



รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-35

รายงานการวิจัย

การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหินภายใต้ความดันล้อมรอบ

**Experimental Assessment of Rock Fracture Permeability under
Confining Pressure**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-35

รายงานการวิจัย

การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหินภายใต้ความดันล้อมรอบ

**Experimental Assessment of Rock Fracture Permeability under
Confining Pressure**

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 และ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2552

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2551 และ 2552 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากนางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

กันยายน 2552

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายภายใต้สภาวะความเค้นหลากหลาย มีการทดสอบการไหลของน้ำเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในตัวอย่างหินทรายที่จัดเตรียมจากหินทรายชุดภูกระดึง พระวิหาร ภูพาน และเสาชั่ว ภายใต้ความดันล้อมรอบและความเค้นเบี่ยงเบน และหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของรอยแตกที่เกิดจากการดึงในหินทรายภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากและในแนวเฉือน ผลการทดสอบระบุว่าความซึมผ่านของหินทรายจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเครียดเชิงปริมาตรก่อนเกิดการบวมตัว ซึ่งอาจเกิดจากการปิดตัวของช่องว่างและรอยแตกเล็กๆ ภายในเนื้อหิน ค่าความซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันเมื่อตัวอย่างหินเกิดการบวมตัวใกล้จุดแตก ซึ่งอาจเกิดจากการกำเนิดและการพัฒนาของรอยแตกในเนื้อหินภายใต้ความเค้นเบี่ยงเบนที่มากกระทำ ผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขระบุว่า ค่าความซึมผ่านของหินทรายที่อยู่รอบๆ หลุมเจาะหรือช่องเหมืองรูปร่างกลมสามารถเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า ซึ่งสูงกว่าค่าความซึมผ่านดั้งเดิมเมื่อหินทรายนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงพอ รอยเปิดเผยอในหินทรายที่ถูกวัดทางกายภาพ (e_p) และรอยเปิดเผยอที่คำนวณจากการไหลของน้ำในรอยแตก (e_f) จะเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ชัดเมื่อรอยแตกนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากสูง ค่าความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเฉือน และภายใต้สภาวะที่มีการเฉือนถึงจุดสูงสุด (peak shear stress) จะคล้ายคลึงกัน ค่าความซึมผ่านที่คำนวณจากรอยเปิดเผยอที่วัดเชิงกายภาพจะมีค่าสูงกว่าค่าความซึมผ่านที่คำนวณจากการไหลของน้ำประมาณ 10 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเมื่อรอยแตกนั้นถูกเฉือนเข้าสู่สภาวะความเค้นคงเหลือ ค่าความซึมผ่านที่คำนวณจาก 2 วิธีนี้จะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นในแนวตั้งมีค่าสูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างค่าความซึมผ่านในช่วงความเค้นคงเหลือและที่จุดความเค้นสูงสุดจะมีความแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเค้นในแนวตั้งมีค่าสูงขึ้น ผลจากการตรวจวัดระบุว่าสัมประสิทธิ์ของความซึมผ่านในรอยแตกจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 10000×10^{-6} m/s ถึง 100×10^{-6} m/s เมื่อความเค้นในแนวตั้งเพิ่มขึ้นจาก 0.35 MPa ถึง 2.06 MPa ภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากอย่างเดียวจะทำให้รอยแตกมีการปิดตัวลงอย่างถาวรบางส่วน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการลดตัวของค่าความซึมผ่านอย่างถาวรเมื่อความเค้นในแนวตั้งฉากมีค่าสูงถึง 2.0 MPa

Abstract

The objective of this study is to determine the permeability of fractures in sandstones under a variety of stress states. Flow tests have been performed to determine hydraulic conductivity of intact specimens prepared from Phu Kradung, Phra Wihan, Phu Phan and Sao Kua sandstones under confining pressures and deviatoric stresses, and of tension-induced fractures under normal and shear stresses. The results indicate that the intact sandstone permeability decreases with increasing volumetric strain before dilation strength probably due to the closure of voids and micro-cracks, and rapidly increases with the specimen dilation after the dilation strength probably due to the initiation and propagation of cracks and fractures. Numerical simulations indicate that the sandstone permeability around circular openings can increase by up to an order of magnitude from its initial value when it subjected to high deviatoric stresses. The physical aperture e_p and hydraulic aperture e_h increase with shearing displacement, particularly under high normal stresses. The magnitudes of fracture permeability under no shear and under peak shear stress are similar. The K_p is about an order of magnitude greater than K_h , particularly in the residual shear region. Both tend to decrease exponentially with increasing normal stress. The difference between the permeability under residual shear stress and that under peak stress becomes larger under higher normal stresses. The fracture hydraulic conductivities exponentially decrease from 10000×10^{-6} m/s to 100×10^{-6} m/s as the normal stresses are increased from 0.35 MPa to 2.06 MPa. Under normal stress alone a permanent fracture closure is usually observed after unloading as evidenced by the permanent reduction of the measured flow rates.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก.....	9
2.2 ความชื้นผ่านในมวลหิน.....	11
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.4 การวิจารณ์ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัย.....	23
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน	25
3.1 ตัวอย่างหิน.....	25
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	25
3.3 การศึกษาแร่วิทยา.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ	31
4.1 รูปแบบการทดสอบ.....	31
4.2 การทดสอบความซึมผ่านของหินทราย โดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ ความดันล้อมรอบเท่ากัน.....	31
4.2.1 วิธีการทดสอบ.....	31
4.2.2 ผลการทดสอบ.....	33
4.2.3 สรุปผลการทดสอบ.....	33
4.3 การทดสอบความซึมผ่านของหินทราย โดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ Deviatoric stress.....	33
4.3.1 วิธีการทดสอบ.....	33
4.3.2 ผลการทดสอบ.....	38
4.3.3 สรุปผลการทดสอบ.....	38
4.4 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตก โดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ ความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตก.....	49
4.4.1 วิธีการทดสอบ.....	49
4.4.2 ผลการทดสอบ.....	49
4.4.3 สรุปผลการทดสอบ.....	49
4.5 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตก โดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ ความเค้นในแนวแกนและแนวเฉือน.....	51
4.5.1 วิธีการทดสอบ.....	51
4.5.2 ผลการทดสอบ.....	51
4.5.3 สรุปผลการทดสอบ.....	67
4.6 การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	75
4.6.1 คุณสมบัติของหินสำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	75
4.6.2 อุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกลมในบริเวณไร้ออบเขตภายใต้ความเค้นที่ไม่เท่ากัน.....	76
4.6.3 อุโมงค์ขนานรูปทรงกลมภายใต้ความเค้นที่ไม่เท่ากัน.....	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การวิจารณ์ผลและบทสรุป.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 การนำผลไปประยุกต์ใช้และข้อเสนอแนะในการศึกษา.....	90
บรรณานุกรม.....	93
ประวัตินักวิจัย.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ.....	17
2.2	การจำแนกความเป็ดเผยอโดยขนาด.....	20
3.1	ผลการวิเคราะห์แร่ประกอบหินด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD).....	29
4.1	ผลการทดสอบการไหลภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกัน.....	48
4.2	ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร.....	52
4.3	ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน.....	53
4.4	ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง.....	53
4.5	ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดเสาข้าว.....	53
4.6	คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จากการทดลองของ Walsri et al. (2009).....	76
4.7	ตัวแปรในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC สำหรับอุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกลม.....	76
4.8	ค่าความซึมผ่านตั้งต้นของตัวอย่างหินทรายที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้น รอบข้างเท่ากับ 1 MPa.....	78
4.9	ตัวแปรในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC สำหรับอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม.....	85

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การทดสอบหาค่าความซึมผ่านเนื้อหินและรอยแตกเนื้อหินในแนวรัศมี (Radial flow) ภายใต้อุณหภูมิในแนวแกน (σ_{axial}).....	4
1.2 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านรอยแตกในตัวอย่างหินภายใต้อุณหภูมิโดยให้ของไหลเคลื่อนผ่านรอยแตกในแนวแกน (Axial flow).....	5
2.1 Block Diagram แสดงรอยแตกและหน้าของรอยแตก และ Mode พื้นฐานของรอยแตก ที่เกี่ยวกับ แนวแตก (Mode I) และรอยเลื่อน (Mode II หรือ Mode III).....	10
2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเนื้อหินและในรอยแตกของตัวอย่างหิน.....	12
2.3 ชนิดของความซึมผ่านในตำแหน่งต่างๆ.....	12
2.4 ปัจจัยที่ควบคุมค่าความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว.....	13
2.5 รูปแบบต่าง ๆ ของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน.....	20
2.6 ผลของความลึกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเปิดเผยในแนวแตก.....	21
2.7 การประมาณค่าความเปิดเผยของรอยแตกในจุดที่กำหนด.....	22
3.1 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน และชุดภูกระดึง ถูกจัดเตรียมสำหรับการทดสอบอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	26
3.2 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (PW) ชุดภูพาน (PP) ชุดเสาข้าว (SK) และชุดภูกระดึง (PK) สำหรับการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้อุณหภูมิในแนวแกนและแนวเฉียง.....	28
3.3 การทำรอยแตกในแท่งตัวอย่างหิน โดยใช้วิธีการกดในแนวเส้น.....	28
4.1 การทดสอบแบบ constant head flow test.....	32
4.2 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดภูพาน หมายเลข 9 และ 10 ภายใต้อุณหภูมิความชื้นเท่ากันทุกทิศทาง.....	34
4.3 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดภูพาน หมายเลข 4 และ 8 ภายใต้อุณหภูมิความชื้นเท่ากันทุกทิศทาง.....	35
4.4 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 2 และ 3 ภายใต้อุณหภูมิความชื้นเท่ากันทุกทิศทาง.....	36
4.5 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 1 และ 7 ภายใต้อุณหภูมิความชื้นเท่ากันทุกทิศทาง.....	37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร โดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa 39
4.7	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร โดยมีความดันล้อมรอบ 2 MPa 40
4.8	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร โดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa 41
4.9	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูพาน โดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa..... 42
4.10	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูพาน โดยมีความดันล้อมรอบ 2 MPa..... 43
4.11	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูพาน โดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa..... 44
4.12	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง โดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa... 45
4.13	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง โดยมีความดันล้อมรอบ 2 MPa... 46
4.14	ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง โดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa... 47
4.15	ผลการทดสอบความซึมผ่านแบบ Falling Head test ของรอยแตกในหินทราย และ ผลการคำนวณการเปิดแยกของรอยแตก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน..... 50
4.16	รูปแบบการทดสอบ โดยการอัดน้ำด้วยแรงดันผันแปรในรอยแตกภายใต้ความเค้น ในแนวตั้งและกำลังเฉือน..... 52
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa และ 1.38 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร..... 55
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa และ 2.76 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร..... 56
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa และ 4.14 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารเฉือน..... 57
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa และ 1.38 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน..... 58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa และ 2.76 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน.....	59
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa และ 4.14 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน.....	60
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa และ 1.38 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง.....	61
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa และ 2.76 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง.....	62
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa และ 4.14 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง.....	63
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa และ 1.38 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดเสาขัว.....	64
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa และ 2.76 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดเสาขัว.....	65
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดผแยก และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa และ 4.14 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดเสาขัว.....	66
4.29 รอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารหลังการทดสอบสำหรับตัวอย่างหินทราย ชุดพระวิหารและภูพาน.....	68

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยเปิดเผยเชิงไฮดรอลิก (e_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (คำนวณจากค่า e_p) เทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง (σ_p) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ภูพาน ภูกระดึง และเสาข้าว.....	69
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนเทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง โดยแสดงในรูปของ coulomb criterion.....	70
4.32 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายชุดพระวิหาร.....	71
4.33 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายชุดภูพาน.....	72
4.34 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายชุดภูกระดึง.....	73
4.35 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายเสาข้าว.....	74
4.36 Finite difference mesh สำหรับการจำลองอุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกระบอกในบริเวณไร่ขอบเขต (Model A).....	78
4.37 รูปแบบความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	78
4.38 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหารที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว.....	80
4.39 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึงที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว.....	81
4.40 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหารที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว.....	82
4.41 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึงที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว.....	83
4.42 Finite difference mesh สำหรับการจำลองอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม (Model B)	
4.43 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชั้นพระวิหารที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม.....	86
4.44 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึงที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

องค์ความรู้เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตกและในเนื้อหินเป็นสิ่งสำคัญในการคำนวณเพื่อประเมินอัตราและพฤติกรรมของของไหลในมวลหินที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน องค์ความรู้นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแผนการสำรวจและการผลิตน้ำมัน น้ำบาดาล ก๊าซธรรมชาติ และในการวิเคราะห์เสถียรภาพของชั้นหินที่เป็นแหล่งกักเก็บน้ำมันและของสิ่งก่อสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ในหรือบนมวลหิน เช่น อุโมงค์ ฐานรากของเขื่อนและความลาดชัน เป็นต้น นอกจากนี้การเข้าใจถึงการเคลื่อนตัวของของไหลในชั้นหินที่มีรอยแตกยังสามารถช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค และช่วยในการป้องกันและแก้ไขการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นจากชั้นน้ำไม่บริสุทธิ์ เช่น ชั้นน้ำเค็ม หรือจากน้ำเสียบนผิวดิน

การวิเคราะห์และคำนวณปริมาณและอัตราการไหลของชั้นน้ำบาดาลหรือแหล่งหินปิโตรเลียมส่วนใหญ่มักจะสมมติให้มวลหินมีลักษณะพรุนอย่างสม่ำเสมอ (Porous media) เพื่อให้สอดคล้องต่อการพัฒนาสมการควบคุม กล่าวคือ สมมติให้รอยแตกและรูพรุนในเนื้อหินมีการไหลอย่างต่อเนื่อง สมมติฐานเช่นนี้ทำให้ผลการคำนวณปริมาณและอัตราการไหลคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อออกแบบการผลิตน้ำบาดาลหรือน้ำมันในชั้นหินเหล่านั้น ไม่ถูกต้อง

ปัญหาเช่นนี้มักจะประสบอยู่เสมอในอุตสาหกรรมเจาะสำรวจและผลิตน้ำมัน ซึ่งส่งผลให้การคาดคะเนปริมาณสำรองและอัตราการผลิตในอนาคตมีความไม่แน่นอนสูง นักวิจัยและวิศวกรตระหนักดีว่าแท้จริงแล้วการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากทิศทาง การวางตัว และการเปิดเผยของรอยแตกในหินที่จุดใด ๆ ก็ตามจะมีการแปรผันอย่างมาก ซึ่งทำให้การเคลื่อนตัวของก๊าซหรือของเหลวในมวลหินมักจะเลือกแนวหรือทิศทางที่มีแรงต้านน้อยที่สุด (Selective path) การแปรผันของรอยแตกที่ส่งผลต่อค่าความซึมผ่านจะมีปัจจัยหลักอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องคือ สภาพของความเค้นในชั้นหินรวมไปถึงความหนาแน่น ความต่อเนื่องและความขรุขระของรอยแตกเองด้วย มีนักวิจัยในต่างประเทศหลายท่านได้พัฒนาสูตร โดยได้รวมปัจจัยบางประการเข้าไว้ในสมการควบคุม แต่ก็ยังไม่สามารถนำปัจจัยหลักทั้งหมดเข้ามาไว้ในสมการควบคุมชุดเดียวกัน นอกจากนั้นสมการเกือบทั้งหมดได้พัฒนามาในเชิงทฤษฎีโดยไม่มีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการตรวจวัดในภาคสนามมายืนยันหรือเปรียบเทียบ

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีงานพัฒนาสมการการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงเป็นรูปธรรม และมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม หรือมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเข้ามาอธิบายหรือยืนยันความน่าเชื่อถือของสมการเหล่านั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหินภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ คือ ความเค้นและความพรุนของเนื้อหิน
- 2) เพื่อพัฒนาสมการควบคุมที่สมบูรณ์ ผลที่ได้จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินที่ใกล้เคียงกับสถานะความเป็นจริงในภาคสนาม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการผลิตน้ำบาดาล น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ และต่อการประเมินผลกระทบของน้ำใต้ดินต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ อุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) จะมีการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการไม่ต่ำกว่า 5 ชนิด ซึ่งจะเน้นไปที่หินทราย หินทรายแป้ง (ชั้นน้ำบาดาลและแหล่งน้ำมัน) และหินอัคนีบางชนิด
- 2) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกจะดำเนินการภายใต้ความดันล้อมรอบ (Confining pressure) ที่ผันแปรตั้งแต่ 100 psi ถึง 3,000 psi (สอดคล้องกับระดับความลึกประมาณ 3000 ฟุต) และอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 3) มีการทดสอบเพื่อศึกษาค่าความซึมของหินที่ไม่มีรอยแตก (Intact rock) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินที่มีความพรุนสูงเช่นหินทราย เนื่องจากความพรุนที่มีอยู่ในเนื้อหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตก
- 4) รอยแตกในตัวอย่างหินจะถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการด้วยการกดหรือการตัด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง (บางส่วนได้สรุปมาในข้อเสนอโครงการนี้แล้ว) ซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและกฎต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหล ทั้งในรอยแตกของหินและในเนื้อหิน ความซึมผ่านของของไหล ชนิด ลักษณะ และต้นกำเนิดของรอยแตกในหิน ผลกระทบของความเค้นต่อความดันของของไหลและต่อพฤติกรรมของรอยแตกและของเนื้อหิน ผลการวิจัยที่ดำเนินมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บตัวอย่างหินจากภาคสนามและจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยจะดำเนินการเก็บหินตัวอย่างจากภาคสนาม และนำมาจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้จะใช้หินไม่ต่ำกว่า 4 ชนิด และที่มีค่าความซึมผ่านของเนื้อหินต่างกันจะถูกนำมาศึกษาเพื่อระบุอายุ (ชุด หรือ หมวดหิน) และแหล่งที่มาของตัวอย่างหิน

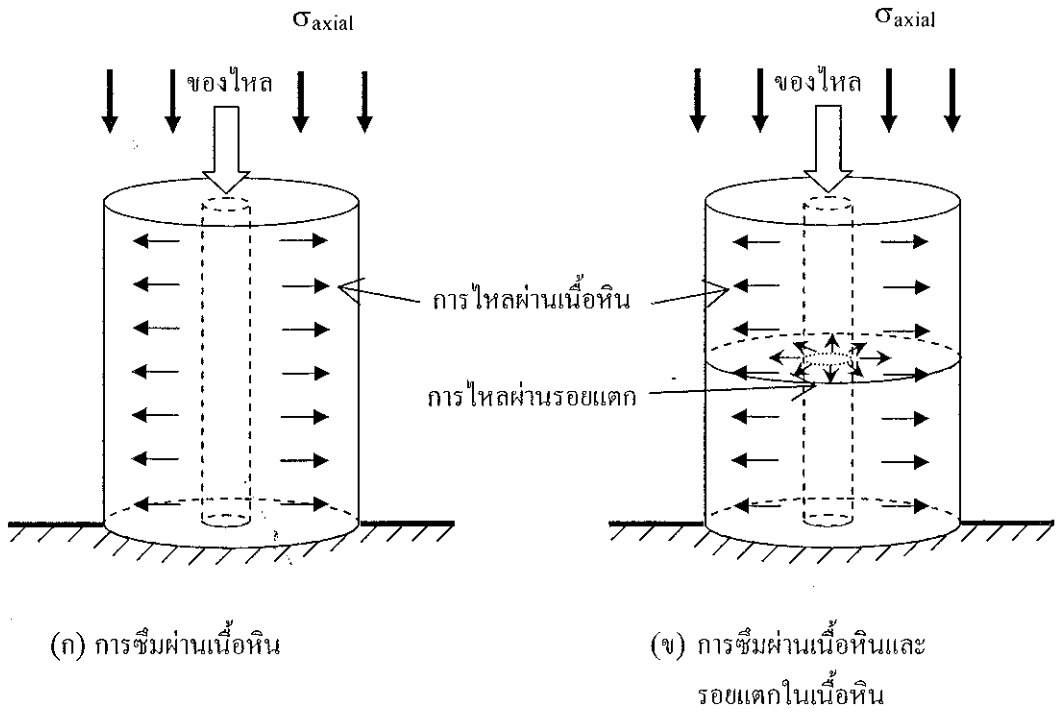
ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบ 3 กลุ่ม คือ การวิเคราะห์ทางแร่วิทยา (Petrography Analysis) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลศาสตร์ และการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกและเนื้อหิน

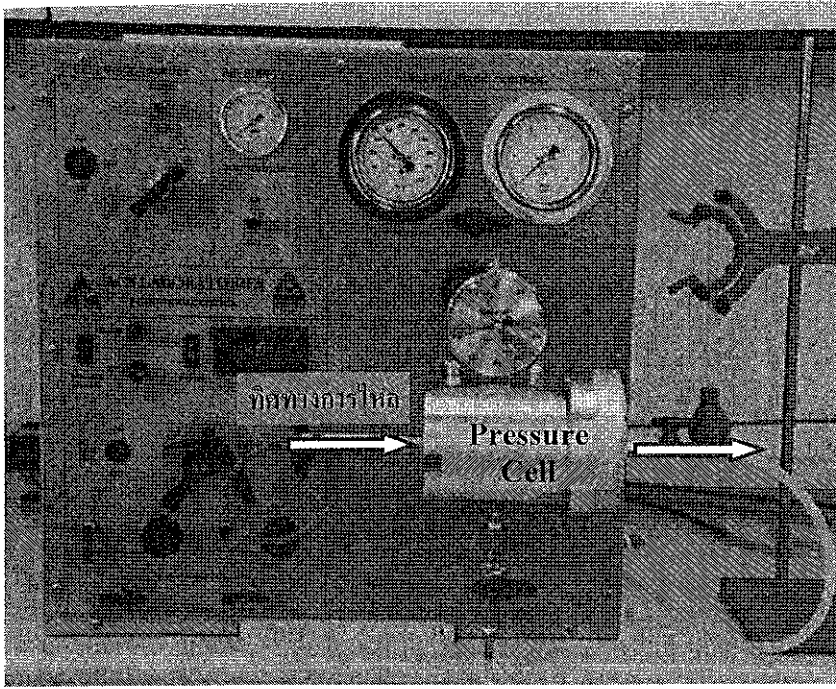
1) การวิเคราะห์ทางแร่วิทยา จะมีการศึกษาแร่องค์ประกอบของตัวอย่างหินโดยวิธี Petrography Analysis

2) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลศาสตร์ ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าแรงกดอัดในแกนเดียว การทดสอบหาค่าความยืดหยุ่น การทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดในรอยแตก และอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Poisson's ratio) โดยการจัดเตรียมและวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานสากล (ASTM) ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานนี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบ Parameters ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบค่าความซึมผ่านภายใต้แรงดันต่อไป อาทิ ค่าความเค้นกดสูงสุดจะเป็นตัวระบุช่วงของความเค้นที่ใช้ในการวัดค่าความซึมผ่านและค่าความยืดหยุ่น อัตราส่วน Poisson จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนของเนื้อหินและการยุบตัวหรือการลดการเปิดเผยของรอยแตกในหิน เป็นต้น

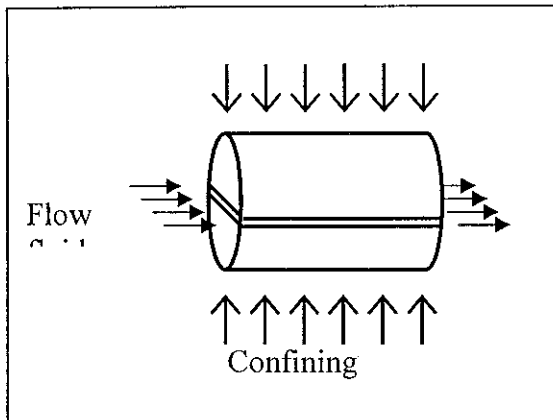
3) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกและเนื้อหิน จะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ การทดสอบการไหลในแนวรัศมี (Radial Flow Testing) ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของรอยแตกภายใต้แรงในแนวตั้ง (ดังรูปที่ 1.1) และการทดสอบความซึมผ่านของของไหลภายใต้ความดันล้อมรอบ (Confining Pressure) (ดังรูปที่ 1.2) การทดสอบการไหลในแนวรัศมีจะดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 4 นิ้ว และภายในเท่ากับ 1 นิ้ว น้ำจะถูกอัดเข้าไปในรูแกนกลางด้วยความดันคงที่ระหว่าง 10 ถึง 100 psi การทดสอบจะทำในหินที่ไม่มีรอย



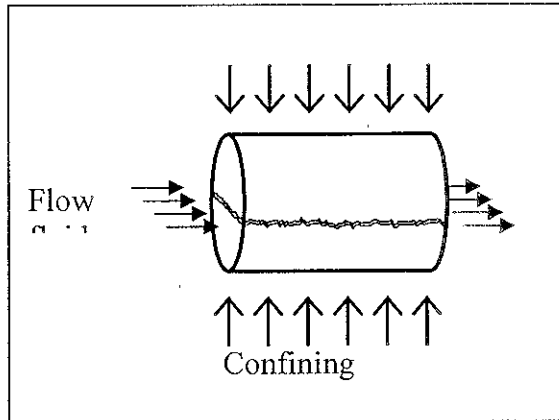
รูปที่ 1.1 การทดสอบหาค่าความซึมผ่านเนื้อหินและรอยแตกเนื้อหินในแนวรัศมี (Radial flow) ภายใต้ความเค้นในแนวแกน (σ_{axial})



(ก) เครื่อง Overburden PoroPerm Cell



(ข) Saw-cut Fracture



(ค) Tension-induced Fracture

รูปที่ 1.2 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านรอยแตกในตัวอย่างหินภายใต้ความดันล้อมรอบ โดยให้ของไหลเคลื่อนผ่านรอยแตกในแนวแกน (Axial flow)

แตกและหินก้อนเดียวกันที่มีรอยแตก (รอยแตกจะได้จากการกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง) การทดสอบทั้งสองขั้นตอนจะใช้ความเค้นกดในแนวแกนที่ผันแปรจาก 10% ถึง 50% ของค่าความกดอัดสูงสุดของหินชนิดนั้น ๆ ผลที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 จะให้ค่าความซึมผ่านของเนื้อหินที่มีรูพรุนภายใต้ความเค้นกดต่าง ๆ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความยืดหยุ่นและค่าความพรุนของหิน ผลต่างที่วัดได้จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 จะบ่งบอกถึงค่าความซึมผ่านของรอยแตกในลักษณะต่าง ๆ กัน ตัวอย่างหินอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (ที่มีรอยแตกผิวเรียบ รอยแตกผิวตัด และรอยแตกผิวขรุขระ) จะถูกจัดเตรียมจากหินแต่ละชนิดโดยมีค่าความขรุขระของรอยแตกที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการที่ต่างกันและจะใช้ตัวอย่างหิน 5 ชนิด

การทดสอบความซึมผ่านของของไหลภายใต้ความดันล้อมรอบจะใช้เครื่องมือชื่อ Poro-Perm Cell (รูปที่ 1.2) ซึ่งจะสามารถให้ความกดอัดสูงสุดถึง 3,000 psi ผลที่ได้จะให้ความสัมพันธ์ของความซึมผ่านในเนื้อหินและในรอยแตกกับค่าความเค้นในสามด้าน โดยรอยแตกที่ถูกทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีทิศทางขนานกับแกนของตัวอย่างหิน (รูปที่ 1.2) และใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวแทนของของไหลซึ่งจะสามารถวัดค่าความซึมผ่านได้ต่ำสุดถึง 10^{-8} m/s

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างสมการการไหลในรอยแตกของหิน

ผลการทดสอบจะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการการไหลในมวลหินที่มีรอยแตก โดยมีตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องรวมอยู่ในสมการด้วย เช่น ความเค้น ค่าความเปิดเผย ค่าความขรุขระ ค่าความต่อเนื่อง และระยะห่างระหว่างรอยแตก และค่าความซึมผ่านของเนื้อหินเอง

ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอน โดยละเอียด การวิเคราะห์ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ประกอบด้วยการนำเสนอในการประชุมทางด้านวิชาการ และนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ตีพิมพ์ในวารสาร และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยในการประเมินอัตราความชื้นผ่านของของไหลผ่านรอยแตกในหิน ซึ่งสามารถนำไปประกอบการวิเคราะห์หาปริมาณสำรองและอัตราการผลิตของของไหลได้ โดยหน่วยงานที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากตรงนี้ได้ เช่น กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมน้ำบาดาล เป็นต้น

2) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

ในการศึกษาความชื้นผ่านของรอยแตกในมวลหินภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหิน และเพื่อพัฒนาสมการพื้นฐานขึ้นมาใหม่โดยจะพิจารณาถึงปัจจัยที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสมการพื้นฐานนี้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลายสาขาวิชา และสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกอย่างมากมาย

3) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานราชการ เช่น กรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน กรมน้ำบาดาล อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมัน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งหน่วยงานในท้องถิ่น เช่น อบต. อบจ. เป็นต้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลในรอยแตกและนำไปสู่การพัฒนาบ่อบาดาลที่มีอยู่ในท้องถิ่น รวมถึงเพิ่มอัตราการผลิตน้ำมัน ทั้งนี้ยังป้องกันไม่ให้เกิดภัยแล้งอันเป็นปัญหาใหญ่ที่ประสบอยู่ในหลายพื้นที่

4) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมันเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น เพื่อให้เกิดผลสำเร็จจากงานวิจัยนี้มากขึ้น ผู้วิจัยจำเป็นต้องให้ความรู้และเป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญให้กับหน่วยงานในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมัน รวมถึงบริษัทน้ำมันทั้งในและต่างประเทศ อันเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศ อีกทั้งประชาชนที่จะได้รับผลประโยชน์จากอัตราการผลิตน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรกรรมและนำไปสู่คุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

5) นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

ผลการศึกษาจะทำให้ได้มาซึ่งสมการความสัมพันธ์ของการไหลในรอยแตกภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่สามารถจดลิขสิทธิ์และเผยแพร่ให้กับประชาชนและหน่วยงานต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น เพื่อนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์และสามารถจำหน่ายแก่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศได้

6) เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

การผลิตน้ำมันและน้ำบาดาลในปัจจุบันนี้มีศักยภาพไม่เพียงพอกับความต้องการของประชาชนและหน่วยงานอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องใช้น้ำมันหรือน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะสามารถปรับปรุงและเพิ่มศักยภาพในการผลิตน้ำมันและน้ำบาดาลได้อย่างดีเยี่ยม อันส่งผลให้การพัฒนาประเทศเป็นไปได้ด้วยดี

7) เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เมื่อกลุ่มเป้าหมายมีความรู้ความเข้าใจในทางด้านนี้แล้วจะสามารถนำไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำบาดาลและน้ำมัน ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ไขปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรได้ส่วนหนึ่ง

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ 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) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรม โยธา วิศวกรรมเหมืองแร่และวิศวกรรมธรณี
- 8) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 9) กระทรวงพลังงาน
- 10) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตกของหิน ซึ่งประกอบด้วย การเกิดและชนิดของรอยแตก ความซึมผ่านในหิน ผลกระทบของความเค้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการออกแบบการทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกและในเนื้อหินเอง

2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก

รอยแตก (Fracture มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า Fractus แปลว่า แตก) หมายถึง ผิวที่แตกออกของหินหรือแร่ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Twiss and Moores, 1992)

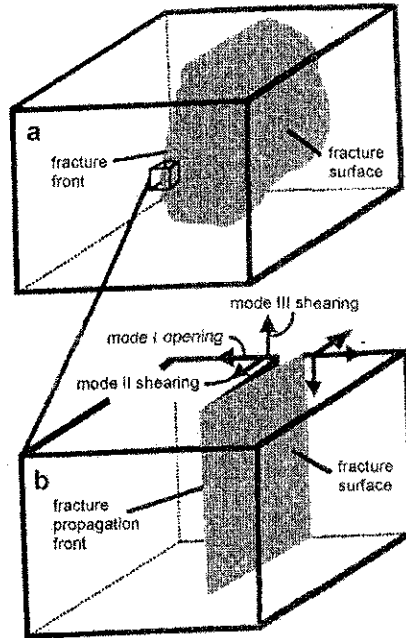
โดยทั่วไปรอยแตกในมวลหิน (Rock mass) จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับความแกร่งของหิน แหล่งหรือกลไกที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถทำให้เกิดความเครียดสูงในเปลือกโลก คือ 1) Lithostatic คือ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของหินกดทับ ทั้งที่ถูกฝังอยู่และที่ถูกนำออกไปโดยการยกตัวและการผุกร่อน 2) ความดันในของไหล 3) แรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก 4) ความร้อนจากการเย็นตัวของหินแทรกซอนและหินพุ และการเย็นตัวที่เกิดจากการยกตัวและการผุกร่อนของเปลือกโลก 5) การชนของวัตถุนอกโลก และ 6) กระบวนการทางธรณีวิทยาอื่น ๆ เช่น การคดโค้ง กิจกรรมที่เกี่ยวกับภูเขาไฟ และการแทรกซอนของเกลือ (National Research Council, 1996)

Bates and Jackson (1980) จำแนกรอยแตกในมวลหินเป็น 3 ประเภทตามกลุ่มทางธรณีวิทยาบนพื้นฐานทางธรรมชาติของความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเคลื่อน ดังนี้

1) รอยแตกขยายหรือแนวแตก (Joints) เป็นผิวขรุขระ 2 แบบที่เคลื่อนออกจากกันในทิศทางที่ตั้งฉากต่อกัน (รูปที่ 2.1b) ในเชิงกลศาสตร์จะเรียกรอยแตกประเภทนี้ว่า “Mode I” (Lawn and Wilshaw, 1975)

2) รอยแตกเฉือนหรือรอยเลื่อน (Faults) เป็นพื้นผิวที่เคลื่อนออกจากกันในทิศทางที่ขนานกัน ถ้าเป็นแบบตั้งฉากกับหน้ารอยแตก ในเชิงกลศาสตร์จะเรียกว่า “Mode II” แต่ถ้าขนานกับหน้ารอยแตกจะเรียกว่า “Mode III” (รูปที่ 2.1b)

3) รอยแตกซิด หรือ Pressure Solution Surfaces เป็นรอยแตกในหินตะกอนที่ถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยสารละลายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อผิวของเกรน



รูปที่ 2.1 (a) Block Diagram แสดงรอยแตกและหน้าของรอยแตก
 (b) Mode พื้นฐานของรอยแตกที่เกี่ยวกับ แนวแตก (Mode I) และรอยเลื่อน (Mode II หรือ Mode III).

