 การจำลองการพังทลายของความลาดเอียงภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

การศึกษากการพังทลายแบบไหลเลื่อนของความลาดเอียงภายใต้คลื่นไหวสะเทือนจะใช้การวิเคราะห์แบบ Pseudostatic analysis (Kramer, 1996) ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของความเร่งเชิงสถิติที่ทำให้เกิดแรงเฉื่อยส่งผลให้มวลหินเกิดการพังทลาย โดยนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับการทดสอบ

5.5.1 วิธีการจำลองการพังทลายของความลาดเอียงภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

การจำลองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามขนาดของตัวอย่างหิน คือ $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบจะผันแปรความเร่งของคลื่นไหวสะเทือน ความสูงของความลาดเอียง มุมของระนาบที่ไหลเลื่อน และมุมที่ผิวหน้าความลาดเอียง ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

- 1) จัดเรียงตัวอย่างหินในแนวอนบนบนคานยกปรับระดับมุมเอียงให้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเรียงหินเพื่อทดสอบการพังทลายในแนวระนาบในสภาวะแห้ง
- 2) ปิดแบบจำลองด้วยแผ่นอะคลิลิก เพื่อป้องกันการการพังทลายออกมด้านนอก
- 3) ทำการหมุนรอกเพื่อยกระดับของคานเพื่อให้หินมีมุมเอียงซึ่งสามารถผันแปรจาก 0° ถึง 22° โดยจะทำการทดสอบที่มุมเอียงทุก 1°
- 4) เปิดมอเตอร์เพื่อให้เกิดคลื่นไหวสะเทือน โดยเริ่มต้นที่ความเร็วต่ำสุด โดยปล่อยให้เกิดการสั่นไหวจนครบ 1 นาที แล้วทำการปิดเครื่อง
- 5) บันทึกภาพวิดีโอทัศนและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหินขณะที่หินยังคงสั่นไหว
- 6) หากไม่เกิดการพังทลายของความลาดเอียงของตัวอย่างหินจะยกมุมเอียงของตัวอย่างหินให้เพิ่มขึ้นทีละ 1°
- 7) ปิดเครื่องทันทีถ้าตัวอย่างหินเคลื่อนตัว ทำการบันทึกค่าความเร็ว และความถี่ของการสั่นสะเทือน
- 8) คำนวณหาความสูงของความลาดเอียงที่จุดพังทลาย (H) และมุมของผิวหน้าลาดเอียงที่จุดพังทลาย (ψ_p)
- 9) เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีและผลจากการสังเกต

5.5.2 การศึกษากการพังทลายของความลาดเอียงภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

การศึกษากการพังทลายแบบ Pseudostatic analysis เป็นการอธิบายผลกระทบของแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการพังทลายของความลาดเอียงมวลหิน Kramer (1996) ซึ่งกล่าวว่า การสั่นไหวด้วยความเร่งเชิงสถิติจะทำให้เกิดแรงเฉื่อย (F_h และ F_v) ที่ส่งผลให้มวลหินเกิดการพังทลาย ขนาดของแรงเชิงสถิตินี้คือ

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (5.9)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (5.10)$$

เมื่อ a_h และ a_v คือความเร่งเชิงสถิติในแนวราบและในแนวตั้ง k_h และ k_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสถิติในแนวราบและในแนวตั้ง และ W คือน้ำหนักของมวลที่เกิดการพังทลาย ขนาดของความเร่งเชิงสถิติจะสัมพันธ์กับความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาความเร่ง a_h จากการหมุนของมอเตอร์ที่ผลักให้แบบจำลองเกิดการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 5.26 ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ความเร่ง a_h มีค่าเท่ากับความเร่งที่จุด B นั่นคือ $a_h = a_B$ โดย

$$a_B = R\omega_{OA}^2 \cos\theta + y\omega_{AB}^2 \cos\phi - y\alpha_{AB} \sin\phi \quad (5.11)$$

