

บทที่ 6

การจำลองอุโมงค์ในมวลหิน

เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีการทดสอบและผลของการจำลองอุโมงค์ในมวลหินในสภาพสองมิติด้วยแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้แรงดันสถิต และภายใต้คลื่นไหวสะเทือน และจะมีการผันแปรความกว้าง (W) และความลึก (D) ของช่องอุโมงค์และระยะห่างระหว่างรอยแตก (S) ในมวลหิน

6.1 การจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้แรงดันสถิต

การจำลองจะใช้ตัวอย่างหิน 3 ขนาด คือ 4×4×4 เซนติเมตร 4×4×8 เซนติเมตร และ 4×4×12 เซนติเมตร ซึ่งการจำลองจะผันแปรความลึก (D) และความกว้าง (W) ของอุโมงค์ โดยมีขั้นตอนการจำลองดังนี้

1) ปรับระดับของคานยกให้อยู่ในแนวระนาบ (มุมเอียงเท่ากับศูนย์องศา) จัดเรียงตัวอย่างหินในแนวตั้งให้เต็มพื้นที่ของแบบจำลอง และใช้ชุดของลูกแก้วบรรจุในช่อง 2 ข้างของชุดหินเพื่อให้ความเค้นแบบ Hydrostatic กับแบบจำลอง

2) ตั้งตัวอย่างหินที่อยู่ระหว่างกลางของแบบจำลองเพื่อให้เกิดเป็นอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมตามระดับความลึกที่ออกแบบไว้ สังเกตการพังทลายของตัวอย่างหินบริเวณรอบอุโมงค์ หากยังไม่เกิดการพังทลาย จะทำการตั้งตัวอย่างหินที่อยู่ติดกันในแถวเดียวกันเพื่อขยายความกว้างของอุโมงค์ จนกว่าจะเกิดการพังทลาย

3) ทำการวัดความลึกของอุโมงค์และความกว้างของอุโมงค์ ณ จุดที่เกิดการพังทลาย

4) จำลองอุโมงค์ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน และบันทึกผลการจำลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

การจำลองที่ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร โดยผันแปรความลึกตั้งแต่ 16.7 ถึง 98.7 เซนติเมตร ได้แสดงค่าปัจจัยและผลจากการจำลองไว้ในตารางที่ 6.1 ตัวอย่างของแบบจำลองในระดับความลึกต่าง ๆ กันได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 ส่วนรอยแตกที่ถูกจำลองในแนวตั้งและแนวระนาบแสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ซึ่งแสดงความกว้างสูงสุด (Maximum Span) ของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกในฟังก์ชันของความลึก ซึ่งผลระบุว่า ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ ณ จุดพังทลายจะเพิ่มขึ้นตามความลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ

$$D/S = 1.147 \exp(0.442W/S) \quad (6.1)$$

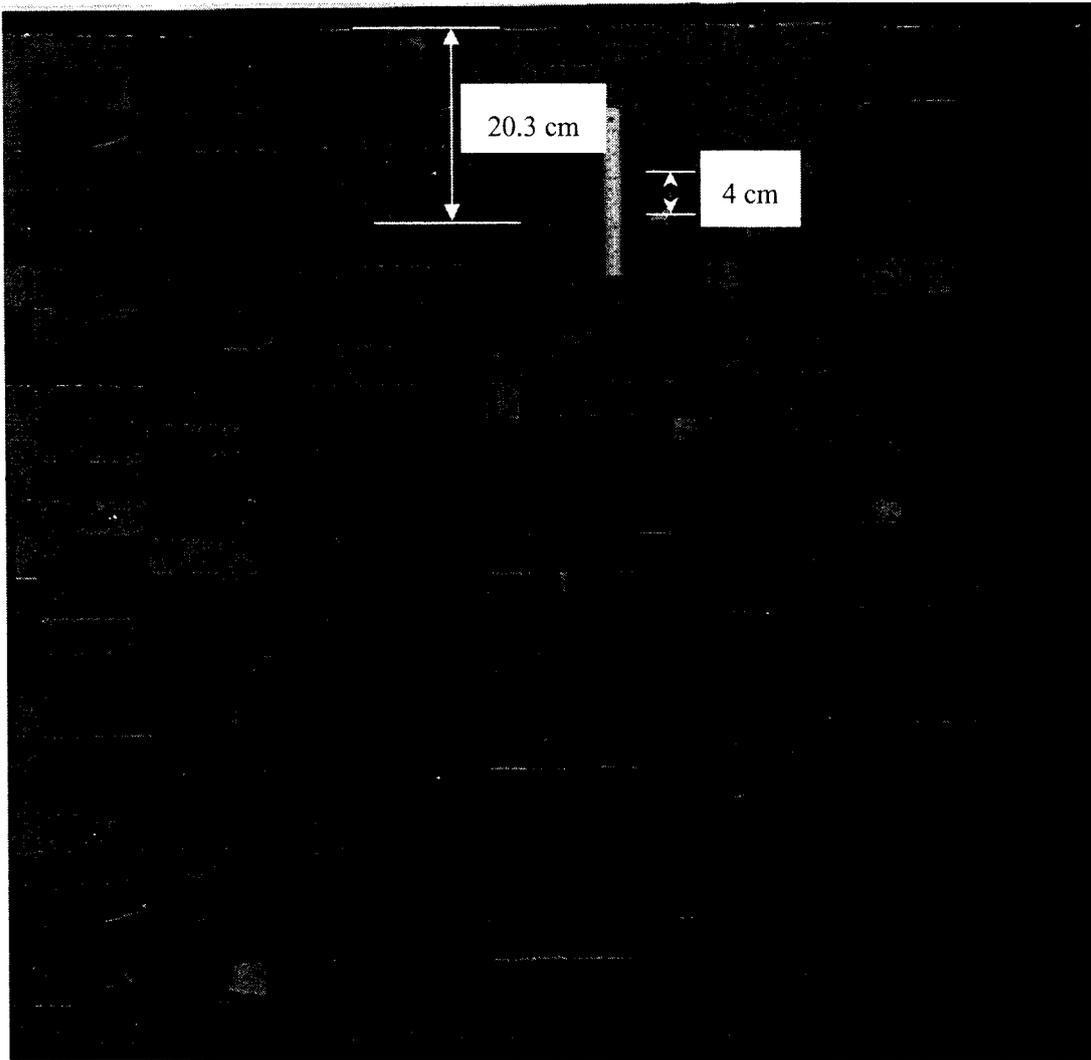
ตารางที่ 6.1 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 4 เซนติเมตร

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	Results
H1C1	98.7	24.7	4.4	1.1	Stable
H1C2	98.7	24.7	8.4	2.1	Stable
H1C3	98.7	24.7	12.6	3.15	Stable
H1C4	98.7	24.7	16.6	4.15	Stable
H1C5	98.7	24.7	20.4	5.1	Stable
H1C6	98.7	24.7	24.5	6.125	Stable
H1C7	98.7	24.7	29.2	7.3	Failure
H5C1	16.7	4.2	4.4	1.1	Stable
H5C2	16.7	4.2	8.6	2.2	Stable
H5C3	16.7	4.2	12.7	3.2	Failure
Hr3C1	53.6	13.4	4.2	1.1	Stable
Hr3C2	53.6	13.4	8.4	2.1	Stable
Hr3C3	53.6	13.4	12.7	3.2	Stable
Hr3C4	53.6	13.4	17	4.3	Stable
Hr3C5	53.6	13.4	20.8	5.2	Failure
H2C1	78.4	19.6	4.3	1.1	Stable
H2C2	78.4	19.6	8.5	2.1	Stable
H2C3	78.4	19.6	12.5	3.1	Stable
H2C4	78.4	19.6	16.6	4.2	Stable
H2C5	78.4	19.6	20.2	5.1	Stable
H2C6	78.4	19.6	24.8	6.2	Failure

