

รหัสโครงการ SUT7-719-57-24-43



รายงานการวิจัย

การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินทราย
ภายใต้ความเค้นในสามแกนจริง

(Shear Strength of Fracture in Sandstone
Under True Triaxial Stresses)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-57-24-43



รายงานการวิจัย

การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินทราย
ภายใต้ความเค้นในสามแกนจริง
(Shear Strength of Fracture in Sandstone
Under True Triaxial Stresses)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และ 2558
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และ 2558 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2558

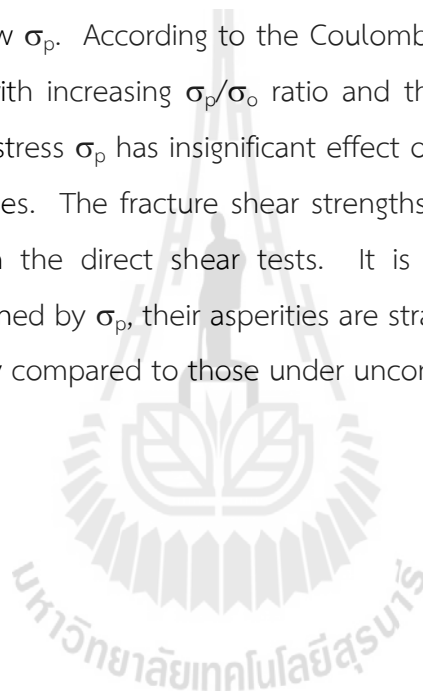


บทคัดย่อ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นในหินทรายสามชนิดของประเทศไทยด้วยโครงทดสอบแบบหลายแกนเพื่อให้ความเค้นล้อมรอบ (σ_p และ σ_o) ต่อตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีขนาด $76 \times 76 \times 126$ mm ระบายของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นทำมุมเอียง 59.1 องศา กับความเค้นหลักในแนวแกน โดยผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกสามารถลดกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกได้ ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเดียวกันรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าสูง พบว่ามีการขยายตัวของรอยแตกมีมากกว่าอยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าต่ำ จากเกณฑ์ของคูมบ์ค่าของมุมเสียดทานลดลงในเชิงเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o) และค่าความเค้นยึดติดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตก ค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_p) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานพื้นฐานของรอยแตกพื้นผิวเรียบ และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้ $\sigma_p = 0$ พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ดังนั้น อาจตั้งสมมติฐานได้ว่าเมื่อมีการให้แรงด้านข้างในทิศทางที่ขนานกับระนาบรอยแตก (σ_p) และเมื่อพื้นผิวของความขรุขระได้รับความเค้นดังกล่าวก็อาจเกิดความเครียดภายในพื้นผิวรอยแตกเป็นผลให้เกิดการเฉือนหรือการเลื่อนไหลได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ

Abstract

True triaxial shear tests have been performed to determine the peak shear strengths of tension-induced fractures in three Thai sandstones. A polyaxial load frame is used to apply mutually perpendicular lateral stresses (σ_p and σ_o) to the 76×76×126 mm rectangular block specimens. The normal of the fracture plane makes an angle of 59.1° with the axial (major principal) stress. Results indicate that the lateral stress that is parallel to the fracture plane (σ_p) can significantly reduce the peak shear strength of the fractures. Under the same normal stress (σ_n) the fractures under high σ_p dilate more than those under low σ_p . According to the Coulomb criterion, the friction angle decreases exponentially with increasing σ_p/σ_o ratio and the cohesion decreases with increasing σ_p . The lateral stress σ_p has insignificant effect on the basic friction angle of the smooth saw-cut surfaces. The fracture shear strengths under $\sigma_p=0$ correlate well with those obtained from the direct shear tests. It is postulated that when the fractures are laterally confined by σ_p , their asperities are strained into the aperture, and are sheared off more easily compared to those under unconfined condition.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การพัฒนาและสร้างทฤษฎีความสัมพันธ์จากการทดสอบ.....	7
2.2 ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน.....	8
2.3 การศึกษางานวิจัยที่มีการทดลองในลักษณะการให้แรงในรูปแบบ สามแกนจริง.....	9
2.4 การพัฒนาเครื่องมือการทดสอบ.....	11
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	15
3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง (ผิวขรุขระ).....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นขนาน กับรอยแตกคงที่ (ผิวเรียบ).....	21
3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (ผิวขรุขระ).....	27
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	29
4.1 วัตถุประสงค์.....	29
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	29
4.3 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง.....	31
4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินทรายก่อนการทดสอบ.....	32
4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินทรายในโครงทดสอบ.....	32
4.3.3 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว.....	33
4.4 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (ผิวขรุขระ).....	33
4.4.1 การเตรียมตัวอย่างหินทรายก่อนการทดสอบ.....	33
4.4.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินทรายในเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง.....	34
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	37
5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริง.....	37
5.1.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตก ผิวขรุขระ (กรณีที่ผันแปรอัตราส่วนของค่าความเค้นขนานกับ รอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตก).....	37
5.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวขรุขระ (กรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่).....	43
5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวเรียบ (กรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่).....	43
5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	49
6.1 การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเค้นตึงฉาก.....	49
6.2 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนาน กับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตกคงที่.....	49
6.3 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนานกับ รอยแตกคงที่.....	53
6.4 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนานกับ รอยแตกคงที่ (กรณีที่มีรอยแตกเรียบ).....	56
6.5 การคำนวณผลจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	56
 บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย.....	 59
 บรรณานุกรม.....	 61
 ประวัตินักวิจัย.....	 65



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบ กำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p เป็นสัดส่วนกับ σ_0 (ผิวขรุขระ).....	18
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบ กำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวเรียบ).....	22
3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบ กำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวเรียบ).....	25
3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบ กำลังเฉือนแบบโดยตรง.....	27
5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนในกรณีที่ผันแปรอัตราส่วน (σ_p/σ_0)	38
5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระกรณีที่มี σ_p คงที่.....	44

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ.....	3
2.1 การติดตั้งระบบการให้แรงแบบสามแกนจริงของ Rao and Tiwari (2008).....	12
2.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริงที่ Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนา.....	13
3.1 ตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดสอบ.....	16
3.2 ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบและลักษณะการให้แรงดึงแบบแนวเส้น.....	16
3.3 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากหินทรายบางส่วนที่สามารถประเมินค่าJRC อยู่ระหว่าง ช่วง 6-8.....	17
3.4 ตัวอย่างหินทรายแบบผิวเรียบบางส่วนสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้น ขนานกับรอยแตกคงที่.....	25
3.5 ตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงหลังจากมี การให้แรงดึงแบบแนวเส้น.....	27
4.1 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	30
4.2 องค์ประกอบของโครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	30
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดจาก σ_p โดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณแก้ไขค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ แท่งตัวอย่างหินด้านข้าง.....	31
4.4 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ ในการคำนวณความเสียดทานระหว่างตัวอย่างหินและเบ้าทดสอบ.....	33
4.5 ตัวอย่างหินทรายบางส่วนหลังจากหล่อปูนยึดติดกับเบ้าเหล็กของเครื่องทดสอบ กำลังเฉือนแบบโดยตรง.....	34
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงด้วยเครื่อง SBEL-DR44.....	35
5.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนในบาง อัตราส่วน (σ_p/σ_c) สำหรับหินทรายทั้งสามชนิด.....	39
5.2 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก (d_n) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินทรายบางส่วน.....	40
5.3 ค่าความเค้นหลักในแนวแกนในรูปแบบของค่าความเค้นบนรอยแตกผิวขรุขระ.....	41

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตก ผิวขรุขระสำหรับกรณีที่มีการผันแปรอัตราส่วน.....	42
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตก ผิวขรุขระกรณีที่ σ_p มีค่าคงที่.....	45
5.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวเรียบสำหรับ ตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด.....	46
5.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง: (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือน ในรูปแบบ ของค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตก (b) ค่าการเคลื่อนตัวของ รอยแตกในรูปแบบของ ค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน.....	47
5.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังรับ แรงเฉือนในสามแกนจริงกรณีที่มีความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์.....	48
6.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงโดยที่อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้น ที่ขนานกับรอยแตกและค่าความเค้นบนรอยมีค่าคงที่สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง.....	51
6.2 ค่ามุมเสียดทานปรากฏ (ϕ^*) ในรูปแบบของอัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตก ที่หารด้วยค่าความเค้นบนรอยแตก.....	52
6.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงโดยที่ค่าความเค้นที่ขนานกับรอย แตกมีค่าคงที่สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง.....	54
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดปรากฏและค่าความเค้นขนานกับรอยแตก ที่มีค่าคงที่.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

มวลหินที่อยู่ตามธรรมชาติ (ตามโครงสร้างทางธรณีวิทยา) มีความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) ซึ่งประกอบด้วย รอยแตก รอยแยก ชั้นหิน และรอยเลื่อน เมื่อมีการก่อสร้างอาคาร เขื่อน หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่บนมวลหิน จะทำให้มีความเสี่ยงต่อการไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างดังกล่าวได้ เช่น เกิดการทรุดตัวของโครงสร้างเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลหิน โครงสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่บนมวลหินจะมีส่วนในการเพิ่มน้ำหนักกดทับหรือแรงขับเคลื่อนของหินบนรอยแตกทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น ในสภาวะที่ไม่มีโครงสร้างทางวิศวกรรมก่อสร้างอยู่ในพื้นที่ที่มีรอยแตกหรือรอยเลื่อน มวลหินจะเกิดการเคลื่อนตัวด้วยอัตราที่ช้ามาก แต่ถ้ามีโครงสร้างทางวิศวกรรมไปเพิ่มแรงขับเคลื่อนก็จะทำให้สมดุลของแรงในธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนตัวในรอยแตกของหินเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในอัตราที่สูงขึ้นได้

ค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในมวลหินเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี อาทิ ความลาดชันของมวลหินตามแนวถนน ทางรถไฟ อ่างเก็บน้ำ และฐานรากของเขื่อน และของมวลหินที่อยู่รอบอุโมงค์ที่ใช้ส่งน้ำในระบบชลประทานและอุโมงค์สำหรับถนนและทางรถไฟ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างเหล่านี้จะมีการคำนวณค่าความปลอดภัยโดยอาศัยค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกหรือระบบของรอยแตกในมวลหินเป็นหลัก ค่ากำลังเฉือนนี้สามารถทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีทดสอบตามมาตรฐานสากล (ASTM D5607) โดยนำตัวอย่างหินที่มีรอยแตกมาให้แรงเฉือนขนานกับรอยแตกภายใต้ความเค้นคงที่ที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับหนึ่ง ค่าแรงเฉือนที่ให้จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเคลื่อนตัวของชิ้นตัวอย่างหินที่อยู่สองข้างของรอยแตกนั้น ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้สามารถนำมาคำนวณกำลังเฉือนของรอยแตกนั้นสำหรับหินชนิด ซึ่งแรงที่ให้จะถูกเรียกว่า แรงแบบสถิต

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราความเค้นเฉือนในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบแรงเฉือนเป็นการทดสอบโดยการให้แรงเฉือนคงที่ที่อัตราเดียว โดยที่การให้แรงเฉือนในห้องปฏิบัติการจะมีอัตราให้แรงที่สูงมากกว่าความเป็นจริงในภาคสนาม ส่งผลให้การทำนายค่ากำลังเฉือนของรอยแตกสูงกว่าความเป็นจริงมากและไม่สอดคล้องกับสภาวะในภาคสนาม ทั้งนี้วิศวกรต้องพึงตระหนักถึงผลกระทบของค่าความเค้นเฉือนในสามแกน เพื่อให้การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมบนมวลหินมีความมั่นคงและมีเสถียรภาพในระยะยาว ดังนั้นจึงต้องนำค่าการทดสอบกำลังเฉือนในสภาวะที่สอดคล้องกับในภาคสนามมาใช้ในการออกแบบ แต่การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในมวลหินที่มีการพิจารณาถึงกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังและเป็นรูปธรรมเพียง

พอที่จะสามารถนำไปใช้ในออกแบบในสภาวะจริงตามธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาองค์ความรู้นี้ให้สามารถนำไปใช้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อทำการตรวจสอบหากล้างต้านทานแรงเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินทรายภายใต้การให้แรงในสามแกนจริง โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงที่มีการสร้างรอยแตกจากวิธีการให้แรงดึงแบบแนวเส้น และแบบผิวเรียบได้ดำเนินการโดยใช้โครงทดสอบในสามแกนจริง (Fuenkajorn & Kenkhunthod, 2010)
- 2) สร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากโดยมีความเค้นหลักในสามทิศทางที่ไม่เท่ากัน (Anisotropic stress state)

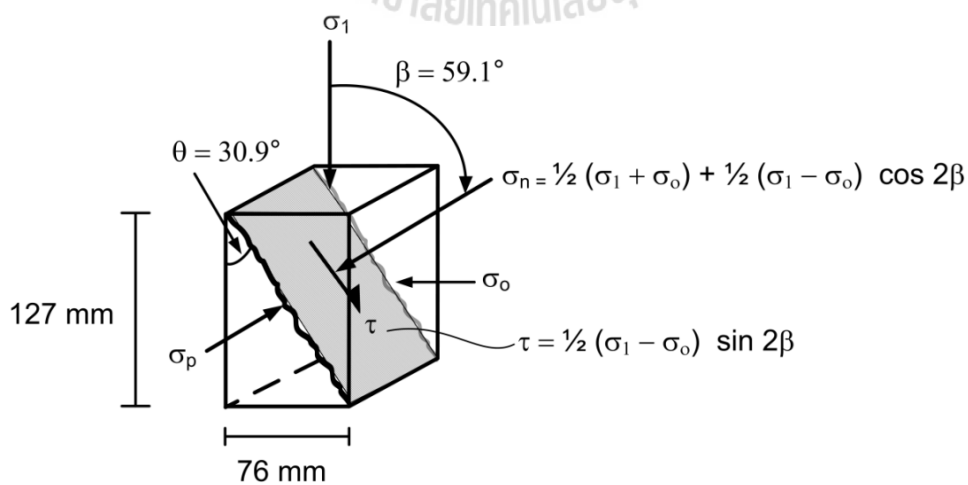
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการได้ใช้หินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายพระวิหาร หินทรายภูพาน และหินทรายภูกระดึง
- 2) การทดสอบประกอบด้วยการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง ภายใต้ค่าความเค้นรอบข้างที่มีค่าคงที่ ซึ่งประกอบด้วยค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) และค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_o)
- 3) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ ได้แก่ ค่าความเค้นตั้งฉากรอยแตกเป็นส่วนเดียวกับค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p/σ_o) และค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่
- 4) ใช้ตัวอย่างหินทรายในการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกมากกว่า 30 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิด
- 5) รอยแตกของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension induced fracture)
- 6) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกโดยตรง (Direct shear test) แต่ละระดับได้ทำการผันแปรความเค้นกดในแนวตั้งฉากกับรอยแตกอย่างน้อย 4 ค่า เพื่อให้การสร้างเกณฑ์การแตกเป็นไปอย่างแม่นยำ
- 7) การทดสอบทุกประเภทได้ดำเนินการภายใต้สภาวะแห้งและอุณหภูมิห้อง
- 8) งานวิจัยนี้ไม่มีการออกสำรวจในภาคสนาม

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินทรายในสามแกนจริงมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของมวลหินที่มีรอยแตกและเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการออกแบบฐานรากและโครงสร้างในชุดหินโคราชที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหินทรายในสามแกนจริงเพื่อหาผลกระทบระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากของหินทราย 3 ชนิด โดยพิจารณาการให้ความเค้นในสามแกน และมีการสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉาก โดยตัวอย่างหินทรายชุดโคราชได้ถูกนำมาทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงด้วยโครงกดทดสอบในสามแกนจริงภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบประกอบด้วยทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง (True triaxial test) ภายใต้ค่าความเค้นรอบข้างที่มีค่าคงที่ ซึ่งประกอบด้วยค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) และค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_o) แสดงในรูปที่ 1.1

แนวคิดในงานวิจัยนี้คือการใช้ตัวอย่างหินทรายที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $76 \times 76 \times 127$ mm³ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโครงกดทดสอบในสามแกนจริงสามารถให้ความเค้นที่ขนานกับรอยแตก (σ_p) และค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_o) ได้อย่างคงที่ โดยรอยแตกของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบจะถูกสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ ด้วยการให้แรงกดแบบแนวเส้น โดยมุมของรอยแตกบนตัวอย่างหินจะได้อาจจากการคำนวณด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์ตามเกณฑ์ของ Coulomb ที่จะพัฒนาขึ้นในรูปของค่าความเค้นยึดติด (c) และมุมเสียดทาน (ϕ) ซึ่งรวมผลกระทบของความเค้นล้อมรอบ โดยจะทำให้เกณฑ์การเฉือนใหม่ที่ได้นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพของมวลหินได้ใกล้เคียงกับสถานะความเป็นจริงในภาคสนามมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องออกเป็น 4 ประเด็นหลักประกอบด้วย 1) การพัฒนาและสร้างทฤษฎีความสัมพันธ์จากการทดสอบ 2) ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน 3) การศึกษางานวิจัยที่มีการทดลองในลักษณะการให้แรงในรูปแบบสามแกนจริง และ 4) การพัฒนาเครื่องมือทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างหินทราย

ในขั้นตอนนี้ได้ดำเนินการสร้างรอยแตกของตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายพระวิหาร หินทรายภูพาน และหินทรายภูกระดึงเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีการสร้างรอยแตกขึ้นภายในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้นเพื่อใช้ในการทดสอบ 2 กลุ่ม ดังนี้

1) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงด้วยตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ที่ถูกจัดเตรียมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $76 \times 76 \times 127 \text{ mm}^3$ โดยตัวอย่างหินทรายแต่ละชนิดได้ถูกทดสอบไม่น้อยกว่า 30 ก้อน

2) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยตัวอย่างหินทรายรูปสี่เหลี่ยมขนาด $100 \times 100 \times 150 \text{ mm}^3$ โดยมีการให้แรงกดตั้งฉากกับรอยแตก 4 ระดับ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง

ในขั้นตอนนี้ได้ดำเนินการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงด้วยโครงกดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial load frame) โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ คือ 1) ผันแปรอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นขนานกับรอยแตกและค่าความเค้นบนรอยแตก ($\sigma_p/\sigma_o = 0, 0.5, 1, 2, 3$ และ 4) และ 2) กำหนดให้ค่าความเค้นขนานรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Model DR-44 Direct Shear Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D5607 และได้ทำการหาค่าคุณสมบัติของหินทรายทั้ง 3 ชนิด เช่น ค่าความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทาน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนนี้ได้นำผลการทดสอบมาหาค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 6 การพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ 3 แบบคือ

1) จากชุดการทดสอบแรกที่ได้กำหนดอัตราส่วนระหว่างความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) และความเค้นบนรอยแตก (σ_o) ให้มีค่า 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa สามารถใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทาน (ϕ) กับการผันแปรอัตราส่วนระหว่างความเค้นขนานรอยแตกและความเค้นบนรอยแตก

2) จากการทดสอบชุดที่สองได้มีการกำหนดให้ความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่ที่ 1, 2 และ 3 MPa สามารถใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดติด (c) กับความเค้นขนานรอยแตก

3) ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ตามเกณฑ์ของ Coulomb ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะนำเสนอในรูปแบบของค่าความเค้นเฉือนของหินทราย 3 ชนิด โดยอยู่ในรูปแบบของค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ที่ได้จากการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ประเด็นหลัก

2.1 การพัฒนาและสร้างทฤษฎีความสัมพันธ์จากการทดสอบ

Barton and Choubey (1977) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Joint Roughness Coefficient: JRC) โดยแทนด้วยตัวเลขตั้งแต่ 1-20 ซึ่งสามารถประเมินได้จากความขรุขระของรอยแตกในหิน Barton and Bandis (1990) ได้พิจารณาถึงผลกระทบของขนาดที่มีต่อค่า JRC และได้ทำการเสนอค่า JRC สำหรับความไม่ต่อเนื่องขนาดใหญ่ คณะกรรมการกลศาสตร์หินแห่งนานาชาติ (International Society for Rock Mechanic, ISRM) จึงได้ตั้งให้เป็นมาตรฐานในการประเมินค่าความขรุขระบนผนังของความไม่ต่อเนื่อง

Kusumi et al. (1997) ได้ทำการศึกษาสมการใหม่ของค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับรอยแตกหินที่มีความไม่สม่ำเสมอ โดยกล่าวไว้ว่าเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนของ Ladanyi (1970) จะถูกนำไปใช้เฉพาะกับรอยแตกแบบสามเหลี่ยมทั่วไป วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ก็เพื่อที่จะเสนอกำลังรับแรงเฉือนใหม่ซึ่งจะประยุกต์ใช้กับรอยแตกที่ไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีการประเมินค่าที่เหมาะสมของโปรไฟล์รอยแตกที่ไม่สม่ำเสมอต้องเป็นการประเมินเชิงปริมาณ มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการหล่อปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมี 4 JRC โปรไฟล์ที่แตกต่างกัน รวมถึงได้ใช้ตัวอย่างหินทรายที่ประกอบด้วยรอยแตกที่ไม่สม่ำเสมอ เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง นอกจากนั้นก่อนการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเพื่อที่จะทำการประเมินโปรไฟล์พื้นผิวความไม่ต่อเนื่องของรอยแตกของตัวอย่างยังได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์โปรไฟล์ของความไม่ต่อเนื่องของรอยแตกแต่ละตัวอย่างด้วยการใช้โปรไฟล์มิเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้ผลว่าสมการที่ได้จากการทดสอบใหม่นี้สามารถใช้เป็นตัวแทนที่ดีของค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนที่รวมอยู่ในเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนของ Ladanyi ที่ได้เสนอไว้ และจะได้รับการยอมรับว่าสมการที่ได้จากการทดสอบใหม่นี้สามารถประยุกต์ใช้สำหรับตัวอย่างหินที่มีรอยแตกไม่สม่ำเสมอได้

Zhao (1997) ได้ศึกษาการแนบกันของพื้นผิวรอยแตกและกำลังรับแรงเฉือนด้วยเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือน JRC-JMC กล่าวว่า เมื่อเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือน JRC-JCS ของ Barton (1977) ถูกใช้สำหรับการตีความและการคาดการณ์ของกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกตามธรรมชาติ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง JRC-JCS มีแนวโน้มที่จะคาดการณ์สูงกว่าความเป็นจริงสำหรับรอยแตกตามธรรมชาติกับพื้นผิวที่ไม่แนบกัน เพื่อเอาชนะข้อเสียเปรียบนี้ เกณฑ์กำลังรับแรงเฉือน JRC-JMC ใหม่ที่เสนอนี้จะรวมผลกระทบของความขรุขระของพื้นผิวรอยแตกและการแนบกันของรอยแตกในรูปแบบของ $\tau = \sigma_n \cdot \tan$

$[JRC \cdot JMC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n) + \phi_r]$ โดยที่ JMC ควรกำหนดที่ 0.3 สำหรับ JMC ที่ได้ทำการตรวจวัดแล้ว มีค่าน้อยกว่า 0.3 ซึ่งมันเป็นการปรับเปลี่ยนเกณฑ์ของ JRC-JCS ที่มีอยู่แล้ว แบบจำลอง JRC-JMC ใหม่ นี้จะให้การฟิตตั้งผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนกับการผันแปรรอยแตกเมื่อพื้นผิวมีมุมที่แตกต่างกันได้ อย่างเหมาะสมทั้งด้านความขรุขระและการแนบกัน นอกจากนี้ยังช่วยให้การแปรความและการ คาคัดการณ์แม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับรอยแตกในธรรมชาติที่ไม่มีพื้นผิวแนบกันอย่าง สมบูรณ์

Grasselli and Egger (2003) ได้เสนอ Constitutive criterion ใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับ ความเค้นและการเคลื่อนตัว โดยแบบจำลองที่เสนอเป็นความต้านทานแรงเฉือนของรอยแตกที่อยู่ภายใต้ เงื่อนไขค่าความเค้นตั้งฉากคงที่ และอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีหรือคำอธิบายจากการทดลองของพื้นผิว จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงที่มีการผันแปรค่าความเค้นตั้งฉากมากกว่า 50 ค่า ซึ่งได้ จากการสร้างแบบจำลองของรอยแตกแบบตั้งและการทำให้เกิดรอยแตกจำลองบนตัวอย่างหินที่ใช้ ทดลองทั้ง 7 ชนิด แบบจำลองประกอบ (Constitutive model) สามารถใช้เพื่ออธิบายการทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ และตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองนี้สามารถทำ การตรวจวัดได้โดยง่ายจากการทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ เกณฑ์ที่เสนอนี้จะถูกใช้เพื่อ ประเมินค่า JRC ค่าจากการคาดการณ์ที่เป็นผลสำเร็จจะมีความสัมพันธ์กับค่า JRC ที่ได้จากการ วิเคราะห์ย้อนกลับของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

2.2 ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน

Fuenkajorn and Kemthong (2007) ได้ทำการศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการที่ใช้ใน ภาคสนามสำหรับกำหนดค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน (b) ค่ากำลังกดในแกนเดียว (UCS หรือความแข็งแรงของ ผันรอยแตก) และค่า JRC ที่ต่างกันในตัวอย่างหินที่ตัดให้มีผิวเรียบพบว่า กำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณได้ จากกฎของ Barton จะอ่อนไหวต่อค่า b มากกว่าค่า UCS ค่า JRC สามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรง เฉือนของรอยแตกผิวขรุขระได้ดีสำหรับหินอ่อนและหินทราย แต่ไม่สามารถอธิบายกำลังเฉือนของรอย แตกในตัวอย่างหินแกรนิตได้ ซึ่งอาจเกิดจากผิวตัดเรียบของหินที่มีขนาดผลึกแร่ใหญ่และมีความแข็งแรงมาก

Fuenkajorn et al. (2011) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่า Hydraulic conductivity ของ ตัวอย่างหินรอยแตกภายใต้ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน หินที่ใช้ในการทดสอบมี 4 ชนิด ได้แก่ หินปูนชุดสระบุรี หินแกรนิตตาก หินแกรนิตเวียดนาม และหินแกรนิตจีน ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็น ว่าค่าการเปิดเผยอทางกายภาพ (Physical apertures, e_p) และค่า Hydraulic aperture เพิ่มขึ้นตาม ค่าการเคลื่อนตัวของความเค้นเฉือนภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าสูง ซึ่งค่าความซึมผ่านของรอยแตก ภายใต้สภาวะไม่มีความเค้นเฉือนและสภาวะความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าที่เท่ากัน ค่า Hydraulic conductivities ได้มีค่าลดลงแบบ Exponential ในขณะที่ความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Babanouri (2011) ได้ศึกษาผลกระทบของการอัดตัวคายน้ำที่สูงเกินไป (over-consolidation) กับพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกหิน ได้กล่าวว่าผู้วิจัยหลายท่าน (Ohnishi and Dharmaratne, 1990; Indraratna and Haque, 2000) โดยมากได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของความเค้นตึงฉากและความเค้นเฉือนของรอยแตก ซึ่งโดยมากไม่ได้พิจารณาผลกระทบของพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำที่สูงเกินไป ของความไม่ต่อเนื่องหรือรอยแตก พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำที่สูงเกินไปของรอยแตกของหินที่มีความขรุขระควรจะพิจารณาเมื่อ เกิดการตกทับถม การอัดตัวคายน้ำ การผูกกร่อน (หรือการขุดเจาะ) ตามลำดับ โดย Plaster replicas จะเป็นตัวแทนของพื้นผิวรอยแตกของหินในธรรมชาติเพื่อใช้สำหรับการศึกษา ในกรณีนี้พื้นผิวขรุขระและคุณสมบัติทางรูปทรงจะรักษาให้คงที่ในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสังเกตเห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนส่วนมากของความขรุขระ ความแข็งของผนังรอยแตก และค่าความเค้นตึงฉากมีนัยสำคัญอย่างมากกับการเพิ่มอัตราส่วนของการอัดตัวคายน้ำที่สูงเกินไป จากผลการทดสอบ แบบจำลองใหม่ได้พัฒนาและเพิ่มเติมจากเกณฑ์การวิบัติกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในมวลหินของ Barton แบบจำลองนี้ได้พิจารณาผลกระทบของการให้ความเค้นตึงฉาก/หยุดให้ความเค้นตึงฉาก ก่อนการให้ความเค้นเฉือนและอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำที่สูงเกินไป (Over-consolidation ratio) บนรอยแตก ซึ่งการปิดตัวอย่างสูงของรอยแตก (Joint Over-Closure : JOC) ที่เกิดขึ้นใหม่จะเป็นตัวแปรที่นำไปสู่การได้อัตราส่วนของเงื่อนไขการปิดตัวในการปิดตัว-อย่างสูงของรอยแตก (Over-closed) ถึงการปิดตัวปกติของรอยแตก (Normal closed)

2.3 การศึกษางานวิจัยที่มีการทดลองในลักษณะการให้แรงในรูปแบบสามแกนจริง

Song and Haimson (1997) ได้จำลองหลุมเจาะในตัวอย่างหินทรายและหินแกรนิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการแตกของหินในหลุมเจาะ (Borehole breakout) และความเค้นด้วยเครื่องทดสอบแรงกดในสามแกนจริง โดยใช้การสันนิษฐานที่ว่าสถานะความเค้นที่ขอบเขตรอยแตกของผนังหลุมเจาะมีค่าความแข็งที่เท่ากัน ซึ่งกฎเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ไม่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาการแตกของหลุมเจาะได้ ซึ่งกฎเกณฑ์ของแรงกดในสามแกนจริงใช้ได้ดีกว่า เนื่องจากผลของ σ_2 มีความเหมาะสมต่อขอบเขตของการแตก เช่น กฎเกณฑ์ของ Nadai ใช้สำหรับหินทราย และกฎเกณฑ์ของ Mogi ใช้สำหรับหินแกรนิต

$$\tau_{oct} = f_1 (\sigma_{oct}) \quad (2.1)$$

เมื่อ
$$\tau_{oct} = 1/3[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

และ
$$\sigma_{oct} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

โดยที่ f_1 คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ

$$\tau_{\text{oct}} = f_2 (\sigma_2^m) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$

โดยที่ f_2 คือ ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นทางคณิตศาสตร์ขึ้นกับชนิดหิน การวิเคราะห์แผ่นหินบาง (thin section) มีบทบาทสำคัญต่อกลไกทางกลศาสตร์ของการแตก และค่าความแข็งขึ้นกับชนิดของหิน

Singh et al. (1998) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเค้นหลักกลางกับค่าความแข็งของมวลหินที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางกล่าวว่า เกณฑ์ของ Mohr–Coulomb มีความจำเป็นจะต้องพัฒนาสำหรับวัสดุหินที่มีความแปรปรวนหรือไม่เท่ากันทุกทิศทางสูงและเป็นรอยแตกในมวลหิน เมื่อเพิ่ม σ_2 เข้าไป เกณฑ์การแตกใหม่ซึ่งแนะนำว่า σ_2 และ σ_3 จะส่งผลกับความเค้นตั้งฉากบนระนาบที่มีอยู่เดิมของระนาบที่มีความแข็งแรงต่ำ เกณฑ์นี้จะอธิบายถึงการปรับปรุงความแข็ง ($\sigma_2 - \sigma_3$) ในอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดิน เนื่องจาก σ_2 ตลอดแนวของอุโมงค์มีความสำคัญอย่างมาก เหตุผลอีกประการหนึ่งคือเพื่อช่วยปรับปรุงค่าความแข็งด้วยการ Mass modulus ในอุโมงค์เพื่อที่จะจำกัด Dilatancy ความสัมพันธ์จากการทดลองที่ได้จากข้อมูลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบบล็อก และการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวแบบแจ็กเก็ต (Uniaxial jacket tests) ได้รับการแนะนำให้ใช้เพื่อประเมินตัวแปรของค่าความแข็ง โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงดึงของมวลหินที่ได้เสนอไว้ทฤษฎีของ Hoek และ Brown ใช้เพื่ออธิบายแนวคิดของ σ_2 เป็นเพียงข้อเสนอสำหรับเกณฑ์การแตกทั่วไปเพื่อสนับสนุนการทำเหมืองใต้ดินและบนผิวดิน

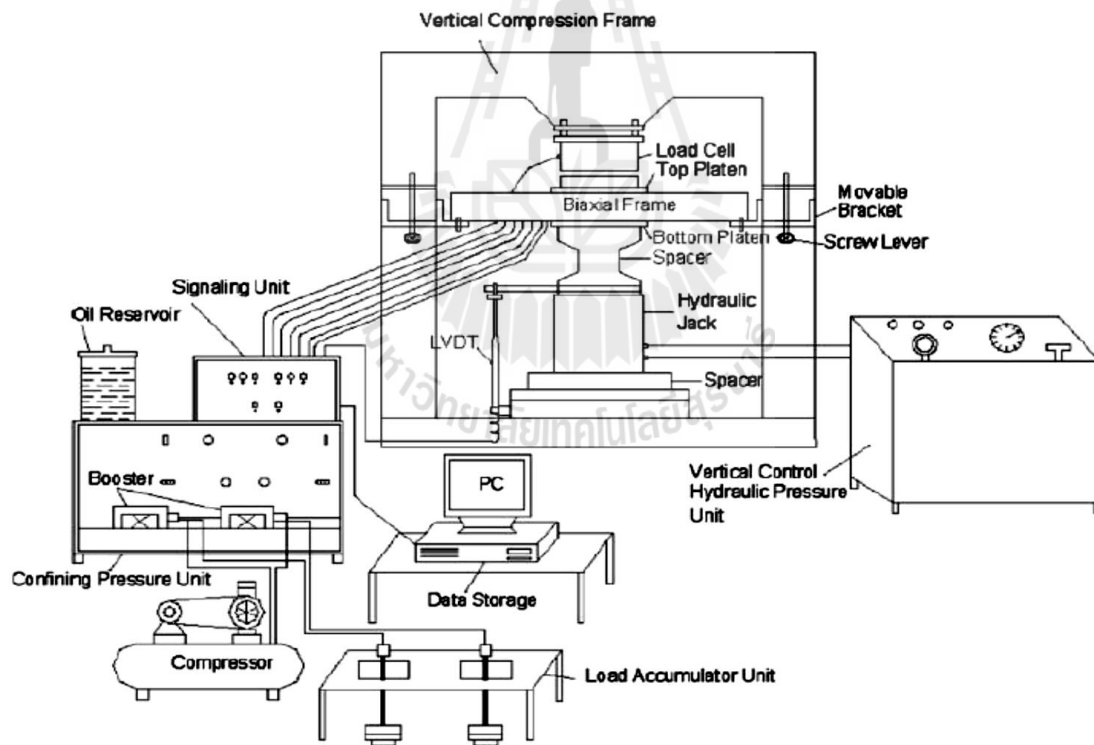
Alexeev et al. (2008) ได้ศึกษาผลกระทบปัจจัยของสภาวะความเครียดบนรอยแตกของหินทรายภายใต้การให้แรงในสามแกนจริง ผลจากการทดลองการเสียรูปร่างของหินและรอยแตกภายใต้การกดในสามแกนจริงแสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมระหว่างสภาวะความเค้นและความเครียด โดยที่สภาวะความเค้นผันแปรจากแรงกดโดยทั่วไปถึงแรงเฉือนทั่วไปที่ $\sigma_3 \neq 0$ รอยแตกของตัวอย่างหินภายใต้การกดในสามแกนจริงเกิดขึ้นจากแรงเฉือนตามยาว/ตามขวาง และทำให้เกิด Dilatancy สูงมาก เมื่อเพิ่มระดับความดัน Hydrostatic ค่าความเค้นเฉือนนั้นจะลดลงและจะยับยั้งผลกระทบของ Dilatancy ค่า Dilatancy สูงสุดจะสอดคล้องกับค่าสูงสุดของพื้นที่ผิวที่สดใหม่ที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของหิน โดยทั่วไปรอยแตกของหินจะเกิดจากข้อเสียเปรียบอย่างชัดเจนในการกดแบบสามแกนจริงในภาคสนาม หินทรายบางส่วนที่เปราะมาก ๆ ภายใต้การกดแบบสามแกนจริง ($\sigma_2 \neq 0$) ที่ค่าต่ำของส่วนประกอบความเครียดน้อยที่สุด (σ_2) เนื่องจากความพรุนเริ่มต้น Dilatancy สูง