$$\omega_{OA} = \frac{2\pi}{T} \quad (5.12)$$

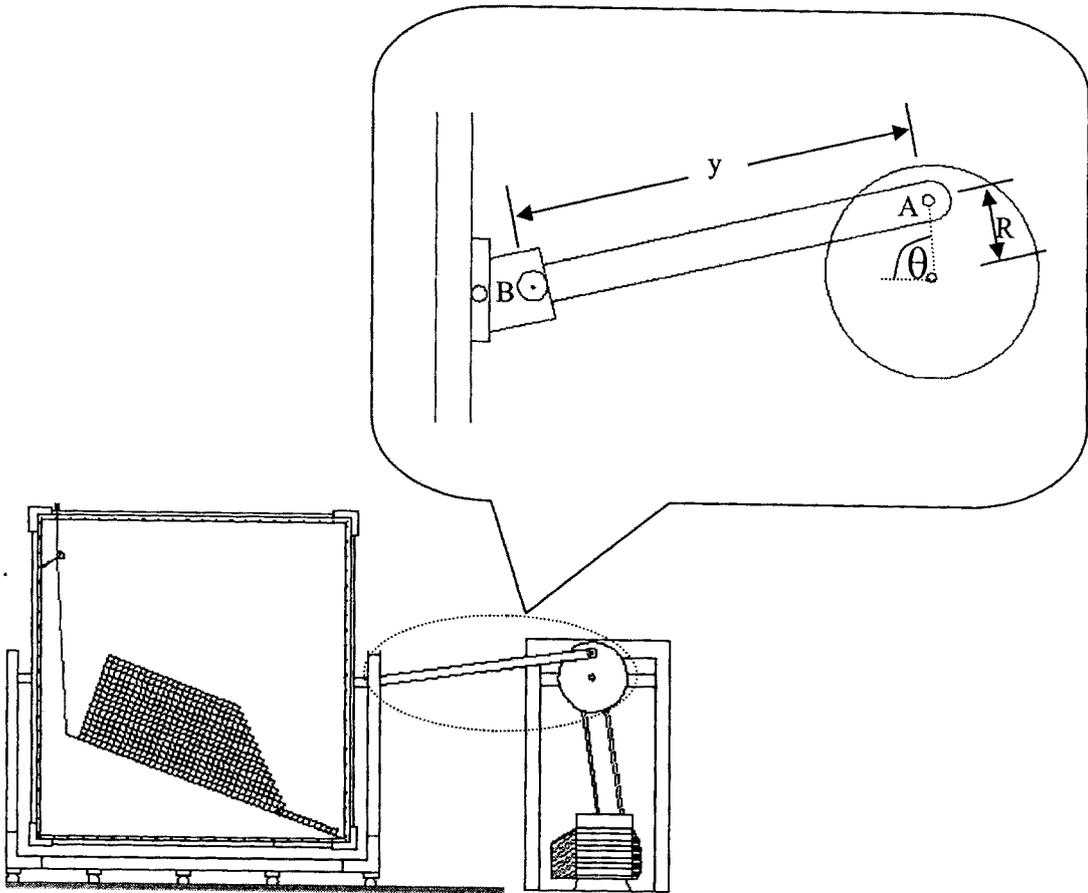
$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{R \sin\theta}{y} \right] \quad (5.13)$$

$$\omega_{AB} = \frac{R\omega_{OA} \cos\theta}{y \cos\phi} \quad (5.14)$$

$$\alpha_{AB} = \frac{R\omega_{OA}^2 \sin\theta - y\omega_{AB}^2 \sin\phi}{y \cos\phi} \quad (5.15)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของจานหมุน y คือ ความยาวของข้อเหวี่ยงที่เชื่อมระหว่างจานหมุนมอเตอร์และแบบจำลอง ω_{OA} คือ ความเร็วเชิงมุมของ OA ค่า θ คือ มุมที่จุด A กระทบกับแนวระนาบ ω_{AB} คือ ความเร็วเชิงมุมของแขนข้อเหวี่ยง ϕ คือ มุมที่ข้อเหวี่ยงกระทบกับแนวระนาบ α_{AB} คือ ความเร่ง AB และ T คือ คาบของการหมุน (Riley and Sturges, 1993)

ค่าปัจจัยความปลอดภัยคำนวณได้จากแรงที่ต้านการเคลื่อนตัวของมวลต่อแรงที่ชักนำให้เกิดการพังทลายของมวลหินในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวของการพังทลาย (Kramer, 1996)



รูปที่ 5.26 ส่วนประกอบของข้อเหวี่ยงและจานหมุนของมอเตอร์ที่ผลักให้แบบจำลองเกิดการเคลื่อนที่ในการจำลองคลื่นไหวสะเทือน

$$FS = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}} = \frac{c_{ab} + [(W - F_v)\cos\beta - F_h \sin\beta]\tan\phi}{(W - F_v)\sin\beta + F_h \cos\beta} \quad (5.11)$$

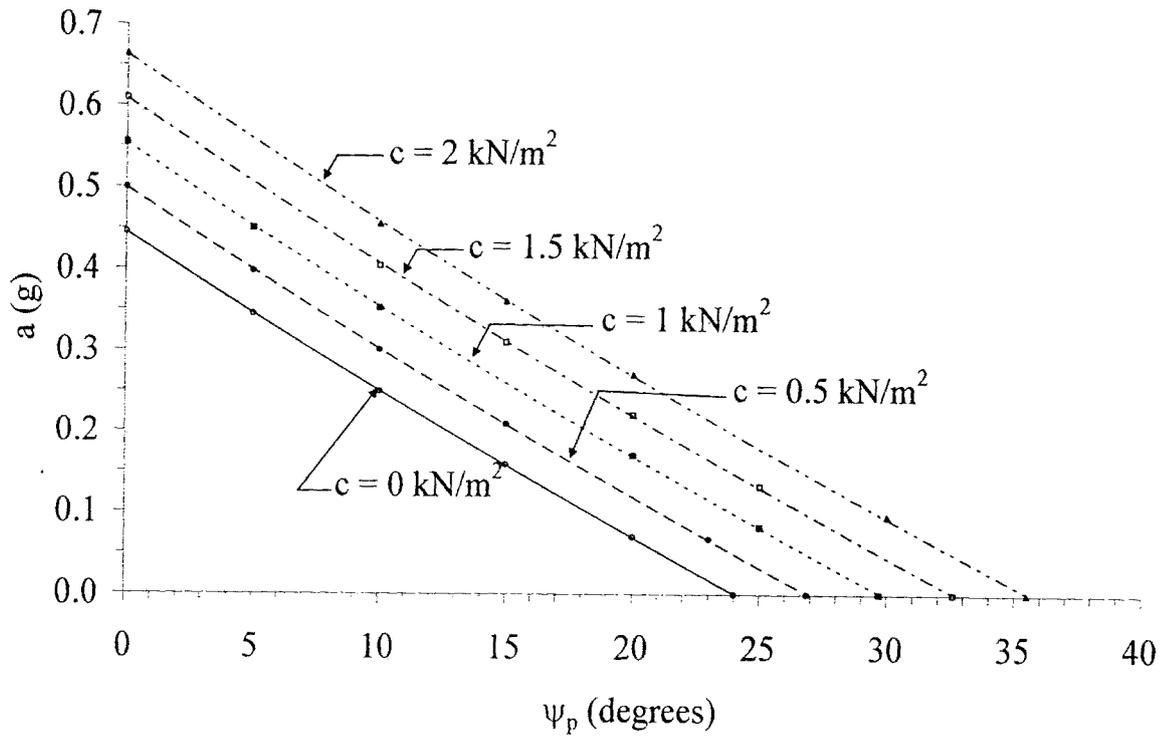
เมื่อ c และ ϕ คือ ค่าตัวแปรของความแข็งของ Mohr-Coulomb ที่อธิบายความแข็งแรงเฉือนของ ระบายที่พังทลาย และ l_{ab} คือความยาวของระบายที่พังทลาย แรงเชิงสถิตในแนวราบทำให้ค่าปัจจัย ความปลอดภัยลดลง นั่นคือแรงนี้จะลดค่าแรงต้านการเคลื่อนของมวลหิน (สำหรับ $\phi > 0$) และเพิ่ม แรงที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลหิน ค่าแรงเชิงสถิตในแนวตั้งจะมีอิทธิพลต่อค่าปัจจัยความ ปลอดภัยน้อย เนื่องจากแรงนี้จะลด (หรือเพิ่ม ขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง) ทั้งแรงที่ก่อให้เกิดการ เคลื่อนที่และแรงต้านการเคลื่อนที่ของมวลหิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาผลกระทบของ ความเร่งในแนวตั้งในการวิเคราะห์เชิงสถิต เพราะแทนทดสอบจะเคลื่อนตัวในแนวระนาบเท่านั้น