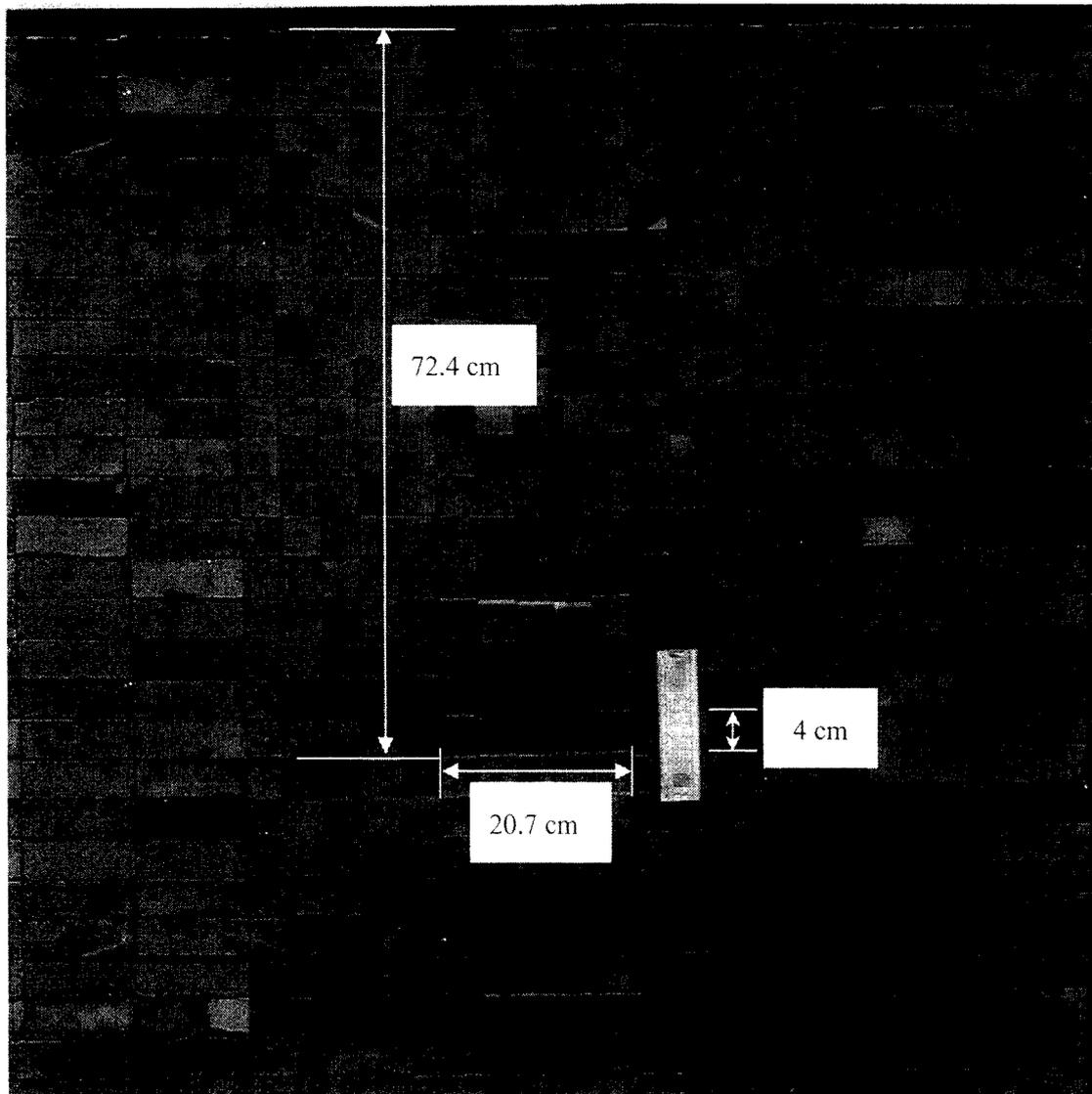
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

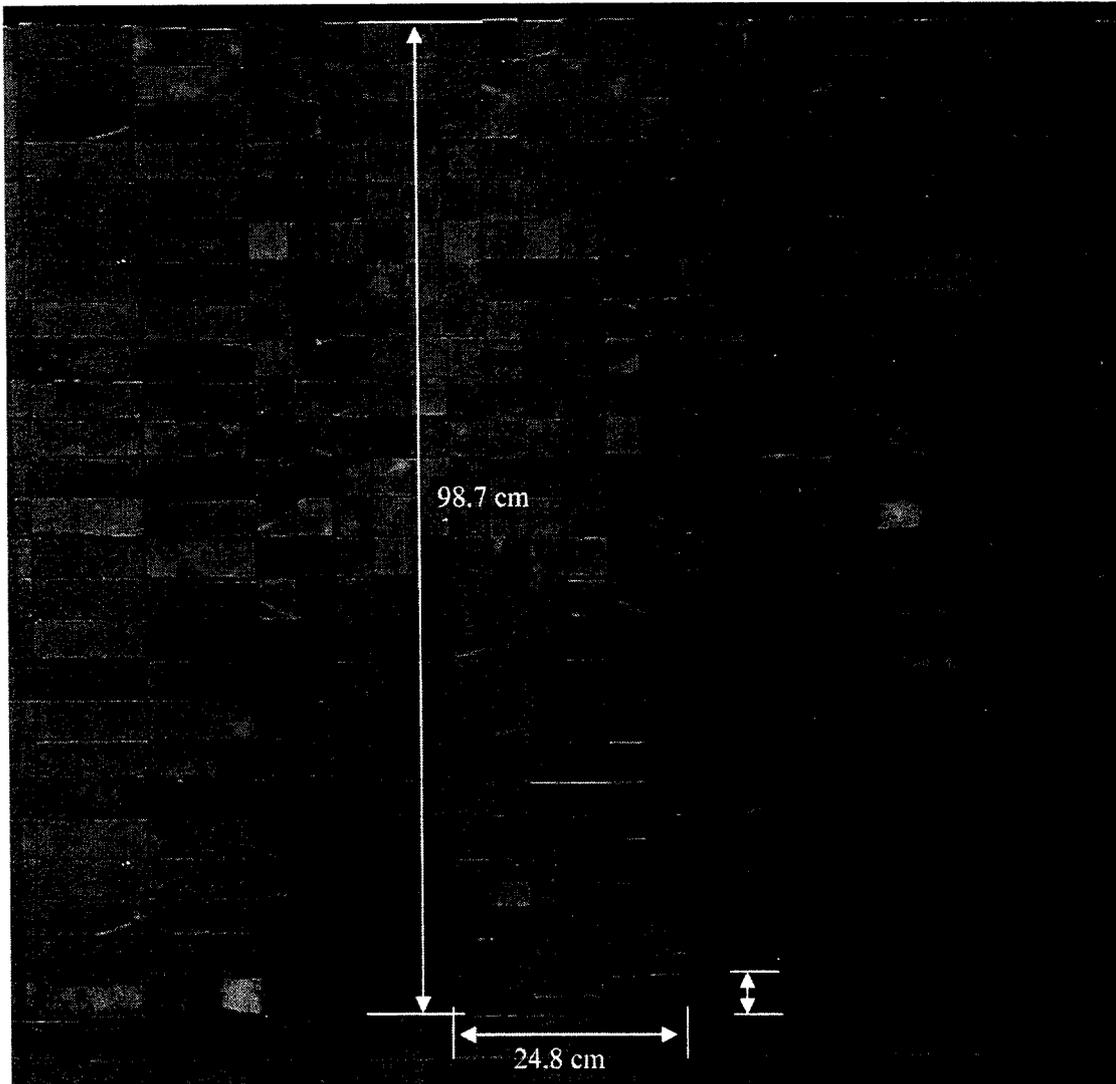
W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่คงเสถียรภาพไว้ได้



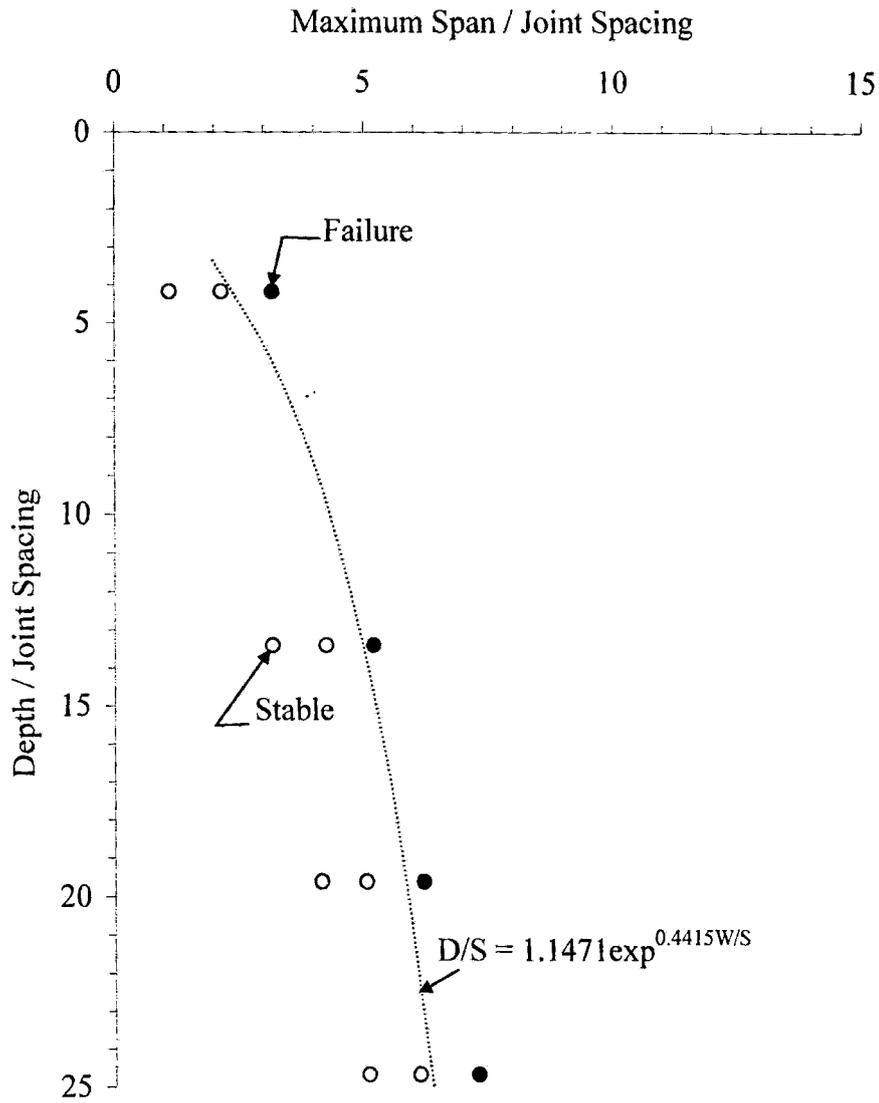
รูปที่ 6.1 ตัวอย่างของแบบจำลองอุโมงค์ในมวลหินในระดับต้น ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4x4x4 เซนติเมตร เพื่อจำลองระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้ง เท่ากับ 4 เซนติเมตร



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างของแบบจำลองอุโมงค์ในมวลหินที่ระดับความลึกปานกลาง ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร เพื่อจำลองระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้ง เท่ากับ 4 เซนติเมตร