2.2 ความซึมผ่านในมวลหิน

ความซึมผ่านเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล เช่น น้ำ ก๊าซ หรือเอนกสถานะ (เช่น น้ำ+ก๊าซ, น้ำ+ก๊าซ+น้ำมัน) ในการไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ดินหรือหิน โดยค่าความซึมผ่านรวมของมวลหินสามารถแทนด้วยสมการ

$$k = k_f + k_m \quad (2.1)$$

โดย k = ความซึมผ่านรวมของมวลหิน
 k_f = ความซึมผ่านของแต่ละรอยแตก
 k_m = ความซึมผ่านของเนื้อหิน

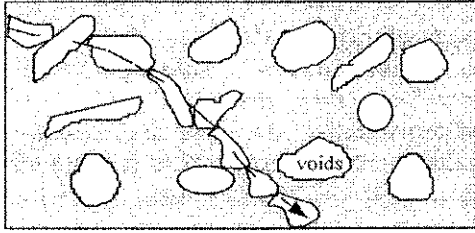
หินที่มีเนื้อเป็นผลึก ของไหลจะสามารถไหลผ่านเนื้อหินได้น้อยกว่าการไหลผ่านรอยแตก เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่ต่อกันและขนาดของรูพรุนในหินแข็งโดยทั่วไปมีน้อย (Gale, 1975; Iwai, 1976; Raven & Gale, 1985) ค่าความซึมผ่านยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินและการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเสถียรภาพ โครงสร้างวิศวกรรมในหิน ของไหลในตัวอย่างหินสามารถไหลผ่านเนื้อหินและช่องว่างที่ต่อกันหรือทั้งสองแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 สำหรับการไหลแบบที่มีของไหลเพียงชนิดเดียว ค่าความซึมผ่านสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ 1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน 2) ความซึมผ่านของรอยแตก และ 3) ความซึมผ่านของทั้งเนื้อหินและรอยแตก ความสัมพันธ์ของรอยแตกรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งประเภทของความซึมผ่านได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 การคำนวณความซึมผ่านแต่ละประเภทมีดังนี้

1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน

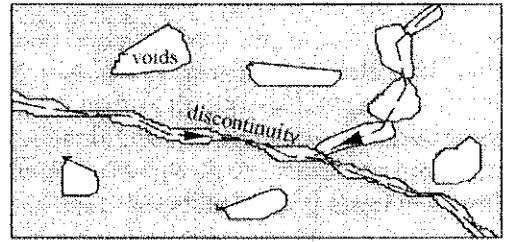
ค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน (k_m) รูปทรงกระบอกสามารถคำนวณจาก Darcy's law ได้ดังนี้

$$k_m = \frac{4q\mu}{\pi D^2 (dp/dx)} \quad (2.2)$$

โดย q = อัตราการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวอย่างหิน
 dp/dx = Pressure Gradient ตามความยาว (dx) ของตัวอย่างหิน (รูปที่ 2.4)
 μ = ความหนืดของของไหล
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่างหิน

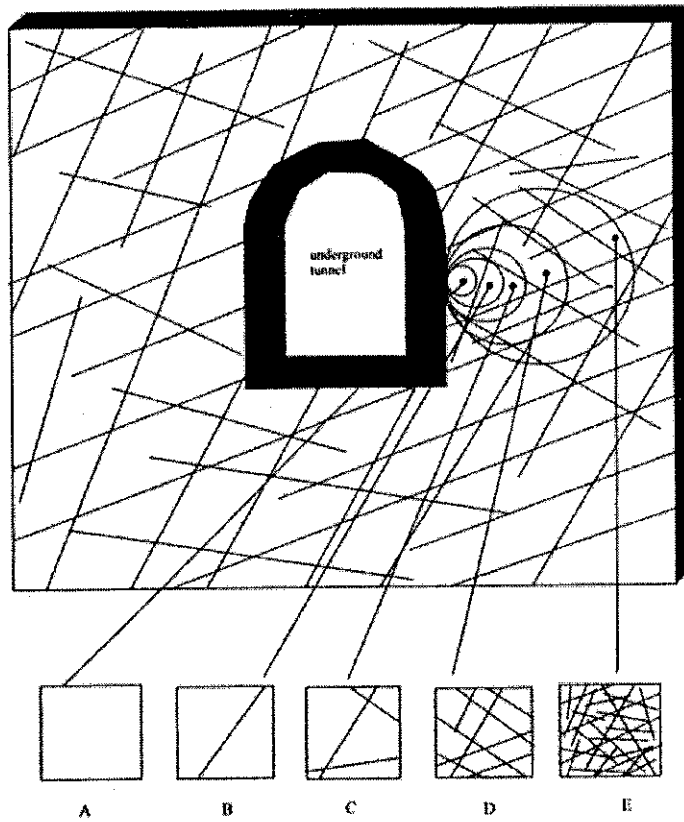


Intact rock with voids, where possible flow occurs through interconnected voids



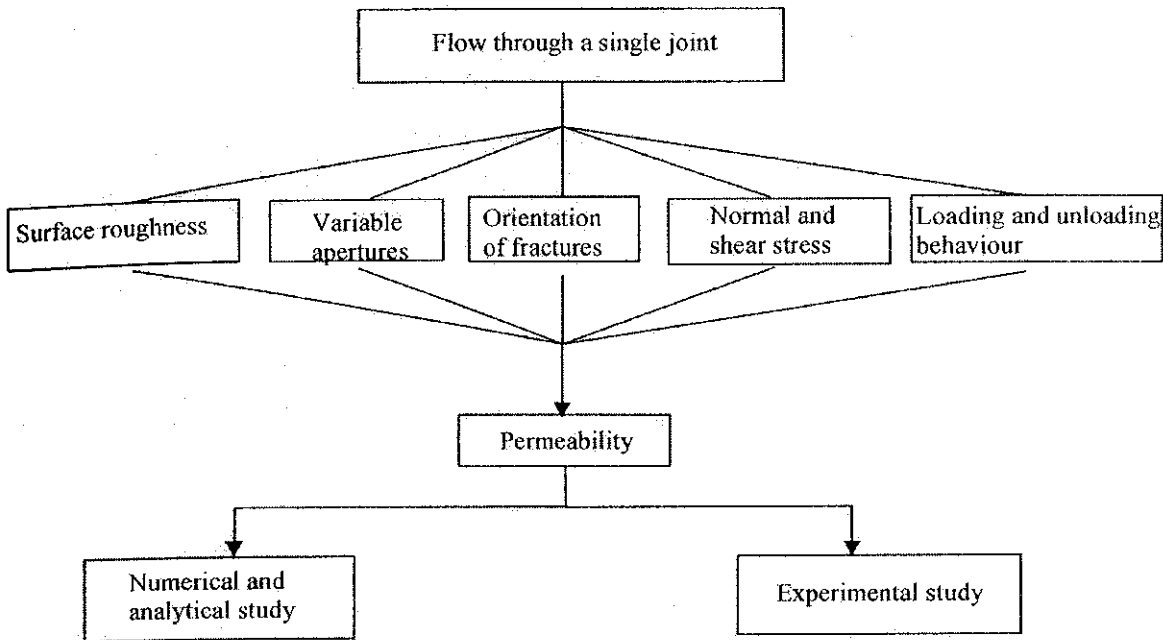
Specimen with a major discontinuity, where flow occurs through discontinuity and any interconnected voids

รูปที่ 2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเนื้อหินและในรอยแตกของตัวอย่างหิน
(จาก Indraratna and Ranjith, 2001)



รูปที่ 2.3 ชนิดของความซึมผ่านในตำแหน่งต่างๆ (ดัดแปลงมาจาก Brady and Brown, 1994)

- A = หินที่ไม่มีรอยแตก (ไหลอย่างต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในเนื้อหิน
- B = หินที่มีรอยแตกเดียว (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- C = หินที่มีรอยแตกลittle (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- D = หินที่มีหลายรอยแตก (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- E = มวลหิน (ไหลอย่างต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในเนื้อหิน



รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่ควบคุมค่าความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว (จาก Indraratna and Ranjith, 2001)

ถ้าไม่พิจารณา Hydraulic Gradient และความเค้นรอบข้างที่ให้กับตัวอย่างหิน ค่าความซึมผ่านของเนื้อหินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อหินซึ่งแทนด้วยขนาดของรูพรุน รูปร่าง และการเชื่อมต่อกันของช่องว่าง ถ้าของไหลที่ผ่านเป็นก๊าซเพียงอย่างเดียวจะสามารถประมาณค่าความซึมผ่านของเนื้อหินได้ตามสมการ

$$k_m = \frac{2qp_e\mu L}{(p_i^2 - p_e^2)A} \quad (2.3)$$

โดย

- q = อัตราการไหลของก๊าซ
- μ = ความหนืดของก๊าซ
- L = ความยาวของตัวอย่างหิน
- A = พื้นที่ภาพตัดขวางของตัวอย่างหิน
- p_i = ความดันของก๊าซที่เข้าไป
- p_e = ความดันของก๊าซที่ออกมา

ถ้าวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้วิธีแบบ Transient ค่าความดันจะขึ้นอยู่กับเวลาตามความสัมพันธ์

$$p_t = p_0 e^{-\alpha t} \quad (2.4)$$

โดย p_t = ความดันสุดท้าย
 p_0 = ความดันเริ่มต้น
 t = เวลา
 α = ค่าคงที่

และสมการหาค่าความซึมผ่านของเนื้อหินโดยใช้วิธีแบบ Transient ซึ่งถูกเสนอโดย Kranz et al. (1979) ดังนี้

$$k_m = \frac{\alpha \beta \mu L V_1 V_2}{A(V_1 + V_2)} \quad (2.5)$$

โดย β = ค่าความกดอัดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Compressibility)
 A = พื้นที่หน้าตัดขวาง
 V_1 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านบนของตัวอย่าง
 V_2 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านใต้ของตัวอย่าง
 L = ความยาวของตัวอย่างหิน

Gangi (1978) พยายามที่จะพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อหาผลกระทบของความดันรอบด้าน (Confining Pressure) ต่อค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน โดยสมมติให้หินที่มีรูพรุนเกิดจากการอัดตัว มีเม็ดหินเป็นทรงกลม และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องว่างเป็นไปตามทฤษฎีของ Hertz สมการหาค่าความซึมผ่านของเนื้อหินจะเป็นดังนี้

$$k_m = k_0 \left[1 - C_0 \left((\sigma_c + \sigma_i) / p_0 \right)^{2/3} \right]^4 \quad (2.6)$$

โดย k_0 = ความซึมผ่านเริ่มต้น
 σ_c = ความดันรอบด้าน
 σ_i = ความดันสมดุลที่เกิดจากการประสานและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร
 p_0 = ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นประสิทธิผล (Effective Elastic Modulus) ของเกรน

2) การคำนวณความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว

Indraratna and Ranjith (2001) กล่าวว่า ปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยว คือ ความขรุขระของผิวรอยแตก ความเปิดเผยอ ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนัก (รูปที่ 2.4) นอกเหนือจากปัจจัยเหล่านี้แล้วขนาดของความเปิดเผยอก็เป็นปัจจัยหลักซึ่งเป็นส่วนประกอบของความเค้นภายนอก ความดันของไหล และคุณสมบัติทางด้านรูปร่างของแนวแตก ดังนั้นสมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวจะเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่มาเกี่ยวข้องคือ

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (2.7)$$

โดย k = ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว
 e = ความเปิดเผยอของแนวแตก

ความเปิดเผยอของแนวแตกจะขึ้นอยู่กับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่มากระทำบนแนวแตก สมมติให้เนื้อหินมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ตาม Hooke's law ความสัมพันธ์ของความเปิดเผยอและความเค้นจะเป็นดังนี้

$$e = e_0 \pm \delta e \quad (2.8)$$

โดย e_0 = ความเปิดเผยอเริ่มต้นของแนวแตก
 δe = ความเปลี่ยนแปลงของความเปิดเผยอที่เกิดจากความเค้น (ทั้งความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน) ที่มากระทำต่อแนวแตก

ในกลศาสตร์หิน Jaeger and Cook (1979) ได้เสนอสมการหาค่าความเปลี่ยนแปลงทั่วไป (δe_n) ดังนี้

$$\delta e_n = \frac{1}{K_n} [\sigma_z \cos \beta + \sigma_h \sin \beta] \quad (2.9)$$

โดย K_n = ความแกร่งตั้งฉากของรอยแตก
 σ_z = ความเค้นในแกนตั้ง
 σ_h = ความเค้นในแกนนอน
 β = มุมการวางตัวของรอยแตก

ถ้าพิจารณาค่าความดันน้ำที่กระทำตั้งฉากกับผิวของรอยแตก สมการที่ 2.9 จะเปลี่ยนเป็น

$$\delta e_n = \frac{1}{K_n} [\sigma_1 \cos \beta - \sigma_3 \sin \beta - p_w] \quad (2.10)$$

โดย $p_w =$ ความดันน้ำภายในรอยแตก

รวมสมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 จะได้สมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยว สำหรับแนวแตกที่เป็นแผ่นเรียบดังนี้

$$k = \frac{(e_0 + \delta e_n)^2}{12} \quad (2.11)$$

สมการนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการพิจารณาหรือทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากง่ายและเชื่อถือได้

Detoumay (1980) ได้แนะนำความสัมพันธ์ที่จะอธิบายค่าความซึมผ่านในรอยแตกโดยพื้นฐานของความเปิดแยกไฮโดรลิกเริ่มต้นและความชิดของแนวแตกดังนี้

$$k = \frac{e_0^2 \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)^2}{12} \quad (2.12)$$

โดย $e_0 =$ ความเปิดแยกไฮโดรลิกเริ่มต้นที่ความเค้นเป็นศูนย์

$v_0 =$ ความชิดของแนวแตกเมื่อความเปิดแยกไฮโดรลิกมีค่าใกล้ศูนย์

$v =$ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทั่วไปของแนวแตก ซึ่งอาจคำนวณได้โดยใช้สมการที่

2.10

Snow (1968a) ได้สังเกตแบบจำลองอย่างง่ายเพื่ออธิบายความผันแปรของการไหลในรอยแตกที่ตรงข้ามกับความเค้นตั้งฉากคือ

$$k = k_0 + K_n \frac{e^2}{s} (\sigma - \sigma_0) \quad (2.13)$$

โดย k_0 = ความซึมผ่านเริ่มต้นของรอยแตกที่ความเค้นตั้งฉากเริ่มต้น (σ_0)
 K_n = ความแกร่งตั้งฉาก
 s = ความกว้างของรอยแตก
 e = ความเปิดเผยไฮโดรลิก

Jones (1975) ได้แนะนำความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความซึมผ่านในรอยแตกและความเค้นตั้งฉากดังนี้

$$k = c_0 (\log(\sigma_{ch} / \sigma_c))^3 \quad (2.14)$$

โดย σ_{ch} = ความดันสมานรอบด้าน (Confining Healing Pressure) ที่ซึ่งค่าความซึมผ่านเป็นศูนย์
 σ_c = ความเค้นประสิทธิผลรอบด้าน
 c_0 = ค่าคงที่ที่ขึ้นกับผิวของรอยแตกและความเปิดเผยแรกเริ่ม

Nelson (1975) ได้เสนอความสัมพันธ์อย่างง่ายสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายดังนี้

$$k = A + B\sigma_c^{-m} \quad (2.15)$$

โดย A , B และ m เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ ค่าคงที่นี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของหิน สำหรับหินชนิดเดียวกันจะขึ้นอยู่กับสภาพของผิวรอยแตก โดย Nelson (1975) ได้เสนอค่าบางค่าไว้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Nelson, 1975)

Sample no.	Constant A	Constant B	Constant m
9-13	1494.0	4311.0	0.1
11-10	101.07	35800.0	0.7
16-17	-434.4	3410.0	0.2
19-15	-1600.0	3780.0	0.1

Gangi (1978) จำลองผิวของหินให้เหมือนกับเตียงตะปูและได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกที่ขึ้นกับความดันรอบด้านดังนี้

$$k = k_0 \left(1 - (\sigma_c / P_1)^m\right)^3 \quad (2.16)$$

โดย P_1 = ความยืดหยุ่นประสิทธิผลของความขรุขระ
 m = ค่าคงที่ซึ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ขึ้นกับความยาวของความขรุขระ

สมการนี้จะให้ผลดีก็ต่อเมื่อไม่คิดผลกระทบต่อการไหลที่เกิดจากความขรุขระของผิวรอยแตก ซึ่งไม่สมเหตุ-สมผลในทางปฏิบัติ

Walsh (1981) พิจารณาผลกระทบของความขรุขระของผิวรอยแตกและได้สมการความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยวที่ขึ้นกับความดันรอบด้านดังนี้

$$k = k_0 \left[1 - \left(2 \frac{h}{a_{02}} \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \right)^{0.5} \right]^3 \left[\frac{1 - b(\sigma_c - u_w)}{1 + b(\sigma_0 - u_w)} \right] \quad (2.17)$$

$$b = [3f / E(1 - \nu^2)h]^{0.5} \quad (2.18)$$

โดย f = ระยะปรับแก้อัด โนมัตติ
 E = สัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น
 ν = Poisson's Ratio
 h = รากที่สองของความสูงในการกระจายตัวของผิวรอยแตก
 k_0 = ความซึมผ่านที่ความดันรอบด้านอ้างอิง (σ_p)
 σ_c = ความดันรอบด้าน
 a_{02} = ครึ่งหนึ่งของความเปิดแยกที่ความดันอ้างอิง

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kranz et al. (1979), Walsh (1981), Råven and Gale (1985), Singh (1997) และ Ranjith (2000) ได้ศึกษาผลกระทบของความเค้นในแกนและความดันรอบด้านที่มีผลต่อค่าความซึมผ่านโดยใช้การทดสอบในสามแกน (Triaxial Test) ทุกการทดสอบให้ผลเหมือนกัน คือ ความเค้นมีผลต่อความซึมผ่านเป็นอย่างมาก โดยค่าความซึมผ่านในรอยแตกหินจะลดลงตามสัดส่วนของความเค้น

รอบด้านประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของความชื้นผ่านในรอยแตกเรียบจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับรอยแตกที่ขรุขระ

Makurat et al. (1990) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อค่าความชื้นผ่านของรอยแตกตามธรรมชาติ พบว่าค่าความชื้นผ่านอาจลดลงหรือเพิ่มขึ้นในระหว่างที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Shear Displacement) และแนวแตกที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Joint Roughness Coefficient, JRC) น้อย จะมีค่าความชื้นผ่านค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนมากขึ้น

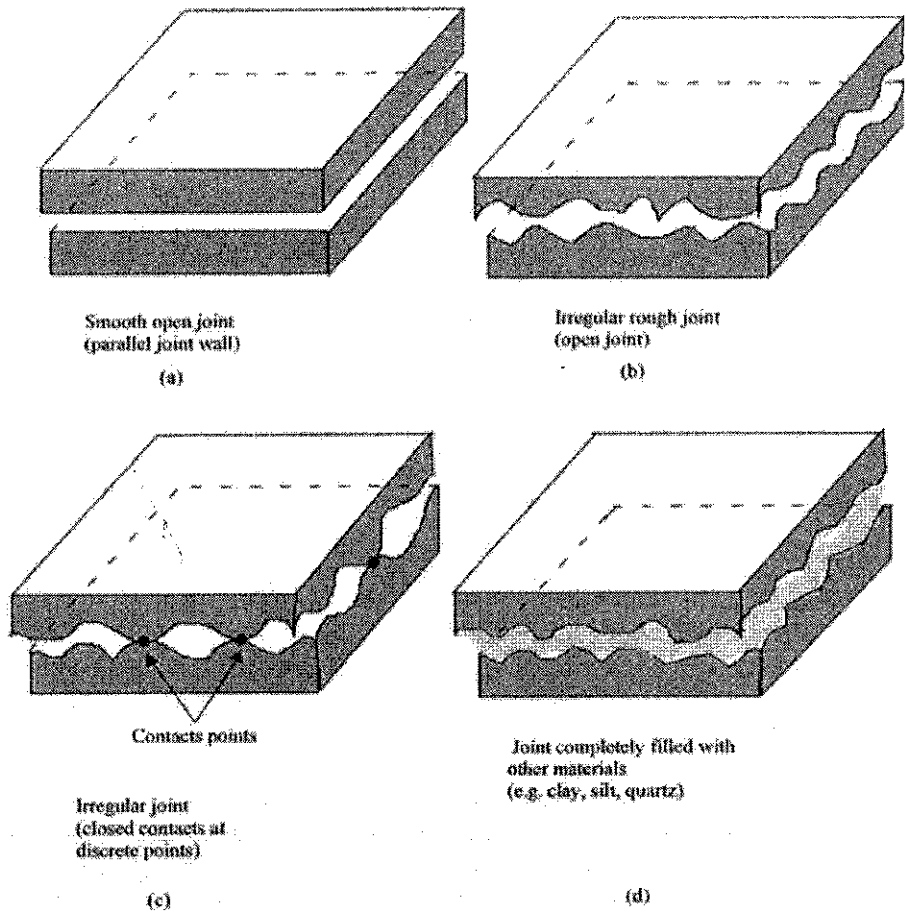
นอกเหนือจากคุณสมบัติของของไหลและ Hydraulic Head ที่ให้แล้ว ความเปิดเผยของแนวแตกก็เป็นปัจจัยวิกฤตที่ควบคุมปริมาณการไหล ยิ่งรอยแตกมีขนาดใหญ่ อัตราและปริมาตรของการไหลก็จะยิ่งมาก ดังนั้นการประมาณค่าความเปิดเผยของแนวแตกจึงมีความสำคัญ แต่ในความเป็นจริงแล้วมีความเป็นไปได้เล็กน้อยเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของผิวรอยแตก รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน เช่น ความเปิดเผยแบบผิวเรียบ ความเปิดเผยแบบผิวขรุขระที่อาจมีหรือไม่มีจุดสัมผัสระหว่างผนังของแนวแตก และแนวแตกที่มีวัตถุอื่นเข้ามาแทรกอยู่ Lee and Farmer (1993) ได้ทำการบันทึกและจำแนกความเปิดเผยตามขนาดด้วยวิธีของ Barton (1973) ไว้ดังตารางที่ 2.2

Snow (1968a, b) ได้ทำการทดสอบค่าความชื้นผ่านในภาคสนามที่ Colorado และพบว่าความเปิดเผยจะมีค่าได้ตั้งแต่ 50 ถึง 350 ไมครอนที่ความลึก 10 เมตร ส่วนที่ระดับความลึกมากกว่า 30 เมตร จะมีค่าลดลง 40 ถึง 100 ไมครอน ดังรูปที่ 2.6

Snow (1970) ได้ทำการทดสอบโดยใช้วิธีการฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) เข้าไปในตัวอย่างหิน แล้วทำการถ่ายรูปสารที่ไหลออกมาจากขอบของความไม่ต่อเนื่อง การประมาณค่าความเปิดเผยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพและความคมชัดของรูป

Barr and Hocking (1976) ได้ทำการวัดค่าความเปิดเผยเชิงกลศาสตร์ในหลุมโดยใช้การทดสอบแบบ Impression Packer ซึ่งทำได้โดยการทาไขพลาสติก ไว้ที่ผิวของหลุมแล้วทำการถ่ายรูปวิธีนี้ไม่เพียงจะได้ค่าความเปิดเผยเชิงกลศาสตร์ของแนวแตกที่ติดกับหลุม แต่ยังได้ทั้งความกว้างและทิศทางการวางตัวของรอยแตกอีกด้วย

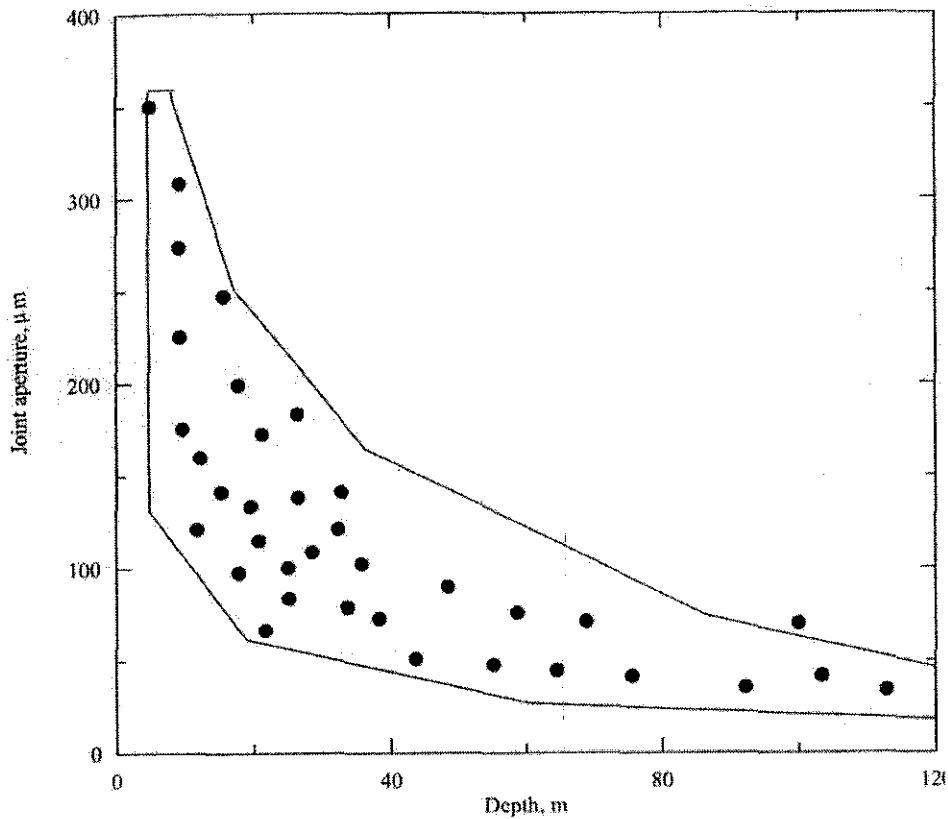
Bandis (1980) ใช้วิธีการวัดโดยตรงด้วยการใช้แผ่นเหล็กวัดความห่าง (Tapered Feeler Gauge) เพื่อวัดค่าความเปิดเผยของแนวแตก แผ่นเหล็กที่ใช้วัดควรมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถใส่เข้าไปในรอยแตกที่มีขนาด 10^{-5} - 10^{-9} เมตรได้



รูปที่ 2.5 รูปแบบต่าง ๆ ของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน (จาก Indraratna and Ranjith, 2001)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกความเปิดเผยโดยขนาด (จาก Barton, 1973)

Class	Aperture (mm)
Very tight	<0.1
Tight	0.1-0.25
Partly open	0.25-0.50
Open	0.50-2.5
Moderately wide	2.5-10.0
Wide	10

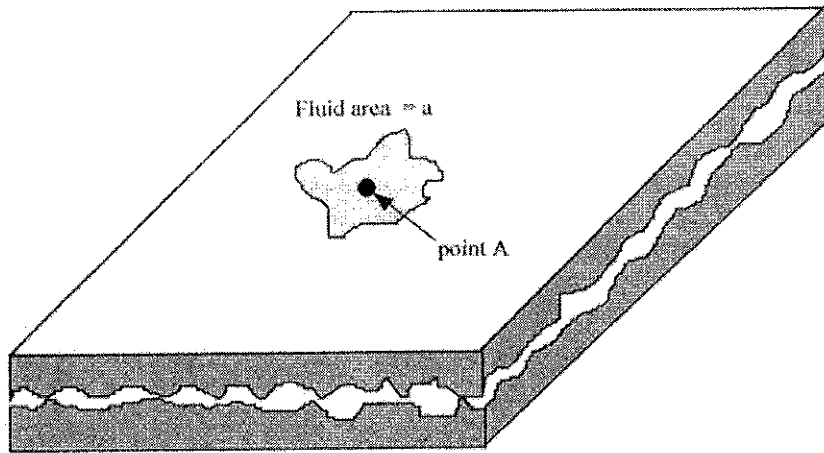


รูปที่ 2.6 ผลของความลึกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเปิดรอยในแนวแตก (จาก Snow, 1968a,

Hakami and Barton (1990) ได้ทำการทดสอบค่าความเปิดรอยของแนวแตกในจุดที่กำหนด โดยจำลองแนวแตกขึ้นมา จากนั้นใส่ยางซิลิกอน (Silicon Rubber) เข้าไปที่ผิวของรอยแตกเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์ในการหล่อ Epoxy โปร่งแสงให้เป็นรูปร่างตามรอยแตกดังรูปที่ 2.7 ค่าความเปิดรอยที่จุด A ได้จากสมการ

$$e_A = \frac{Q}{a} \quad (2.19)$$

โดย Q = ปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไปยังจุด A บนผิวของรอยแตก
 a = พื้นที่ของน้ำ



รูปที่ 2.7 การประมาณค่าความเปิดของรอยแตกในจุดที่กำหนด (จาก Hakami and Barton, 1990)

Barton and Bakhtar (1983) และ Bandis et al. (1983, 1985) ได้เสนอวิธีหาค่าความเปิด
 เผยของเชิงกลศาสตร์โดยวิธีการวัดทางอ้อมบนพื้นฐานของความต้านแรงกดของแนวแตก (Joint
 Compressive Strength, JCS) และค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Joint Roughness Coefficient,
 JRC) ดังนี้

$$e_m = \left[\frac{JRC}{5} \right] [0.2\sigma_c / JCS - 0.1] \quad (2.20)$$

โดย e_m = ความเปิดเผยเชิงกลศาสตร์ (mm)
 σ_c = ความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)

ความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้จะใช้หาค่า JCS บนพื้นฐานของ Schmidt Hammer Rebound
 Number (R)

$$\log_{10}(JCS) = 0.00088\gamma R + 1.01 \quad (2.21)$$

โดย γ = น้ำหนักต่อหน่วยของหิน (kN/m^3)

2.4 การวิจารณ์ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัย

จากการทบทวนผลการวิจัยเบื้องต้นที่สรุปไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ชัดว่ายังไม่
 มีนักวิจัยผู้ใดได้พัฒนาสมการที่สมบูรณ์ (รวมทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกัน) ที่จะนำมาใช้ในการ
 คำนวณการเคลื่อนที่ของของไหลในมวลหินในภาคสนามที่มีทั้งรอยแตก ความพรุนของเนื้อหินเอง
 และอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่หลากหลาย ในส่วนของความเค้นนักวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่ความ
 เค้นหรือความดันล้อมรอบภายใต้สภาวะ Hydrostatic ซึ่งในความเป็นจริงความเค้นในมวลหินที่เป็น
 ชั้นน้ำบาดาลหรือหินแหล่งกักเก็บน้ำมันจะมีความเค้นภายใต้สภาวะ Anisotropic กล่าวคือ ความเค้น
 ในสามทิศทางที่กระทำต่อรอยแตกหรือชุดของรอยแตกในมวลหินมักจะมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้
 นักวิจัยส่วนใหญ่จะไม่พิจารณาการเกิดของรอยแตกในมวลหินที่มักจะมีลักษณะเป็นชุด (แต่ละชุดจะ
 มีรอยแตกขนานกัน) ส่วนใหญ่จะมีสองถึงสามชุดขึ้นไป แต่ละชุดจะมีทิศทางที่ต่างกันด้วย ซึ่งสมการ
 ควบคุมที่รวมคุณลักษณะที่สำคัญเหล่านี้ยังไม่มีการศึกษาไว้ ดังนั้นผลการศึกษาจาก
 งานวิจัยที่เสนอมานี้ที่น่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการคำนวณหรือประเมินการไหลของของ
 ไหลในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมวลหินที่เป็นชั้นน้ำบาดาลและแหล่งกักเก็บน้ำมัน

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 ตัวอย่างหิน

โครงการวิจัยนี้ได้คัดเลือกตัวอย่างหินทรายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อหาความชื้นผ่านภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ คือ ความเค็ม ความพรุนของเนื้อหิน ความขรุขระของรอยแตก และความชื้นผ่านของรอยแตก ตัวอย่างหินที่คัดเลือกมาใช้ในการทดสอบจะอาศัยหลักการให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด (Homogeneous) มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ หินทรายซุดภูพาน ซุดภูกระดึง ซุดเสาชั่ว และซุดพระวิหาร ซึ่งชื่อของหินทรายเหล่านี้จะใช้ตัวอักษรย่อคือ PP, PK, SK และ PW ตามลำดับ ตัวอย่างหินแต่ละชนิดได้นำมาเจาะและตัดให้มีขนาดตามที่กำหนดและบางส่วนได้นำมาบดเป็นผงเพื่อนำไปทดสอบองค์ประกอบเชิงแร่วิทยาโดยใช้วิธี X-ray diffraction

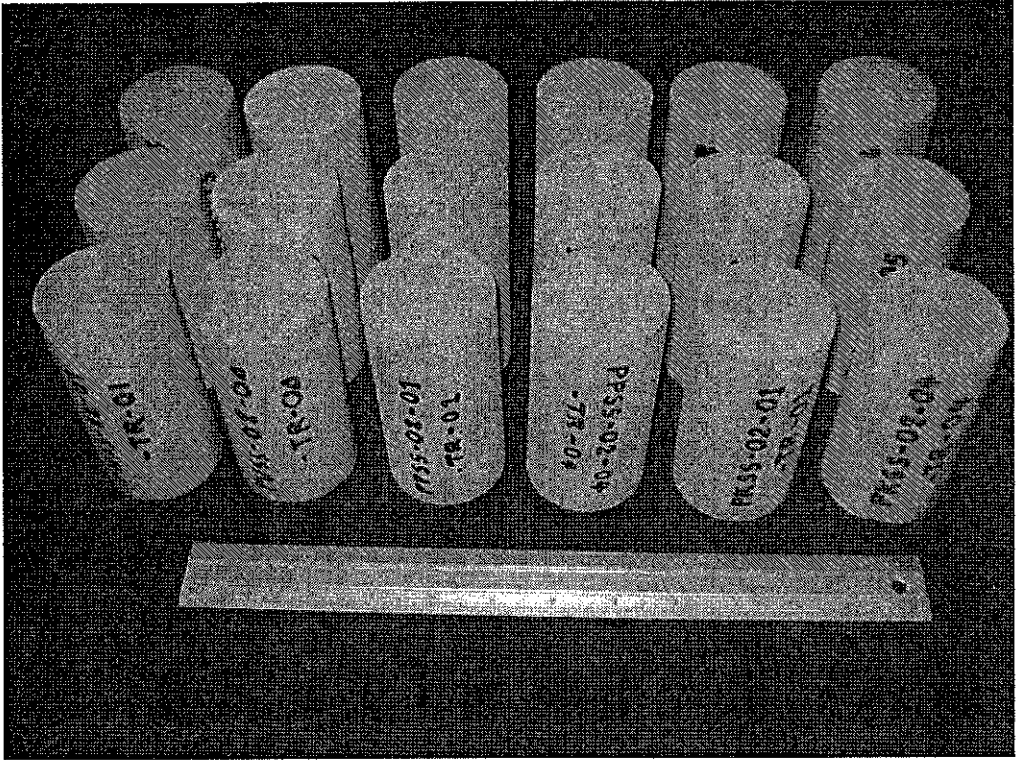
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างหินได้อาศัยมาตรฐานที่มีอยู่ของ ASTM (D4543) ซึ่งหินทรายทั้ง 4 ชนิด ที่นำมาทดสอบมีแร่ควอตซ์เป็นส่วนประกอบหลักเพราะมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง มีความหนาแน่นและมีความแข็งปานกลาง ขนาดของเม็ดผลึกประมาณ 0.1–1.0 มิลลิเมตร สามารถพบได้ทั่วไปตามภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การจัดเตรียมตัวอย่างหินสำหรับ 4 วิธีการทดสอบมีดังนี้

1) ตัวอย่างหินสำหรับทดสอบการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ (Constant head test) ภายใต้ความดันล้อมรอบที่เท่ากัน (Hydrostatic stress) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะมีการจัดเตรียมทั้งหมด 24 ตัวอย่าง แบ่งเป็น ซุดภูพาน 6 ตัวอย่าง ซุดภูกระดึง 6 ตัวอย่าง ซุดเสาชั่ว 6 ตัวอย่าง และซุดพระวิหาร 6 ตัวอย่าง

2) ตัวอย่างหินสำหรับทดสอบการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ความเค็มที่แตกต่างกัน (Deviatoric stress) นำตัวอย่างหินไปเจาะให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร (รูปที่ 3.1) ซึ่งจะมีการจัดเตรียมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง แบ่งเป็นซุดภูพาน 3 ตัวอย่าง ซุดภูกระดึง 3 ตัวอย่าง และซุดพระวิหาร 3 ตัวอย่าง

3) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบความชื้นผ่านของรอยแตกโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ความดันในแนวแกน มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร และสร้างรอยแตกบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างหินโดยใช้วิธี line load ซึ่งจะมีการจัดเตรียมทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แบ่งเป็นซุดภูพาน 2 ตัวอย่าง ซุดภูกระดึง 2 ตัวอย่าง ซุดเสาชั่ว 2 ตัวอย่าง และซุดพระวิหาร 2 ตัวอย่าง

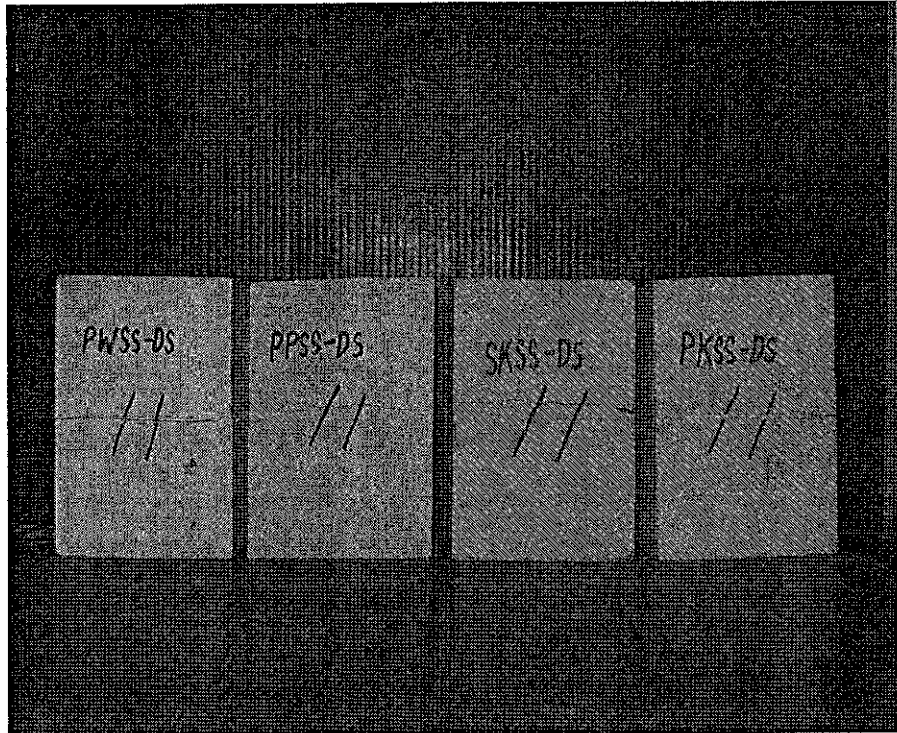


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (2 แถวซ้าย) ชุดภูพาน (2 แถวกลาง) และชุดภูกระดึง (2 แถวขวา) ถูกจัดเตรียมสำหรับการทดสอบอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ความดันล้อมรอบที่แตกต่างกัน

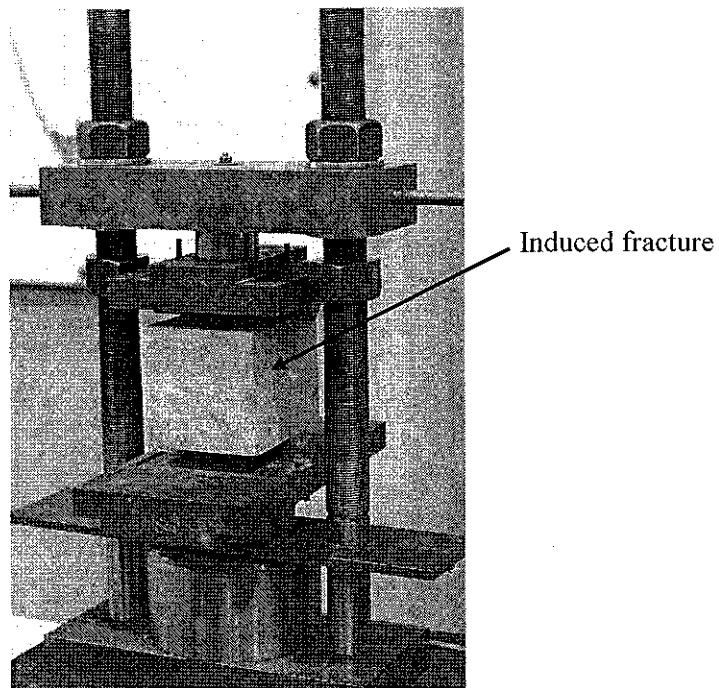
4) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบความชื้นผ่านของรอยแตกโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ความเค้นในแนวแกนและแนวเฉือน มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร (รูปที่ 3.2) และสร้างรอยแตกบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างหินโดยใช้วิธี line load (รูปที่ 3.3) ซึ่งจะมีการจัดเตรียมทั้งหมด 24 ตัวอย่าง แบ่งเป็นชุดคุณภาพ 6 ตัวอย่าง ชุดกระดูกแข็ง 6 ตัวอย่าง ชุดเสาเข็ม 6 ตัวอย่าง และชุดพระวิหาร 6 ตัวอย่าง

3.3 การศึกษาแร่วิทยา

การศึกษาแร่วิทยามีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณแร่ประกอบหินและลักษณะแร่วิทยาของตัวอย่างหินทั้ง 4 ชนิด เพื่อใช้เป็นปัจจัยในการอธิบายลักษณะความชื้นผ่านได้ของหินแต่ละชนิด ซึ่งผลการศึกษาลักษณะแร่วิทยาของตัวอย่างหินทั้ง 4 ชนิด โดยการวิเคราะห์หาแร่ประกอบหินด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) โดยการใช้เครื่องมือ X-ray Diffractometer Power รุ่น D5005 ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งผลการศึกษานี้จะนำมาพิจารณา และวิเคราะห์ร่วมกับผลการศึกษาความแข็งและการผูกกร่อนของหินแต่ละชนิดในบทต่อไป



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (PW) ชุดภูพาน (PP) ชุดเสาข้าว (SK) และชุดภูกระดึง (PK) สำหรับการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปร ภายใต้ความเค้นในแนวแกนและแนวเฉียง



รูปที่ 3.3 การทำรอยแตกในแท่งตัวอย่างหิน โดยใช้วิธีการกดในแนวเส้น (Line Loading)

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์แร่ประกอบหินด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

Sandstone	Density (g/cc)	Grain Size (mm)	Sorting	Mineral Compositions				
				Quartz (%)	Albite (%)	Kaolinite (%)	Feldspar (%)	Mica (%)
PW	2.35	1.5-2.0	well	99.47	-	0.53	-	-
PP	2.45	1.5-2.0	well	98.40	-	-	-	1.60
PK	2.63	0.1-1.5	moderate	48.80	46.10	5.10	-	-
SK	2.37	0.1-1.0	poorly	57.00	39.50	-	2.90	0.60

บทที่ 4

การทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ

4.1 รูปแบบการทดสอบ

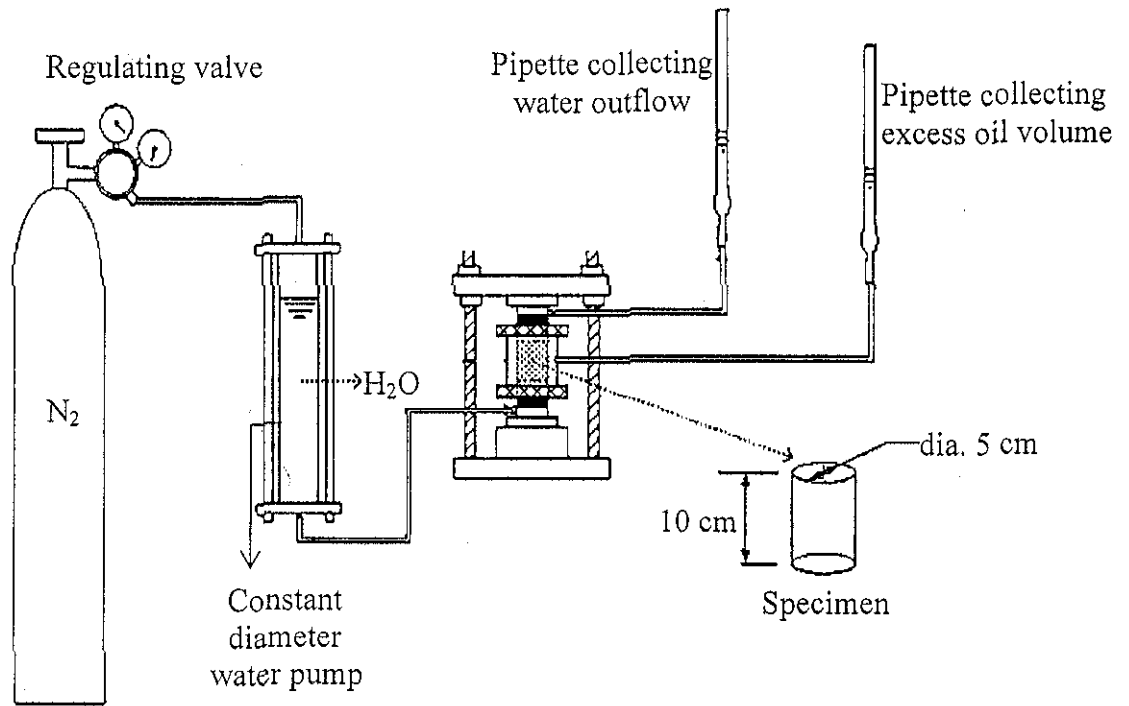
การทดสอบความซึมผ่านในหินทรายและรอยแตก สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 รูปแบบ ดังนี้

- (1) การทดสอบความซึมผ่านของหินทรายโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ความดันล้อมรอบเท่ากัน
- (2) การทดสอบความซึมผ่านของหินทรายโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ Deviatoric stress
- (3) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตก
- (4) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากและแนวเฉือน

4.2 การทดสอบความซึมผ่านของหินทรายโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ความดันล้อมรอบเท่ากัน

4.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบนี้ได้นำวิธีการแบบ constant head flow test มาใช้เพื่อหาผลกระทบของความเค้นที่เท่ากันทุกทาง และค่าความซึมผ่านในหินทรายที่ไม่มีรอยแตกและเป็นเนื้อเดียวกัน รูปที่ 4.1 แสดงการทดสอบแบบ constant head flow test ภายใต้ความดันล้อมรอบ ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารและชุดภูพานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร โดยมีการใช้หลอดอัดน้ำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคงที่เพื่ออัดน้ำด้วยความดัน 0.14 MPa (20 psi) เข้าสู่ส่วนล่างของตัวอย่างหินที่มีความดันล้อมรอบภายในโดยใช้ Hoek cell ซึ่งมีวาล์วเปิด-ปิดในการควบคุมระดับความดันของน้ำและใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวอัด โดยค่าความดันล้อมรอบจะผันแปรในช่วง 3.45 (500 psi), 6.9, 10.34, 13.79, 17.24 ไปถึง 20.69 MPa (3000 psi) แล้วใช้ pipette ในการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลออกมาจากส่วนบนของตัวอย่าง



รูปที่ 4.1 การทดสอบแบบ constant head flow test

4.2.2 ผลการทดสอบ

อัตราการไหลที่วัดได้จากความดันล้อมรอบที่หลากหลายถูกนำมาคำนวณค่าความซึมผ่านของตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ของตัวอย่างคำนวณโดยใช้สมมติฐานของ Darcy's law (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = 4q\mu / [\pi D^2(dp / dx)] \quad (4.1)$$

โดยที่ q คือ อัตราการไหลผ่านตัวอย่าง (cm^2/s)
 μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)
 D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง (cm) และ
 dp/dx คือ อัตราของความดันตลอดความยาวของตัวอย่าง

รูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารจำนวน 8 ตัวอย่างภายใต้ความดันล้อมรอบในช่วง 3.45 ถึง 20.7 MPa ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงจาก 100×10^{-9} m/s ถึง 50×10^{-9} m/s เมื่อค่าความดันล้อมรอบเพิ่มขึ้นจาก 3.45 MPa ถึง 20.7 MPa

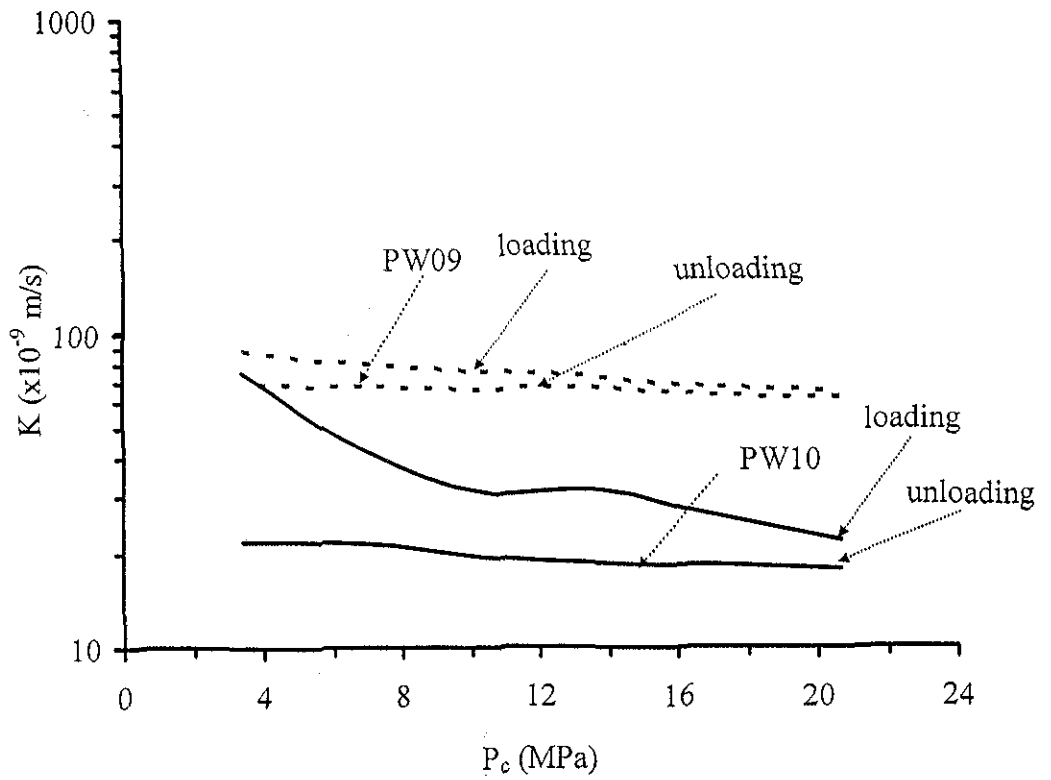
4.2.3 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลที่ลดลงในช่วง loading แสดงถึงค่าความซึมผ่านที่มีค่าลดลงเนื่องจากช่องว่างภายในหินถูกปิดลงทำให้เส้นทางการไหลถูกปิดกั้นลงไปด้วย แต่ในช่วง unloading ค่าความซึมผ่านของหินทรายมีแนวโน้มคงที่เนื่องจากช่องว่างการไหลได้ถูกปิดกั้นลงไปแล้วในช่วง loading จึงทำให้อัตราการไหลผ่านมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

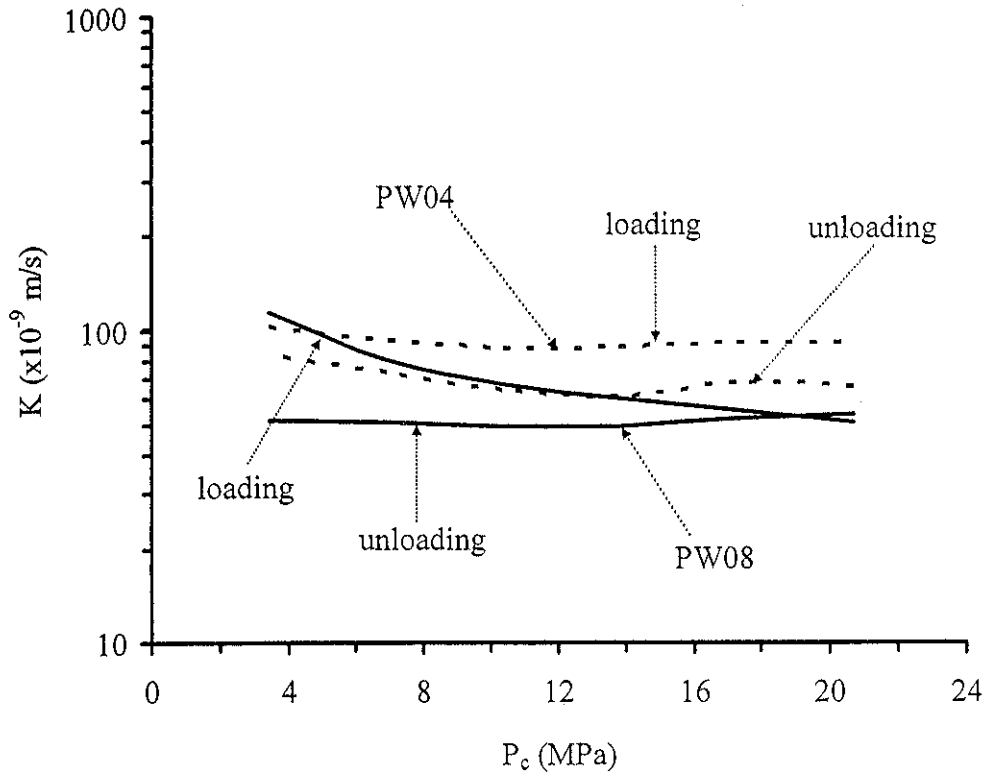
4.3 การทดสอบความซึมผ่านของหินทรายโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ Deviatoric stress

4.3.1 วิธีการทดสอบ

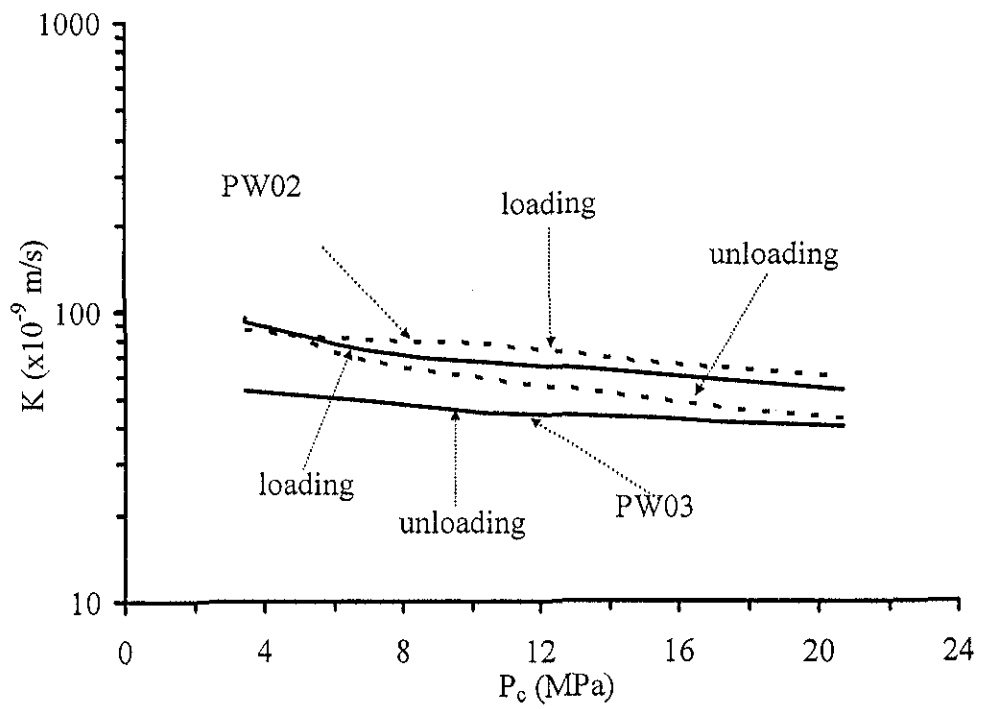
รูปแบบการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ภายใต้ Deviatoric stress จะคล้ายกับรูปแบบการทดสอบการไหลภายใต้ความดันล้อมรอบ โดยหลังจากที่มีการใส่ค่าความดันล้อมรอบจะมีการเพิ่มค่าความเค้นกดในแนวแกนจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ค่าความดันล้อมรอบมีการผันแปรในช่วง 1-3 MPa การวัดค่าการไหลจะวัดเมื่อความเค้นกดในแนวแกน



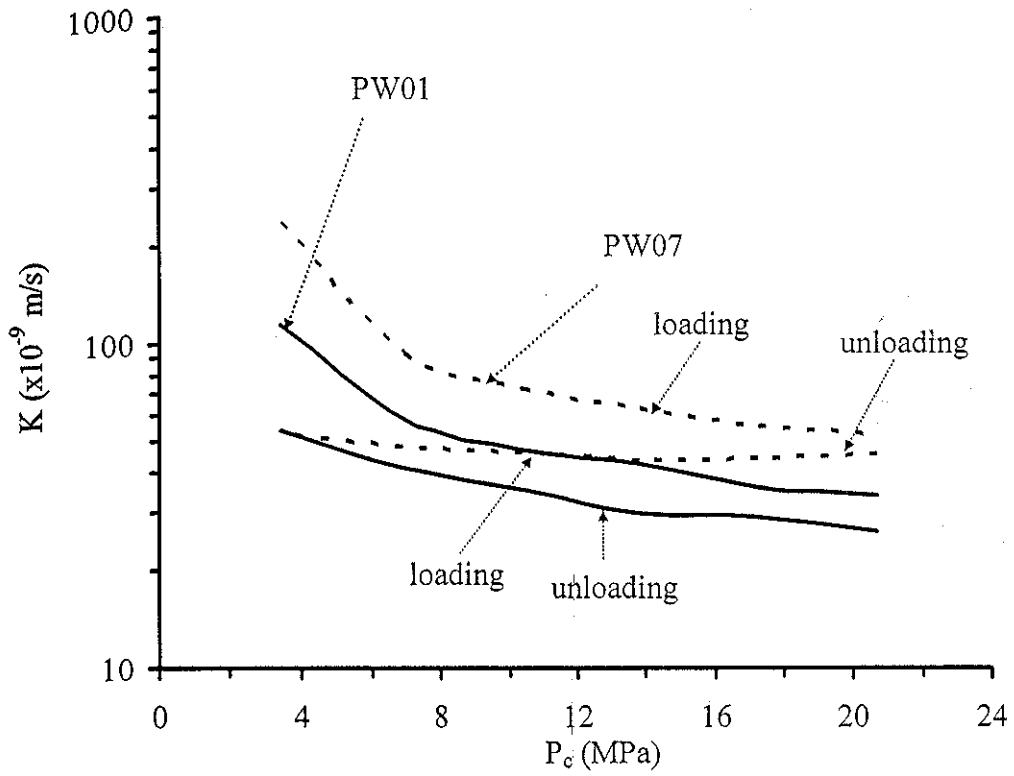
รูปที่ 4.2 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 9 และ 10 ภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 4.3 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 4 และ 8 ภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 4.4 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 2 และ 3 ภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 4.5 ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินชุดพระวิหาร หมายเลข 1 และ 7 ภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง

เพิ่มขึ้นทุก 6.9 MPa แรงดันน้ำที่อัดเข้าไปในตัวอย่างจะถูกรักษาไว้ที่ 0.27 MPa (40 psi) โดยใช้ pipette ในการวัดค่าน้ำมันส่วนเกินที่ปล่อยออกมาจาก Hoek cell ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของตัวอย่าง สามารถวัดค่าโดยใช้มาตราส่วนแบบ pipette

4.3.2 ผลการทดสอบ

การคำนวณค่าความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างในช่วง loading สามารถคำนวณได้จากสมการ

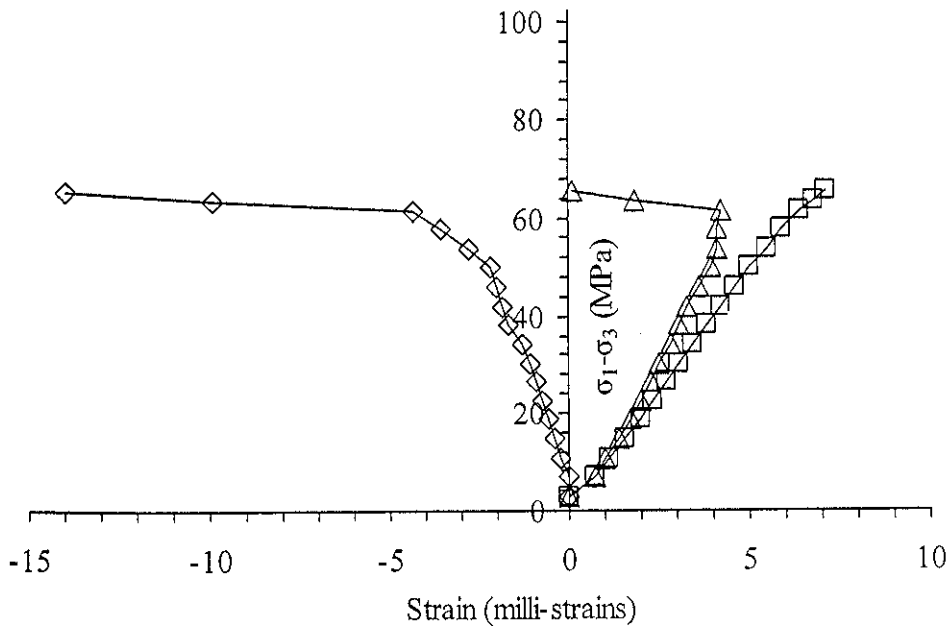
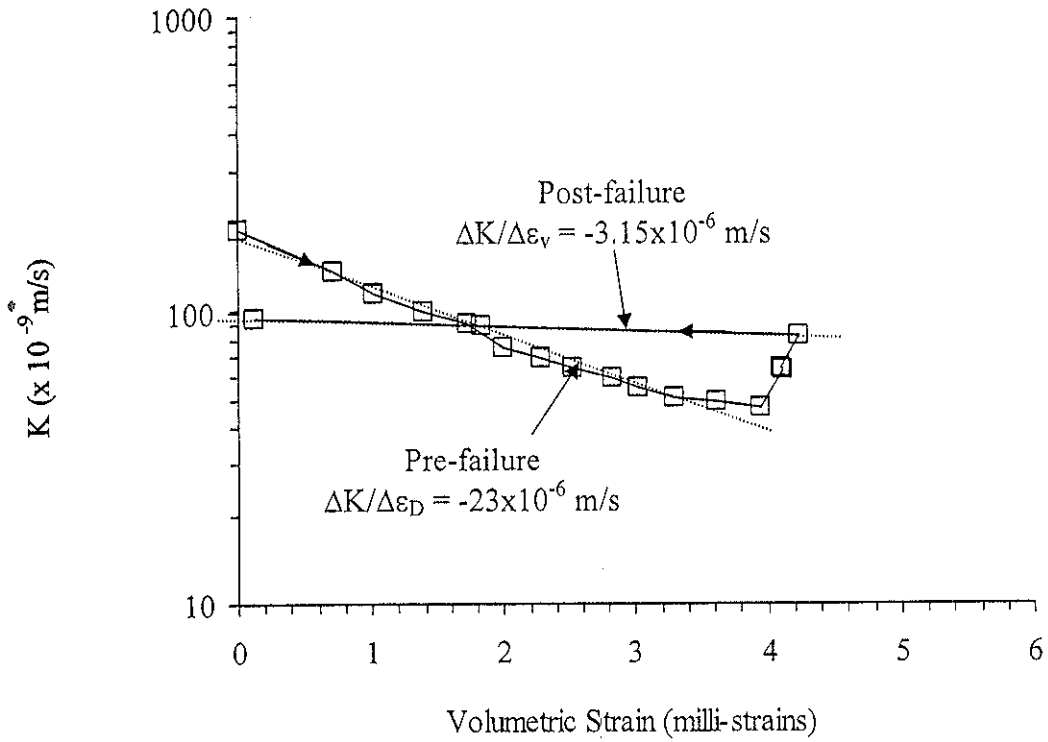
$$\varepsilon_v = (V_o - V_s) / V_R \quad (4.2)$$

โดยที่ V_o คือ ปริมาตรของน้ำมันส่วนเกิน
 V_s คือ ปริมาตรของน้ำมันที่ถูกแทนที่ด้วยแท่งกด และ
 V_R คือ ปริมาตรของตัวอย่างหิน

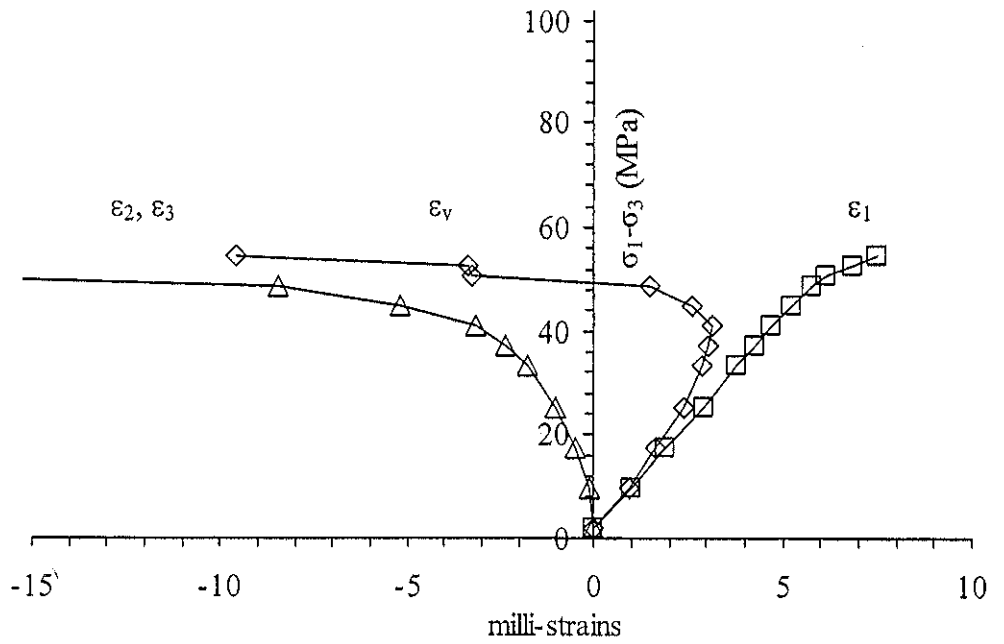
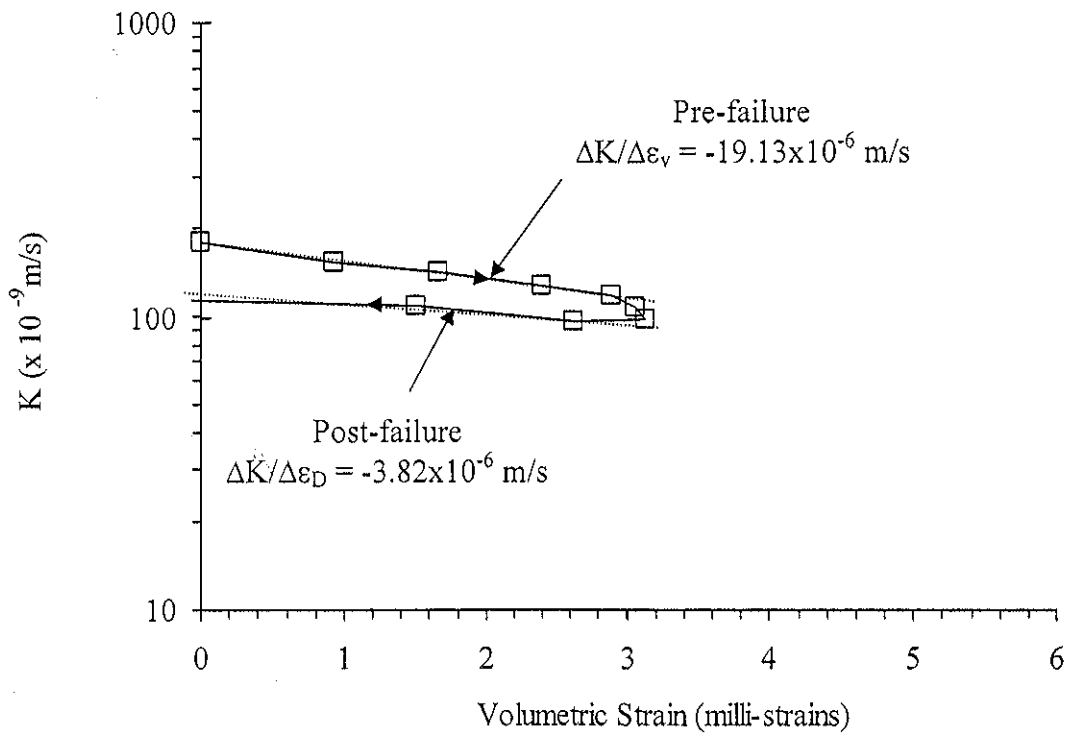
รูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.14 แสดงค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ภูพาน และภูกระดึงเทียบกับค่าความเครียดเชิงปริมาตร (ε_v) โดยผลที่ได้มีการนำมาเปรียบเทียบในรูปของ stress-strain curve ภายใต้อุณหภูมิรอบ (σ_3) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1)

4.3.3 สรุปผลการทดสอบ

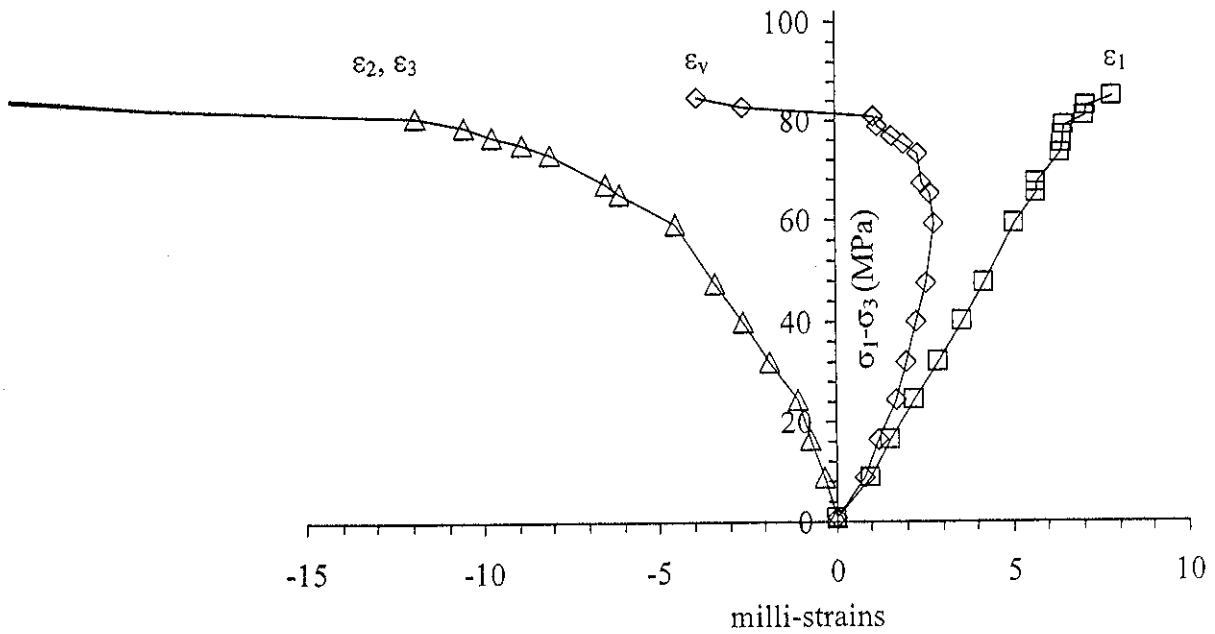
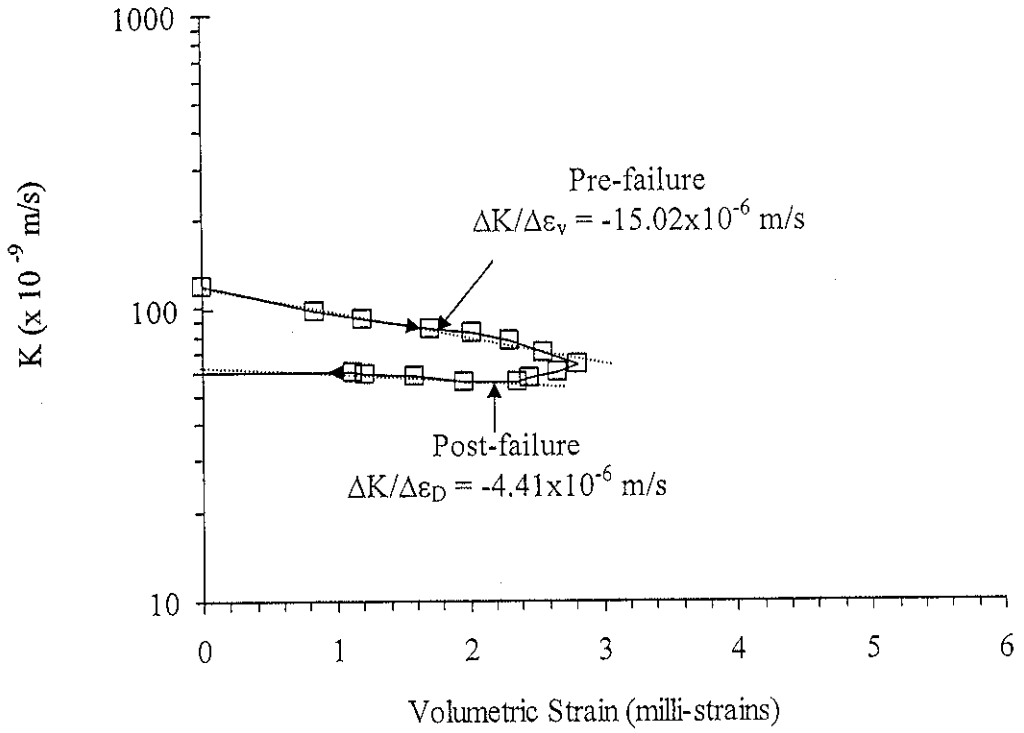
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงก่อนเกิดการบวมตัวค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความต่างของความเค้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ferfera et al. (1997), Pusch and Weber (1998), Oda et al. (2002) และ Heiland (2003) จนกระทั่งหินเกิดการบวมตัวขึ้น จึงทำให้ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินทรายชุดภูพานและภูกระดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเค้นให้แตกต่างกันมากขึ้น ตารางที่ 4.1 แสดงผลสรุปของการทดสอบการไหลภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกัน โดยมีการคำนวณอัตราส่วนของค่าความซึมผ่านต่อความเครียดเชิงปริมาตร ($\Delta K / \Delta \varepsilon_v$) ก่อนเกิดการบวมตัว และอัตราส่วนของค่าความซึมผ่านต่อความเครียดของการบวมตัว ($\Delta K / \Delta \varepsilon_D$) หลังเกิดการบวมตัว



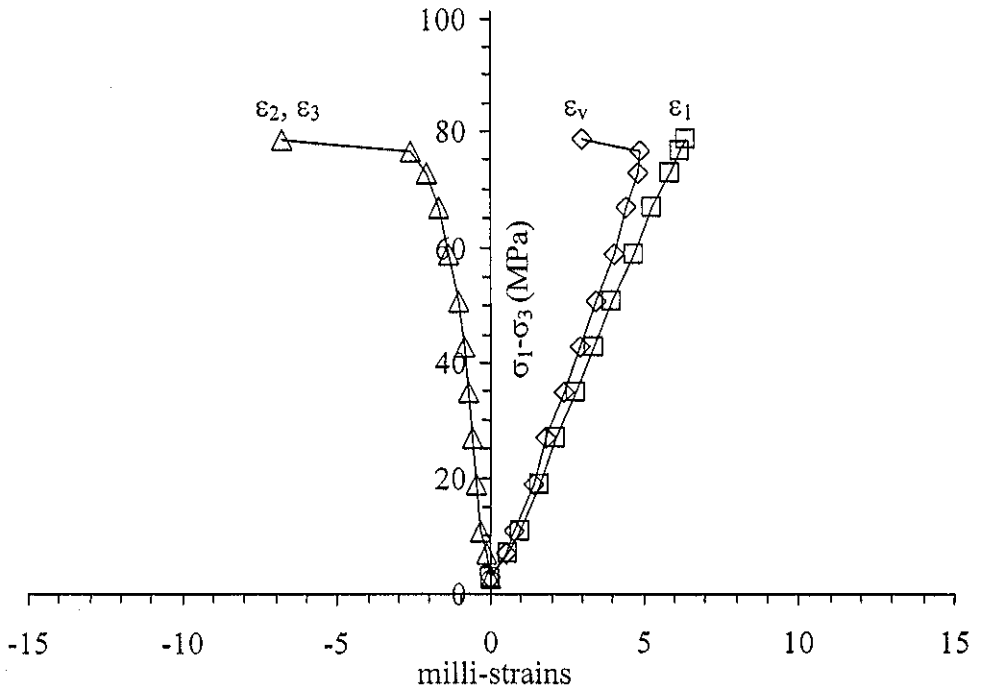
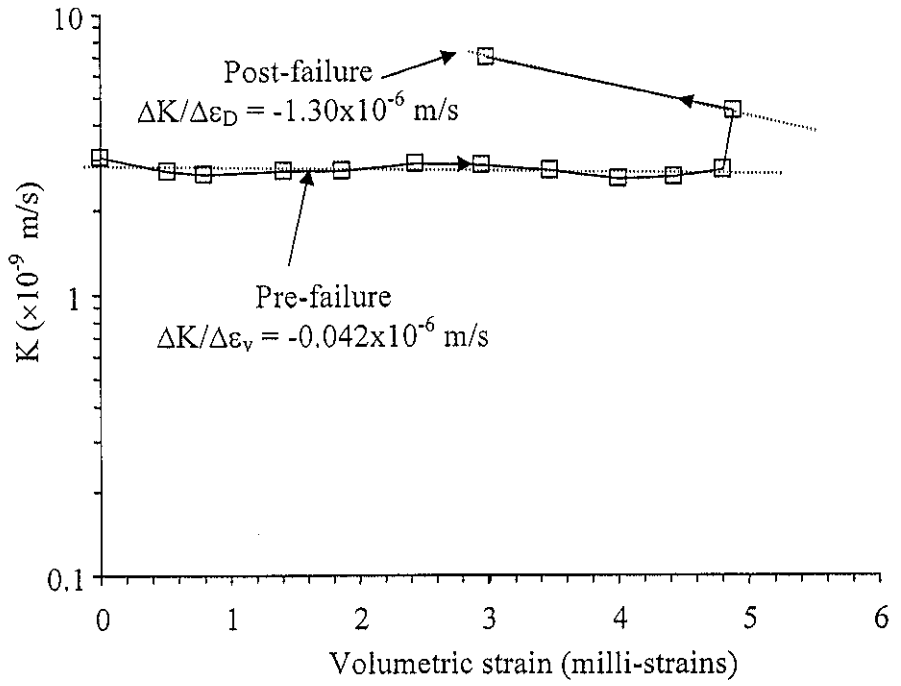
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหารโดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa



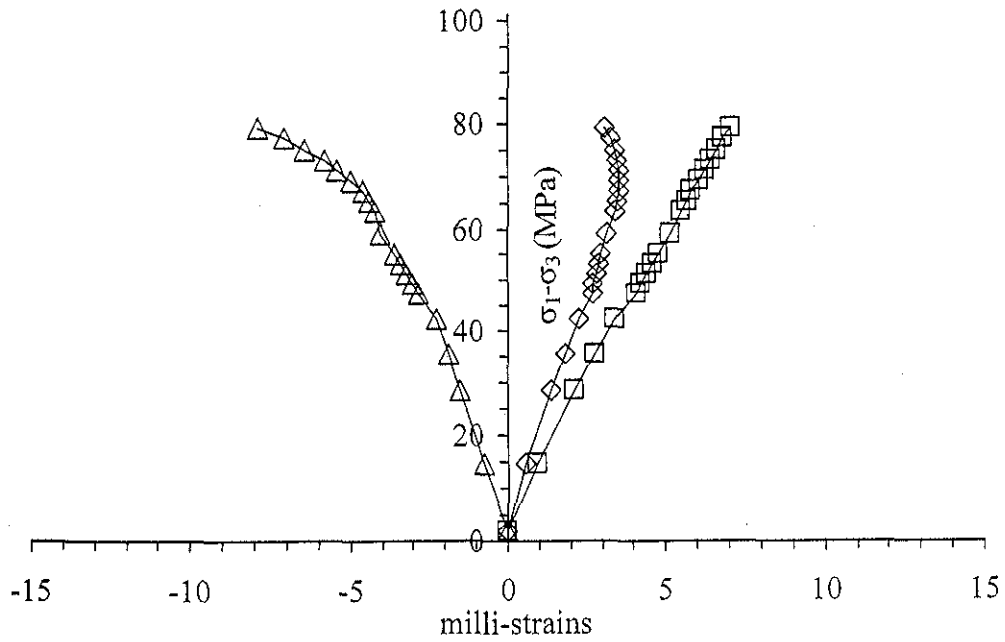
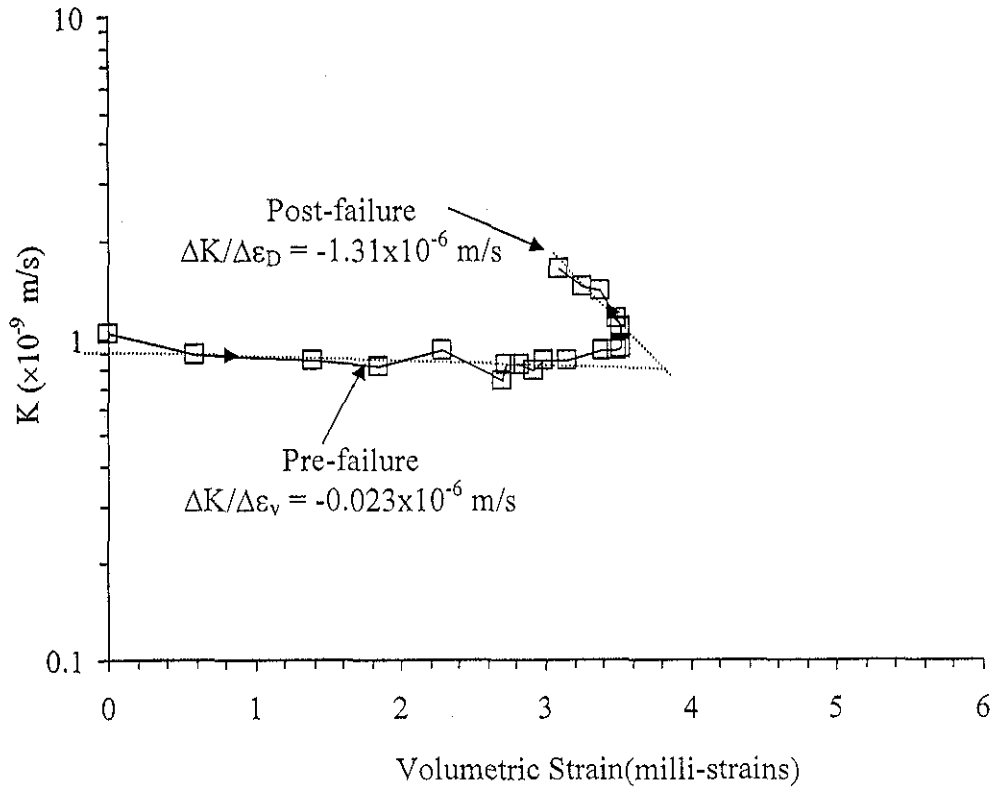
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร โดยมีความดันล้อมรอบ 2 MPa



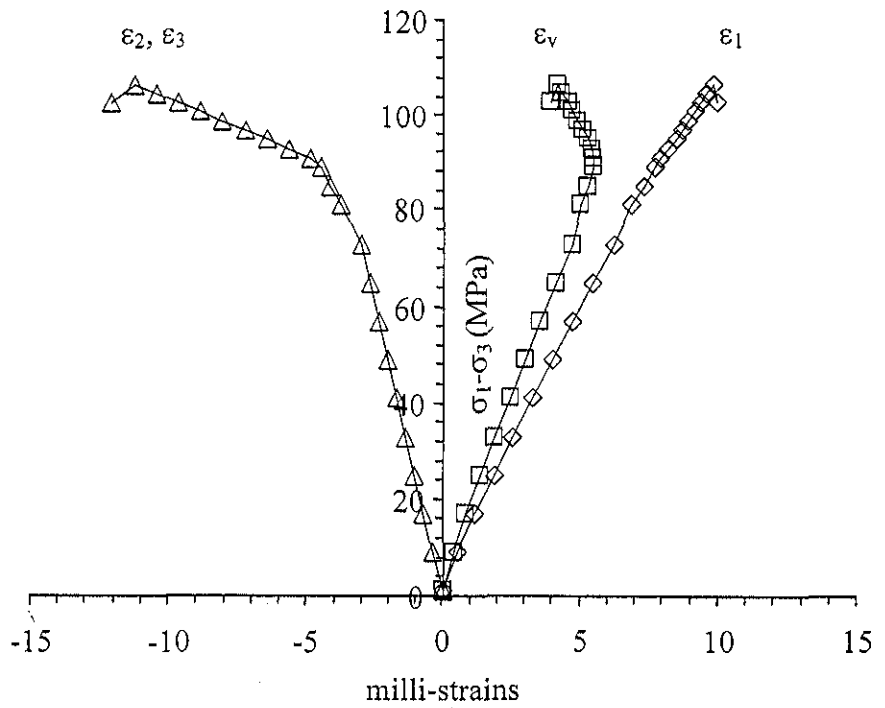
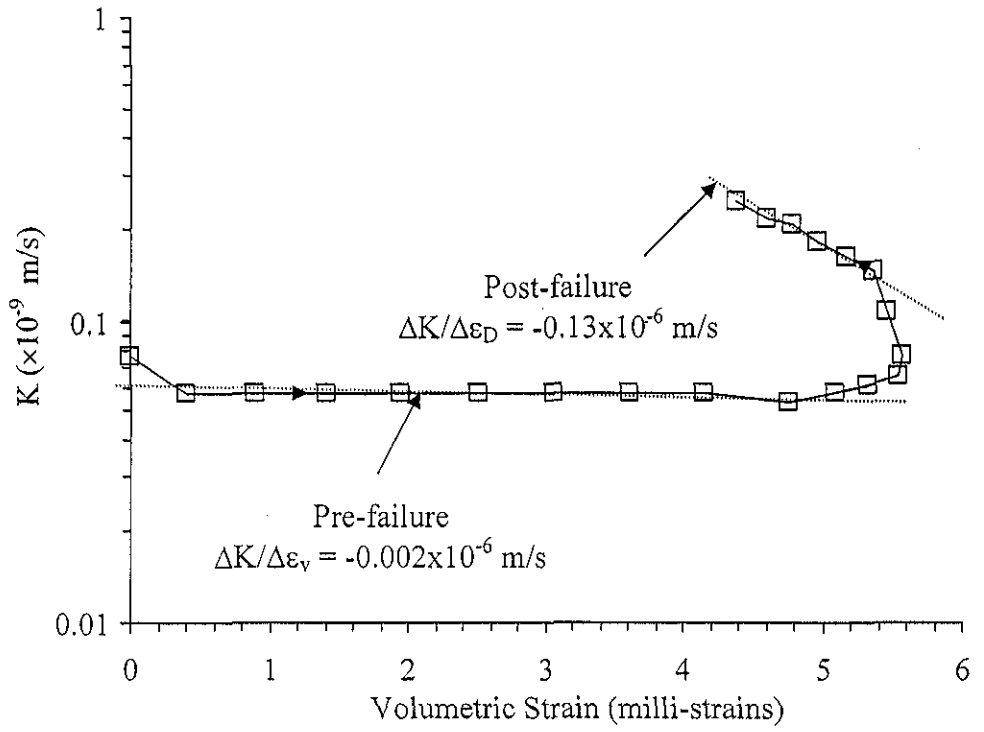
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความชื้นผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร โดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa



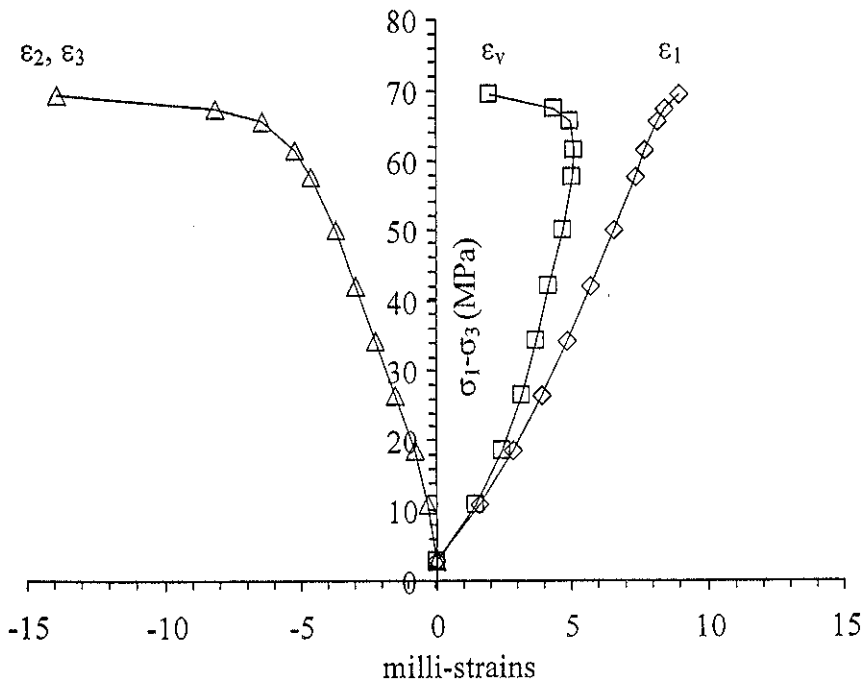
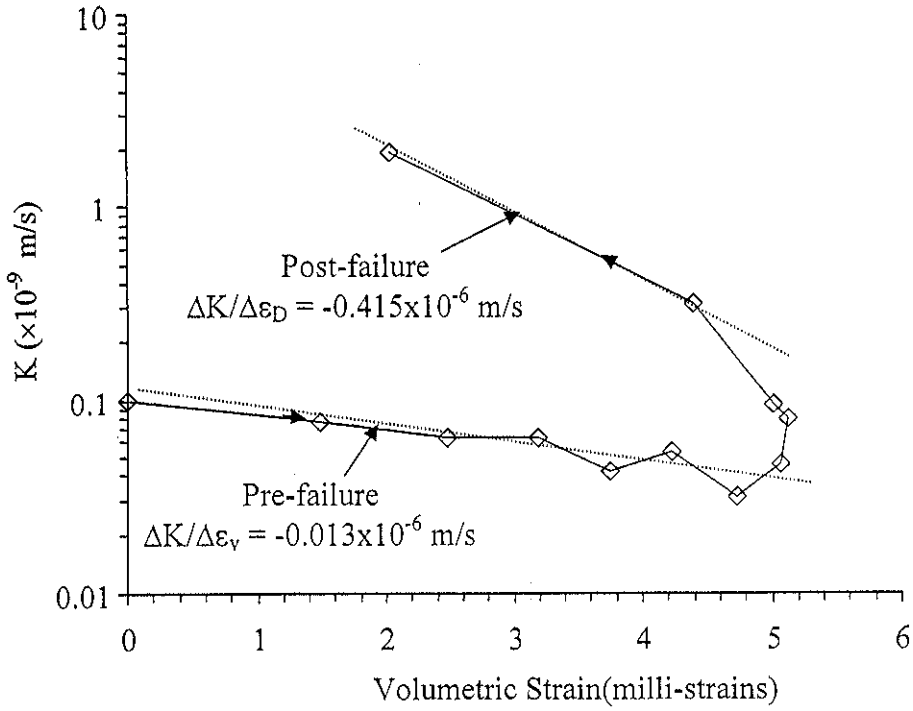
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูพาน โดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa



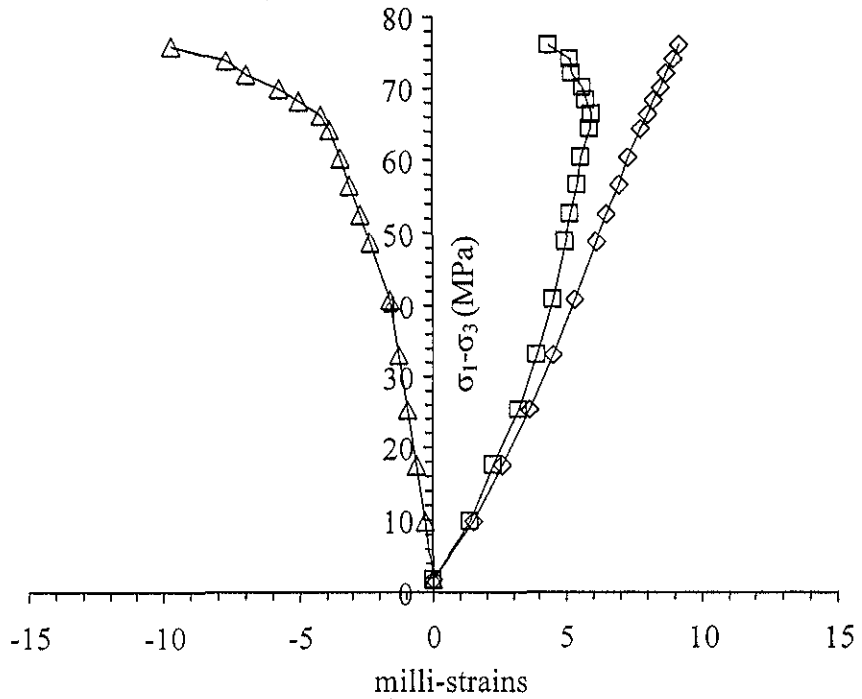
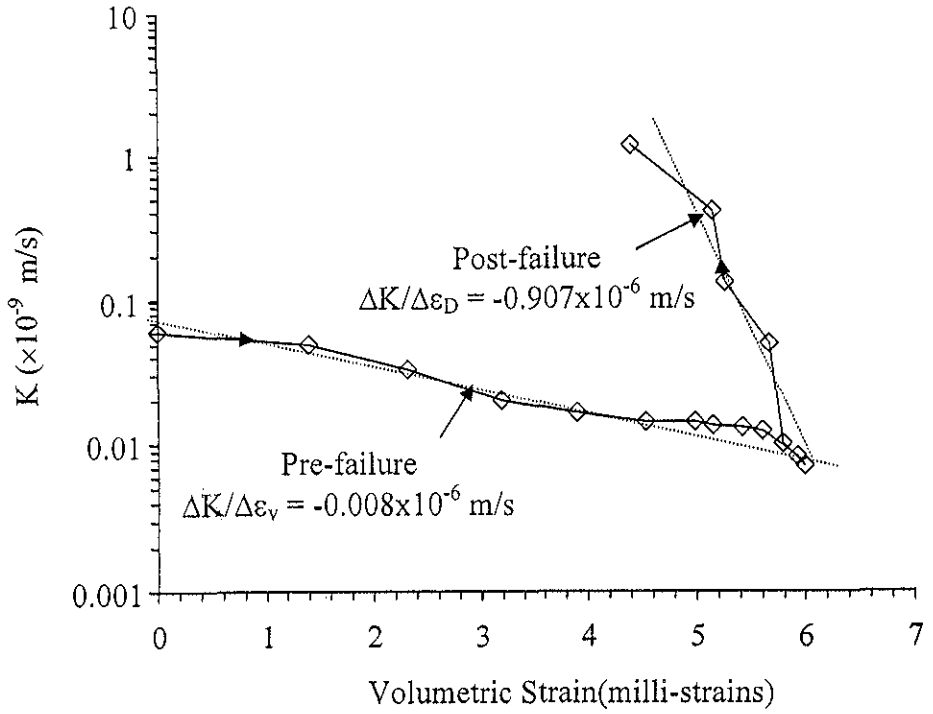
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูพาน โดยมีความดันล้อมรอบ 2 MPa



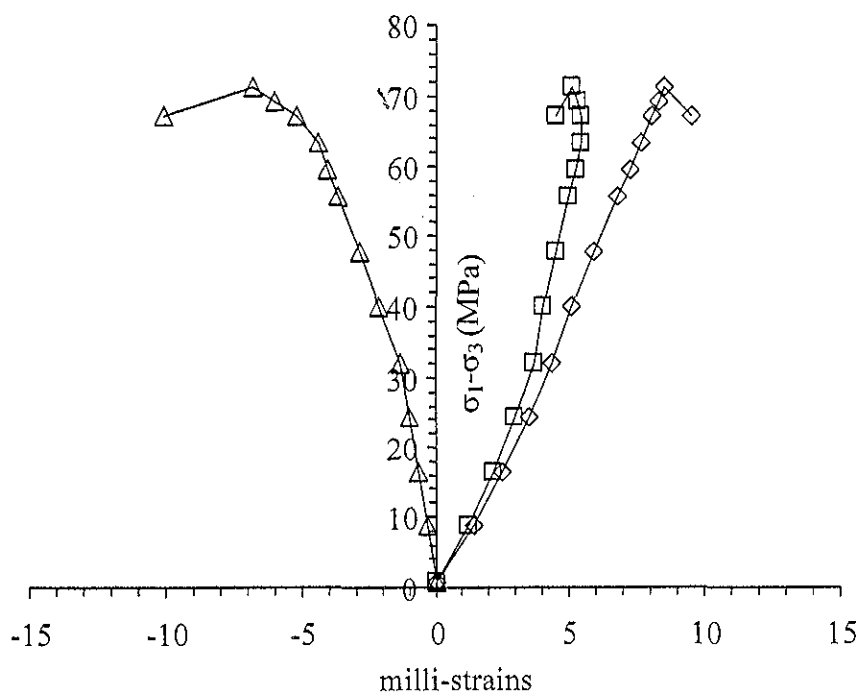
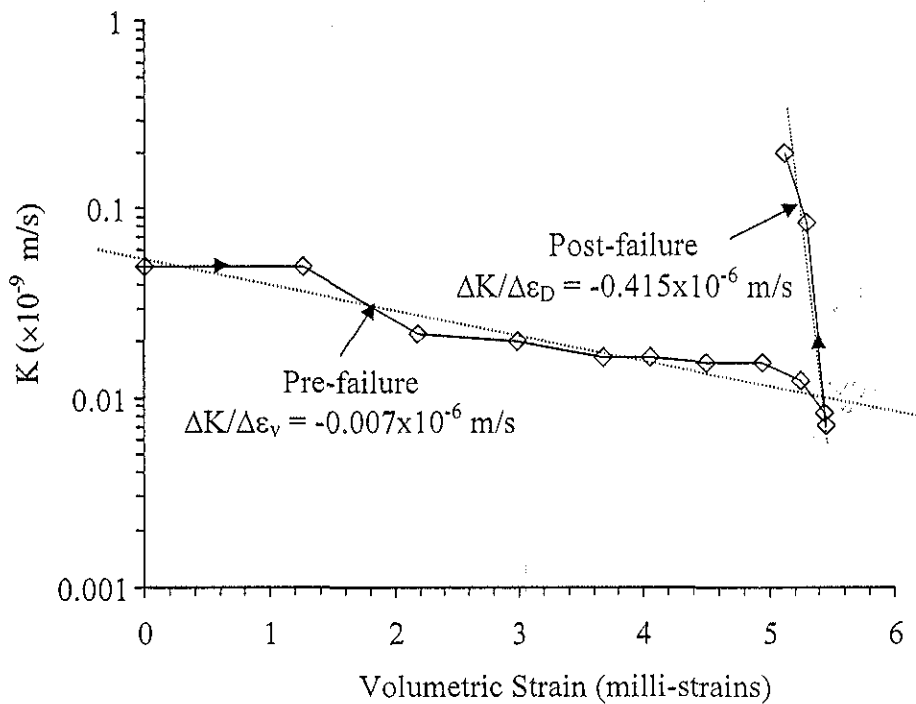
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความชื้นผ่านของหินทรายชุดภูพานโดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความชื้นผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง โดยมีความดันล้อมรอบ 1 MPa



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึงโดยมีความดันค้ำล้อมรอบ 2 MPa



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง โดยมีความดันล้อมรอบ 3 MPa

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการไหลภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกัน

Sample No.	P _c (MPa)	E (GPa)	ν	Dilation Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Pre-failure	Post-failure
						$\Delta k/\Delta \epsilon_v$ ($\times 10^{-6}$ m/s)	$\Delta k/\Delta \epsilon_D$ ($\times 10^{-6}$ m/s)
PWSS-01	1	9.66	0.33	42	65	-23.00	-3.15
PWSS-02	2	8.66	0.35	37	55	-19.13	-3.82
PWSS-03	3	8.52	0.33	55	88	-15.02	-4.41
Standard deviation				45±10	69±19		
PPSS-01	1	11.58	0.27	60	78	-0.042	-1.31
PPSS-02	2	12.77	0.27	61	79	-0.023	-1.31
PPSS-03	3	13.0	0.26	92	106	-0.002	-0.13
Standard deviation				76±16	88±18		
PKSS-01	1	7.47	0.27	58	70	-0.013	-0.61
PKSS-02	2	7.70	0.30	60	75	-0.008	-0.91
PKSS-03	3	7.39	0.31	55	71	-0.007	-0.41
Standard deviation				58±3	73±3		

4.4 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตก

4.4.1 วิธีการทดสอบ

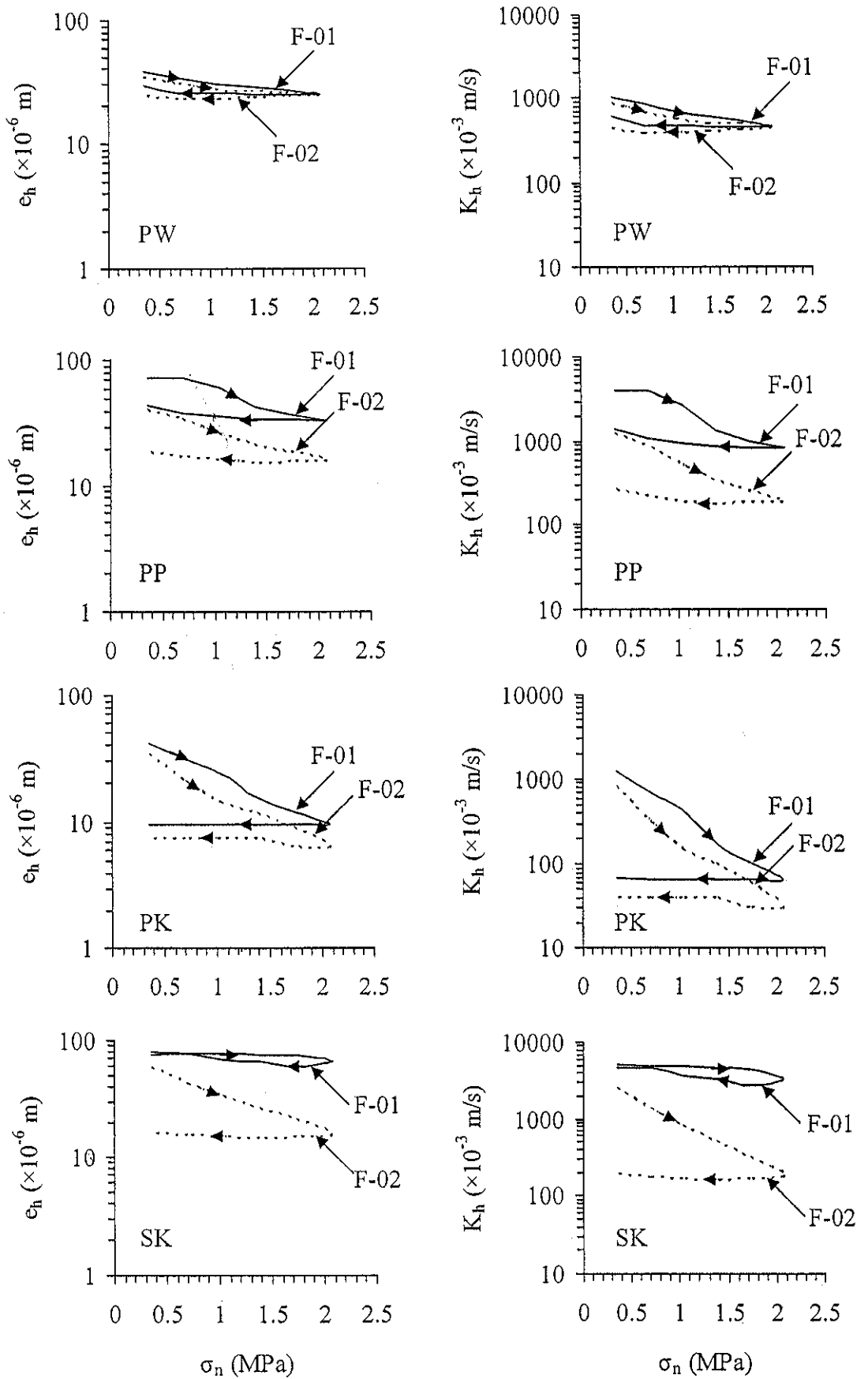
การทดสอบด้วยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากกับรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน ชุดภูกระดึง และชุดเสาขัว ในหนึ่งรอบของการทดสอบการไหลจะมีช่วงที่ใส่ค่าน้ำหนักกดและช่วงลดค่าน้ำหนักกด ในขณะที่ใส่ค่าน้ำหนักกดจะมีการเพิ่มค่าความเค้นในแนวตั้งฉากโดยเพิ่มจาก 0.35, 0.69, 1.03, 1.39, 1.72 ไปจนถึง 2.06 MPa ในช่วงที่มีการลดค่าน้ำหนักกดจะลดค่าความเค้นในแนวตั้งฉากจากมากที่สุดไปจนถึงน้อยที่สุด ซึ่งทั้งสองช่วงนี้จะมีการวัดอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างทดสอบจะมีขนาดพื้นที่รอยแตกเท่ากับ 15×15 เซนติเมตร รูปแบบของการทดสอบจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปแบบการทดสอบภายใต้ความเค้นในแนวตั้งฉากและแนวเฉียง โดยมีการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่างในแต่ละชนิดของหินทราย

4.4.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.15 แสดงค่ารอยเปิดเฉย (e_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) ของรอยแตกเทียบกับค่าความเค้นในแนวแกน โดยแสดงทั้งช่วงที่ใส่ค่าน้ำหนักกดและช่วงลดค่าน้ำหนักกด โดยค่า hydraulic aperture และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านคำนวณจากสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 ตามลำดับ

4.4.3 สรุปผลการทดสอบ

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของหินทรายทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มของค่าความเค้นในแนวแกน โดยค่าความซึมผ่านที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 100×10^{-6} m/s ถึง 1000×10^{-6} m/s ในช่วง unloading รอยเปิดเฉยจะปิดตัวส่งผลให้มีค่าความซึมผ่านของรอยแตกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบความซึมผ่านแบบ Falling head test ของรอยแตกในหินทราย ภาพซ้าย แสดงผลการคำนวณการเปิดผกของรอยแตก ภาพขวาแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน

4.5 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกโดยวิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรภายใต้ความเค้นในแนวตั้งและแนวเอียง

4.5.1 วิธีการทดสอบ

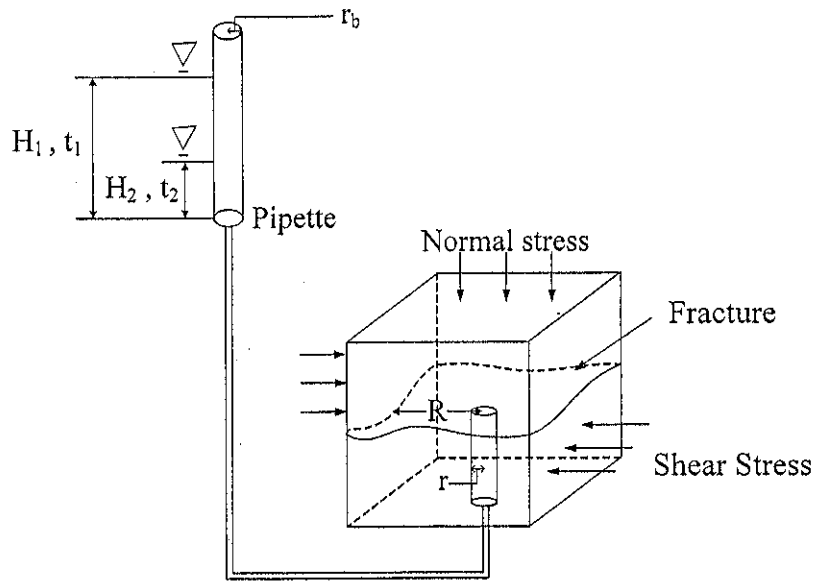
การทดสอบโดยใช้วิธีอัดน้ำด้วยแรงดันแบบผันแปรถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นในแนวแกนและแนวเอียงของหินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน ชุดภูกระดึง และชุดเสาข้าว รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบการทดสอบโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันผันแปรในรอยแตกภายใต้ความเค้นในแนวแกนและแนวเอียง ระดับน้ำสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบอยู่เหนือรอยแตก 1.23 เมตร บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างหินทรายชั้นล่างมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร มีการสร้างรอยแตกบนตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมขนาด 10×10×12 เซนติเมตร ด้วยวิธีแบบ line load เพื่อสร้างแรงดึงทำให้เกิดรอยแตกบนหิน โดยสามารถจำแนกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตกด้วย JRC profile ของ Barton (JRC-ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแตก) ความเค้นในแนวแกนมีค่าระหว่าง 0.69, 1.38, 2.76, 3.45 และ 4.14 MPa การวัดค่าจะวัดในช่วงที่ความเค้นในแนวเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 300 lbs ในช่วงก่อน peak strength และการเคลื่อนตัวทุกๆ 0.5 มิลลิเมตร ในช่วง residual strength โดยทำการทดสอบไปจนถึง 10 มิลลิเมตร ระหว่างที่ทำการทดสอบจะมีการวัดระดับน้ำในทุกช่วงการเคลื่อนตัวและมีการวัดค่ารอยเปิดแยกออกทั้งก่อนและหลังใส่ค่าความเค้นในแนวเอียง การวัดค่าการยึดตัวหรือหดตัวของรอยเปิดแยกจะวัดระหว่างที่ทำการทดสอบ

4.5.2 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบและค่าปัจจัยการทดสอบ นำค่า physical, mechanical และ hydraulic aperture มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของการทดสอบรอยแตก ซึ่งค่า physical aperture ได้มาจากการวัดรอยแตกโดยตรงทั้งก่อนและระหว่างการใส่ค่าความเค้นในแนวแกนและค่าความเค้นในแนวเอียง โดยจะวัด 4 จุดบริเวณมุมของ shear box แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย โดยค่าที่ได้จะเป็นค่า physical aperture ในแต่ละการเคลื่อนตัว ส่วนค่า mechanical aperture ในหน่วยมิลลิเมตรสามารถคำนวณได้จากสมการ (Barton & Bakhtar, 1983 and Bandis et al., 1983, 1985):

$$e_m = [JRC / 5] / [0.2(\sigma_c / JCS) - 0.1] \quad (4.3)$$

โดยที่ σ_c และ JCS คือ ค่า uniaxial compressive strength และ joint compressive strength ของหินในหน่วย MPa โดยสมมติให้ σ_c และ JCS มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 4.16 รูปแบบการทดสอบโดยการอัดน้ำด้วยแรงดันผันแปรในรอยแตกภายใต้ความเค้นในแนวตั้งและกำลังเฉือน

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร

Specimen No.	σ_n (MPa)	τ_{peak} (MPa)	$\tau_{residual}$ (MPa)	$e_{h,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$e_{h,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$e_{p,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$e_{p,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$K_{h,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{h,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)
PW02	0.69	1.5	0.86	79	127.5	400	810	4.55	11.85	116.67	478.41
PW04	1.38	2.2	1.55	69.49	117.53	490	1030	3.52	10.07	175.07	773.57
PW03	2.07	2.97	2.28	62.36	110.49	420	1030	2.84	8.9	128.63	773.57
PW01	2.76	4.1	2.72	48.8	108.76	420	800	1.74	8.62	128.63	466.67
PW06	3.49	5.2	3.62	22.54	83.54	377	780	0.37	5.09	103.64	443.62
PW05	4.14	6.01	5.09	16.25	78.12	320.5	764.5	0.19	4.43	74.9	426.17

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน

Specimen No.	σ_n (MPa)	τ_{peak} (MPa)	$\tau_{residual}$ (MPa)	$C_{h,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{h,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$K_{h,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{h,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)
PP01	0.69	2.07	0.95	115.88	120.25	780	910	9.79	10.54	443.63	603.82
PP02	1.38	2.41	1.1	108.53	118.62	800	1110	8.59	10.26	466.67	898.41
PP06	2.07	2.97	1.47	80.56	102.18	386	860	4.73	7.61	108.64	539.29
PP04	2.76	4.07	2.37	44.27	96.83	337.5	447.5	1.43	6.84	83.06	146.02
PP05	3.49	5.47	3.28	17.88	90.66	255	420	0.23	5.99	47.41	128.63
PP03	4.14	5.99	3.79	22.54	89.94	250	415	0.37	5.9	45.57	125.58

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง

Specimen No.	σ_n (MPa)	τ_{peak} (MPa)	$\tau_{residual}$ (MPa)	$C_{h,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{h,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$K_{h,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{h,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)
PK01	0.69	1.16	0.82	113.66	120.25	610	720	9.42	10.54	271.32	378
PK02	1.38	1.81	1.38	110.26	116.98	415	710	8.86	9.98	125.58	367.57
PK03	2.07	2.37	1.85	98.13	116.98	355	510	7.02	9.98	91.89	189.66
PK04	2.76	2.8	2.16	88.48	115.88	295	440	5.71	9.79	63.46	141.17
PK05	3.49	3.5	2.5	64.4	96.83	265	425	3.02	6.84	51.21	131.71
PK06	4.14	4.31	3.66	59.05	92.78	192.5	412.5	2.54	6.28	27.02	124.07

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรและผลการทดสอบของตัวอย่างหินทรายชุดเสาข้าว

Specimen No.	σ_n (MPa)	τ_{peak} (MPa)	$\tau_{residual}$ (MPa)	$C_{h,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{h,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,peak}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$C_{p,residual}$ ($\times 10^{-6}$ m)	$K_{h,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{h,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,peak}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	$K_{p,residual}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)
SK01	0.69	1.55	1.03	85.44	94.15	485	550	5.32	6.46	171.52	220.57
SK02	1.38	1.64	1.12	80.56	89.94	390	450	4.73	5.9	110.91	147.66
SK03	2.07	2.37	1.38	75.17	82.23	350	400	4.12	4.93	89.32	116.67
SK04	2.76	2.93	2.07	69.05	75.17	280	330	3.48	4.12	57.17	79.41
SK05	3.49	3.88	3.1	52.64	65.62	240	315	2.02	3.14	42	72.35
SK06	4.14	4.53	3.32	48.8	65.62	220	310	1.74	3.14	35.29	70.07

ค่า JRC ที่วัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง 11, 13 ถึง 15 สามารถจำแนกเป็นลักษณะแบบ rough and undulating; bedding and tectonic joints; and relief joints ตามลำดับ จากสมการสามารถคำนวณค่า mechanical aperture จากค่า JRC มีค่าเท่ากับ 220, 260 และ 300 ไมโครเมตร

ค่า hydraulic aperture สำหรับการไหลแบบรัศมีสามารถคำนวณด้วยสมการ (Maini, 1971):

$$e_h = \left[\frac{\ln((H_1 / H_2)r_b^2 \ln(R / r) 6\mu)}{[(t_2 - t_1)\gamma]} \right]^{1/3} \quad (4.4)$$

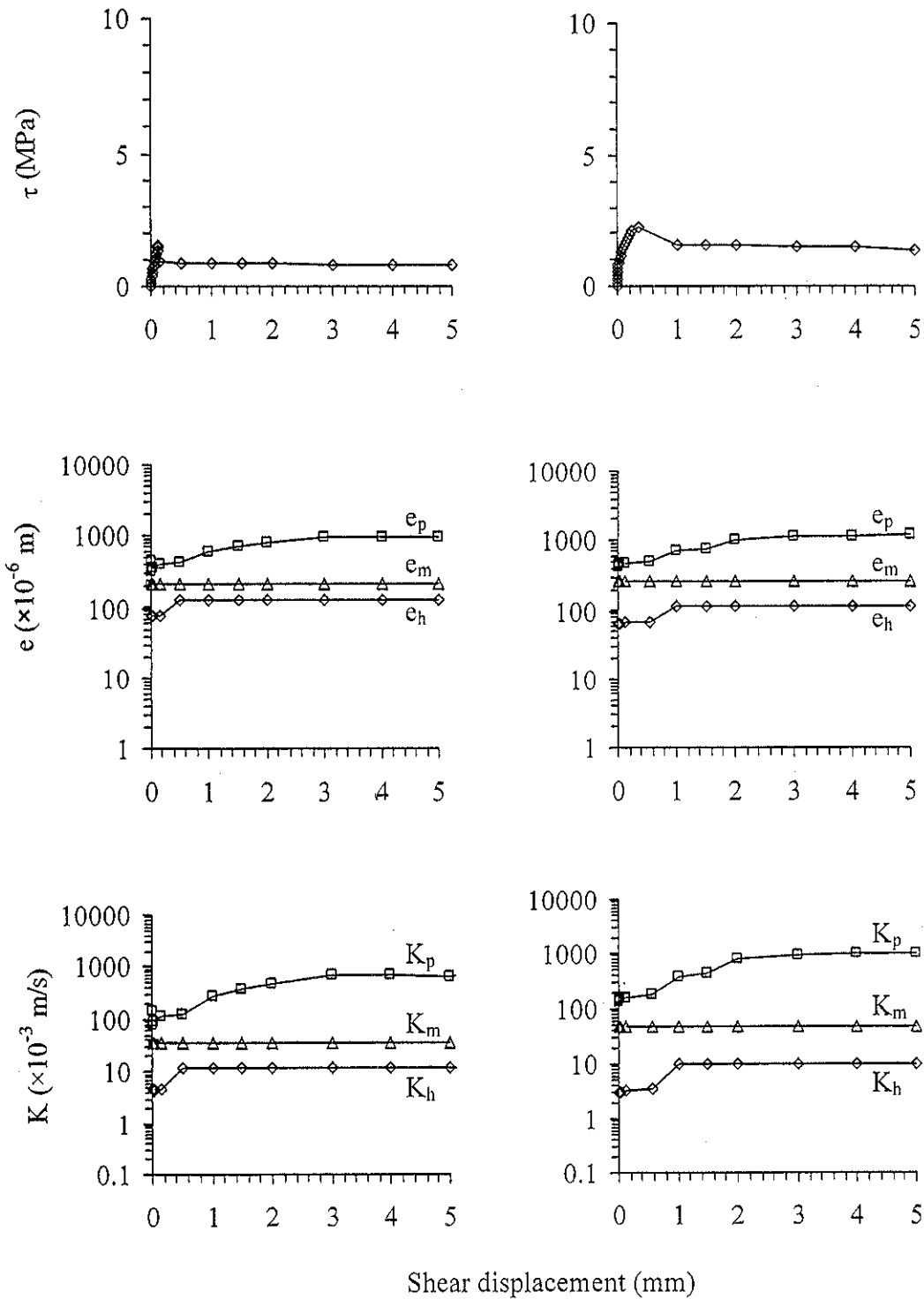
โดยที่	γ	คือ ความถ่วงจำเพาะของน้ำ (N/m^3)
	μ	คือ ค่าความหนืด ($N \cdot s/m^2$)
	H_1 และ H_2	คือ ระดับความสูงของน้ำ (m) ที่เวลา t_1 (s) และ t_2 (s)
	r_b	คือ รัศมีของ pipette (m)
	R	คือ รัศมีการไหลหน่วย (m), และ
	r	คือ รัศมีของรูที่น้ำผ่านหน่วย (m)

ค่าความซึมผ่านของรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ (Zeigler, 1976):

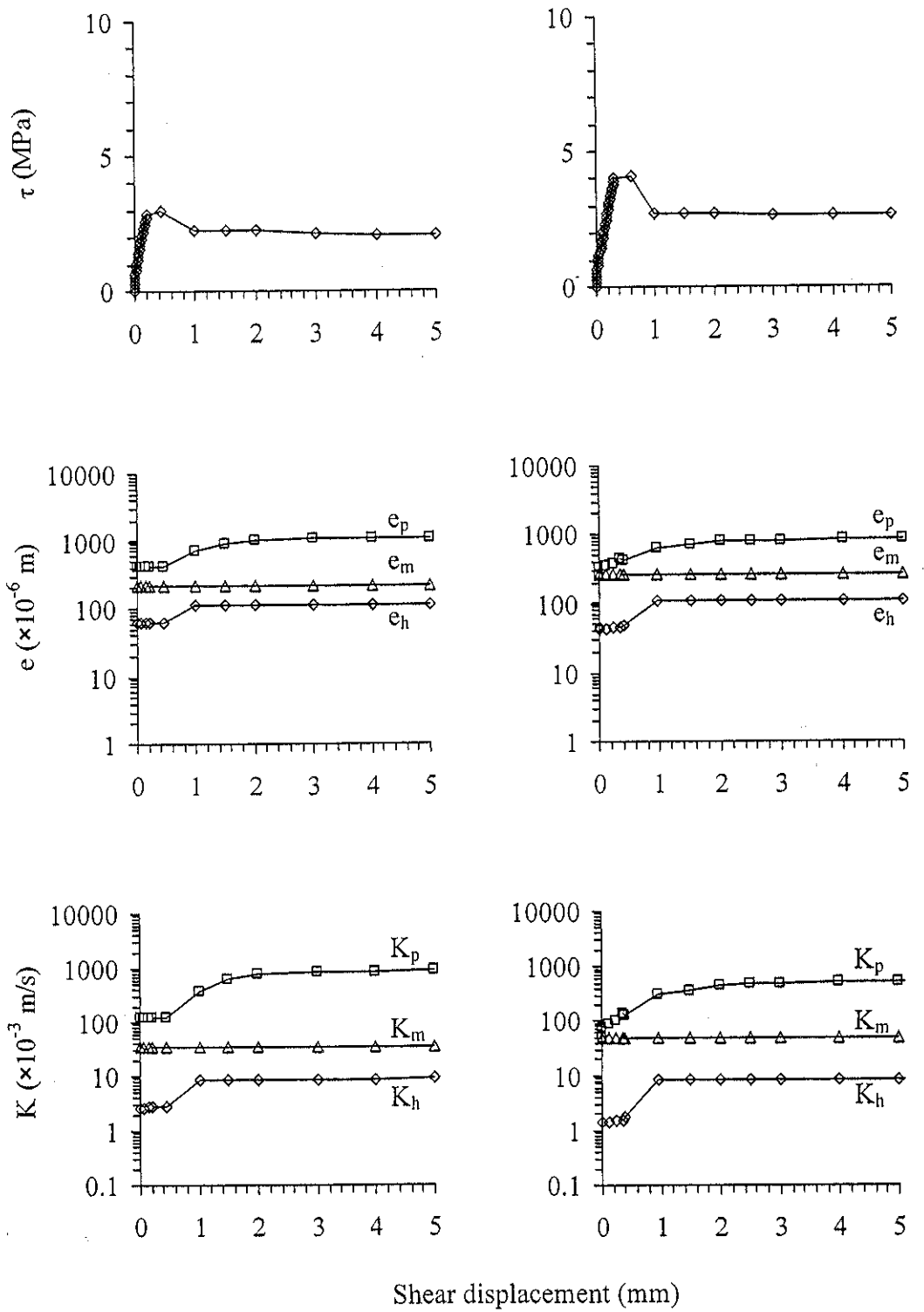
$$K = \gamma e^2 / 12\mu \quad (4.5)$$

โดยที่ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านแผ่นราบเรียบและขนาน (m/s) และ e คือ รอยเปิดเพียงแนวขนาน (m) โดยสมมติให้การไหลผ่านรอยแตกเป็นการไหลแบบราบเรียบบนหินที่ไม่มีรอยแตกและเป็นเนื้อเดียวกัน (ไม่มีความซึมผ่าน) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากรอยเปิดเพียงแต่ละชนิด คือ e_h , e_m และ e_p โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านจะมีสัญลักษณ์ต่างกันไปตามชนิด คือ K_p -physical, K_m -mechanical และ K_h -hydraulic conductivity

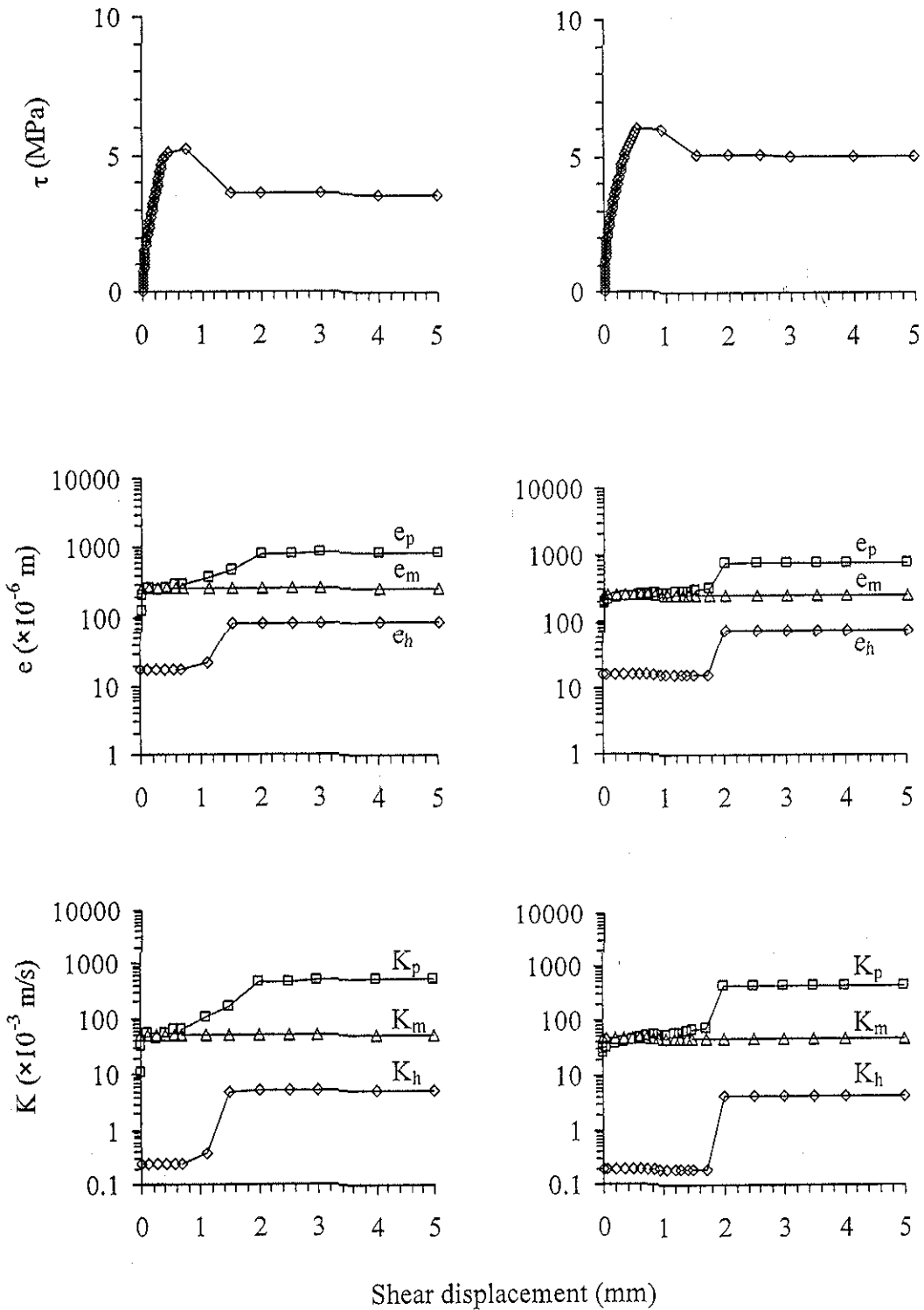
รูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านซึ่งคำนวณจากค่ารอยเปิดเพียงทั้งสามค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับระยะการเคลื่อนตัวตามแรงเฉือน (u) สำหรับค่าความเค้นในแนวแกน 0.69, 2.75 และ 4.14 MPa ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน ชุดภูกระดึง และชุดเสาข้าว โดยจากรูปจะแสดงความสัมพันธ์กับกราฟของค่าความเค้นในแนวเฉือนเทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือน โดยแสดงค่าการเคลื่อนตัวจากความเค้นในแนวเฉือนจนผ่านช่วง peak และแสดงค่าการเคลื่อนตัวจากความเค้นในแนวเฉือนช่วง residual ถึง 10 มิลลิเมตร แต่จากรูปจะแสดงระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนไปถึง 5 มิลลิเมตร เท่านั้น



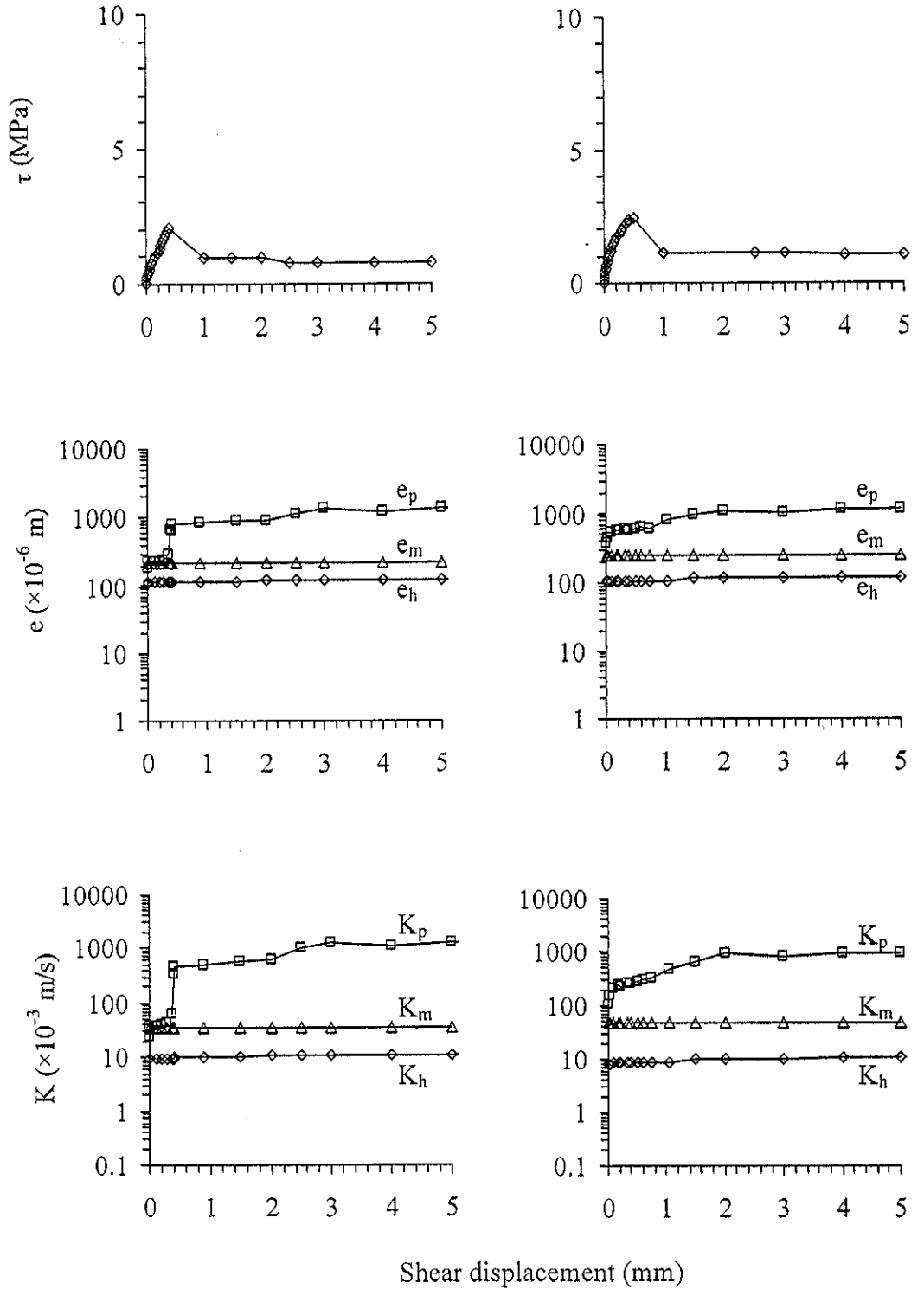
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa (ซ้าย) และ 1.38 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



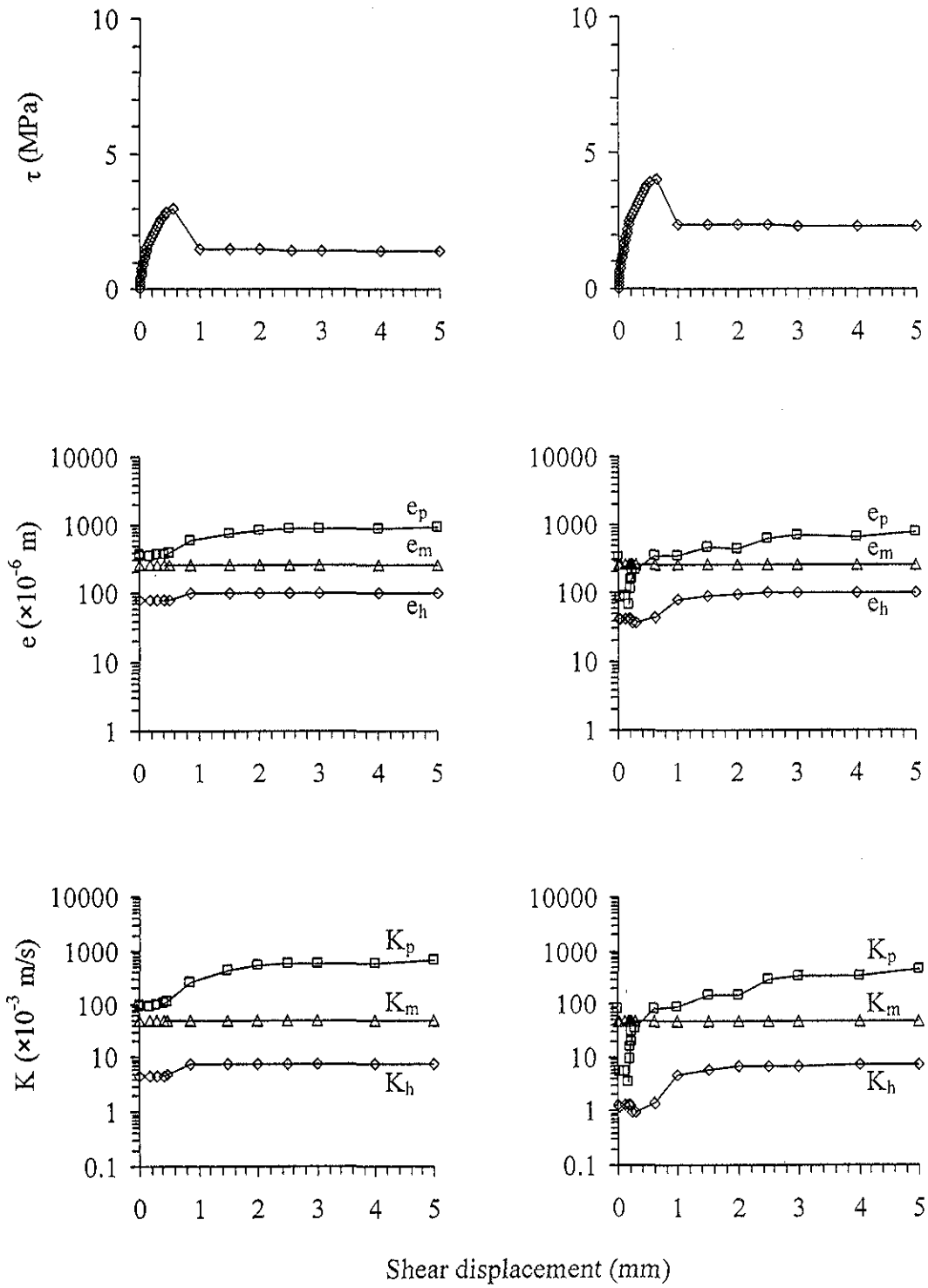
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa (ซ้าย) และ 2.76 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



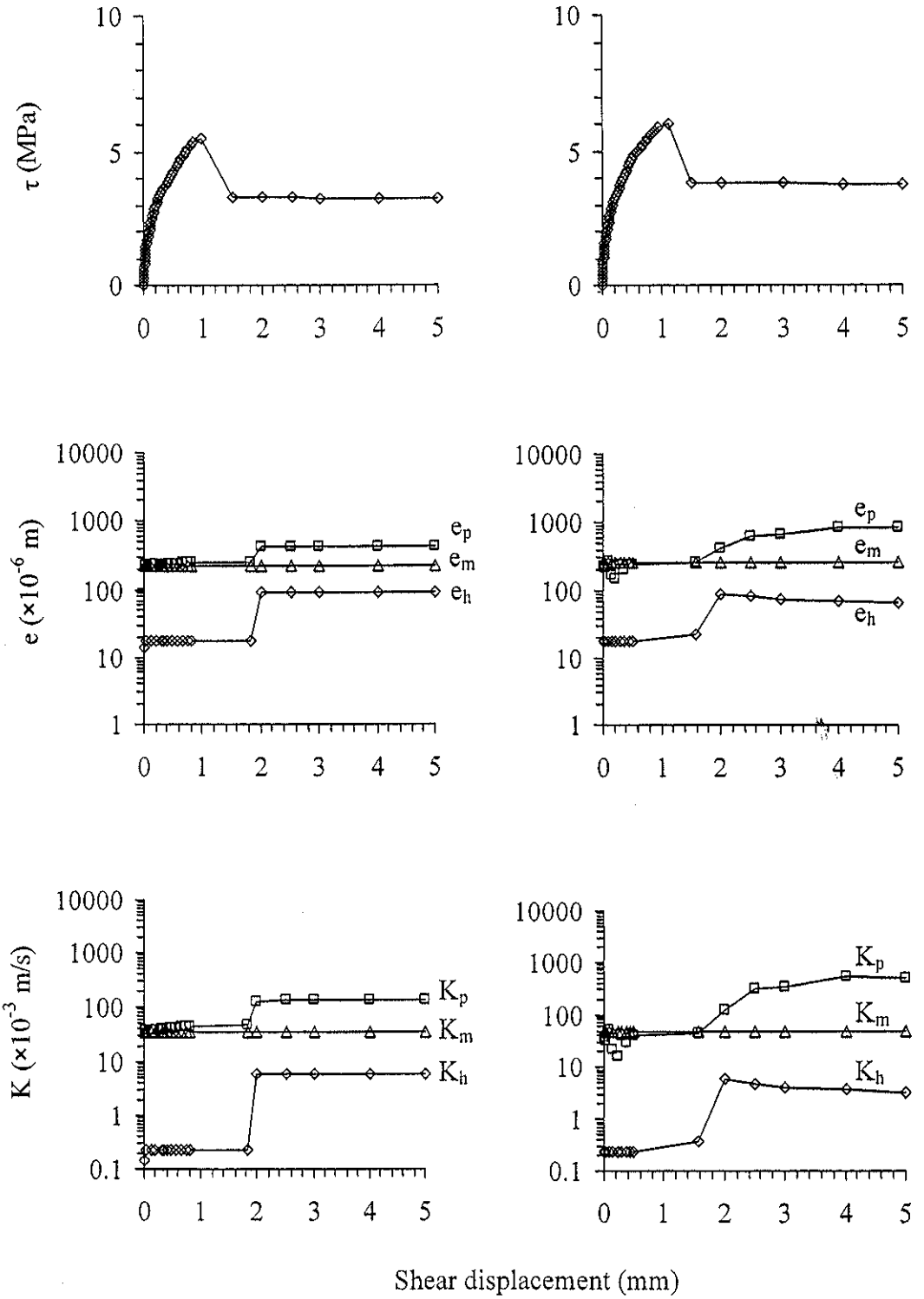
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉย และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa (ซ้าย) และ 4.14 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร



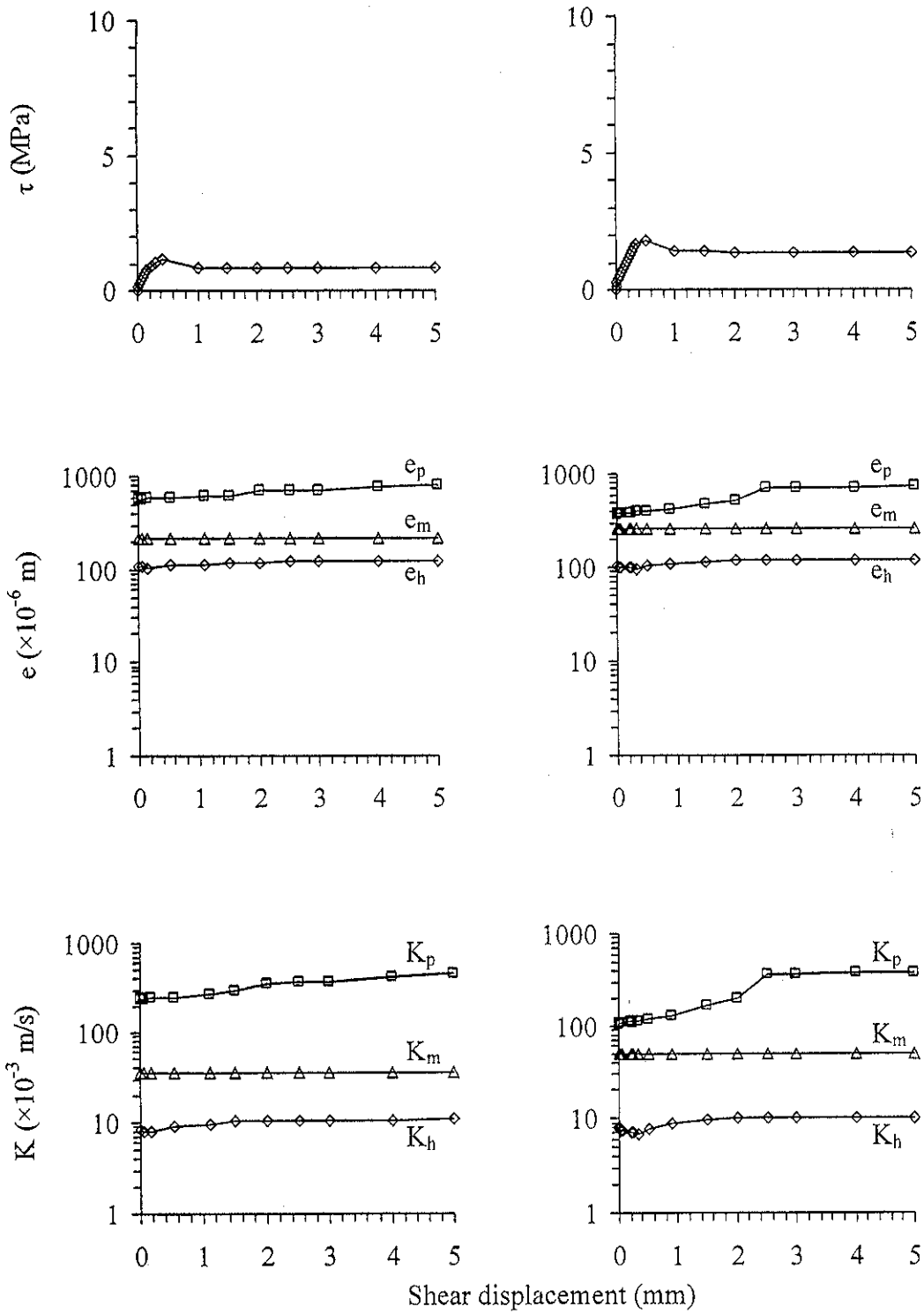
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉย และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa (ซ้าย) และ 1.38 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



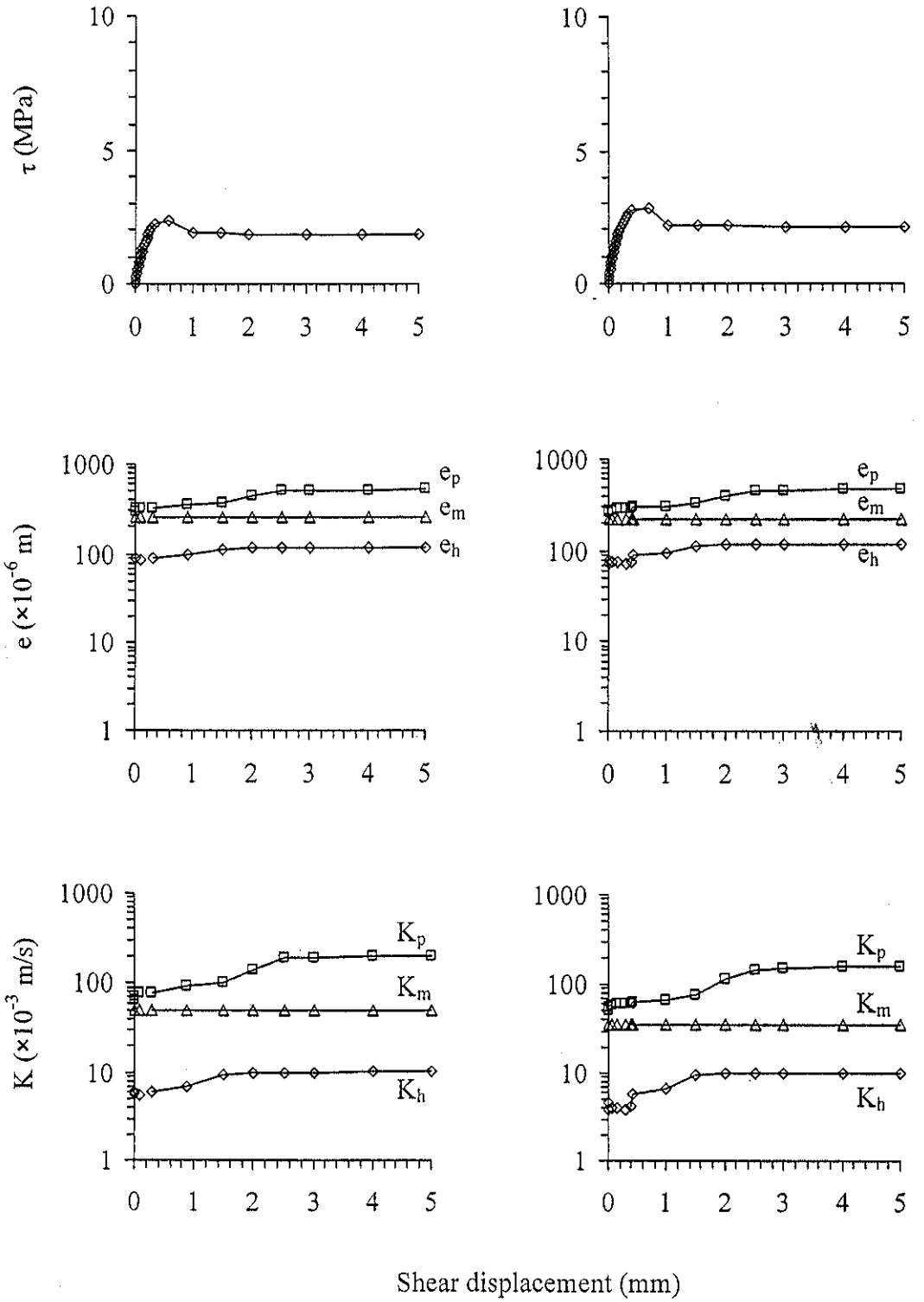
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa (ข้าว) และ 2.76 MPa (ข้าว) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



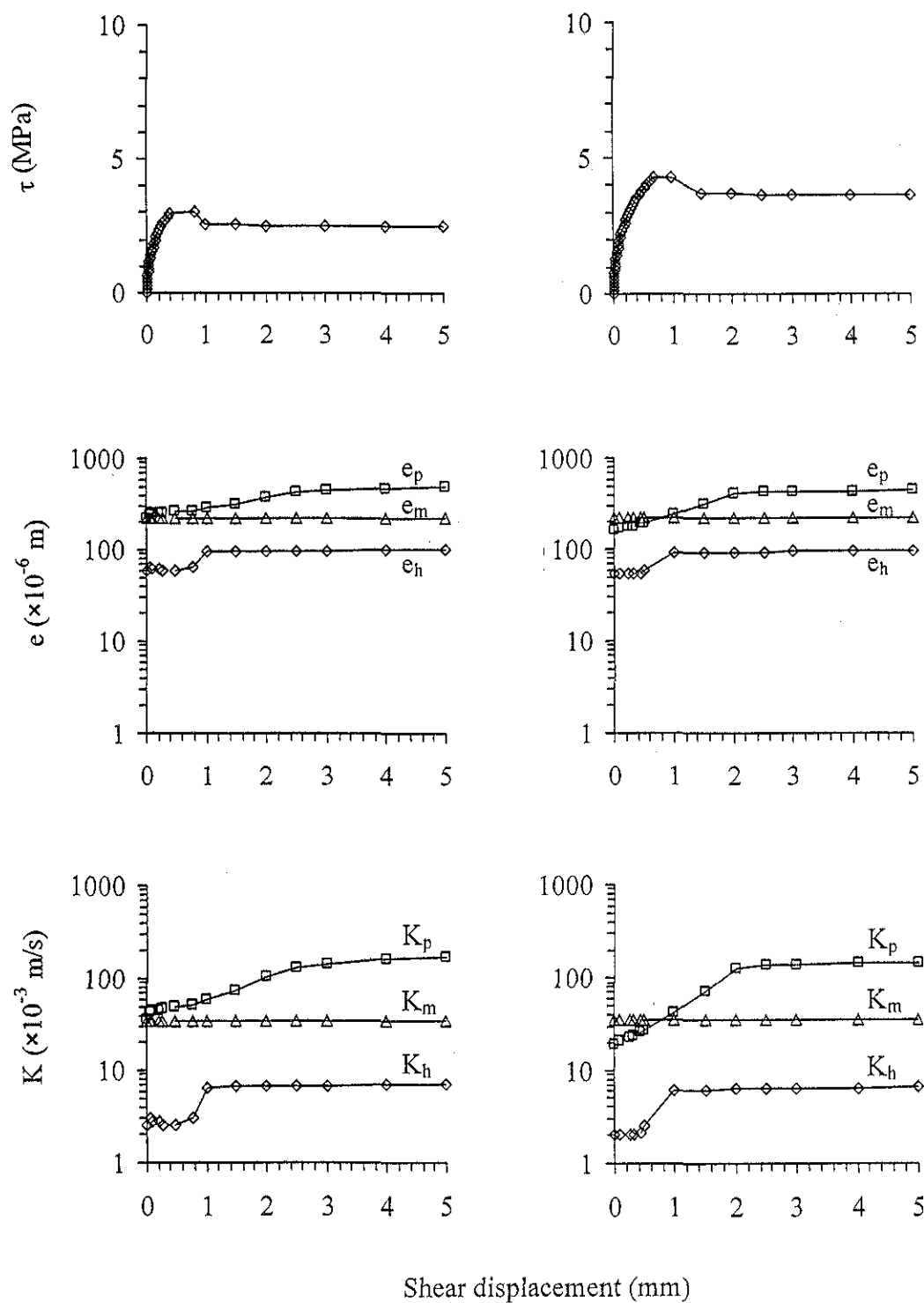
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉย และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa (ข้าว) และ 4.14 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน



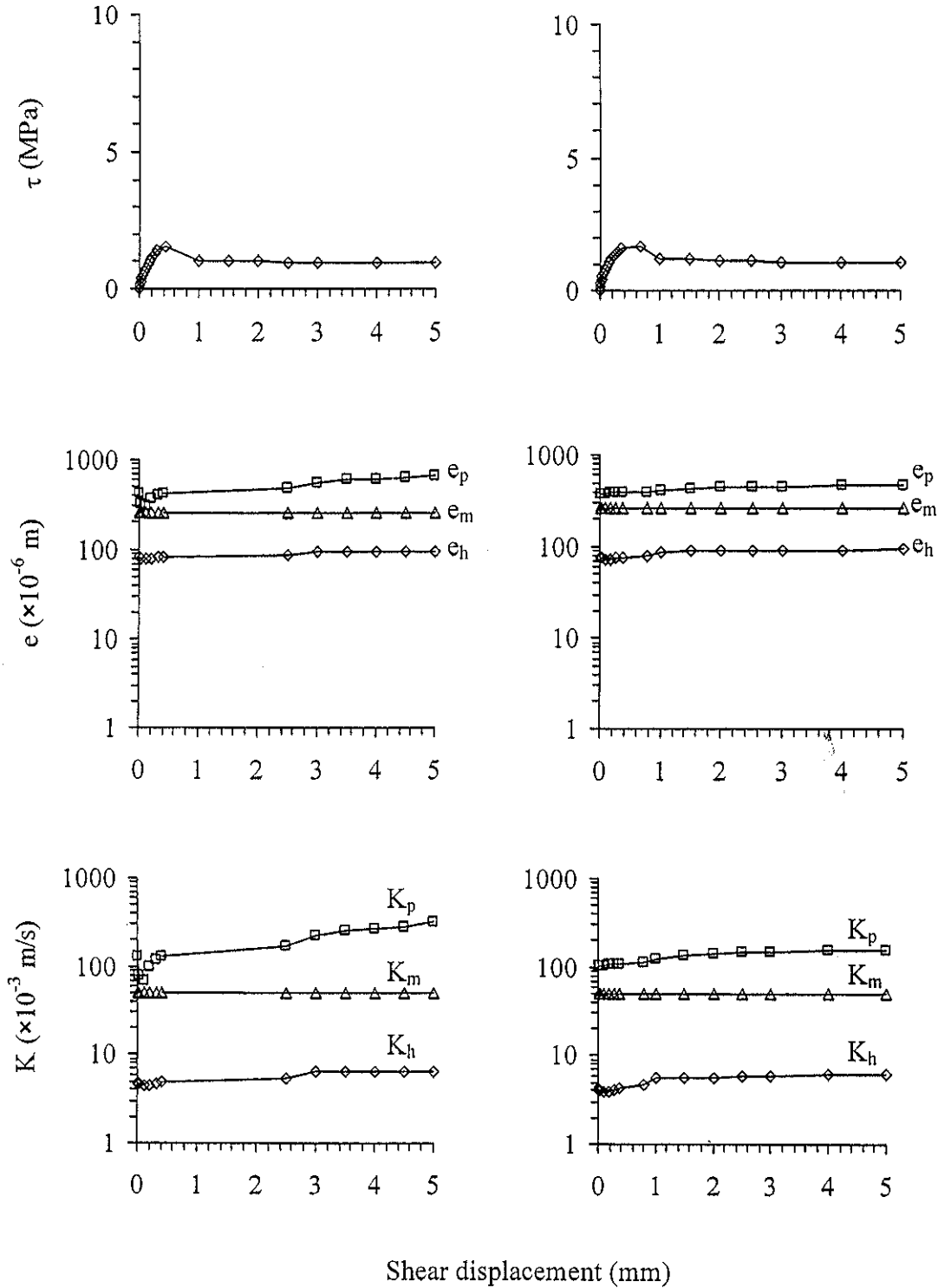
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉย และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa (ซ้าย) และ 1.38 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



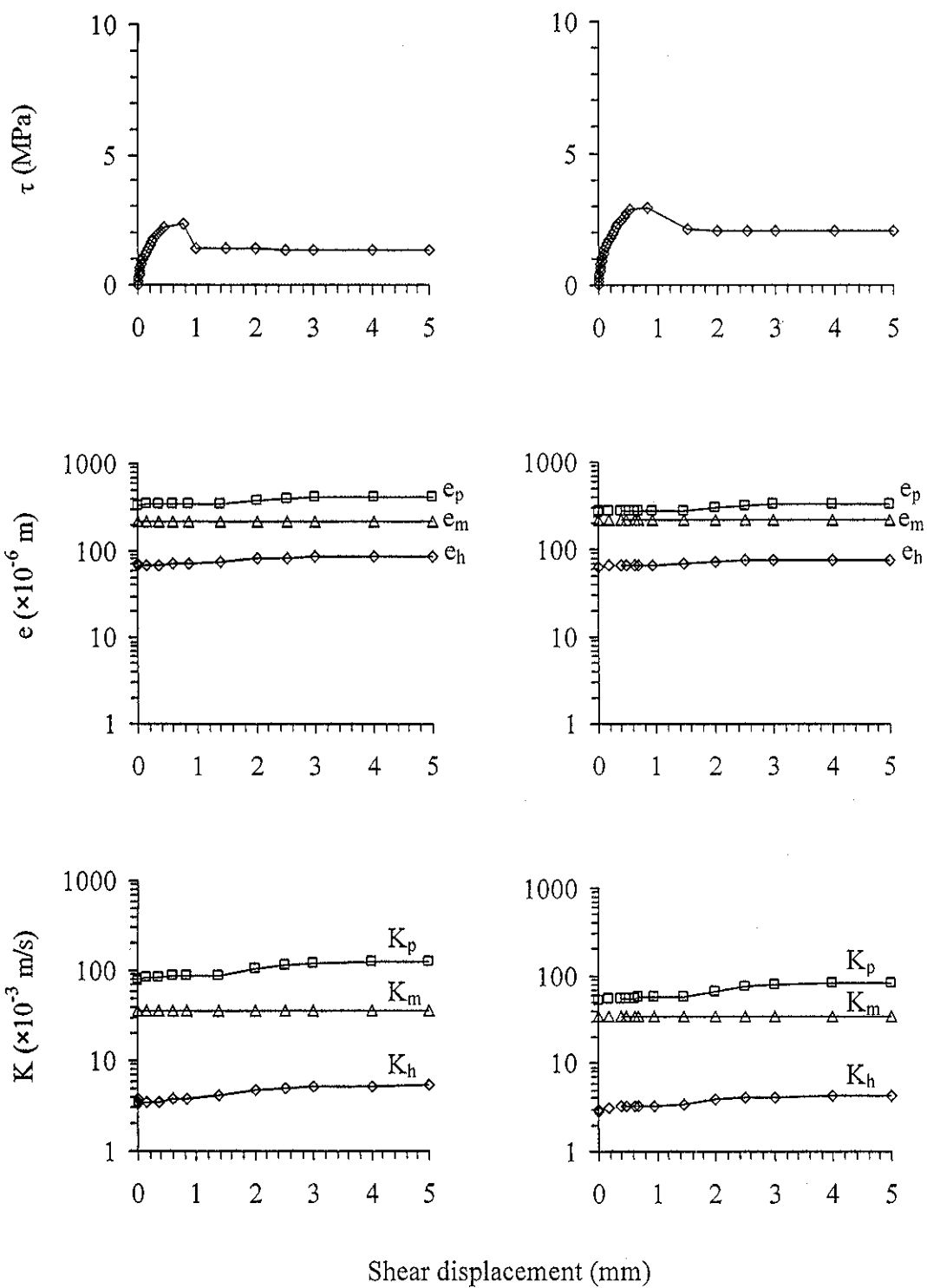
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa (ซ้าย) และ 2.76 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



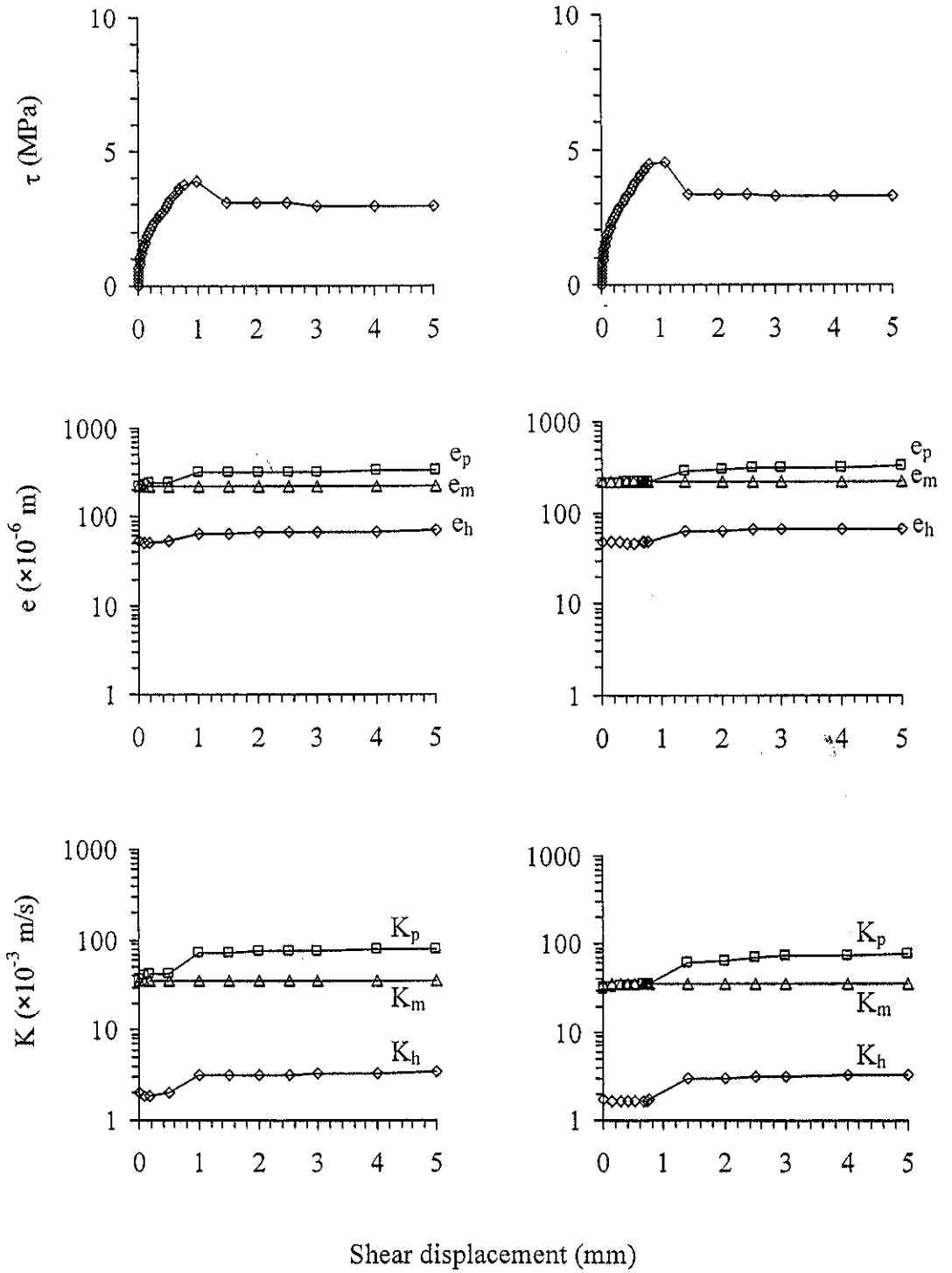
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa (ซ้าย) และ 4.14 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.69 MPa (ซ้าย) และ 1.38 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดเสาขั้ว



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.07 MPa (ซ้าย) และ 2.76 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดสาขั้ว



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน รอยเปิดเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน เทียบกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนที่ความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 3.49 MPa (ซ้าย) และ 4.14 MPa (ขวา) ของตัวอย่างหินทรายชุดเสาขัว

รูปที่ 4.29 แสดงรอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารหลังการทดสอบ (สำหรับตัวอย่างหินทรายทั้ง 4 ชุด) แสดงค่ารอยเปิดเหยอเชิงกายภาพ (e_p) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวของแรงเฉือน ซึ่งค่า e_p มีค่ากว้างไปมาก่อนช่วง peak และมีแนวโน้มคงที่ในช่วง residual ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_p) สามารถคำนวณจากค่า physical aperture (e_p) โดยลักษณะของเส้นโค้งในกราฟระหว่างค่าความซึมผ่านกับระยะการเคลื่อนตัวจากแรงเฉือนจะคล้ายกัน

รูปที่ 4.30 แสดงค่ารอยเปิดเหยอเชิงไฮดรอลิกและค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง โดยค่าความซึมผ่านในช่วง residual จะมีค่ามากกว่าในช่วงที่ไม่มีแรงเฉือน และช่วงก่อน peak และความแตกต่างของทั้งสองช่วงนี้จะมีมากขึ้นเมื่อความเค้นในแนวตั้งมีค่ามากขึ้น

รูปที่ 4.31 แสดงค่าความเค้นในแนวเฉือนเทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง โดยแสดงค่าความเค้นยึดติด ค่ามุมเสียดทานของช่วง peak และ residual ของแต่ละชุดหิน

รูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.35 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเทียบกับค่าความเค้นในแนวเฉือน โดยการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในช่วง peak สามารถแสดงในรูปของสมการ

$$K_h = \alpha_p \exp(\beta_p \tau_p) \quad (4.6)$$

โดยที่ α_p และ β_p คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ

สำหรับการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในช่วง residual สามารถแสดงในรูปของสมการ

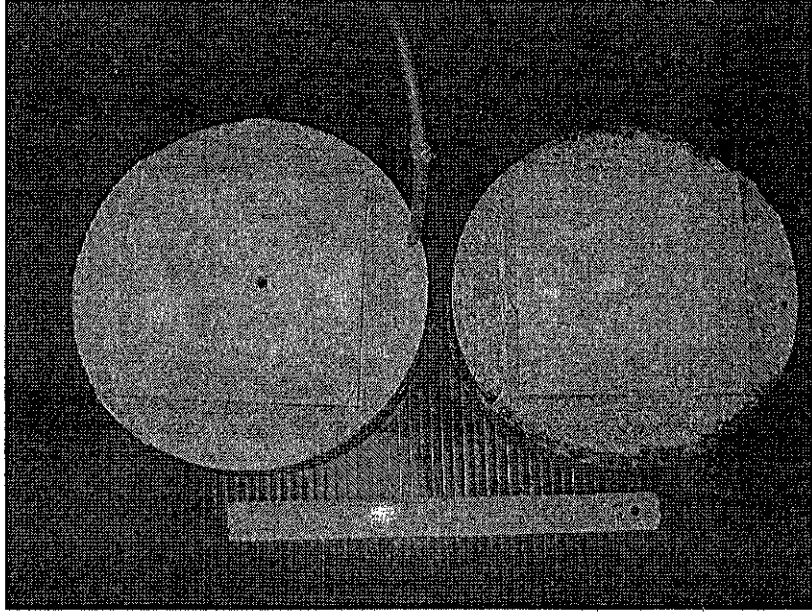
$$K_h = \alpha_r \exp(\beta_r \tau_r) \quad (4.7)$$

โดยที่ α_r และ β_r คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ

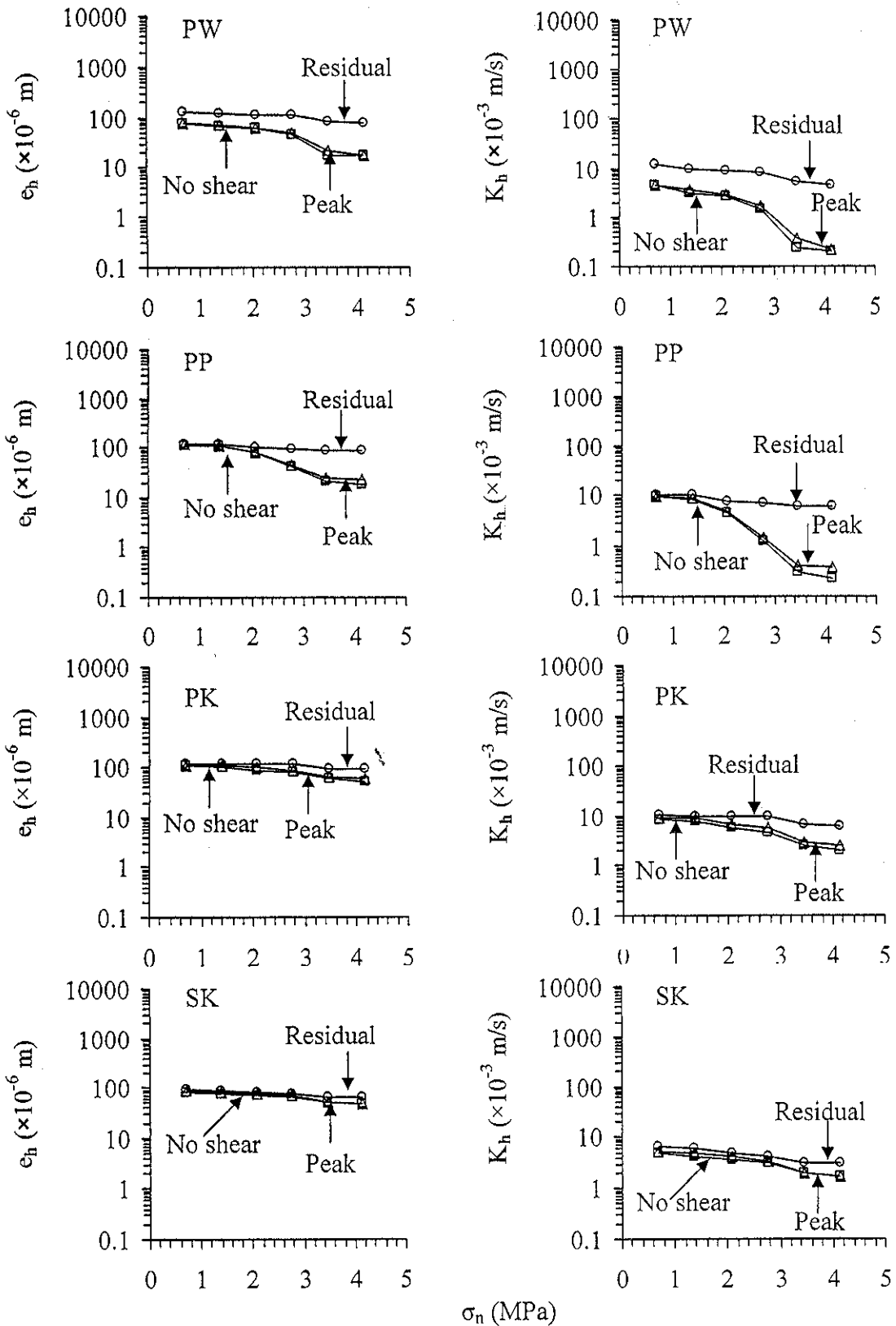
โดยผลที่จากการทดสอบระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่คำนวณจากช่วง peak มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่คำนวณจากช่วง residual

4.5.3 สรุปผลการทดสอบ

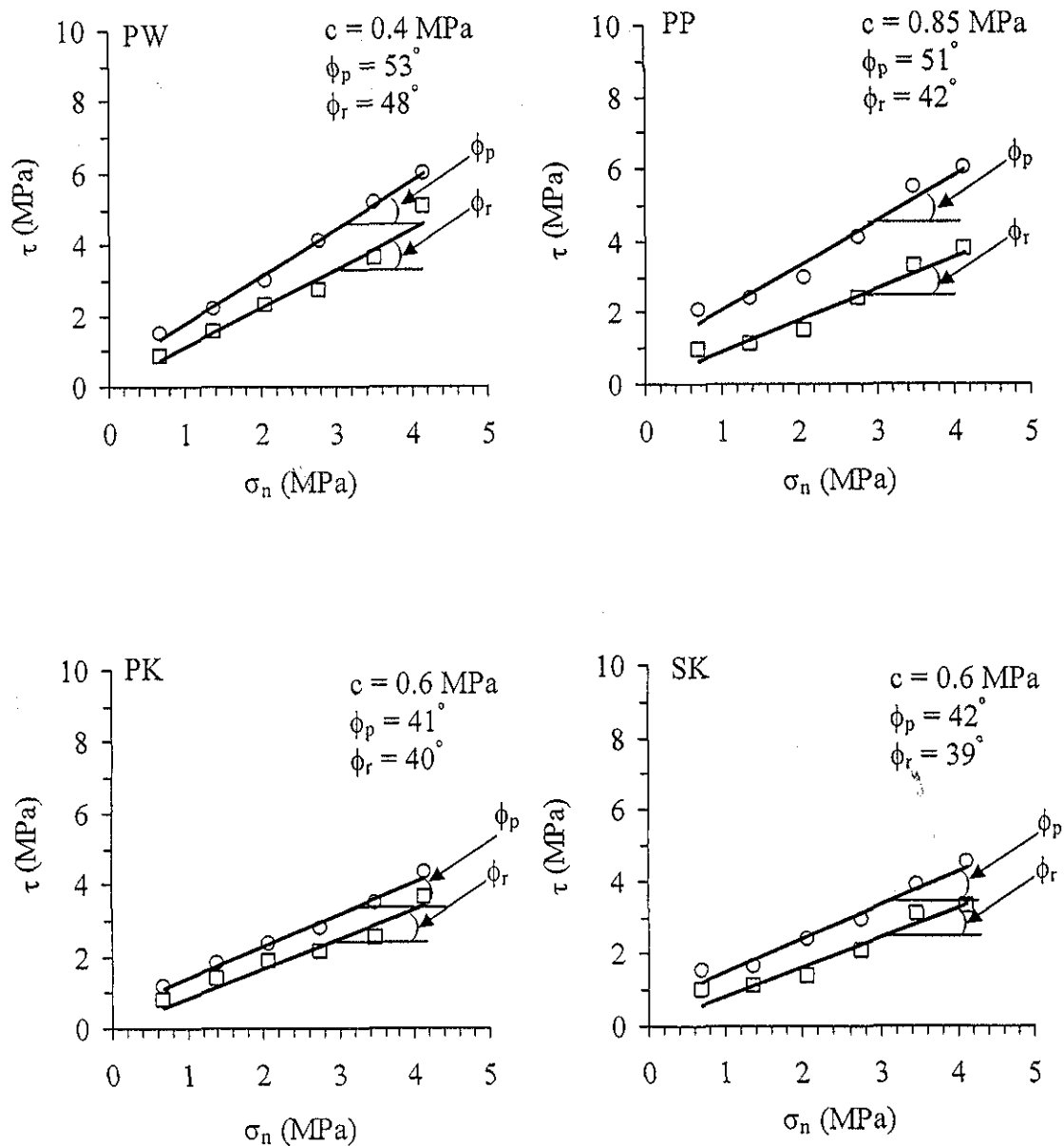
ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าในช่วงก่อนและหลังการทดสอบความขรุขระของรอยแตกมีความแตกต่างกันน้อย ส่งผลให้ค่า JRC ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะค่าความเค้นในแนวตั้งมีค่าน้อย ค่า mechanical aperture (e_m) ในช่วงก่อนการทดสอบ ระหว่างการทดสอบและหลังการทดสอบมีค่าคงที่เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในแนวแกน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_m) จะคำนวณจากค่า mechanical aperture (e_m)



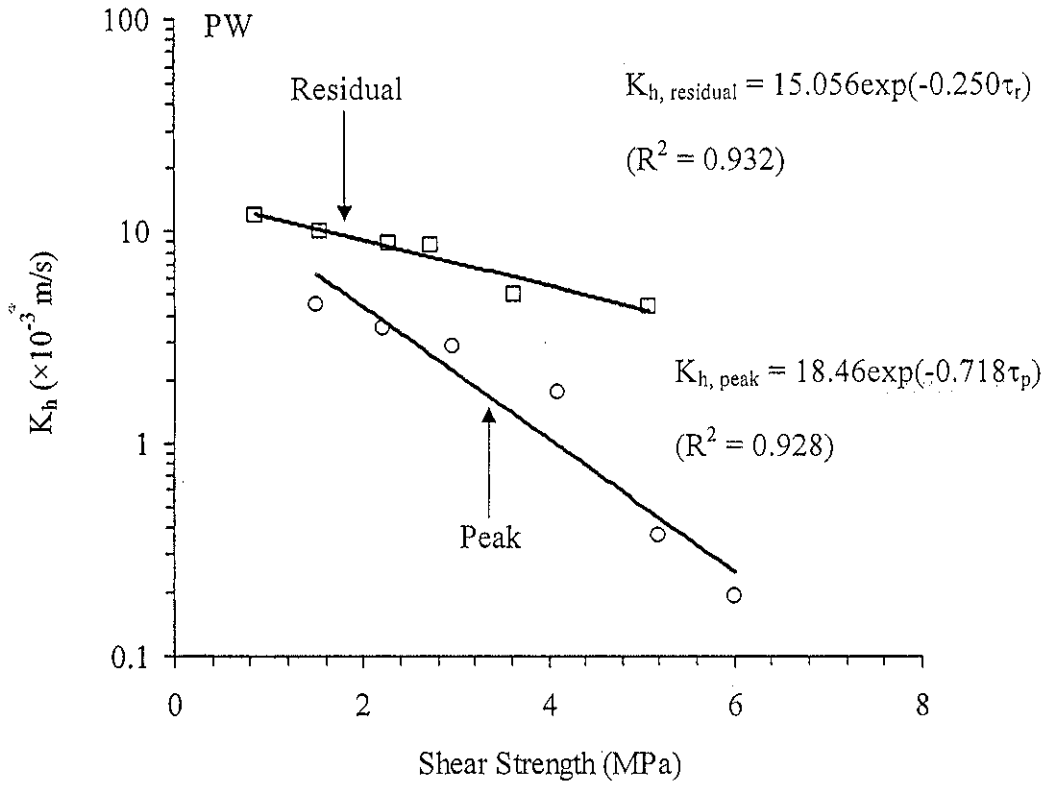
รูปที่ 4.29 รอยแตกของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารหลังการทดสอบสำหรับตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารและภูพาน



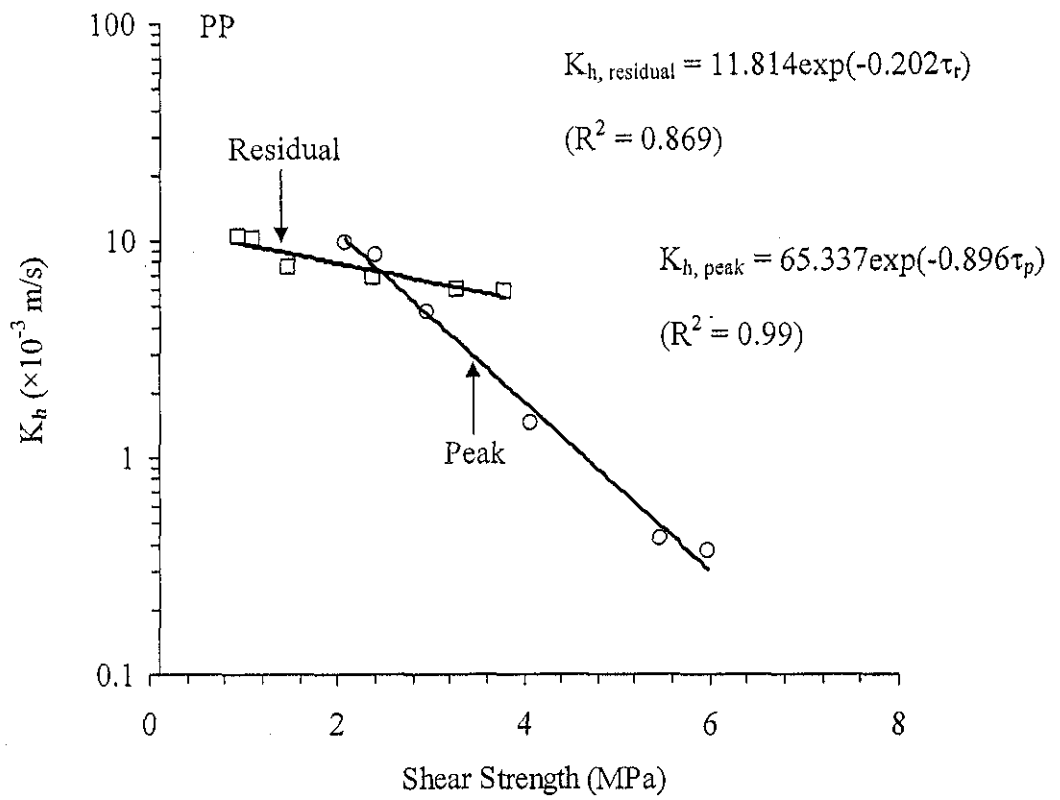
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยเปิดเฉือนเชิงไฮดรอลิก (e_h) และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (คำนวณจากค่า e_h) เทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง (σ_n) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร ภูพาน ภูกระดึง และเสาข้าว



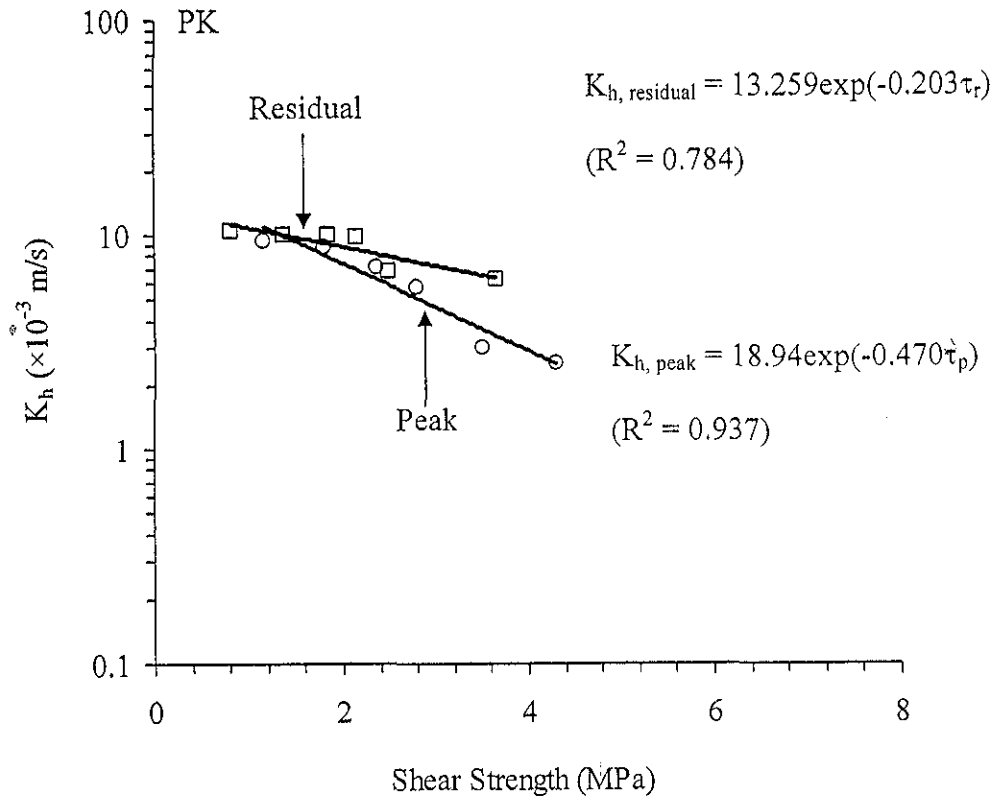
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนเทียบกับค่าความเค้นในแนวตั้ง โดยแสดงในรูปของ coulomb criterion



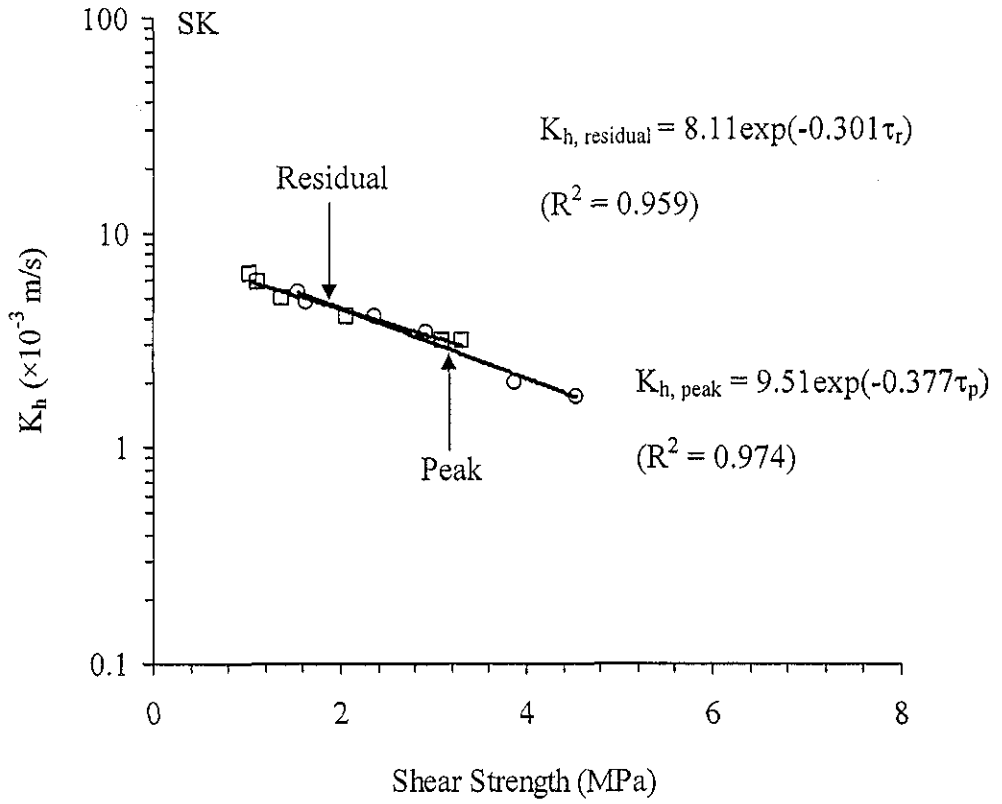
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_h) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายชุดพระวิหาร



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_h) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายชุดภูพาน



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_h) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายภูกระดึง



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K_h) เทียบกับค่าความเค้นเฉือนในช่วง peak และ residual ของหินทรายเสาข้าว

การเปิดเผยอเชิงกายภาพและเชิงไฮดรอลิกจะเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวแบบเฉือนซึ่งจะเห็นได้ชัดสำหรับรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นตึงสูง ความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้สภาวะที่ไม่มีแรงเฉือนและสภาวะที่มีแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกัน การเปิดเผยอเชิงกายภาพจะมีค่ามากกว่าการเปิดเผยอเชิงไฮดรอลิก 5-10 เท่า ส่งผลให้ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพสูงกว่าค่าความซึมผ่านเชิงไฮดรอลิก 10-100 เท่า ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการเปิดเผยอเชิงกายภาพไม่ได้พิจารณาผลกระทบของความขรุขระของรอยแตกที่เป็นปัจจัยทำให้ระยะทางการไหลของน้ำยาวขึ้น ผลต่างระหว่างค่าความซึมผ่านภายใต้ความเค้นสูงสุดและภายใต้ความเค้นคงเหลือจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเค้นตึงฉากบนรอยแตกนั้นมีค่ามากขึ้น ค่าความซึมผ่านของรอยแตกจะลดลงเมื่อความเค้นในแนวตั้งมีค่าสูงขึ้น ค่าความซึมผ่านของหินทรายที่ทดสอบได้จากงานวิจัยนี้มีค่าระหว่าง 0.1×10^{-3} เมตร/วินาที ถึง 10×10^{-3} เมตร/วินาที

4.6 การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การหาผลกระทบของค่าความเค้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางต่อค่าความซึมผ่านของหินทรายสามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ซึ่งจำลองขึ้น 2 กรณี คือ 1) หินบริเวณรอบอุโมงค์เดี่ยวในบริเวณที่ไร้ขอบเขต และ 2) อุโมงค์ขนานรูปทรงกลมภายใต้ความเค้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง การวิเคราะห์นี้สามารถหาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมผ่านในบริเวณที่เป็นอีลาสติกและพลาสติกที่อยู่ภายใต้ความเค้นไม่เท่ากันทุกทิศทางได้ ผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปเชิงกลศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านของหินซึ่งถูกผลกระทบจากค่าความเค้นโดยนำค่าคุณสมบัติของหินทรายชุดพระวิหารและภูกระดึงมาใช้ในแบบจำลองนี้

4.6.1 คุณสมบัติของหินสำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ก่อนจะทำการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ จะต้องกำหนดคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และกลศาสตร์ของหินทรายเพื่อใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม FLAC code (Itasca, 1992) โดยค่า elastic modulus และ Poisson's ratio หาได้จากการทดสอบแบบกดในสามแกน ค่า cohesion, tensile strength และ basic friction angle ของหินทรายชุดพระวิหารและภูพานได้จากการทดลองของ Waisri et al. (2009) ในตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นต่ำสุดแปรผันจาก 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.8

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จากการทดลองของ Walsri et al. (2009)

Basic Mechanical Properties	PW Sandstone	PK Sandstone
Elastic Modulus (measured from loading curves) (GPa)	8.66	7.70
Poisson's Ratio	0.35	0.30
Cohesion (MPa)	10	19
Tension (MPa)	6.7	8.7
Internal Friction Angle (degrees)	58	50
Dilation Angle (degrees)	29	25

4.6.2 อุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกลมในบริเวณไร่ขอบเขตภายใต้ความเค้นที่ไม่เท่ากัน

ได้มีการสร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบ 2 แกน สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดเชิงระนาบ โดยสมมติให้ความเครียดในแนวแกนเท่ากับ 0 โดยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบถูกจำลองขึ้น 1 ใน 4 ของขอบเขตการจำลองเนื่องจากการสมมาตร แบบจำลองอุโมงค์อยู่ภายใต้ค่าความเค้นต่ำสุดต่อสูงสุด 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.8 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC สำหรับอุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกลม

Series	Maximum Principal Stress (σ_1) (MPa)	Minimum Principal Stress (σ_3) (MPa)	$k = \sigma_3 / \sigma_1$
1	20	4	0.2
		8	0.4
		12	0.6
		16	0.8
2	10	5	0.5
	20	10	
	30	15	
	40	20	

รูปที่ 4.36 แสดงแบบจำลอง ก. ซึ่งจำลองอุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกลมรัศมี 4 เมตร ระยะห่างจากขอบเขตด้านบน และด้านขวาถึงจุดศูนย์กลางเท่ากับ 20 เมตร หรือ 5 เท่า ของรัศมีความเค้นที่ทำให้ทางด้านบนและด้านขวาถูกแปรผันตามรูปแบบการจำลอง ขอบเขตทางด้านบนและด้านขวาถูกปล่อยให้เคลื่อนที่อย่างอิสระทั้งในทิศทาง x และ y ขอบเขตทางด้านซ้ายคือแกนสมมาตรที่แบ่งอุโมงค์ออกเป็น 2 ส่วน แกน y สามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง y เท่านั้น ขอบเขตทางด้านล่างคือแกนสมมาตรที่แบ่งอุโมงค์ออกเป็น 2 ส่วน แกน x ถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ในทิศทาง x เท่านั้น

สำหรับวัสดุอีลาสติค-พลาสติกที่สมมติขึ้นนั้น ระบบกฎเกณฑ์ในการแก้ปัญหาของจำนวนที่แน่นอนทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม FLAC อธิบายได้ว่าการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกสามารถเกิดขึ้นได้หลังจากที่ค่าความเค้นที่ต่างกันมีค่าเกินกว่าค่าความแข็งของหิน การหาค่าความแข็งของหินในที่นี้ได้ใช้ coulomb criterion โดยสรุปแล้วในบริเวณอีลาสติค ค่าความเค้นที่ต่างกันและค่าความเครียดเชิงปริมาตรคำนวณจากตัวแปรของหินในช่วงอีลาสติค ในบริเวณพลาสติกการหาค่าความเค้นที่ต่างกันและค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าวัสดุอยู่ในสถานะ perfectly plastic เมื่อเกิดการแตกหักไปแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.37

ค่าความเครียดเชิงปริมาตรที่คำนวณได้จากช่วงอีลาสติคและพลาสติกถูกนำมาใช้ในการหาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมผ่านหิน ตามสมการข้างล่างนี้

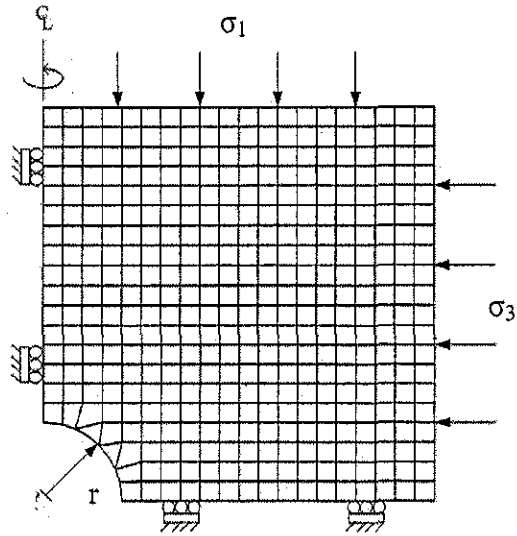
$$\Delta K = A \cdot \Delta \varepsilon_v \quad (4.8)$$

โดย A คือค่าคงที่ $(\Delta K / \Delta \varepsilon_v)$ ในช่วงอีลาสติค

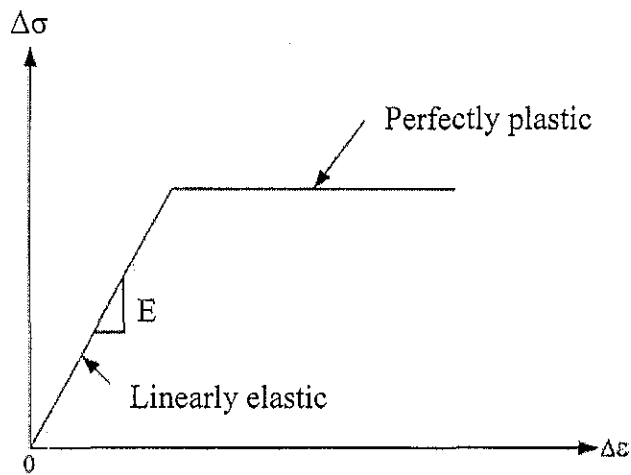
$$\Delta K = B \cdot \Delta \varepsilon_p \quad (4.9)$$

โดย B คือค่าคงที่ $(\Delta K / \Delta \varepsilon_p)$ ในช่วงพลาสติก

การกระจายตัวของค่าความเครียดเชิงปริมาตรที่หาได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC สามารถหาค่าการเพิ่มขึ้นของความซึมผ่านของหิน (ΔK) ได้ด้วยวิธีจุดต่อจุดจากผลบวกระหว่างค่าความซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นกับค่าความซึมผ่านดั้งเดิมของหิน (K_0) ดังนั้นค่าการเพิ่มขึ้นแท้จริงของค่าความซึมผ่านหินจึงสามารถหาได้ ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความซึมผ่านดั้งเดิมของหินที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.36 Finite difference mesh สำหรับการจำลองอุโมงค์เดี่ยวรูปทรงกระบอก
ในบริเวณไร้ขอบเขต (Model A) แบบจำลองตั้งฉากกับแกนของอุโมงค์



รูปที่ 4.37 รูปแบบความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.8 ค่าความซึมผ่านตั้งต้นของตัวอย่างหินทรายที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้นรอบ
ข้างเท่ากับ 1 MPa

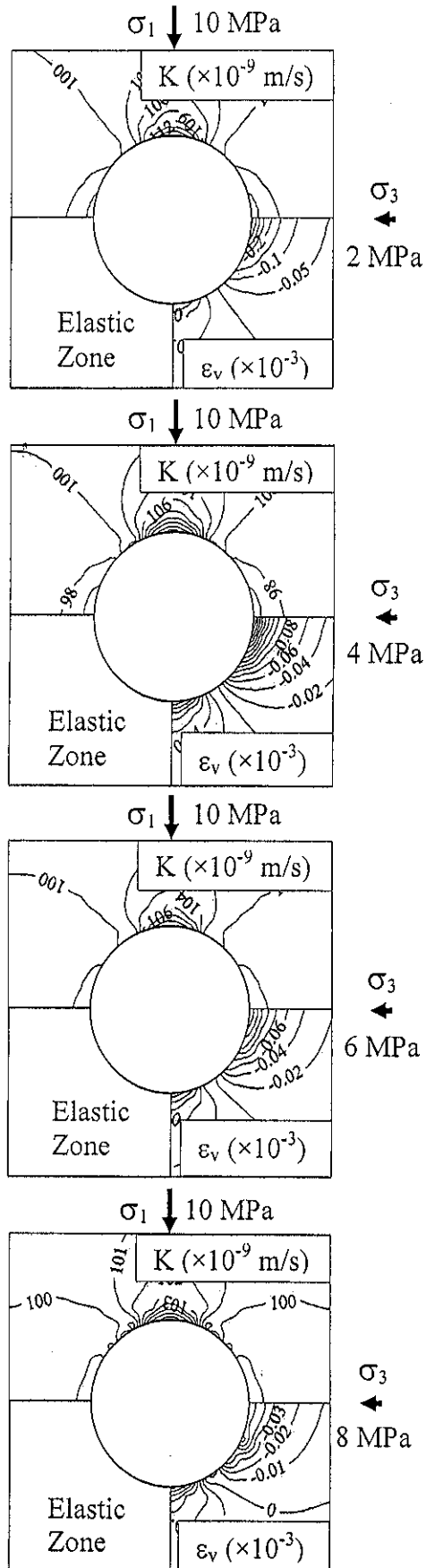
Sandstone member	K_0 (m/s)
PW	100×10^{-9}
PP	1×10^{-9}
PK	50×10^{-12}

ผลจากการจำลองสามารถสรุปได้ว่าค่าความเครียดเชิงปริมาตรสูงสุดของค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 คือ 0.2×10^{-3} , 0.14×10^{-3} , 0.1×10^{-3} และ 0.07×10^{-3} สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 0.25×10^{-3} , 0.2×10^{-3} , 0.16×10^{-3} และ 0.1×10^{-3} สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง เมื่อค่าความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 10 MPa และค่าความเค้นในแนวระนาบแปรผันจาก 2, 4, 6 ถึง 8 MPa เนื่องจากการขยายตัวของค่าความเครียดเชิงปริมาตรค่าความซึมผ่านจึงเพิ่มขึ้น โดยค่าความซึมผ่านสูงสุดของ ค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 คือ 120×10^{-9} , 116×10^{-9} , 112×10^{-9} และ 107×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 300×10^{-12} , 250×10^{-12} , 190×10^{-12} และ 140×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง

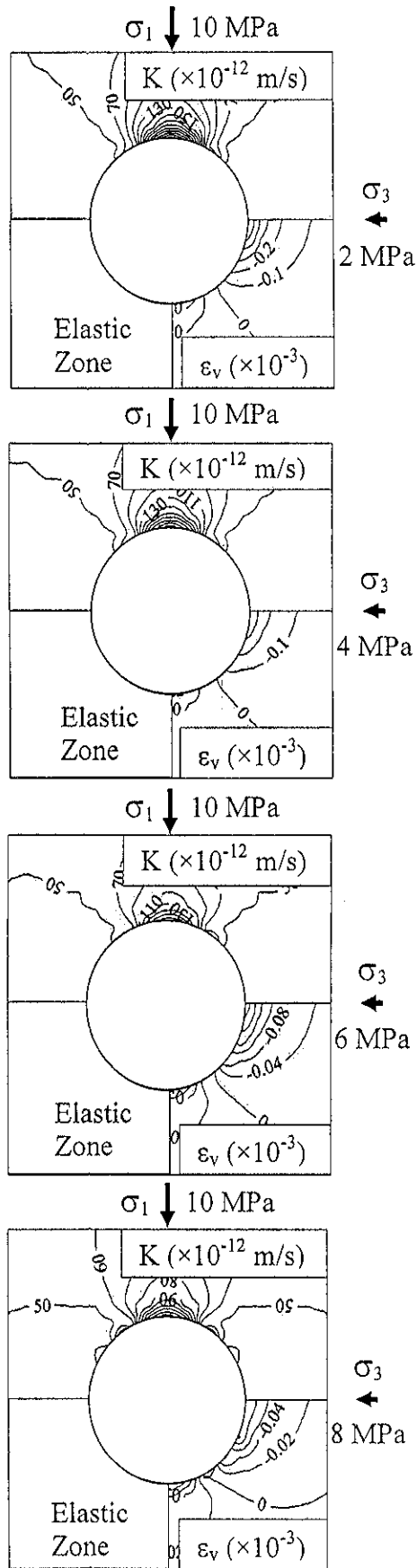
ผลจากการจำลองเมื่อค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 0.5 พบว่า ค่าความเครียดเชิงปริมาตรสูงสุดสำหรับค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 MPa คือ 0.12×10^{-3} , 0.2×10^{-3} , 0.3×10^{-3} และ 0.4×10^{-3} สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 0.15×10^{-3} , 0.3×10^{-3} , 0.4×10^{-3} และ 0.6×10^{-3} สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง ค่าความซึมผ่านสูงสุดสำหรับค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 MPa คือ 114×10^{-9} , 124×10^{-9} , 140×10^{-9} และ 150×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 123×10^{-12} , 380×10^{-12} , 550×10^{-12} and 650×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านของหินรอบอุโมงค์ซึ่งถูกผลกระทบจากค่าอัตราส่วนของค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งพบว่า ค่าความซึมผ่านสูงขึ้นเมื่อค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งลดลง โดยค่าความซึมผ่านสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 107×10^{-9} ถึง 120×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 140×10^{-12} ถึง 300×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง เมื่ออัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งลดลงจาก 0.8 ถึง 0.2 โดยรูปที่ 4.38 และ 4.39 การเปรียบเทียบกันของค่าความซึมผ่านรอบๆผนังอุโมงค์

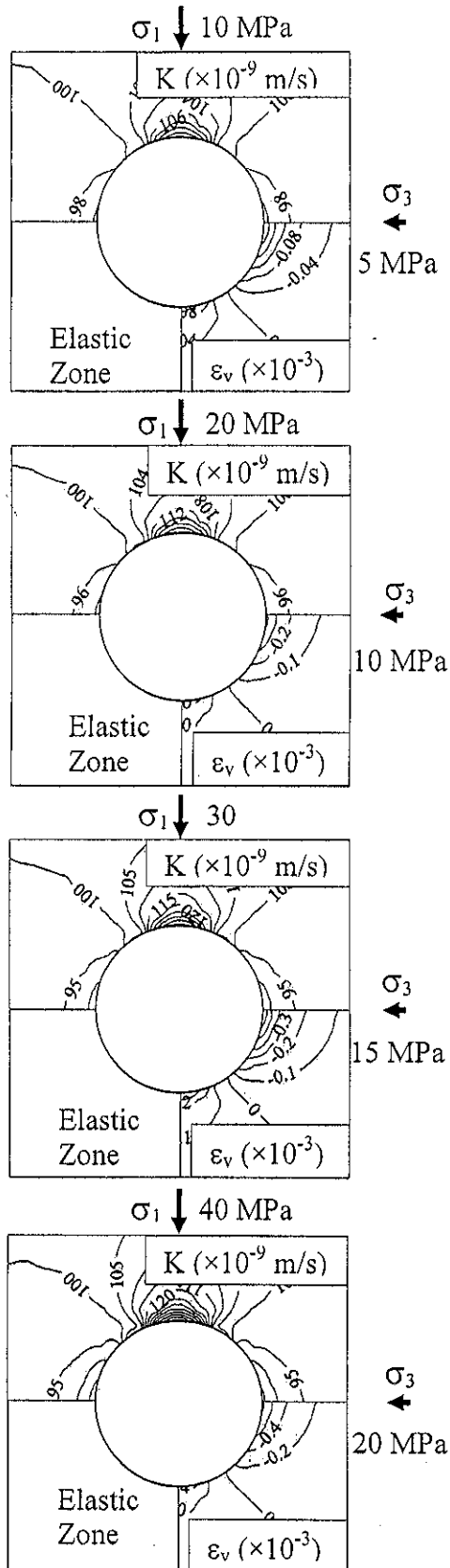
จากการเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านของหินรอบอุโมงค์เมื่อค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 0.5 พบว่า ค่าความซึมผ่านสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 120×10^{-9} ถึง 150×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 123×10^{-12} ถึง 650×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง เมื่อค่าความแตกต่างของค่าความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 20 MPa รูปที่ 4.40 และ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบกันของค่าความซึมผ่านรอบๆ ผนังอุโมงค์เมื่อค่าความเค้นในแนวระนาบต่อค่าความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 0.5



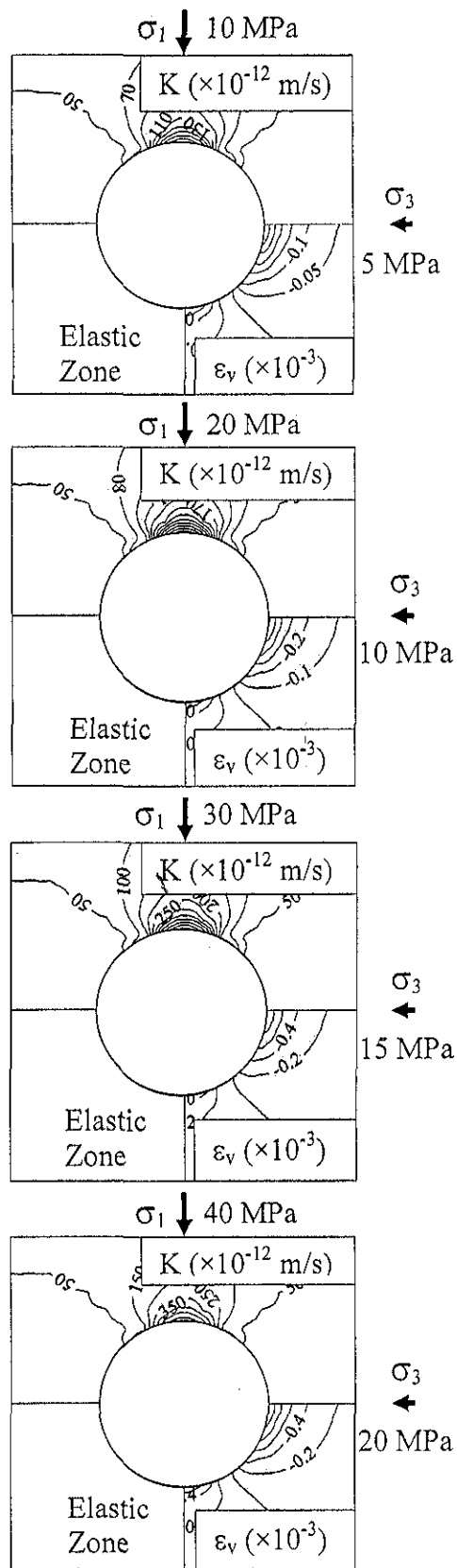
รูปที่ 4.38 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร
ที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว



รูปที่ 4.39 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง
ที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว



รูปที่ 4.40 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหาร
ที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว



รูปที่ 4.41 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง
ที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์เดี่ยว

4.6.3 อุโมงค์ขนำนรูปทรงกลมภายใต้ความเค้นที่ไม่เท่ากัน

สำหรับการจำลองนี้ ได้สร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์เมชจำนวน 2 แบบ ในแนวแกน x-y โดยในแนวแกน z ถูกละเว้นเพราะอยู่ภายใต้การวิเคราะห์ความเครียดใน 2 แกน โดยสมมติให้ ความเครียดในแกน z เท่ากับ 0 ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์เมชถูกสร้างขึ้นเพียงครั้งเดียวของขอบเขตการ วิเคราะห์เนื่องจากการสมมาตร โดยแบบจำลองนี้อยู่ภายใต้ความเครียดในแนวตั้งตั้งแต่ 10 ถึง 40 MPa ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

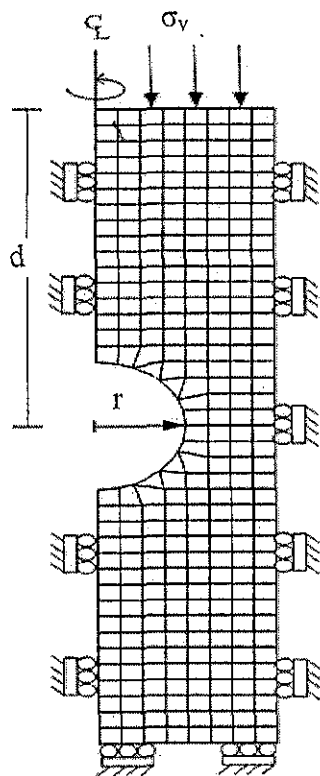
รูปที่ 4.42 แสดงแบบจำลอง ข โดยระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ เท่ากับ 16 เมตร ความเค้นที่ให้ทางด้านบนคือความเค้นในแนวตั้ง ขอบเขตทางด้านบนถูกปล่อยให้ เคลื่อนที่อย่างอิสระทั้งในทิศทาง x และ y ขอบเขตทางด้านซ้ายคือแกนสมมาตรที่แบ่งอุโมงค์ ออกเป็น 2 ส่วน แกน y สามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง y เท่านั้น ขอบเขตทางด้านล่างและขวา คือแกน สมมาตรที่แบ่งอุโมงค์ออกเป็นหลายๆส่วน แกน x ถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ในทิศทาง x เท่านั้น ส่วน แกน y ถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ในทิศทาง y เท่านั้น

จากการจำลองอุโมงค์ขนำนรูปทรงกลมภายใต้ความเค้นในแนวตั้งระหว่าง 10 ถึง 40 MPa พบว่า ค่าความเครียดเชิงปริมาตรสูงสุดคือ 0.2×10^{-3} , 0.4×10^{-3} , 0.6×10^{-3} และ 0.8×10^{-3} สำหรับ หินทรายชุดพระวิหาร และ 0.3×10^{-3} , 0.6×10^{-3} , 0.9×10^{-3} และ 1.2×10^{-3} สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง ค่าความซึมผ่านสูงสุดสำหรับความเค้นในแนวตั้งตั้งแต่ 10, 20, 30 ถึง 40 MPa คือ 120×10^{-9} , 135×10^{-9} , 155×10^{-9} และ 180×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และ 350×10^{-12} , 650×10^{-12} , 950×10^{-12} และ 1350×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง

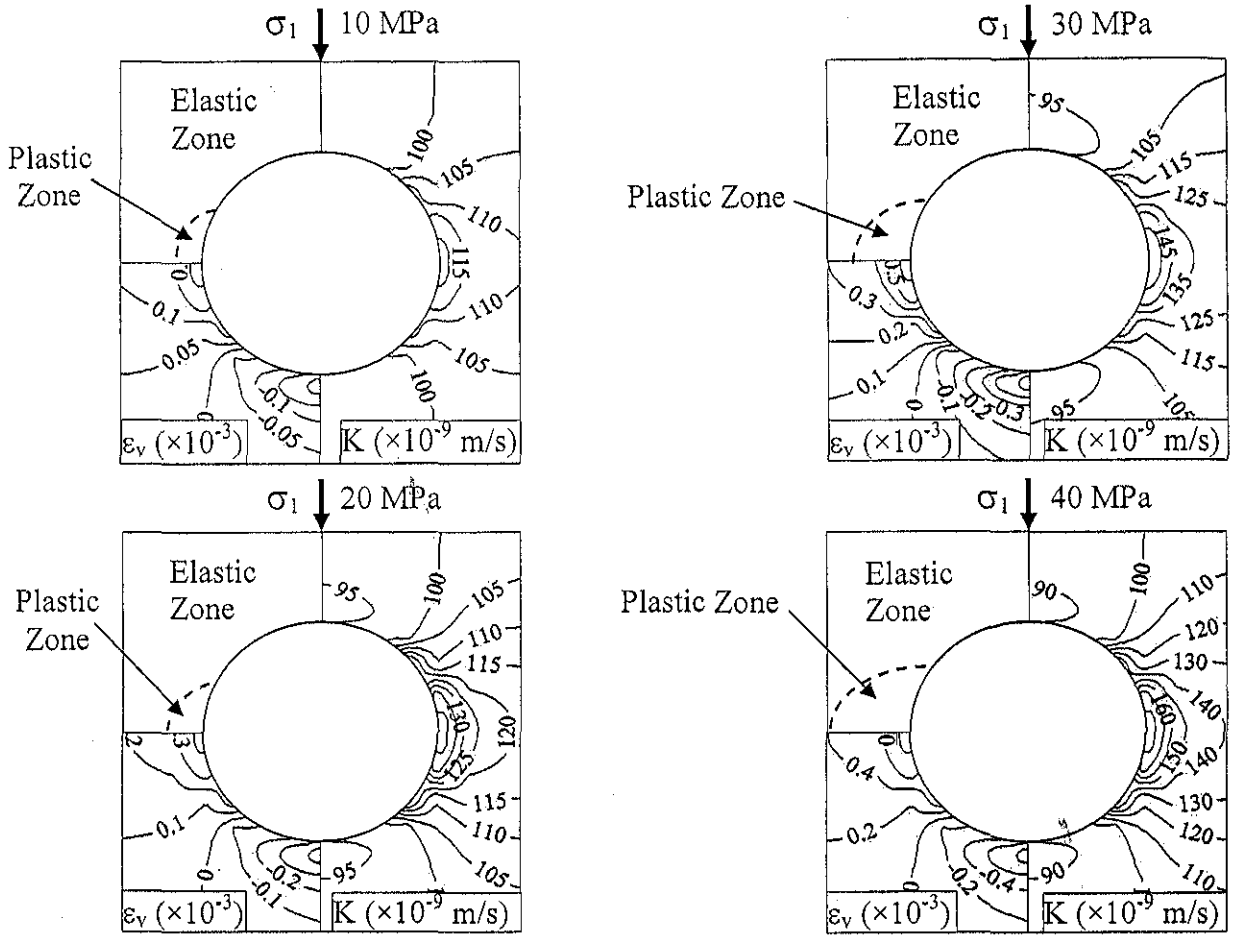
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านสูงสุดที่อยู่ภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง 10, 20, 30 และ 40 MPa สามารถสรุปได้ว่า ค่าความซึมผ่านของเสาหินระหว่างอุโมงค์ขนำนรูปทรงกลมเพิ่มขึ้น จาก 120×10^{-9} ถึง 180×10^{-9} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดพระวิหาร และจาก 350×10^{-12} ถึง 1350×10^{-12} เมตรต่อวินาที สำหรับหินทรายชุดภูกระดึง ดังรูปที่ 4.43 ถึง 4.44 แสดงการเปรียบเทียบ กันของค่าความซึมผ่านในเสาหิน

ตารางที่ 4.9 ตัวแปรในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC สำหรับอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม

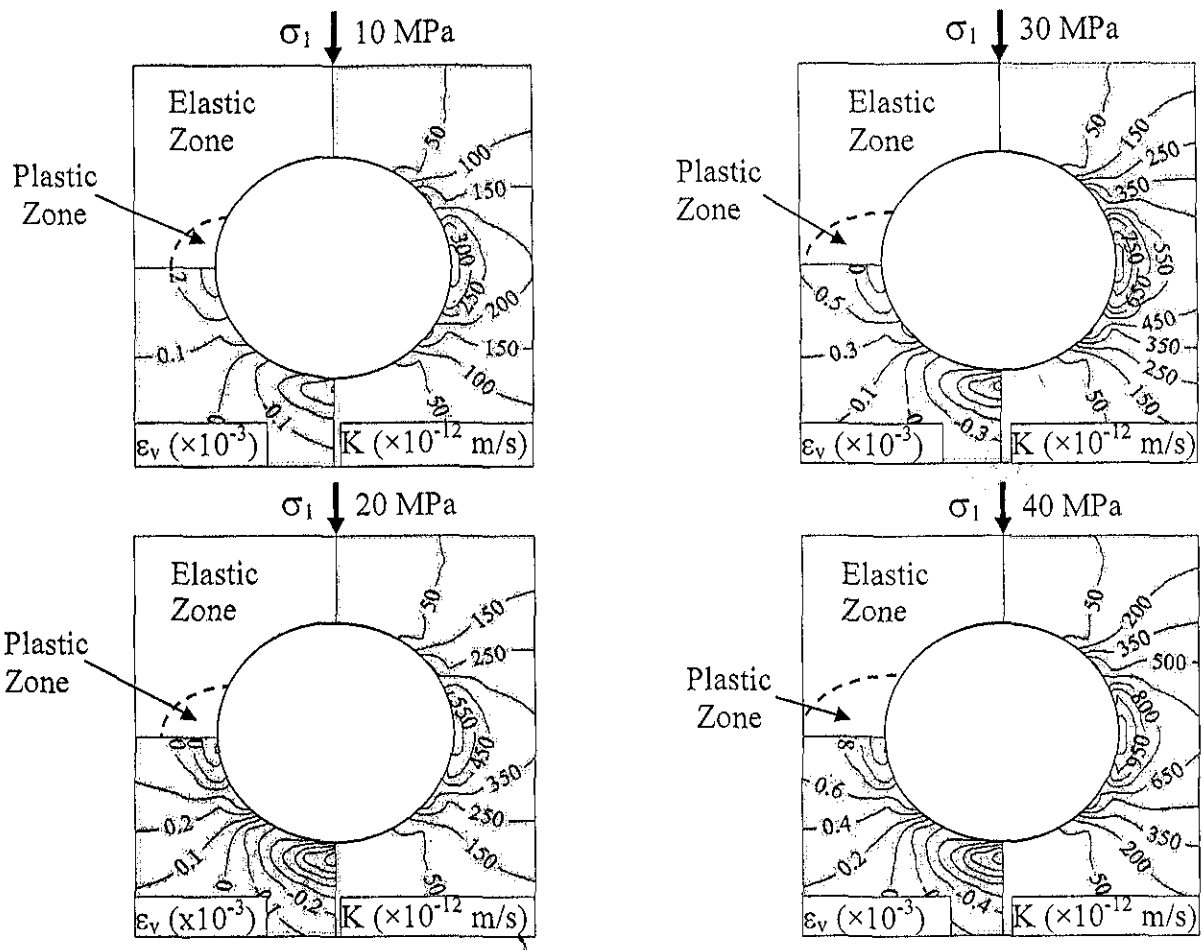
Sandstone Member	Opening depth (m) (d)	Opening radius (m) (r)	Vertical Stress (MPa)
PW	16	4	10
			20
			30
			40
PK	16	4	10
			20
			30
			40



รูปที่ 4.42 Finite difference mesh สำหรับการจำลองอุโมงค์ขนานรูปทรงกลม (Model B)



รูปที่ 4.43 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชั้นพระวิหาร
ที่ได้จากการจำลองรอบอุโมงค์ขนำนรูปทรงกลม



รูปที่ 4.44 ค่าความเครียดเชิงปริมาตรและค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดภูกระดึง
ที่ได้จากการจำลองรอบอโมงค์ขนานรูปทรงกลม

บทที่ 5

การวิจารณ์ผลและบทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหินภายใต้สภาวะความเค้นที่ต่างกันและเพื่อพัฒนาสมการควบคุมระหว่างความซึมผ่านของรอยแตกกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกนั้น โดยมีการทดสอบความซึมผ่านของหินและรอยแตกในห้องปฏิบัติการจากหินทราย 4 ชนิด คือ หินทรายชุดพระวิหาร ชุดภูพาน ชุดภูกระดึง และชุดเสาข้าว

ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ค่าความซึมผ่านของหินทรายชุดพระวิหารจะลดลงจาก 100×10^{-9} m/s ที่ความดันล้อมรอบ 3.45 MPa จนถึง 50×10^{-9} m/s ที่ความดันล้อมรอบ 20.7 MPa เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบการให้ความดันล้อมรอบจาก 2 วัฏจักรพบว่าค่าความซึมผ่านที่ได้จากวัฏจักรที่สองจะต่ำกว่าค่าความซึมผ่านที่วัดได้ในวัฏจักรแรกประมาณ 5 เท่า เนื่องจากค่าความพรุนในหินทรายชุดพระวิหารลดต่ำลงอย่างถาวรจากการกดภายใต้วัฏจักรแรกที่มีค่าสูงสุดถึง 20.7 MPa (3000 psi) ส่วนหินทรายชุดภูพาน เสาข้าว และภูกระดึงมีค่าความซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-9} m/s (น้อยกว่าความสามารถของเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการมี) ผลของค่าความซึมผ่านของเนื้อหินที่ไม่มีรอยแตกที่วัดได้นี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้ประเมินหรือคำนวณค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

การทดสอบความซึมผ่านของหินทรายภายใต้ความดันที่ไม่เท่ากัน (Deviatoric stress) จะทำให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรที่สัมพันธ์กับค่าความซึมผ่านต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเบี่ยงเบน ผลที่ได้สรุปว่าเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนมีค่ามากขึ้นค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้น (เกิดจากการหดตัวของความพรุนในเนื้อหิน) ในช่วงนี้ผู้วิจัยสามารถคำนวณอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดเชิงปริมาตร ($\Delta K / \Delta \epsilon_v$) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 เมื่อความเค้นเบี่ยงเบนสูงมากขึ้นจนถึงจุดแตกของหิน ความเครียดเชิงปริมาตรจะลดลงอย่างฉับพลัน (เกิดจากการพัฒนารอยแตก รอยร้าว และการบวมตัวของความพรุนในเนื้อหิน) ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถวัดอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าความซึมผ่านต่อความเครียดเชิงปริมาตรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถสรุปโดยรวมได้ว่า ค่าความซึมผ่านในหินทรายจะลดลงเมื่อมีความเค้นล้อมรอบเพิ่มขึ้นและเมื่อมีความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น (ก่อนการแตกของหิน) ค่าความซึมผ่านนี้จะสูงขึ้นอย่างฉับพลันเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนสูงเกินกว่าค่ากำลังกดสูงสุดของหินทรายนั้นๆ ผลที่ได้สามารถนำมาใช้ประกอบกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อคาดคะเนค่าความซึมผ่านของเนื้อหินทรายรอบหลุมเจาะน้ำมันหรือน้ำบาดาลดังแสดงตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.6

การทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายทั้ง 4 ชนิด โดยรอยแตกมีค่า JRC อยู่ระหว่าง 11 ถึง 15 สามารถคำนวณค่าการเปิดเผยเชิงไฮดรอลิก (e_p) ที่ลดลงตามค่าความเค้นที่ตั้งฉากอยู่กับรอยแตกโดยมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นจาก 0.5 ถึง 2.0 MPa ในระหว่างการกด (loading) และลดลงจาก 2.0 ถึง 0.5 MPa ในช่วงของการคลายความเค้น (unloading) ผลที่ได้สรุปว่า รอยแตกจะมีการปิดตัวลงอย่างถาวรในระดับหนึ่งเมื่อความเค้นที่ตั้งฉากกับรอยแตกนั้นเพิ่มไปถึง 2.0 MPa การปิดตัวลงของรอยแตกนี้สามารถวัดได้จากอัตราการไหลของน้ำที่ลดลง ในขณะที่ทำการทดสอบ หินทรายชุดภูกระดึงและเสาขัวจะมีการปิดตัวลงของรอยแตกมากกว่าหินทรายชุดพระวิหาร และภูพาน การปิดตัวลงของรอยแตกจะเกิดขึ้นอย่างถาวรซึ่งสังเกตได้จากค่าความซึมผ่านในช่วง unloading มีค่าต่ำกว่าค่าความซึมผ่านในช่วง loading พฤติกรรมเช่นนี้ระบุว่ารอยแตกของหินทราย ในภาคสนามที่ระดับความลึกอาจจะไม่มีการเปิดเผยขึ้นมากนัก ถึงแม้ความเค้นในแนวตั้งฉากกับ รอยแตกจะมีค่าลดลงก็ตาม

ผลจากการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นเฉือนระบุว่า การเปิดเผยของรอยแตกของหินทรายทั้ง 4 ชนิด ในช่วงก่อนกำลังเฉือนสูงสุด (peak strength) จะมีค่าต่ำ และจะมีค่าสูงขึ้นอย่างฉับพลันหลังจากรอยแตกนั้นถูกเฉือนเกินกว่ากำลังเฉือนสูงสุด (อยู่ในช่วง กำลังเฉือนคงเหลือ) โดยทั่วไปการเปิดเผยและค่าความซึมผ่านของรอยแตกจะลดลงเมื่อค่าความเค้นในแนวตั้งฉากมีค่าสูงขึ้น ค่าความซึมผ่านภายใต้สภาวะที่ไม่มีกำลังเฉือนและที่สภาวะกำลังเฉือน สูงสุดจะมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ในช่วงความเค้นคงเหลือหรือเมื่อรอยแตกนั้นถูกเฉือนเกินกว่า ค่าสูงสุด (ขนาดของการเคลื่อนตัวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร) ค่าความซึมผ่านจะมีค่าสูงขึ้นและจะไม่ ขึ้นกับขนาดของการเคลื่อนที่ของรอยแตก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทรายใดที่รอยแตกในหินทรายทั้ง 4 ชนิดไม่ถูกเฉือนเกินกว่ากำลังเฉือนสูงสุดก็จะมีค่าความซึมผ่านต่ำ อยู่ในช่วง $0.1-10 \times 10^{-3}$ m/s (ขึ้นกับ ค่าความเค้นในแนวตั้งฉากที่สภาวะนั้นๆ) ในช่วงกำลังเฉือนคงเหลือค่าความซึมผ่านจะสูงขึ้นและจะ ไม่ขึ้นกับขนาดของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (shearing displacement) ในช่วงนี้

5.2 การนำผลไปประยุกต์ใช้และข้อเสนอแนะในการศึกษา

ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปคาดคะเนค่าความซึมผ่านของมวลหินที่ประกอบด้วย รอยแตกและเนื้อหินที่มีการผันแปรตามค่าความเค้นที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ ค่าความซึมผ่านของมวล หินที่อยู่ใกล้กับอุโมงค์หรือช่องเหมืองที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นจากสภาพเดิมหรือมีการ เคลื่อนตัวของรอยแตก และค่าความซึมผ่านของมวลหินบนความลาดชันหรือบนผนังเหมืองเปิดที่มี การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้น โดยการขุดเจาะมวลหินที่อยู่ใกล้เคียง ความซึมผ่านของเนื้อหิน สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วน $\Delta K / \Delta \epsilon_v$ (ก่อนเกิดการแตก) และอัตราส่วน $\Delta K / \Delta \epsilon_p$ (หลังเกิด การแตก) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวสามารถใช้ประกอบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่านของรอยแตกที่เกิดจากการผันแปรค่าความเค้นในแนวตั้งและแนวเอียงสามารถประเมินได้จากกราฟในรูปที่ 4.30

เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่หินทรายจากหลากหลายชุดหิน ผู้วิจัยคาดว่าผลงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหินทรายทั่วไปที่เป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาลและน้ำมันและที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามผลจากงานวิจัยนี้อาจไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหินชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์แตกต่างไปจากหินทั้ง 4 ชนิด ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ ดังนั้นควรดำเนินการทดสอบกับหินที่มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้และมีคุณสมบัติหลากหลายและแตกต่างกันทั้งในเชิงความแข็งและความชื้นผ่าน อาทิ หินแกรนิต หินปูน หินอ่อน หินดินดานและหินโคลน เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Akkrachattrarat, N., Suanprom, Buaboocha P. and Fuenkajorn, K. (2009). Flow Testing of Sandstone Fracture under Normal and Shear Stresses. **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**, Thailand, pp 319-334., Suranaree University of Technology.
- Ali, H. S. (1987). The Effect of Overburden Pressure, SPE-Paper 15730 5. **SPE Middle-East Oil Show Proc.** Manama, Bahrain, pp 7-10.
- ASTM D4543-08. Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D5607-95, Standard test method for performing laboratory direct shear strength test of rock specimens under constant normal force. **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Auradou, A., Drazer, G., Boschan, A., Hulin, J.P. & Koplik, J. (2006). Flow channeling in a single fracture induced by shear displacement. **Geothermics**. 35(5-6) : 576–588.
- Baghbanan, A. and Jing, L. (2006). Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 44 (5) : 704–719.
- Baghbanan, A. and Jing, L. (2008). Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 45(8) : 1320-1334.
- Bandis, S.C., Barton, N.R., and Christianson, M. (1985). Application of a new numerical model of joint behavior to rock mechanics problems. **Proceeding of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints**, Bjorkliden.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C., and Barton, N.R. (1983). Fundamentals of rock Joint deformation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 20(6) : 249-268.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. **Engineering Geology**. 7(4) : 287-332.

- Barton, N., and Bakhtar, K. (1983). Rock Joint Description and Modeling of the Hydrothermomechanical Design of Nuclear Waste Repositories (Contact Report, Submitted to CANMET). **Mining Research Laboratory**, Ottawa.
- Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. (1985). Strength, Deformation and conductivity coupling of rock joints. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstract**, 22(3) : 121-140.
- Brown, E.T. (editor) (1981). Rock Characterization testing and monitoring: ISRM Suggested methods. The Commission on Rock Testing Methods, **International Society for Rock Mechanics**, Pergamon Press, New York, 211 pp.
- Chandra, S., Ahmed, S., Ram, A. and Dewandel, B. (2008). Estimation of hard rock aquifers hydraulic conductivity from geoelectrical measurements : A theoretical development with field application. **Journal of Hydrology**. 357(3-4) : 218-227.
- Dautriat, J., Gland, N., Youssef, S., Rosenberg, E., and Bekri, S. (2007). Stress dependent permeabilities of sandstones and carbonates: Compression experiments and pore network modeling. **2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. Anaheim, California, U.S.A. 11-14 November 2007.
- Detoumay, E. (1980). Hydraulic Conductivity of Closed Rock Fractures: An Experimental and Analytical Study. **Proceeding of the 13th Canadian Rock Mechanics Symposium** (pp 168-173). Toronto: (n.p.).
- Ferfera, F.M.R., Sarda, J-P., Bouteica, M. and Vincke, O. (1997). Experimental study of monophasic permeability changes under various stress paths. **Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.** 34(3-4) : 3-4.
- Fleuter, W.F. (1997). Analytical and experimental investigation into the shear performance of joints in soft sedimentary rocks. **MengSc dissertation**. Australia : **Department of Civil Engineering, Monash University**.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Gale, G. E. (1975). **A Numerical, Field and Laboratory Study of Fluid Flow in Rocks with Deformable Fractures**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Gangi, A. F. (1978). Variation of Whole and Fractured Porous Rocks Permeability with Confining Pressure. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 15: 249-257.

- Ghabezloo, S., Sulem, J. and Saint-Marc, J. (2008). Evaluation of a permeability-porosity relationship in a low permeability creeping material using a single transient test. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. DOI 10.1016/j.ijrmms.2008.10.003.
- Giacominia, A., Buzzib, O., Ferreroa, A.M., Migliazzaa, M. and Giania, G.P. (2008). Numerical study of flow anisotropy within a single natural rock joint. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 45 (1) : 47–58.
- Hakami, E., and Barton, N. (1990). Aperture Measurements and Flow Experiments using Transparent Replicas of Rock Joints. **Proceeding of the International Symposium on Rock Joints** (pp 383-390). Norway: Loen.
- Hamiel, Y., Lyakhovsky, V. and Agnon, A. (2005). Rock dilation, nonlinear deformation, and pore pressure change under shear. **A Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem**.
- Heiland, J. (2003). Permeability of triaxially compressed sandstone: Influence of deformation and strain-rate on permeability. **Pure appl. Geophys.** 160: 889-908.
- Holt, R.M. (1989). Permeability Reduction Induced Nonhydrostatic Stress Field, **SPE-Paper 19595 Annual Techn. Conf.**, San Antonio, Oct. 8-11.
- Indraratna, B. and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Indraratna, B. and Ranjith, P.G. (2001). Laboratory measurement of two-phase flow parameters in rock joints based on high pressure triaxial testing. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 127(6) : 530-542.
- Indraratna, B., and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse : A. A. Balkema.
- Iscan, A.G., Kok, M.V. and Bage, A.S. (2006). Estimation of permeability and rock mechanical properties of limestone reservoir rocks under stress conditions by strain gauge. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. 53: 13-24.
- Itasca (1992a). **FLAC–Fast Lagrangian Analysis of Continua**, Version 4.0, User Manual. **Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA**.

- Itasca (1992b). User Manual for FLAC–Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0, **Itasca Consulting Group Inc.**, Minneapolis, MN.
- Iwai, K. (1976). Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture. **Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.**
- Jiang, X.W., Wan, L., Wang, X.S., Liang, S.H. and Hu, B.X. (2009). Estimation of fracture normal stiffness using a transmissivity-depth correlation. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences.** 46(1) : 51-58.
- Jiang, Y., Tanabashi, Y., Xiao, J. and Nagaie (2004). An improved shear-flow test apparatus and its application to deep underground construction. Paper 1A 28 — SINOROCK2004 Symposium. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** Vol. 41, No. 3, CD-ROM.
- Jones, F. O. (1975). A Laboratory Study of the Effects of Confining Pressure on Fracture Flow and Storage Capacity in Carbonate Rocks. **Journal of Petroleum Technology.** 21: 21-27.
- Kiyama, T., Kita, H., Ishijima, Y., Yanagidani, T., Aoki, K. and Sato, T. (1996). Permeability in anisotropic granite under hydrostatic compression and triaxial compression including post-failure region. In: Aubertin, M., Hassani, F., Mii, H. (Eds.), **Rock Mechanics.** Balkema, Rotterdam, pp. 1643–1650.
- Kranz, R.L., Frankel, A.D., Engelder, T. and Scholz, C.H. (1979). The permeability of whole and jointed barre granite. **Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.** 16: 225-334.
- Lee, C.H., and Farmer, I. (1993). Fluid Flow in Discontinuities Rocks. London: **Chapman & Hall.**
- Lee, H.S. and Cho, T.F. (2002). Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. **Rock Mechanics and Rock Engineering.** Springer-Verlag Wien. 35(4) : 299-318.
- Lee, S.D. and Harrison, J.P. (2001). Empirical parameters for non-linear fracture stiffness from numerical experiments of fracture closure. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences.** 38(5) : 721-727.
- Maini, Y.N.T. (1971). In situ hydraulic parameters in jointed rock—their measurement and interpretation. **Ph.D. Thesis. Imperial College, London.** 321 p.

- Makurat, A., Barton, N., Rad, N. S., and Bandis, S. (1990). Joint Conductivity Variation due to Normal and Shear Deformation. **Rock Joints**, In Barton, N. S. and Stephansson, eds., Balkema, pp. 535-540.
- National Research Council. (1996). Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Nelson, R. (1975). Fracture Permeability in Porous Reservoirs: Experimental and Field Approach. **Ph.D. dissertation, Department of Geology, Texas A&M University.**
- Niemi, A.P., Vaattinen, T.A., Vuopio, J.A. and Polla, J.P. (1997). Simulation of heterogeneous flow in a natural fracture under varying normal stress. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34(3-4) : 565.
- Oda, M., Takemura, T., and Aoki, T. (2002). Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite. **Mechanics of Materials**. 34 (6) 313–331.
- Pearce, H. A micro-mechanical approach to the shear behavior of rock joints. Ph.D. dissertation. Australia : Department of Civil Engineering, Monash University.
- Pusch, G. and Weber, J.R. (1998). Correlation of rock permeability and anisotropic stress conditions for the integration of rock mechanical and hydraulic flow models. **Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts**. Sept. 14-16, den Haag, Netherlands.
- Pyrak-Noltea, L.J. and Morriss, J.P. (2000). Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 37(1) : 245-262.
- Ranjith, P. G. (2000). Analytical and Numerical Investigation of Water and Air Flow Through Rock Media. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Wollongong, Australia.
- Raven, K. G., and Gale, J. E. (1985). Water Flow in a Natural Rock Fracture as a Function of Stress and Sample Size. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 22(4): 251-261.
- Risnes, R., Faldaas, I., Korsnes, R.I. and Norland, T. (2003). Measurements on Stress Dependent Permeability. **Geophysical Research Abstracts**. 5: 03507.

- Seidel, J.P., and Haberfield, C.M. (2002). A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 39(5) : 539-553.
- Shangxian, Y. and Shangxu W. (2006). Effect and mechanism of stresses on rock permeability at different scales. **Science in China: Series D Earth Sciences** 2006, 49(7) : 714-723.
- Smart, B.G. (1992). The Effects of Combined Changes in Pore Fluid Chemistry and Stress State on Reservoir Permeability. **PSTI-Technical Bulletin No. 1**, pp 14-17.
- Snow, D. T. (1968a). Anisotropic Permeability of Fractured Media. **Water Resources Research**, 5(6): 1273-1289.
- Snow, D. T. (1968b). Rock Fracture Spacing, Openings and Porosity. **Journal of Rock Mechanics (Found. Div., ASCE)**, 94(SM 1): 73-91.
- Snow, D. T. (1970). The Frequency and Apertures of Fractures in Rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 7: 23-40.
- Son, B.K., Lee, Y.K. and Lee, C.I. (2004). Elasto-plastic simulation of a direct shear test on rough rock joints. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 41(3) : 1-6.
- Spivak, A.I. and Popov, A.M. (1986). *Breaking Rocks During Drilling [in Russian]*, Nedra, Moscow.
- Stavrogin, A. N., and Tarasov, B.G. (2001). *Experimental Physics and Rock Mechanics*. Lisse: A. A. Balkema.
- Trimmer, D. (1982). Laboratory measurements of ultralowpermeability of geological materials. **Rev. Sci. Instrum.** 53(8).
- Walsh, J.B. (1981). Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability, **International Journal of Rock Mech. Min.Sci. and Geomechanics**, 18: 429-435.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwan, R., and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses. **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**, Thailand, pp 199-218., Suranaree University of Technology.
- Wilhelmi, B. and Somerton, W.H. (1967). Simultaneous Measurement of Pore and Elastic Properties of Rocks under Triaxial Stress Conditions, **SPE-Journal**, 9: 283 – 294.
- Witherspoon, P.A. (1980). Validity of the Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. **Water Resources Res.** 16(6): 1016-1024.

- Xiao, Y.X., Lee, C.F. and Wang, S.J. (1999). Assessment of an equivalent porous medium for coupled stress and fluid flow in fractured rock. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 36(7) : 871-881.
- Zangerl, C., Evans, K.F., Eberhardt, E. and Loew, S. (2008). Normal stiffness of fractures in granitic rock : A compilation of laboratory and in-situ experiments. **International of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 45(8) : 1500-1507.
- Zeigler, B. 1976. Theory of Modelling and Simulation. New York: John Wiley and Sons.
- Zhao, J. (1998). Rock mass hydraulic conductivity of the Bukit Timah granite, Singapore. **Engineering Geology**. 50(1-2) : 211-216.
- Zhou, J. J. and Shao, J. F. (2006). micromechanical study of damage growth and permeability variation in brittle rocks. **Studia Geotechnica et Mechanica**. 28(1): 62-73.
- Zhu, W., Montési, Laurent G.J. and Wong, T.F. (2002). Effects of stress on the anisotropic development of permeability during mechanical compaction of porous sandstones. **Geological Society, London, Special Publications**; 2002; v. 200; p. 119-136.
- Zoback, M.D. and Byerlee, J.D. (1975). The effect of microcrack dilatancy on permeability of westerly granite. **J. Geophys. Res.** 80(5): 52-755.

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 ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา 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