5.5.3 ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

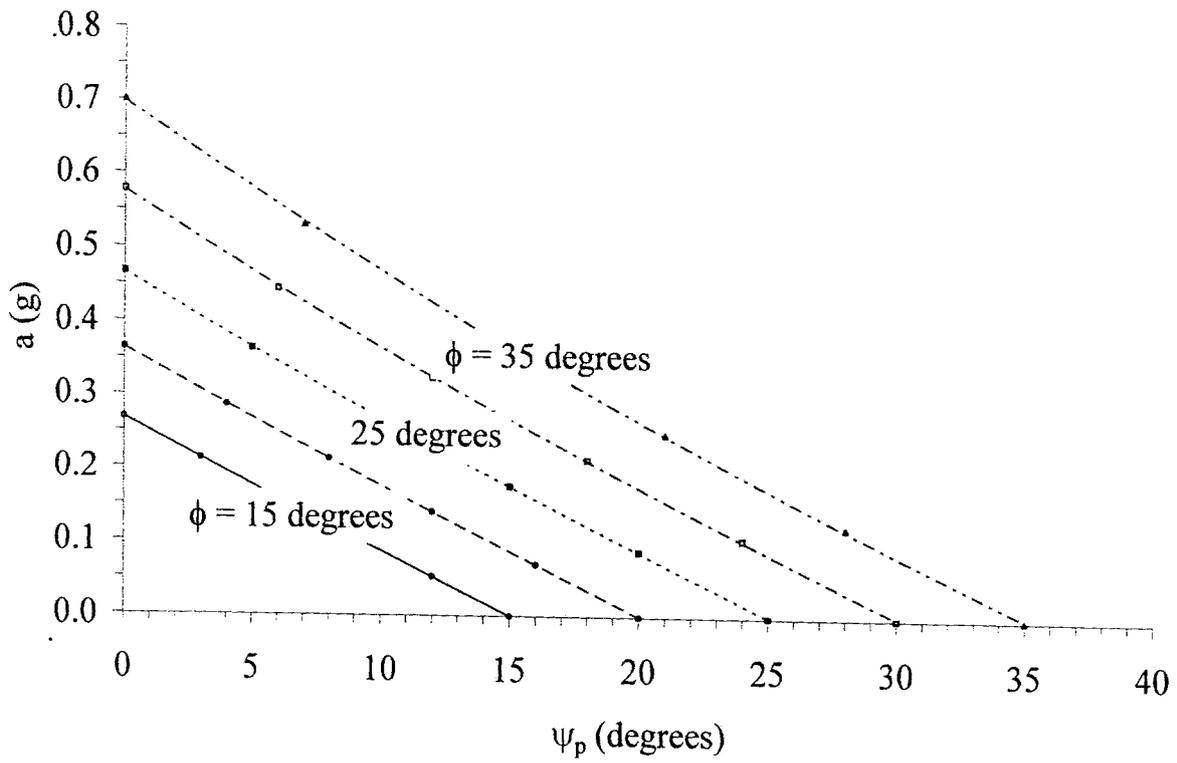
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการพังทลายของความลาดเอียงแบบไหลเลื่อนของตัวอย่างหิน ทั้งสามขนาดจำนวนทั้งสิ้น 100 ชุด โดยมีการผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ของสถิตเต็มในแนวราบ (k_h) ซึ่งงานวิจัยนี้จะเสนอในรูปของค่าความเร่งในแนวระนาบ (a) ที่เปรียบเทียบกับเป็นจำนวนเท่าของแรง ดึงดูดของโลก (g) ตั้งแต่ 0.013 ถึง 0.225 g ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2 ส่วนการคำนวณตามทฤษฎีได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.27 และ 5.28 ซึ่งระบุว่าค่า a ที่ทำให้เกิดการเคลื่อน ไหลจะลดลงถ้ามุม φ_p เพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งนี้จะขึ้นกับค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ด้วย โดยตารางที่ 5.3 ถึง 5.5 สรุปค่าปัจจัยและผลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างหินทั้ง 3 ขนาด ภายใต้ สภาวะที่ต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ในรูปที่ 5.29 ถึง 5.31 และสามารถสรุปได้ว่า อัตราเร่งที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหลของความลาดเอียงที่ทดสอบได้มี ค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตัวอย่างหินที่มีขนาดเล็ก หรืออีกนัยหนึ่งคือ มวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกน้อย ซึ่งผลการทดสอบนี้ทำให้เกิดข้อพิง ระวังเมื่อนำสมการคำนวณจากทฤษฎีมาใช้ในการประเมินเสถียรภาพของมวลหินภายใต้ แรงสั่นสะเทือน เพราะจะทำให้ผลการประเมินไม่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์