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างของแบบจำลองอุโมงค์ในมวลหินในระดับลึก ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร เพื่อจำลองระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้ง เท่ากับ 4 เซนติเมตร



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความลึกต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกกับอัตราส่วนของความกว้างสูงสุด โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งคงที่เท่ากับ 4 เซนติเมตร สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.961

เมื่อ D/S คือ อัตราส่วนของความลึกต่อระยะห่างระหว่างรอยแตก และ W/S คือ อัตราส่วนของความกว้างสูงสุดต่อระยะห่างระหว่างรอยแตก

การจำลองที่ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างรอยแตกเท่ากับ 8 เซนติเมตร โดยตารางที่ 6.2 แสดงค่าปัจจัยและผลจากการจำลองที่ผันแปรความลึกตั้งแต่ 24.7 ถึง 97.5 เซนติเมตร ตัวอย่างการพังทลายของตัวอย่างหินที่จำลองรอยแตกทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 ได้แสดงความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกในฟังก์ชันของความลึกซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองของตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร โดยความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$D/S = 0.935 \exp(0.383W/S) \quad (6.2)$$

ปัจจัยและผลการจำลองด้วยตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 6.3 โดยผันแปรความลึกตั้งแต่ 23.8 ถึง 84.3 เซนติเมตร พบว่า การพังทลายของตัวอย่างหินดังรูปที่ 6.7 ส่งผลให้เกิดการยุบตัวของพื้นผิวด้านบน ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกกับความลึกต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 6.8 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$D/S = 0.207 \exp(0.560W/S) \quad (6.3)$$

รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่สามารถดำรงเสถียรภาพอยู่ได้สำหรับมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกที่ต่างกัน ผลที่ได้ระบุว่า อุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวดิ่งน้อยจะมีความกว้างน้อยกว่าอุโมงค์ที่อยู่ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกกว้างกว่า

6.2 การจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

การจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนได้จำแนกระยะห่างของรอยแตกเช่นเดียวกับการจำลองภายใต้แรงดันสถิต อุโมงค์มีลักษณะเป็นอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมมีการผันแปรความกว้างของอุโมงค์และผันแปรความเร่ง (a) ของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองในแนวราบที่ระดับความลึกต่าง ๆ

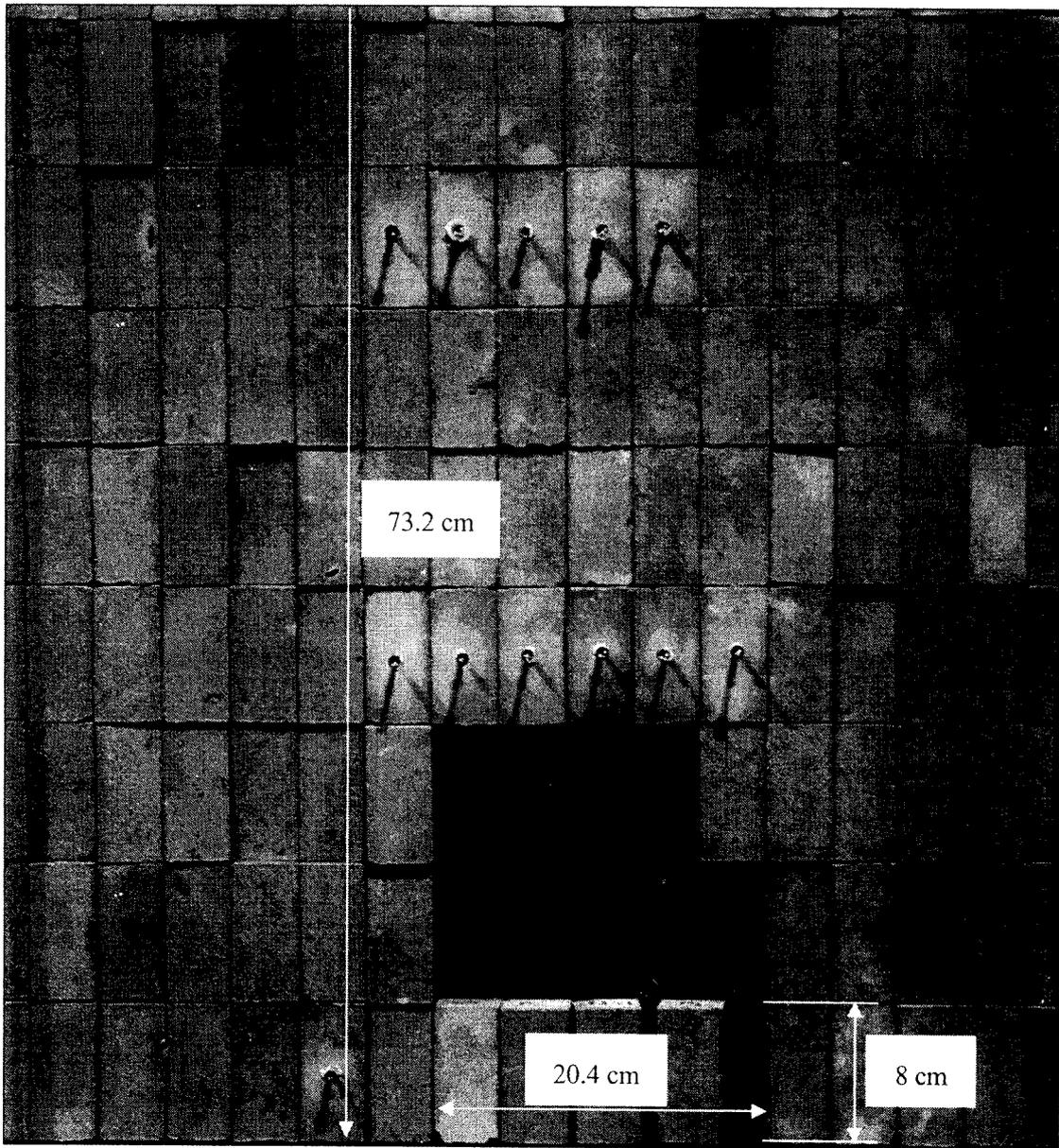
ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 8 เซนติเมตร

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	Results
R8V-H1C2	24.7	3.1	8.4	2.1	Stable
R8V-H1C3	24.7	3.1	12.2	3.1	Failure
R8V-H2C4	49.1	6.1	16.5	4.1	Stable
R8V-H2C5	49.1	6.1	20.5	5.1	Failure
R8V-H3C4-a	73.2	9.2	16.4	4.1	Stable
R8V-H3C5-a	73.2	9.2	20.4	5.1	Failure
R8V-H3C5-b	81.2	10.2	20.3	5.1	Stable
R8V-H3C6-b	81.2	10.2	24.3	6.1	Failure
R8V-H4C6-a	89.5	11.2	24.5	6.1	Stable
R8V-H4C7-a	89.5	11.2	28.4	7.1	Failure
R8V-H4C6-b	97.5	12.2	24.3	6.1	Stable
R8V-H4C7-b	97.5	12.2	28.2	7.1	Failure

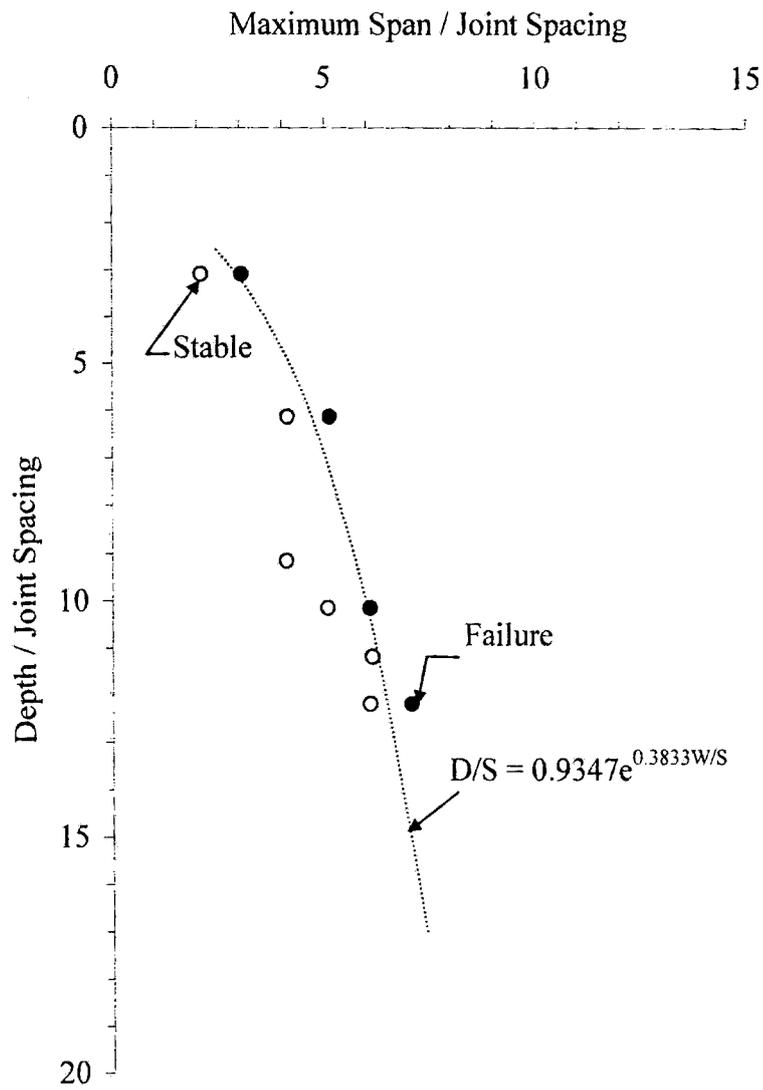
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์