Fuenkajorn and Kenkhunthod (2010) ได้ทำการทดสอบ UCS และ Triaxial โดยใช้โครงกวดหลายแกนเพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อความแข็งและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทรายสามชนิด การเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในแนวแกนถูกควบคุมด้วยอัตราคงที่ที่ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/s โดยรักษาความดันล้อมรอบคงที่ที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa ความแข็งและความยืดหยุ่นของหินทรายเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณกับอัตราการให้แรง โดยอัตราการให้แรงขึ้นอยู่กับสมการการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ซึ่งเป็นพื้นฐานต่อข้อสมมติฐานของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนคงที่ของหินที่แตกภายใต้ความเค้นตั้งฉาก จึงเป็นเหตุเป็นผลให้ได้สมการที่ขึ้นกับอัตราการให้แรงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ส่งผลให้เหมือนกับสมการ brittle isotropic intact rock

2.4 การพัฒนาเครื่องมือการทดสอบ

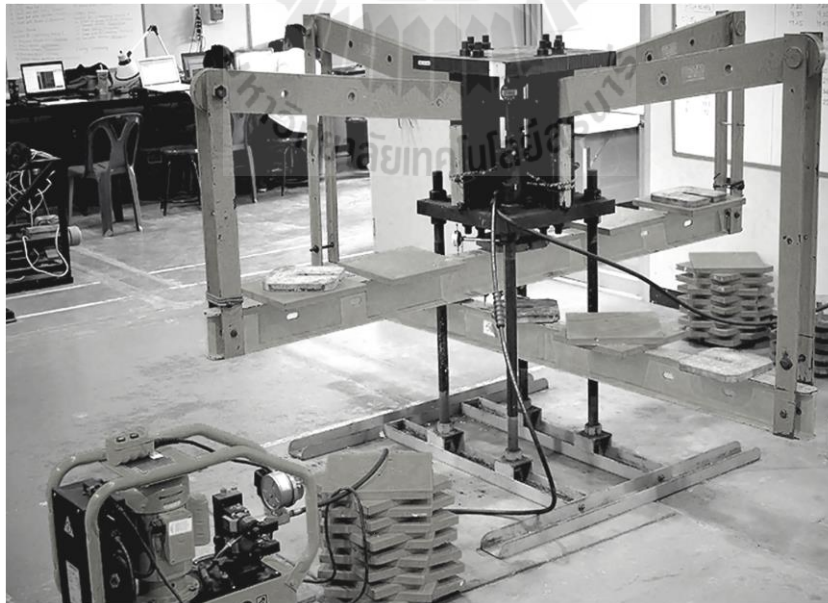
Tiwari and Rao (2006) ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพสำหรับทดสอบการกวดในสามแกน และการกวดทดสอบในสามแกนจริงของมวลหินที่จะถูกนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้น ตัวอย่างหินประกอบด้วยรอยแตกที่ต่อเนื่องจำนวน 3 ชุด ที่เตรียมมาจาก Block ของแบบจำลองวัสดุ Sand lime การทดสอบได้ทำโดยใช้ระบบกวดทดสอบในสามแกนจริง (TTS) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (Strain hardening) ความเครียดที่ลดลง (Strain softening) และพฤติกรรมเชิงพลาสติกของมวลหินที่ถูกจำลองที่ขึ้นกับรูปร่างเชิงเรขาคณิตของรอยแตกและสถานะความเค้น

Rao and Tiwari (2008) ได้พัฒนาระบบการให้แรงแบบหลายแกนสำหรับทดสอบแบบจำลองรอยแตกในมวลหิน (รูปที่ 2.1) โดยทำการออกแบบและพัฒนาระบบการให้แรงแบบสามแกนไม่เท่ากัน ที่ห้องปฏิบัติการของสถาบันเทคโนโลยีอินเดีย นิวเดลี ในการสร้างแบบจำลองมวลหินขนาดใหญ่ของรูปทรงรอยแตกที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถนำมาทดสอบสถานะความเครียดแบบสามแกนไม่เท่ากัน โดยจำลองสถานะความเครียดในภาคสนามด้วยการใช้เครื่องกวดทดสอบในสามแกนจริงที่ได้ออกแบบ ประกอบด้วยโครงกวดในแนวตั้ง 1,000 kN และโครงกวดในแนวราบ (Biaxial fram) อีกสองตัวๆ ละ 300 kN แรงดันถูกจำกัดด้วยไฮดรอลิกแจ๊ค (Hydraulic jacks) และแผ่นเหล็ก หน่วยของแรงดันล้อมรอบที่ใช้จะคงที่ ทำให้สามารถตรวจวัดและรักษาความเค้นในแนวราบ (σ_2 และ σ_3) บนหน้าตัวอย่างได้ง่าย โดยระบบเก็บข้อมูลจะมีแปดช่อง มีการบันทึกแรงทั้งหมดที่ใช้และส่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปยังคอมพิวเตอร์ ระบบดังกล่าวถูกตรวจสอบโดยการทดสอบสามแกนจริงบนแบบจำลองตัวอย่างที่หลากหลายของบล็อกหินทราย-ปูน ซึ่งมีรอยแตกสามทิศทางที่ตั้งฉากกัน



รูปที่ 2.1 การติดตั้งระบบการให้แรงแบบสามแกนจริงของ Rao and Tiwari (2008)

Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนา Polyaxial load frame (รูปที่ 2.2) เพื่อหากำลังรับแรงกดและกำลังแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับใช้ในการทดสอบหินทรายสามชนิด ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็น Transversely isotropic โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ Bedding plane สัดส่วนของค่า Poisson's บนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากทิศทางขนานกับ Bedding plane ผลจากการทดสอบแรงดึงแบบ Brazillian ภายใต้แรงกดในแกนเดียวมีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมที่สำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ส่วนใหญ่จะไม่สอดคล้องกับสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ความเค้นในแกนหลักในสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ เรียกว่า ความเค้นกดในสามแกนจริง แต่การทดสอบโดยการจำลองความเค้นกดในสามแกนจริงจะทำให้ยากและใช้เครื่องมือพิเศษที่มีราคาสูงมาก (อยู่ในระดับหลายล้านดอลลาร์) ดังนั้นการทดสอบแบบการกดในสามแกนจริง จึงไม่เป็นที่นิยมและแพร่หลาย ซึ่งโดยสรุปแล้วข้อเสียของเครื่องกดในสามแกนจริงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 1) มีราคาสูง 2) มีความซับซ้อนในการใช้งาน 3) ไม่สามารถทดสอบการเคลื่อนไหลของหินได้อย่างต่อเนื่อง 4) ใช้พลังงานไฟฟ้ามากเพื่อที่จะควบคุมแรงกดให้คงที่ (Servo-Control) และ 5) ยากที่จะรักษาระดับของแรงให้คงที่อย่างแท้จริงในช่วงเวลาการทดสอบที่ต้องการความเค้นคงที่ด้านข้าง



รูปที่ 2.2 โครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่ Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนา

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่าง

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างหินทราย เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) ต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินทรายภายใต้สภาวะสามแกนจริง

การเตรียมตัวอย่างหิน

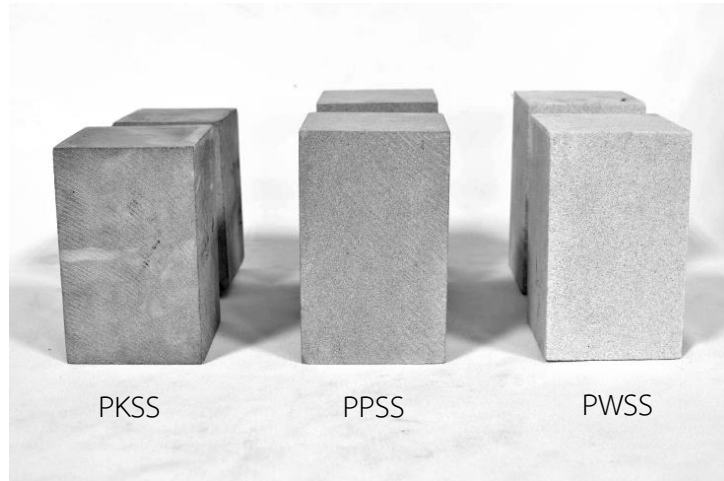
ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยหินทรายชุดภูกระดึง (Phu Kradung sandstone) หินทรายชุดภูพาน (Phu Phan sandstone) และหินทรายชุดพระวิหาร (Phra Wihan sandstone) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงและไม่มีรอยแตกในเนื้อหินเพื่อควบคุมความแปรปรวนของการสร้างรอยแตกของหิน โดยหินทรายเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางวิศวกรรมหรือใช้เป็นฐานราก สำหรับการจัดเตรียมตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง

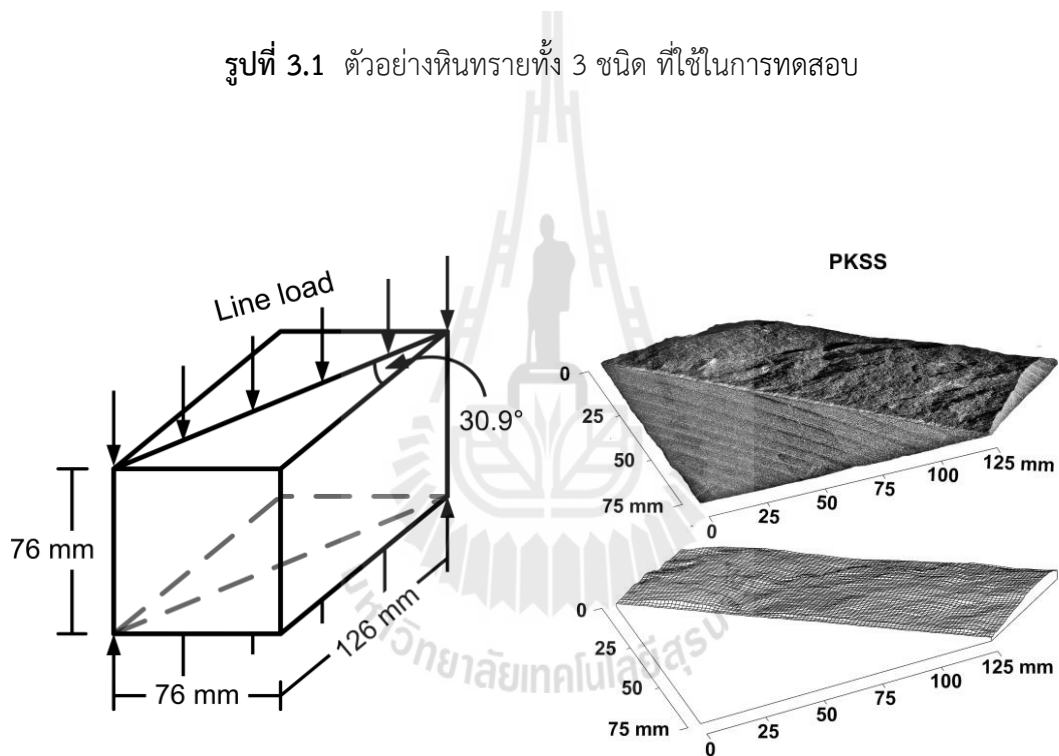
(ผิวขรุขระ)

การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง ได้ใช้หินทรายทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าวข้างต้น โดยตัดให้มีขนาด $76 \times 76 \times 127 \text{ mm}^3$ แสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นทำการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension-induced fracture) เพื่อสร้างรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 3.2 รอยแตกที่สร้างขึ้นมีค่า JRC ที่ประมาณ 6-8 แสดงในรูปที่ 3.3 โดยการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงได้ดำเนินการโดยใช้โครงกดทดสอบแบบหลายแกน (Polyaxial load fame) และได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบคือ

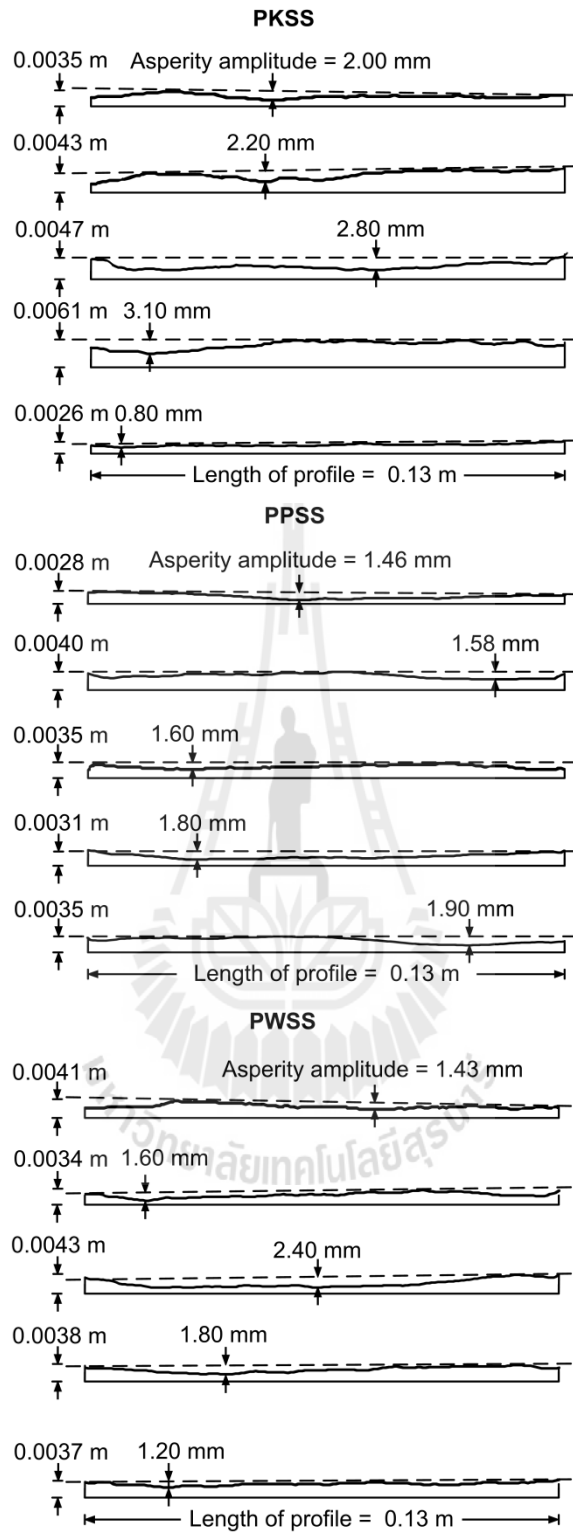
1) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงโดยที่ความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) เป็นสัดส่วนกับความเค้นบนรอยแตก (σ_o) โดยมีค่าระหว่าง 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa และได้ใช้ตัวอย่างหินทรายทั้งหมด 33 ก้อน และตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง (ผิวขรุขระ) ของชุดที่หนึ่ง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบและลักษณะการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension-induced fracture)



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากหินทรายบางส่วนที่สามารถประเมินค่าJRC (Barton, 1982) อยู่ระหว่างช่วง 6-8

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p เป็นสัดส่วนกับ σ_o (ผิวขรุขระ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PKSS-01	7.61×7.6×12.7	2.55
PKSS-02	7.6×7.6×12.72	2.53
PKSS-03	7.62×7.63×12.63	2.5
PKSS-04	7.61×7.62×12.62	2.55
PKSS-05	7.62×7.6×12.63	2.53
PKSS-06	7.63×7.6×12.61	2.54
PKSS-07	7.6×7.61×12.62	2.56
PKSS-08	7.63×7.61×12.6	2.52
PKSS-09	7.63×7.62×12.63	2.54
PKSS-10	7.6×7.65×12.7	2.53
PKSS-11	7.62×7.64×12.64	2.52
PKSS-12	7.63×7.63×12.6	2.53
PKSS-13	7.6×7.6×12.65	2.56
PKSS-14	7.6×7.61×12.62	2.57
PKSS-15	7.62×7.61×12.64	2.52
PKSS-16	7.6×7.61×12.62	2.54
PKSS-17	7.6×7.6×12.62	2.54
PKSS-18	7.62×7.61×12.67	2.53
PKSS-19	7.6×7.61×12.62	2.54
PKSS-20	7.6×7.63×12.63	2.56
PKSS-21	7.61×7.61×12.7	2.56
PKSS-22	7.62×7.6×12.64	2.54
PKSS-23	7.62×7.64×12.6	2.53
PKSS-24	7.6×7.61×12.64	2.54
PKSS-25	7.6×7.61×12.62	2.51
PKSS-26	7.6×7.62×12.63	2.54
PKSS-27	7.6×7.61×12.63	2.53
PKSS-28	7.63×7.62×12.62	2.55

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p เป็นสัดส่วนกับ σ_o (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PKSS-29	7.62×7.63×12.62	2.5
PKSS-30	7.6×7.61×12.62	2.56
PKSS-31	7.6×7.6×12.6	2.53
PKSS-32	7.6×7.61×12.71	2.55
PPSS-01	7.63×7.63×12.7	2.45
PPSS-02	7.65×7.62×12.63	2.42
PPSS-03	7.65×7.63×12.63	2.43
PPSS-04	7.64×7.62×12.66	2.43
PPSS-05	7.6×7.6×12.6	2.39
PPSS-06	7.6×7.65×12.6	2.36
PPSS-07	7.6×7.61×12.62	2.44
PPSS-08	7.63×7.61×12.64	2.46
PPSS-09	7.6×7.61×12.62	2.4
PPSS-10	7.62×7.62×12.6	2.46
PPSS-11	7.63×7.6×12.67	2.45
PPSS-12	7.6×7.61×12.62	2.42
PPSS-13	7.62×7.61×12.6	2.39
PPSS-14	7.62×7.6×12.6	2.38
PPSS-15	7.63×7.65×12.7	2.4
PPSS-16	7.62×7.6×12.7	2.44
PPSS-17	7.6×7.61×12.62	2.41
PPSS-18	7.62×7.62×12.6	2.42
PPSS-19	7.63×7.6×12.67	2.47
PPSS-20	7.6×7.61×12.62	2.46
PPSS-21	7.62×7.61×12.6	2.39
PPSS-22	7.62×7.63×12.63	2.45
PPSS-23	7.63×7.64×12.66	2.43
PPSS-24	7.61×7.6×12.6	2.43