ตารางที่ 5.2 สรุปค่าปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความลาดเอียงของตัวอย่างหินที่ได้รับผลกระทบจาก
คลื่นแผ่นดินไหว (ประยุกต์จาก Richter, 1958 และ Wald et al, 1999)

Sample	No. of Testing	Frequency (Hz)	k_n or a (g)	Modified Mercalli Intensity	H (cm)	Ψ_r (degrees)	Ψ_p (degrees)
4x4x4	7	0.403	0.013	III	69-83	40-44	15-18
	3	0.504	0.017	IV	80-82	40-43	15-17
	3	0.629	0.027	IV	76-78	41-44	14-16
	4	0.700	0.033	IV	44-53	33-44	12-17
	7	0.833	0.046	V	50-77	31-41	4-15
	8	1.000	0.067	V	46-75	28-38	1-12
	4	1.233	0.102	VI	49-54	28-32	3-6
	4	1.346	0.119	VI	46-62	28-32	1-4
	1	1.833	0.225	VII	46	46	1
4x4x8	7	0.403	0.013	III	55-58	61-67	16-21
	7	0.504	0.017	IV	55-56	64-68	18-20
	3	0.629	0.027	IV	54-56	63-68	18-19
	3	0.700	0.033	IV	55-57	60-64	15-18
	11	0.833	0.046	V	51-55	57-63	10-16
	8	1.000	0.067	V	48-52	52-59	10-12
	6	1.346	0.119	VI	45-48	48-54	1-5
	1	1.700	0.193	VII	45	51	1
	1	1.833	0.225	VII	45	46	1
4x4x12	2	0.403	0.013	III	58-59	66-67	21-22
	4	0.833	0.046	V	55-57	60-63	15-18
	2	1.117	0.083	V	52-53	58-59	12-13
	2	1.429	0.136	VI	49-50	52-53	6-7
	1	1.700	0.193	VII	45	46	1
	1	1.833	0.225	VII	45	46	1



รูปที่ 5.27 การคำนวณตามทฤษฎีของความลาดเอียงในสถานะที่มีคลื่นไหวสะเทือนที่ผันแปรค่าความเค้นยึดติด โดยน้ำหนักของมวลหินที่พังทลายเท่ากับ 13.2 kN/m ความยาวของระนาบที่พังทลายเท่ากับ 1.44 เมตร ที่มีมุมเสียดทานเท่ากับ 24°



รูปที่ 5.28 การคำนวณตามทฤษฎีของความลาดเอียงในสถานะที่มีคลื่นไหวสะเทือนที่พื้นแปรค่ามุมเสียดทาน โดยน้ำหนักของมวลหินที่พังทลายเท่ากับ 13.2 kN/m ความยาวของระนาบที่พังทลายเท่ากับ 1.44 เมตร และไม่มีค่าความเค้นยึดติด

ตารางที่ 5.3 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_n or a (g)	Stability*
C-S2-H2-M2-4d	23.47	151.4	61.4	44.8	67.6	85	15	40.5	11.3	0.046	F
C-S2-H2-M2-5d	23.47	151.1	57.3	44.8	62.9	80	12	38	11.1	0.033	S
C-S2-H2-M2-6d	23.47	151.1	57.3	44.8	62.9	80	12	38	11.1	0.046	F
C-S2-H2-M2-7d	23.47	151.1	57.3	44.8	62.9	80	12	38	11.1	0.067	F
C-S2-H2-M2-8d	23.47	151.3	66.3	44.5	59.0	87	10	37	11.5	0.046	S
C-S2-H2-M2-9d	23.47	151.3	66.3	44.5	59.0	87	10	37	11.5	0.067	F
C-S2-H2-M2-10d	23.47	151.1	62.1	44.6	56.9	75	8	34	11.3	0.046	S
C-S2-H2-M2-11d	23.47	151.1	62.1	44.6	56.9	75	8	34	11.3	0.067	S
C-S2-H2-M2-12d	23.47	151.1	62.0	44.6	53.3	80	6	33.5	11.3	0.046	S
C-S2-H2-M2-13d	23.47	151.1	62.0	44.6	53.3	80	6	33.5	11.3	0.067	S
C-S2-H2-M2-14d	23.47	151.3	69.5	44.7	50.6	90	4	31.5	11.7	0.046	S
C-S2-H2-M2-15d	23.47	151.3	69.5	44.7	50.6	90	4	31.5	11.7	0.067	S