รูปที่ 6.5 ตัวอย่างของแบบจำลองอุโมงค์ในมวลหินในระดับลึก ใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร เพื่อจำลองระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้ง เท่ากับ 8 เซนติเมตร





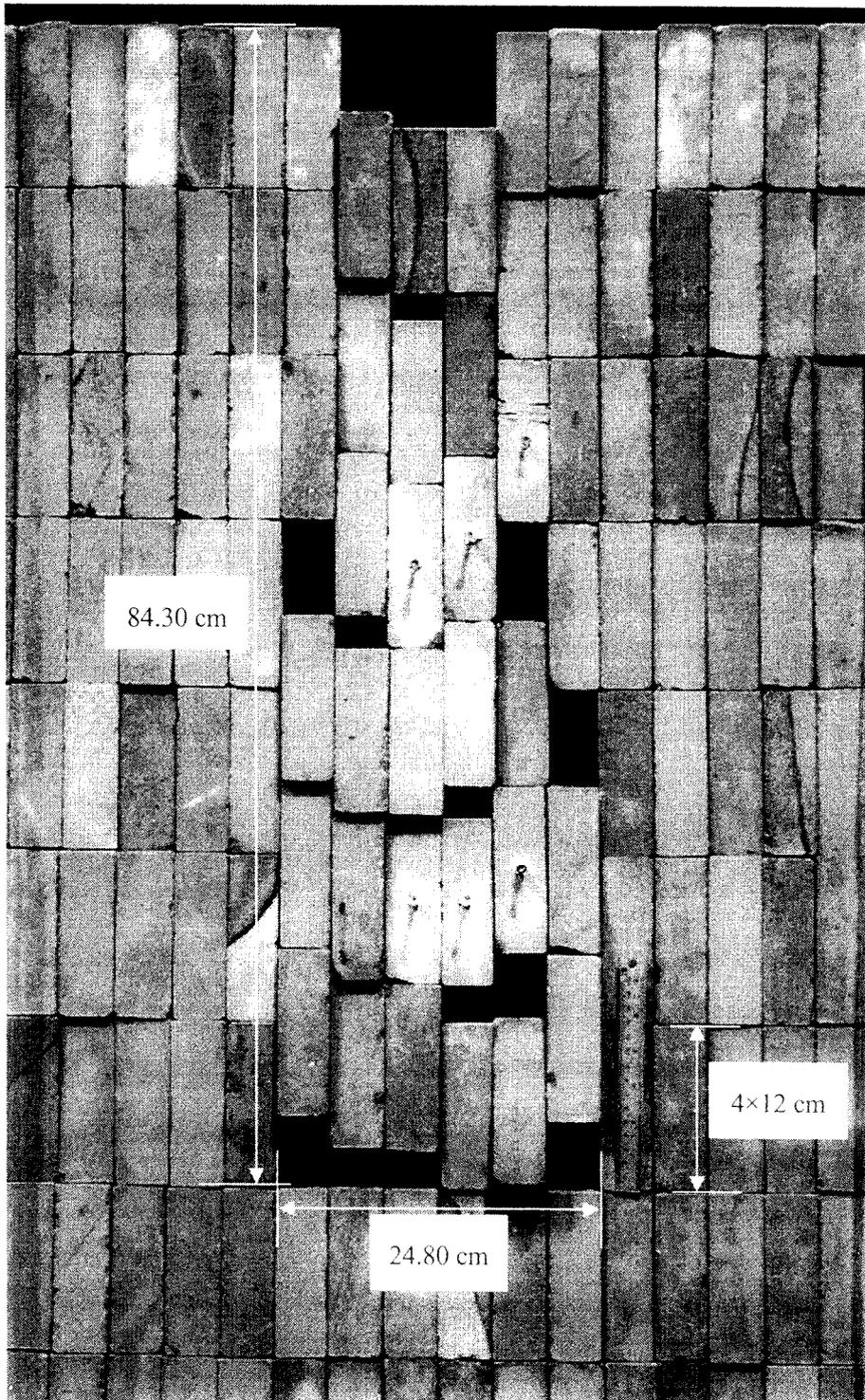
ตารางที่ 6.3 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร โดยระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	Results
R12V-H1C3	23.80	1.98	12.30	3.08	Stable
R12V-H1C4	23.80	1.98	16.10	4.03	Failure
R12V-H2C4	47.60	3.97	16.20	4.05	Stable
R12V-H2C5	47.60	3.97	21.10	5.28	Failure
R12V-H3aC5	72.10	6.01	20.80	5.20	Stable
R12V-H3aC6	72.10	6.01	24.40	6.10	Failure
R12V-H3bC5	84.30	7.03	20.90	5.23	Stable
R12V-H3bC6	84.30	7.03	24.80	6.20	Failure

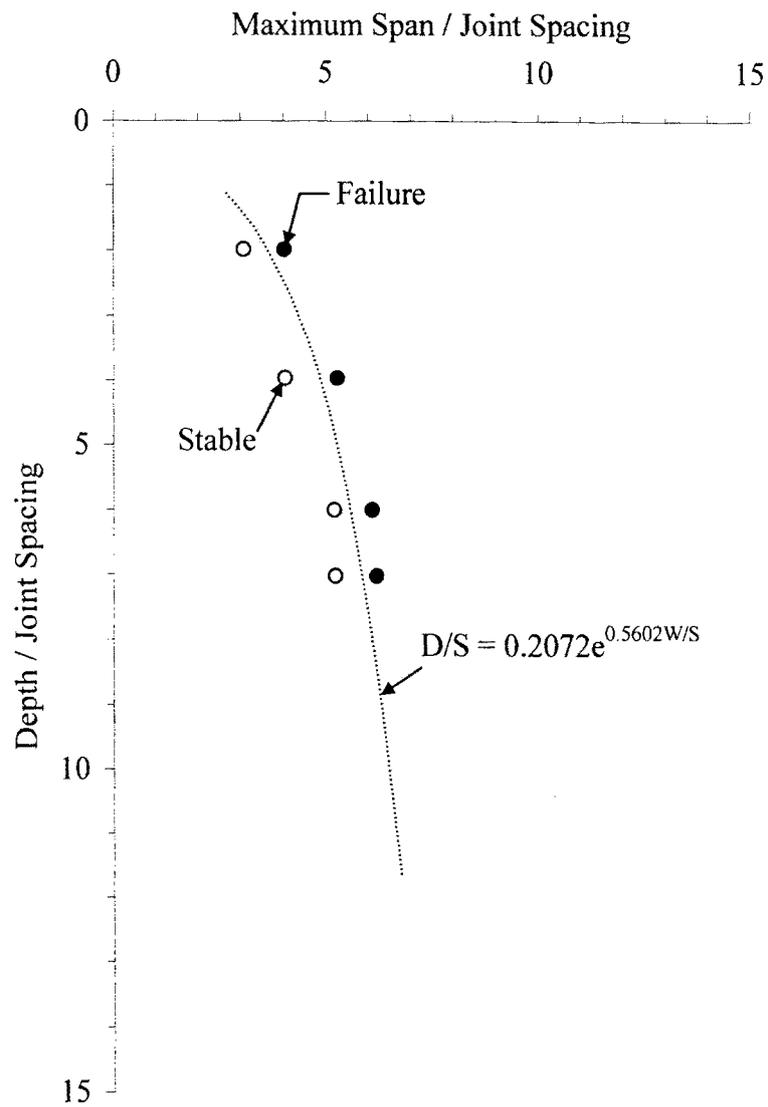
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

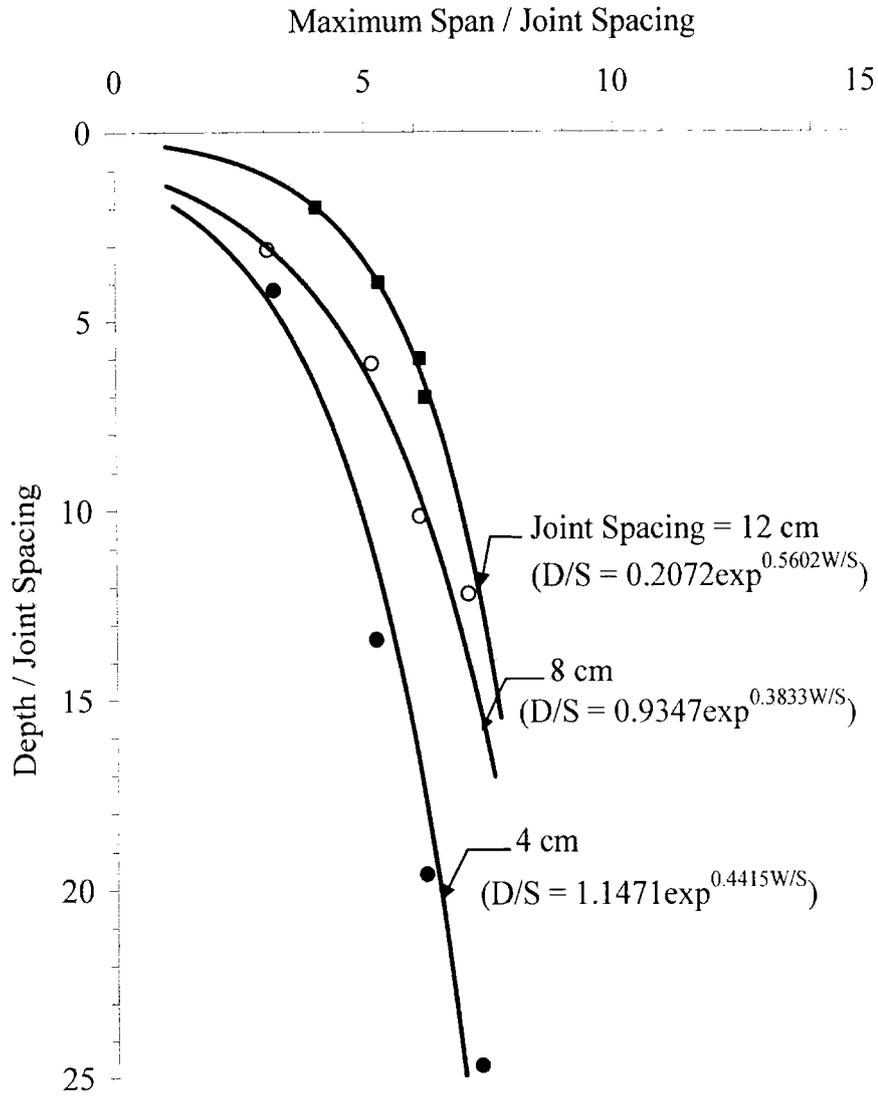
W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์



รูปที่ 6.7 ตัวอย่างของแบบจำลองอุโมงค์ในมวลหินในระดับลึก ใช้ตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร เพื่อจำลองระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้ง เท่ากับ 12 เซนติเมตร



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความลึกต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกกับอัตราส่วนของความกว้างสูงสุด โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งคงที่เท่ากับ 12 เซนติเมตร สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.995



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ สำหรับแบบจำลองมวลหินที่มีระยะระหว่างรอยแตกในแนวตั้งต่างกัน

การจำลองจะใช้ตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร $4 \times 4 \times 8$ เซนติเมตร และ $4 \times 4 \times 12$ เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนการจำลองดังนี้

1) ปรับระดับของคานยกให้อยู่ในแนวระนาบ (มุมเอียงเท่ากับศูนย์องศา) จัดเรียงตัวอย่างหินในแนวตั้งให้เต็มพื้นที่ของแบบจำลอง พร้อมทั้งใส่ชุดลูกแก้วด้านข้างเพื่อจำลองความเค้นแบบ Hydrostatic

2) ตั้งตัวอย่างตัวอย่างหินที่อยู่ระหว่างกลางของแบบจำลองเพื่อให้เกิดเป็นอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมตามระดับความลึกที่ออกแบบไว้

3) เปิดมอเตอร์เพื่อจำลองคลื่นไหวสะเทือนในรูปของอัตราเร่งในแนวระนาบ โดยเริ่มต้นจากความเร็วดำสุด เป็นเวลา 1 นาที หากตัวอย่างหินยังไม่พังทลาย จะทำการเพิ่มความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนอีกเป็นเวลา 1 นาที

4) หากตัวอย่างหินพังทลายภายในเวลา 1 นาที ทำการบันทึกผลของความถี่และความเร็วของคลื่นไหวสะเทือน จากนั้นวัดความลึกและความกว้างของอุโมงค์ ณ จุดพังทลาย

5) หากหินยังไม่เกิดการพังทลาย จะต้องเพิ่มความกว้างของอุโมงค์ และทำการจำลองดังข้อ 3 และ 4

6) ทำการจำลองที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน บันทึกผลการจำลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

การจำลองที่ใช้ตัวอย่างหินขนาด $4 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร ได้ทำการผันแปรความลึกตั้งแต่ 33.3 ถึง 98.7 เซนติเมตร และใช้ความเร่งในแนวราบที่เทียบเป็นจำนวนเท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) 2 ระดับคือ ความเร่งที่เท่ากับ 0.193 g และ 0.225 g ตารางที่ 6.4 แสดงค่าปัจจัยและผลจากการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ต่อระยะห่างของรอยแตกของตัวอย่างหินกับความลึกของอุโมงค์ต่อระยะห่างของรอยแตกของตัวอย่างหินที่ความเร่งเท่ากับ 0.193 g ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.10 และรูปที่ 6.11 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ความเร่งเท่ากับ 0.225 g ความสัมพันธ์นี้อธิบายได้ด้วยสมการ 6.4 และ 6.5

$$D/S = 4.73 \exp(0.264W/S) \quad (6.4)$$

$$D/S = 6.755 \exp(0.221W/S) \quad (6.5)$$

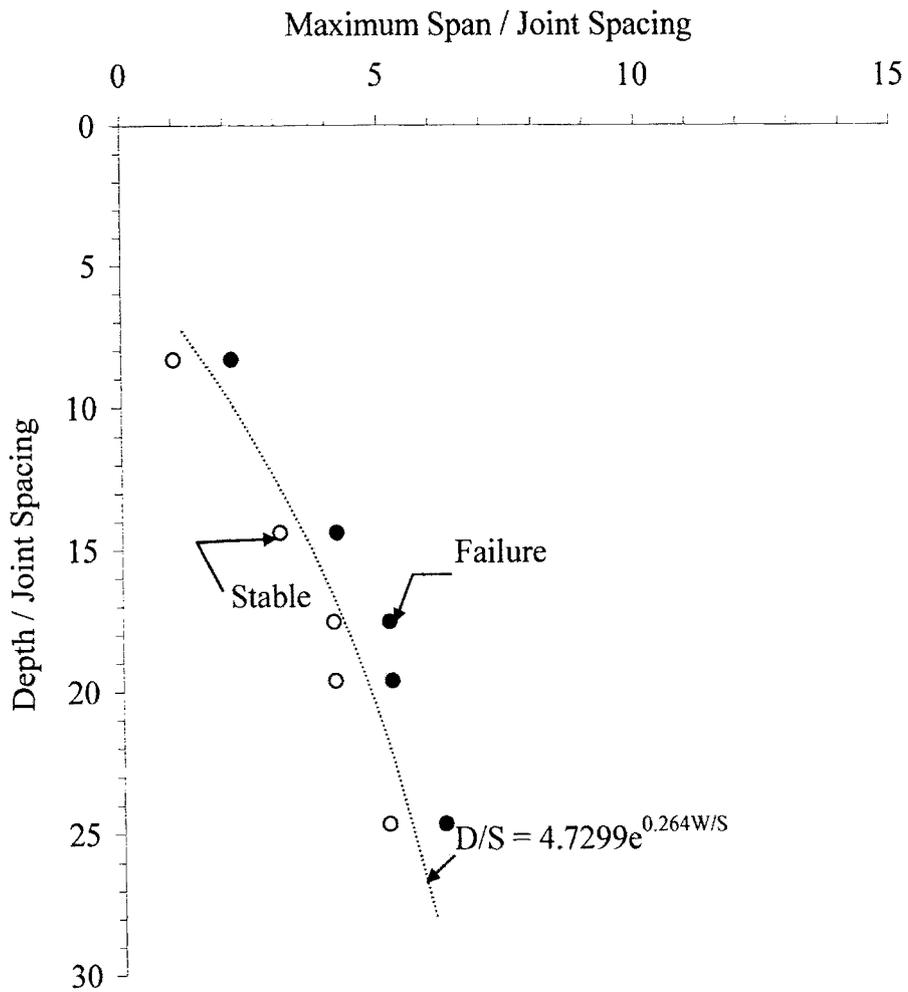
ตารางที่ 6.4 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	a (g)	Results
Hr4C1d	33.3	8.3	4.1	1.0	0.193	Stable
Hr4C2d	33.3	8.3	8.6	2.2	0.193	Failure
Hs2C4d	70.2	17.6	16.4	4.1	0.193	Stable
Hs2C5d	70.2	17.6	20.7	5.2	0.193	Failure
Ht3C3d	57.6	14.4	12.3	3.1	0.193	Stable
Ht3C4d	57.6	14.4	16.7	4.2	0.193	Failure
Ht2C4d	78.6	19.7	16.5	4.1	0.193	Stable
Ht2C5d	78.6	19.7	20.9	5.2	0.193	Failure
Ht1C5d	98.7	24.7	20.6	5.2	0.193	Stable
Ht1C6d	98.7	24.7	25.0	6.3	0.193	Failure
Ha1C4d	82.2	20.6	16.5	4.1	0.225	Stable
Ha1C5d	82.2	20.6	20.5	5.1	0.225	Failure
Hb1C1d	41.2	10.3	4.1	1.0	0.225	Stable
Hb1C2d	41.2	10.3	8.4	2.1	0.225	Failure
Hb2C2d	57.6	14.4	8.5	2.1	0.225	Stable
Hb2C3d	57.6	14.4	12.5	3.1	0.225	Failure
Hb5C5d	94.3	23.6	20.6	5.2	0.225	Stable
Hb5C6d	94.3	23.6	24.8	6.2	0.225	Failure

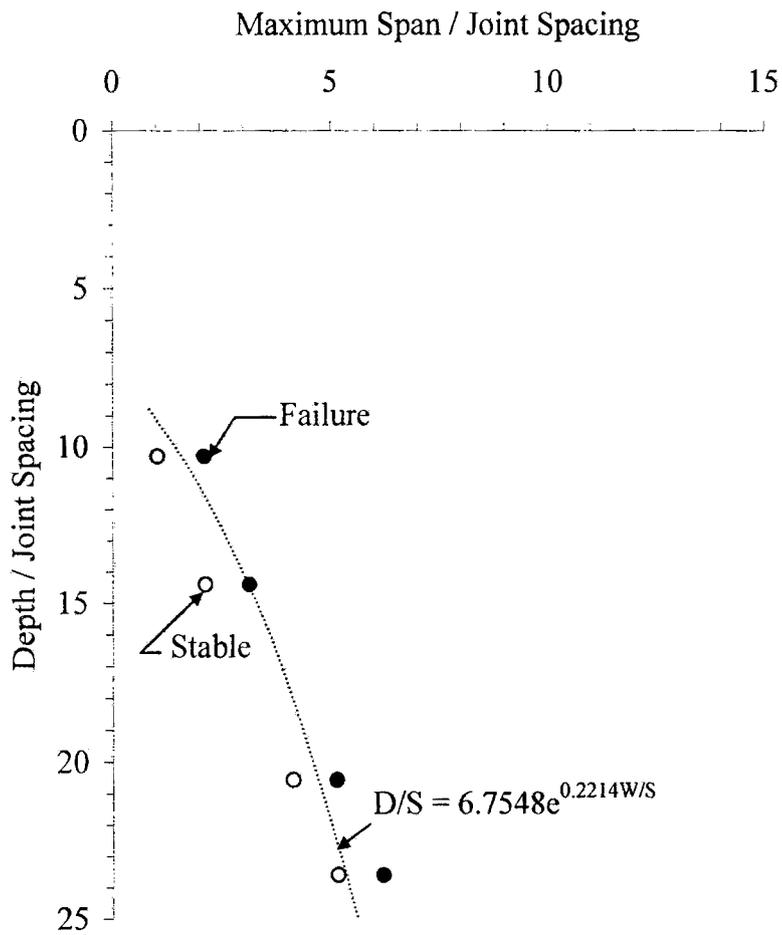
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์



รูปที่ 6.10 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.193 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.992



รูปที่ 6.11 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 4 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.225 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.972

ซึ่งเมื่อเทียบผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนและภายใต้แรงดันสถิตตั้งรูปที่ 6.12 พบว่า ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่จะยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้ในระดับดินจะแปรผกผันตามขนาดของความเร่งคือ ที่ความเร่งมากขึ้นความกว้างสูงสุดของอุโมงค์จะน้อยลง ในระดับลึกมากขึ้นความกว้างสูงสุดของอุโมงค์จะแปรผกผันน้อยลง

ผลการจำลองโดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร ที่ผันแปรความลึกตั้งแต่ 24.8 ถึง 97.6 เซนติเมตร และใช้ความเร่งเท่ากับ 0.132 g และ 0.225 g ได้สรุปไว้ในตารางที่ 6.5 ผลจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกของตัวอย่างหินกับความลึกของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกของตัวอย่างหินที่ความเร่งเท่ากับ 0.132 g และ 0.225 g (รูปที่ 6.13 และ 6.14) พบว่า ที่ระดับความลึกเดียวกัน ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่ระดับความเร่ง 0.132 g มีค่ามากกว่าที่ระดับความเร่ง 0.225 g เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองภายใต้คลื่นไหวสะเทือนและภายใต้แรงดันสถิตตั้งรูปที่ 6.15 พบว่า มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการจำลองของหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

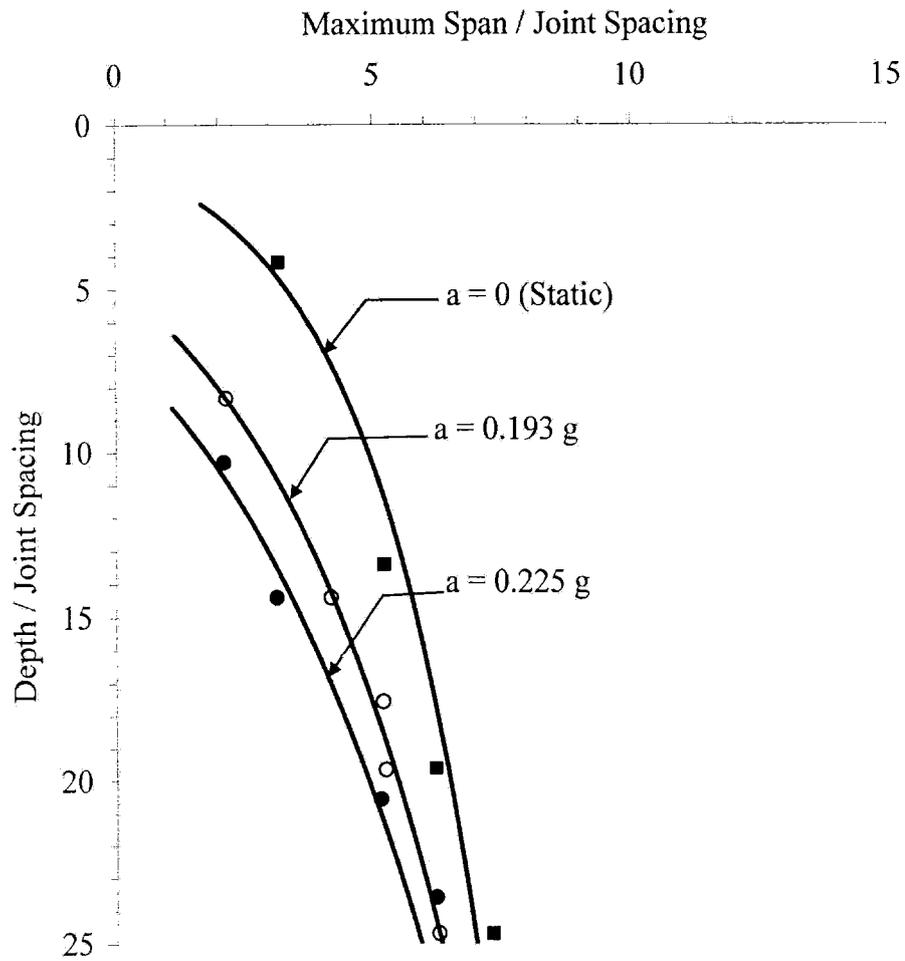
$$D/S = 2.168 \exp(0.274W/S) \quad (6.6)$$

$$D/S = 3.842 \exp(0.222W/S) \quad (6.7)$$

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการจำลองตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร ที่ผันแปรความลึกตั้งแต่ 23.6 ถึง 95.9 เซนติเมตร และใช้ความเร่ง เท่ากับ 0.132 g และ 0.225 g ซึ่งพบว่า ที่ระดับความลึกเดียวกัน ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่ระดับความเร่ง 0.132 g มีค่ามากกว่าที่ระดับความเร่ง 0.225 g เล็กน้อย (รูปที่ 6.16 และ 6.17) และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองภายใต้คลื่นไหวสะเทือนและภายใต้แรงดันสถิต (รูปที่ 6.18) พบว่า สอดคล้องกับผลการจำลองของหินขนาด 4×4×4 เซนติเมตร และ 4×4×8 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ของความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกกับความลึกต่อระยะห่างระหว่างรอยแตกที่ความเร่งเท่ากับ 0.132 g และ 0.225 g สามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$D/S = 0.622 \exp(0.406W/S) \quad (6.8)$$

$$D/S = 0.994 \exp(0.342W/S) \quad (6.9)$$



รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้แรงดันสถิตและคลื่นไหวสะเทือน สำหรับมวลหินที่มีระยะระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 4 เซนติเมตร

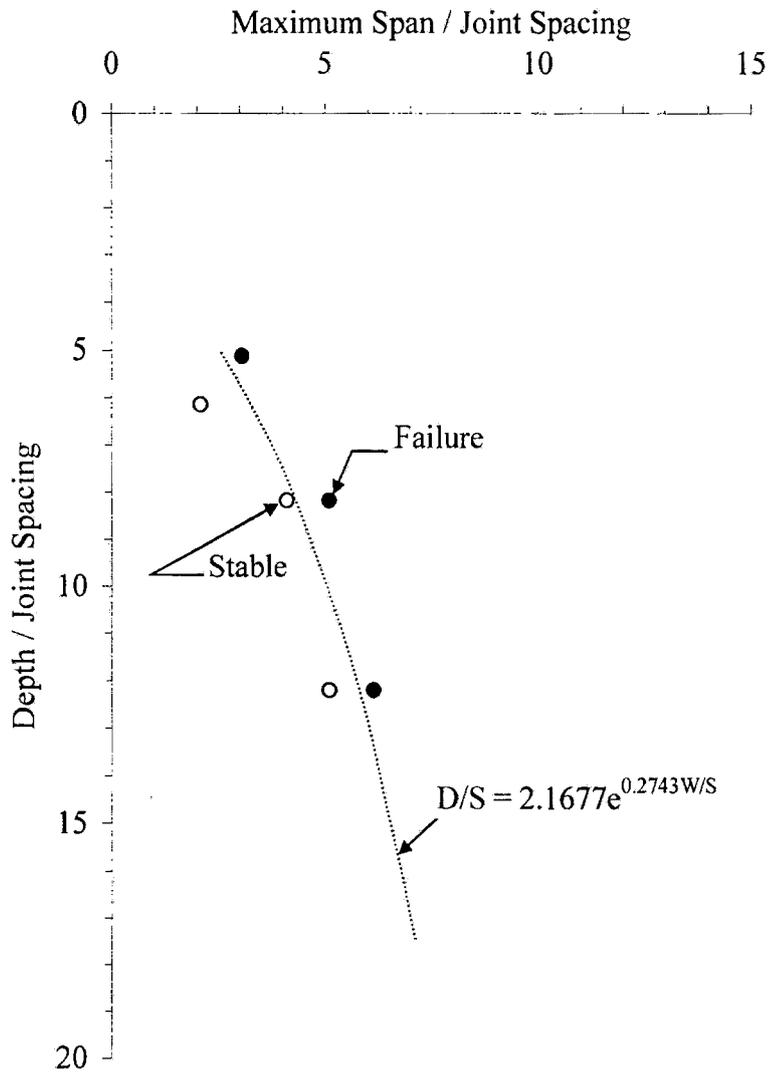
ตารางที่ 6.5 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×8 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	a (g)	Results
R8V-H1C2d	24.8	3.1	8.2	2.1	0.132	Failure
R8V-H1C3d	24.8	3.1	12.3	3.1	0.132	Failure
R8V-H2C3d	41.0	5.1	12.2	3.1	0.132	Failure
R8V-H2C3d	49.1	6.1	8.3	2.1	0.132	Stable
R8V-H2C4d	49.1	6.1	12.2	3.1	0.132	Failure
R8V-H3C4d	65.4	8.2	16.4	4.1	0.132	Stable
R8V-H3C5d	65.4	8.2	20.4	5.1	0.132	Failure
R8V-H4C6d	97.6	12.2	20.4	5.1	0.132	Stable
R8V-H4C6d	97.6	12.2	24.5	6.1	0.132	Failure
R8V-H1C2d	24.5	3.1	8.2	2.1	0.225	Failure
R8V-H2C1d	49.0	6.1	4.1	1.0	0.225	Stable
R8V-H2C2d	49.0	6.1	8.2	2.1	0.225	Failure
R8V-H3C3d	73.5	9.2	12.3	3.1	0.225	Stable
R8V-H3C4d	73.5	9.2	16.3	4.1	0.225	Failure
R8V-H3C4d	88.0	11.0	16.4	4.1	0.225	Stable
R8V-H3C5d	88.0	11.0	20.4	5.1	0.225	Failure
R8V-H4C4d	97.5	12.2	16.4	4.1	0.225	Stable
R8V-H4C5d	97.5	12.2	20.4	5.1	0.225	Failure

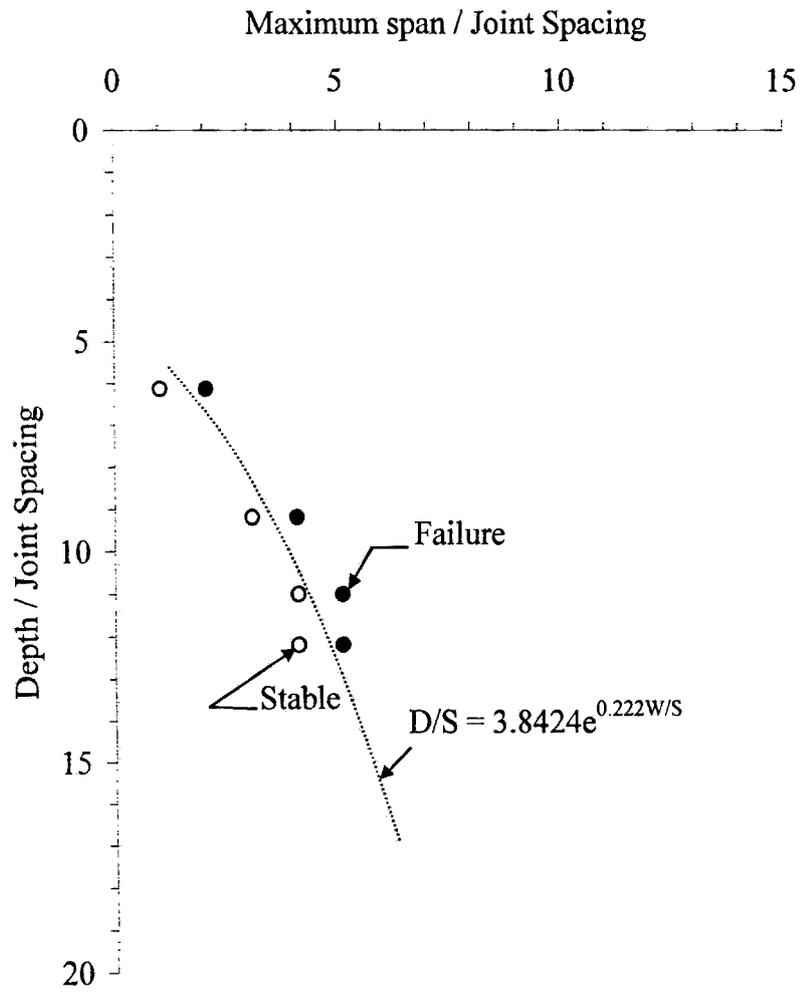
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

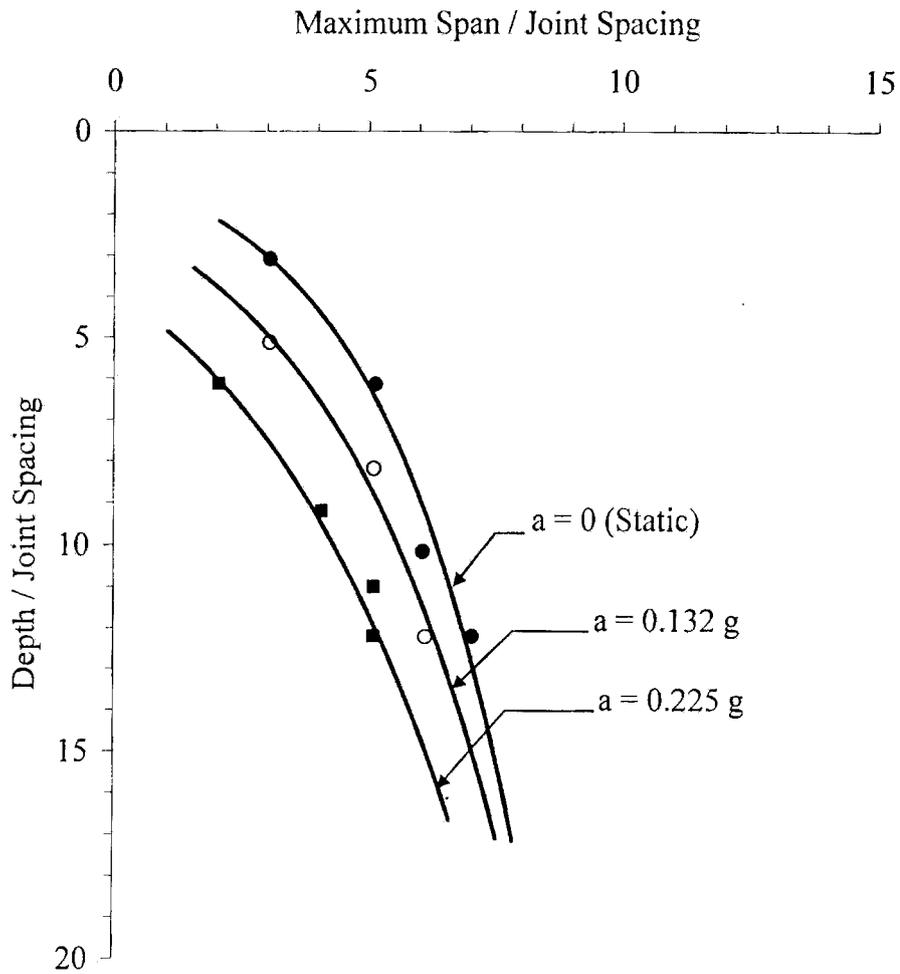
W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์



รูปที่ 6.13 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.132 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.979



รูปที่ 6.14 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 8 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.225 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.993



รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้แรงดันสถิตและคลื่นไหวสะเทือน สำหรับมวลหินที่มีระยะระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 8 เซนติเมตร

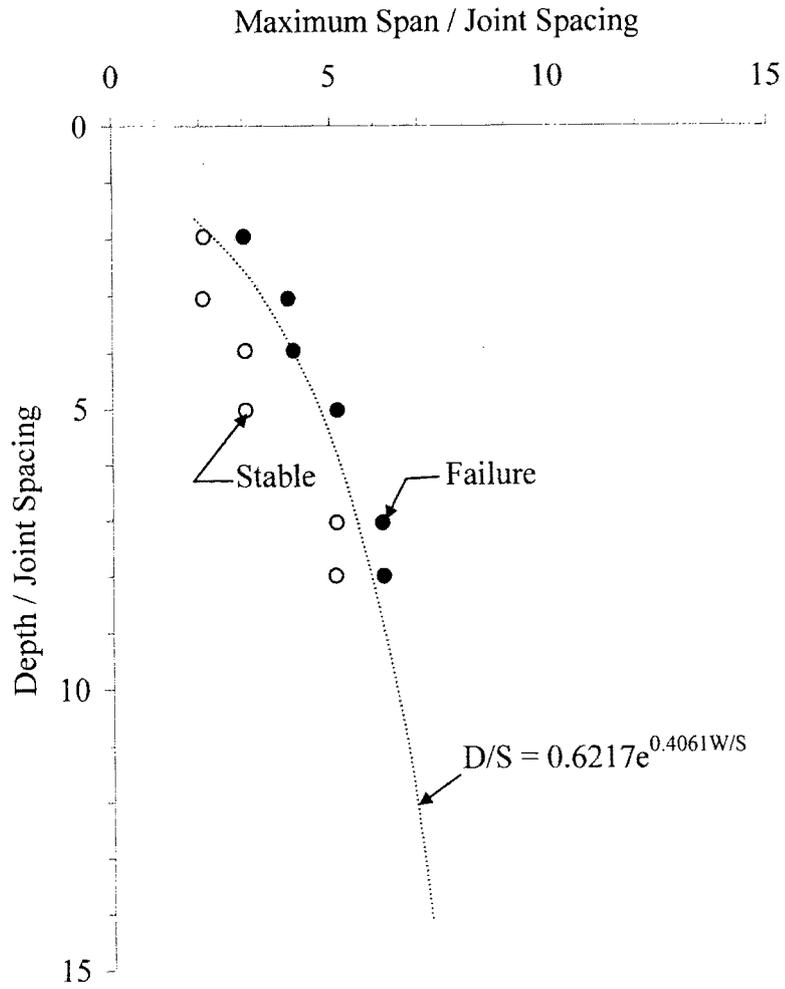
ตารางที่ 6.6 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้ตัวอย่างหินขนาด 4×4×12 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือน

Model	D (cm)	D/S	W (cm)	W/S	a (g)	Results
R12V-H1aC2d	23.60	1.97	8.40	2.10	0.132	Stable
R12V-H1aC3d	23.60	1.97	12.10	3.03	0.132	Failure
R12V-H1bC2d	36.60	3.05	8.30	2.08	0.132	Stable
R12V-H1bC3d	36.60	3.05	16.10	4.03	0.132	Failure
R12V-H2aC3d	47.60	3.97	12.20	3.05	0.132	Stable
R12V-H2aC4d	47.60	3.97	16.60	4.15	0.132	Failure
R12V-H2bC3d	60.30	5.03	12.20	3.05	0.132	Stable
R12V-H2bC4d	60.30	5.03	20.60	5.15	0.132	Failure
R12V-H3bC5d	84.50	7.04	20.50	5.13	0.132	Stable
R12V-H3bC6d	84.50	7.04	24.70	6.18	0.132	Failure
R12V-H4C5d	95.90	7.99	20.40	5.10	0.132	Stable
R12V-H4C6d	95.90	7.99	24.80	6.20	0.132	Failure
R12V-H1C1d	23.90	1.99	4.0	1.0	0.225	Stable
R12V-H1C2d	23.90	1.99	8.1	2.0	0.225	Failure
R12V-H2C3d	48.00	4.00	12.3	3.1	0.225	Stable
R12V-H2C4d	48.00	4.00	16.2	4.1	0.225	Failure
R12V-H3C4d	71.70	5.98	16.4	4.1	0.225	Stable
R12V-H3C5d	71.70	5.98	21.3	5.3	0.225	Failure
R12V-H4C5d	95.80	7.98	20.9	5.2	0.225	Stable
R12V-H4C6d	95.80	7.98	24.1	6.0	0.225	Failure

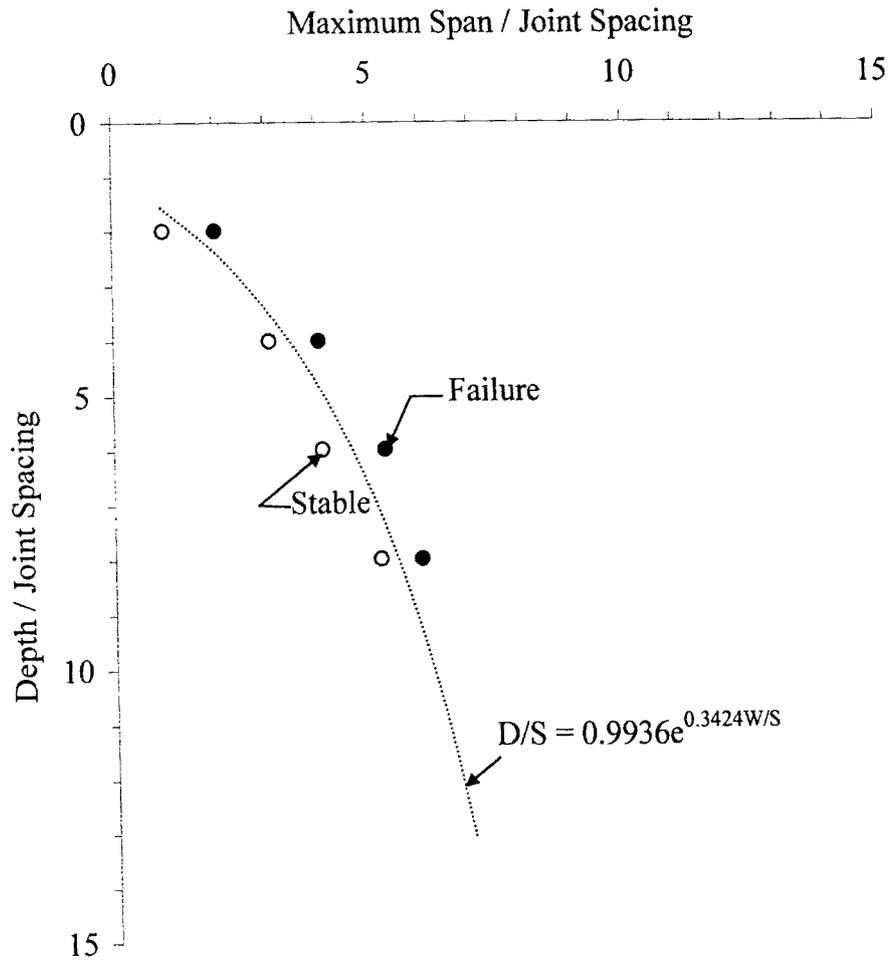
D = ความลึกของอุโมงค์

S = ระยะห่างระหว่างรอยแตก

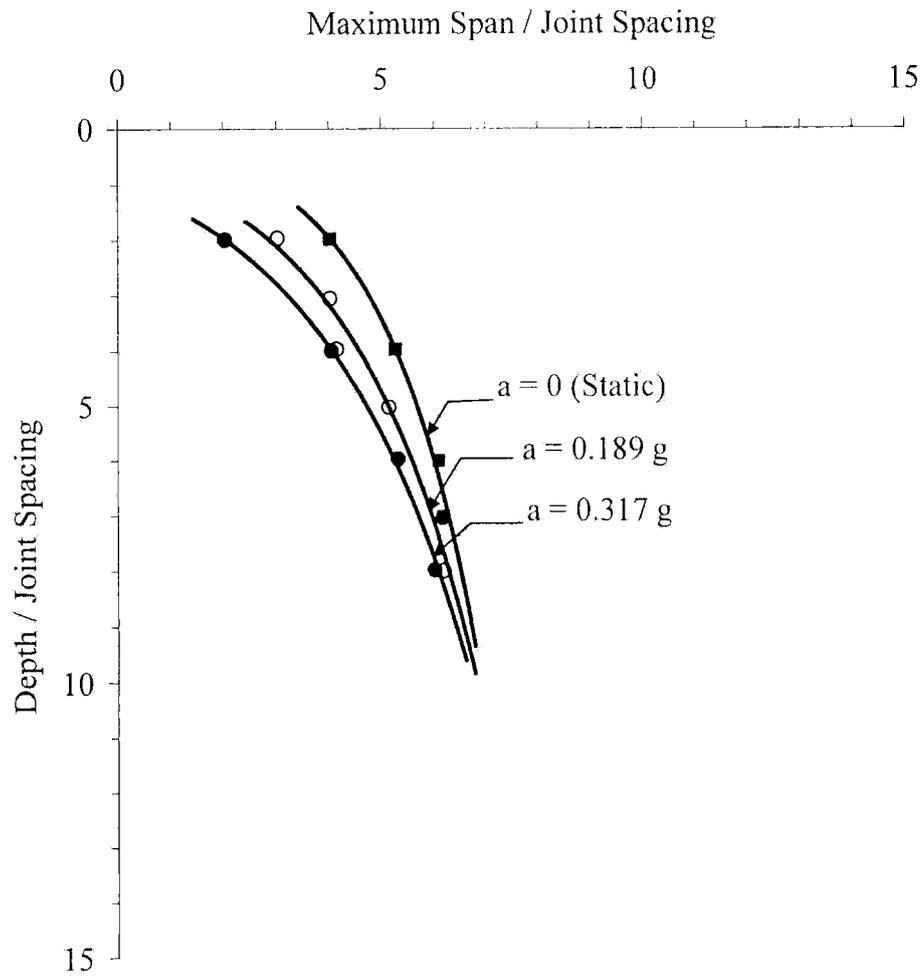
W = ความกว้างสูงสุดของอุโมงค์



รูปที่ 6.16 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.132 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.968



รูปที่ 6.17 ผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินที่มีระยะห่างระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร ภายใต้คลื่นไหวสะเทือนที่มีความเร่งเท่ากับ 0.225 g สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) = 0.999



รูปที่ 6.18 เปรียบเทียบผลการจำลองเสถียรภาพของอุโมงค์ภายใต้แรงดันสถิตและคลื่นไหวสะเทือน สำหรับมวลหินที่มีระยะระหว่างรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร

การทดสอบความกว้างและความลึกของอุโมงค์ในมวลหินภายใต้คลื่นไหวสะเทือนสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

- 1) ผลกระทบของคลื่นไหวสะเทือนจะลดลงตามความลึกของอุโมงค์
- 2) ผลกระทบจากความแตกต่างของค่าอัตราเร่ง g จะลดลงตามความลึกของอุโมงค์เช่นกัน
- 3) ผลกระทบจากระยะห่างระหว่างรอยแตกจะมีมากสำหรับอุโมงค์ในระดับตื้น ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจะลดลงสำหรับอุโมงค์ในระดับลึกลงไป