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p เป็นสัดส่วนกับ σ_o (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PPSS-25	7.61×7.63×12.71	2.42
PPSS-26	7.62×7.62×12.65	2.45
PPSS-27	7.63×7.62×12.7	2.43
PPSS-28	7.6×7.61×12.6	2.39
PPSS-29	7.63×7.63×12.62	2.42
PPSS-30	7.65×7.62×12.66	2.4
PPSS-31	7.6×7.6×12.63	2.43
PPSS-32	7.62×7.62×12.61	2.38
PWSS-01	7.6×7.6×12.64	2.21
PWSS-02	7.63×7.62×12.6	2.23
PWSS-03	7.62×7.65×12.65	2.23
PWSS-04	7.63×7.62×12.67	2.19
PWSS-05	7.64×7.62×12.64	2.24
PWSS-06	7.62×7.62×12.65	2.26
PWSS-07	7.63×7.67×12.63	2.22
PWSS-08	7.6×7.61×12.6	2.23
PWSS-09	7.62×7.61×12.6	2.23
PWSS-10	7.62×7.6×12.6	2.24
PWSS-11	7.63×7.65×12.7	2.26
PWSS-12	7.62×7.6×12.7	2.19
PWSS-13	7.6×7.63×12.62	2.22
PWSS-14	7.62×7.6×12.6	2.26
PWSS-15	7.63×7.6×12.6	2.26
PWSS-16	7.6×7.63×12.62	2.29
PWSS-17	7.62×7.62×12.62	2.25
PWSS-18	7.62×7.6×12.63	2.23
PWSS-19	7.63×7.62×12.63	2.26
PWSS-20	7.61×7.6×12.6	2.23

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p เป็นสัดส่วนกับ σ_o (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PWSS-21	7.61×7.6×12.6	2.22
PWSS-22	7.6×7.6×12.62	2.2
PWSS-23	7.62×7.63×12.63	2.25
PWSS-24	7.6×7.6×12.62	2.17
PWSS-25	7.62×7.64×12.63	2.28
PWSS-26	7.63×7.63×12.61	2.3
PWSS-27	7.6×7.61×12.62	2.3
PWSS-28	7.63×7.63×12.62	2.26
PWSS-29	7.63×7.63×12.65	2.24
PWSS-30	7.63×7.62×12.7	2.33
PWSS-31	7.6×7.6×12.6	2.3
PWSS-32	7.6×7.6×12.6	2.25

2) การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงโดยที่ความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่เป็น 1, 2 และ 3 MPa และความเค้นบนรอยแตก (σ_o) ผันแปรระหว่าง 1.5–6 MPa โดยใช้ตัวอย่างหินทรายทั้งหมด 19 ก้อน และตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง (ผิวขรุขระ) ของชุดที่สอง

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่ (ผิวเรียบ)

การทดสอบกำลังเฉือนดังกล่าวนี้จะดำเนินการโดยใช้โครงทดสอบแบบหลายแกน และใช้หินทรายทั้ง 3 ชนิด ตามที่ได้กล่าวข้างต้น โดยตัดหินให้มีขนาด 76×76×127 mm³ จากนั้นใช้เครื่องตัดเพื่อสร้างพื้นผิวสัมผัสเรียบในแนวเอียง (Smooth saw-cut surfaces) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นนำมาทำการทดสอบโดยผันแปรความเค้นขนานกับรอยแตก 3 ระดับ คือ 0, 1 และ 2 MPa ส่วนความเค้นตั้งฉากรอยแตกจะผันแปรจาก 1-6 MPa และตารางที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่ (ผิวเรียบ)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวขรุขระ)

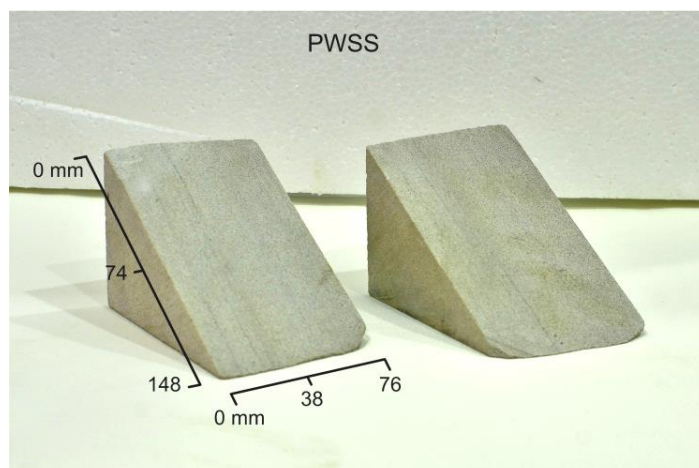
Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PKSS-01	7.62×7.6×12.62	2.52
PKSS-02	7.59×7.61×12.58	2.53
PKSS-03	7.63×7.6×12.6	2.52
PKSS-04	7.59×7.58×12.61	2.5
PKSS-05	7.58×7.58×12.61	2.54
PKSS-06	7.6×7.6×12.6	2.5
PKSS-07	7.62×7.61×12.6	2.56
PKSS-08	7.6×7.62×12.63	2.55
PKSS-09	7.59×7.59×12.59	2.54
PKSS-10	7.57×7.59×12.58	2.53
PKSS-11	7.61×7.6×12.6	2.52
PKSS-12	7.62×7.61×12.62	2.53
PKSS-13	7.62×7.59×12.61	2.56
PKSS-14	7.59×7.6×12.59	2.57
PKSS-15	7.57×7.61×12.59	2.51
PKSS-16	7.6×7.61×12.62	2.53
PKSS-17	7.62×7.59×12.6	2.54
PKSS-18	7.6×7.59×12.6	2.53
PKSS-19	7.59×7.62×12.61	2.54
PKSS-20	7.61×7.63×12.58	2.52
PKSS-21	7.58×7.61×12.59	2.56
PKSS-22	7.59×7.6×12.6	2.58
PKSS-23	7.6×7.6×12.62	2.57
PKSS-24	7.61×7.59×12.61	2.56
PKSS-25	7.61×7.58×12.58	2.52
PKSS-26	7.62×7.6×12.59	2.54
PKSS-27	7.6×7.62×12.6	2.53
PKSS-28	7.6×7.61×12.61	2.55

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PPSS-01	7.62×7.61×12.6	2.39
PPSS-02	7.62×7.59×12.61	2.42
PPSS-03	7.59×7.6×12.59	2.41
PPSS-04	7.57×7.61×12.6	2.46
PPSS-05	7.58×7.58×12.61	2.38
PPSS-06	7.6×7.6×12.6	2.36
PPSS-07	7.62×7.6×12.6	2.39
PPSS-08	7.6×7.62×12.62	2.42
PPSS-09	7.61×7.61×12.61	2.44
PPSS-10	7.62×7.62×12.62	2.46
PPSS-11	7.61×7.59×12.59	2.45
PPSS-12	7.59×7.61×12.59	2.44
PPSS-13	7.61×7.6×12.61	2.39
PPSS-14	7.6×7.6×12.6	2.38
PPSS-15	7.58×7.62×12.59	2.42
PPSS-16	7.61×7.59×12.62	2.43
PPSS-17	7.6×7.58×12.61	2.41
PPSS-18	7.62×7.6×12.59	2.42
PPSS-19	7.6×7.6×12.62	2.49
PPSS-20	7.59×7.62×12.59	2.45
PPSS-21	7.6×7.61×12.6	2.39
PPSS-22	7.58×7.6×12.6	2.46
PPSS-23	7.61×7.61×12.61	2.43
PPSS-24	7.62×7.6×12.63	2.44
PPSS-25	7.6×7.6×12.59	2.46
PPSS-26	7.62×7.58×12.6	2.45
PPSS-27	7.61×7.6×12.62	2.43
PPSS-28	7.6×7.59×12.6	2.39

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PWSS-01	7.59×7.6×12.62	2.2
PWSS-02	7.61×7.58×12.59	2.22
PWSS-03	7.58×7.62×12.6	2.23
PWSS-04	7.59×7.61×12.62	2.19
PWSS-05	7.6×7.59×12.61	2.25
PWSS-06	7.61×7.62×12.61	2.26
PWSS-07	7.62×7.61×12.59	2.2
PWSS-08	7.6×7.59×12.58	2.23
PWSS-09	7.6×7.58×12.6	2.24
PWSS-10	7.61×7.6×12.61	2.25
PWSS-11	7.59×7.6×12.6	2.26
PWSS-12	7.58×7.62×12.59	2.19
PWSS-13	7.6×7.62×12.62	2.22
PWSS-14	7.61×7.61×12.59	2.26
PWSS-15	7.6×7.62×12.59	2.28
PWSS-16	7.59×7.59×12.58	2.29
PWSS-17	7.59×7.59×12.6	2.25
PWSS-18	7.61×7.62×12.58	2.23
PWSS-19	7.62×7.61×12.6	2.26
PWSS-20	7.6×7.63×12.61	2.24
PWSS-21	7.58×7.62×12.62	2.26
PWSS-22	7.59×7.59×12.58	2.22
PWSS-23	7.6×7.58×12.59	2.21
PWSS-24	7.62×7.58×12.61	2.19
PWSS-25	7.61×7.62×12.6	2.26
PWSS-26	7.6×7.58×12.61	2.28
PWSS-27	7.59×7.61×12.62	2.25
PWSS-28	7.58×7.6×12.61	2.23



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินทรายแบบผิวเรียบบางส่วนสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวเรียบ)

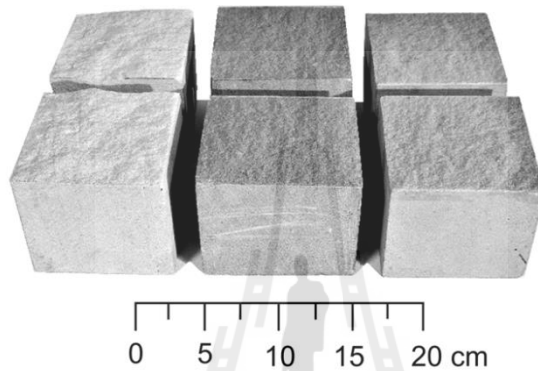
Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PKSS-01	7.6×7.61×12.6	2.51
PKSS-02	7.62×7.6×12.59	2.52
PKSS-03	7.61×7.62×12.61	2.49
PKSS-04	7.6×7.59×12.62	2.54
PKSS-05	7.58×7.6×12.6	2.53
PKSS-06	7.63×7.61×12.6	2.51
PKSS-07	7.59×7.62×12.59	2.56
PKSS-08	7.6×7.59×12.58	2.52
PKSS-09	7.61×7.59×12.59	2.52
PKSS-10	7.62×7.6×12.6	2.51
PKSS-11	7.6×7.61×12.62	2.49
PKSS-12	7.6×7.62×12.61	2.56
PPSS-01	7.61×7.6×12.6	2.38
PPSS-02	7.61×7.61×12.59	2.4

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง โดยที่ σ_p มีค่าคงที่ (ผิวเรียบ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PPSS -03	7.59×7.61×12.61	2.45
PPSS -04	7.58×7.59×12.61	2.43
PPSS -05	7.59×7.61×12.6	2.4
PPSS -06	7.61×7.62×12.6	2.39
PPSS -07	7.6×7.6×12.62	2.38
PPSS -08	7.6×7.59×12.59	2.47
PPSS -09	7.59×7.61×12.58	2.46
PPSS -10	7.58×7.62×12.6	2.44
PPSS -11	7.62×7.6×12.6	2.4
PPSS -12	7.61×7.61×12.61	2.42
PWSS-01	7.6×7.61×12.62	2.24
PWSS -02	7.59×7.59×12.59	2.25
PWSS -03	7.61×7.58×12.61	2.27
PWSS -04	7.59×7.6×12.62	2.19
PWSS -05	7.6×7.61×12.6	2.28
PWSS -06	7.61×7.59×12.6	2.24
PWSS -07	7.61×7.61×12.61	2.27
PWSS -08	7.6×7.62×12.62	2.23
PWSS -09	7.59×7.58×12.58	2.18
PWSS -10	7.62×7.6×12.6	2.22
PWSS -11	7.61×7.6×12.61	2.25
PWSS -12	7.6×7.61×12.59	2.23

3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (ผิวขรุขระ)

การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงได้ใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Model DR-44 Direct Shear Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D5607 และได้ใช้หินทรายทั้ง 3 ชนิด ทั้งหมด 12 ก้อน โดยตัดหินให้มีขนาด $100 \times 100 \times 150 \text{ mm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นทำการให้แรงดึงแบบแนวเส้น (Tension-induced fracture) เพื่อสร้างรอยแตก และใช้ค่าความเค้นตั้งฉาก 4 ระดับ คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa และตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง หลังจากมีการให้แรงดึงแบบแนวเส้น

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PKSS-01	7.61×7.6×12.6	2.2
PKSS-02	7.62×7.61×12.62	2.23
PKSS-03	7.62×7.59×12.61	2.24
PKSS-04	7.6×7.6×12.61	2.25
PPSS-01	7.63×7.6×12.6	2.38
PPSS-02	7.61×7.61×12.6	2.36
PPSS-03	7.62×7.63×12.61	2.39

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
PPSS-04	7.63×7.62×12.61	2.42
PWSS-01	7.6×7.6×12.6	2.25
PWSS-02	7.62×7.6×12.62	2.27
PWSS-03	7.62×7.62×12.7	2.19
PWSS-04	7.61×7.64×12.65	2.28



บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

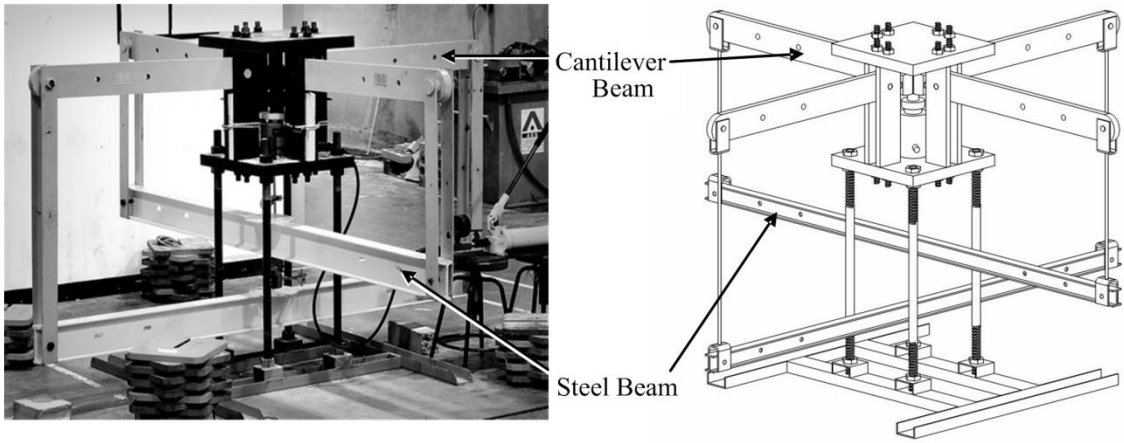
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงและสมการที่ใช้ในการคำนวณผลการทดสอบ โดยการทดสอบเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาวะของความเค้นที่กระทำบนรอยแตกของหิน และจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี

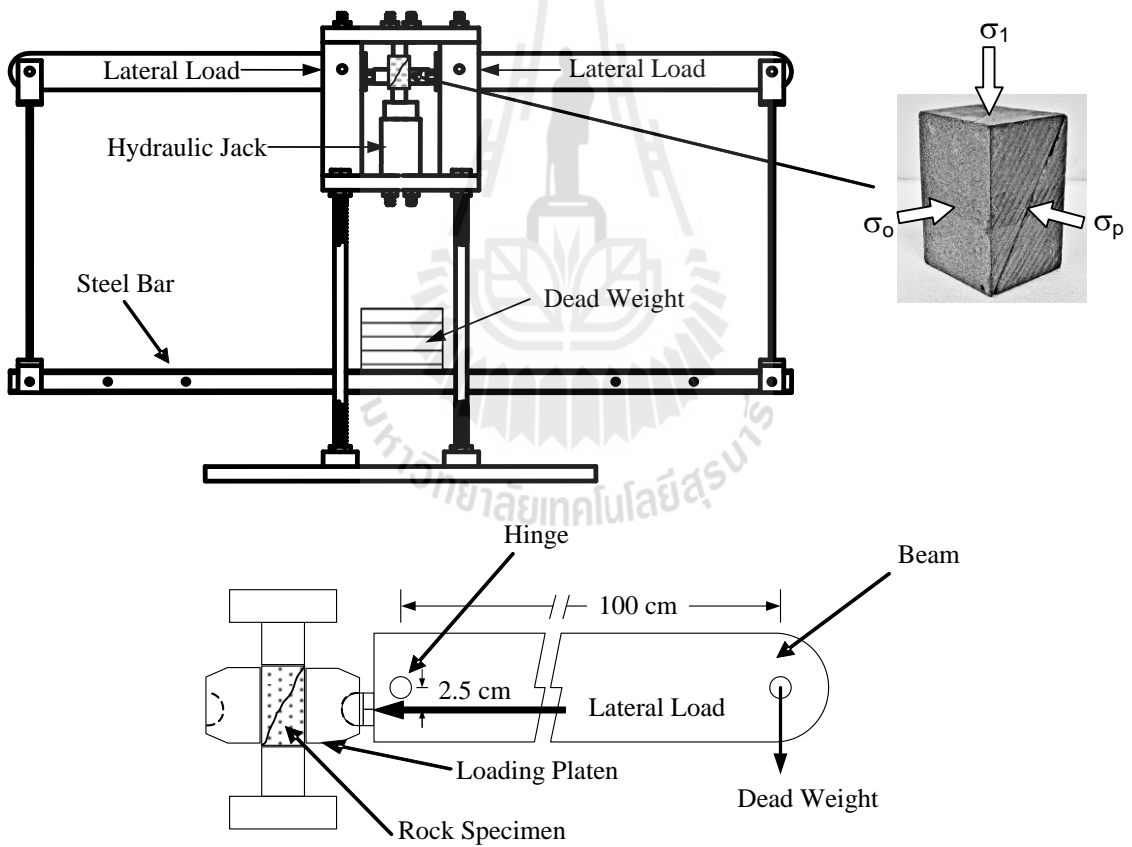
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

โครงกทดสอบในสามแกนจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นฐานการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) กำหนดค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 54 mm) และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