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.3 รังไข่และผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	Ψ_p (degrees)	Ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_n or a (g)	Stability*
C-S2-H2-M2-16d	23.47	151.3	61.4	44.7	50.6	80	4	31.5	11.3	0.119	F
C-S2-H2-M2-17d	23.47	151.1	63.7	44.8	47.8	85	2	29	11.5	0.067	S
C-S2-H2-M2-18d	23.47	151.1	59.2	44.8	47.8	85	2	29	11.2	0.119	S
C-S2-H2-M2-19d	23.47	150.3	51.2	44.8	46.3	70	1	28	10.7	0.067	S
C-S2-H2-M2-20d	23.47	150.3	51.2	44.8	46.3	70	1	28	10.7	0.119	S
C-S2-H1-M1-1d	23.47	151.3	42.5	52.8	80.3	85	15	40	12.2	0.013	S
C-S2-H1-M1-2d	23.47	151.3	42.5	52.8	81.3	85	16	41.5	12.2	0.013	S
C-S2-H1-M1-3d	23.47	151.3	42.5	52.8	80.8	85	17	44	12.2	0.013	F
C-S2-H1-M1-4d	23.47	150.2	41.0	52.7	80.2	80	15	40	12.0	0.013	S
C-S2-H1-M1-5d	23.47	150.2	41.0	52.7	80.2	80	15	40	12.0	0.017	S
C-S2-H1-M1-6d	23.47	150.2	41.0	52.7	80.4	80	16	42	12.0	0.017	F
C-S2-H1-M1-8d	23.47	150.2	45.1	52.6	81.8	80	17	43	12.2	0.017	F

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)



ตารางที่ 5.3 รั้วขี้และผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	Ψ_p (degrees)	Ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_h or a (g)	Stability*
C-S2-H1-M1-9d	23.47	151.3	46.8	52.9	76.8	85	15	43	12.5	0.027	F
C-S2-H1-M1-10d	23.47	151.3	46.8	52.9	78.3	85	16	44	12.5	0.027	F
C-S2-H1-M1-11d	23.47	149.6	40.6	52.8	76.3	91	14	41	12.0	0.027	S
C-S2-H2-M1-1d	23.47	149.6	40.6	52.8	78.1	93	16	44	12.0	0.013	S
C-S2-H2-M1-2d	23.47	149.6	40.6	52.8	82.9	95	18	44.5	12.0	0.013	F
C-S2-H2-M1-3d	23.47	151.1	57.8	44.9	69.3	93	17	43.5	11.2	0.013	F
C-S2-H2-M4-1d	23.47	149.6	40.6	44.9	45.7	85	1	46	10.2	0.225	F
C-S2-H2-M4-1d	23.47	147.2	59.2	44.6	49.4	80	3	28.5	11.0	0.102	S
C-S2-H2-M4-2d	23.47	147.2	59.2	44.6	51.0	80	4	29.5	11.0	0.102	S
C-S2-H2-M4-3d	23.47	147.2	59.2	44.6	52.6	80	5	30.5	11.0	0.102	S
C-S2-H2-M4-4d	23.47	147.2	59.2	44.6	54.1	80	6	31.5	11.0	0.102	F

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_h or a (g)	Stability*
R8H-S1-H2-M1-1d	23.47	148.7	107.9	44.7	55.1	80.5	16	61.5	13.6	0.013	S
R8H-S1-H2-M1-2d	23.47	148.7	107.9	44.7	56.1	82.5	18	63.5	13.6	0.013	S
R8H-S1-H2-M1-3d	23.47	148.7	107.9	44.7	57.0	84.5	20	65.5	13.6	0.013	F
R8H-S1-H2-M1-4d	23.47	148.7	107.9	44.7	57.5	85.5	21	66.5	13.6	0.013	F
R8H-S1-H2-M1-5d	23.47	145.4	104.0	44.9	55.4	82.5	18	65.5	13.3	0.017	S
R8H-S1-H2-M1-6d	23.47	145.4	104.0	44.9	55.8	83.5	19	66.5	13.3	0.017	F
R8H-S1-H2-M1-8d	23.47	145.4	104.0	44.9	56.3	84.5	20	67.5	13.3	0.017	F
R8H-S1-H2-M1-9d	23.47	148.6	107.9	44.7	55.4	80.5	18	65	13.6	0.027	F
R8H-S1-H2-M1-10d	23.47	148.6	107.9	44.7	55.8	81.5	19	66	13.6	0.027	F
R8H-S1-H2-M2-1d	23.47	145.5	104.1	44.8	54.9	90	15	60	13.3	0.033	S
R8H-S1-H2-M2-2d	23.47	145.5	104.1	44.8	56.2	90	17	61.5	13.3	0.033	F
R8H-S1-H2-M2-3d	23.47	145.5	104.1	44.8	56.4	90	17.5	62	13.3	0.033	F

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_h or a (g)	Stability*
R8H-S1-H2-M2-4d	23.47	148.7	107.9	44.7	54.9	90	16	62	13.6	0.046	F
R8H-S1-H2-M2-5d	23.47	148.7	107.9	44.7	53.8	90	15	62.5	13.6	0.046	F
R8H-S1-H2-M1-2d	23.47	148.7	107.9	44.7	56.1	82.5	18	63.5	13.6	0.013	S
R8H-S1-H2-M1-3d	23.47	148.7	107.9	44.7	57.0	84.5	20	65.5	13.6	0.013	F
R8H-S1-H2-M1-4d	23.47	148.7	107.9	44.7	57.5	85.5	21	66.5	13.6	0.013	F
R8H-S1-H2-M1-5d	23.47	145.4	104.0	44.9	55.4	82.5	18	65.5	13.3	0.017	S
R8H-S1-H2-M1-6d	23.47	145.4	104.0	44.9	55.8	83.5	19	66.5	13.3	0.017	F
R8H-S1-H2-M1-8d	23.47	145.4	104.0	44.9	56.3	84.5	20	67.5	13.3	0.017	F
R8H-S1-H2-M1-9d	23.47	148.6	107.9	44.7	55.4	80.5	18	65	13.6	0.027	F
R8H-S1-H2-M1-10d	23.47	148.6	107.9	44.7	55.8	81.5	19	66	13.6	0.027	F
R8H-S1-H2-M2-1d	23.47	145.5	104.1	44.8	54.9	90	15	60	13.3	0.033	S
R8H-S1-H2-M2-2d	23.47	145.5	104.1	44.8	56.2	90	17	61.5	13.3	0.033	F

