



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-31

รายงานการวิจัย

ผลกระทบของแรงแบบวัฏจักรต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน

(Effects of Cyclic Loading on Rock Joint Shear Strength)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-31

รายงานการวิจัย

ผลกระทบของแรงแบบวัฏจักรต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน

(Effects of Cyclic Loading on Rock Joint Shear Strength)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2556

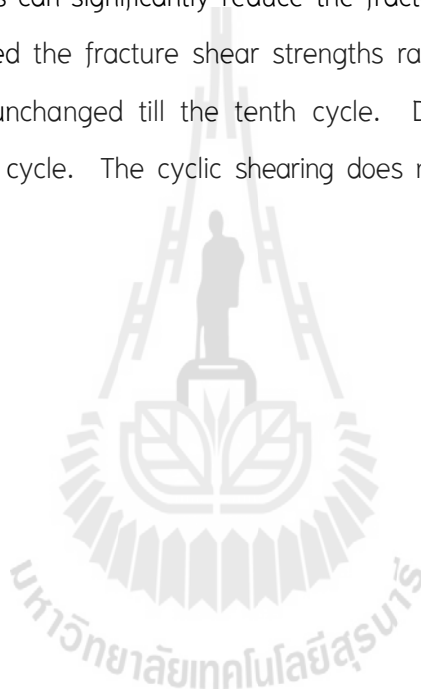


บทคัดย่อ

การทดสอบความเค้นเฉือนแบบตรงได้ดำเนินการเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และกำลังรับแรงเฉือนคงเหลือของรอยแตกในตัวอย่างหิน 3 ชนิด ภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักร ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยหินทรายชุดภูพาน หินปูนสระบุรี และหินแกรนิตจาก จังหวัดสระบุรี รอยแตกได้ถูกทำขึ้นภายในห้องปฏิบัติการมีสองชนิดคือ รอยแตกแบบขรุขระโดยวิธีการให้แรงดึง และรอยแตกแบบผิวเรียบโดยการตัด ตัวอย่างหินมีพื้นที่ของรอยแตกเท่ากับ 8×10 ตารางเซนติเมตร การทดสอบได้มีการให้แรงเฉือนจำนวน 10 วัฏจักร ค่าความเค้นตั้งฉากมีการผันแปรตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3 ถึง 4 MPa ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังเฉือนแบบวัฏจักรเป็นตัวแปรที่สำคัญในการลดความเสียหายของรอยแตก ผลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ระบุว่าค่ากำลังเฉือนของรอยแตกมีการลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านวัฏจักรแรกและไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากวัฏจักรที่ 2 ถึง 10 การเคลื่อนตัวของรอยแตกโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นหลังจากผ่านวัฏจักรแรก การทดสอบการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไม่มีผลกระทบต่อรอยแตกแบบผิวเรียบ

Abstract

Direct shear tests have been performed to determine the peak and residual shear strengths of tension-induced fractures in three rock types under cyclic loading. The rock specimens are prepared from Phu Phan sandstone, Saraburi limestone, and Saraburi granite. The fractures are artificially made in the laboratory by tension inducing and saw cut methods. The samples have fractures area of $8 \times 10 \text{ cm}^2$. The cyclic shear loads are applied up to ten cycles. The normal stresses are varied from 0.5, 1, 2, 3, to 4 MPa. Results indicate that the cyclic shear stresses can significantly reduce the fracture shear strength and shear stiffness. For all rocks tested the fracture shear strengths rapidly decrease after the first cycle and tend to remain unchanged till the tenth cycle. Degradation of the asperities mainly occurs after the first cycle. The cyclic shearing does not affect of the smooth joint surface specimen.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 วัตถุประสงค์.....	7
2.2 การเคลื่อนตัวแบบวัฏจักร.....	7
2.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวัฏจักรการเคลื่อนตัว.....	9
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	11
3.1 วัตถุประสงค์.....	11
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	11
3.3 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างหิน.....	11

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	19
4.1 วัตถุประสงค์.....	19
4.2 วิธีการทดสอบกำลังเฉือน.....	19
4.3 ผลการทดสอบรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	22
4.3.1 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อค่ากำลังเฉือน.....	22
4.3.2 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อชนิดหิน.....	22
4.3.3 ระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากและแนวเฉือน.....	28
4.4 ผลการทดสอบรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	28
4.4.1 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อค่ากำลังเฉือน.....	28
4.4.2 ระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากและแนวเฉือน.....	37
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์และวิจารณ์ผลการทดสอบ	41
5.1 วัตถุประสงค์.....	41
5.2 กำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหิน.....	41
5.3 ค่าการกระดกระหว่างการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน.....	46
5.4 ค่าความแข็งเฉือนและค่าการยุบตัวของรอยแตกในหิน.....	46
5.5 ผลกระทบของลักษณะผิวความขรุขระของรอยแตกในหิน.....	49
5.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ.....	35
5.7 สรุปผลการทดสอบ.....	37
บทที่ 6 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	51
6.1 วัตถุประสงค์.....	51
6.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง.....	51
6.3 รูปแบบโครงสร้างความลาดชันของมวลหิน.....	52
6.4 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	52
6.5 สรุปและเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	57
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต	59

สารบัญ

	หน้า
บรรณานุกรม.....	61
ประวัตินักวิจัย.....	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	ขนาดของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	13
3.2	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Density) และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (JRC) ของ ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด.....	17
4.1	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	25
4.2	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	26
4.3	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	27
4.4	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	36
4.5	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	36
4.6	ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	37
5.1	สรุปค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ	43
5.2	สรุปค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ...	44
5.3	ตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการให้แรงเฉือนแบบ วัฏจักรต่อค่าการกระดกของรอยแตกในตัวอย่างหิน.....	47
5.4	ตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการการยุบตัวของ รอยแตกในหิน.....	50
6.1	ตัวแปรพื้นฐานทางกลศาสตร์ของหินทั้ง 3 ชนิด.....	51

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
1.1	กำลังเฉือนของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรและแบบสถิต.....	2
3.1	ตัวอย่างหินบางส่วนของหินทรายชุดภูพาน (PPSS) หินแกรนิตชุดสระบุรี (SGR) และหินปูนชุดสระบุรี (SLS) ที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	12
3.2	ตัวอย่างหินบางส่วนของหินทรายชุดภูพาน (PPSS) หินแกรนิตชุดสระบุรี (SGR) และหินปูนชุดสระบุรี (SLS) ที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	12
3.3	ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินทรายชุดภูพาน.....	14
3.4	ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินแกรนิตชุดสระบุรี.....	15
3.5	ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินปูนชุดสระบุรี.....	16
3.6	ตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่ถูกหล่อด้วยปูนซีเมนต์ภายในแบบอุปกรณ์ทดสอบ.....	18
4.1	ตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่ถูกหล่อด้วยปูนซีเมนต์ภายในแบบหล่อชุดอุปกรณ์ทดสอบ.....	20
4.2	อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน.....	21
4.3	แผนภาพทิศทางของการให้แรงเฉือนสำหรับ 1 วัฏจักร.....	21
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_c) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 Mpa.....	23
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_c) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	24
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_c) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	24
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 Mpa.....	29
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	30

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	31
4.10 ตัวอย่างหินหลังทดสอบการให้แรงเฉือน 10 วัฏจักร ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5 และ 4 MPa.....	32
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	33
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	34
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	35
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	38
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	39
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa.....	40
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	42
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกแบบเรียบ.....	43

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และความเค้นยึดติดของตัวอย่างหิน (c) กับวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระ.....	44
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และความเค้นยึดติดของตัวอย่างหิน (c) กับวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวเรียบ.....	45
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกของตัวอย่างหิน (d_n/d_s) และวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด.....	47
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉือน (K_s) และวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด.....	48
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของรอยแตกในตัวอย่างหิน (K_n) และวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด.....	49
6.1 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณทางหลวงหมายเลข 2256 จังหวัด ลพบุรี.....	53
6.2 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณหลักกิโลเมตรที่ 136 บนทางหลวงสายมิตรภาพ เขตอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี.....	53
6.3 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณเหมืองหินปูนใกล้กับวัดเขาชีจรรย์ จังหวัดชลบุรี	54
6.4 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินทรายชุดภูพานจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1.....	54
6.5 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินแกรนิตชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1.....	55
6.6 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินปูนชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1.....	55
6.7 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินทรายชุดภูพานจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10.....	56
6.8 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินแกรนิตชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10.....	56
6.9 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินปูนชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10.....	57

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับผลกระทบของแรงเฉือนภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักร ซึ่งการให้แรงในลักษณะนี้จะทำให้รอยแตกเปลี่ยนแปลงสภาพส่งผลให้ความขรุขระของรอยแตกและค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลง ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่นำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ภายใต้สภาวะแรงแบบวัฏจักร เช่น ความลาดชันของมวลหินตามแนวถนน ทางรถไฟ อ่างเก็บน้ำ และฐานรากของเขื่อน และของมวลหินที่อยู่รอบอุโมงค์ ซึ่งอาจมีผลกระทบมาจากการระเบิดหินหรือจากการเกิดแผ่นดินไหว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2 การเคลื่อนตัวแบบวัฏจักร

Hutson และ Downing (1990) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างหินโดยการจัดเตรียมรอยแตกของ หินแกรนิตและหินปูน มีการทดสอบด้วยเทคนิคการควบคุมเชิงตัวเลข เพื่อวัดการย่อยสลายความขรุขระของรอยแตกภายใต้ความเค้นตั้งฉากและการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกับแรงจากแผ่นดินไหวที่ระดับความลึก 50–300 เมตร จากพื้นดิน จากการทดสอบพบว่าความต้านทานแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากมีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายกับรอยแตกขนาดใหญ่หรือรอยแตกในภาคสนาม การย่อยสลายผิวขรุขระของรอยแตกนี้ถูกพบว่าเป็นฟังก์ชันของงาน ผิวขรุขระของรอยแตก ความเค้นตั้งฉาก และค่ากำลังรับแรงของรอยแตก

Ma และ Brady (1998) ศึกษาและเสนอผลการตรวจวัดพฤติกรรมการสั่นสะเทือนจากการขุดเจาะชั้นใต้ดินในภาคสนาม ซึ่งถูกนำมาเปรียบเทียบกับการศึกษาเชิงตัวเลขและการเปลี่ยนแปลงที่เคยเกิดขึ้นของหิน โดยพฤติกรรมของหินในภาคสนามได้แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงอันเกิดจากการขุดเจาะภายใต้การสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเหตุผลที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของการตอบสนองในหินด้วยแบบจำลอง Distinct element การพัฒนาการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปแบบของรอยแตกโดยใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมดังกล่าว ซึ่งแนะนำอัตราการเคลื่อนที่ของมวลหินสำหรับการออกแบบการขุดเจาะที่ต้องการและใช้คาดการณ์ช่วงการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วสำหรับการขุดเจาะ

Leea et al. (2001) ได้ทดสอบและนำเสนอระบบของวัฏจักรในแนวเฉียงเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของรอยแตกในหินที่ขรุขระภายใต้เงื่อนไขการให้แรงแบบวัฏจักร การทดสอบวัฏจักรแรงเฉียงได้ใช้หิน 2 ชนิด คือ หินแกรนิต Hwangdeung และหินอ่อน Yeosan ทำการตัดและสร้างรอยแตกด้วยวิธีการตั้ง ก่อนการทดสอบความขรุขระของหินแต่ละชั้นจะมีการวัดความขรุขระของหน้าตัดผิวตัวอย่างหินโดยใช้ Laser profilometer ลักษณะที่สำคัญและพฤติกรรมรอยแตกของหินที่เป็นวัฏจักร ยกตัวอย่างเช่น ค่าสูงสุดของแรงเฉือนและค่าความไม่เป็นเส้นตรงในวัฏจักรของการให้แรงในรอบแรก ค่าความแตกต่างของแรงเสียดทานที่สวนทางกับทิศทางการเฉือน พฤติกรรมการเฉือนที่ไม่มีความเท่ากันทุกทิศทางและขึ้นกับระดับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก ซึ่งถูกแสดงในรูปแบบการทดสอบวัฏจักรการเฉือน จากคุณสมบัติและรูปแบบของวัฏจักรการให้แรงเหล่านี้ส่วนใหญ่เนื่องมาจากผลของความขรุขระและความแข็งของหินแต่ละชนิด จากผลการทดลองพบว่าการสลายความขรุขระของรอยแตกตามวัฏจักรการให้แรงในแนวเฉียงเป็นไปตามกฎการสลายตัวที่อธิบายไว้สำหรับมุมของความขรุขระ กลไกการสลายก็จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับทิศของความขรุขระในรอยแตก

Jafari et al. (2002) ทำการวิจัยและนำเสนอการออกแบบเสถียรภาพภายใต้การสั่นสะเทือนของอุโมงค์ระดับตื้นในมวลหินที่มีรอยแตก ซึ่งมีตัวแปรสำคัญที่สุดคือความเค้นเฉือนของรอยแตกในมวลหิน การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการกดแบบวัฏจักรสำหรับตัวแปรต่างๆ ที่มีรอยแตกประมาณ 50 แนว โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบในสามแกนและเครื่องกดในแนวเฉียง แบบจำลองของรอยแตกรูปพื้นเลื่อยมีการจำลองให้เหมือนกับตัวอย่างของรอยแตกซึ่งเตรียมโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นซิลิโคนและครกแบบพิเศษ ทำการทดสอบตัวอย่างภายใต้สภาวะการกดที่แตกต่างกันเพื่อจำลองผลกระทบของแผ่นดินไหวขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ในระหว่างการทดสอบได้มีการศึกษาการผันแปรค่าความเค้นเฉือนด้วยตัวแปรของการกดแบบวัฏจักร และการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของรอยแตก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่มีความสำคัญต่อค่าความเค้นเฉือนอันเนื่องมาจากอัตราการกด จำนวนของวัฏจักร ความถี่ของการให้แรงกด ดังนั้นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิวรอยแตกถูกนำไปใช้ศึกษาขั้นสูงในการเคลื่อนตัวแบบวัฏจักร

Grasselli and Egger (2003) แสดงเกณฑ์ที่ตั้งขึ้นใหม่เกี่ยวกับความเค้นและการเคลื่อนตัว ซึ่งได้นำเสนอโดยแบบจำลองการต้านทานแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้สภาวะแรงกดที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่คงที่ ซึ่งเป็นการอธิบายอย่างง่ายด้วยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงกดที่ตั้งฉากกับพื้นผิวดังที่ กกว่า 50 ค่า โดยใช้หิน 7 ชนิด ที่มีรอยแตกจากการใช้แรงดึง ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถอธิบายการทดสอบแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการได้ นอกจากนี้พารามิเตอร์ยังเป็นสิ่งจำเป็นในแบบจำลองที่สามารถวัดได้อย่างง่ายผ่านการทดสอบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ และเกณฑ์ที่ได้นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (JRC) โดยค่าที่ได้จากการคาดคะเนสัมพันธ์กับค่า JRC ด้วยการวิเคราะห์ย้อนกลับจากการทดสอบแรงเฉือน

Jafari et al. (2003) เสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษารูปแบบของแรงเฉือนภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักร ผิดของรอยแตกถูกเตรียมเพื่อนำมาใช้กับแบบหล่อหินที่สร้างขึ้นจากปูนชนิดพิเศษ การทดสอบแรงเฉือนจะดำเนินการภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากคงที่ และสภาวะการให้แรงแบบวัฏจักร โดยพิจารณาการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันตามแนวเฉือนที่เกิดกับตัวอย่าง เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมก่อนการเกิดรอยแตก และพิจารณาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือน ซึ่งพบว่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยแตกสัมพันธ์กับอัตราการเคลื่อนตัววัฏจักรของการให้แรงและระดับของความเค้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อใช้คาดการณ์ความแข็งแรงของแรงเฉือนในสภาวะการให้แรงแบบวัฏจักรต่อไป

Jafari et al. (2004) เสนอการประเมินผลกระทบของการเกิดแผ่นดินไหวซ้ำๆ ขนาดเล็กในรอยแตกของหินบริเวณที่ยังมีการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบงานก่อสร้างใต้ดินให้ความสนใจ การประเมินผลเหล่านี้มีความจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของรอยแตกในหินภายใต้พลศาสตร์และวัฏจักรการให้แรง การศึกษาพฤติกรรมจากรอยแตกในหินภายใต้วัฏจักรการเฉือน กว่า 30 แบบจำลอง ด้วยการทดสอบการกดในสามแกนภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันของการให้แรงแบบวัฏจักรในชุดการทดสอบชุดแรกบางตัวอย่างได้รับการทดสอบในรูปแบบของการให้แรงแบบวัฏจักร ภายใต้สภาวะความดันล้อมรอบ และอัตราการเคลื่อนที่ต่างๆ ในชุดที่สอง โดยเพิ่มระดับความถี่และขนาดของความเค้นให้กับกลุ่มตัวอย่างหินดังกล่าวแล้ว ทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรอีกครั้ง รูปแบบของความเค้นเฉือนคงเหลือสูงสุดถูกศึกษาด้วยการทดสอบนี้ ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความดันล้อมรอบ และผลของค่าความต้านทานแรงเฉือนจะลดลง ถ้าเราเพิ่มอัตราการให้แรงจำนวนรอบ ระดับความถี่ และขนาดของความเค้น

2.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวัฏจักรการเคลื่อนตัว

Hosseini et al. (2004) ระบุว่า ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวอย่างรุนแรง วัฏจักรการเคลื่อนตัวอาจเกิดขึ้นระหว่างผนังของรอยแตก การเคลื่อนตัวเป็นวัฏจักรจะไปทำลายความขรุขระระหว่างผิวสัมผัสตามแนวรอยแตกในชั้นที่หนึ่งและสองตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้แรงเฉือนภายในรอยแตกของหินลดลงไปด้วย การทดสอบนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความแปรปรวนของแรงเฉือนในรอยแตกของหินภายใต้วัฏจักรการเคลื่อนตัว เพื่อจำลองผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวอย่างรุนแรงจึงได้พัฒนาสิ่งประดิษฐ์เพื่อใช้ในการทดสอบนี้ด้วยการสร้างแบบหล่อหินจากปูนชนิดพิเศษ ประกอบกับอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงภายใต้สภาวะการให้แรงแบบวัฏจักร และทำการทดสอบโดยให้แรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัสในระดับที่แตกต่างกัน เพื่อหาพฤติกรรมการเฉือนที่แตกต่างกันของรอยแตกในมวลหินที่ระดับความลึกแตกต่างกัน (จากระดับ

ลึกจนถึงผิวดิน) ในการทดสอบวัฏจักรการเคลื่อนตัวที่หลากหลาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนภายในตัวอย่างจากการถูกกดทำลายความขรุขระของผิวสัมผัสตามแนวการแตกเพื่อทำการศึกษาในแต่ละรอบ พื้นฐานการค้นคว้าของงานวิจัยนี้เป็นการกล่าวสรุปถึงกำลังรับแรงเฉือนในรอยแตกของหินที่มีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของวัฏจักรการให้แรงกับอัตราการถูกทำลายความขรุขระของรอยแตกในหิน ด้วยการให้แรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัสในระดับที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังกล่าวสรุปเกี่ยวกับระดับของแรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัสอันจะเป็นตัวควบคุมกลไกการแตกร้าวและการเคลื่อนตัวของรอยแตก ในช่วงแรงกดตั้งฉากกับผิวรอยแตกที่ระดับสูงๆ การเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนจะเข้าไปทำลายความขรุขระในขณะที่เกิดการเคลื่อนตัวมากกว่าแรงกดตั้งฉากในระดับที่ต่ำกว่า ซึ่งการเคลื่อนตัวในลักษณะนี้เป็นลักษณะเด่นของกลไกการเคลื่อนตัวแบบเลื่อนไถล พัฒนาการของการทดสอบและการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการคำนวณจะถูกพัฒนาเพื่อใช้คาดการณ์วัฏจักรการให้แรงภายในสภาวะที่เป็นวงกว้าง

Puntel et al. (2006) ทำการทดสอบและนำเสนอลักษณะโดยทั่วไปของแบบจำลองผิวสัมผัสรอยแตกและรอยแตกขนาดเล็กซึ่งถูกกำหนดให้ทำในวัสดุกึ่งเปราะ แบบจำลองถูกนำเสนอในสองรูปแบบบนพื้นฐานของกลศาสตร์รอยแตก รูปแบบที่หนึ่งถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการทดสอบการหาอัตราการกดแบบ Monotonic ของคอนกรีตและรูปแบบที่สองสำหรับการทดสอบภายใต้พื้นฐานของแรงเสียดทาน โดยพัฒนาเพื่อนำไปใช้สำหรับการตอบสนองแรงแบบวัฏจักรในรอยแตกของหินบริเวณผิวหน้าของรอยแตกที่มีความขรุขระซึ่งแสดงอยู่ในรูปของความเค้นยึดติดคุณสมบัติของรูปแบบและความสามารถที่ได้จากการสังเกตพฤติกรรมทดสอบได้ถูกแสดงโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข โดยแบบจำลองเหมาะสำหรับการจำลองการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณเขื่อนและการเกิดรอยแตกของหินภายใต้การกระตุ้นของแผ่นดินไหวหรือรอยแตกคอนกรีตตามวัฏจักรการให้แรงแบบย้อนกลับ

Jing et al. (1993) เสนอแนวความคิดในการจำลองพฤติกรรมรอยแตกของหินด้วยการทดสอบแรงเฉือนแบบวัฏจักรและการทดสอบภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากคองที่ ซึ่งมีการทดสอบแรงเฉือนกับแบบจำลองรอยแตกของหินโดยใช้คอนกรีตจำนวน 50 ตัวอย่าง เพื่อตรวจวัดค่าความเค้นเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่าง ซึ่งพบว่ามีความเค้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง ผลลัพธ์นี้จะอยู่บนพื้นฐานของการจำลองในสองทิศทาง ซึ่งพัฒนาจากรอยแตกของหินภายใต้อัตราการกดแบบวัฏจักร รูปแบบรอยแตกถูกกำหนดโดยไม่เกี่ยวข้องในทางพลศาสตร์ ซึ่งกฎเกณฑ์ที่ได้จากการทดสอบทั้งสองทิศทางสามารถนำมาพัฒนาในรูปแบบของรอยแตกเรียบโดยปรากฏบนความเค้นสูงสุดและความเค้นคงเหลือ ซึ่งอัตราการขยายและหดตัวจะเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส และกฎเกณฑ์ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ได้นำเสนอความไม่เท่ากันและการกำจัดค่าคุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบรอยแตก โดยแบบจำลองพฤติกรรมรอยแตกของหินในสองทิศทางได้ใช้โปรแกรม UDEC ในการหาผลลัพธ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในมวลหินเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี เช่น ความลาดชันของมวลหินตามแนวถนน ทางรถไฟ อ่างเก็บน้ำ ฐานรากของเขื่อนและของมวลหินที่อยู่รอบอุโมงค์ส่งน้ำในระบบชลประทานและอุโมงค์สำหรับถนนและทางรถไฟ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างเหล่านี้จะมีการคำนวณค่าความปลอดภัยโดยอาศัยค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกหรือระบบของรอยแตกในมวลหินเป็นหลัก ค่ากำลังเฉือนนี้สามารถทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีทดสอบตามมาตรฐานสากล (ASTM D5607) โดยนำตัวอย่างหินที่มีรอยแตกมาให้แรงเฉือนขนานกับรอยแตกภายใต้ความเค้นคงที่ที่ติดตั้งกับรอยแตกในระดับหนึ่ง ค่าแรงเฉือนที่ให้อาจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเคลื่อนตัวของชิ้นตัวอย่างหินที่อยู่สองข้างของรอยแตกนั้น ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้สามารถนำมาคำนวณกำลังเฉือนของรอยแตกสำหรับหินชนิดนั้น ซึ่งแรงที่ให้อาจเรียกว่า แรงแบบสถิต

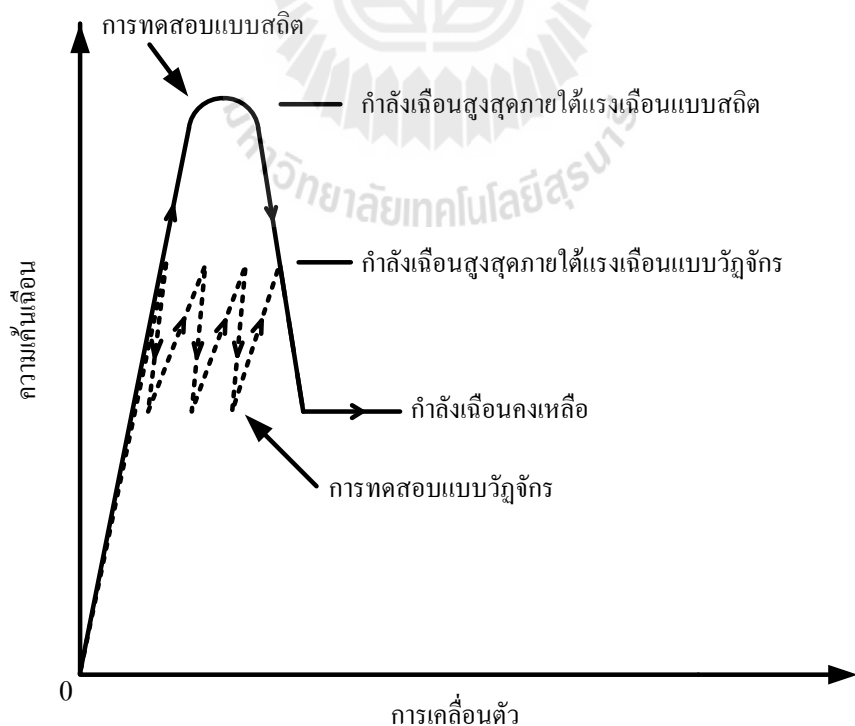
มวลหินในภาคสนามที่รองรับโครงสร้างทางวิศวกรรมบางแห่งอยู่ในพื้นที่ที่มักเกิดแผ่นดินไหว ผลกระทบจากแผ่นดินไหวในมวลหินเหล่านี้จะถูกเรียกว่า คลื่นไหวสะเทือน (Seismic Waves) ซึ่งจะแสดงผลในลักษณะของแรงแบบวัฏจักรในแนวระนาบ ความรุนแรง ความถี่ และระดับของแรงแบบวัฏจักรนี้ขึ้นกับระยะห่างจากจุดที่เกิดแผ่นดินไหวและขึ้นกับความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว แรงแบบวัฏจักรดังกล่าวจะเป็นปัจจัยที่ลดค่ากำลังเฉือนที่ขนานอยู่กับรอยแตกในมวลหิน (เป็นผลจากความล้าของเนื้อหินตามแนวรอยแตก) ซึ่งอาจจะทำให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่คำนวณไว้จากค่ากำลังเฉือนของรอยแตกภายใต้แรงแบบสถิตมีค่าลดลง ดังนั้นการออกแบบความลาดชันของมวลหินหรือมวลหินที่เป็นหลังคาของอุโมงค์อาจไม่เป็นเชิงอนุรักษ์ถ้าไม่นำแรงแบบวัฏจักรที่เกิดจากคลื่นไหวสะเทือนเข้ามาพิจารณาด้วย

อย่างไรก็ตาม การทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหินในห้องปฏิบัติการสำหรับมวลหินที่มีผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวยังไม่มีการดำเนินการอย่างจริงจัง การหาผลกระทบของคลื่นไหวสะเทือนต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในต่างประเทศมักจะเน้นไปที่ลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยแตกที่เลยจุดวิบัติไปแล้ว แต่ผลกระทบดังกล่าวต่อค่ากำลังเฉือนสูงสุดก่อนจุดวิบัติ (ก่อนการเคลื่อนตัว) ของรอยแตกยังไม่มีผู้ใดได้ศึกษา ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องใช้พิจารณาในการคำนวณค่าความปลอดภัยและเสถียรภาพของมวลหินในพื้นที่เสี่ยงภัย

ดังกล่าว รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบสถิต (แรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิดการเคลื่อนตัว) กับกำลังเฉือนสูงสุดที่ได้ภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักร (แรงเฉือนเพิ่มขึ้นและลดลงที่เป็นผลมาจากคลื่นไหวสะเทือน) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังเฉือนแบบวัฏจักรจะต่ำกว่าค่ากำลังเฉือนที่ทดสอบได้ภายใต้แรงเฉือนแบบสถิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรในห้องปฏิบัติการโดยมีปัจจัย ที่นำมาพิจารณาคือ ความเค้นในแนวตั้งฉาก ขนาดของแรงเฉือน และความขรุขระของรอยแตก
- 2) เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรกับการให้แรงเฉือนแบบสถิต
- 3) พัฒนาคความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับปัจจัยต่างๆ ที่นำมาพิจารณา
- 4) เปรียบเทียบเสถียรภาพความลาดชันของมวลหินระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบแบบวัฏจักรและผลจากการทดสอบภายใต้แรงเฉือนสถิตโดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.1 กำลังเฉือนของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรและแบบสถิต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทดสอบค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวอย่างหินทั้งหมด 3 ชนิด
- 2) ทดสอบหาค่ากำลังเฉือนภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress) ที่ผันแปรตั้งแต่ 0.5 MPa ถึง 4 MPa
- 3) รอยแตกในตัวอย่างหินถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ
- 4) ปัจจัยที่นำมาพิจารณาคือ ขนาดของแรงเฉือน ความขรุขระของรอยแตก โดยแต่ละปัจจัยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉาก 5 ระดับ
- 5) พัฒนาคความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับปัจจัยต่างๆ จากผลการทดสอบ
- 6) คำนวนโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (UDEC Program) เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของหินที่มีรอยแตกภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรในระดับต่างๆ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงเฉือนแบบสถิต
- 7) พื้นที่ของรอยแตกที่ทดสอบมีขนาดไม่ต่ำกว่า 8×10 ตารางเซนติเมตร
- 8) การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 9) รอยแตกอยู่ในสภาวะแห้งไม่มีแรงดันน้ำ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรที่เป็นผลมาจากคลื่นไหวสะเทือนของการเกิดแผ่นดินไหว เพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังเฉือนแบบสถิต (ด้วยวิธีดั้งเดิม ASTM D5607) ของรอยแตกในหินภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่คงที่กับค่ากำลังเฉือนที่ได้จากแรงเฉือนแบบวัฏจักร โดยมีการผันแปรความถี่และขนาดของแรงแบบวัฏจักรให้สอดคล้องกับคลื่นไหวสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวในระดับต่างๆ กัน ในการทดสอบภายใต้แรงแบบวัฏจักรนี้จะมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยแตกในทุกรอบของการให้แรงและในเชิงเวลา นอกจากนั้นจะมีการผันแปรความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตกเพื่อจำลองความรู้สึกของรอยแตกในมวลหิน ดังนั้นผลกระทบของแรงเฉือนแบบวัฏจักรจึงสามารถจำลองภายใต้สภาวะต่างๆ ที่เหมือนกับสภาวะของมวลหินในภาคสนามในพื้นที่ที่ใกล้กับการเกิดแผ่นดินไหว นอกจากนี้ยังมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบกำลังเฉือน (Direct Shear Machine) เพื่อให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรได้ในระดับที่คงที่ และสามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและในแนวตั้งฉากได้อย่างต่อเนื่องในทุกรอบของการให้แรงและในเชิงเวลา

งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อเชื่อมโยงค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกกับปัจจัยที่เกี่ยวกับลักษณะของแรงแบบวัฏจักร ความขรุขระของรอยแตก และความลึกของรอยแตกในมวลหิน สมการนี้จะเป็นประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพและการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีในมวลหินนั้นๆ ท้ายสุดเพื่อสาธิตความแตกต่างของค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ใช้กำลังเฉือนที่ได้จากแรงแบบสถิตกับแรงแบบวัฏจักร ได้มีการจำลองความลาดชันของมวลหินจริงโดยใช้แบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม UDEC ซึ่งเป็นโปรแกรมขั้นสูงที่สามารถจำลองระบบของรอยแตกในมวลหินได้อย่างสมจริง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมไปถึงวิธีและกระบวนการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรของรอยแตก ผลการวิจัยที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงได้ถูกสรุปไว้ในบรรณานุกรมของรายงานวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างหินและรอยแตกเพื่อใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี โดยจัดเตรียมตัวอย่างหินให้มีรอยแตก 2 แบบ คือ รอยแตกที่มีผิวขรุขระด้วยวิธีการให้แรงกดแบบเส้น และรอยแตกที่มีผิวเรียบด้วยวิธีการใช้เครื่องเลื่อยตัด โดยพื้นที่ของรอยแตกทั้ง 2 แบบ มีพื้นที่ไม่ต่ำกว่า 8×10 ตารางเซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลกระทบของแรงเฉือนแบบวัฏจักรในรอยแตกของหิน ได้มีการทดสอบกับรอยแตก 2 แบบ คือ รอยแตกแบบผิวเรียบและผิวขรุขระ โดยทำการทดสอบกับหินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี โดยผันแปรความเค้นในแนวตั้งฉากตั้งแต่ 0.5 MPa ถึง 4 MPa ในการทดสอบแรงเฉือนสูงสุดแบบวัฏจักรได้ทำการทดสอบโดยให้แรงเฉือนไป-กลับจำนวน 10 รอบ ระยะเวลาเคลื่อนของตัวอย่างหินคือ ± 5 มิลลิเมตร และการทดสอบแรงเฉือนสูงสุดแบบสถิตได้มากจากการทดสอบแรงเฉือนในรอบแรกของการทดสอบแบบวัฏจักร

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลโดยพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์

ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 3 ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดแบบวัฏจักรกับค่ากำลังเฉือนแบบสถิต และศึกษาผลกระทบจากปัจจัยความแตกต่างของเนื้อหิน ขนาดของแรงเฉือน และความถี่ในการเฉือนของรอยแตก ในเบื้องต้นได้อาศัยเกณฑ์การแตกพื้นฐานของ Coulomb และ Barton มาช่วยพัฒนาสมการ ซึ่งสมการเหล่านี้ได้มีการเพิ่มตัวแปรและค่าคงที่เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยต่างๆ ที่นำมาทดสอบในงานวิจัย อาทิ ขนาดและความถี่ของการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักร

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาจำลองการเคลื่อนตัวของรอยแตกของมวลหินภายใต้แรงเฉือนแบบสถิตและแบบวัฏจักร การจำลองได้ใช้โปรแกรม UDEC (Itasca Consulting Group, 2004) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีวิธีการคำนวณแบบ Discrete Element Method สามารถจำลองการเคลื่อนตัวของรอยแตกในสองมิติ เพื่อคาดคะเนพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกายภาพของรอยแตกได้อย่างสมจริง ซึ่งจะนำไปใช้หาผลกระทบจากลักษณะความต่างของเนื้อหิน ขนาดของแรงและความถี่ในการเฉือนแบบวัฏจักร สมการเชิงคณิตศาสตร์และผลการจำลองด้วยโปรแกรม UDEC จะสามารถนำมาใช้คาดคะเนและประเมินเสถียรภาพของมวลหินที่มีรอยแตกที่สัมพันธ์กับโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีเช่น ความลาดชัน อ่างเก็บน้ำและผนังอุโมงค์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดและข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

ผลงานวิจัยจะนำเสนอในการประชุมทางด้านวิชาการทั้งระดับชาติและนานาชาติ และตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมปิโตรเลียม รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน ถนน ทางรถไฟ หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (เหมืองถ่านหินแม่เมาะ)
- 4) กรมทรัพยากรน้ำ
- 5) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 6) การรถไฟแห่งประเทศไทย กระทรวงคมนาคม
- 7) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเหมืองแร่ และ วิศวกรรมธรณี
- 8) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 9) กระทรวงพลังงาน

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อจัดเตรียมตัวอย่างหินในการทดสอบและศึกษาผลกระทบของแรงเหวี่ยงแบบวัฏจักรของรอยแตกในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างหินในการทดสอบ 3 ชนิด ประกอบด้วย หินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ (Smooth surface) และตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ (Rough surface)

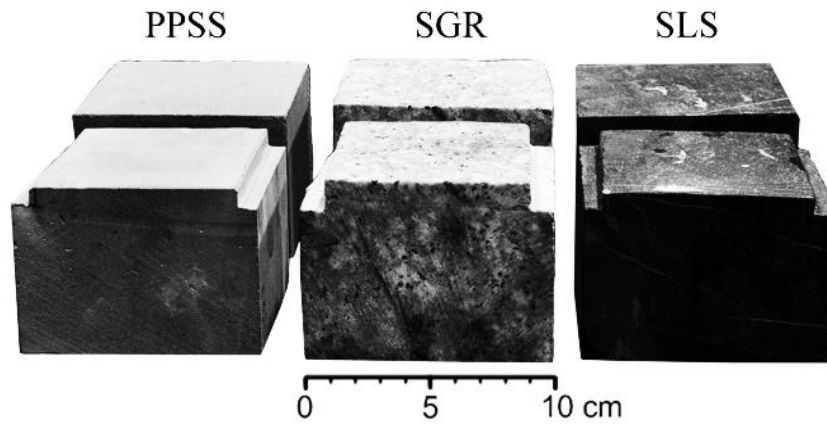
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ ได้ใช้ตัวอย่างหินที่มีขนาด $10 \times 10 \times 16$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้เครื่องเลื่อยหินตัดที่ตรงกลางของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 3.1) สำหรับการจัดเตรียมตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ มีการใช้แรงกดแบบเส้นที่กึ่งกลางตัวอย่างหินเพื่อสร้างแรงดึงให้เกิดรอยแตกกับหินทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 3.2) โดยตัวอย่างหินชิ้นบนทั้งแบบผิวเรียบและแบบผิวขรุขระที่ได้จัดเตรียมจะถูกนำมาตัดออกข้างละ 1 เซนติเมตร เพื่อให้การทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงมีพื้นที่ของรอยแตกที่สัมพันธ์กันคงที่ตลอดเวลาการทดสอบ ซึ่งรอยแตกสำหรับการทดสอบมีพื้นที่ประมาณ 8×10 ตารางเซนติเมตร ตัวอย่างหินที่จัดเตรียมมีการอ่านและบันทึกข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.1

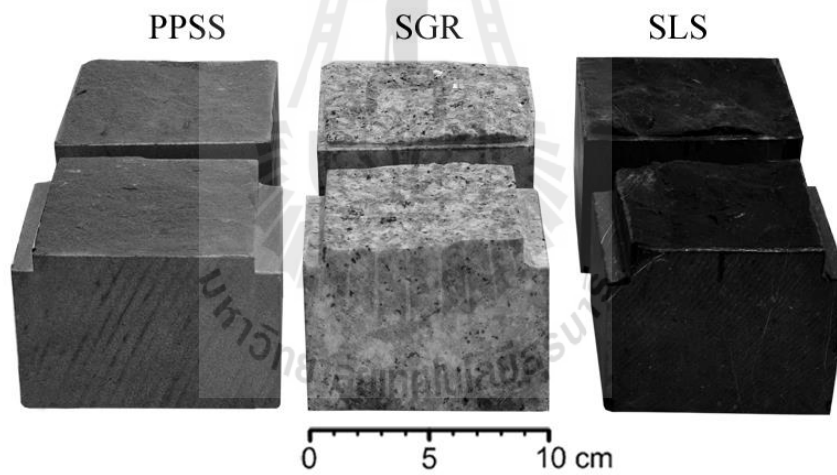
3.3 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างหิน

การจำแนกความขรุขระของรอยแตกมีการใช้เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ที่มีความละเอียด 20 ไมครอน โดยสแกนผิวความขรุขระของรอยแตก (Scan line) กับหินทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 5 ตัวอย่าง รูปที่ 3.3 แสดงผลการสแกนรอยแตกของหินทรายชุดภูพาน รูปที่ 3.4 แสดงผลการสแกนรอยแตกของหินแกรนิตชุดสระบุรี รูปที่ 3.5 แสดงผลการสแกนรอยแตกของหินปูนชุดสระบุรี โดยผลการวัดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตัวอย่างหินที่จัดเตรียมรอยแตกเสร็จแล้วจะถูกนำมาหล่อใส่ในแบบอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงด้วยปูนซิเมนต์แข็งชนิดพิเศษ (SikagROUT-212GP) เพื่อยึดตัวอย่างหินไว้สำหรับการทดสอบแรงเหวี่ยงต่อไป (รูปที่ 3.6)



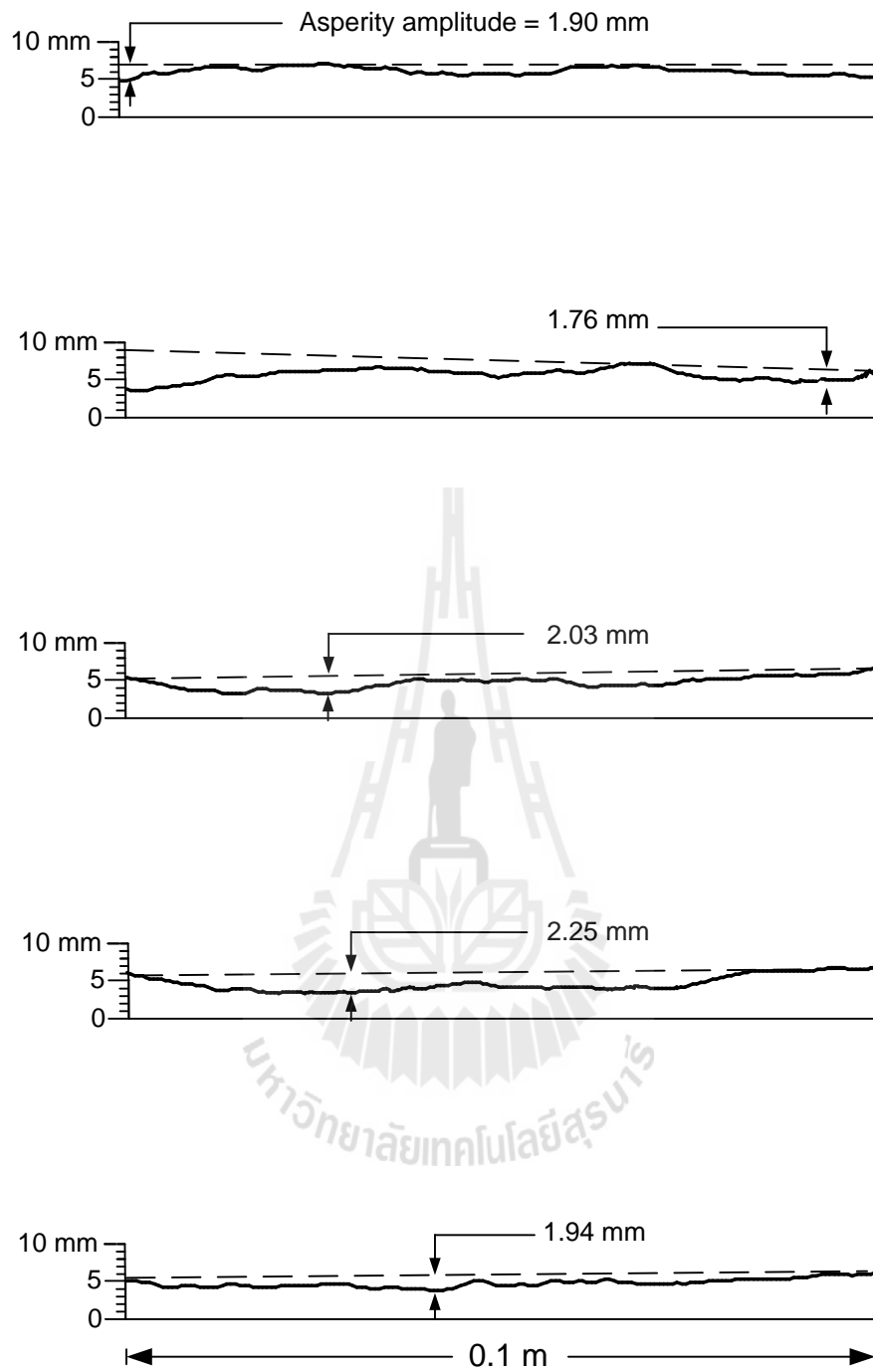
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินบางส่วนของหินทรายชุดภูพาน (PPSS) หินแกรนิตชุดสระบุรี (SGR) และหินปูนชุดสระบุรี (SLS) ที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ



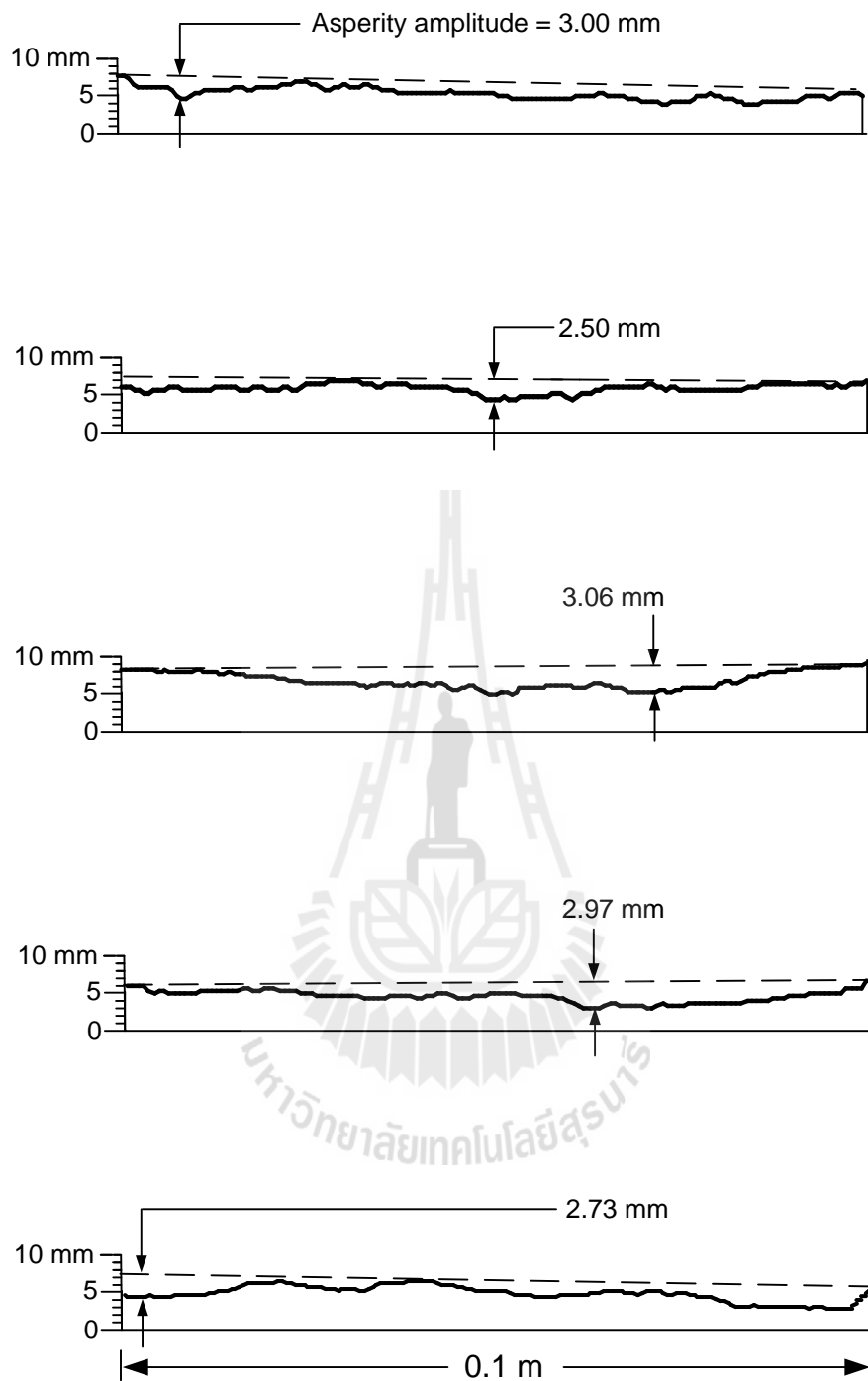
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินบางส่วนของหินทรายชุดภูพาน (PPSS) หินแกรนิตชุดสระบุรี (SGR) และหินปูนชุดสระบุรี (SLS) ที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

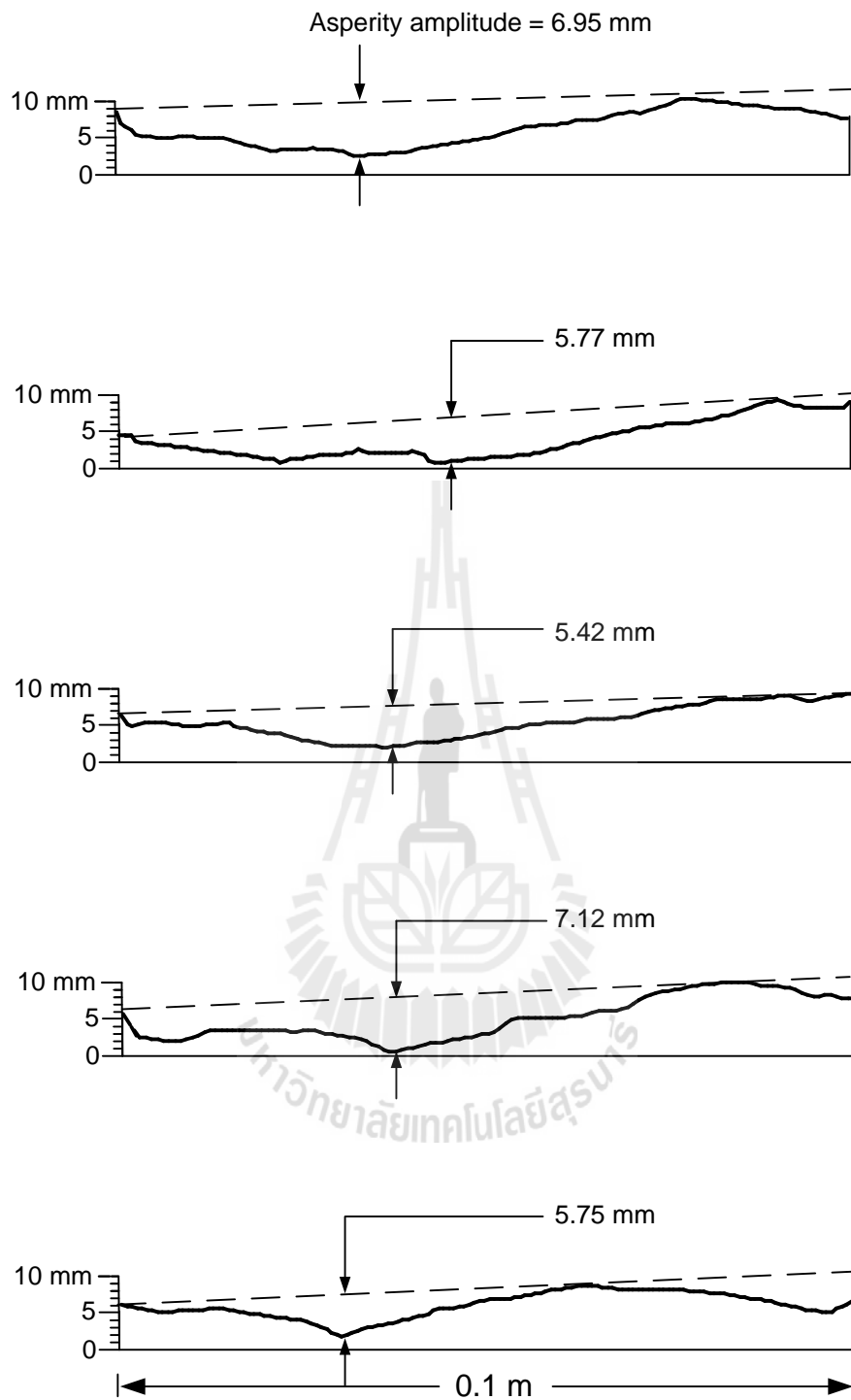
Specimen no.	Width (cm)	Length (cm)	Height (cm)	Fracture area (cm) ²
Phu-Phan Sandstone -01	8.0	10.4	16.1	82.84
Phu-Phan Sandstone -02	8.2	10.6	16.1	86.71
Phu-Phan Sandstone -03	8.0	10.2	16.0	81.35
Phu-Phan Sandstone -04	8.0	10.5	16.0	83.94
Phu-Phan Sandstone -05	8.1	10.2	15.9	82.58
Phu-Phan Sandstone -06	8.2	10.3	15.9	84.4
Saraburi Granite -01	7.9	10.0	16.0	79.03
Saraburi Granite -02	8.1	10.3	16.0	83.42
Saraburi Granite -03	8.2	10.7	15.9	87.95
Saraburi Granite -04	7.9	9.9	15.8	78.39
Saraburi Granite -05	8.0	10.2	15.8	81.74
Saraburi Granite -06	8.1	10.2	15.8	82.32
Saraburi Limestone -01	7.8	9.9	16.1	77.55
Saraburi Limestone -02	8.3	10.5	15.8	87.10
Saraburi Limestone -03	8.0	10.2	15.9	81.87
Saraburi Limestone -04	8.1	10.6	16.0	85.81
Saraburi Limestone -05	8.2	10.5	15.9	86.45
Saraburi Limestone -06	8.1	10.6	15.9	85.55



รูปที่ 3.3 ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินทรายชุดภูพาน



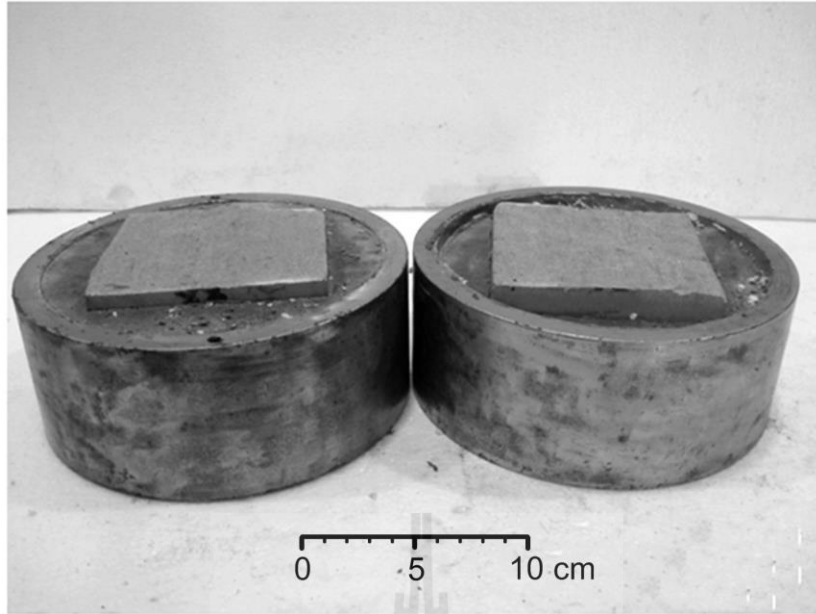
รูปที่ 3.4 ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินแกรนิตชุดสระบุรี



รูปที่ 3.5 ผลการสแกนผิวความขรุขระของหินปูนชุดสระบุรี

ตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Density) และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (JRC) ของตัวอย่าง หินทั้ง 3 ชนิด

Specimen no.	Density (g/cc)	JRC
Phu-Phan Sandstone -01	2.21	8
Phu-Phan Sandstone -02	2.31	7
Phu-Phan Sandstone -03	2.33	8
Phu-Phan Sandstone -04	2.30	9
Phu-Phan Sandstone -05	2.26	8
Phu-Phan Sandstone -06	2.27	smooth surface
Saraburi Granite -01	2.66	12
Saraburi Granite -02	2.65	10
Saraburi Granite -03	2.68	12
Saraburi Granite -04	2.67	12
Saraburi Granite -05	2.68	11
Saraburi Granite -06	2.71	smooth surface
Saraburi Limestone -01	2.79	20
Saraburi Limestone -02	2.78	20
Saraburi Limestone -03	2.75	20
Saraburi Limestone -04	2.79	20
Saraburi Limestone -05	2.76	20
Saraburi Limestone -06	2.80	smooth surface



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างหินทรายชุดคุณภาพที่ถูกหล่อด้วยปูนซีเมนต์ภายในแบบอุปกรณ์ทดสอบ



บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักรในห้องปฏิบัติการ โดยมีปัจจัยที่นำมาพิจารณาคือ ความเค้นในแนวตั้งฉาก และขนาดของแรงเฉือน โดยมีการผันแปรค่าความเค้นตั้งฉากกับรอยแตก ผลการศึกษาได้แสดงถึงผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักรต่อค่ากำลังเฉือนของหิน

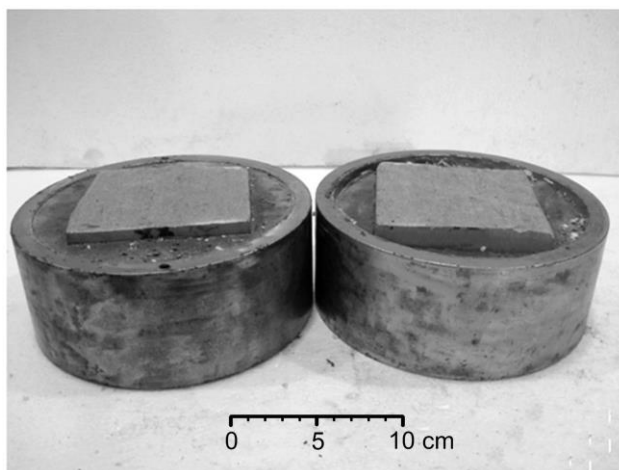
เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการข้อปฏิบัติและผลการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักร ซึ่งการทดสอบได้จำลองลักษณะความเค้นเฉือนของหินภายใต้การให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรโดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนาม เช่น การออกแบบความลาดชันของมวลหินตามแนวถนน การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของเหมืองแร่ สุสานรากเขื่อน มวลหินที่อยู่รอบอุโมงค์ที่ใช้ส่งน้ำในระบบชลประทาน และอุโมงค์สำหรับทางถนนหรือทางรถไฟ ที่อยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการระเบิด แผ่นดินไหว และการจลาจล

4.2 วิธีการทดสอบกำลังเฉือน

การทดสอบกำลังเฉือนของหินทั้ง 3 ชนิด ในห้องปฏิบัติการได้ใช้หินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบและรอยแตกแบบผิวขรุขระ โดยมีการทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa การทดสอบในแต่ละความเค้นตั้งฉากมีการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไปและกลับ 10 รอบ ด้วยระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินทั้งรอบไปและรอบกลับเท่ากับ ± 5 มิลลิเมตร ระหว่างการทดสอบจะมีการอ่านและบันทึกค่าความเค้นและระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินและแนวขนานกับรอยแตกของตัวอย่างหินเพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละวัฏจักร

การติดตั้งตัวอย่างหินเพื่อทดสอบกำลังเฉือนมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

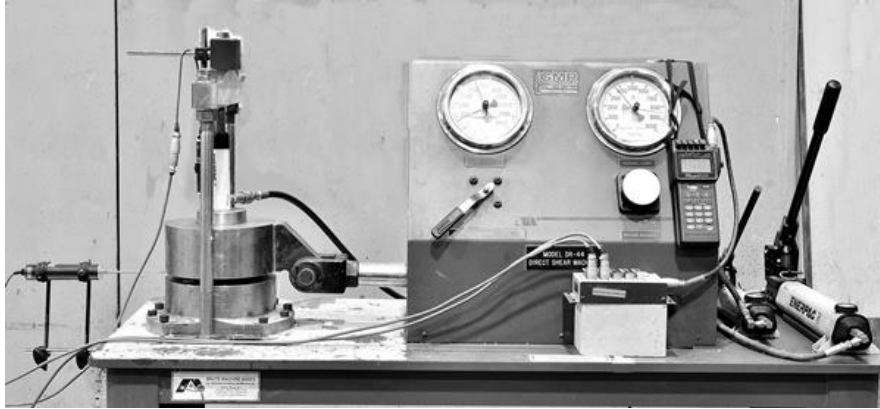
- 1) นำตัวอย่างหินที่จัดเตรียมรอยแตกเสร็จแล้วมาหล่อใส่ในแบบอุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนด้วยปูนซิเมนต์ชนิดแข็งพิเศษ (Sikagrout-212GP) เพื่อยึดตัวอย่างหิน (รูปที่ 4.1) โดยทำการหล่อยึดตัวอย่างหินขึ้นล่างก่อนแล้วรอให้ปูนเริ่มแข็งโดยใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหล่อยึดตัวอย่างหินขึ้นบนต่อเมื่อทำการหล่อตัวอย่างหินทั้งขึ้นบนและขึ้นล่างเสร็จแล้วปูนซิเมนต์จะใช้เวลาแข็งตัวประมาณ 12 ชั่วโมง จึงพร้อมทดสอบ



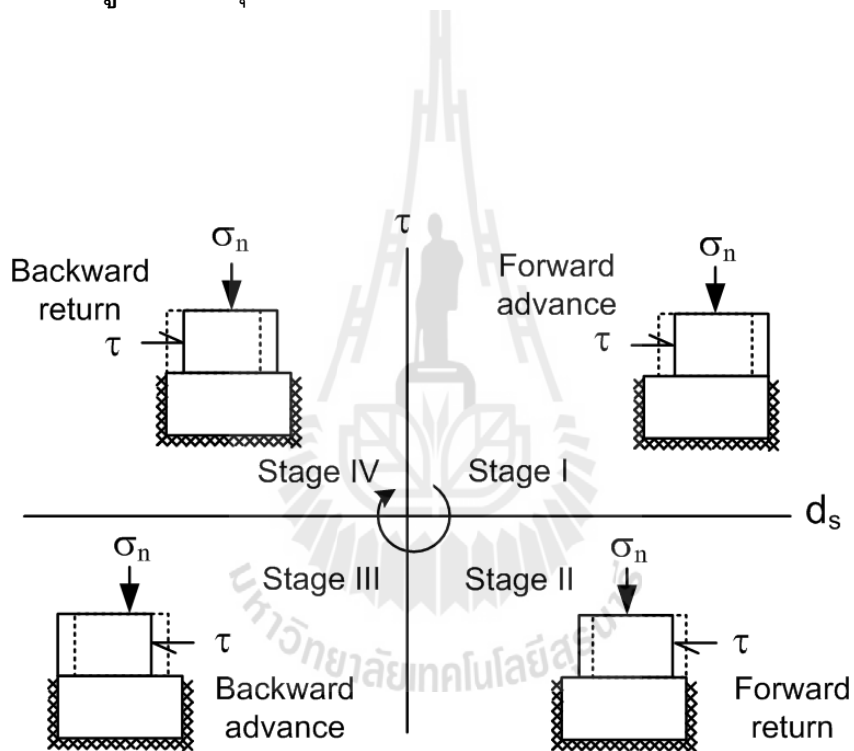
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างหินทรายชุดคุณภาพที่ถูกหล่อด้วยปูนซีเมนต์ภายในแบบหล่อชุดอุปกรณ์ทดสอบ

- 2) นำตัวอย่างหินที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว ประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน (Direct shear device, SBEL DR44) โดยใส่คานเหล็กกดด้านบนเพื่อส่งแรงในแนวตั้งฉากกับรอยแตก และใส่คานเหล็กด้านข้างเพื่อส่งแรงเฉือนในแนวขนานกับรอยแตกของตัวอย่างหิน
- 3) เมื่อประกอบตัวอย่างหินกับชุดคานเหล็กส่งแรงเสร็จแล้ว จึงทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินทั้งในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับรอยแตกของตัวอย่างหิน (รูปที่ 4.2) โดยเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดระยะคือ LVDTs (TML Co. CDP-50, ± 50 มิลลิเมตร, sensitivity: 5.0 mV/V และ CDP-25, ± 25 มิลลิเมตร, sensitivity: 6.25 mV/V)
- 4) กดตัวอย่างหินด้วยคานเหล็กด้านบนเพื่อให้ความเค้นตั้งฉากกับรอยแตกด้วยปั๊ม ไฮดรอลิกจากขนาดแรงกดที่กำหนดไว้ (0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa)
- 5) เมื่อตัวอย่างหินอยู่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากจึงทำการให้แรงเฉือนกับรอยแตกของตัวอย่างหินด้วยปั๊มไฮดรอลิกด้วยการใส่แรงเฉือนไปอย่างต่อเนื่อง จนระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแนวขนานกับรอยแตกทั้งรอบไปและรอบกลับเท่ากับ ± 5 มิลลิเมตร โดยใส่แรงเฉือนลักษณะนี้ให้ครบ 10 รอบวัฏจักรแต่ละวัฏจักรมี 4 stages (รูปที่ 4.3)

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการตรวจวัดและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละวัฏจักรการให้แรง เพื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกด้วยการให้แรงแบบวัฏจักร



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน



รูปที่ 4.3 แผนภาพทิศทางของการให้แรงเฉือนสำหรับ 1 วัฏจักร

4.3 ผลการทดสอบรอยแตกแบบผิวขรุขระ

หลังจากทดสอบกำลังเฉือนโดยใช้ตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบขรุขระแล้วจึงนำผลที่ได้มาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตก (d_s) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรการให้แรงต่อค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนผิวรอยแตก และเพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการยกตัวของรอยแตก (Dilation) ต่อวัฏจักรการให้แรงที่เพิ่มขึ้น

4.3.1 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อค่ากำลังเฉือน

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถสรุปได้ว่าการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรมีผลกระทบโดยตรงต่อกำลังเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) ของหินทั้ง 3 ชนิด ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa

เมื่อนำค่ากำลังเฉือนสูงสุดของทั้ง 10 วัฏจักร มาเปรียบเทียบกันพบว่า การให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรมีผลให้กำลังเฉือนลดลงจากวัฏจักรแรกดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 โดยค่ากำลังเฉือนสูงสุดในแต่ละชนิดหินของวัฏจักรที่ 1 จะสูงกว่าวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 อย่างชัดเจนซึ่งผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักรต่อชนิดหินจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

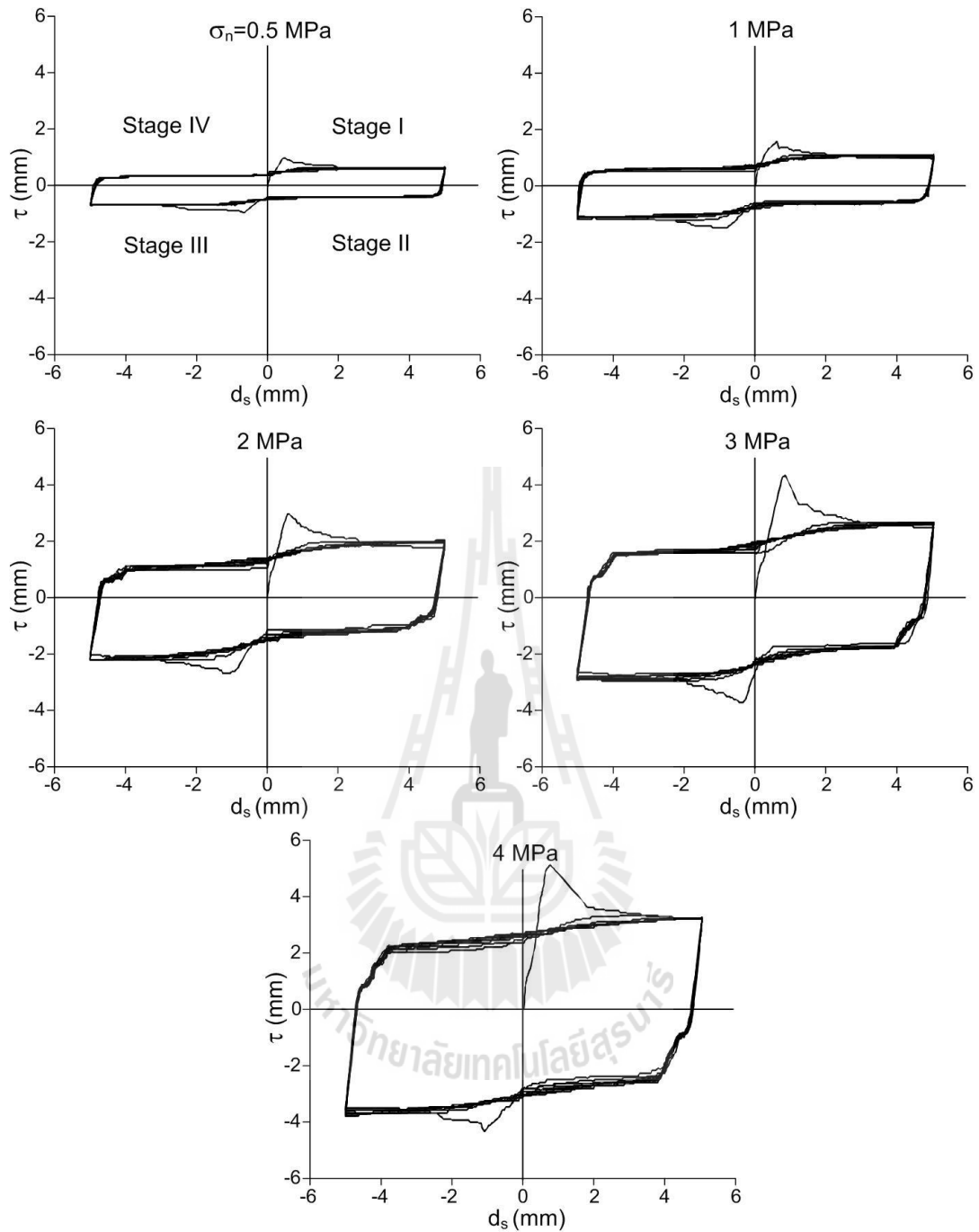
4.3.2 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อชนิดหิน

หินแกรนิตชุดสระบุรี

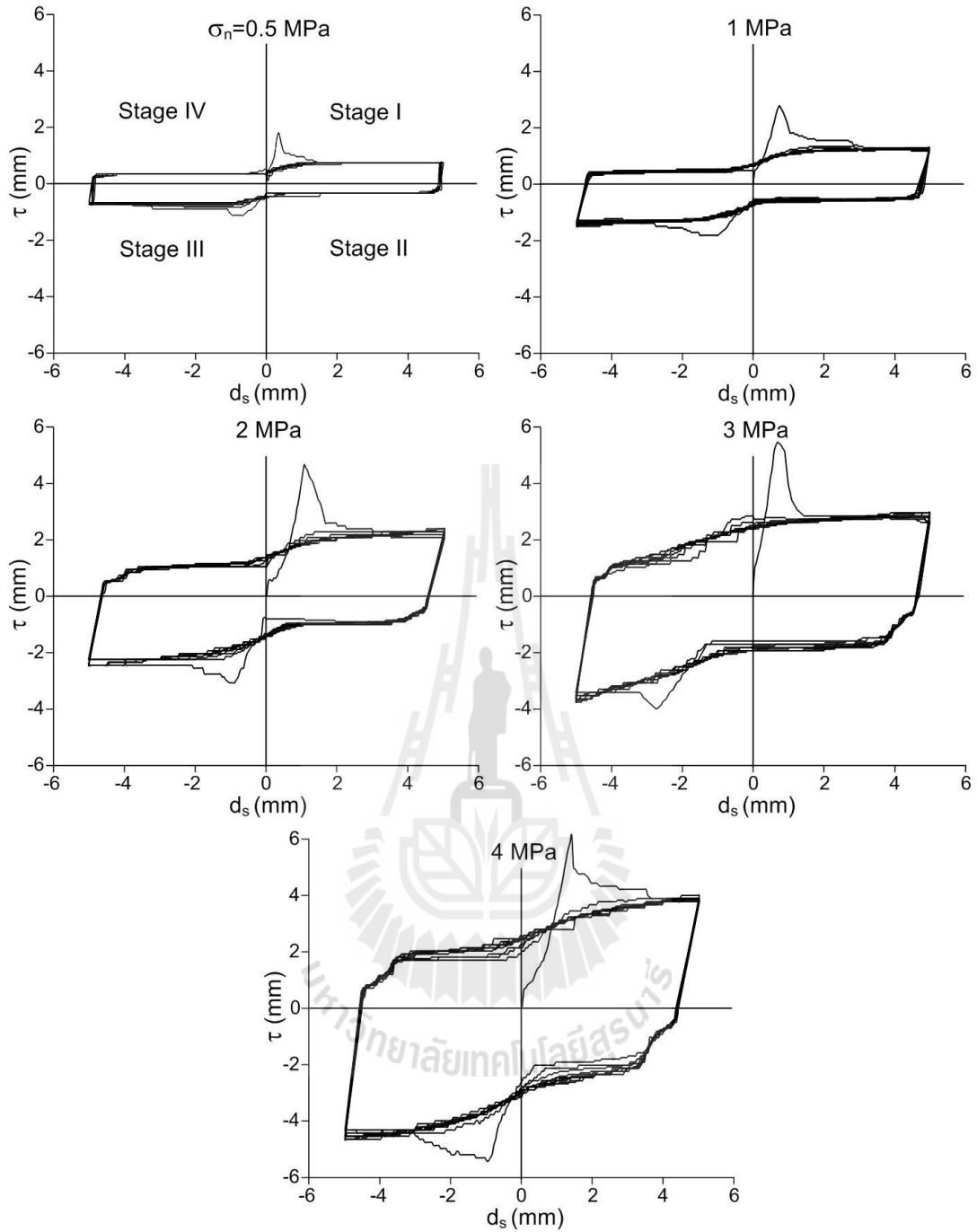
ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการให้แรงแบบวัฏจักรมีผลกับหินแกรนิตชุดสระบุรีมากที่สุด โดยสามารถสังเกตได้จากค่ากำลังเฉือนสูงสุดในวัฏจักรที่ 2 ลดลงจากวัฏจักรที่ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับหินอีก 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากหินแกรนิตชุดสระบุรีมีลักษณะโครงสร้างผลึกในเนื้อหินเป็นเม็ดหยาบและแข็งจึงส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนในวัฏจักรที่ 1 มีค่าสูง และเมื่อผิวความขรุขระถูกทำลายอย่างรุนแรงจากวัฏจักรแรกย่อมมีผลให้ค่ากำลังเฉือนลดลงอย่างมากในวัฏจักรถัดไป

หินทรายชุดภูพาน

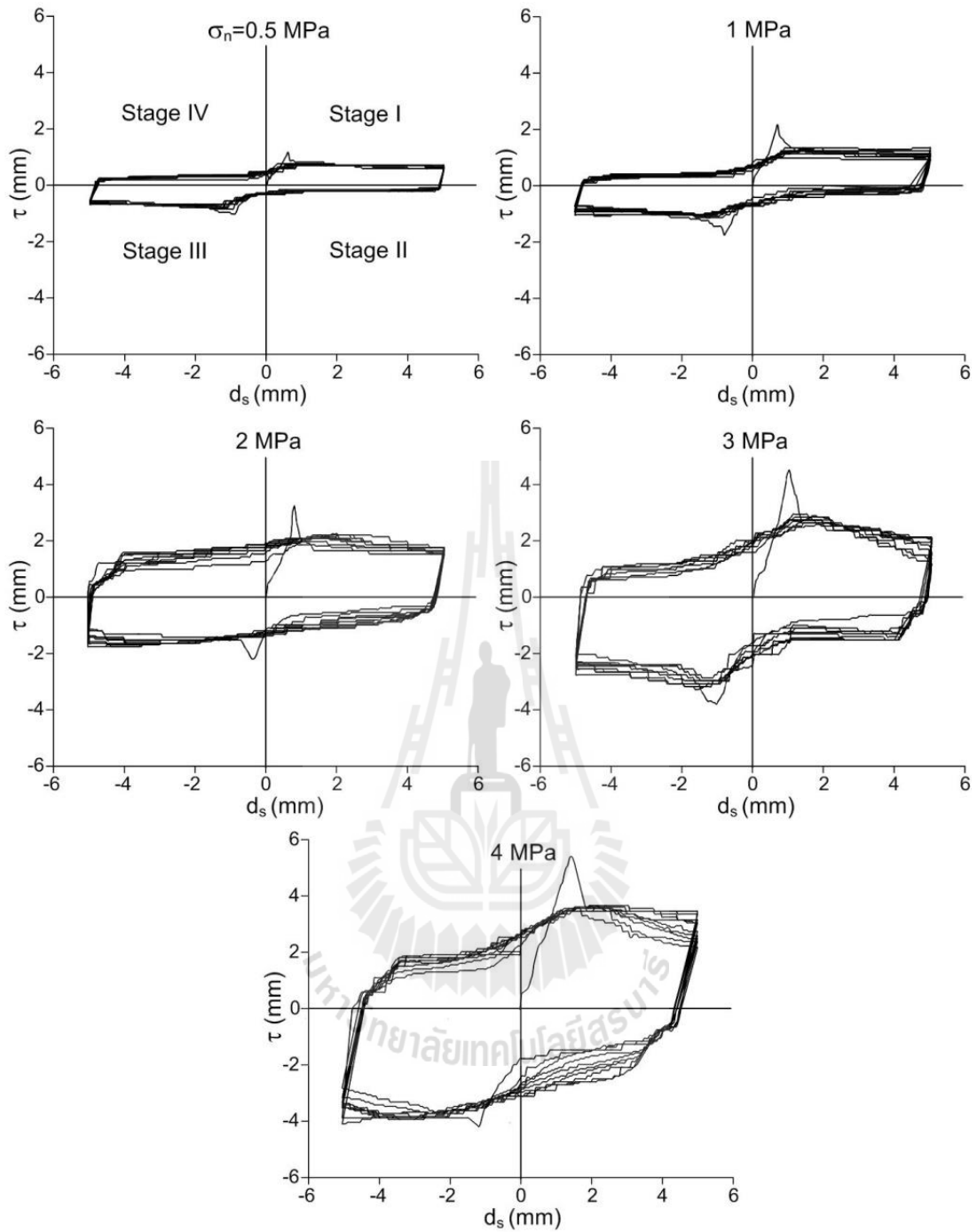
จากผลการทดสอบสำหรับหินทรายชุดภูพานที่มีลักษณะพื้นผิวความขรุขระเป็นเม็ดเล็กละเอียดและมีเนื้อค่อนข้างอ่อน สามารถเฉือนได้ง่ายตั้งแต่วัฏจักรแรกส่งผลให้มีค่ากำลังเฉือนที่ต่ำ และค่ากำลังเฉือนลดลงเพียงเล็กน้อยในวัฏจักรถัดไปเมื่อเทียบกับหินแกรนิต



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบพิวชรูชระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	1.02	1.54	2.95	4.29	5.12
C2	0.67	1.08	1.97	2.65	3.34
C3	0.67	1.03	1.97	2.65	3.23
C4	0.67	1.03	1.97	2.60	3.23
C5	0.64	1.03	1.97	2.65	3.23
C6	0.64	1.03	1.97	2.65	3.23
C7	0.64	1.03	1.97	2.65	3.23
C8	0.64	1.08	1.97	2.65	3.23
C9	0.64	1.03	1.97	2.65	3.23
C10	0.64	1.03	1.97	2.65	3.23

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	1.80	2.77	4.55	5.45	6.04
C2	0.73	1.33	2.23	2.78	3.81
C3	0.73	1.28	2.23	2.78	3.70
C4	0.73	1.23	2.23	2.78	3.81
C5	0.73	1.28	2.23	2.84	3.81
C6	0.73	1.23	2.23	2.84	3.81
C7	0.73	1.28	2.23	2.95	3.81
C8	0.73	1.23	2.23	2.95	3.81
C9	0.73	1.28	2.23	2.95	3.81
C10	0.73	1.28	2.23	2.95	3.92

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	1.15	2.15	3.21	4.45	5.46
C2	0.75	1.33	1.85	2.90	3.65
C3	0.75	0.97	1.96	2.69	3.60
C4	0.69	1.23	2.07	2.59	3.65
C5	0.69	1.23	2.07	2.79	3.71
C6	0.75	1.12	2.17	2.85	3.71
C7	0.75	1.33	2.17	2.69	3.60
C8	0.69	1.33	2.17	2.54	3.71
C9	0.69	1.23	2.23	2.69	3.65
C10	0.69	1.33	2.17	2.69	3.71

หินปูนชุดสระบุรี

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวรอยแตกของหินปูนชุดสระบุรีพบว่ามีความขรุขระที่ลึกกว่าหินอีก 2 ชนิด แต่ไม่ส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนสูงกว่าหินแกรนิต เนื่องจากพื้นผิวค่อนข้างราบเรียบเนื้อแน่น และมีการยึดติดระหว่างรอยแตกต่ำ ส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนใกล้เคียงกับหินทรายชุดภูพาน โดยค่ากำลังเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 มีค่าลดลงจากวัฏจักรแรกเพียงเล็กน้อย

จากการสังเกตลักษณะรอยแตกของหินแต่ละชนิดที่ได้ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่าหินทรายที่มีลักษณะเป็นตะกอนอนุภาค (Clastic rock) โดยส่วนใหญ่มักจะถูกเฉือนและแตกได้ง่ายเนื่องจากการรบกวนระหว่างเม็ดอนุภาคของหิน ส่งผลให้ผิวความขรุขระถูกทำลายโดยง่ายตั้งแต่การเฉือนในวัฏจักรแรก ในขณะที่หินแกรนิตที่มีลักษณะเป็นหินเนื้อผลึก (Crystalline rock) มีเม็ดผลึกขนาดใหญ่และแข็ง ยึดเกาะกันได้ดี ต้องใช้กำลังเฉือนที่สูงตั้งแต่วัฏจักรแรก แต่เมื่อผลึกของหินแกรนิตถูกทำลาย ค่ากำลังเฉือนจะลดลงมากเมื่อเทียบกับหินอีก 2 ชนิด และสำหรับหินปูนที่เป็นหินกลุ่มตะกอนเคมี (Chemical sedimentary rock) มีผิวรอยแตกค่อนข้างราบเรียบ ไม่มีความเป็นเม็ดหรือผลึก ซึ่งส่งผลให้รอยแตกยึดเกาะกันไม่ดี จากลักษณะทางกายภาพดังกล่าว หินปูนจึงสามารถเฉือนออกจากกันได้ง่ายตั้งแต่วัฏจักรแรก

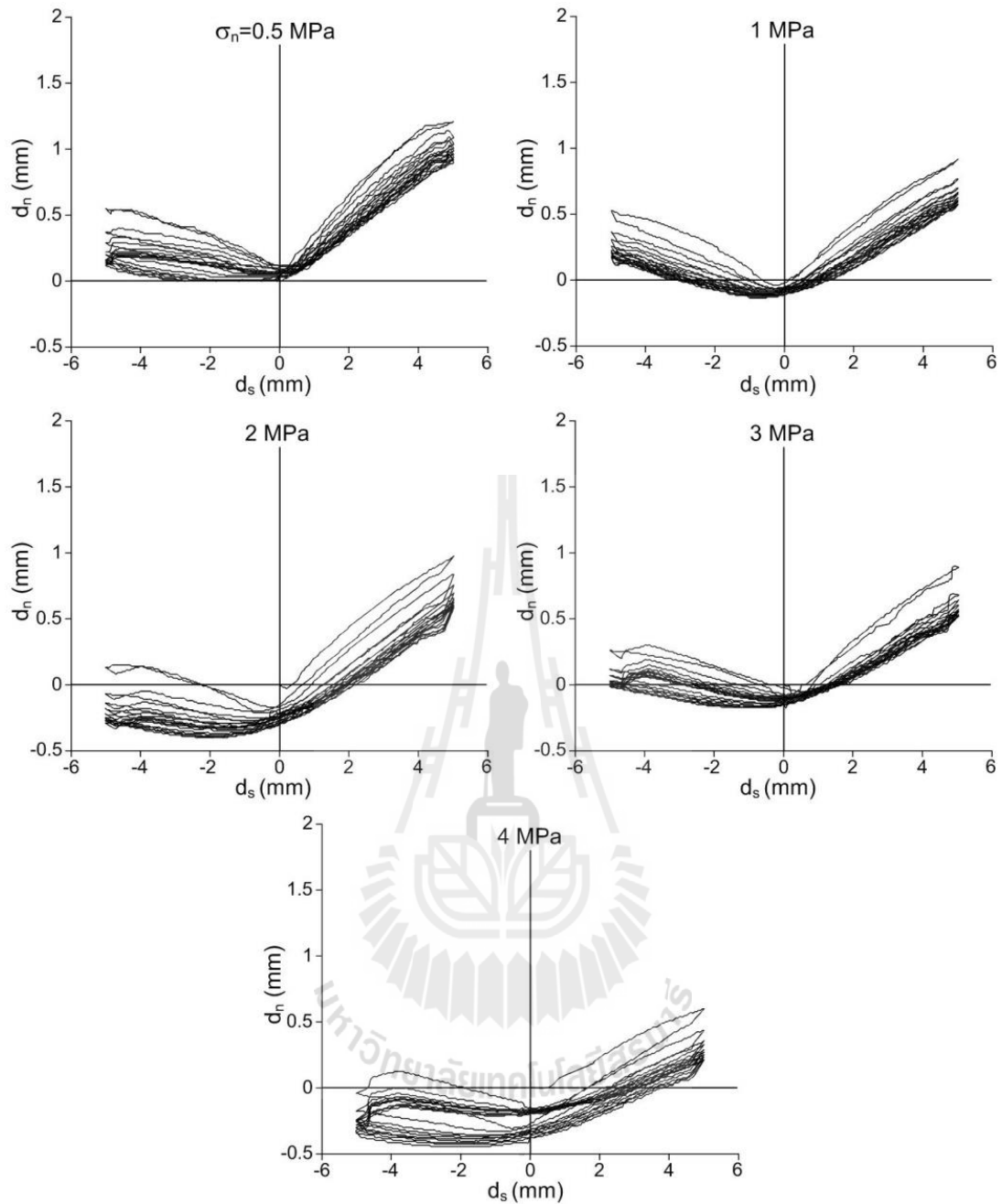
4.3.3 ระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากและแนวเฉียง

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกจากการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่แตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแนวตั้งฉากและระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแนวเฉียงของหินทั้ง 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในระหว่างที่ตัวอย่างหินเคลื่อนตัวด้วยการให้แรงเฉือน รอยแตกของตัวอย่างหินจะเคลื่อนตัวเฉือนกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวอย่างหินชั้นบนจะยกตัวขึ้นผ่านผิวความขรุขระของรอยแตกในหิน จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวดังกล่าวส่งผลให้ระดับผิวความขรุขระลดลงเนื่องจากผิวความขรุขระของรอยแตกถูกทำลาย นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าค่าความเค้นตั้งฉากมีผลกระทบต่อการทำลายผิวความขรุขระของรอยแตกในหินเช่นกัน กล่าวคือตัวอย่างหินที่ทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าสูง ตัวอย่างหินชั้นบนจะยกตัวผ่านผิวความขรุขระได้ยากขึ้น ส่งผลให้รอยแตกของหินเฉือนกันอย่างรุนแรงจนทำให้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินค่อนข้างแปรปรวนเมื่อเทียบกับระดับความเค้นตั้งฉากที่ต่ำกว่า โดยผลการทดสอบนี้สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการวิจัยของ Jafari et al. (2003) กล่าวคือ เมื่อผิวความขรุขระของรอยแตกในหินถูกทำลายจากการเฉือนในวัฏจักรแรกจะส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนลดลงในวัฏจักรถัดไป รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างหินหลังการทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5 และ 4 MPa

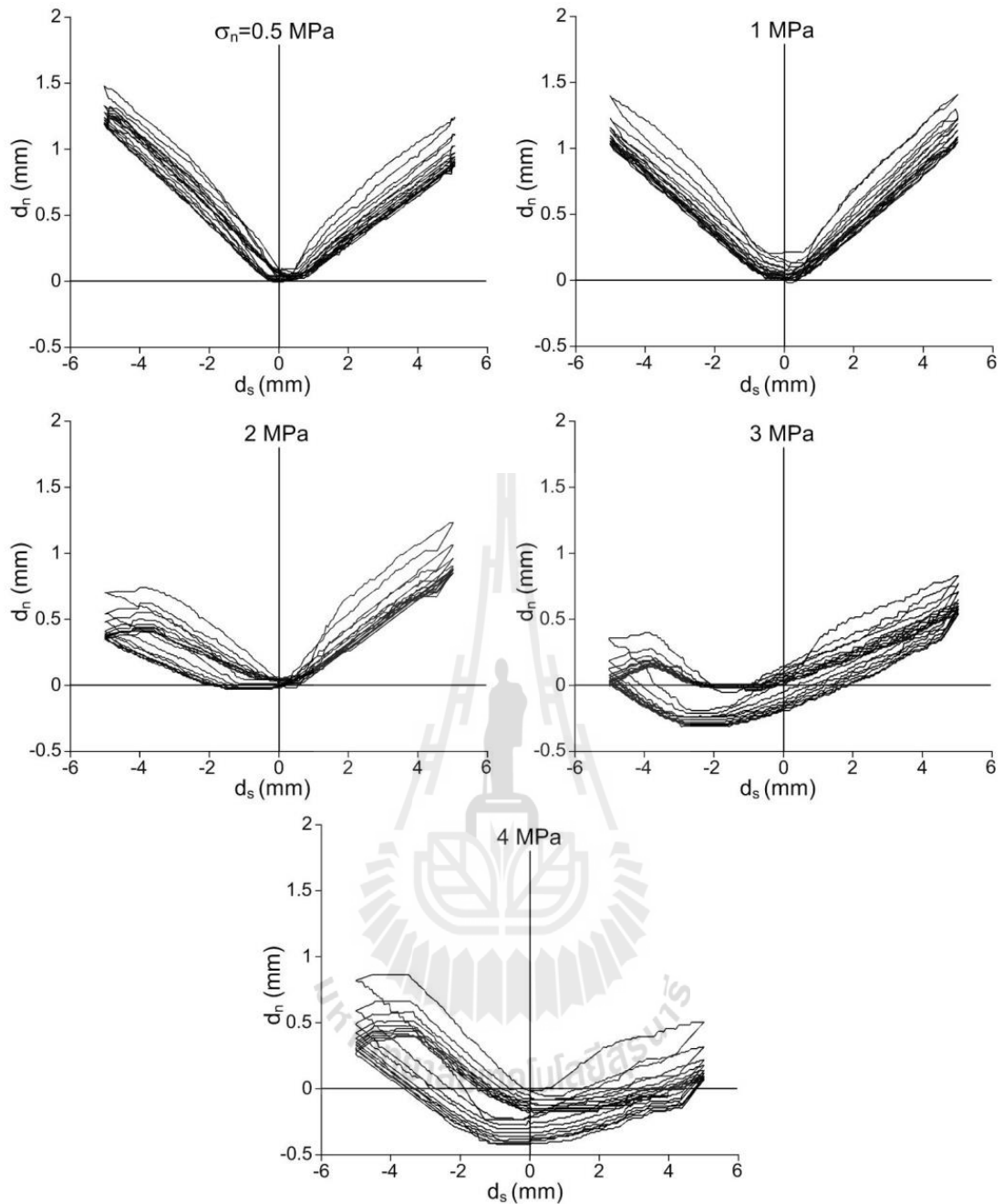
4.4 ผลการทดสอบรอยแตกแบบผิวเรียบ

4.4.1 ผลกระทบของวัฏจักรการให้แรงต่อค่ากำลังเฉือน

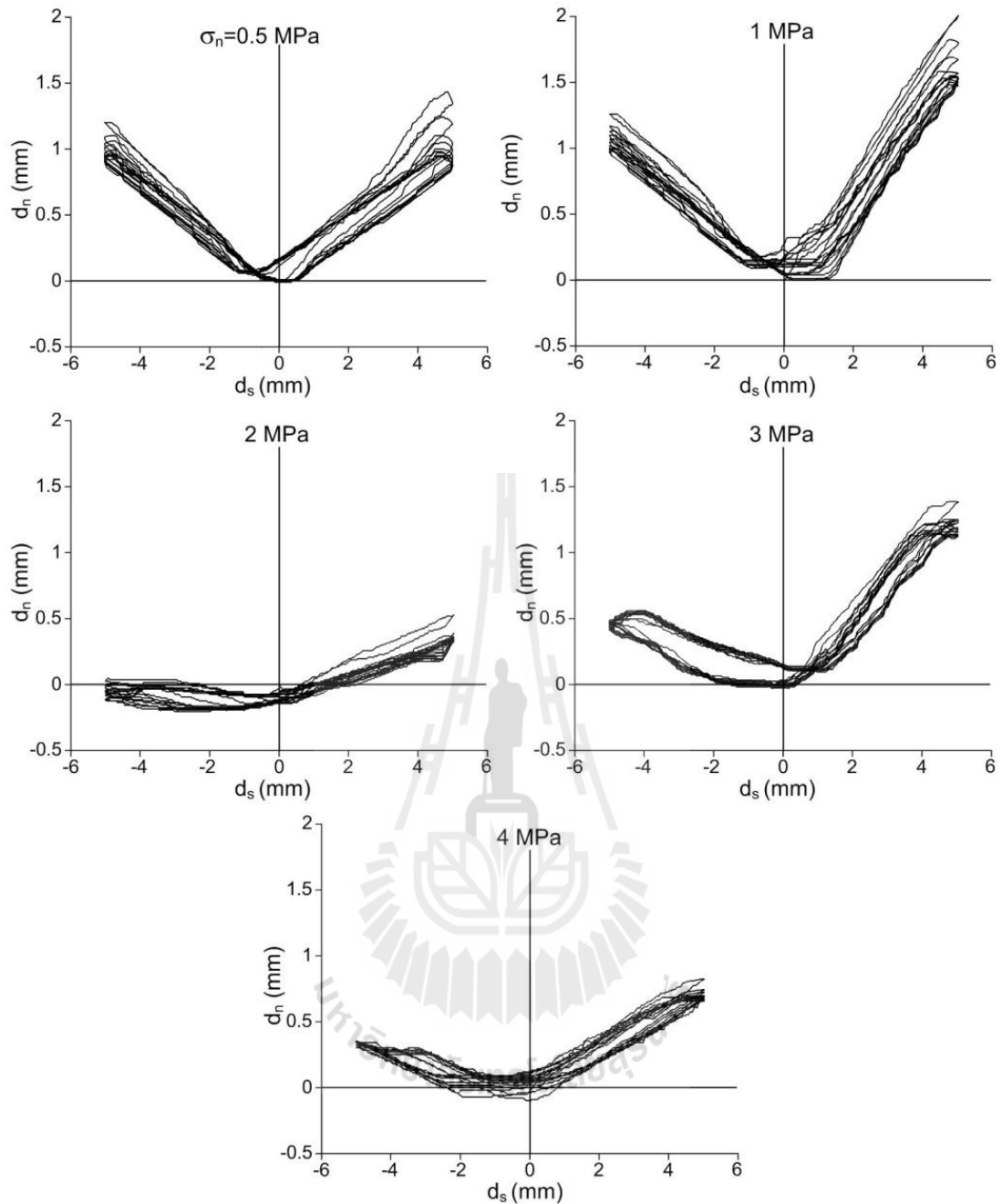
การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกบนตัวอย่างหินแบบผิวเรียบทั้ง 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa โดยการทดสอบแต่ละความเค้นตั้งฉากมีการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักร (ไป-กลับ) จำนวน 10 รอบวัฏจักร ระยะในการเคลื่อนตัวของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งระหว่างการทดสอบได้มีการอ่านและบันทึกข้อมูลของค่าความเค้นและระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับรอยแตกของตัวอย่างทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละวัฏจักร ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินจากรอยแตกแบบผิวเรียบของหินทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 โดยค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างหินเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความเค้นตั้งฉาก ซึ่งการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรมีค่ากำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่เท่ากันทุกวัฏจักรดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.6



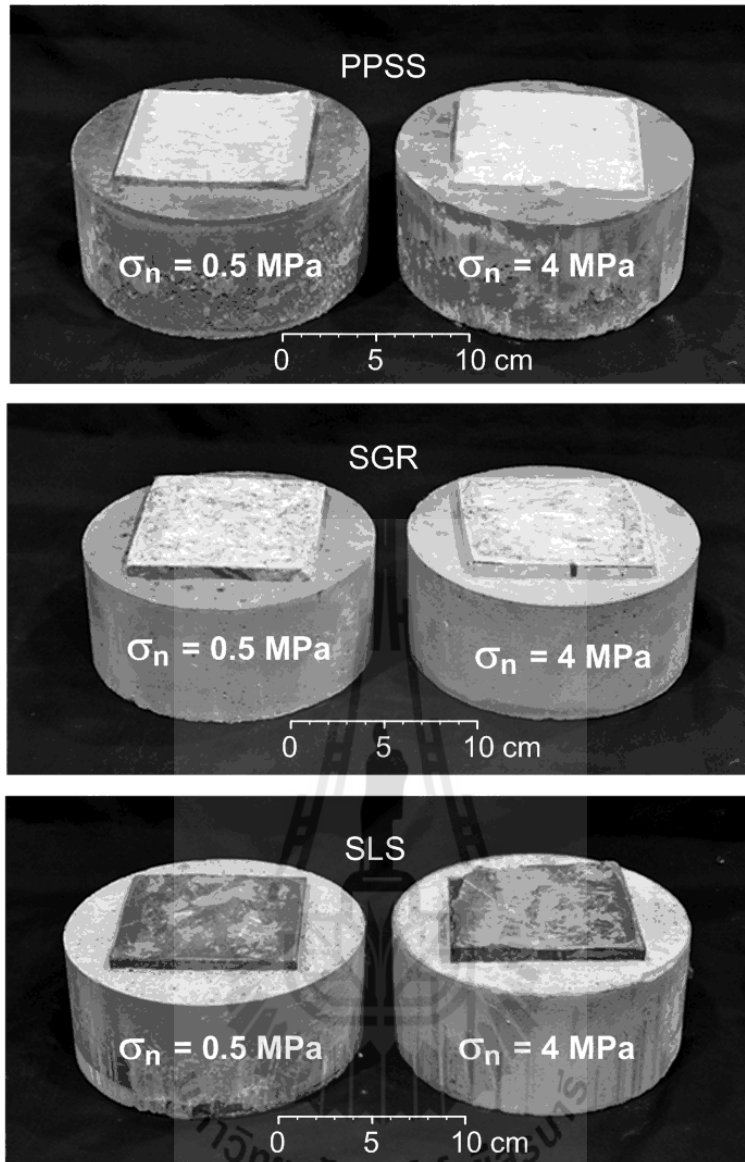
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



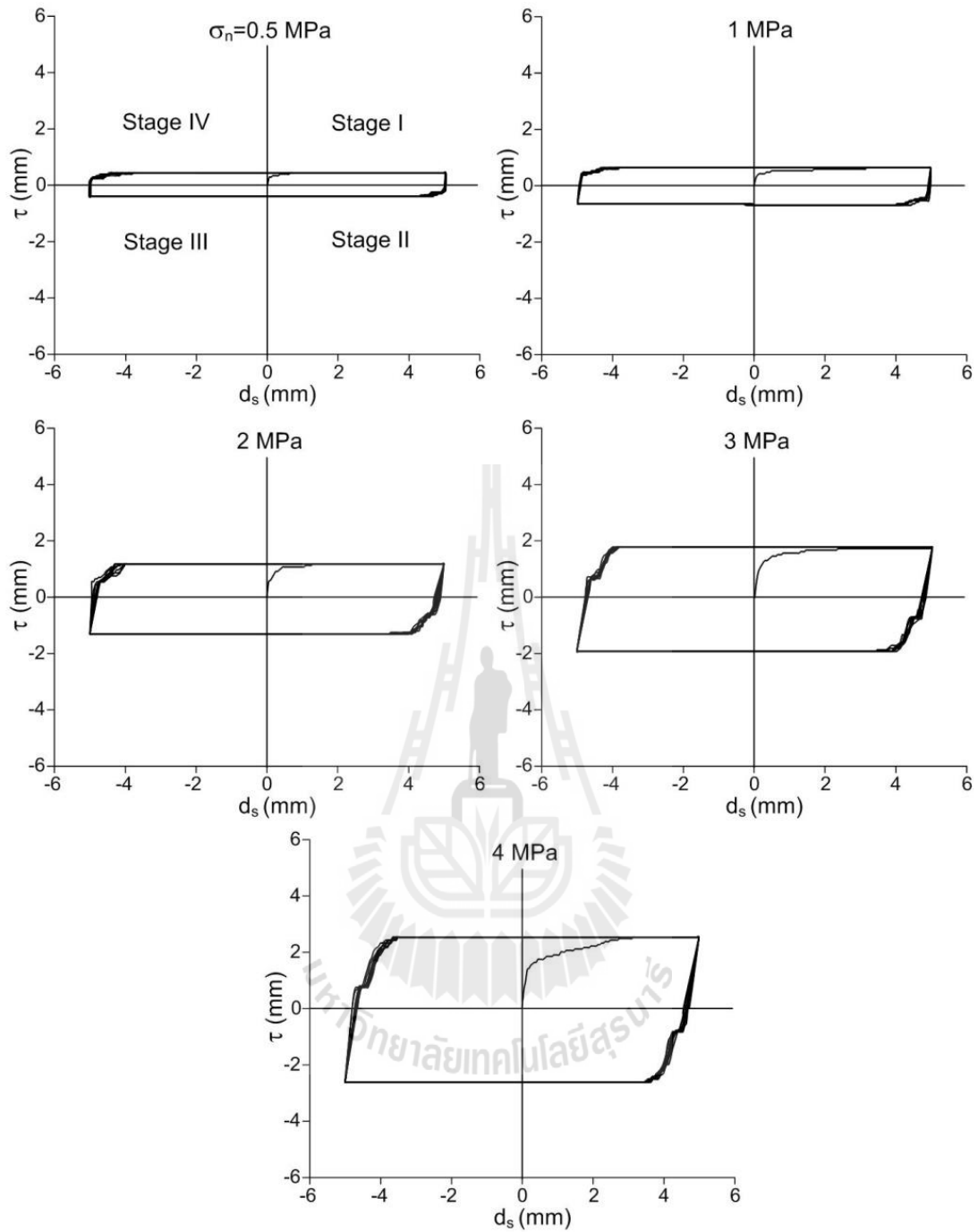
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



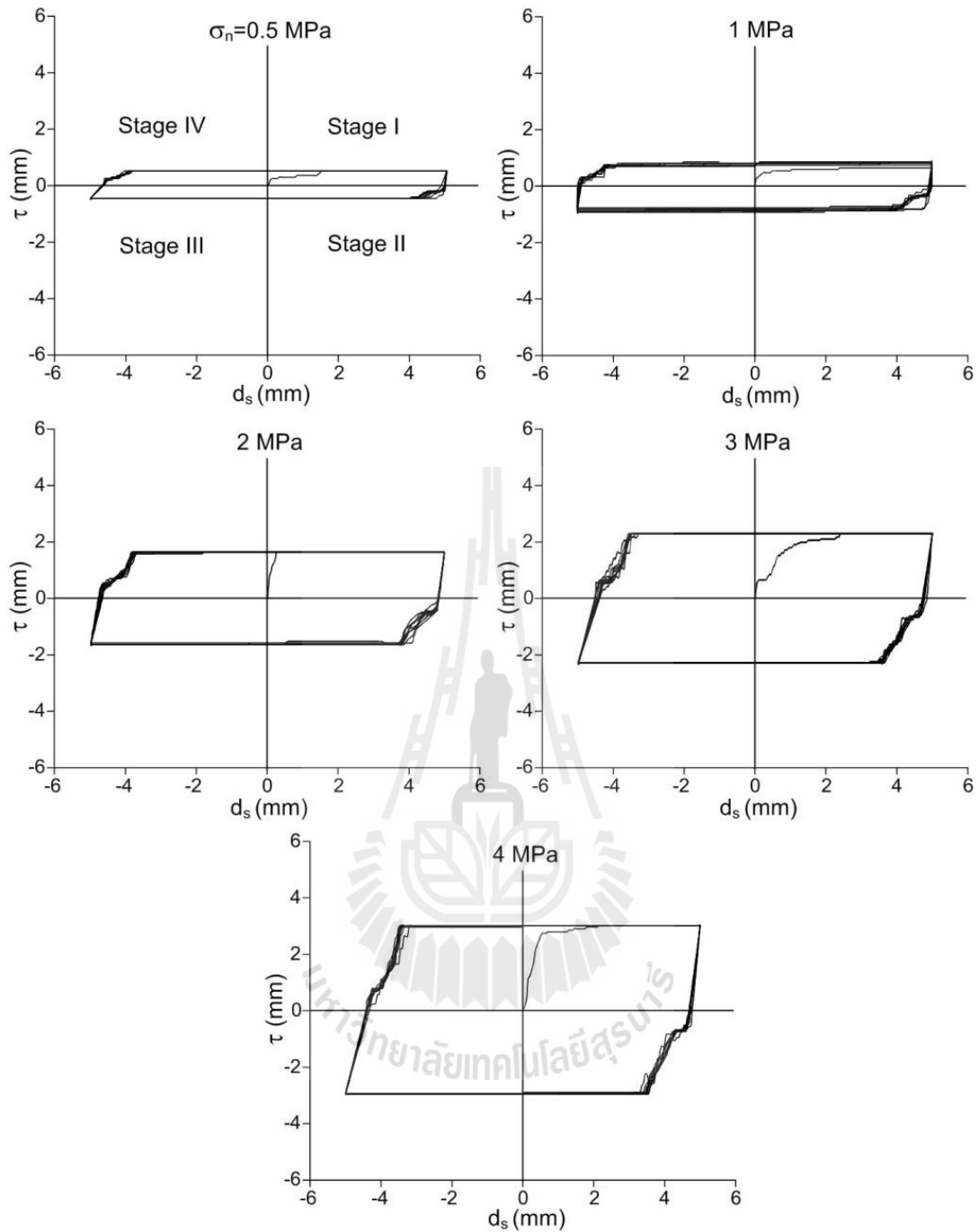
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



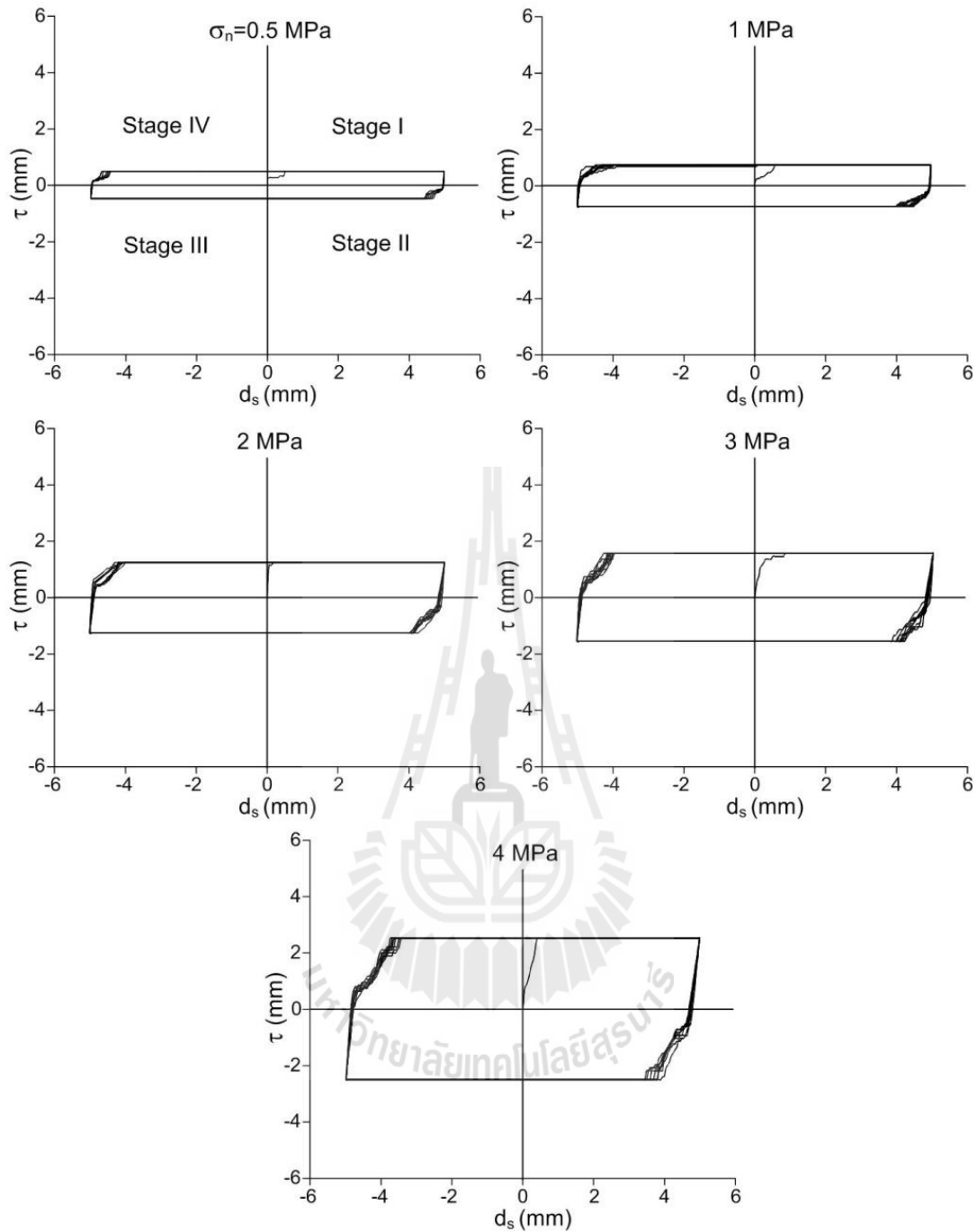
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างหินหลังทดสอบการให้แรงเฉือน 10 วัฏจักร ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5 และ 4 MPa



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	0.42	0.63	1.16	1.74	2.53
C2	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C3	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C4	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C5	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C6	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C7	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C8	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C9	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53
C10	0.42	0.63	1.16	1.79	2.53

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	0.49	0.81	1.62	2.27	2.92
C2	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C3	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C4	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C5	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C6	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C7	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C8	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C9	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97
C10	0.49	0.81	1.62	2.27	2.97

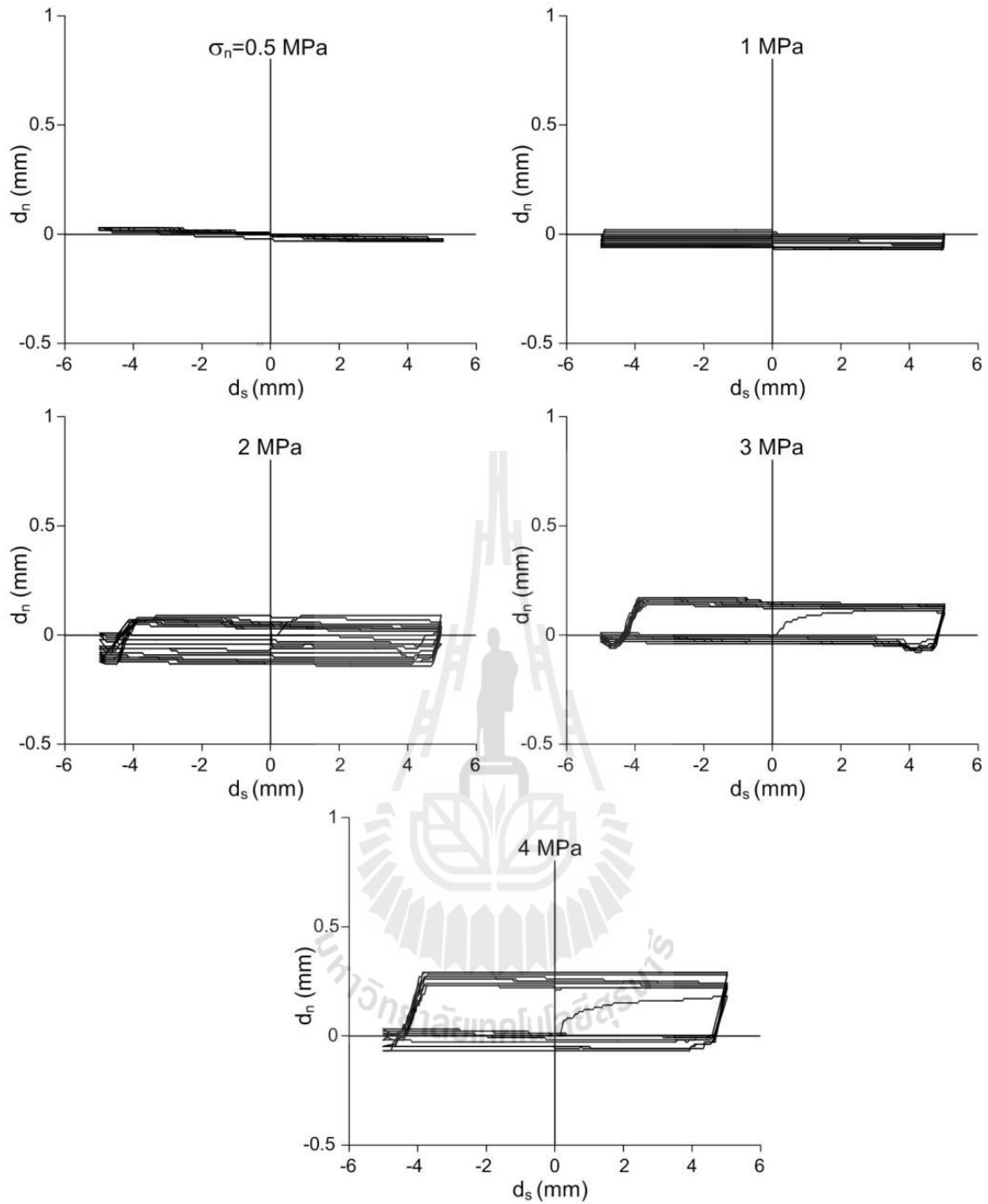
ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ

Cycle No.	Shear stress (MPa)				
	Normal stress (MPa)				
	0.5	1	2	3	4
C1	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C2	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C3	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C4	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C5	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C6	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C7	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C8	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C9	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50
C10	0.47	0.73	1.25	1.56	2.50

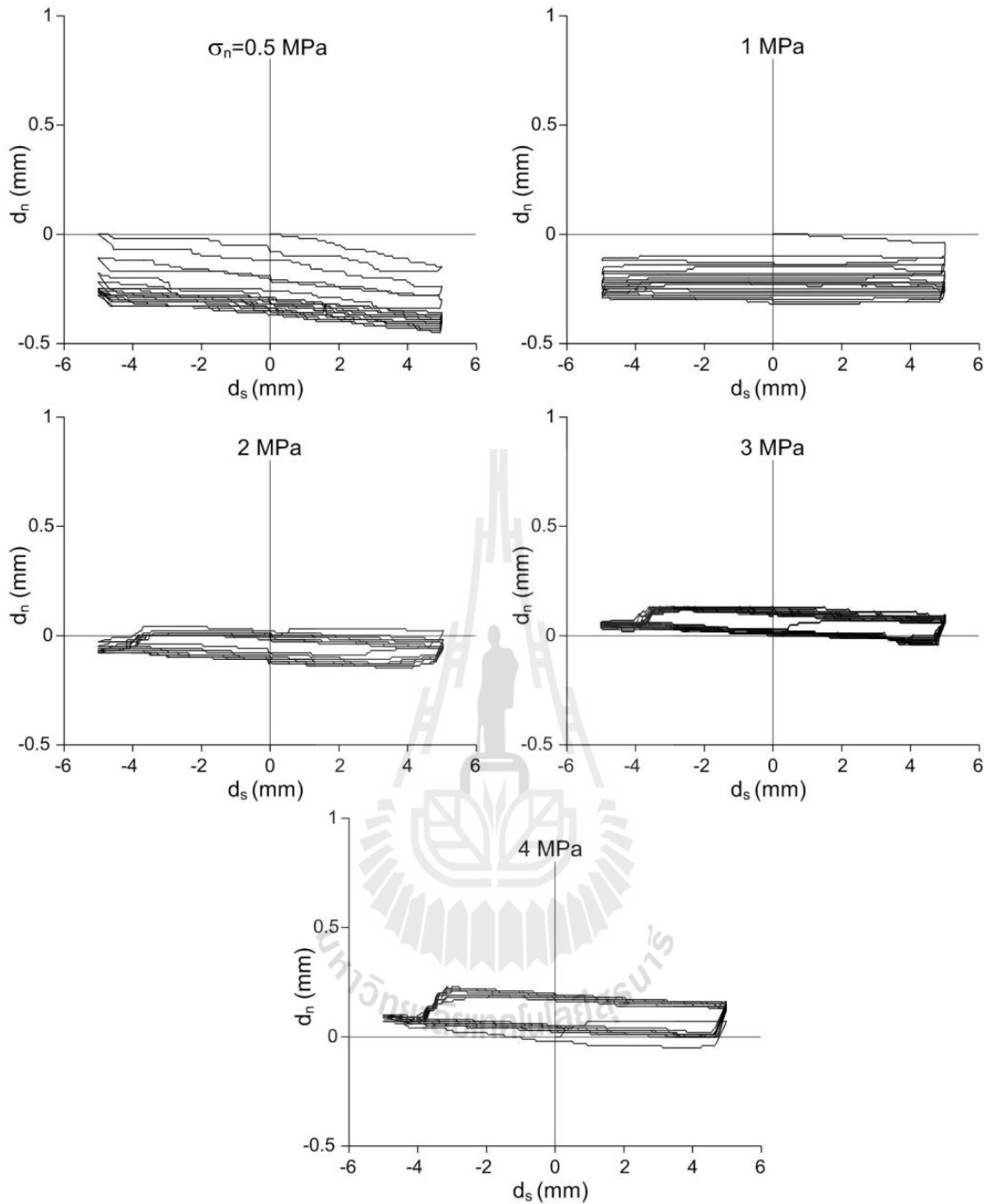
4.4.2 ระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากและแนวเฉือน

จากการทดสอบกำลังเฉือนแบบวัฏจักรบนตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ พบว่าการเคลื่อนตัวไม่มีมุมการยกตัวเหมือนกับการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกแบบผิวขรุขระ กล่าวคือ การเคลื่อนตัวของรอยแตกเป็นไปอย่างราบเรียบโดยเฉพาะการทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการวิจัยของ Lee et al. (2001) ซึ่งได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างหินแกรนิต Hwangdeung และหินอ่อน Yeosan ด้วยการให้แรงเฉือน 15 วัฏจักร

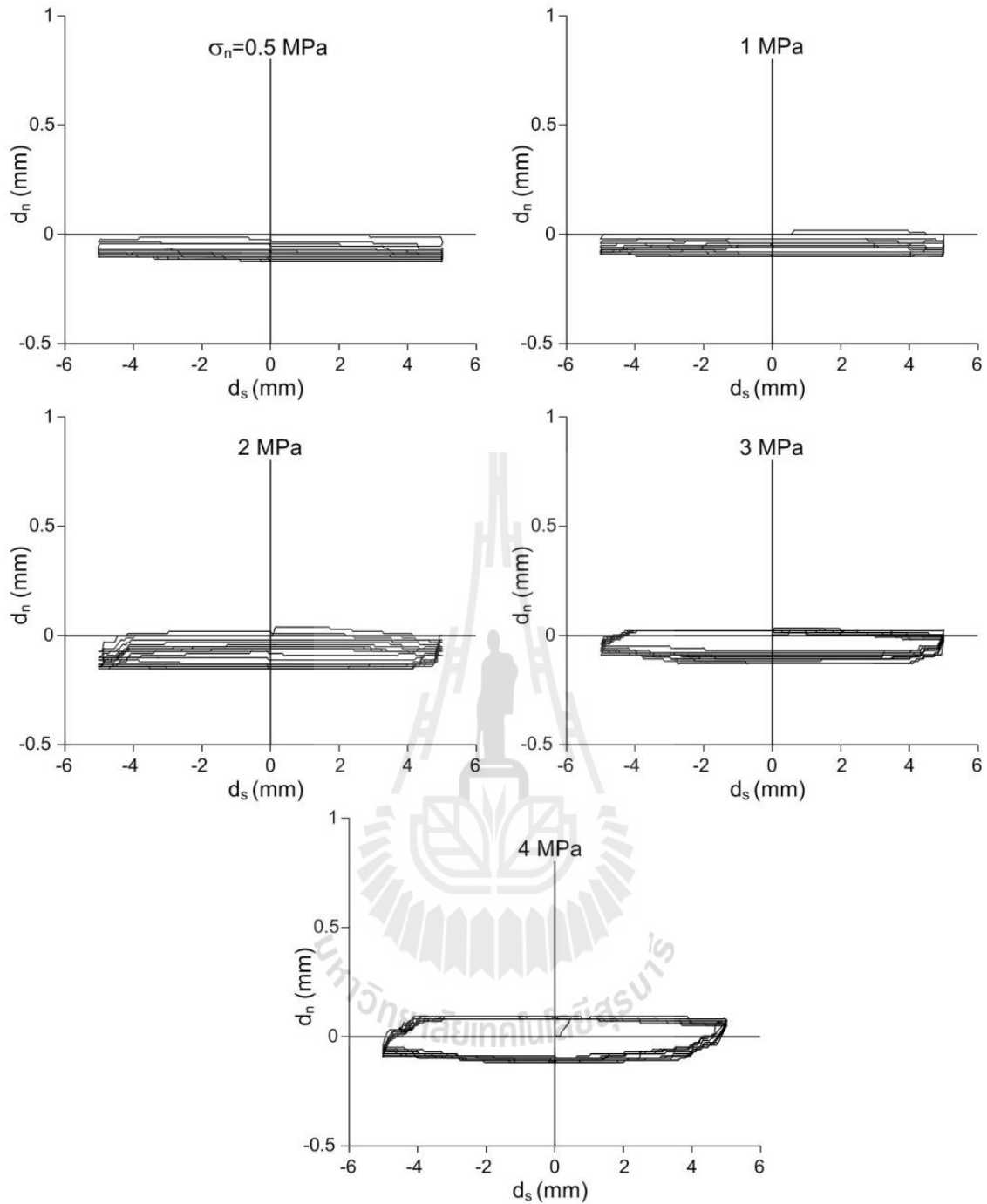
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับรอยแตกแบบผิวขรุขระแล้วพบว่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตกลดลงอย่างต่อเนื่องตามวัฏจักรการให้แรงเฉือน ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนลดลงด้วย และผิวความขรุขระจะถูกทำลายอย่างรุนแรงเมื่อทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าสูง นอกจากนี้ผลการวิจัยของ Lee ยังระบุอีกว่าการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกแบบผิวเรียบของหินทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตก (d_n) และระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับรอยแตก (d_s) ของตัวอย่างหินปูนชุดสระบุรีที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

5.1 วัตถุประสงค์

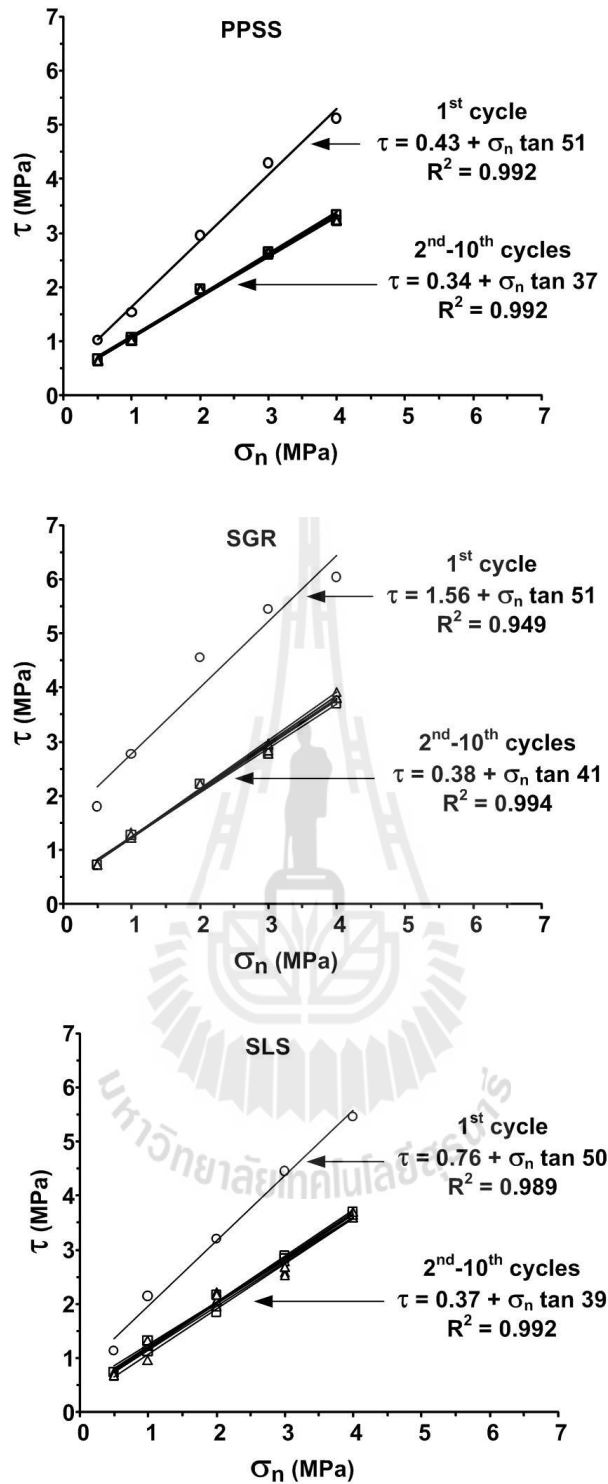
เนื้อหาในบทนี้อธิบายความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน (มุมเสียดทานและความเค้นยึดติด) และการเคลื่อนตัวของรอยแตกในหินทั้ง 3 ชนิด จากการให้แรงเฉือน 10 วัฏจักร ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa

5.2 กำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหิน

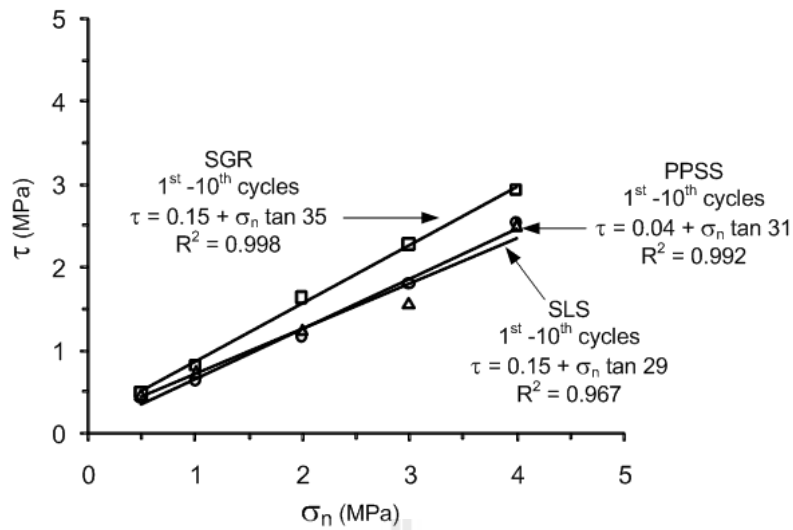
เมื่อนำค่าความเค้นในแนวเฉือนมาสัมพันธ์กับความเค้นกดในแนวตั้งฉาก (รูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2) จะเห็นได้ว่ากฎของคูลอมบ์มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ การเคลื่อนตัวของรอยแตกในหินในสองมิติสามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างง่ายในขั้นตอนนี้โดยสมมติว่ากฎเกณฑ์ของการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Jaeger et al., 2007) กล่าวคือ

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (5.1)$$

โดยที่ τ คือความเค้นเฉือน c คือค่าความเค้นยึดติดของหิน σ_n คือค่าความเค้นตั้งฉาก และ ϕ คือมุมเสียดทานของรอยแตก โดยค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานของรอยแตกทั้งแบบผิวเรียบและผิวขรุขระของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 จากผลที่ได้สามารถนำค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานของรอยแตกทั้งแบบผิวเรียบและผิวขรุขระมาวิเคราะห์ตามรอบของวัฏจักรการให้แรง รูปที่ 5.3 แสดงค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหินแบบผิวขรุขระซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหิน โดยในวัฏจักรแรกค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหินมีค่าสูงและลดลงอย่างรวดเร็วในวัฏจักรถัดไป และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตั้งแต่วัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกันทั้งหมดจากหินทั้ง 3 ชนิด รูปที่ 5.4 แสดงค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหินแบบผิวเรียบ จากรูปแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไม่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหิน โดยมีค่าเท่ากันตั้งแต่วัฏจักรที่ 1 ถึงวัฏจักรที่ 10



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกแบบผิวขรุขระ



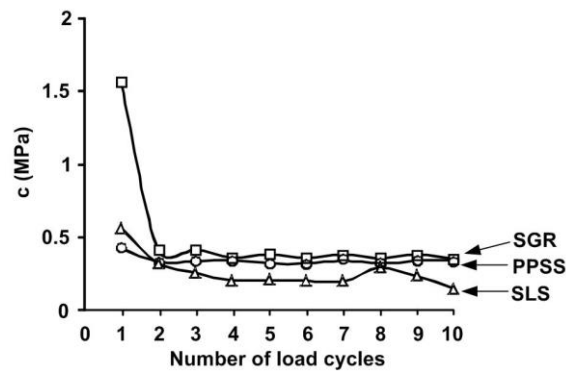
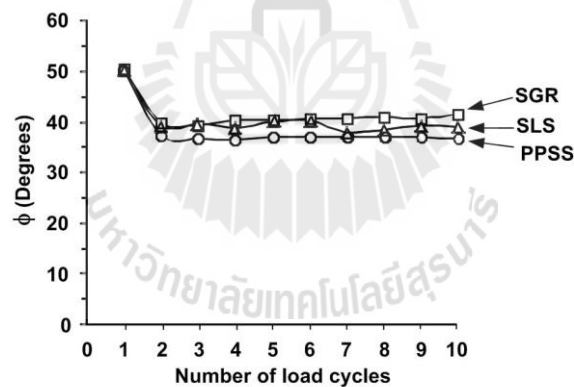
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกแบบเรียบ

ตารางที่ 5.1 สรุปค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระ

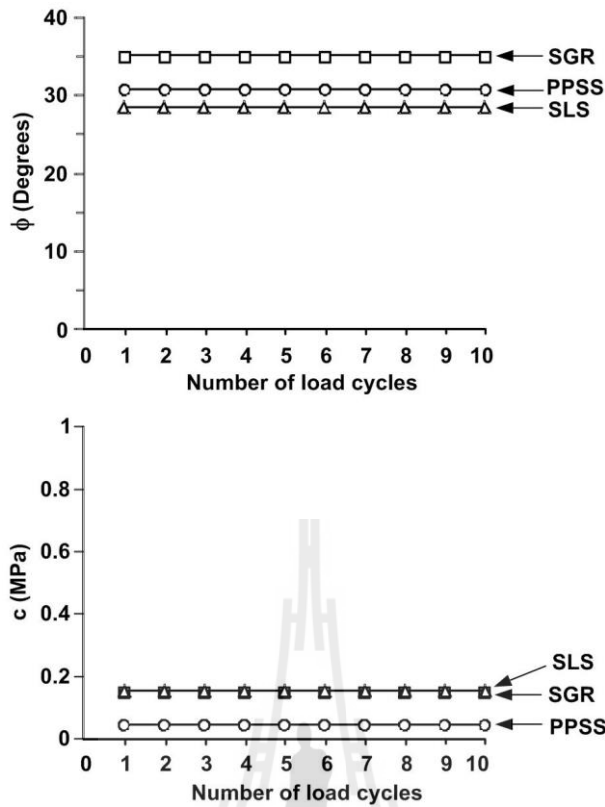
Cycle No.	Phu-Phan Sandstone		Saraburi Granite		Saraburi Limestone	
	ϕ (degrees)	c (MPa)	ϕ (degrees)	c (MPa)	ϕ (degrees)	c (MPa)
1	50.5	0.43	50.6	1.56	50.2	0.56
2	37.4	0.33	40.0	0.41	39.3	0.33
3	36.8	0.34	39.4	0.42	39.7	0.26
4	36.5	0.34	40.5	0.36	38.9	0.21
5	36.9	0.32	40.4	0.39	40.1	0.21
6	36.9	0.32	40.7	0.36	40.3	0.21
7	36.9	0.34	40.7	0.38	37.9	0.20
8	36.9	0.32	41.0	0.36	38.6	0.29
9	36.9	0.34	40.7	0.38	39.2	0.24
10	36.7	0.35	41.7	0.35	39.1	0.15

ตารางที่ 5.2 สรุปค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบ

Cycle No.	Phu-Phan Sandstone		Saraburi Granite		Saraburi Limestone	
	ϕ (degrees)	c (MPa)	ϕ (degrees)	c (MPa)	ϕ (degrees)	c (MPa)
1	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
2	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
3	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
4	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
5	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
6	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
7	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
8	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
9	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15
10	30.8	0.04	35.1	0.15	28.6	0.15



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และความเค้นยึดติดของตัวอย่างหิน (c) กับวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระ



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน (ϕ) และความเค้นยึดติดของตัวอย่างหิน (c) กับวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวเรียบ

จากการศึกษาผลกระทบแรงเฉือนแบบวัฏจักรต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหิน สามารถสรุปได้ว่า การให้แรงเฉือนในวัฏจักรแรกจะไปทำลายผิวความขรุขระของรอยแตกในหิน อย่างรุนแรงทำให้ผิวความขรุขระของรอยแตกลดลง เมื่อผิวความขรุขระของรอยแตกลดลง ตัวอย่างหินจึงสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องใช้แรงเฉือนมากเท่ากับวัฏจักรแรก จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ลดลงเมื่อเทียบกับวัฏจักรแรก แต่การให้แรงแบบวัฏจักรไม่ส่งผลต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแบบผิวเรียบ เนื่องจากรอยแตกมีผิวเรียบตั้งแต่เริ่มต้น ส่งผลให้แรงเฉือนคงที่ทั้ง 10 วัฏจักร และเมื่ออาศัยกฎของคูลอมบ์เพื่ออธิบายค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหิน ระบุได้ว่าค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดได้รับอิทธิพลจากระดับผิวความขรุขระของรอยแตกในหิน เช่นเดียวกัน เมื่อผิวความขรุขระถูกทำลายจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรแรกจึงส่งผลให้ค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหินลดลงเช่นเดียวกัน

5.3 ค่าการกระดกระหว่างการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน

การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของรอยแตกแบบผิวขรุขระในระหว่างการให้แรงเฉือนได้อาศัยระยะการเคลื่อนตัวของรอยแตกหินทั้งในแนวเฉือนและแนวตั้งฉากเพื่ออธิบายค่าการกระดก (d_n/d_s) ของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับวัฏจักรการให้แรงเฉือนสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$d_n/d_s = \alpha \cdot n^\beta \quad (5.2)$$

โดยที่ n คือจำนวนรอบของวัฏจักรการให้แรง α และ β คือตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าค่าการกระดกของตัวอย่างหินลดลงอย่างมากจากวัฏจักรแรก และค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวัฏจักรสุดท้าย (รูปที่ 5.5) โดยผลสอดคล้องกันกับหินที่มีรอยแตกแบบผิวขรุขระทั้ง 3 ชนิด

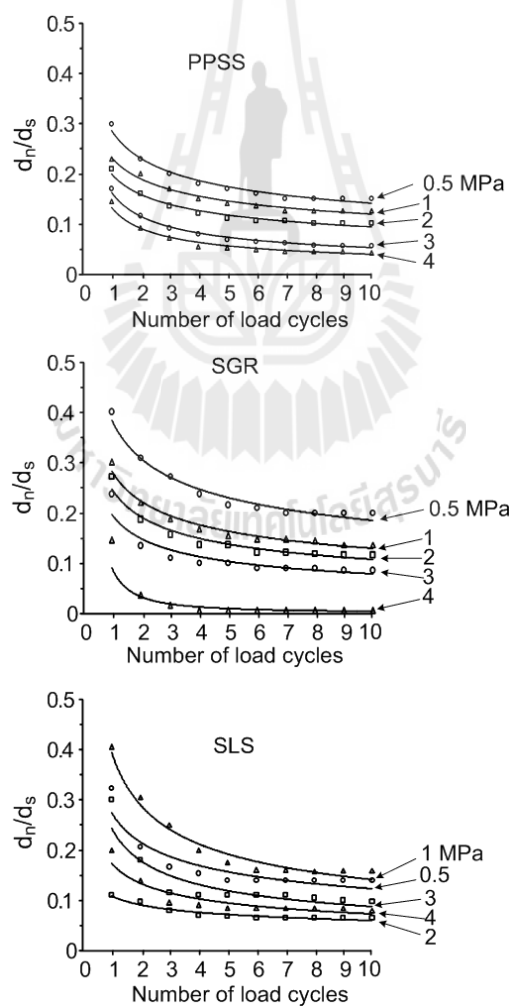
จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรกับรอยแตกในตัวอย่างหินภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่ ผิวความขรุขระของรอยแตกลดลงอย่างต่อเนื่องโดยสังเกตได้จากค่า d_n/d_s ของรอยแตกในตัวอย่างหินที่ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วัฏจักรแรก และคงที่ในวัฏจักรที่ 6 ถึงวัฏจักรที่ 10 จากค่าการกระดกที่ลดลงตามวัฏจักรการให้แรงจึงทำให้รอยแตกของตัวอย่างหินเลื่อนตัวจากการเฉือนได้ง่ายขึ้นกว่าวัฏจักรแรก และยังสามารถสรุปได้ว่าการให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไม่ส่งผลกระทบต่อรอยแตกแบบผิวเรียบดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับมวลหินจะต้องพิจารณาถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวหรือแรงจากการระเบิดเหมืองต่างๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อรอยแตกที่อยู่ในมวลหินของบริเวณนั้นๆ ด้วย

5.4 ค่าความแข็งเฉือนและค่าการยุบตัวของรอยแตกในหิน

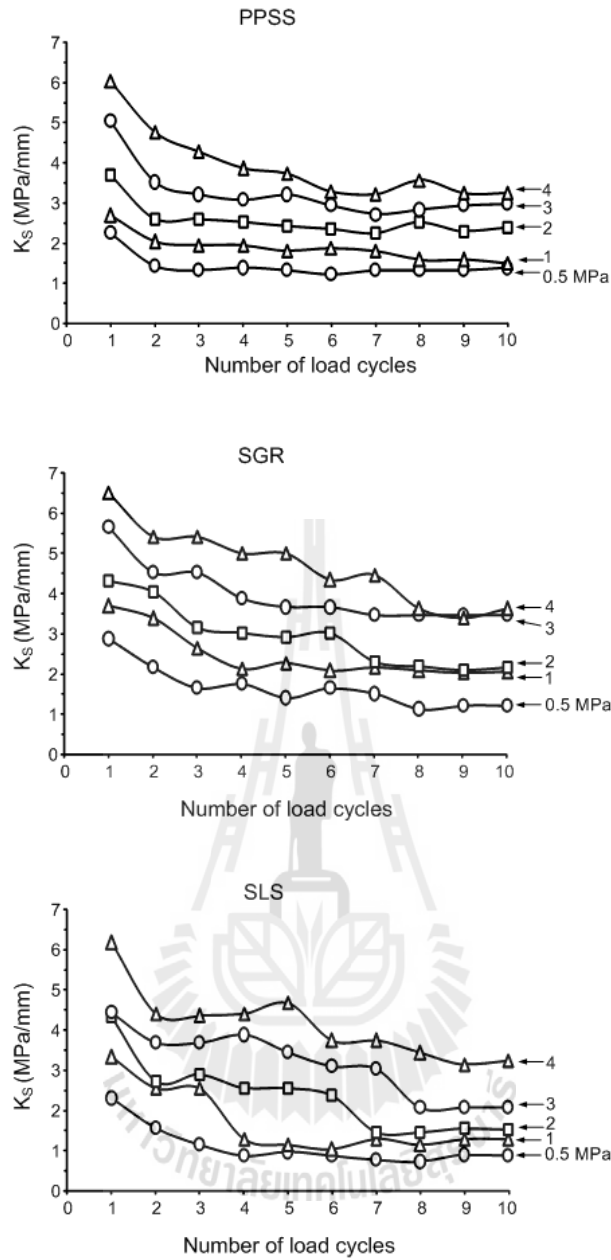
การลดลงของค่าการกระดกในรอยแตกของหินที่ส่งผลกระทบต่อกำลังเฉือนสามารถแสดงได้ในรูปแบบของค่าความแข็งเฉือน (K_s) ดังรูปที่ 5.6 โดยค่า K_s คำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่างความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนจากรูปแสดงค่า K_s ที่ลดลงเมื่อวัฏจักรการให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น และค่า K_s เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นตั้งฉาก รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของรอยแตกในหิน (K_n) กับความเค้นตั้งฉาก จากรูปแสดงให้เห็นว่ารอยแตกของหินแต่ละชนิดมีค่า K_n เพิ่มขึ้นแบบ Exponential เมื่อค่าความเค้นตั้งฉากเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการให้แรงเฉือนแบบ
 วัฏจักรต่อค่าการกระดกของรอยแตกในตัวอย่างหิน

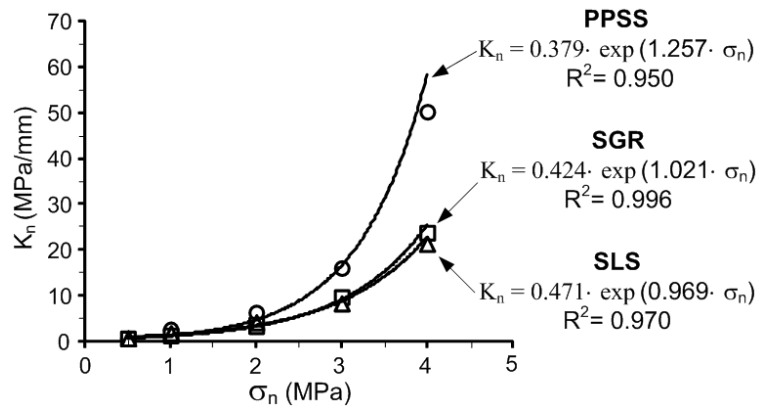
σ_n	$d_n/d_s = \alpha \cdot n^\beta$								
	Phu-Phan Sandstone			Saraburi Granite			Saraburi Limestone		
	α	β	R^2	α	β	R^2	α	β	R^2
0.5	0.287	-0.31	0.974	0.383	-0.31	0.961	0.273	-0.34	0.858
1	0.232	-0.29	0.972	0.281	-0.34	0.969	0.394	-0.44	0.953
2	0.199	-0.33	0.966	0.246	-0.36	0.945	0.107	-0.25	0.919
3	0.162	-0.51	0.986	0.195	-0.40	0.895	0.242	-0.43	0.837
4	0.131	-0.55	0.962	0.089	-1.49	0.870	0.172	-0.37	0.852



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระดกของตัวอย่างหิน (d_n/d_s) และวัฏจักรของการให้แรง
 เชือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉือน (K_s) และวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของรอยแตกในตัวอย่างหิน (K_n) และวัฏจักรของการให้แรงเฉือนของรอยแตกแบบผิวขรุขระของหินทั้ง 3 ชนิด

$$K_n = \omega \cdot \exp(k \cdot \sigma_n) \quad (5.3)$$

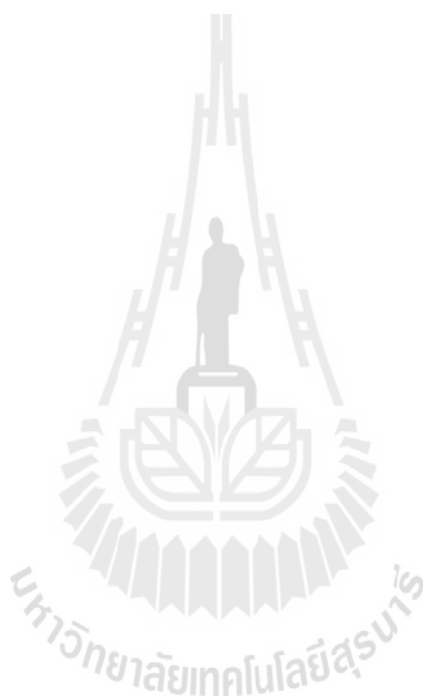
โดยที่ ω และ k คือตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.4 โดยหินทรายชุดภูพานมีค่า K_n มากที่สุดเนื่องจากมีเนื้อหินที่ค่อนข้างอ่อนเมื่อเทียบกับหินปูนชุดสระบุรีและหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีเนื้อหินค่อนข้างแข็ง ส่งผลให้มีค่า K_n ต่ำกว่า

5.5 ผลกระทบของลักษณะผิวความขรุขระของรอยแตกในหิน

เมื่อนำค่า JRC มาวิเคราะห์กับค่าความเค้นยึดติดในหินสามารถสรุปได้ว่า หินปูนชุดสระบุรีที่มีค่า JRC สูงที่สุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20 แต่มีค่าความเค้นยึดติดที่ต่ำกว่าหินแกรนิตชุดสระบุรีที่มีค่า JRC เฉลี่ยเท่ากับ 11 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวความขรุขระของหินแกรนิตมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและผลึกแข็งจึงส่งผลให้ผิวรอยแตกยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งต่างจากหินปูนที่มีพื้นผิวความขรุขระเป็นลักษณะเนื้อละเอียดแน่นและผิวค่อนข้างราบเรียบมีความยึดติดของพื้นผิวรอยแตกลดลง จึงสามารถเลื่อนได้ง่ายกว่า ในทำนองเดียวกันสำหรับหินทรายชุดภูพานที่มีค่า JRC เท่ากับ 8 และมีค่าความเค้นยึดติดต่ำที่สุด เนื่องจากลักษณะผิวความขรุขระมีเนื้ออ่อนและมีเม็ดที่เล็กละเอียด ส่งผลให้ถูกทำลายจากแรงเฉือนได้ง่ายกว่าหินแกรนิตชุดสระบุรี

ตารางที่ 5.4 ตัวแปรที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการการยุบตัวของรอยแตกในหิน

Rock type	ω	κ
Phu-Phan Sandstone	0.379	1.257
Saraburi Granite	0.424	1.021
Saraburi Limestone	0.471	0.969



บทที่ 6

การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

6.1 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองความลาดชันของมวลหินตามแนวถนนจากโครงสร้างที่มีอยู่จริงด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพความลาดชันของมวลหินด้วยการใช้ค่ามุมเสียดทานของรอยแตกและค่าความเค้นยึดติดของหินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในวัฏจักรที่แตกต่างกัน โดยในบทนี้ได้อธิบายตัวแปรและรูปแบบของหินที่ใช้ในการจำลอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากการให้แรงในวัฏจักรที่ 1 กับตัวแปรที่ได้จากการให้แรงในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10

6.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง

การศึกษาเสถียรภาพความลาดชันของมวลหินตามแนวถนน โดยทำการจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ UDEC–Universal distinct element code, V4.0 (Itasca, 2004) ภายใต้สมมติฐานให้หินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ (Perfectly linear elastic) มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) โดยทำการจำลองความเครียดในสองแกน (Plane strain) ด้วยหินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี ซึ่งแสดงค่าคุณสมบัติไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตัวแปรพื้นฐานทางกลศาสตร์ของหินทั้ง 3 ชนิด

Cycle No.	ϕ (degrees)		c (MPa)		density (kg/m^3)
	Cycle No.1	Average Cycle No. 2–10	Cycle No.1	Average Cycle No. 2–10	
PPSS	51	37	0.43	0.32	2300
SGR	51	41	1.56	0.38	2650
SLS	50	39	0.76	0.37	2750

6.3 รูปแบบโครงสร้างความลาดชันของมวลหิน

การศึกษาเสถียรภาพความลาดชันของมวลหินด้วยการจำลองโดยอ้างอิงจากโครงสร้างสถานที่จริง 3 แห่ง จากข้อมูลการศึกษาของ กิตติเทพ เพ็ญชจร (2546) คือ 1) บริเวณข้างทางหลวงสาย 2256 จังหวัดลพบุรี หรือที่ 47 P 0759028 และ UTM 1670703 ดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วยชั้นหินทรายสลับกับชั้นหินดินดานความลาดเอียงมวลหินสูงประมาณ 50 m ยาวประมาณ 70 m โดยทิศทางการวางตัวของชั้นหินเฉลี่ยคือ 080 องศา มีมุมเทความลาดชันเท่ากับ 60 องศา และมีชุดรอยแตกตัดกัน 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 มีมุมเท 80 องศา ชุดที่ 2 มีมุมเท 25 องศา 2) บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 136 บนทางหลวงสายมิตรภาพ เขตอำเภอเมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี หรือที่ 47 P 0731404 และ UTM 1619159 ดังรูปที่ 6.2 ประกอบด้วยมวลหินปูนที่มีความลาดเอียงสูงประมาณ 15 m ยาวประมาณ 40 m ทิศทางการวางตัวของชั้นหินเฉลี่ยคือ 095 องศา มีมุมเทความลาดชันเท่ากับ 80 องศา และมีชุดรอยแตกตัดกัน 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 มีมุมเท 22 องศา ชุดที่ 2 มีมุมเท 89 องศา และ 3) บริเวณเหมืองหินปูนใกล้กับวัดเขาชีจรรย์ จังหวัดชลบุรี หรือที่ 47 P 0713246 และ UTM 1409209 ดังรูปที่ 6.3 ประกอบด้วยมวลหินปูนที่มีความลาดเอียงสูงประมาณ 60 m ยาวประมาณ 40 m ทิศทางการวางตัวของชั้นหินเฉลี่ยคือ 030 องศา มีมุมเทความลาดชันเท่ากับ 60-70 องศา และมีชุดรอยแตกตัดกัน 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 มีมุมเท 45 องศา ชุดที่ 2 มีมุมเท 61 องศา โดยนำโครงสร้างชั้นหินจากทั้ง 3 แห่งมาคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้คุณสมบัติของหินที่ได้จากการทดสอบตามลำดับดังนี้ หินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี

6.4 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพความลาดชันของมวลหิน การจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือจำลองโดยใช้ผลจากการทดสอบการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1 และจำลองโดยใช้ผลจากการทดสอบการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10

รูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.6 แสดงผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ผลจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1 ผลการคำนวณระบุว่าความลาดชันของมวลหินมีสัดส่วนความปลอดภัยดังนี้ หินทรายชุดภูพานเท่ากับ 4.38 หินแกรนิตชุดสระบุรีเท่ากับ 18.59 และหินปูนชุดสระบุรีเท่ากับ 4.29 และเมื่อจำลองโดยใช้ผลจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ซึ่งความลาดชันของมวลหินมีสัดส่วนความปลอดภัยดังนี้ หินทรายชุดภูพานเท่ากับ 3.06 หินแกรนิตชุดสระบุรีเท่ากับ 5.96 และหินปูนชุดสระบุรีเท่ากับ 2.26 ดังรูปที่ 6.7 ถึงรูปที่ 6.9 จากผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่า ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของหินทั้ง 3 ชนิด ลดลงเมื่อใช้ตัวแปรจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10



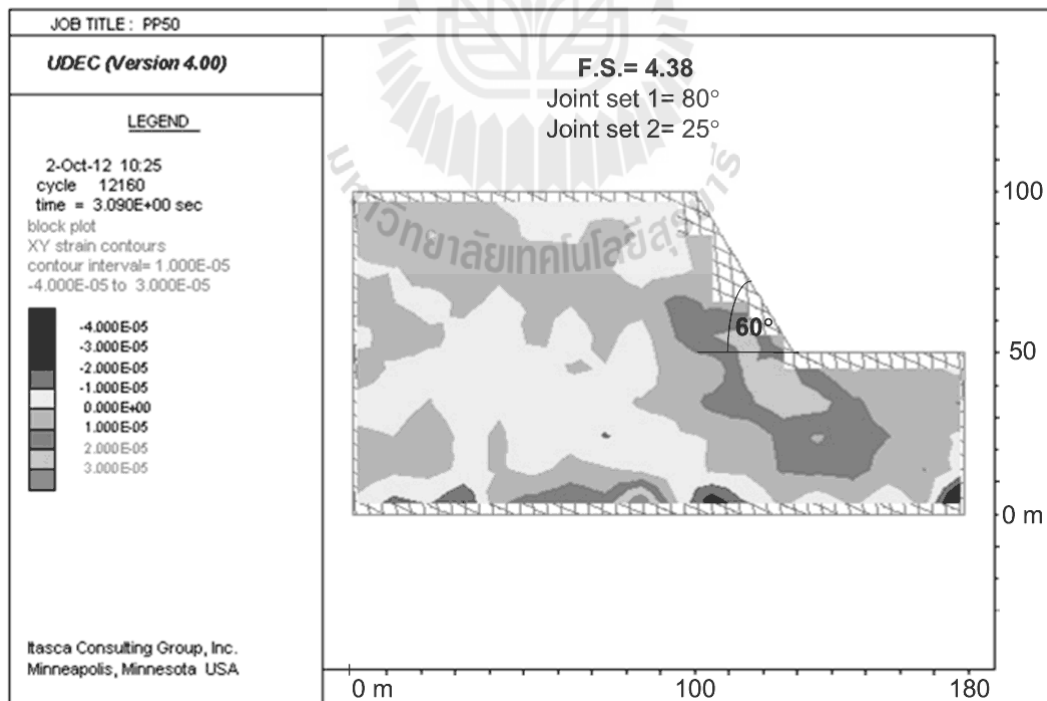
รูปที่ 6.1 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณทางหลวงหมายเลข 2256 จังหวัด ลพบุรี (กิตติเทพ
เฟื่องขจร, 2546)



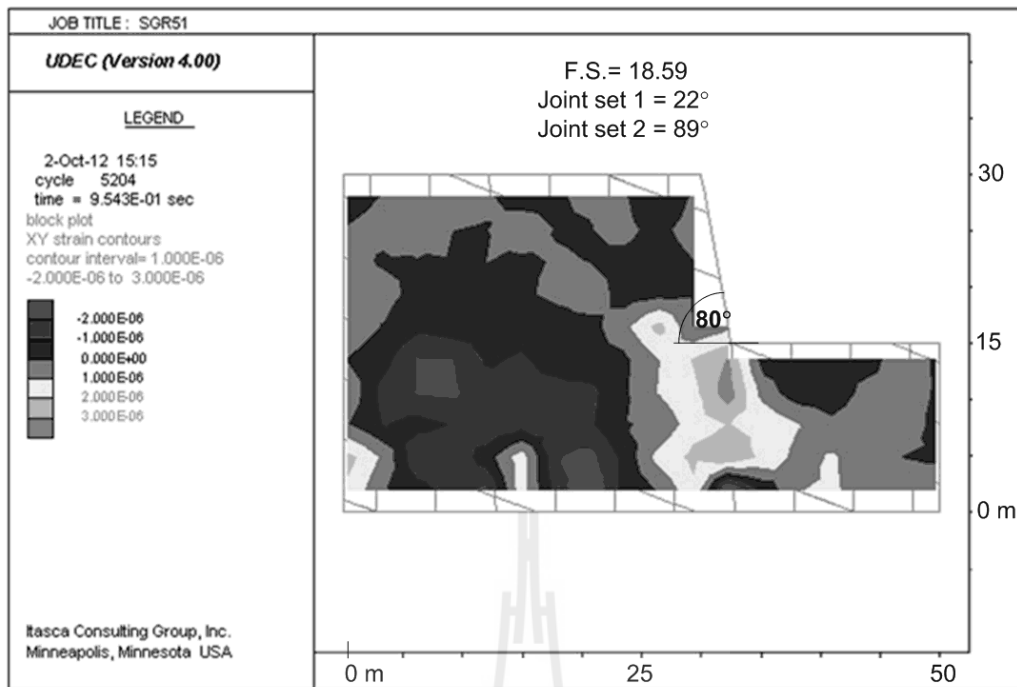
รูปที่ 6.2 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณหลักกิโลเมตรที่ 136 บนทางหลวงสายมิตรภาพ
เขตอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)



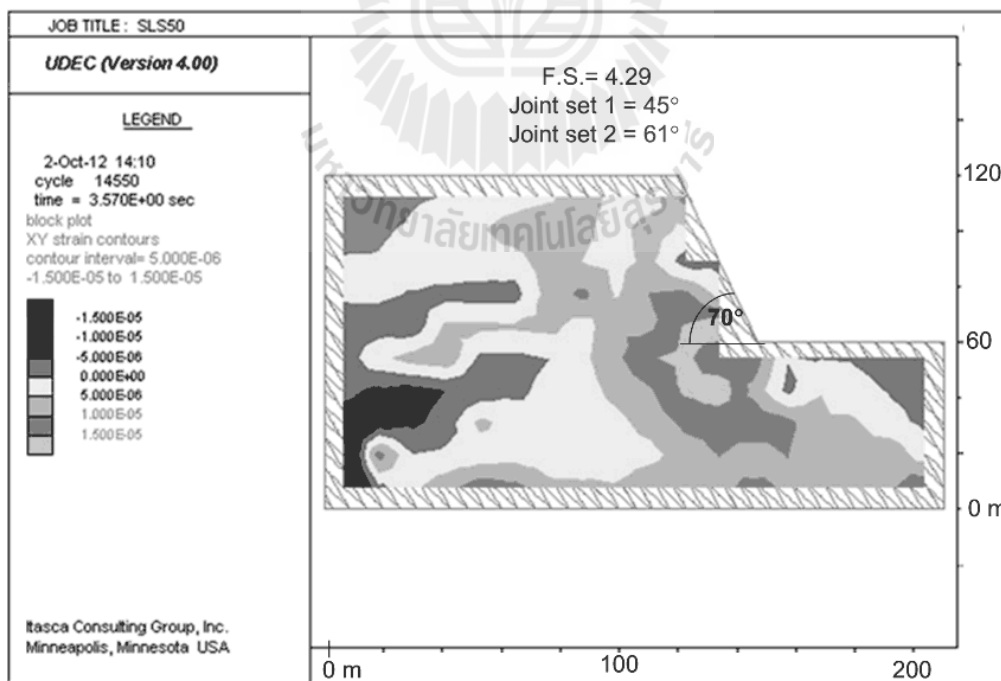
รูปที่ 6.3 ความลาดเอียงของมวลหินบริเวณเหมืองหินปูนใกล้กับวัดเขาชีจรรย์ จังหวัดชลบุรี (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)



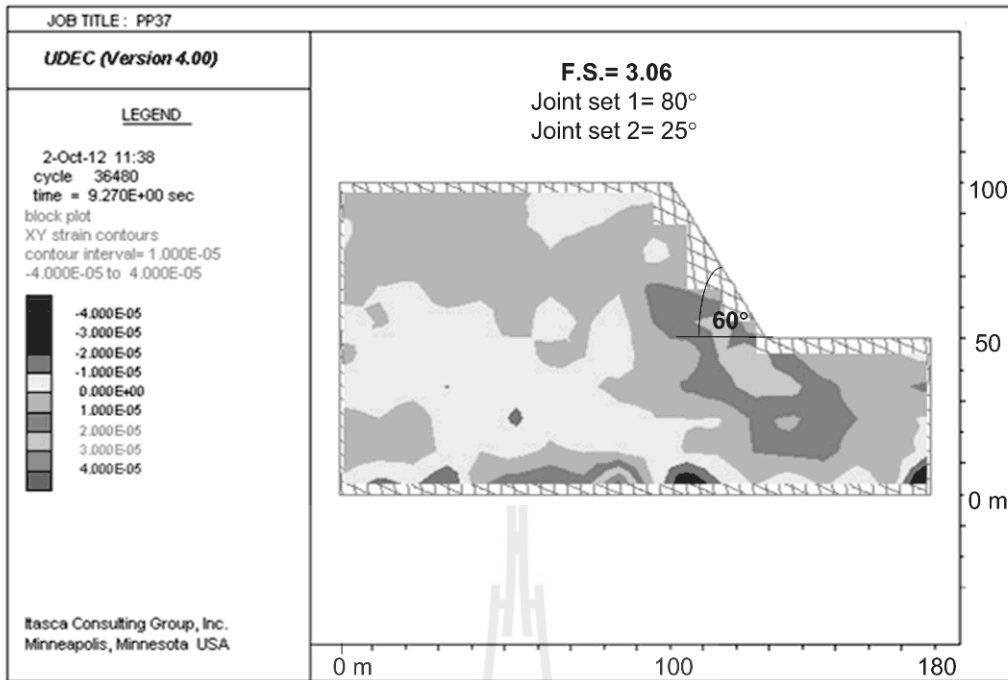
รูปที่ 6.4 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินทรายชุดภูพานจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1



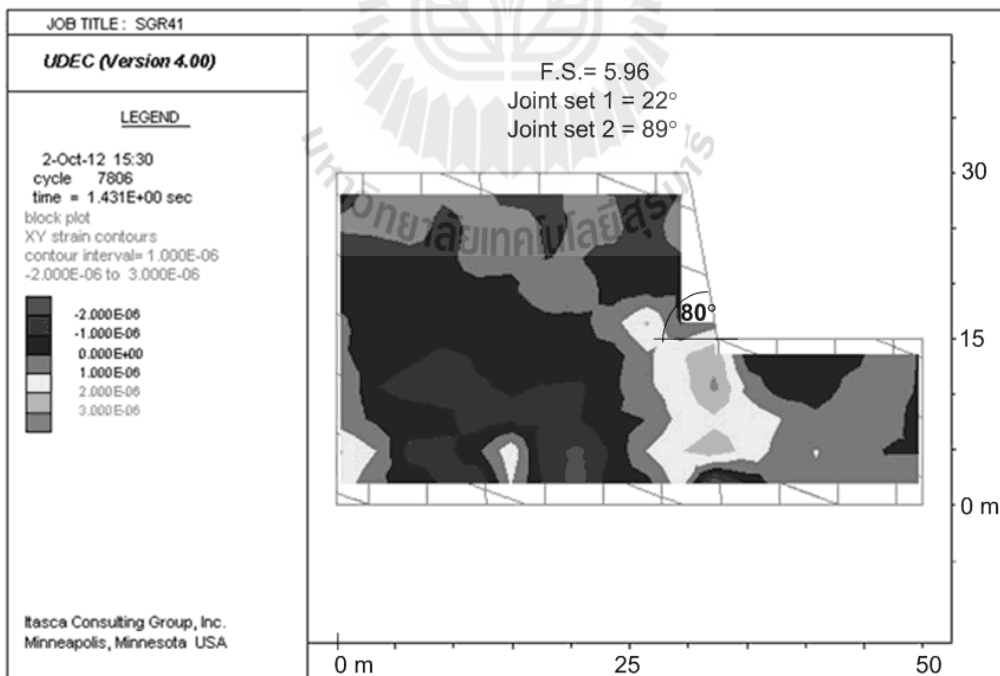
รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินแกรนิตชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1



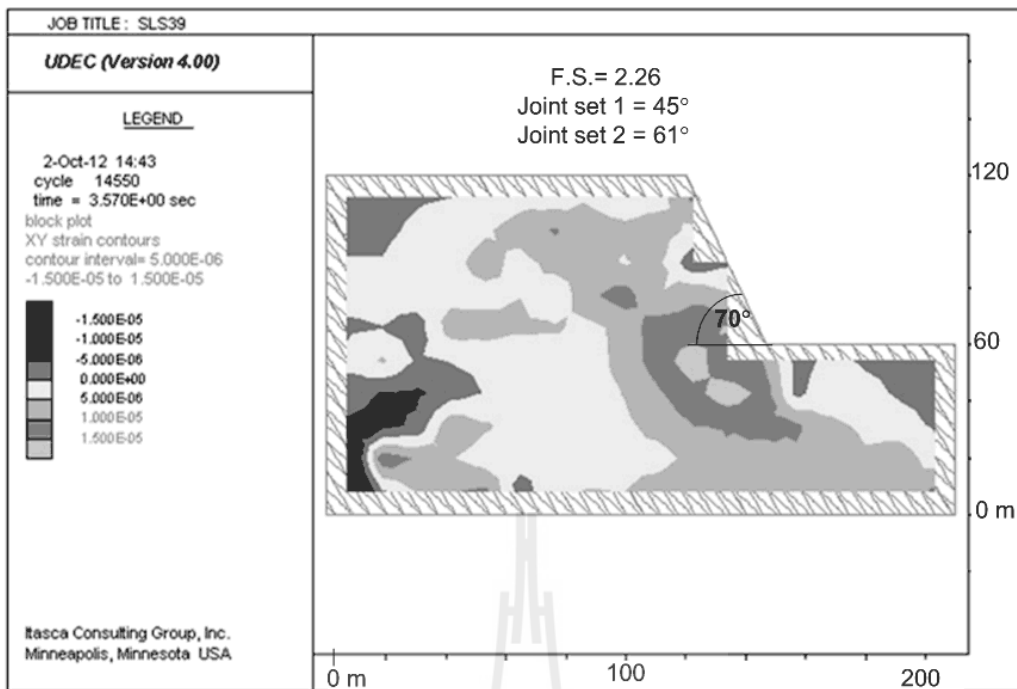
รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินปูนชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 1



รูปที่ 6.7 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินทรายชุดภูพานจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10



รูปที่ 6.8 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินแกรนิตชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10



รูปที่ 6.9 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบหินปูนชุดสระบุรีจากการให้แรงเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10

6.5 สรุปและเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สรุปได้ว่า เมื่อกำหนดให้ค่าความเค้นยึดติดของหินและมุมเสียดทานของรอยแตกมีค่าเท่ากับผลการทดสอบในวัฏจักรที่ 1 ความลาดชันของมวลหินจะมีเสถียรภาพดี โดยมีสัดส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับเสถียรภาพที่ใช้ค่าความเค้นยึดติดของหินและมุมเสียดทานของรอยแตกจากผลการทดสอบในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ซึ่งผลสอดคล้องกันกับหินทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าสัดส่วนความปลอดภัยของหินแกรนิตชุดสระบุรีมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากมีค่าความเค้นยึดติดของหินสูงกว่าหินทรายชุดภูพานและหินปูนชุดสระบุรี ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างที่อ้างอิงผลจากการให้แรงในวัฏจักรที่ 1 ค่าสัดส่วนความปลอดภัยจะสูงกว่าความเป็นจริงหากไม่พิจารณาถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว การจลาจล หรือแรงระเบิดจากการทำเหมืองต่างๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับมวลหินจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบเหล่านี้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกในหินภายใต้แรงเฉือนแบบวัฏจักร เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาตามกฎของคูลอมป์ภายใต้การผันแปรความเค้นตั้งฉาก ซึ่งรอยแตกของตัวอย่างหินทั้งแบบผิวเรียบและผิวขรุขระมีพื้นที่เท่ากับ 8×10 ตารางเซนติเมตร ถูกจัดเตรียมจากหินขนาด $10 \times 10 \times 16$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จากหินทรายชุดภูพาน หินแกรนิตชุดสระบุรี และหินปูนชุดสระบุรี เพื่อใช้ทดสอบกำลังเฉือนด้วยการให้แรงเฉือน 10 วัฏจักร โดยอาศัยเครื่องทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง (Direct shear device, SBEL DR44) ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa ซึ่งผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของมวลหิน

ผลที่ได้จากการทดสอบระบุว่า การให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรมีผลโดยตรงต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหินแบบผิวขรุขระ กล่าวคือ มีผลให้ค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินลดลง ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการให้แรงเฉือนในวัฏจักรแรกจะไปทำลายผิวความขรุขระของรอยแตกในตัวอย่างหินอย่างรุนแรงทำให้ผิวความขรุขระของรอยแตกลดลงอย่างต่อเนื่องตามวัฏจักรการให้แรงเฉือน เมื่อผิวความขรุขระของรอยแตกลดลง ตัวอย่างหินจึงสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องใช้แรงเฉือนมากเท่ากับวัฏจักรแรก จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่ากำลังเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ลดลงเมื่อเทียบกับวัฏจักรแรก แต่การให้แรงเฉือนแบบวัฏจักรไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแบบผิวเรียบ เนื่องจากรอยแตกมีผิวเรียบตั้งแต่เริ่มต้น ส่งผลให้แรงเฉือนคงที่ทั้ง 10 วัฏจักร ภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่ นอกจากนี้ค่ากำลังเฉือนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับความเค้นตั้งฉากเพิ่มขึ้นด้วย กล่าวคือ รอยแตกในหินที่อยู่ระดับลึกจะเคลื่อนตัวได้ยากกว่ารอยแตกที่อยู่ระดับตื้น และผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถระบุได้ว่าเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบกำลังเฉือนในวัฏจักรที่ 2 ถึงวัฏจักรที่ 10 ซึ่งมีค่าความเค้นยึดติดของหินและมุมเสียดทานของรอยแตกลดลงมาใช้ในแบบจำลอง ส่งผลให้ความลาดชันของมวลหินมีเสถียรภาพลดลงจากการคำนวณด้วยสัดส่วนความปลอดภัย ดังนั้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับมวลหินจะต้องพิจารณาถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว การจราจร หรือแรงระเบิดจากการทำเหมือง เพื่อให้การออกแบบอยู่ในเชิงอนุรักษ์

สำหรับการวิจัยในอนาคตควรมีการแปรผันอัตราการให้แรงเฉือน เพิ่มระยะเวลาเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน เพิ่มจำนวนรอบของวัฏจักรการให้แรง หรือการทดสอบในรูปแบบอื่น เช่น การทดสอบในสภาวะที่หินอยู่ใต้น้ำ เพื่อจำลองหินที่อยู่บริเวณที่ชุ่มน้ำ หรืออยู่ในบริเวณที่ฝนตกอยู่เป็นประจำ ซึ่งจะทำให้ครอบคลุมพื้นที่ของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่เสี่ยงต่อการพังทลายมากขึ้น

บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2546). การพัฒนาคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และ
ออกแบบความลาดชันของชั้นหิน โดยใช้กรณีศึกษาความรู้และประสบการณ์จาก
ผู้เชี่ยวชาญ, รายงานวิจัย รหัสโครงการ SUT7-719-45-24-04 มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา,ทุนสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ, 280 หน้า.
- Ahola, M.P., Hsiung, S.M., Kana, D.D. (1996). Experimental study on dynamic behavior of
rock joints. In: Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.F. (editors). *Couple Thermo-
Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media*. Amsterdam, Elsevier: 467-494.
- ASTM Standard D5607-08. (2008). Standard test method for performing laboratory direct
shear strength tests of rock specimens under constant normal force. In: *Annual
Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, West
Conshohocken, P.A.
- Divoux, P., Boulon, M., and Bourdarot, E. (1997). A mechanical constitutive model for rock
and concrete joints under cyclic loading. Rossmanith, H.P. (editors). In *Proceedings
of Damage and Failure of Interfaces*, 443-450.
- Fox, D.J., Kana, D.D., and Hsiung, S.M. (1998). Influence roughness on dynamic shear
behavior in jointed rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*
35: 923-940.
- Grasselli, G., and Egger, P. (2003). Constitutive law for the shear strength of rock joints
based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock
Mechanics & Mining Sciences* 40: 25-40.
- Homand, E.F., Lefevre, F., Belem, T., and Souley, M. (1999). Rock joints behavior under
cyclic direct shear tests. In: Amadei, B., Kranz, R.L., Scott, G.A., Smeallie, P.
(editors). *Rock Mechanics for Industry*. Rotterdam, Balkema: 399-406.
- Hosseini, K. A., Pellet, F., Jafari, M. K., and Boulon, M. (2004). Shear strength reduction of
rock joints due to cyclic loading. In *Proceedings of the 13th World Conference on
Earthquake Engineering* (Paper No. 3070). Vancouver, B.C., Canada, 8 pp.
- Hutson, R.W., and Dowding, C.H. (1990). Joint asperity degradation during cyclic shear.
*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics
Abstracts* 27(2): 109-119.

- Itasca (2004). *UDEC 4.0 GUI A Graphical User Interface for UDEC*. Itasca Consulting Group Inc, Minneapolis, Minnesot, 208 p.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanicals*, 4th edition, Australia: Blackwell Publishing, 475 p.
- Jafari, M. K., Pellet, F., Boulon, M., and Hosseini, K. A. (2004). Experimental study of mechanical behavior of rock joints under cyclic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37 (1): 3–23.
- Jafari, M.K., Amini, H. K., Boulon, M., Pellet, F., Jalaly, H., Uromeihy, A., and Buzzy, O. (2002). Laboratory investigation on shear strength variation of joint replicas due to low and high amplitude cyclic displacements. *JSEE: Summer and Fall* 4(2&3): 37–49.
- Jafari, M.K., Amini, H. K., Pellet, F., Boulon, M., and Buzzy, O. (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23: 619–630.
- Jing, L., Stephansson, O., and Nordlund, E. (1993). Study of rock joints under cyclic loading conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 26 (3): 215–232.
- Lee, H.S., Park, Y.J., Cho, T.F., and You, K.H. (2001). Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38: 967–980.
- Ma, M., and Brady, B.H. (1999). Analysis of the dynamic performance of an underground excavation in jointed rock under repeated seismic loading. *Geotechnical and Geological Engineering* 17: 1–20.
- Puntel, E., Bolzon, G., and Saouma, V. E. (2006). A fracture mechanics based model for joints under cyclic loading. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 132(11): 1151–1159.
- Zubelewicz, A., O'Connor, K., Dowding, C.H., Belytschko, T., and Plesha, M.E. (1987). A constitutive model for cyclic behavior of dilatant rock joints. In *Proceedings of the Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials*, vol. II, 1137–44.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์