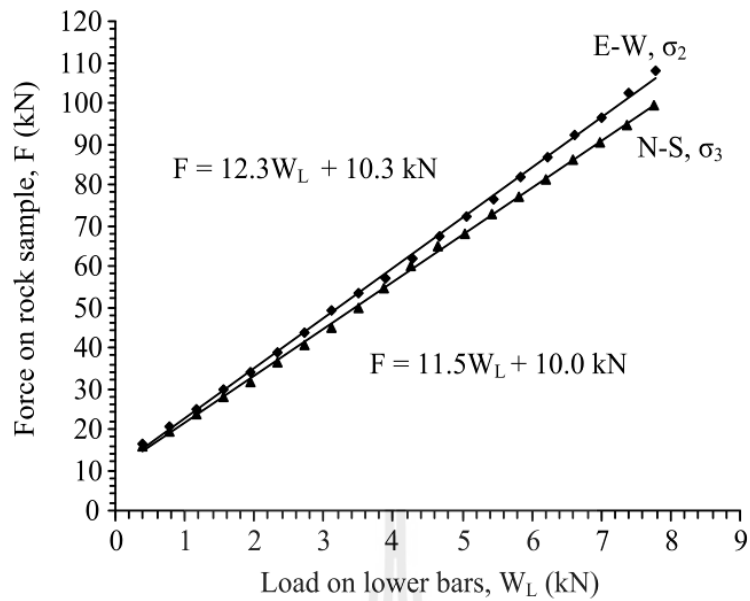
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังเฉือนสูงสุดในสามแกน โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากคานหดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อกันระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแกนของคานหดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานหดแรงจะใช้เพลายึดติดกับเสายึดคานหดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานหดแรงทุกข้างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงมีค่าเท่ากับ 12.3 เท่า ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) และ 11.5 เท่า ในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นที่กระทำในแนวตั้ง (σ_1) ซึ่งสามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดจาก σ_p โดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณแก้ไขค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.3 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง

การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดและศึกษาผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อรอยแตกของหิน โดยทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ สำหรับผิวขรุขระ คือ (1) การทดสอบที่กำหนดให้ความเค้นขนานกับรอยแตกเป็นสัดส่วนกับความเค้นบนรอยแตก (σ_p/σ_o) โดยมีค่าระหว่าง 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa และ (2) การทดสอบที่กำหนดให้ค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่เป็น 1, 2 และ 3 MPa และความเค้นบนรอยแตก (σ_o) ผันแปรระหว่าง 1.5 ถึง 6 MPa

การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงสำหรับผิวเรียบ ได้กำหนดให้ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่เท่ากับ 1, 2 และ 3 MPa และความเค้นบนรอยแตกผันแปรระหว่าง 1 ถึง 6 MPa การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงทั้งรอยแตกเรียบและรอยแตกขรุขระได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินทรายก่อนการทดสอบ

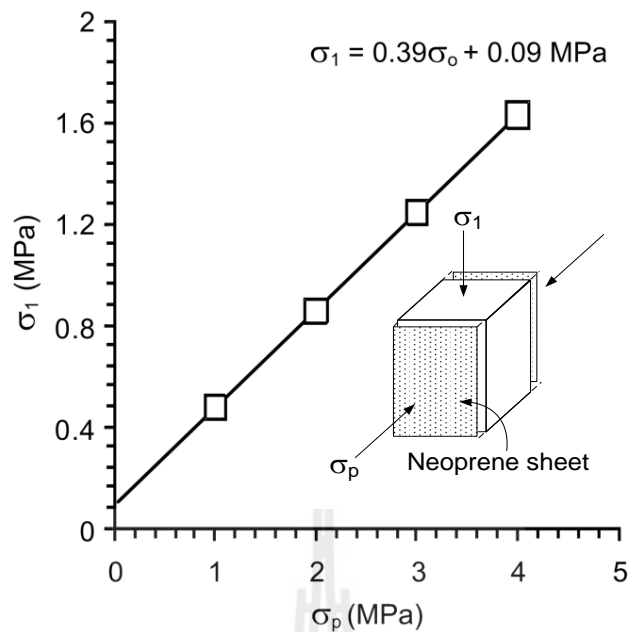
นำตัวอย่างหินทรายที่จะใช้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงมาสร้างรอยแตกในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น จากนั้นนำมาประกบกันแล้วประกบซ้ำด้วยแผ่น Neoprene เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความเสียหายระหว่างตัวอย่างหินและเบ้ากดทดสอบ ซึ่งผลของการสอบเทียบผลกระทบของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับค่าความเค้นขนานกับรอยแตกแสดงในรูปที่ 4.4 โดยแผ่น Neoprene ดังกล่าวจะถูกติดรอบตัวอย่างทั้งหกด้านสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง

4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินทรายในโครงกดทดสอบ

การติดตั้งตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริง (ผิวขรุขระและผิวเรียบ) มีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างหินทรายที่จะทดสอบและเตรียมผู้ช่วยเพื่อยกคานทั้ง 4 ด้าน
- 2) ยกคานในแนวตะวันตก-ตะวันออกขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างหินทรายเข้าไปในแท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับแท่งตัวอย่างสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นบนรอยแตก จากนั้นยกคานในแนวเหนือ-ใต้ขึ้นเพื่อใส่แท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับแท่งตัวอย่างสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นขนานกับรอยแตก
- 3) ใส่หัวกดให้แรงด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน
- 4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านแรงทั้งความเค้นบนรอยแตกและความเค้นที่ขนานกับรอยแตก จากนั้นเพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้
- 5) กดตัวอย่างหินทรายด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งสังเกตเห็นค่ากำลังเฉือนสูงสุดจากมาตรวัดแรงดันในแนวแกน และกดตัวอย่างต่อไปจนกระทั่งบันทึกค่าความเค้นเฉือนคงค้างได้ประมาณ 5-10 ค่า

หมายเหตุ การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงในกรณีนี้ที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์ ไม่ต้องใช้คานในแนวเหนือ-ใต้



รูปที่ 4.4 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณความเสียหายระหว่างตัวอย่างหินและเบ้ากดทดสอบ

4.3.3 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว

ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินทรายในแต่ละแนวแกน โดยทำการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบและในขณะที่ตัวอย่างหินทรายรับแรงกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งถึงค่ากำลังเฉือนสูงสุด

4.4 วิธีการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง (ผิวขรุขระ)

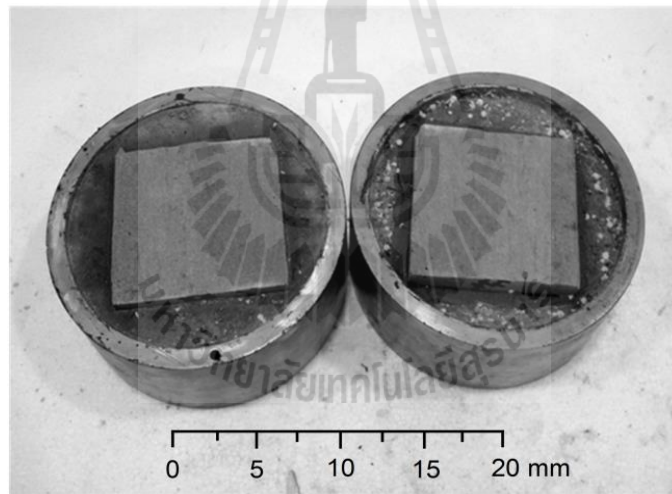
วิธีการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

4.4.1 การเตรียมตัวอย่างหินทรายก่อนการทดสอบ

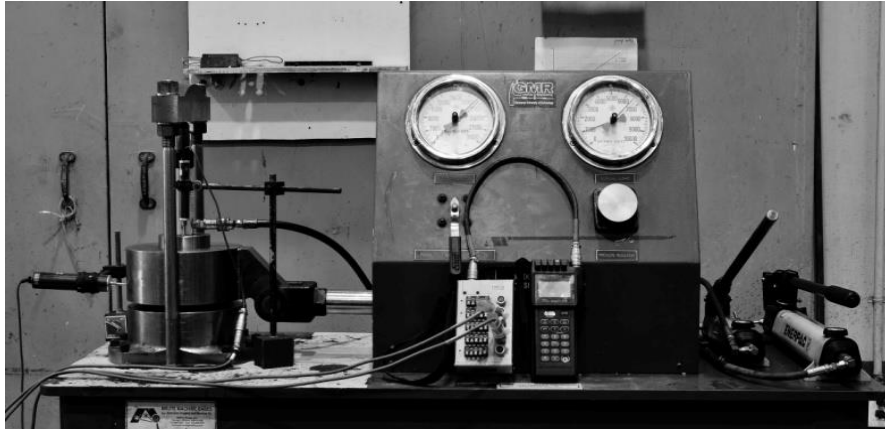
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบภายใต้การให้แรงในแนวตั้งฉากกับรอยแตกเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 MPa โดยดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D5607-08 ระหว่างการทดสอบได้มีการอ่านและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวแรงกดของตัวอย่างหินเพื่อนำไปคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหินต่อไป

4.4.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินทรายในเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง

- 1) สร้างรอยแตกในตัวอย่างหินทรายด้วยวิธีการให้แรงดึงแบบแนวเส้น
- 2) ทำการวัดขนาดของตัวอย่างหินอีกครั้งแล้วทำการจดบันทึกข้อมูลเพื่อหาค่าการเปิดเผยของรอยแตก
- 3) นำตัวอย่างหินมาทำการหล่อปูนยึดติดเข้ากับเบ้าเหล็กของเครื่องทดสอบ โดยทำการหล่อทีละครั้งก่อนดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อปูนที่หล่อก้อนแรกไว้แห้งแล้วจึงนำตัวอย่างหินอีกครั้งก้อนที่เหลือมาทำการหล่ออีกครั้ง โดยวางให้รอยแตกของตัวอย่างหินทรายประกบกันสนิท จากนั้นรอประมาณ 12 ชั่วโมง จนกระทั่งปูนที่หล่อไว้แห้ง
- 4) ทำการประกอบเครื่องทดสอบดังรูปที่ 4.6 โดยมีการติดตั้งมาตรวัดระยะการเคลื่อนตัว (L.V.D.T) ทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อวัดค่าระยะการกระดกและการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนของตัวอย่าง
- 5) กดตัวอย่างหินทรายด้วยปัมไฮดรอลิกจนกระทั่งสังเกตเห็นค่ากำลังเฉือนสูงสุดในขณะที่ค่าความเค้นตั้งฉากมีการผันแปร 4 ระดับ คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างหินทรายบางส่วนหลังจากหล่อปูนยึดติดกับเบ้าเหล็กของเครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง



รูปที่ 4.6 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรงด้วยเครื่อง SBEL-DR44



บทที่ 5

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงในทุกอัตราส่วนของค่าความเค้นขนานกับรอยแตก และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง โดยการทดสอบได้ใช้โครงทดสอบในสามแกนจริง และเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (SBEL DR44)

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริง

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงได้ทำการทดสอบบนรอยแตกผิวขรุขระ และรอยแตกผิวเรียบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ (1) การทดสอบที่กำหนดให้ความเค้นขนานกับรอยแตกเป็นสัดส่วนต่อค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_p/σ_o) (2) การทดสอบที่กำหนดให้ค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่ และ (3) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวเรียบซึ่งกำหนดให้ความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่

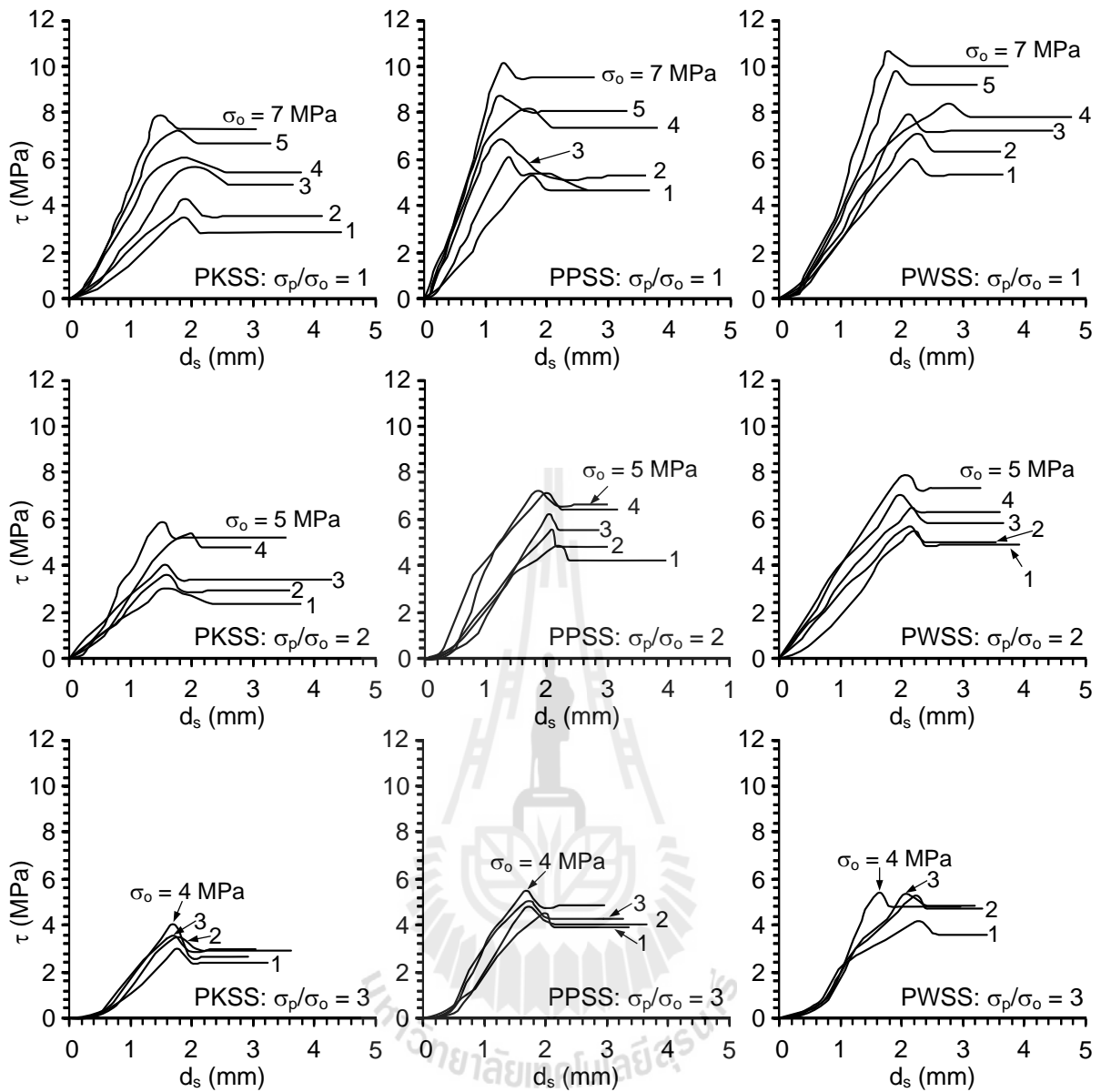
5.1.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวขรุขระ (กรณีที่มีการผันแปรอัตราส่วนของค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_p/σ_o))

การทดสอบชุดนี้ได้กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกและค่าความเค้นบนรอยแตกมีค่าเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa ในตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายทั้งสามชนิด รูปที่ 5.1 แสดงค่ากำลังเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินทรายบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก (d_n) และค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s)

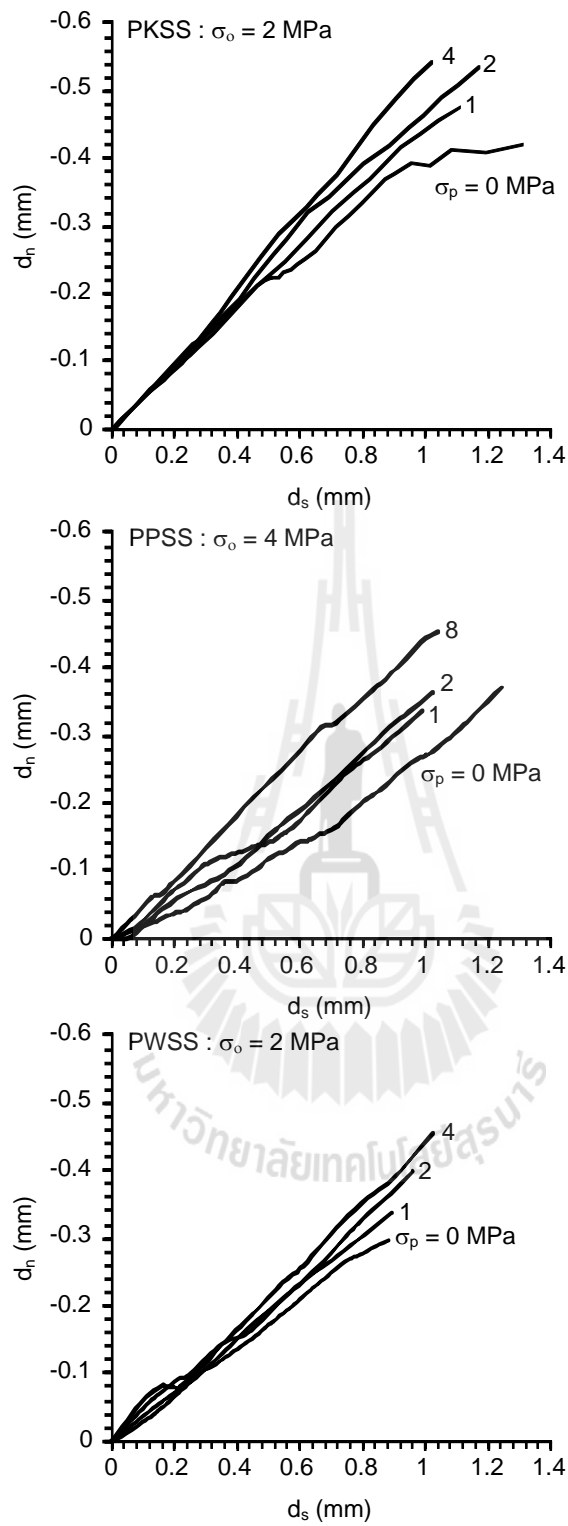
ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด) สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกซึ่งเป็นกรณีที่มีการผันแปรอัตราส่วนค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นที่อยู่บนรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 5.3 จากนั้นนำค่าความเค้นหลักในแนวแกนจากรูปที่ 5.3 มาใช้ในการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของการผันแปรอัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตกหารด้วยค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_p/σ_o) กับค่ามุมเสียดทานในรูปที่ 5.4 สามารถนำไปสู่การพัฒนาสมการต่อไป

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนในกรณีที่ผันแปรอัตราส่วน (σ_p/σ_o)

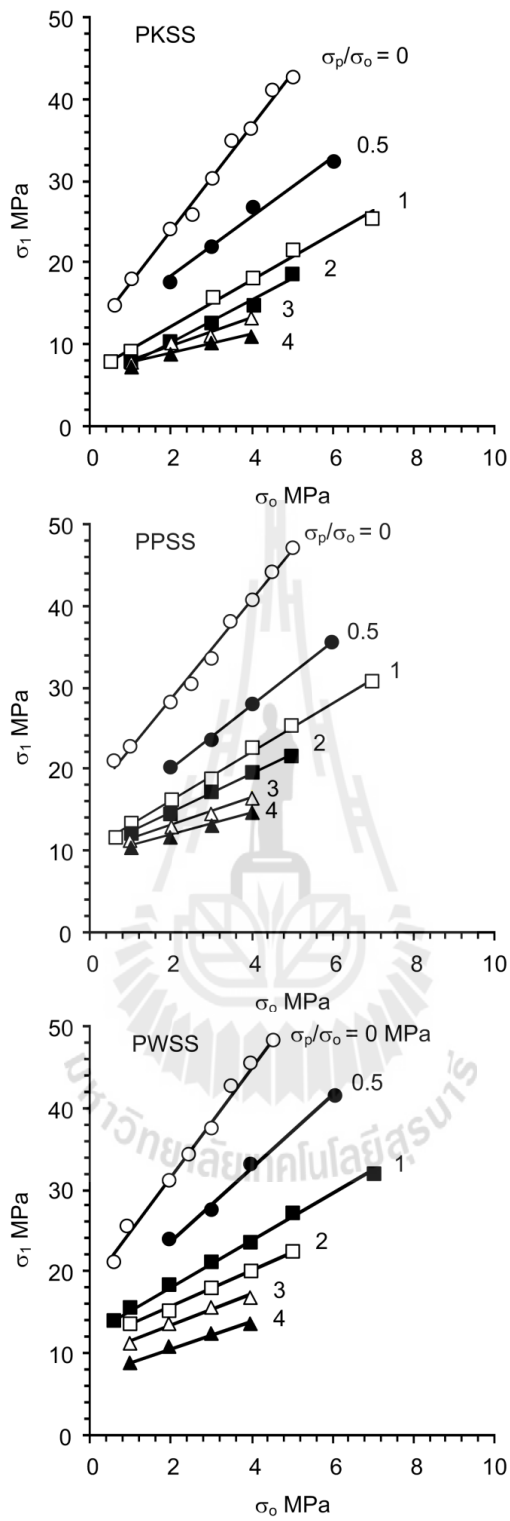
σ_p/σ_o	σ_p (MPa)	σ_o (MPa)	PKSS			PPSS			PWSS		
			σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0.6	14.83	4.16	6.16	21.10	5.72	8.88	20.92	5.68	8.80
	0	1	18.01	5.25	7.37	22.65	6.41	9.37	25.73	7.18	10.71
	0	2	24.21	7.55	9.62	28.01	8.50	11.26	30.79	9.20	12.47
	0	2.5	26.61	8.53	10.44	30.26	9.44	12.01	34.11	10.40	13.69
	0	3	30.26	9.81	11.83	33.56	10.59	13.15	37.67	11.67	15.01
	0	3.5	34.90	11.35	13.59	37.96	12.11	14.92	42.78	13.32	17.00
	0	4	36.43	12.11	14.04	39.49	12.87	15.37	45.60	14.40	18.01
	0	4.5	41.01	13.63	15.81	41.81	13.82	16.16	48.67	15.54	19.13
	0	5	42.54	14.38	16.25	44.07	14.77	16.92	51.05	16.51	19.94
0.5	1	2	17.53	5.88	6.73	20.21	6.55	7.89	24.03	7.51	9.54
	1.5	3	22.00	7.75	8.23	23.42	8.11	8.84	27.15	9.04	10.46
	2	4	27.14	9.79	10.02	27.89	9.97	10.34	33.19	11.29	12.64
	3	6	32.20	12.55	11.35	35.46	13.37	12.76	41.45	14.86	15.35
1	0.6	0.6	7.69	2.37	3.07	11.58	3.34	4.75	13.40	3.80	5.54
	1	1	8.98	3.00	3.46	13.27	4.07	5.31	14.78	4.45	5.97
	2	2	11.92	4.48	4.30	16.12	5.53	6.11	18.41	6.10	7.10
	3	3	15.94	6.24	5.60	18.70	6.93	6.80	21.32	7.57	7.93
	4	4	18.11	7.52	6.11	22.56	8.64	8.04	23.36	8.84	8.38
	5	5	21.72	9.18	7.24	25.22	10.06	8.76	27.69	10.67	9.83
	7	7	25.15	11.54	7.86	30.54	12.88	10.19	31.61	13.15	10.66
2	2	1	7.91	2.73	2.99	12.15	3.79	4.83	13.78	4.20	5.54
	4	2	10.23	4.05	3.56	14.71	5.18	5.55	15.22	5.30	5.72
	6	3	12.38	5.35	4.06	17.32	6.58	6.20	17.98	6.75	6.49
	8	4	14.80	6.70	4.67	19.47	7.87	6.70	20.12	8.03	6.97
	10	5	18.66	8.41	5.91	21.49	9.12	7.14	22.37	9.34	7.52
3	3	1	7.85	2.71	2.97	11.35	3.59	4.48	10.62	3.40	4.16
	6	2	10.02	4.00	3.47	13.12	4.78	4.81	14.23	5.06	5.29
	9	3	11.22	5.06	3.56	14.66	5.91	5.05	15.54	6.13	5.43
	12	4	13.24	6.31	4.00	16.61	7.15	5.46	16.51	7.13	5.45
4	4	1	7.43	2.61	2.79	10.59	3.40	4.15	8.68	2.92	3.33
	8	2	9.03	3.76	3.04	11.82	4.45	4.25	10.73	4.18	3.78
	12	3	10.12	4.78	3.08	13.24	5.56	4.44	12.15	5.29	3.96
	16	4	11.11	5.78	3.08	14.59	6.65	4.58	13.57	6.39	4.15



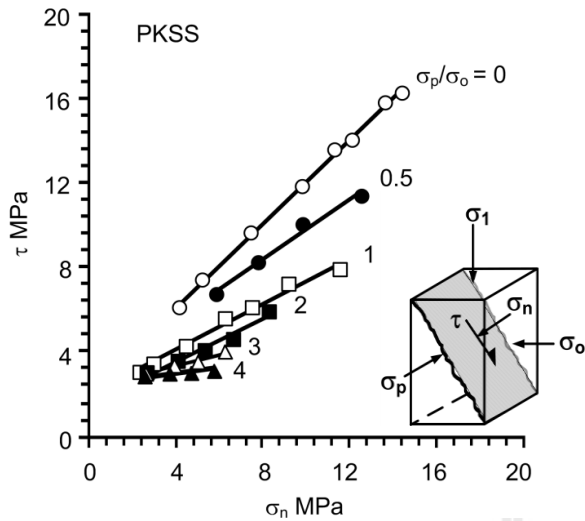
รูปที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนในบางอัตราส่วน (σ_p/σ_o) สำหรับหินทรายทั้งสามชนิด



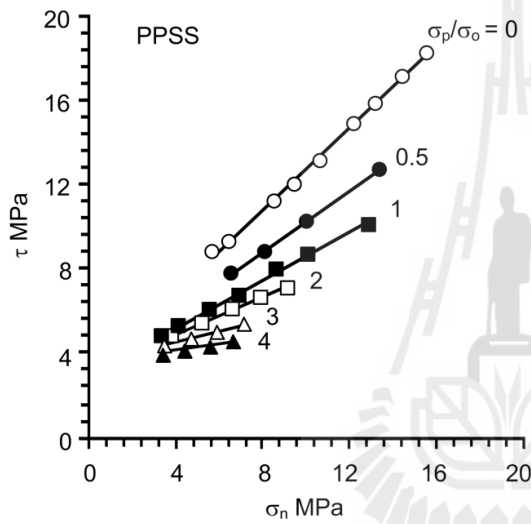
รูปที่ 5.2 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก (d_h) ต่อการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) สำหรับตัวอย่างหินทรายบางส่วน



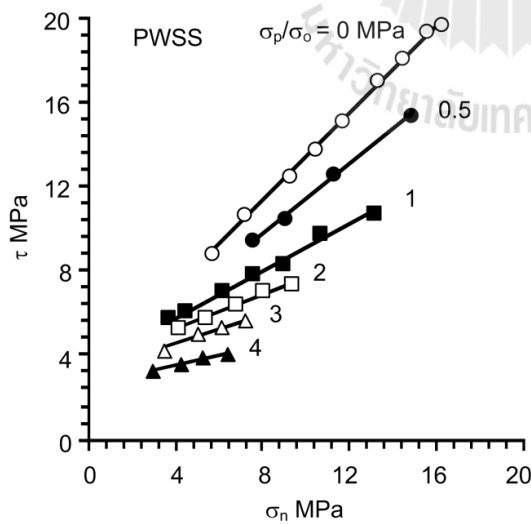
รูปที่ 5.3 ค่าความเค้นหลักในแนวแกนในรูปแบบของค่าความเค้นบนรอยแตกผิวขรุขระ



σ_p/σ_o (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	45	2.01	0.99
0.5	35	2.77	0.98
1	29	1.91	0.98
2	27	1.51	0.98
3	15	2.27	0.97
4	5	2.62	0.98
C* _{average} = 2.18			



σ_p/σ_o (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	44	3.10	0.99
0.5	36	3.08	0.99
1	30	2.93	0.99
2	24	3.23	0.99
3	15	3.51	0.99
4	8	3.67	0.99
C* _{average} = 3.25			



σ_p/σ_o (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	46	3.13	0.99
0.5	39	3.37	0.99
1	29	3.56	0.99
2	22	3.74	0.99
3	19	3.22	0.99
4	12	2.72	0.97
C* _{average} = 3.14			

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกผิว
ขรุขระสำหรับกรณีที่มีการผันแปรอัตราส่วน (σ_p/σ_o)

5.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวขรุขระ (กรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตก (σ_p) มีค่าคงที่)

การทดสอบชุดนี้ได้กำหนดให้ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่ที่สามระดับคือ 1, 2 และ 3 MPa ในขณะที่ค่าความเค้นบนรอยแตกผันแปรจาก 1.5-6 MPa ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสำหรับหินทรายทั้งสามชนิด รูปที่ 5.5 ได้เสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในรูปแบบของค่าความเค้นตั้งฉาก โดยจากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่กับค่าความเค้นยึดติดที่แสดงในรูปที่ 5.5 สามารถนำไปสู่การพัฒนาสมการต่อไป

5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวเรียบ (กรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่)

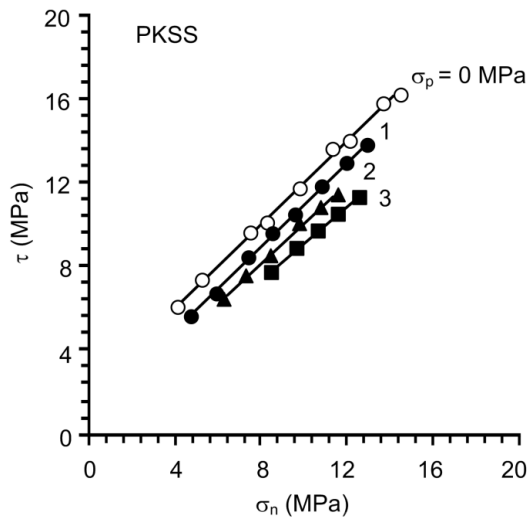
การทดสอบชุดนี้ได้กำหนดให้ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่ที่สามระดับคือ 0, 1 และ 2 MPa ในขณะที่ค่าความเค้นบนรอยแตกผันแปรจาก 2-10 MPa รูปที่ 5.6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในรูปแบบค่าความเค้นตั้งฉาก โดยผลการทดสอบในชุดนี้ทำให้ทราบว่าค่าความเค้นล้อมรอบจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนเมื่อรอยแตกนั้นเป็นรอยแตกขรุขระ แต่ถ้ารอยแตกนั้นเป็นรอยแตกผิวเรียบค่าความเค้นล้อมรอบจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน

5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

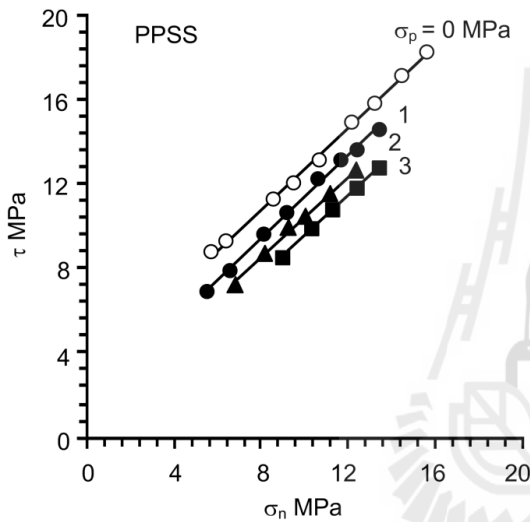
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงได้กำหนดให้ค่าความเค้นตั้งฉากมีค่าคงที่ที่สี่ระดับคือ 1, 2, 3 และ 4 MPa รูปที่ 5.7 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน ผลการทดสอบชุดนี้ใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงในกรณีที่ความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.8

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระกรณีที่ σ_p คงที่

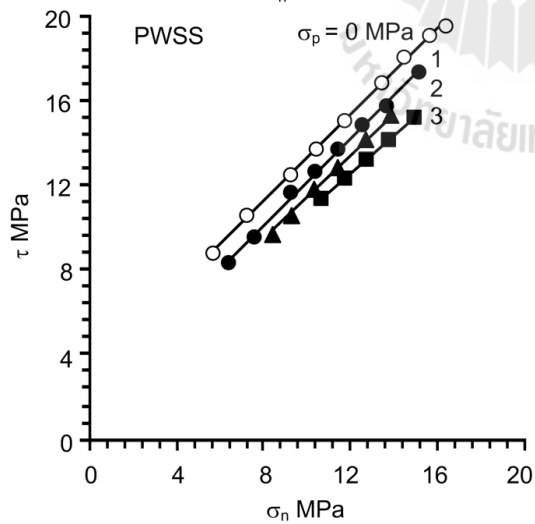
σ_p (MPa)	σ_o (MPa)	PKSS			PPSS			PWSS		
		σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.5	14.52	4.75	5.64	17.50	5.50	6.93	20.78	6.32	8.35
	2	17.53	5.88	6.73	20.21	6.55	7.89	24.03	7.51	9.53
	2.5	22.17	7.41	8.52	24.80	8.07	9.66	29.21	9.18	11.57
	3	25.25	8.56	9.63	27.53	9.13	10.62	32.20	10.30	12.64
	3.5	27.86	9.59	10.55	31.78	10.57	12.25	35.07	11.40	13.67
	4	31.35	10.84	11.84	34.41	11.60	13.17	37.92	12.48	14.69
	4.5	34.41	11.98	12.95	35.95	12.36	13.62	40.79	13.57	15.72
	5	36.86	12.97	13.80	38.50	13.38	14.51	45.12	15.03	17.37
2	2.5	17.14	6.16	6.34	19.35	6.71	7.29	24.86	8.09	9.68
	3	20.34	7.33	7.51	23.34	8.09	8.81	27.89	9.22	10.78
	3.5	23.34	8.46	8.59	26.39	9.22	9.91	30.42	10.23	11.66
	4	27.14	9.79	10.02	27.89	9.97	10.34	33.19	11.30	12.64
	4.5	29.39	10.72	10.77	30.96	11.11	11.46	37.09	12.65	14.11
	5	31.45	11.61	11.45	34.02	12.26	12.57	40.14	13.78	15.21
3	4	22.08	8.52	7.83	23.63	8.91	8.50	30.45	10.61	11.45
	4.5	25.11	9.65	8.93	27.61	10.28	10.00	33.17	11.67	12.41
	5	27.50	10.63	9.74	29.98	11.25	10.82	35.74	12.69	13.31
	5.5	29.61	11.53	10.44	32.85	12.34	11.84	38.25	13.69	14.18
	6	32.20	12.55	11.35	35.46	13.37	12.76	41.45	14.86	15.35



σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	45	2.00	0.99
1	45	0.95	0.99
2	44	0.53	0.99
3	42	0.54	0.99
$\phi^*_{average} = 44.0$			

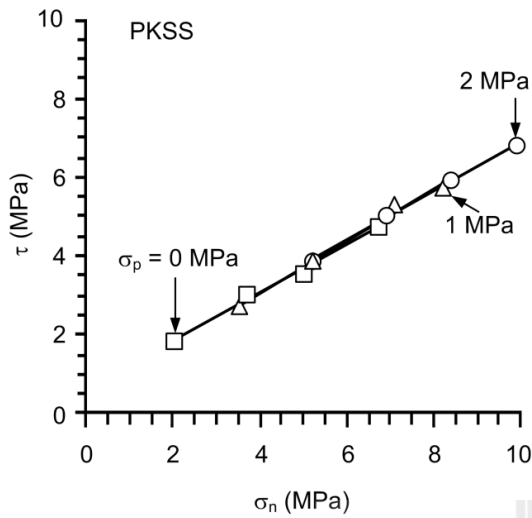


σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	44	3.10	0.99
1	44	1.62	0.99
2	43	1.18	0.99
3	43	0.17	0.99
$\phi^*_{average} = 43.5$			

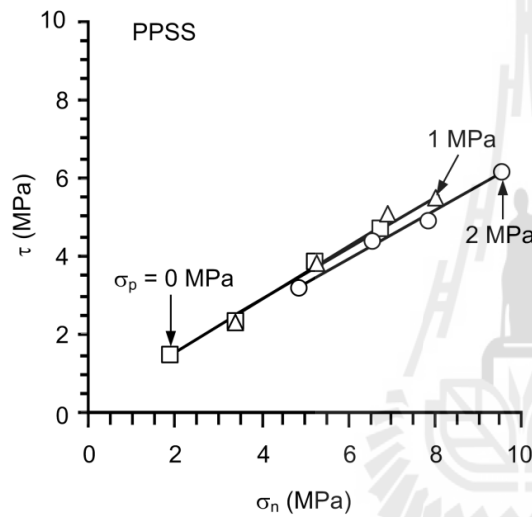


σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	46	3.13	0.99
1	46	1.90	0.99
2	44	1.77	0.99
3	42	1.79	0.99
$\phi^*_{average} = 44.5$			

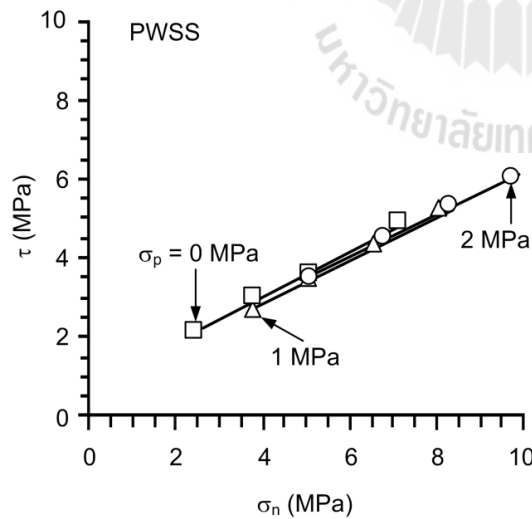
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกผิว
 ขรุขระกรณีที่มี σ_p มีค่าคงที่



σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	31	0.69	0.99
1	33	0.45	0.97
2	32	0.70	0.99
$\phi^*_{\text{average}} = 32^\circ$		$c^*_{\text{average}} = 0.61$	

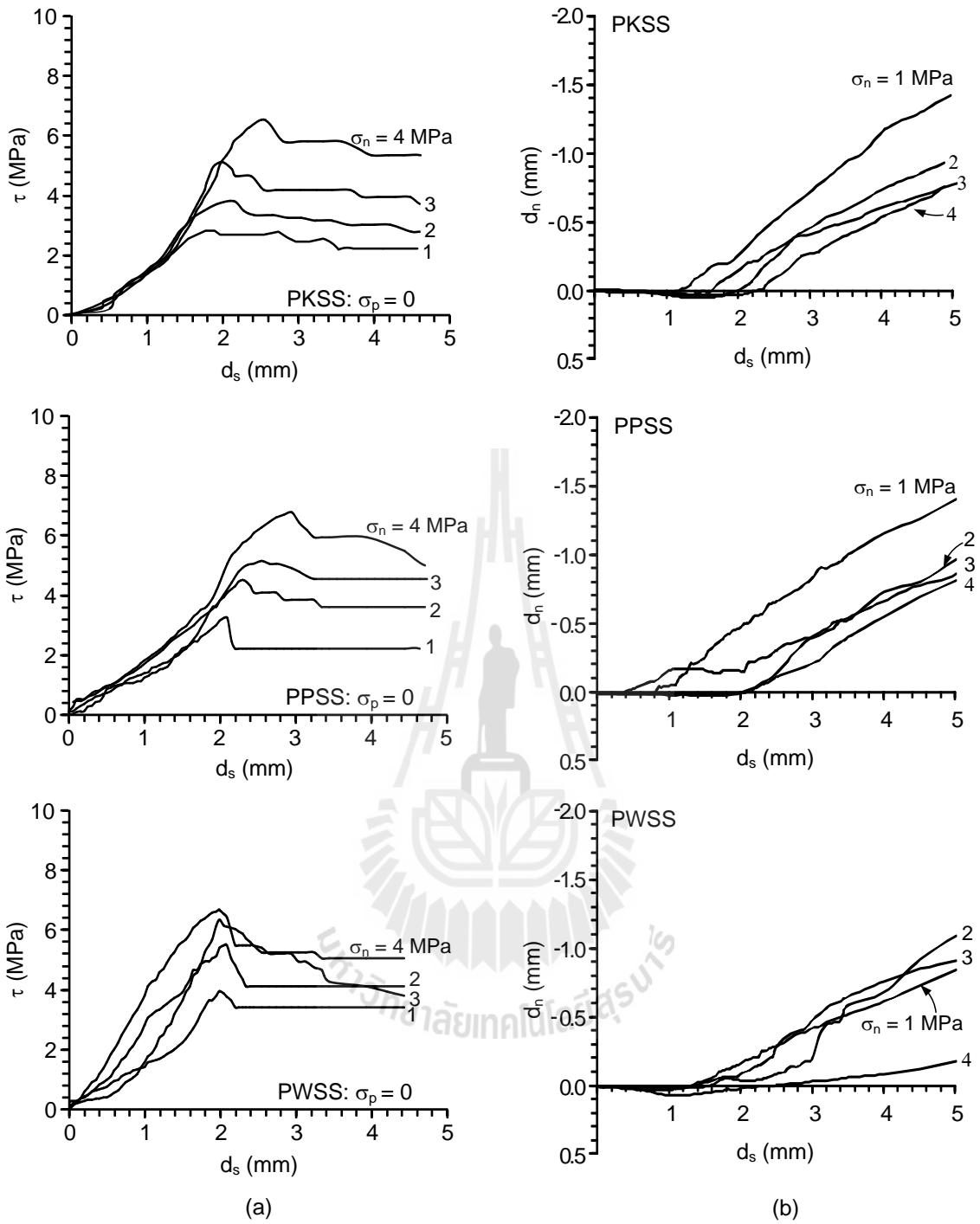


σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	34	0.19	0.99
1	33	0.36	0.97
2	31	0.32	0.99
$\phi^*_{\text{average}} = 32^\circ$		$c^*_{\text{average}} = 0.61$	

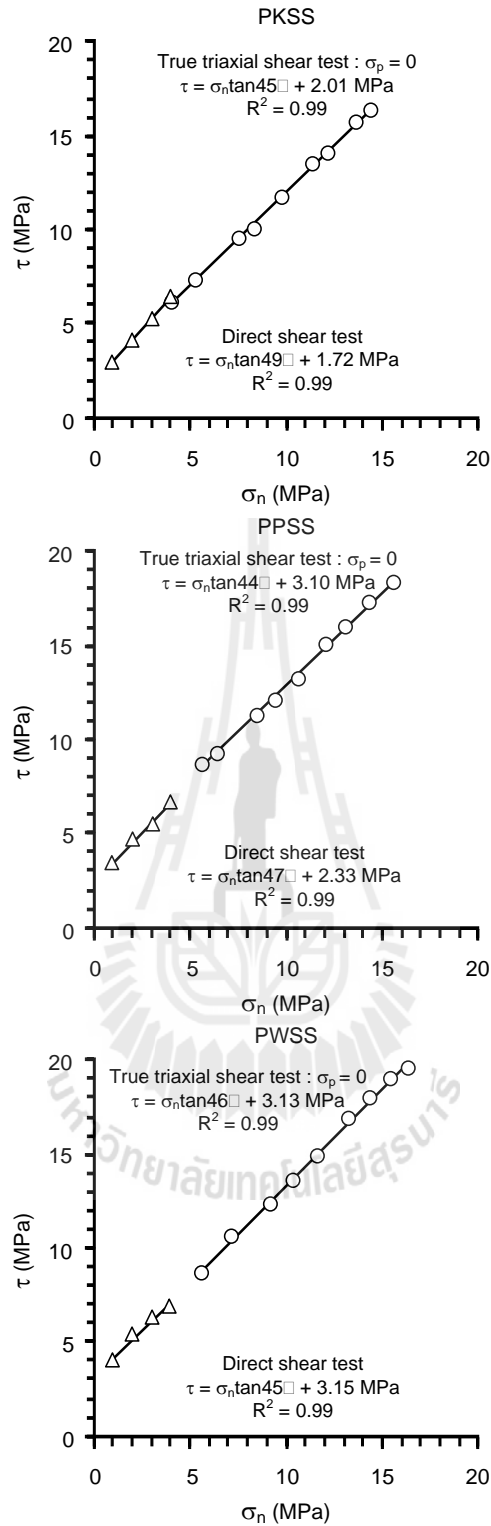


σ_p (MPa)	$\tau = \sigma_n \tan \phi^* + c^*$		R^2
	ϕ^* (Degrees)	c^* (MPa)	
0	31	0.71	0.99
1	30	0.65	0.99
2	30	0.73	0.99
$\phi^*_{\text{average}} = 30^\circ$		$c^*_{\text{average}} = 0.70$	

รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนรอยแตกผิวเรียบสำหรับตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด



รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง: (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือน ในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตก (b) ค่าการเคลื่อนตัวของ รอยแตกในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงกรณีที่มีความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์

บทที่ 6

การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายการพัฒนาสมการและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าความเค้นหลักและค่าความเค้นล้อมรอบ ค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นตั้งฉาก โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะนำไปสู่การพัฒนาเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนใหม่ที่ได้คำนึงถึงผลกระทบของค่าความเค้นล้อมรอบที่กระทำต่อรอยแตกหิน

6.1 การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉาก

การทดสอบกำลังเฉือนในสามแกนจริงทั้งกรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกเป็นสัดส่วนกับค่าความเค้นบนรอยแตก และในกรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่สามารถคำนวณค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากได้จาก (Jaeger et al., 2007)

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_0) \sin 2\beta \quad (6.1)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_0) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_0) \cos 2\beta \quad (6.2)$$

โดยที่ σ_1 คือ ความเค้นหลักในแนวแกน
 σ_0 คือ ความเค้นล้อมรอบ
 β คือ มุมระหว่างความเค้นหลักในแนวแกนกับความเค้นตั้งฉาก โดยตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามุมเท่ากับ 59.1° ทุกตัวอย่าง

6.2 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตกคงที่

การทดสอบชุดนี้สามารถคำนวณค่ากำลังเฉือนสูงสุดจากอัตราส่วนค่าความเค้นล้อมรอบที่ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 MPa โดยที่อัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตกที่มีค่าเท่ากับ 0 และ 1 เทียบได้กับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกน (Triaxial shear tests) สำหรับการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) และการเคลื่อนตัวของรอยแตก (d_n) สามารถคำนวณได้จาก

$$d_s = \frac{1}{2} (d_1 - d_0) \sin 2\beta \quad (6.3)$$

$$d_n = \frac{1}{2} (d_1 + d_0) + \frac{1}{2} (d_1 - d_0) \cos 2\beta \quad (6.4)$$

โดยที่ d_1 คือ การเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ตรวจวัดขณะทำการทดสอบ
 d_0 คือ การเคลื่อนตัวในทิศทางของค่าความเค้นบนรอยแตกที่ตรวจวัดขณะทำการทดสอบ

ค่าความเค้นหลักในแนวแกนมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และสามารถแสดงผลในรูปแบบของความเค้นตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยยึดเกณฑ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นของคูลอมบ์เพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่ากำลังเฉือนสูงสุดภายใต้การผันแปรอัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตก ดังสมการ

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi^*) + c^* \quad (6.5)$$

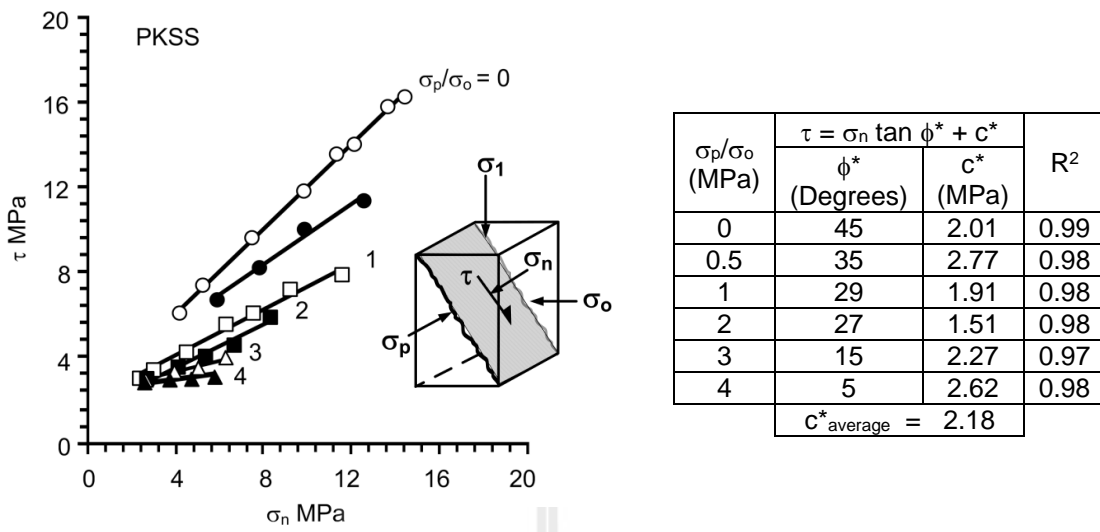
โดยที่ ϕ^* คือ ค่ามุมเสียดทานปรากฏ (Apparent friction angle)
 c^* คือ ค่าความเค้นยึดติดปรากฏ (Apparent cohesion)

การกำหนดตัวแปรใหม่เป็น ϕ^* และ c^* เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนของค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง โดยสมการที่ 6.5 ใช้สำหรับฟิตข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในรูปแบบของค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 จากผลการทดสอบหินทรายทุกชนิดในกรณีที่อัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตกคงที่ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ϕ^* จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่ออัตราส่วนค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความเค้นบนรอยแตกเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียลดังแสดงในรูปที่ 6.2

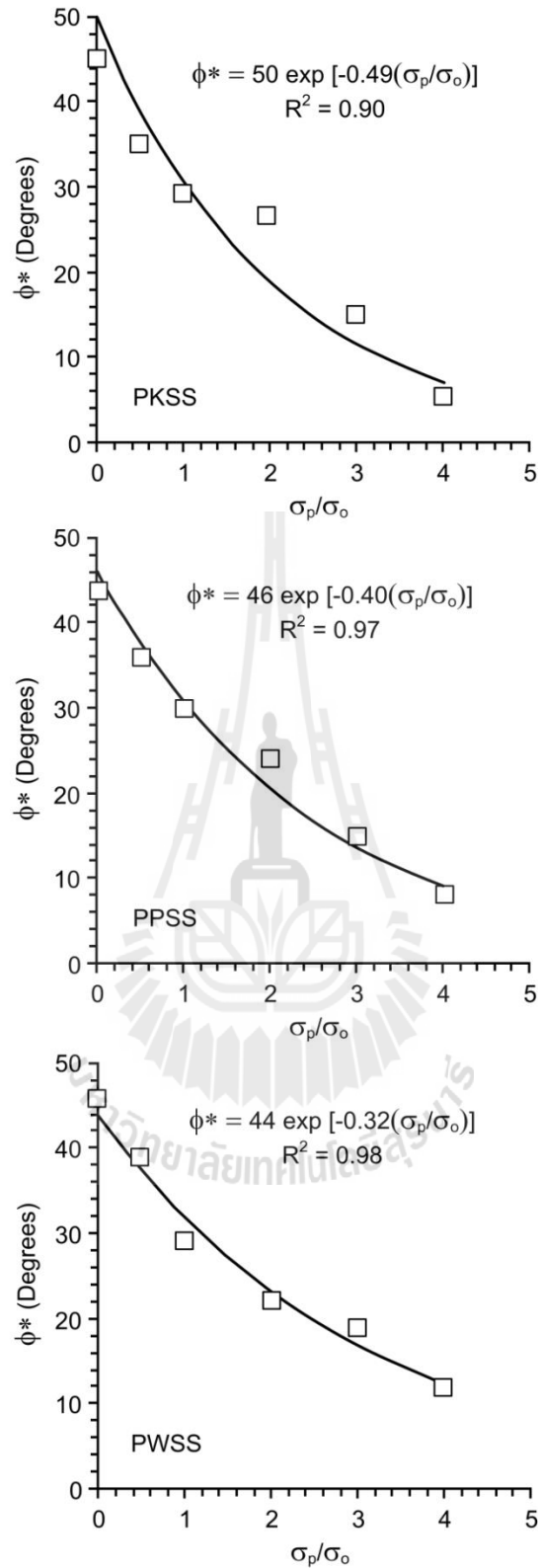
$$\phi^* = \alpha \exp [-k(\sigma_p/\sigma_0)] \quad (6.6)$$

โดยที่ α และ k คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบ

ค่าความเค้นยึดติดปรากฏที่ได้จากการทดสอบนี้มีแนวโน้มที่ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกและค่าความเค้นบนรอยแตก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.18, 2.96 และ 3.14 MPa สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง ภูพาน และพระวิหาร ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงโดยที่อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกและค่าความเค้นบนรอยมีค่าคงที่สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง



รูปที่ 6.2 ค่ามุมเสียดทานปรากฏ (ϕ^*) ในรูปแบบของอัตราส่วนค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกหารด้วยค่าความเค้นบนรอยแตก (σ_p/σ_o)

6.3 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่

การทดสอบชุดนี้กำหนดให้ค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่ 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 MPa ขณะที่ค่าความเค้นบนรอยแตกผันแปรจาก 1.5 ถึง 6 MPa รูปที่ 6.3 แสดงผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในรูปแบบของค่าความเค้นตั้งฉาก และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\sigma_p=0$) ดังนั้นจึงได้แสดงผลการทดสอบนี้ไว้ในรูปที่ 6.3 ด้วย จากการทดสอบชุดนี้ทำให้พบว่าค่าความเค้นล้อมรอบ (ค่าความเค้นขนานกับรอยแตก) มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลง และความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความเค้นตั้งฉากที่ได้สำหรับทุกระดับของความเค้นขนานกับรอยแตกสามารถอธิบายได้จากสมการ (6.3) ค่ามุมเสียดทานปรากฏมีแนวโน้มที่จะไม่ขึ้นต่อค่าความเค้นขนานกับรอยแตก ในขณะที่ค่าความเค้นยึดติดปรากฏลดลงเมื่อค่าความเค้นขนานกับรอยแตกเพิ่มขึ้น

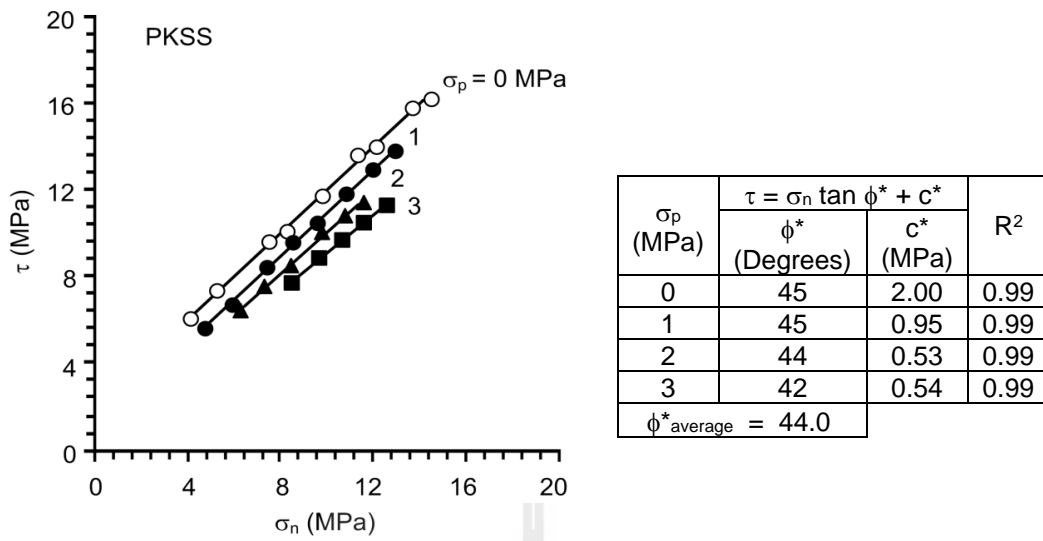
$$c^* = \psi \exp [-\xi (\sigma_p)] \quad (6.7)$$

โดยที่ ψ และ ξ คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบ

ค่าตัวเลขได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับจากรูปที่ 6.4 และค่ามุมเสียดทานปรากฏจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 44° , 43° และ 44° สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง ภูพาน และพระวิหารตามลำดับ

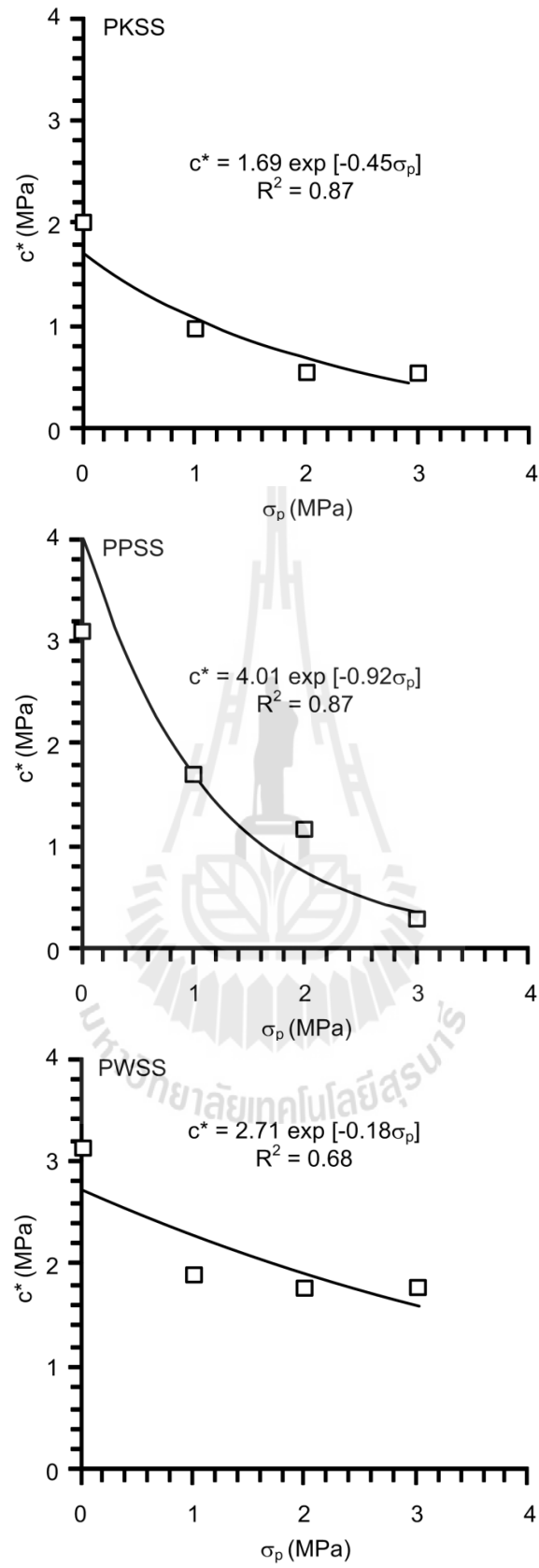
เมื่อทำการแทนค่าสมการที่ (6.6) และ (6.7) ในสมการที่ (6.5) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการกำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณาค่าความเค้นล้อมรอบดังนี้

$$\tau = \sigma_n \tan \{ \alpha \exp [-\kappa(\sigma_p/\sigma_o)] \} + \psi \exp [-\xi (\sigma_p)] \quad (6.8)$$



รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงโดยที่ค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง





รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดปรากฏและค่าความเค้นขนานกับรอยแตกที่มีค่าคงที่

6.4 การคำนวณจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกคงที่ (กรณีที่มีรอยแตกเรียบ)

การทดสอบชุดนี้ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นขนานกับรอยแตกต่อค่าความต้านทานกำลังรับแรงเฉือนบนตัวอย่างหินที่มีรอยแตกเรียบ (Smooth saw-cut surfaces) การทดสอบและการคำนวณได้ดำเนินการเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงบนตัวอย่างที่มีรอยแตกขรุขระ ค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกมีค่าคงที่ และมีการผันแปรค่าความเค้นขนานกับรอยแตก 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 MPa ขณะที่ค่าความเค้นบนรอยแตกผันแปรจาก 2 ถึง 10 MPa โดยที่ผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ (6.5) ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับการทดสอบชุดนี้ของหินทรายทั้ง 3 ชนิด (ดังได้แสดงในบทที่ 5) มีแนวโน้มที่ไม่ขึ้นต่อค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตก สามารถสังเกตได้จากค่ามุมเสียดทานปรากฏและค่าความเค้นยึดติดปรากฏที่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นผลการทดสอบชุดนี้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกสามารถส่งผลกระทบต่อความขรุขระและความแข็งของผนังรอยแตกของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิด

6.5 การคำนวณผลจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงได้ดำเนินการกับตัวอย่างที่มีรอยแตกขรุขระเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริง สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงทั้งค่าความเค้นตั้งฉากและค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่าความเค้นในแนวแกน แต่สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ความเค้นตั้งฉากจะมีค่าคงที่ ในขณะที่ทำการทดสอบ การทดสอบและการคำนวณผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D5607-08) ค่าความเค้นตั้งฉากที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริง เนื่องจากความเค้นที่ให้ถูกจำกัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง และโครงกตทดสอบในสามแกนจริง ซึ่งค่าความเค้นตั้งฉากสูงสุดของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงคือ 4 MPa (สำหรับพื้นผิวรอยแตกขนาน $100 \times 100 \text{ mm}^2$) ในขณะที่ค่าความเค้นตั้งฉากต่ำสุดของโครงกตทดสอบในสามแกนจริงคือ 5 MPa

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างหินจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงที่ใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงเป็นกรณีที่ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์และอยู่บนพื้นฐานกฎเกณฑ์ของโคลอมบ์ ซึ่งจากการทดสอบของทั้ง 2 ชุด ให้ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากความแปรปรวนของคุณสมบัติภายในรอยแตกหิน (จากผลการทดสอบที่ได้แสดงในบทที่ 5) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรง

เงื่อนไขแบบโดยตรง การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงที่อยู่ภายใต้ค่าความเค้นตั้งฉาก และลักษณะการให้แรงที่แตกต่างกัน แต่ผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

การกำหนดค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ชุด ให้อยู่ในเงื่อนไขเดียวกันจะกระทำก็ต่อเมื่อค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์ ($\sigma_p=0$) ดังนั้นสมการ (6.6), (6.7) และ (6.8) สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$\phi^* = \alpha \quad (6.9)$$

$$c^* = \psi \quad (6.10)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \{ \alpha \} + \psi \quad (6.11)$$

เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความเค้นล้อมรอบเป็นศูนย์ ตัวแปร α และ ψ ก็คือค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดของรอยแตก ดังนั้นรูปแบบของสมการ (6.8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบได้ดังนี้

$$\tau = \sigma_n \tan \{ \phi \cdot \exp [-k(\sigma_p/\sigma_o)] \} + c \cdot \exp [-\xi (\sigma_p)] \quad (6.12)$$

สมการ (6.12) เป็นสมการที่สามารถยอมให้มีการเปลี่ยนค่ากำลังรับแรงเฉือนจากเงื่อนไขที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ ($\sigma_p=0$, Direct shear testing) ไปยังเงื่อนไขที่มีความเค้นล้อมรอบ ($\sigma_p=0$, True triaxial shear testing)

บทที่ 7

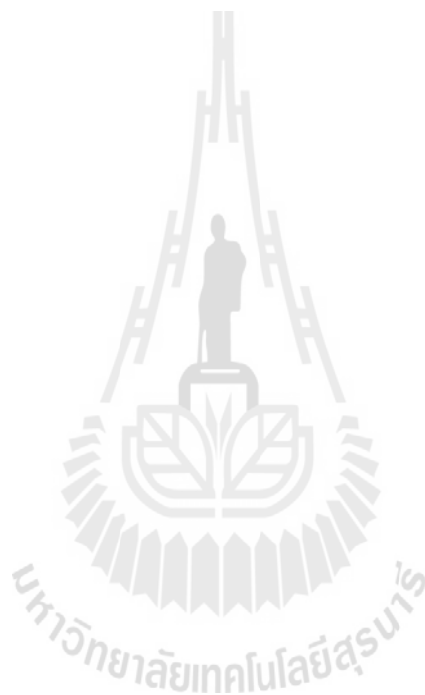
สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของความเค้นที่ขนานกับรอยแตกสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเค้นขนานกับรอยแตกและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนไหล สามารถลดค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของรอยแตกได้ ขนาดของค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดพื้นที่ของการเคลื่อนไหลและการเคลื่อนตัวของรอยแตกสูงขึ้น โดยทั่วไปการลดลงของค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นล้อมรอบ (สำหรับกรณีของอัตราส่วนค่าความเค้นล้อมรอบ $\sigma_r/\sigma_c=1$) สามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบของ Ramamurthy and Arora (1994) ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (ไม่มีค่าความเค้นล้อมรอบ) ไม่ใช่ตัวแทนที่แท้จริงของกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกหรือรอยเลื่อนภายใต้ความเครียดแบบหลายแกนของสภาวะในภาคสนาม

ผลการทดสอบสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าค่าความเค้นขนานกับรอยแตกสามารถก่อให้เกิดความเครียดดึงล้อมรอบ (การกระดก) ของความขรุขระภายในการเปิดเผยของรอยแตกหิน ซึ่งความขรุขระดังกล่าวสามารถเฉือนออกได้โดยง่ายเมื่อรอยแตกอยู่ภายใต้แรงเฉือน และด้วยเหตุนี้ทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีค่าต้านทานแรงเสียดทานต่ำ โดยหลักฐานหนึ่งจากข้อเท็จจริงที่ว่าค่าความเค้นขนานกับรอยแตกไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของพื้นผิวเรียบ ดังนั้นการลดลงของค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานจึงมีความเป็นไปได้ว่าอาจขึ้นกับลักษณะของความขรุขระ สำหรับรอยแตกในหินชนิดอื่นๆ ซึ่งมีพื้นผิวของความขรุขระและความแข็งที่แตกต่างกัน อาจส่งผลให้มุมเสียดทานที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นที่ขนานกับรอยแตกต่างกันไป ความแตกต่างของเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนอาจจำเป็นต่อการอธิบายผลการทดสอบถ้าความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากไม่ได้เป็นสมการเชิงเส้นตรง สำหรับหินประเภทอื่นรูปแบบของสมการที่แตกต่างออกไปอาจถูกใช้เพื่อเป็นตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานปรากฏและอัตราส่วนของค่าความเค้นล้อมรอบและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดปรากฏและค่าความเค้นขนานกับรอยแตก

รูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่ใช้มีข้อได้เปรียบที่ช่วยเปลี่ยนสภาวะของกำลังรับแรงเฉือนในกรณีที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ (การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง) ไปสู่สภาวะสามแกนจริง โดยความสัมพันธ์ที่นำเสนอจากข้อเท็จจริงของผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง และจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงภายใต้ความเค้นขนานรอยแตกมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของการให้แรงมีผลกระทบอย่างมากต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกของการทดสอบหินทราย สำหรับการทดสอบนี้รอยแตกหินส่วนใหญ่ที่ใช้มีความขรุขระไม่มากนัก (JRC=6-8) พื้นผิวของรอยแตกค่อนข้างเล็ก ($76 \times 148 \text{ mm}^2$) ซึ่งพบได้ในหินทรายทั้งสามชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่คล้ายคลึงกัน และอยู่ภายใต้การให้ความเค้นในช่วงแคบๆ ในส่วนของการทดสอบ

เพิ่มเติมจำเป็นต้องมีการใช้ชนิดหินในการทดสอบและลักษณะของรอยแตกให้หลากหลายยิ่งขึ้นเพื่อช่วยส่งเสริมการศึกษาผลกระทบความขรุขระของรอยแตก ขนาด (Fardin et al., 2001) และความแข็งของความขรุขระ (Yang et al., 2001) และความสัมพันธ์เหล่านี้ได้รวบรวมไว้ในเกณฑ์กำลังรับแรงเฉือนในสามแกนไม่เท่ากันตามที่ได้นำเสนอ



บรรณานุกรม

- Alexeev, A.D., Revva, V.N., Bachurin, L.L. and Prokhorov, I. Y. (2008). The effect of stress state factor on fracture of sandstones under true triaxial loading. **International Journal of Fracture** 149 (1): 1-10.
- ASTM D5607-08. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Barton, N. and Choubey V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock Mechanics and Rock Engineering** 10(1-2): 1-54.
- Barton, N. (1982). Shear strength investigations for surface mining. In **Proceedings of the International Conference on Surface mining**. pp. 171-196.
- Barton, N. R. and Bandis, S. C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In **Proceedings international symposium on rock joints**. Loen Norway, pp. 603-610.
- Barton N. R. (1997). The shear strength of rocks and rock joints. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34: 255-279.
- Babanouri, N., Nasab, S. K., Baghbanan, A. and Mohamadi, H. R. (2011). Over-consolidation effect on shear behavior of rock joints. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 48(8): 1283-1291.
- Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (2006). **Rock Mechanics for Underground Mining** (3rd. Edn.). Springer, Netherlands, 628 p.
- Fardin, N., Stephansson, O. and Jing, L. (2001). The scale dependence of rock joint surface roughness. **International Journal of Mechanics and Mining Sciences** 38: 659-669.
- Fuenkajorn, K. and Kemthong, R. (2007). Prediction of joint shear strengths of ten rock types using field-identified parameters. In **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics**. September 13-14, 2007, Nakhonratchasima Thailand. pp. 195-210.

- Fuenkajorn, K. and Kenkhunthod, N. (2010). Influence of loading rate on deformability and compressive strength of three Thai sandstones. **Geotechnical and Geological Engineering** 28: 707-715.
- 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(1): 25-40.
- Haimson, B. and Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 37(1-2): 285-296.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and Zimmerman, R. W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics** (4th. Edn.). Malden, Blackwell Publishing, 475 p.
- Hoek E. and Brown E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34 (8): 1165-1186.
- Indraratna B. and Haque A. (2000). *Shear Behaviour of Rock Joints*. Rotterdam, Balkema.
- Kusumi, H., Teraoka, K. and Nishida, K. (1997). Study on new formulation of shear strength for irregular rock joints. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34(3-4): 168.e1-168.e15.
- Ladanyi, B. and Archambault, G. (1970). Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. In **Proceedings of the 11th Symposium of Rock Mechanics**. AIME, NewYork. pp. 105-125.
- Maksimovic, M. (1996). The shear strength components of a rough rock joint. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts** 33(8): 769-783.
- Mogi, K. (1971). Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. **J. Geophys. Res.** 76: 1255–1269.
- Nadai, A. and (1950). **Theory of Flow and Fracture of Solids**. vol. 1. McGraw-Hill, New York. 572 p.

- Obcheoy, J., Aracheeploha, S. and Fuenkajorn, K. (2011). Fracture permeability under normal and shear stresses. In **Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics**. March 10-11, 2011, Cha-Am Beach, Thailand. pp. 133-140.
- Ohnishi Y. and Dharmaratne P. G. R. (1990). Shear behaviour of physical model of rock joints under constant normal stiffness condition. In **Proceedings of The International Conference on Rock Joints**. pp. 267-73.
- Ramamurthy, T. and Arora, V. K. (1994). Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states. **International Journal of Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts** 31(1): 9-22.
- Rao, K. S. and Tiwari, R. P. (2008). A polyaxial system for testing of jointed rock mass models. **Geotechnical Testing Journal** 31(4): 285-294.
- Song, I. and Haimson, B. C. (1997). Polyaxial strength criteria and their use in estimating in situ stress magnitudes from borehole breakout dimensions. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34: 3-4.
- Singh, B., Goel, R. K., Mehrotra, V. K., Garg, S. K. and Allu, M. R. (1998). Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass. **Tunnelling and Underground Space Technology** 13 (1): 71-79.
- Tiwari, R. P. and Rao, K. S. (2006). Post failure behaviour of rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement. **Engineering Geology** 84: 112-129.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwat, R. and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstone under true triaxial stresses. In **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**. March 12-13, 2009, Chonburi. pp. 199-218.
- Yang, Z. Y., Di, C. C. and Yen, K. C. (2001). The effect of asperity order on the roughness of rock joints. **International Journal of Mechanics and Mining Sciences** 38: 745-752.
- Zhao, J. (1997). Joint surface matching and shear strength part b: JRC-JMC shear strength criterion. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 34(2): 179-185.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก 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 การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กร รัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา 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 และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือก บทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์