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_r or a (g)	Stability*
R8H-S1-H2-M2-3d	23.47	145.5	104.1	44.8	56.4	90	17.5	62	13.3	0.033	F
R8H-S1-H2-M2-4d	23.47	148.7	107.9	44.7	54.9	90	16	62	13.6	0.046	F
R8H-S1-H2-M2-5d	23.47	148.7	107.9	44.7	53.8	90	15	62.5	13.6	0.046	F
R8H-S1-H2-M2-6d	23.47	148.7	107.9	44.7	53.3	90	13	59	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M2-7d	23.47	148.7	107.9	44.7	53.1	90	14	62	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M2-8d	23.47	145.5	95.7	44.7	51.1	75	10	57.5	12.8	0.067	S
R8H-S1-H2-M2-9d	23.47	145.5	95.7	44.7	48.2	75	5	52	12.8	0.067	S
R8H-S1-H2-M2-10d	23.47	145.5	95.7	44.7	48.8	75	6	53	12.8	0.067	S
R8H-S1-H2-M2-11d	23.47	145.5	95.7	44.7	49.3	75	7	55	12.8	0.067	S
R8H-S1-H2-M2-12d	23.47	145.5	95.7	44.7	49.9	75	8	56	12.8	0.067	F
R8H-S1-H2-M2-13d	23.47	148.7	108	44.7	47.9	85	5	54	13.7	0.119	F
R8H-S1-H2-M2-14d	23.47	148.5	107.8	44.7	46.1	85	2	49	13.6	0.119	S

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_h or a (g)	Stability*
R8H-S1-H2-M2-15d	23.47	148.7	107.8	44.7	45.4	85	1	48	13.6	0.119	S
R8H-S1-H2-M2-16d	23.47	148.7	107.8	44.6	51.7	90	11	58	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M2-17d	23.47	148.7	107.8	44.6	52.3	90	12	59	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M2-18d	23.47	148.7	107.8	44.6	51.7	90	11	58	13.6	0.067	S
R8H-S1-H2-M2-19d	23.47	148.7	107.8	44.6	52.3	90	12	59	13.6	0.067	F
R8H-S1-H2-M1-11d	23.47	148.7	108	44.7	55.4	90	18	65	13.7	0.017	S
R8H-S1-H2-M1-13d	23.47	148.7	107.8	44.6	51.1	90	10	57	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M1-14d	23.47	148.7	107.8	44.6	51.7	90	11	58	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M1-15d	23.47	148.7	107.8	44.6	52.3	90	12	59	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M1-16d	23.47	148.7	107.8	44.6	52.8	90	13	60	13.6	0.046	S
R8H-S1-H2-M1-17d	23.47	148.7	107.8	44.6	53.3	90	14	61	13.6	0.046	F
R8H-S1-H2-M1-18d	23.47	148.7	107.7	44.7	54.1	85	18	68	13.6	0.027	F

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_n or a (g)	Stability*
R8H-S1-H2-M2-20d	23.47	148.7	107.8	44.7	49.1	85	8	60	13.6	0.067	F
R8H-S1-H2-M2-21d	23.47	148.6	107.8	44.7	46.9	85	3	49.5	13.6	0.119	F
R8H-S1-H2-M2-22d	23.47	148.6	107.8	44.7	45.4	85	1	49.5	13.6	0.119	S
R8H-S1-H2-M2-23d	23.47	148.6	107.8	44.7	46.9	85	3	49.5	13.6	0.119	S
R8H-S1-H2-M3-2d	23.47	148.7	107.9	44.7	45.3	85	1	51	13.6	0.193	F
R8H-S1-H3-M1-1d	23.47	148.7	123.5	28.5	35.3	85	18	65	9.2	0.013	S
R8H-S1-H3-M1-2d	23.47	148.7	123.5	28.5	35.9	85	20	67	9.2	0.013	F
R8H-S1-H3-M1-3d	23.47	148.5	123.7	28.2	35.4	85	19	65.5	9.1	0.013	S
R8H-S1-H3-M1-4d	23.47	148.5	123.7	28.2	35.2	90	18	64	9.1	0.017	S
R8H-S1-H3-M1-5d	23.47	148.5	123.7	28.2	35.5	90	19	65	9.1	0.017	S
R8H-S1-H3-M1-6d	23.47	145.5	119	28.3	35.9	90	20	66	8.9	0.017	F
R8H-S1-H3-M1-7d	23.47	148.5	123.6	28.3	34.5	85	16	63	9.2	0.027	S

* Notes F = Failure

S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน (ต่อ)

Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	ψ_p (degrees)	ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_n or a (g)	Stability*
R8H-S1-H3-M1-8d	23.47	148.5	123.6	28.3	34.8	85	17	64	9.2	0.027	S
R8H-S1-H3-M1-9d	23.47	148.5	123.6	28.3	35.1	85	18	65	9.2	0.027	F
R8H-S1-H3-M1-10d	23.47	149.8	123.5	28.9	36.1	85	19	66	9.4	0.027	F
R8H-S1-H3-M1-11d	23.47	149.7	123.6	28.4	33.3	85	12	59	9.2	0.046	S
R8H-S1-H3-M1-12d	23.47	149.7	123.6	28.4	33.6	85	13	60	9.2	0.046	S
R8H-S1-H3-M1-13d	23.47	149.7	123.6	28.4	34.0	85	14	61	9.2	0.046	S
R8H-S1-H3-M1-14d	23.47	147.7	123.6	28.4	34.3	85	15	62	9.2	0.046	F
R8H-S1-H2-M2-28d	23.47	144.4	103.2	44.7	54.9	85	16	62	13.2	0.033	S
R8H-S1-H2-M2-29d	23.47	144.4	103.2	44.7	55.4	85	17	63	13.2	0.033	S
R8H-S1-H2-M2-30d	23.47	144.4	103.2	44.7	55.9	85	18	64	13.2	0.033	F
R8H-S1-H2-M2-34d	23.47	178.7	106.9	44.6	52.3	85	12	59	15.2	0.067	F
R8H-S1-H2-M2-35d	23.47	148.7	106.9	45	56.7	85	17.5	62	13.7	0.033	F
R8H-S1-H2-M4-1d	23.47	140.3	99.7	44.5	45.3	90	1	46	12.7	0.225	F

* Notes F = Failure

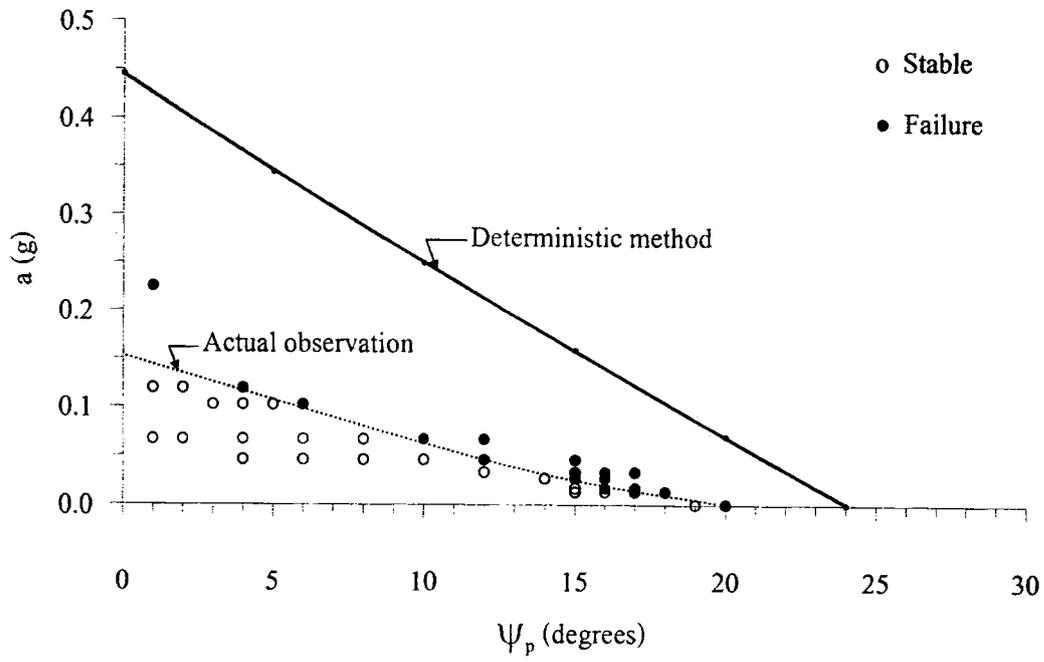
S = Stable (No failure)

ตารางที่ 5.5 ปัจจัยและผลการทดสอบการพังทลายของตัวอย่างหินขนาด 4x4x12 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

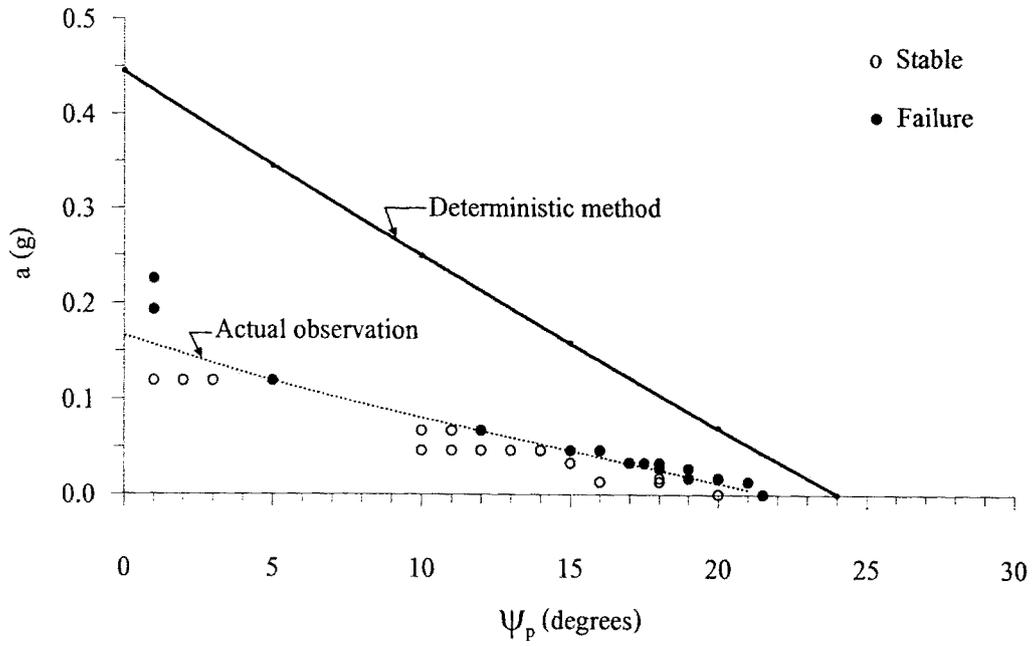
Series	Amplitude (mm)	A (cm)	b (cm)	h (cm)	H (cm)	α (degrees)	Ψ_p (degrees)	Ψ_r (degrees)	W (kN/m)	K_n or a (g)	Stability*
R12H-S1-H2-M2-1d	23.47	45.3	55.5	45.3	55.5	90	15	60	13.4	0.046	S
R12H-S1-H2-M2-2d	23.47	45.3	56.0	45.3	56.0	90	16	61	13.4	0.046	S
R12H-S1-H2-M2-3d	23.47	45.3	56.6	45.3	56.6	90	17	62	13.4	0.046	S
R12H-S1-H2-M2-4d	23.47	45.3	57.1	45.3	57.1	90	18	63	13.4	0.046	F
R12H-S1-H2-M2-5d	23.47	45.3	49.6	45.3	49.6	90	6	52	13.5	0.136	S
R12H-S1-H2-M2-6d	23.47	45.3	50.3	45.3	50.3	90	7	53	13.5	0.136	F
R12H-S1-H2-M1-1d	23.47	45.2	58.4	45.2	58.4	90	21	66	13.4	0.013	S
R12H-S1-H2-M1-2d	23.47	45.2	58.8	45.2	58.8	90	22	67	13.4	0.013	F
R12H-S1-H2-M3-1d	23.47	44.5	45.3	44.5	45.3	90	1	46	12.0	0.193	F
R12H-S1-H2-M3-2d	23.47	44.3	52.2	44.3	52.2	90	12	58	13.2	0.083	S
R12H-S1-H2-M3-3d	23.47	44.5	53.0	44.5	53.0	90	13	59	13.2	0.083	F
R12H-S1-H2-M4-1d	23.47	44.1	44.9	44.1	44.9	90	1	46	13.1	0.225	F

* Notes F = Failure

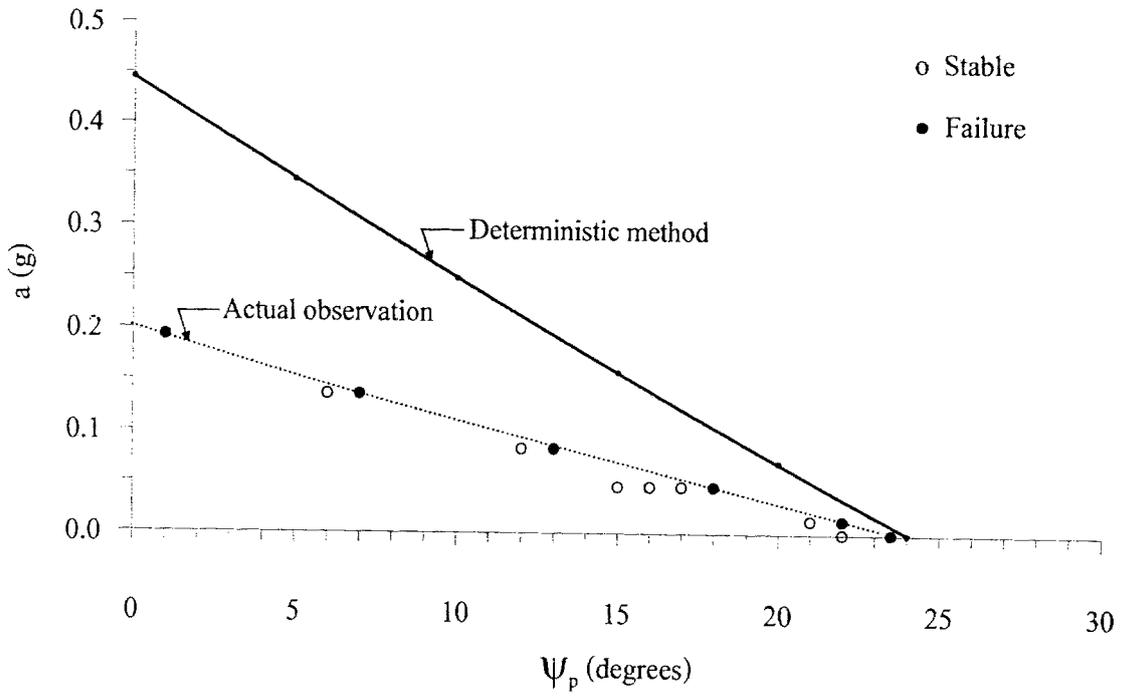
S = Stable (No failure)



รูปที่ 5.29 ผลการจำลองการพังทลายตามระนาบเนื่องจากคลื่นไหวสะเทือนของตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร และเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี



รูปที่ 5.30 ผลการจำลองการพังทลายตามระนาบเนื่องจากคลื่นไหวสะเทือนของตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร และเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี



รูปที่ 5.31 การจำลองการพังทลายตามระนาบเนื่องจากคลื่นไหวสะเทือนของตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร และเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี