



รหัสโครงการ SUT7-719-54-24-40

รายงานการวิจัย

การศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกในหิน
รอบหลุมเจาะน้ำบาดาลและปิโตรเลียม

(Permeability of Rock Fractures
around Groundwater and Petroleum Wells)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-54-24-40

รายงานการวิจัย

การศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกในหิน
รอบหลุมเจาะน้ำบาดาลและปิโตรเลียม

(Permeability of Rock Fractures
around Groundwater and Petroleum Wells)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 และ 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

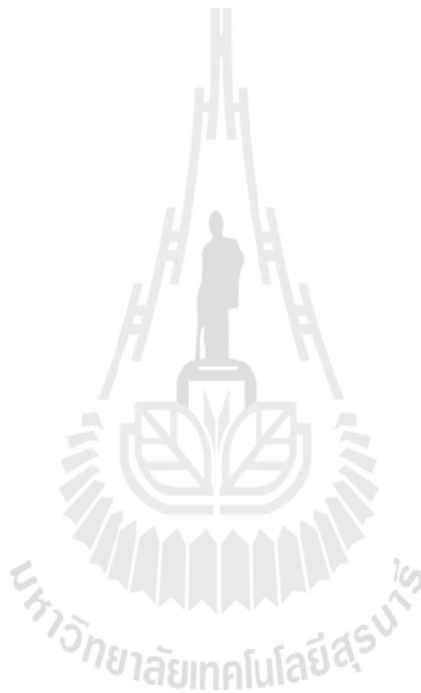
กันยายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 และ 2555 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2555



บทคัดย่อ

การทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะภายในห้องปฏิบัติการ ได้ดำเนินการเพื่อหาผลกระทบของความเค้นกดบนรอยแตก ด้วยการเตรียมตัวอย่างหินทรายชุด ภูกระดึงที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณสมบัติที่บดน้ำให้มีรูปทรงระบอบขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.6 cm สูง 15 cm โดยทำการเจาะรูที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 3.3 cm จากนั้นทำ รอยแตกผ่ากลางรูเจาะด้วยวิธีการให้แรงแบบเส้นซึ่งขนานไปตามแกนกลางของตัวอย่าง การทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตกดำเนินการโดยใช้การอัดน้ำเข้าสู่ตัวอย่างหินภายใต้การให้ แรงในแนวตั้งแบบคงที่โดยผันแปรมุมที่รอยแตกกระทำกับแรงกดที่ละ 15 องศา จนกระทั่ง ครบรอบวัฏจักรและทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง 3 วัฏจักร ค่าความซึมผ่านในรอยแตกคำนวณ ได้จากอัตราการไหลของน้ำที่วัดได้จากการทดสอบค่าความเค้นเฉลี่ยในแนวตั้งบนระนาบตัวอย่าง ที่มีค่าผันแปรตั้งแต่ 0.63 MPa ถึง 1.85 MPa การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ถูก นำมาใช้เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของความเค้นบนรอยแตกภายใต้สภาวะที่ถูกความเค้น กระทำในทิศทางที่ต่างกัน ผลที่ได้สอดคล้องกับการคำนวณด้วยสมการสำเร็จรูปในสภาวะที่มี แรงกระทำจากภายนอก ผลการทดสอบสรุปว่าเมื่อค่าความเค้นในแนวตั้งจากเพิ่มขึ้นค่าความซึม ผ่านในรอยแตกจะมีค่าลดลง เมื่อรอยแตกมีทิศทางเบี่ยงเบนจากความเค้นที่กระทำลงบน ตัวอย่างหินค่าความเค้นเฉือนจะส่งผลให้ค่าความซึมผ่านในรอยแตกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลที่ได้ยัง แสดงให้เห็นถึงความไม่คืนตัวของช่องเปิดของรอยแตกโดยสังเกตจากค่าความซึมผ่านใน วัฏจักรที่ 2 และวัฏจักรที่ 3 ที่มีค่าความซึมผ่านต่ำกว่าวัฏจักรแรกโดยค่าความซึมผ่านในรอย แตกที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ and $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$

Abstract

Laboratory flow tests have been performed to assess the effects of normal and shear stresses on the permeability of radial fractures around borehole. The rock specimens are prepared from Phu Kradung sandstone to obtain hollow cylinders having outside and inside diameters of 18.6 and 3.3 cm with a length of 15 cm. The rock is uniform and effectively impermeable. A radial fracture is artificially made by tension inducing method. It cuts through the borehole axis and along the specimen diameter. After applying a constant diametrical loading, the water is injected under constant head into the center hole. The fracture permeability is determined for various fracture orientations with respect to the vertical loading direction with 15° apart. The flow tests are repeated 3 times under each vertical load to assess the permanent closure of the fracture under loading. The diametrical loads are progressively increased from 0.63 MPa to 1.85 MPa. Finite difference analyses have been performed to calculate the normal and shear stress distributions on the fracture under various orientations. The numerical results agree well with those of the solution of thick wall cylinder under external uniform pressure. The results indicate that the increases of the normal stresses (when it is normal or nearly normal to the applied load direction) rapidly decrease the fracture permeability. When the normal of fracture is deviated from the loading direction, the shear stress can increase the fracture permeability. A permanent closure of the fracture is observed as evidenced by the permanent reduction of the fracture permeability measured from the second and third cycles. The changes of aperture and water flow rate are used to calculate the changes of the fracture permeability. The fracture permeability is in the range between $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ and $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก.....	7
2.2 ความซึมผ่านในมวลหิน.....	7
2.3 ความเค้นรอบอุโมงค์.....	16
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างหิน.....	19
3.1 วัตถุประสงค์.....	19
3.2 การเตรียมตัวอย่างหิน.....	19
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	23
4.1 วัตถุประสงค์.....	23
4.2 การทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก.....	23
4.3 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก27	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	33
5.1 วัตถุประสงค์.....	33
5.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	35
5.3 ผลการคำนวณ.....	35
 บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	 41
บรรณานุกรม.....	43
ประวัตินักวิจัย.....	49



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ	15
5.1	คุณสมบัติพื้นฐานทางกลศาสตร์ของหินทรายชุดภูพานและแผ่นเหล็กจากการศึกษา ของ Walsri และคณะ (2009).....	34



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างหินที่ถูกเตรียมไว้สำหรับการทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก.....	4
1.2 วิธีการทดสอบค่าความซึมผ่าน โดยผันแปรทิศทางของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด..	4
2.1 Block Diagram แสดงรอยแตกและหน้าของรอยแตก และ Mode พื้นฐานของ รอยแตกที่เกี่ยวกับแนวแตก (Mode I) และรอยเลื่อน (Mode II หรือ Mode III).....	8
2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเนื้อหินและในรอยแตกของตัวอย่างหิน	9
2.3 ชนิดของความซึมผ่านในตำแหน่งต่างๆ.....	9
2.4 ปัจจัยที่ควบคุมค่าความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว.....	12
2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความเค้นรอบอุโมงค์รูปวงกลม โดยความเค้นที่เกิดขึ้น อยู่ในสมมติฐานของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง.....	17
2.6 การเปลี่ยนระบบแกนหรือหมุนแกนของความเค้นในแนวแกนเดิม และความเค้นใน แนวแกนใหม่.....	17
3.1 ตัวอย่างหินบางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกโดยมี เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 18.5 cm สูง 15 cm.....	20
3.2 เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm ทะลุผ่านแกนกลางของตัวอย่างหินด้วย เครื่องเจาะ.....	20
3.3 สร้างรอยแตกขนานกับแกนกลางของตัวอย่างหินด้วยการให้แรงแบบเส้นเพื่อใช้ ทำการทดสอบความซึมผ่านในรอยแตก.....	21
3.4 ติดตั้งจุกยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm หนา 0.5 cm ที่บริเวณปลายหลุมเจาะ ทั้งสองด้าน โดยที่จุกยางด้านหนึ่งต่อเข้ากับข้อต่อทนแรงดัน.....	21
4.1 ติดตั้งตัวอย่างหินเข้ากับเครื่องกดในแกนเดียว โดยประกบตัวอย่างหินเข้ากับ แผ่นเหล็กกระจายแรง.....	24
4.2 ติดตั้งสายยางทนแรงดันระหว่างถังก๊าซไนโตรเจนกับท่ออะคริลิก และต่อสายยาง ทนแรงดันระหว่างท่ออะคริลิกกับตัวอย่างหิน.....	25
4.3 รอยแตกของตัวอย่างหินวางตัวอยู่ในระนาบเริ่มต้นหรือที่ 0 องศา และรอยแตก วางตัวอยู่ที่มุมใดๆ โดยทำการวัดค่ามุมจากแนวตั้ง.....	26
4.4 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-01.....	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-02.....	29
4.6 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-03.....	30
4.7 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-04.....	31
5.1 ตัวอย่างของ Finite difference mesh ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 จากการวิเคราะห์แบบ plane strain โดยแบบจำลองมีความสูง 31 cm กว้าง 22.6 cm ตัวอย่างหินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 18.6 cm เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเท่ากับ 3.3 cm.....	34
5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 0 องศา.....	36
5.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 45 องศา.....	37
5.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 90 องศา.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

องค์ความรู้เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตกเป็นสิ่งสำคัญในการคำนวณเพื่อประเมินอัตราและพฤติกรรมของของไหลในมวลหินที่ระดับความลึกต่างๆ กัน องค์ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแผนการสำรวจและการผลิตน้ำมัน น้ำบาดาล ก๊าซธรรมชาติ การวิเคราะห์และคำนวณอัตราการไหลของชั้นน้ำบาดาลหรือแหล่งหินปิโตรเลียม ซึ่งส่วนใหญ่มักจะสมมติให้มวลหินมีลักษณะพรุนอย่างสม่ำเสมอ (Porous media) เพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาสมการควบคุม กล่าวคือ สมมติให้รอยแตกมีการไหลอย่างต่อเนื่อง สมมติฐานเช่นนี้ทำให้ผลการคำนวณปริมาณและอัตราการไหลคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงมาก ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบการผลิตน้ำบาดาลหรือน้ำมันในชั้นหินเหล่านั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ปัญหาเช่นนี้มักจะประสบอยู่เสมอในอุตสาหกรรมเจาะสำรวจและผลิตน้ำมัน ซึ่งส่งผลให้การคาดคะเนปริมาณสำรองและอัตราการผลิตในอนาคตมีความไม่แน่นอนสูง นักวิจัยและวิศวกรตระหนักดีว่าแท้จริงแล้วการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากทิศทาง การวางตัว และการเปิดเผยของรอยแตกในหินที่จุดใดๆ ก็ตามจะมีการแปรผันอย่างมาก ซึ่งทำให้การเคลื่อนตัวของก๊าซหรือของเหลวในมวลหินมักจะเลือกแนวหรือทิศทางที่มีแรงต้านน้อยที่สุด (Selective path) การแปรผันของรอยแตกที่ส่งผลต่อค่าความซึมผ่านจะมีปัจจัยหลักอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องคือ สภาวะของความเค้นในชั้นหิน รวมไปถึงความหนาแน่น ความต่อเนื่อง และความขรุขระของรอยแตกเองด้วย มีนักวิจัยในต่างประเทศหลายท่านได้พัฒนาสูตรโดยได้รวมปัจจัยบางประการเข้าไว้ในสมการควบคุม แต่ก็ยังไม่สามารถนำปัจจัยหลักทั้งหมดเข้ามาไว้ในสมการควบคุมชุดเดียวกันได้ นอกจากนั้นสมการเกือบทั้งหมดได้พัฒนามาในเชิงทฤษฎีโดยไม่มีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการตรวจวัดในภาคสนามมายืนยันหรือเปรียบเทียบ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาสมการการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม และมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม โดยมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเข้ามาอธิบายเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของสมการเหล่านั้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกในหินรอบหลุมผลิตน้ำบาดาลและปิโตรเลียมภายใต้ปัจจัยต่างๆ คือ ความเค้นและทิศทางของรอยแตก โดยมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การพัฒนาสมการควบคุมที่สมบูรณ์ และสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข ผลที่ได้จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหลในมวลหินที่ใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริงในภาคสนาม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการผลิตน้ำบาดาล น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ งานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้วที่ดำเนินการโดยกิตติเทพ เฟื่องขจร (2552) ซึ่งได้ศึกษาการไหลของน้ำผ่านรอยแตกในหินทรายภายใต้ความเค้นกดและความเค้นเฉือน ผลที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวจะนำมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการโดยใช้หินทรายชุดภูกระดึงซึ่งมีค่าความซึมผ่านในเนื้อหินต่ำ
- 2) ทดสอบหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกรอบหลุมเจาะโดยดำเนินการภายใต้ความดันในแนวตั้งที่ผันแปรตั้งแต่ 0.63 MPa ถึง 1.85 MPa
- 3) ทำการศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางตัวและระยะห่างของรอยแตก
- 4) รอยแตกในตัวอย่างหินได้ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการด้วยการกดหรือการตัด
- 5) การทดสอบทั้งหมดได้ใช้น้ำเป็นตัวแทนของของไหลโดยใช้แรงดันแบบคงที่เท่ากับ 41.4 kPa ตลอดการทดสอบ
- 6) ศึกษาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าความซึมผ่านและเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบจำลองทางกายภาพ

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ทำการจำแนกชนิดและลักษณะของรอยแตกในหิน ความซึมผ่านของรอยแตกและผลกระทบของความเค้นในหินต่อการเปิดเผย และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเนื้อหินและรอยแตก โดยทุกประเด็นได้นำมาศึกษาและค้นคว้าหาข้อสรุปเพื่อให้ทราบว่า การวิจัยที่คล้ายคลึงกันมีประโยชน์อย่างไรต่องานวิจัยที่นำเสนอ

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่าง

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกตัวอย่างหินโดยใช้หินทรายชุดภูกระดึงที่มีค่าความซึมผ่านในเนื้อหินต่ำ โดยเตรียมหินรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.5 cm สูง 15 cm จำนวน 4 ตัวอย่าง หินทุกตัวอย่างได้ถูกนำมาเจาะรูตรงกลางขนาด 3.3 cm เพื่อเป็นตัวแทนหลุมเจาะ และทำรอยแตกเดี่ยวผ่ากลางหลุมเจาะ จากนั้นทำการขุดปลายหลุมเจาะ ตัวอย่างทั้งสองด้านด้วยจุกยางวงกลมรัศมีเท่ากับหลุมเจาะมีความหนา 0.5 cm โดยจุกยางด้านหนึ่งต่อเข้ากับข้อต่อลมเพื่อใช้ในการอัดน้ำด้วยแรงดัน 41.4 kPa เข้าสู่หลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

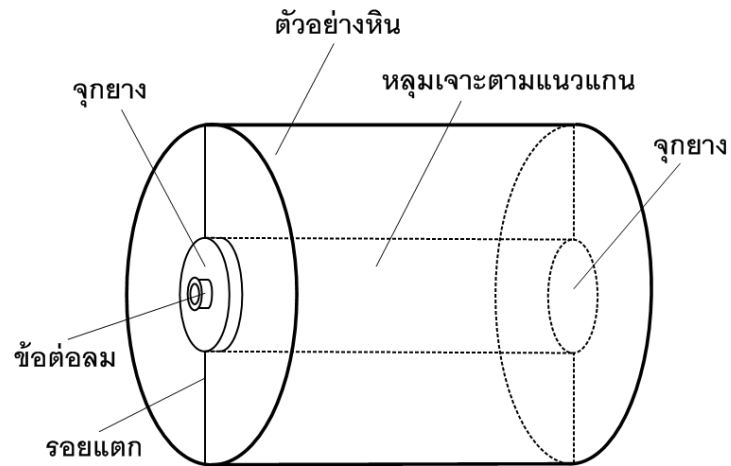
ทำการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหินแต่ละชนิด โดยใช้เครื่องกดในแกนเดี่ยวและใช้วิธีการอัดน้ำด้วยแรงดันแบบคงที่ (Constant head test) ที่ความดันขนาด 41.4 kPa และผันแปรมุมที่ความเค้นกระทำต่อรอยแตกของตัวอย่างหิน รอยแตกที่ทดสอบทั้งหมดเป็นรอยแตกที่ได้ทำการเตรียมในขั้นตอนที่ 2 โดยกำหนดมุมที่แรงในแนวแกนตั้งกระทำต่อรอยแตกในแนวระนาบเป็นมุมเริ่มต้นที่ 0 องศา ทำการหมุนตัวอย่างหินด้วยมุม 0–360 องศา ต่อการทดสอบ 1 วัฏจักร ทำการทดสอบ 3 วัฏจักร โดยใช้ความเค้นตั้งฉากระหว่าง 0.63–1.85 MPa ดังแสดงในรูปที่ 1.2

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

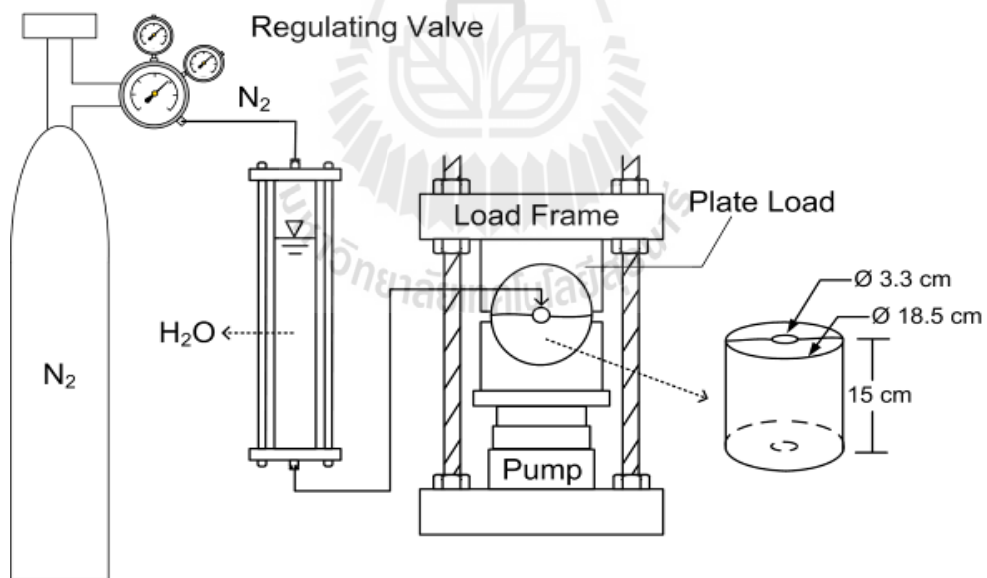
ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก โดยมีจุดประสงค์หลักคือทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะด้วยการผันแปรขนาดและทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างหิน โดยให้แรงในแนวตั้งและใช้แรงดันน้ำแบบคงที่

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

มีการวิเคราะห์ความเค้นและความเค้นเฉือนของตัวอย่างหินเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าความซึมผ่านและมุมที่กระทำต่อรอยแตก โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FLAC 4.0) และสมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาศึกษา โดยในเบื้องต้นนี้จะสมมติให้หินมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างหินที่ถูกเตรียมไว้สำหรับการทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก



รูปที่ 1.2 วิธีการทดสอบค่าความซึมผ่าน โดยผันแปรทิศทางของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) สมการควบคุมการไหลของรอยแตกเดี่ยวในหลุมเจาะ
- 2) ดีพิมพ์ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ
- 3) องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับความซึมผ่านบริเวณรอบๆ หลุมเจาะ
- 4) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 5) เป็นผลงานวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดิน และใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบหลุมเจาะ และป้อบาดาล

บทที่ 2

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดและชนิดของรอยแตก ความซึมผ่านในมวลหิน ความซึมผ่านในรอยแตก การเปิดเผยขอ ความเค้นรอบอุโมงค์ และอิทธิพลของแรงที่กระทำต่อรอยแตก

2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก

Bates and Jackson (1980) จำแนกรอยแตกในมวลหินเป็น 3 ประเภท ตามกลุ่มทางธรณีวิทยาบนพื้นฐานทางธรรมชาติของความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเคลื่อนตัว ดังแสดงในรูปที่

2.1

- 1) รอยแตกขยายหรือแนวแตก (Joints) เป็นผิวขรุขระ 2 แบบ ที่เคลื่อนออกจากกัน ในทิศทางที่ตั้งฉากต่อกัน ในเชิงกลศาสตร์จะเรียกรอยแตกประเภทนี้ว่า “Mode I” (Lawn and Wilshaw, 1975)
- 2) รอยแตกเฉือนหรือรอยเลื่อน (Faults) เป็นพื้นผิวที่เคลื่อนออกจากกันในทิศทางที่ขนานกัน ถ้าเป็นแบบตั้งฉากกับหน้ารอยแตกในเชิงกลศาสตร์จะเรียกว่า “Mode II” แต่ถ้าขนานกับหน้ารอยแตกจะเรียกว่า “Mode III”
- 3) รอยแตกขีด หรือ Pressure Solution Surfaces เป็นรอยแตกในหินตะกอนที่ถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยสารละลายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อผิวของเกรน

2.2 ความซึมผ่านในมวลหิน

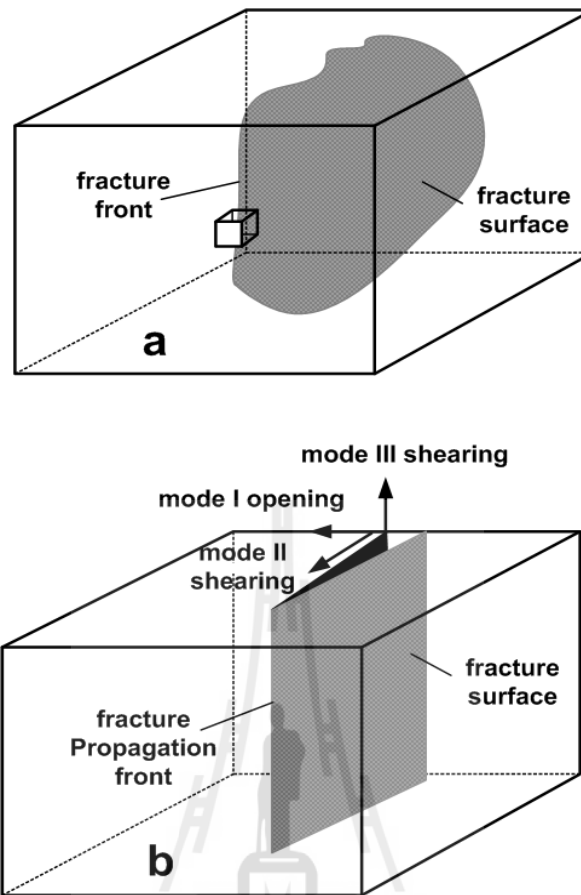
ความซึมผ่านเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล เช่น น้ำ ก๊าซ หรือเอนกสถานะ (เช่น น้ำ+ก๊าซ หรือ น้ำ+ก๊าซ+น้ำมัน) ในการไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ดินหรือหิน โดยค่าความซึมผ่านรวมของมวลหินสามารถแทนด้วยสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

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

โดยที่ k = ความซึมผ่านรวมของมวลหิน

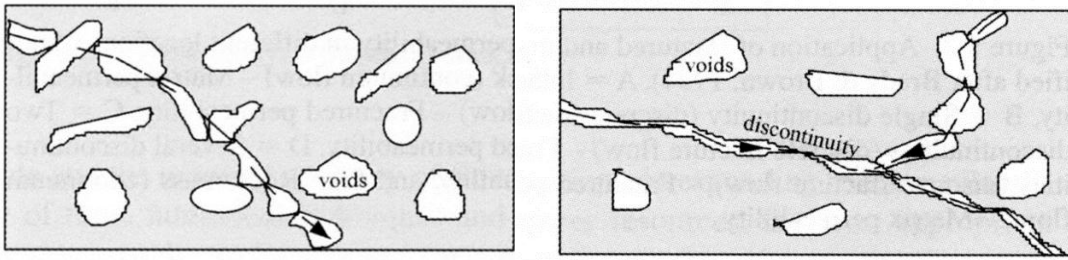
k_f = ความซึมผ่านของแต่ละรอยแตก

k_m = ความซึมผ่านของเนื้อหิน



รูปที่ 2.1 (a) Block Diagram แสดงรอยแตกและหน้าของรอยแตก
 (b) Mode พื้นฐานของรอยแตกที่เกี่ยวกับแนวแตก (Mode I)
 และรอยเลื่อน (Mode II หรือ Mode III) (Pollard and Aydin, 1988)

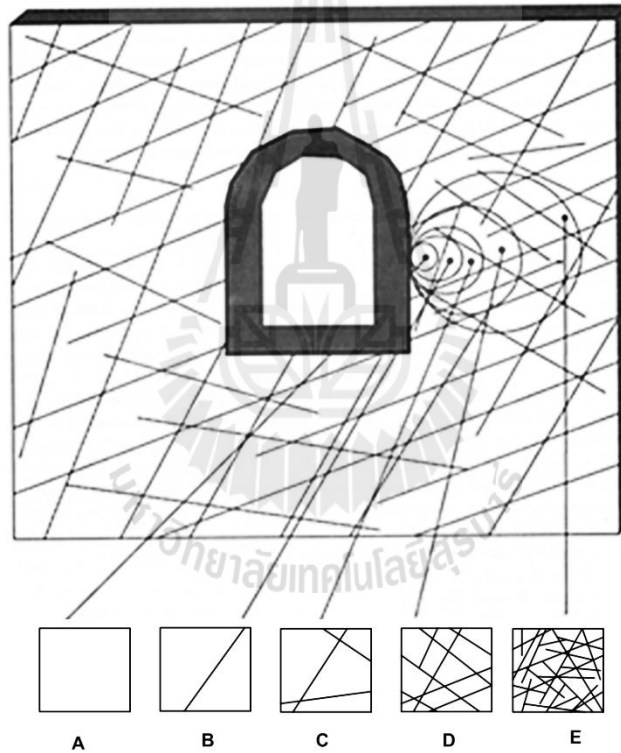
ของไหลจะสามารถไหลผ่านหินที่มีเนื้อเป็นผลึกได้น้อยกว่าการไหลผ่านรอยแตก เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่ต่อกันและขนาดของรูพรุนในหินแข็งโดยทั่วไปมีน้อย (Gale, 1975; Iwai, 1976; Raven & Gale, 1985) ค่าความซึมผ่านยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินและการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเสถียรภาพโครงสร้างวิศวกรรมในหิน ของไหลในตัวอย่างหินสามารถไหลผ่านเนื้อหินและช่องว่างที่ต่อกันหรือทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับการไหลแบบที่มีของไหลเพียงชนิดเดียว ค่าความซึมผ่านสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ 1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน 2) ความซึมผ่านของรอยแตก และ 3) ความซึมผ่านของทั้งเนื้อหินและรอยแตก ความสัมพันธ์ของรอยแตกรูปแบบต่างๆ รวมทั้งประเภทของความซึมผ่านได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 การคำนวณความซึมผ่านแต่ละประเภทมีดังนี้



การไหลผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันในเนื้อหิน

การไหลผ่านรอยแตกและช่องว่างของเนื้อหิน

รูปที่ 2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเนื้อหินและในรอยแตกของ ตัวอย่างหิน
(Indraratna and Ranjith, 2001)



รูปที่ 2.3 ชนิดของความซึมผ่านในตำแหน่งต่างๆ (ดัดแปลงมาจาก Brady and Brown, 1994)

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

1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน

ค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน (k_m) รูปทรงกระบอกสามารถคำนวณจาก Darcy's law ได้ดังนี้

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

โดยที่

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

ถ้าไม่พิจารณา Hydraulic Gradient และความดันรอบข้างที่ให้กับตัวอย่างหิน ค่าความซึมผ่านของเนื้อหินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อหินซึ่งแทนด้วยขนาดของรูพรุน รูปร่าง และการเชื่อมต่อกันของช่องว่าง ถ้าของไหลที่ผ่านเป็นก๊าซเพียงอย่างเดียวจะสามารถประมาณค่าความซึมผ่านของเนื้อหินได้ตามสมการ

$$k_m = 2q\mu L / ((p_i^2 - p_e^2)A) \quad (2.3)$$

โดยที่

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

เมื่อวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้วิธีแบบ Transient ค่าความดันจะขึ้นอยู่กับเวลาตามความสัมพันธ์

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

โดยที่

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

สมการสำหรับหาค่าความซึมผ่านของเนื้อหินแบบวิธี Transient เสนอโดย Kranz et al. (1979) ดังนี้

$$k_m = \alpha\beta\mu LV_1V_2 / (A (V_1 + V_2)) \quad (2.5)$$

โดยที่ β = ค่าความกดอัดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal compressibility)
 A = พื้นที่หน้าตัดขวาง
 V_1 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านบนของตัวอย่าง
 V_2 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านใต้ของตัวอย่าง
 L = ความยาวของตัวอย่างหิน

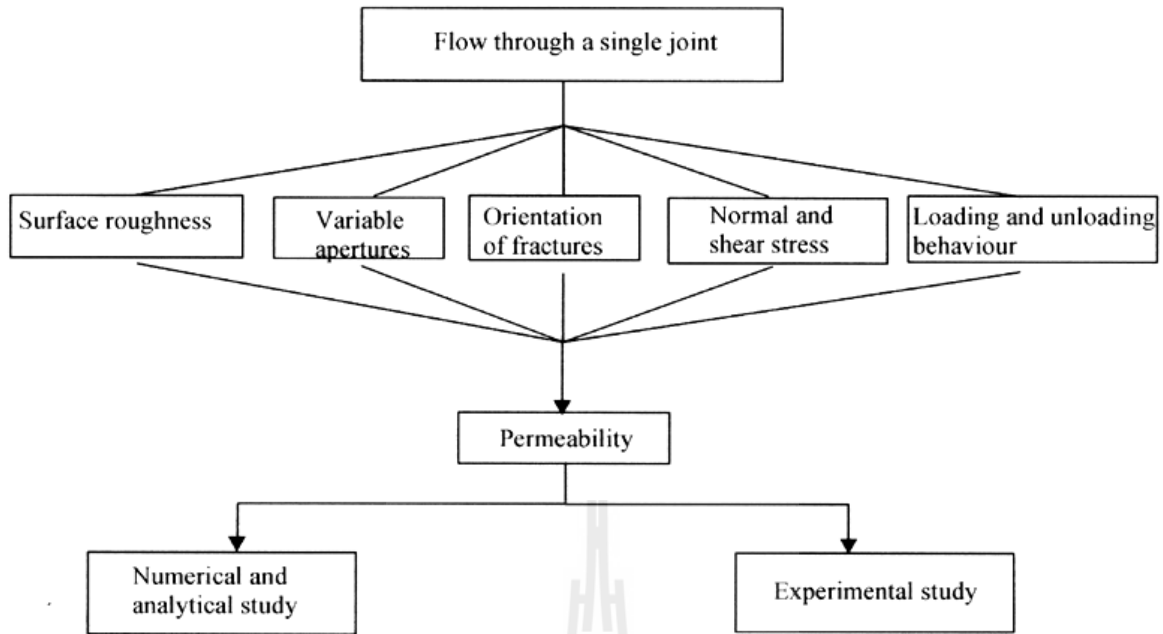
Gangi (1978) ได้พัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อหาผลกระทบของความดันรอบด้าน (Confining pressure) ต่อค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน โดยสมมติให้หินที่มีรูพรุนอันเกิดจากการอัดตัวมีเม็ดหินเป็นทรงกลม ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องว่างตามทฤษฎีของ Hertz ได้สมการดังนี้

$$k_m = k_0 [1 - C_0 ((\sigma_c + \sigma_i) / p_0)^{2/3.4}] \quad (2.6)$$

โดยที่ k_0 = ความซึมผ่านเริ่มต้น
 σ_c = ความดันรอบด้าน
 σ_i = ความดันสมมูลที่เกิดจากการประสานและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร
 p_0 = ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นประสิทธิผล (Effective elastic modulus) ของเกรน

2) การคำนวณความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว

Indraratna and Ranjith (2001) กล่าวว่า ปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยว คือ ความขรุขระของผิวรอยแตก การเปิดเผย ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนัก (รูปที่ 2.4) นอกเหนือจากปัจจัยเหล่านี้แล้ว ขนาดของการเปิดเผยก็เป็นปัจจัยหลักซึ่งเป็นส่วนประกอบของความเค้นภายนอก ความดันของไหล และคุณสมบัติทางด้านรูปร่างของแนวแตก ดังนั้นสมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวจะเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ



รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่ควบคุมค่าความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$k = e^2/12 \quad (2.7)$$

โดยที่ k = ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว
 e = ความเปิดเผยของแนวแตก

ความเปิดเผยของแนวแตกจะขึ้นอยู่กับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่มากระทำบนแนวแตก สมมติให้เนื้อหินมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ตาม Hooke's law ความสัมพันธ์ของการเปิดเผยและความเค้นจะเป็นดังนี้

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

โดยที่ e_0 = การเปิดเผยเริ่มต้นของแนวแตก
 δe = การเปลี่ยนแปลงของการเปิดเผยที่เกิดจากความเค้น (ทั้งความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน) ที่มากระทำต่อแนวแตก

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

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

โดยที่
 K_n = ความแรงตั้งฉากของรอยแตก
 σ_z = ความเค้นในแกนตั้ง
 σ_h = ความเค้นในแกนนอน
 β = มุมการวางตัวของรอยแตก

ถ้าพิจารณาค่าความดันน้ำที่กระทำแบบตั้งฉากกับผิวของรอยแตก สมการที่ (2.9) จะเปลี่ยนเป็น

$$\delta e_n = 1 / K_n [\sigma_z \cos\beta - \sigma_h \sin\beta - p_w] \quad (2.10)$$

โดยที่ p_w = ความดันน้ำภายในรอยแตก

เมื่อรวมสมการที่ (2.7), (2.8) และ (2.9) จะได้สมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวสำหรับแนวแตกที่เป็นแผ่นเรียบซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากไม่ซับซ้อนและเชื่อถือได้ดังนี้

$$k = (e_0 + \delta e_n)^2 / 12 \quad (2.11)$$

Detoumay (1980) ได้แนะนำความสัมพันธ์ที่จะอธิบายค่าความซึมผ่านในรอยแตกโดยพื้นฐานของความเปิดเผยไฮดรอลิกเริ่มต้นและความชิดกันของแนวแตกดังนี้

$$k = e_0^2 (1 - v/v_0)^2 / 12 \quad (2.12)$$

โดยที่
 e_0 = ความเปิดเผยไฮดรอลิกเริ่มต้นที่ความเค้นเป็นศูนย์
 v_0 = ความชิดกันของแนวแตกเมื่อความเปิดเผยไฮดรอลิกมีค่าใกล้เคียงศูนย์
 v = การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทั่วไปของแนวแตก

Snow (1968a) ได้สังเกตแบบจำลองอย่างง่ายเพื่ออธิบายความผันแปรของการไหลในรอยแตกที่ตรงข้ามกับความเค้นตั้งฉากคือ

$$k = k_0 + K_n(e^2/s)(\sigma_z - \sigma_0) \quad (2.13)$$

โดยที่ k_0 = ความซึมผ่านเริ่มต้นของรอยแตกที่ความเค้นตั้งฉากเริ่มต้น (σ_0)
 K_n = ความแกร่งตั้งฉาก
 s = ความกว้างของรอยแตก
 e = ความเปิดเผยอไฮโดรลิก

Jones (1975) ได้แนะนำความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความซึมผ่านในรอยแตกและความเค้นตั้งฉากดังนี้

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

โดยที่ σ_{ch} = ความดันสมานรอบด้าน (Confining healing pressure) ที่มีความซึมผ่านเป็นศูนย์
 σ_c = ความเค้นประสิทธิผลรอบด้าน
 c_0 = ค่าคงที่ที่ขึ้นกับผิวของรอยแตกและการเปิดเผยอแรกเริ่ม

Nelson (1975) ได้เสนอความสัมพันธ์อย่างง่ายสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายดังนี้

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

โดย A, B และ m เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ ค่าคงที่นี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของหิน สำหรับหินชนิดเดียวกันจะขึ้นอยู่กับสภาพของผิวรอยแตก โดย Nelson (1975) ได้เสนอค่าบางค่าไว้ดังตารางที่ 2.1

Gangi (1978) ได้จำลองผิวของหินให้เหมือนกับเตียงตะปูและได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกที่ขึ้นกับความดันรอบด้านดังนี้

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

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

โดยที่ P_1 = ความยืดหยุ่นประสิทธิผลของความขรุขระ
 m = ค่าคงที่ซึ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ขึ้นกับความยาวของความขรุขระ

สมการนี้จะให้ผลดีก็ต่อเมื่อไม่คิดผลกระทบต่อการไหลที่เกิดจากความขรุขระของผิวรอยแตก ซึ่งไม่สมเหตุ-สมผลในทางปฏิบัติ

Walsh (1981) พิจารณาผลกระทบของความขรุขระของผิวรอยแตกและได้สมการความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยวที่ขึ้นกับความดันรอบด้านดังนี้

$$k = k_0 \left[1 - \left(\frac{2h \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_p}}{a_{02}} \right)^{0.573} \right] \left[\frac{1 - b(\sigma_c - u_w)}{1 + b(\sigma_0 - u_w)} \right] \quad (2.17)$$

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

โดยที่ f = ระยะปรับแก้อัตโนมัติ
 E = สัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น
 ν = อัตราส่วนปัวซอง
 h = รากที่สองของความสูงในการกระจายตัวของผิวรอยแตก
 k_0 = ความซึมผ่านที่ความดันรอบด้านอ้างอิง (σ_p)
 σ_c = ความดันรอบด้าน
 a_{02} = เครื่องหนึ่งของการเปิดเผยที่ความดันอ้างอิง

2.3 ความเค้นรอบอุโมงค์

การศึกษาความเค้นรอบอุโมงค์ในมวลหินมีความสำคัญ เนื่องจากการกระจายตัวของความเค้นรอบอุโมงค์หรือหลุมเจาะสามารถเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นรอบหลุมเจาะและค่าการเปิดเพชอในรอยแตกเดี่ยว ความเค้นรอบหลุมเจาะในมวลหินเนื้อเดียวกันจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณได้จากสมการ Kirsch' solution (Brady and Brown, 1985)

$$\sigma_r = \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2.18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2.19)$$

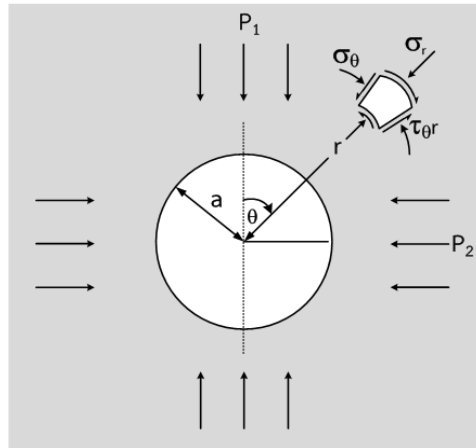
$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (2.20)$$

โดยที่

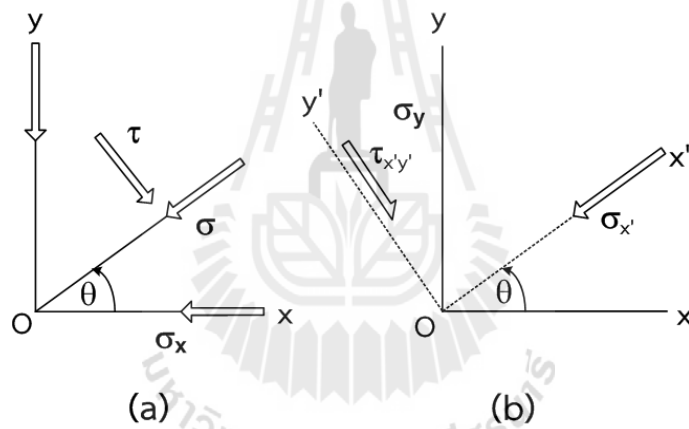
- σ_r = ความเค้นในแนวรัศมีของอุโมงค์
- σ_θ = ความเค้นในแนวตั้งฉากรัศมีของอุโมงค์
- $\tau_{r\theta}$ = ค่าความเค้นเฉือน
- P_1 = ความเค้นในแนวตั้งฉาก
- P_2 = ความเค้นในแนวระนาบ
- a = รัศมีของอุโมงค์
- r = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของวงกลม
- θ = ค่ามุมระหว่างระยะ r ทำมุมกับค่าความเค้นในแนวตั้งฉาก

ในกลศาสตร์หิน การวิเคราะห์ความเค้นในสองมิติ (σ_x , σ_y และ τ_{xy}) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าความเค้นและความเค้นเฉือนในแนวแกนใหม่ ($\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ และ $\tau_{x'y'}$) ซึ่งทำมุมใดๆ กับแนวแกนเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta + \sigma_y \sin^2 \theta \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความเค้นรอบรูวงกลม โดยความเค้นที่เกิดขึ้นอยู่ในสมมติฐานของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Hoek and Brown, 1990)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนระบบแกนหรือหมุนแกนของความเค้น (Jaeger et al., 2007)
 (a) ความเค้นในแนวแกนเดิม (b) ความเค้นในแนวแกนใหม่

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta + \sigma_y \cos^2 \theta \tag{2.22}$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \tag{2.23}$$

โดยที่ θ = ค่ามุมที่แนวแกน x และ y เปลี่ยนแปลงจากแกนเดิม

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kranz et al. (1979), Walsh (1981), Raven and Gale (1985), Singh (1997) และ Ranjith (2000) ได้ศึกษาผลกระทบของความเค้นในแนวตั้งและความดันรอบด้านที่มีผลต่อค่าความซึมผ่านโดยใช้การทดสอบในสามแกน (Triaxial test) ทุกการทดสอบให้ผลเหมือนกัน คือความเค้นมีผลต่อความซึมผ่านเป็นอย่างมาก โดยค่าความซึมผ่านในรอยแตกหินจะลดลงตามสัดส่วนของความเค้นรอบด้าน ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของความซึมผ่านในรอยแตกเรียบจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับรอยแตกที่ขรุขระ

Makurat et al. (1990) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อค่าความซึมผ่านของรอยแตกตามธรรมชาติ พบว่าค่าความซึมผ่านอาจลดลงหรือเพิ่มขึ้นในระหว่างที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Shear displacement) และศึกษาความสัมพันธ์ของแนวแตกต่อค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Joint Roughness Coefficient, JRC) โดยพบว่าเมื่อรอยแตกมีค่า JRC ต่ำจะมีค่าความซึมผ่านค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนมากขึ้น

Obcheoy et al. (2011), Akkrachattrarat et al. (2009) และ Suanprom et al. (2009) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการไหลเพื่อคำนวณหาค่าเหนียวนำชลศาสตร์ในรอยแตกของหินภายใต้ความเค้นตั้งฉากและแนวเฉือน โดยใช้ตัวอย่างหินทรายพระวิหาร (PW) หินทรายภูพาน (PP) หินทรายภูกระดึง (PK) และหินทรายเสาชั่ว (PK) โดยผลการทดสอบที่ได้บ่งชี้ว่าค่ารอยเปิดเผยอทางกายภาพและชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนภายใต้ความเค้นตั้งฉากสูง (σ_n) ค่าความซึมผ่านในรอยแตกทั้งแบบไม่มีแรงเฉือนและแบบมีแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่าคล้ายกัน ช่วงความเค้นเฉือนสูงสุด (τ_{peak}) และตกค้าง ($\tau_{residual}$) จะให้ค่าเปิดเผยอทางกายภาพ (e_p) เท่ากับ 5 ถึง 10 เท่า ของค่ารอยเปิดเผยอทางชลศาสตร์ (e_n) ค่ารอยเปิดเผยอที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่าการเหนียวนำเชิงชลศาสตร์ (K_n) ซึ่งผลจากค่ารอยเปิดเผยอทางกายภาพ (K_p) จะมีค่ามากกว่า 1 ถึง 2 ระดับ เลขยกกำลังสิบของค่ารอยเปิดเผยอทางชลศาสตร์อาจเป็นเพราะไม่ได้นำรอยเปิดเผยอทางกายภาพมาพิจารณาถึงผลกระทบของความขรุขระที่มีสาเหตุมาจากการแตกหัก ทำให้มีเส้นทางการไหลที่ยาวกว่าความซึมผ่านซึ่งมีความแตกต่างกันภายใต้ความเค้นเฉือนสูงสุด และค่าความเหนียวนำเชิงชลศาสตร์จะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นตั้งฉากมากขึ้น (อยู่ในช่วง 1.0×10^{-3} m/s และ 15×10^{-3} m/s)

บทที่ 3

การเตรียมตัวอย่างหิน

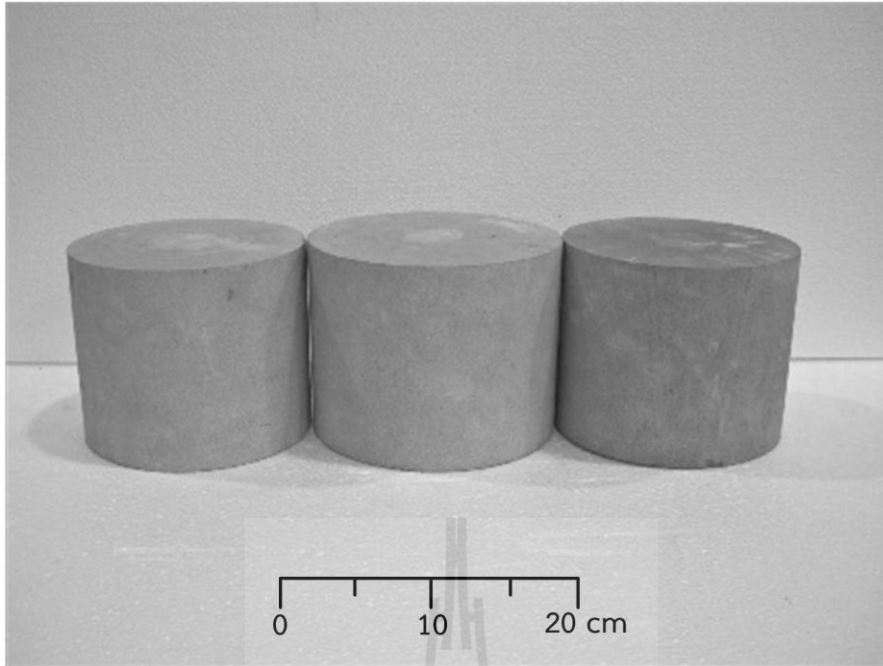
3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายการจัดเตรียมตัวอย่างหินเพื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการศึกษาความชื้นผ่านของรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะด้วยการผันแปรขนาดและทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างหิน โดยให้แรงกดในแกนเดียวและแรงดันแบบคงที่ (Constant head rest) โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดได้ทำการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

3.2 การเตรียมตัวอย่างหิน

ในการศึกษานี้ได้ใช้ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงและมีค่าความชื้นผ่านในมวลหินต่ำเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากค่าความชื้นผ่านในเนื้อหิน โดยมีวิธีการจัดเตรียมตัวอย่างดังนี้

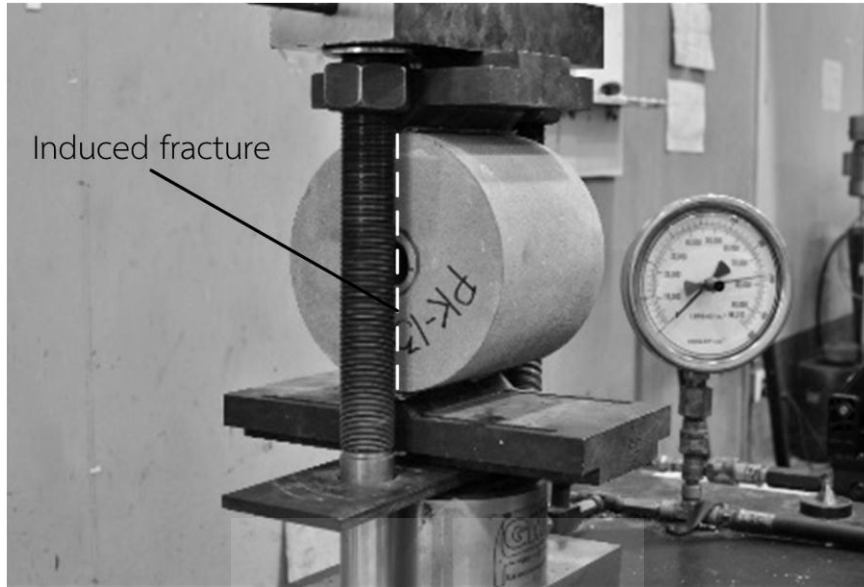
- 1) เตรียมตัวอย่างหินทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางยาว 18.5 cm สูง 15 cm จำนวน 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- 2) ทำการเจาะรูขนานกับแนวแกนของทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm เพื่อเป็นตัวแทนของหลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 3) ทำการให้แรงแบบเส้นขนานกับแนวแกนของหลุมเจาะเพื่อสร้างรอยแตกเดี่ยวให้กับตัวอย่างหิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3
- 4) อุดปลายทั้งสองข้างของหลุมเจาะด้วยจุกยางวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm หนา 0.5 cm
- 5) ทำการเจาะจุกยางด้านหนึ่งต่อเข้ากับข้อต่อทนแรงดันเพื่อใช้ในการอัดน้ำเข้าสู่รอยแตก โดยใช้กาว epoxy เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างตัวอย่างหินและจุกยาง ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 6) ทำการอุดรอยแตกที่ปลายผิวด้านบนและผิวด้านล่างของทรงกระบอกด้วยซิลิโคนเพื่อกำหนดเส้นทางการไหลให้น้ำไหลผ่านเฉพาะบริเวณพื้นที่รอยแตกที่ได้กำหนดไว้



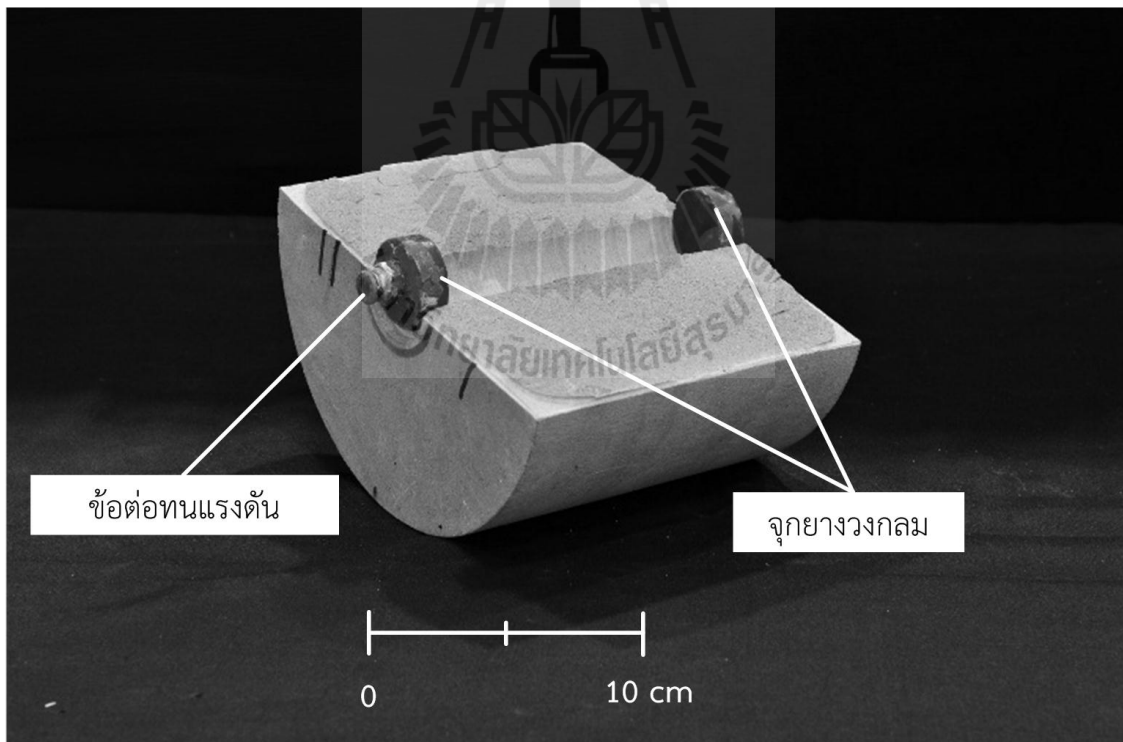
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินบางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 18.5 cm สูง 15 cm



รูปที่ 3.2 เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm ทะลุผ่านแกนกลางของตัวอย่างหินด้วยเครื่องเจาะ



รูปที่ 3.3 สร้างรอยแตกขนานกับแกนกลางของตัวอย่างหินด้วยการให้แรงแบบเส้น เพื่อใช้ในการทดสอบความซึมผ่านในรอยแตก



รูปที่ 3.4 ติดตั้งจุกยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm หนา 0.5 cm ที่บริเวณปลาย หลุมเจาะทั้งสองด้าน โดยที่จุกยางด้านหนึ่งต่อเข้ากับข้อต่อทนแรงดัน

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

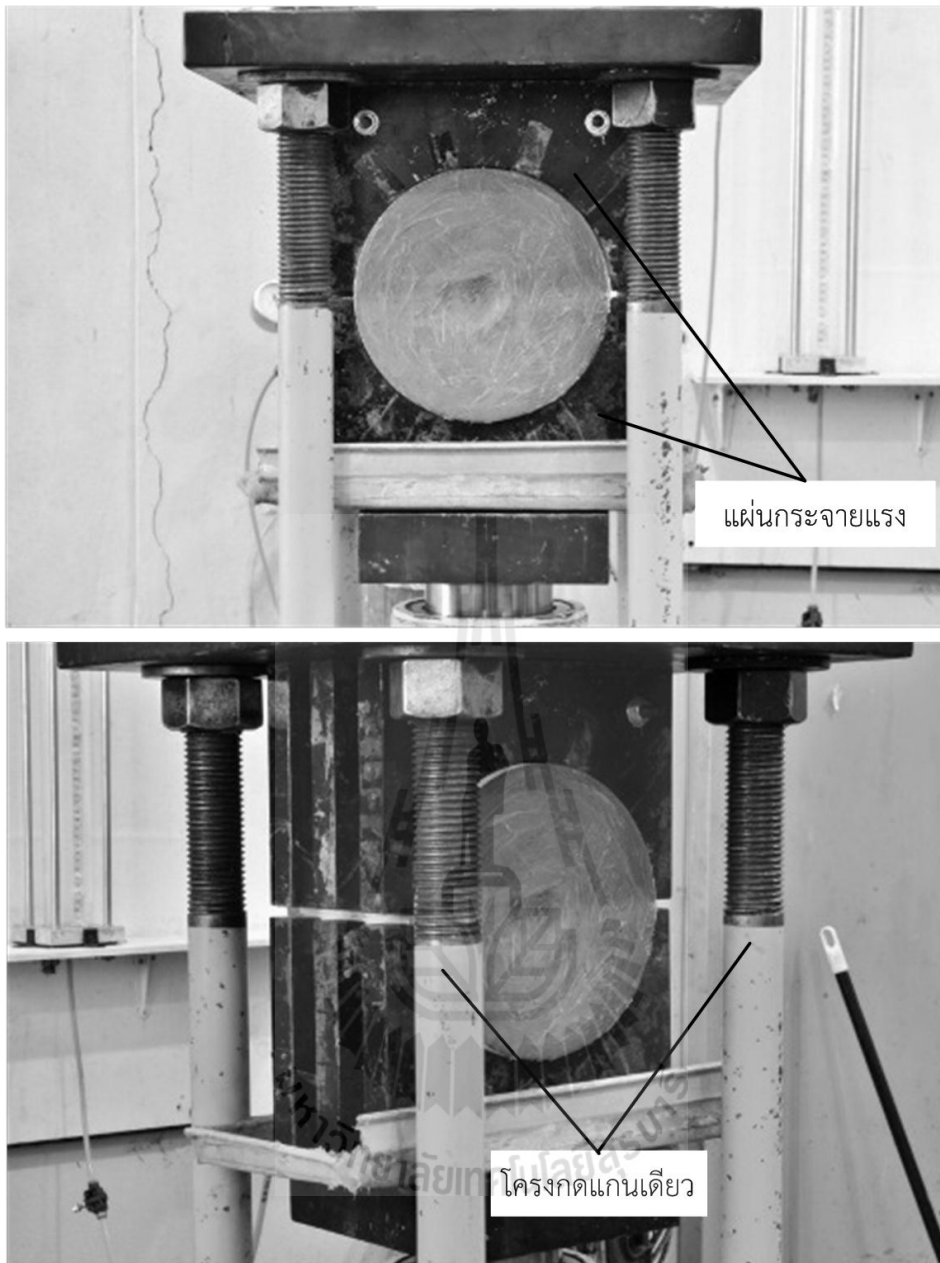
4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะด้วยการผันแปรทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างหิน โดยให้แรงในแนวตั้งและใช้แรงดันน้ำแบบคงที่ เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีและแสดงผลของการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

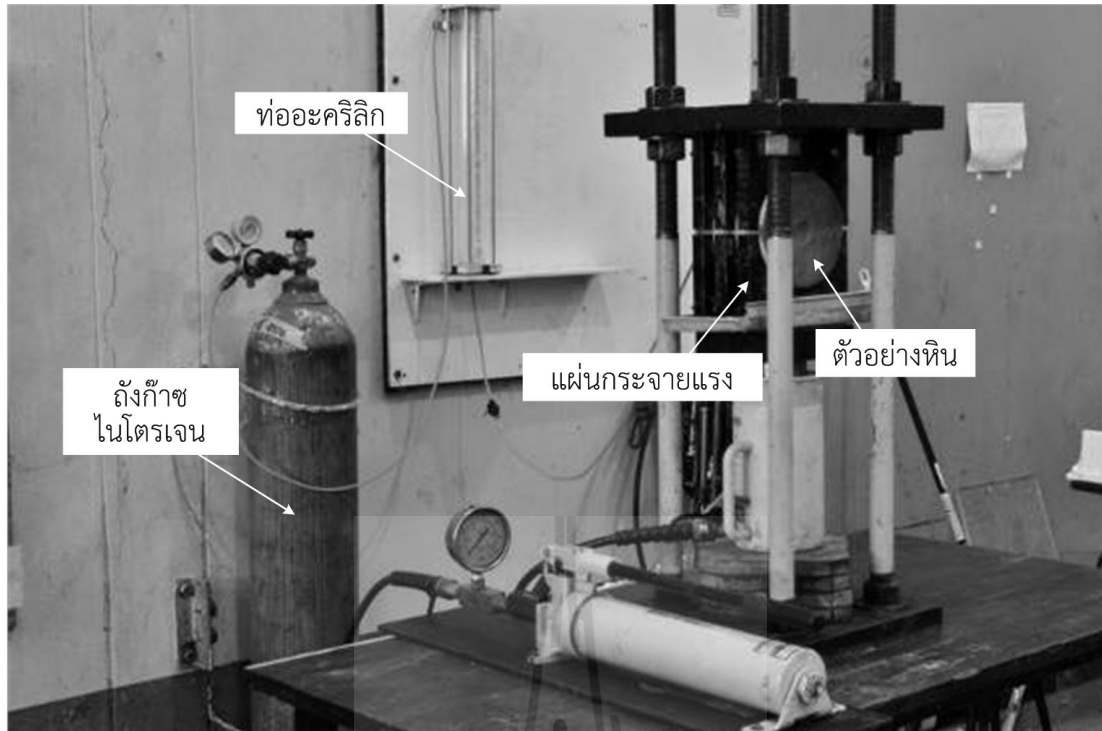
4.2 การทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก

การทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตกของหินทรายทั้งสองชนิดโดยให้แรงกดในแกนเดียวและใช้แรงดันน้ำคงที่มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ติดตั้งตัวอย่างหินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในบทที่ 3 เข้าเครื่องกดในแกนเดียว โดยทำการประกบแผ่นเหล็กกระจายแรงที่มีส่วนโค้งรับกับความโค้งของตัวอย่างหินดังแสดงในรูปที่ 4.1
- 2) ต่อสายยางทนแรงดันระหว่างข้อต่อทนแรงดันบนตัวอย่างหินและท่ออะคริลิกที่มีมาตรวัดบอกปริมาตรขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm ยาว 50 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.2
- 3) ต่อสายยางทนแรงดันระหว่างท่ออะคริลิกและวาล์วควบคุมแรงดันของถังแก๊สไนโตรเจนเพื่อใช้ในการอัดแรงดันแบบคงที่
- 4) เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในท่ออะคริลิก ชั้นฝาปิดที่ต่อกับข้อต่อทนแรงดันให้แน่นเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำและแก๊สไนโตรเจน
- 5) ทำการตั้งองศาของตัวอย่างหินให้รอยแตกทำมุมขนานกับแนวระดับ และกำหนดให้เป็นมุมเริ่มต้น ($\theta = 0$ องศา) ดังแสดงในรูปที่ 4.3
- 6) ทำการให้แรงด้วยเครื่องกดในแกนเดียวเท่ากับ 0.63 MPa จากนั้นเปิดวาล์วควบคุมน้ำและเปิดวาล์วควบคุมแรงดันของถังแก๊สไนโตรเจนให้มีแรงดันคงที่เท่ากับ 41.4 kPa
- 7) วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่ออะคริลิก 3 ครั้ง เพื่อนำค่าเฉลี่ยไปใช้คำนวณหา ค่าอัตราการไหลของน้ำ และคำนวณค่าความซึมผ่านในรอยแตก

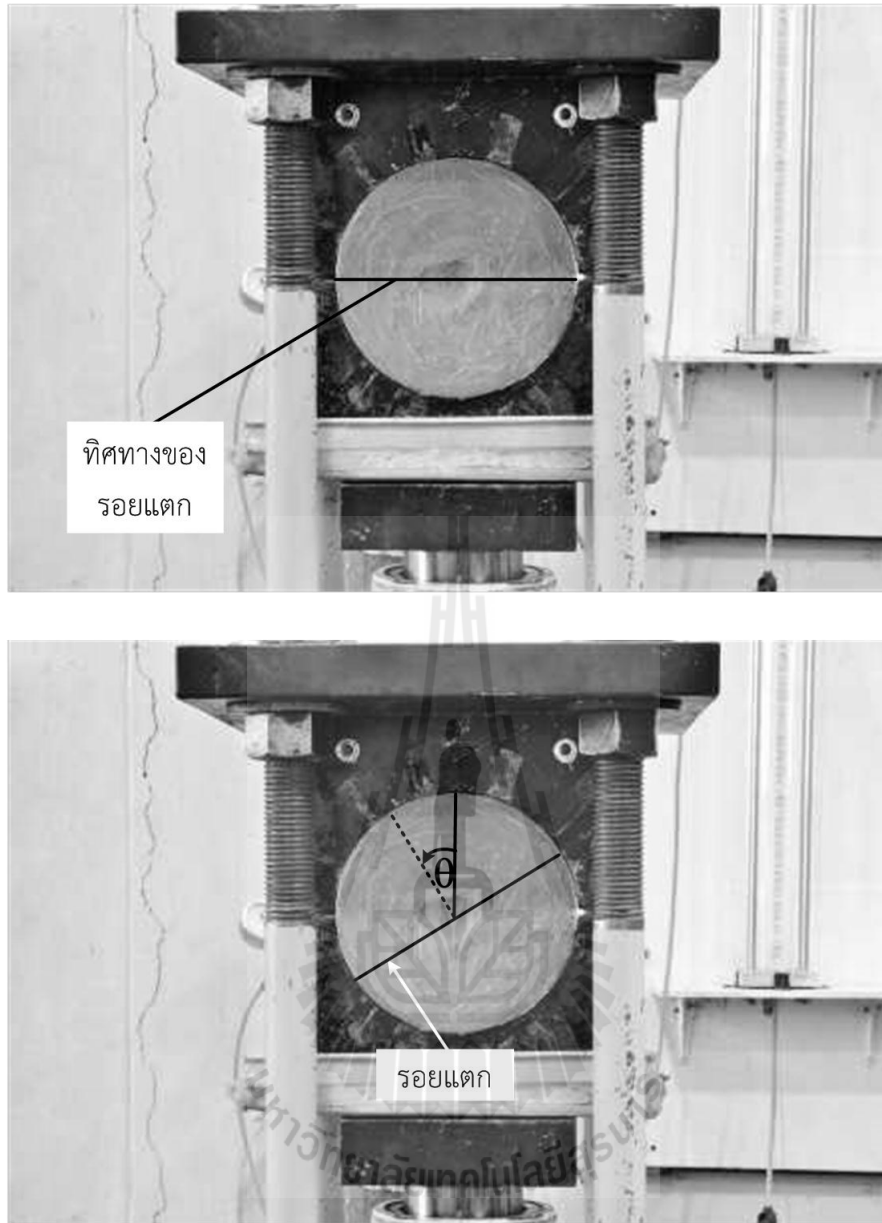


รูปที่ 4.1 ติดตั้งตัวอย่างหินเข้ากับเครื่องกดในแกนเดียว โดยประกบตัวอย่างหินเข้ากับแผ่นเหล็กกระจายแรง



รูปที่ 4.2 ติดตั้งสายยางทนแรงดันระหว่างถังก๊าซไนโตรเจนกับท่ออะคริลิก และต่อสายยางทนแรงดันระหว่างท่ออะคริลิกกับตัวอย่างหิน





รูปที่ 4.3 (บน) รอยแตกของตัวอย่างหินวงตัวอยู่ในระนาบเริ่มต้นหรือที่ 0 องศา
(ล่าง) รอยแตกวางตัวอยู่ที่มุมใดๆ โดยทำการวัดค่ามุมจากแนวตั้ง

- 8) ปิดวาล์วควบคุมน้ำ ปลดแรงในแนวตั้งเพื่อเป็นการปิดระบบ จากนั้นเติมน้ำบริสุทธิ์ลงในท่ออะคริลิกและขันฝาปิดที่ต่อกับข้อต่อทวนแรงดันให้แน่น
- 9) ทำตามขั้นตอนที่ 6-8 โดยผันแปรมุม (θ) เพิ่มขึ้นครั้งละ 15 องศา จนครบหนึ่งรอบการทดสอบ (0-360 องศา)
- 10) ทำตามขั้นตอนที่ 7-9 โดยผันแปรแรงกดในแกนเดียว เป็น 1.24 MPa และ 1.85 MPa ในแต่ละตัวอย่างทดสอบ
- 11) ทำซ้ำทุกขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นในแต่ละตัวอย่างทดสอบ

4.3 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านในรอยแตก

ผลการทดสอบความเปิดเผยอในรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะในทิศทางใดๆ ที่รอยแตกกระทำกับแรงกดในแกนเดียวสามารถคำนวณได้จาก Equivalent cubic law aperture และสมการความซึมผ่าน Indraratna and Ranjith (2001) ในสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) โดยแสดงค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันมุมที่ความเค้นกระทำต่อรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7

$$e_c = \left[\frac{12q\mu}{b(dp/dx)} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

โดยที่

k = ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว

e = ความเปิดเผยอของแนวแตก

μ = ความหนืดของน้ำ

b = ความกว้างของรอยแตก

q = อัตราการไหลของน้ำ

dp/dx = Pressure gradient ตามความสูงของตัวอย่างหิน

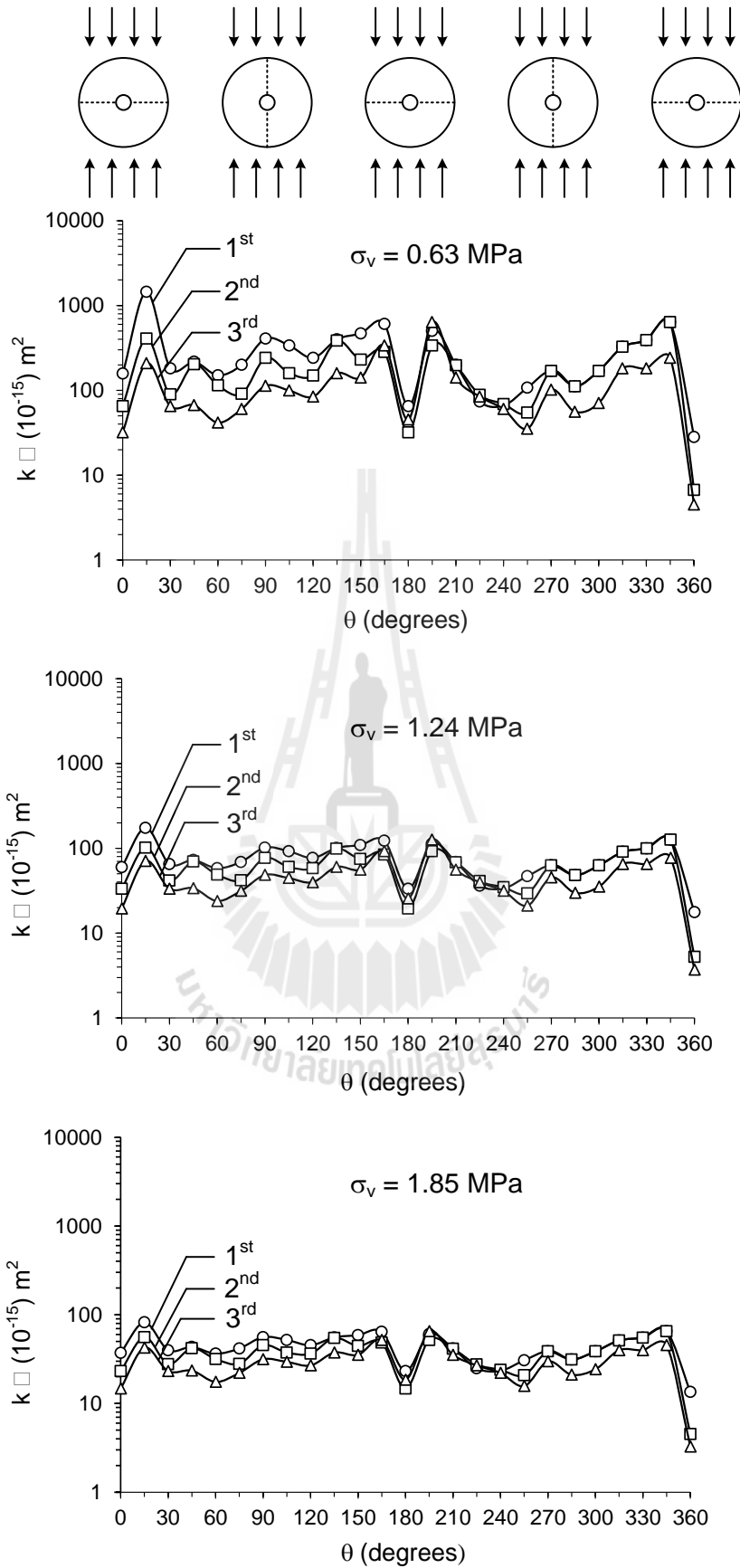
ค่าความซึมผ่านในรอยแตกสามารถหาได้จากสมการของ Indraratna and Ranjith (2001)

$$k = e^2/12 \quad (4.2)$$

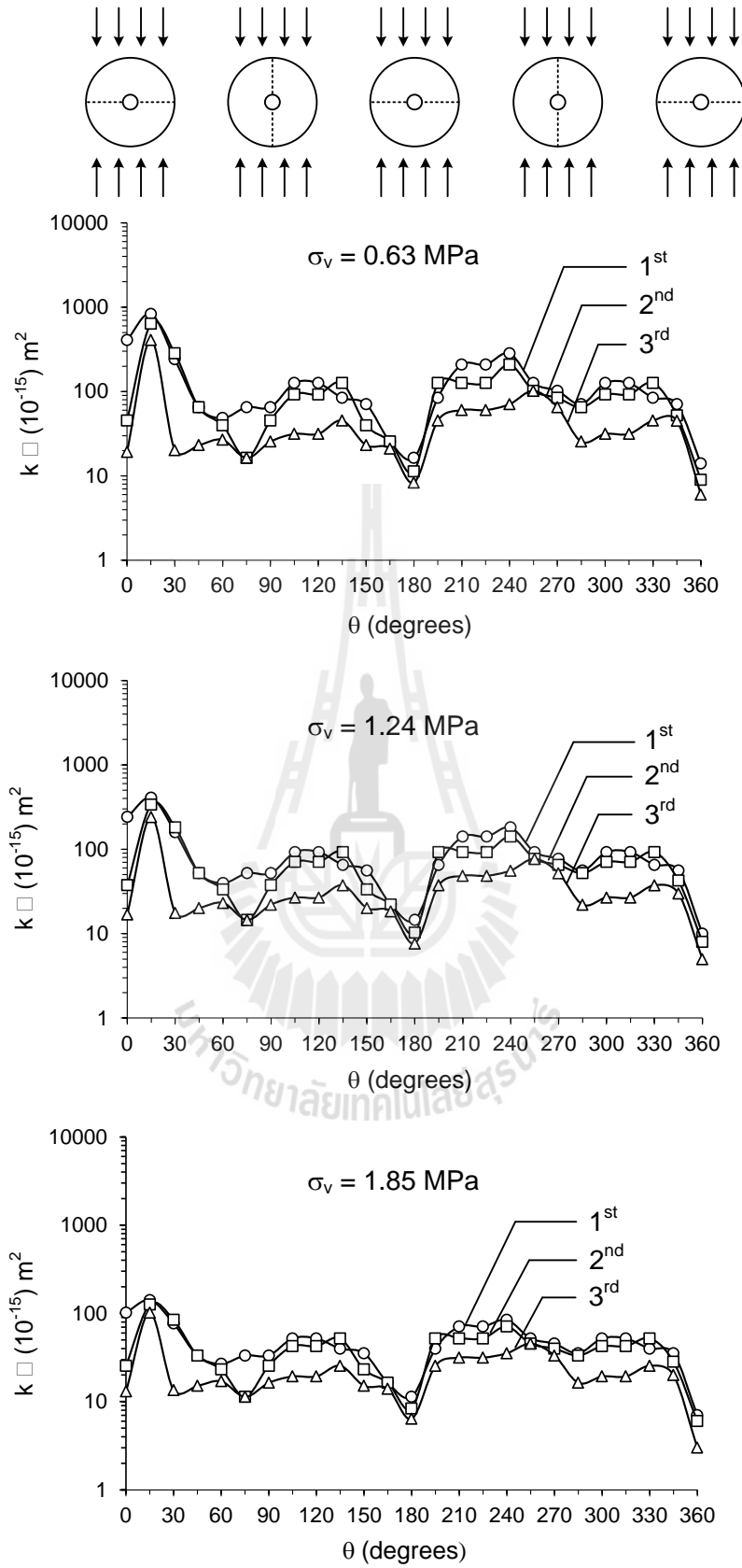
โดยที่

k = ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว

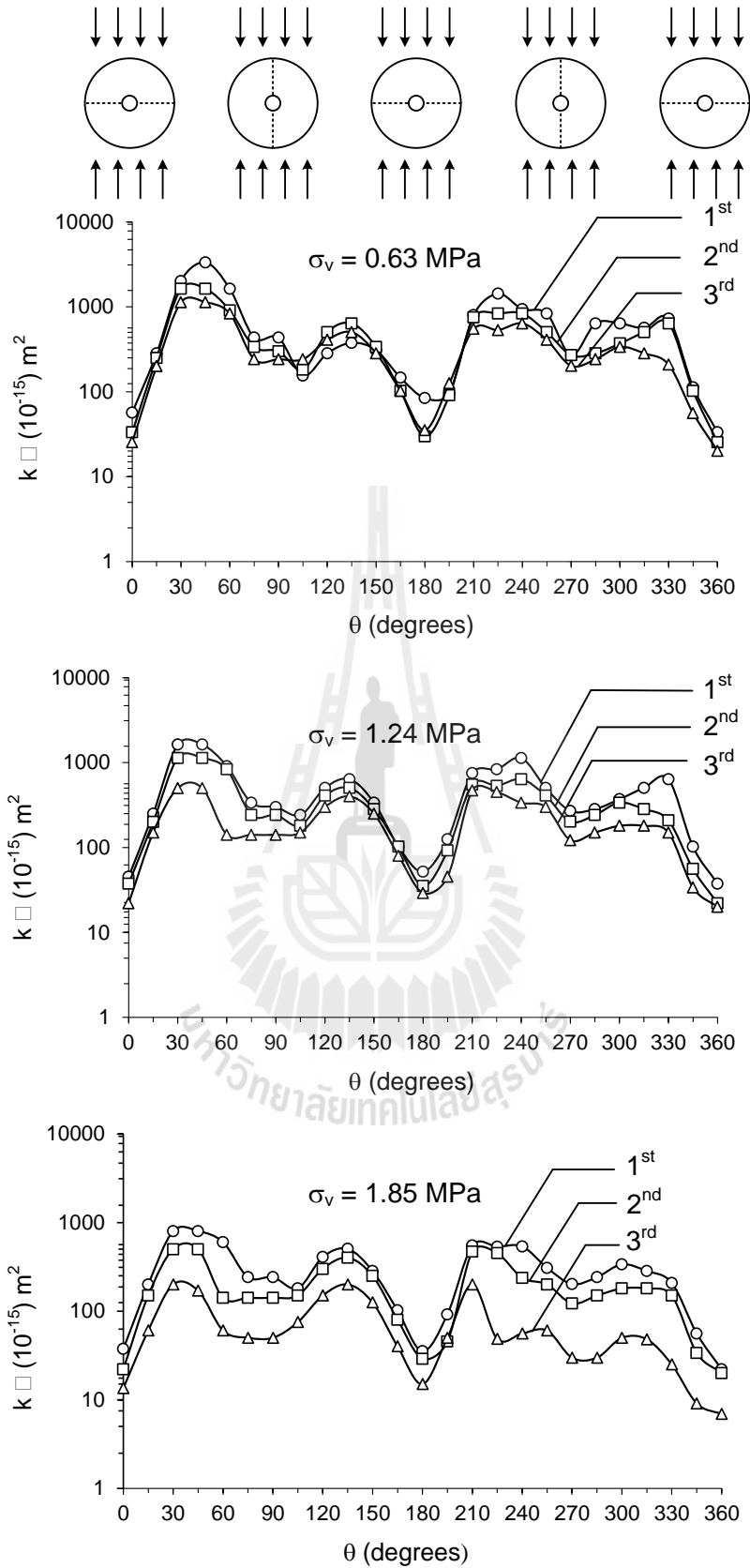
e = ความเปิดเผยอของรอยแตก



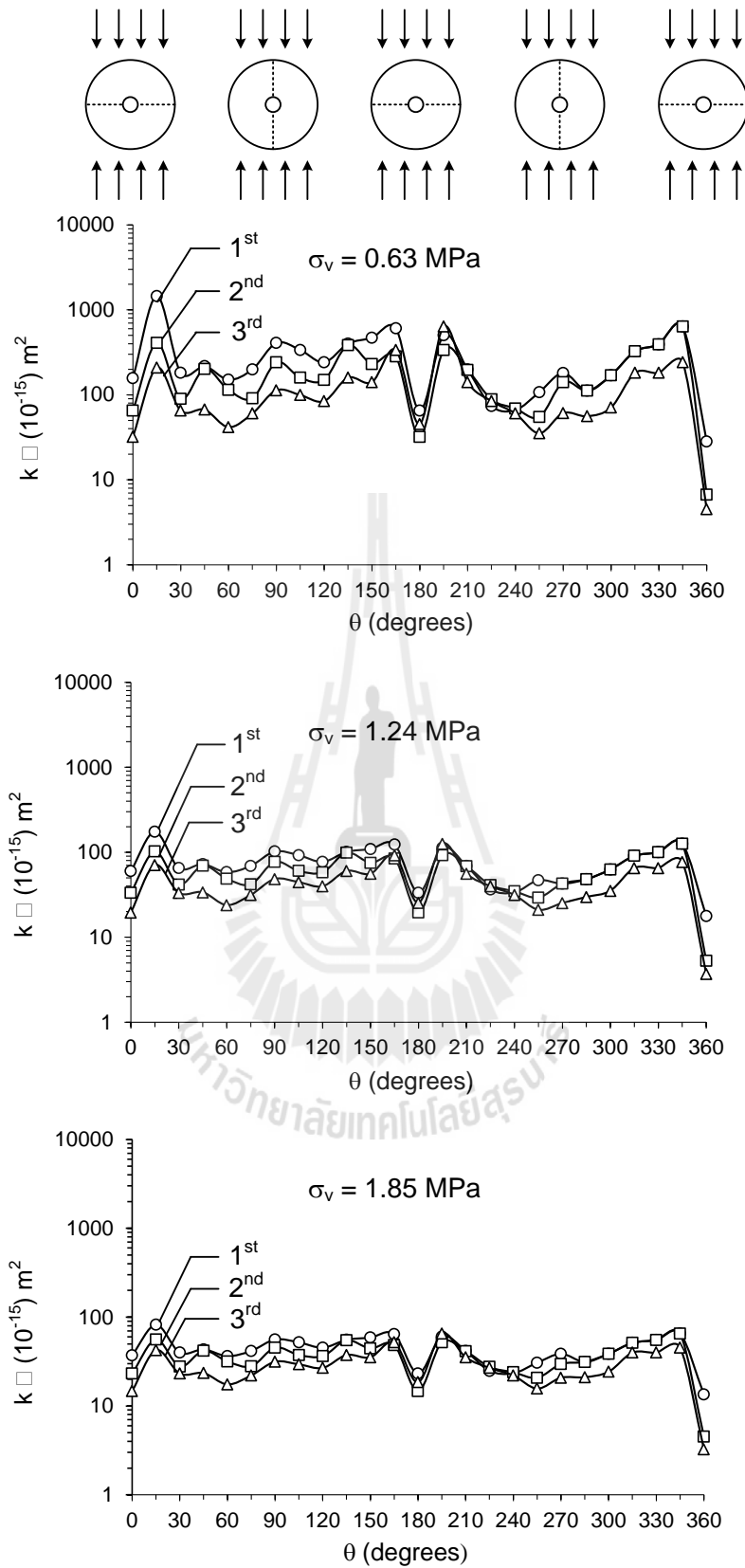
รูปที่ 4.4 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางของการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-01



รูปที่ 4.5 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-02



รูปที่ 4.6 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-03



รูปที่ 4.7 ค่าความซึมผ่านในรอยแตกในฟังก์ชันทิศทางการวางตัวของรอยแตก โดยให้ความเค้น 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa ของตัวอย่างหิน PKSS-04

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ข้อสรุปว่าเมื่อเพิ่มความเค้นในแนวตั้งตั้งแต่ 0.63 ถึง 1.85 MPa ความชื้นผ่านจะมีค่าลดลงประมาณ 10 เท่า ในแต่ละค่าความเค้น และเมื่อเปรียบเทียบความเค้นในแนวตั้งในแต่ละการทดสอบพบว่าเมื่อรอบการทดสอบ (วัฏจักร) มากขึ้น ค่าความชื้นผ่านจะลดลงตามลำดับ ผลการทดสอบยืนยันได้ว่าค่าความชื้นผ่านของรอยแตกภายใต้การผันแปรการวางตัวของรอยแตกเกิดจากผลกระทบของความเค้นในแนวตั้งมากและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบรอยแตก ในทางตรงข้ามค่าความเค้นในแนวรัศมีไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปิดเผยของรอยแตก



บทที่ 5

การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

5.1 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองการกระจายตัวของความเค้นด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นรอบหลุมเจาะภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้ง โดยในบทนี้ได้อธิบายตัวแปรและรูปแบบของหินที่ใช้ในการจำลอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการคำนวณแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

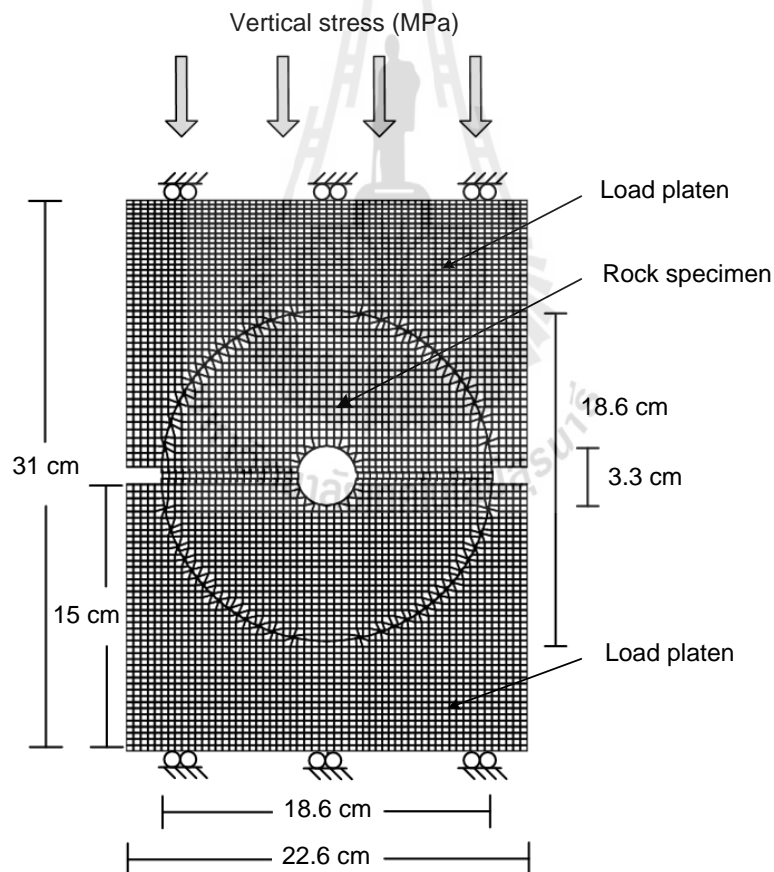
5.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง

การศึกษากการกระจายตัวของความเค้นในสภาวะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของรอยแตกภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง (vertical stress) โดยทำการจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ Finite difference analyses ด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992) ภายใต้สมมติฐานให้หินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ (Perfectly linear elastic) มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ทำการจำลองแบบความเครียดในสองแกน (Plane strain) โดยแบ่งวัสดุในการจำลองออกเป็นสองชนิดคือ หินทรายชุดภูกระดึงและแผ่นเหล็กกระจายแรง โดยหินทรายมีความหนาแน่นเท่ากับ $2,700 \text{ kg/m}^3$ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงเท่ากับ 7.7 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.38 ความเค้นยึดติดเท่ากับ 19 MPa มุมเสียดทานภายในเท่ากับ 50 องศา และมุมยกกระดกเท่ากับ 25 องศา แผ่นเหล็กมีความหนาแน่นเท่ากับ $7,750 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงเท่ากับ 200 GPa และอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3 ดังได้แสดงค่าคุณสมบัติไว้ในตารางที่ 5.1 ความเค้นในแนวตั้ง (σ_v) เท่ากับ 1.85 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ และมุมที่ใช้ในการสังเกตการกระจายตัวของความเค้นคือมุม $0, 45$ และ 90 องศา

รูปแบบการจำลองประกอบด้วยแผ่นเหล็กกระจายแรงด้านบนและด้านล่างกว้าง 22.6 cm รัศมีความโค้งเท่ากับ 9.3 cm และตัวอย่างหินทรายรูปทรงระบอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.6 cm มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 cm ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ผลการจำลองสามารถนำมาเปรียบเทียบและเชื่อมความสัมพันธ์กับค่าความซึมผ่านในรอยแตกที่ได้ทำการทดสอบในบทที่ 3

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกลศาสตร์ของหินทรายชุดภูพานและแผ่นเหล็กจากการศึกษาของ Walsri และคณะ (2009)

Mechanical properties	PK sandstone	Steel
Density (kg/m^3)	2700	7750
Elastic Modulus (GPa)	7.7	200
Poisson's Ratio	0.38	0.3
Cohesion (MPa)	19	-
Tension (MPa)	8.7	-
Internal Friction Angle (degrees)	50	-
Dilation Angle (degrees)	25	-



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของ Finite difference mesh ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 จากการวิเคราะห์แบบ plane strain โดยแบบจำลองมีความสูง 31 cm กว้าง 22.6 cm ตัวอย่างหินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 18.6 cm เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเท่ากับ 3.3 cm

5.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้รับกับการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการให้แรงในดิ่งและการกระจายตัวของความเค้นรอบหลุมเจาะ โดยกำหนดค่าความเค้นกดในแนวตั้งเท่ากับ 0.63, 1.24 และ 1.85 MPa และมุมที่ใช้ในการสังเกตการกระจายตัวของความเค้นคือมุม 0, 45 และ 90 องศา การศึกษาผลกระทบของความเค้นที่กระทำต่อหลุมเจาะในทิศทางต่างๆ โดยกำหนดให้หลุมเจาะเป็นหินเนื้อเดียวกันและตัวอย่างหินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) ถึงสมการที่ (5.3)

$$\sigma_r = \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (5.1)$$

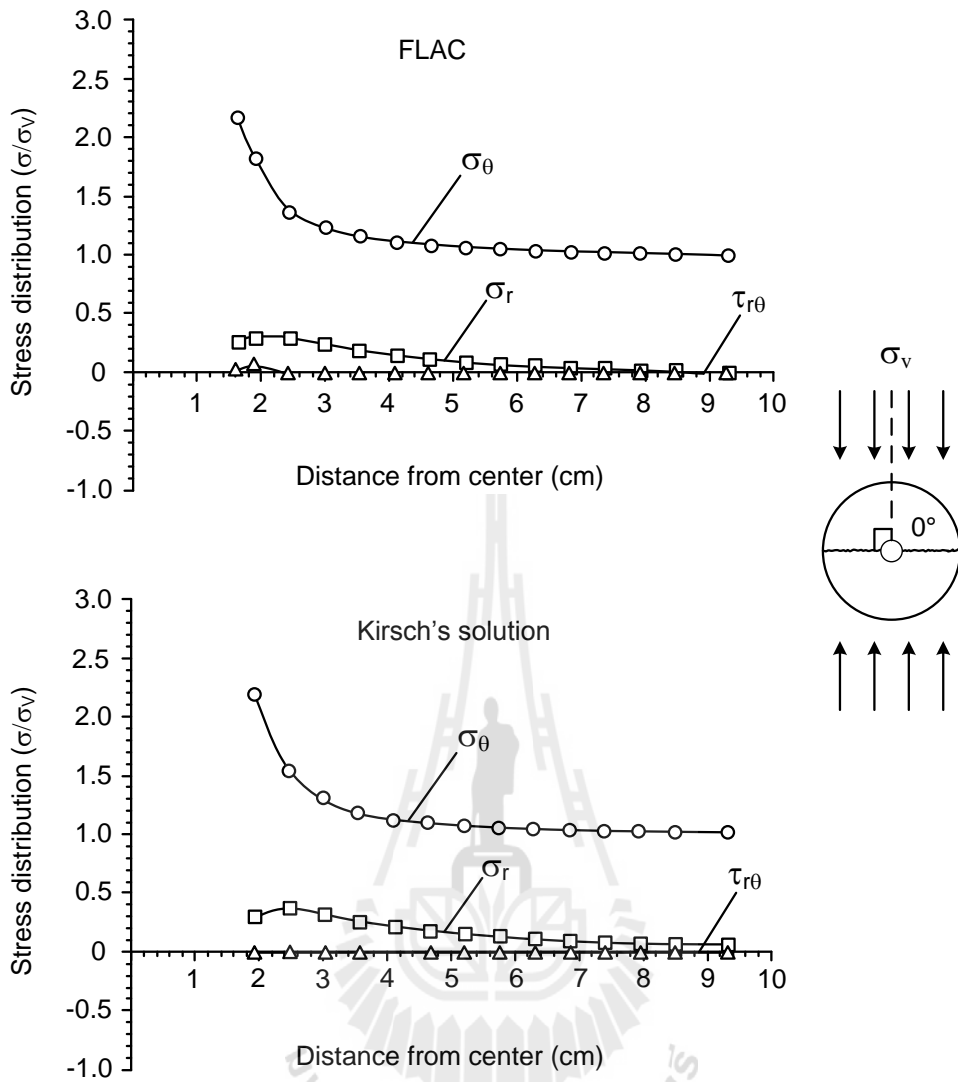
$$\sigma_\theta = \frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{P_1 - P_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (5.2)$$

$$\tau_{\theta} = -\frac{P_1 + P_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (5.3)$$

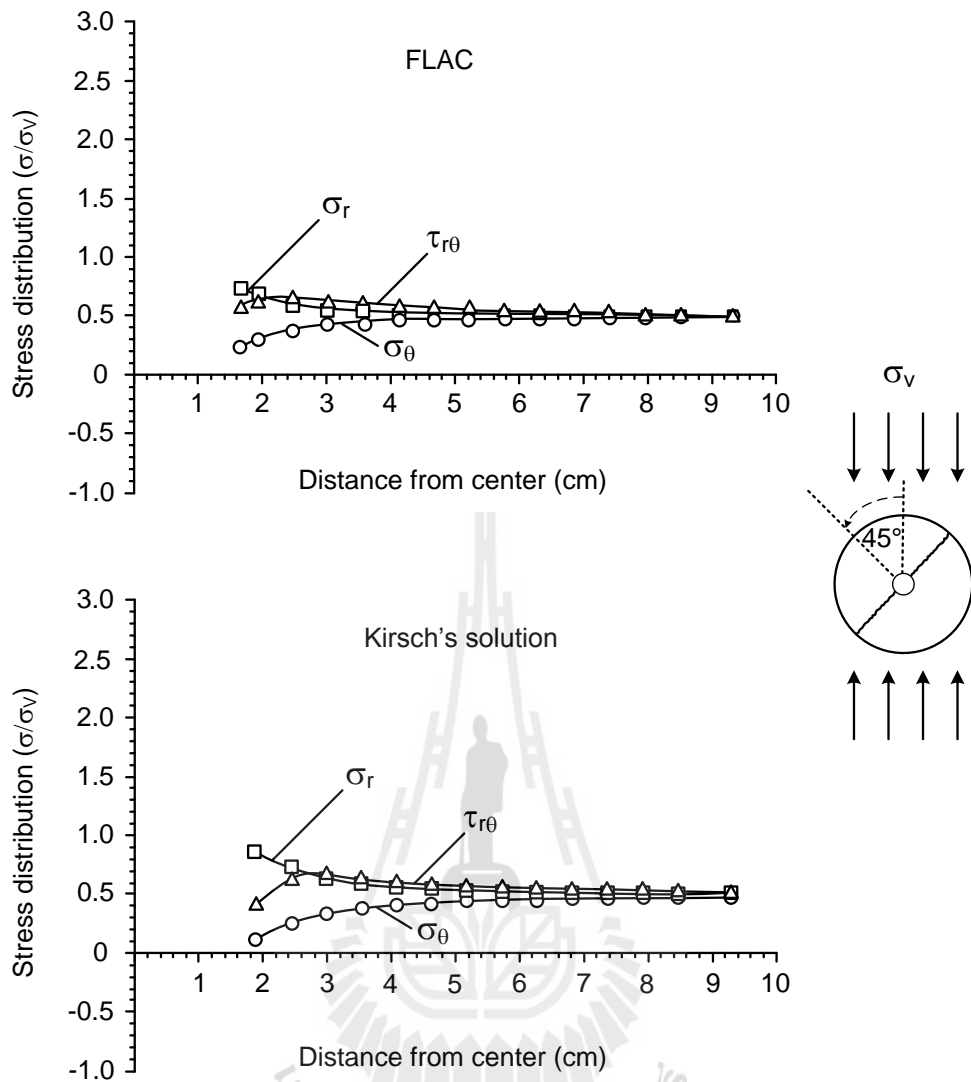
5.3 ผลการคำนวณ

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สรุปได้ว่า การกระจายตัวของความเค้นรอบหลุมเจาะมีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.4 โดยสามารถแบ่งการสังเกตออกเป็น 3 มุม ดังนี้

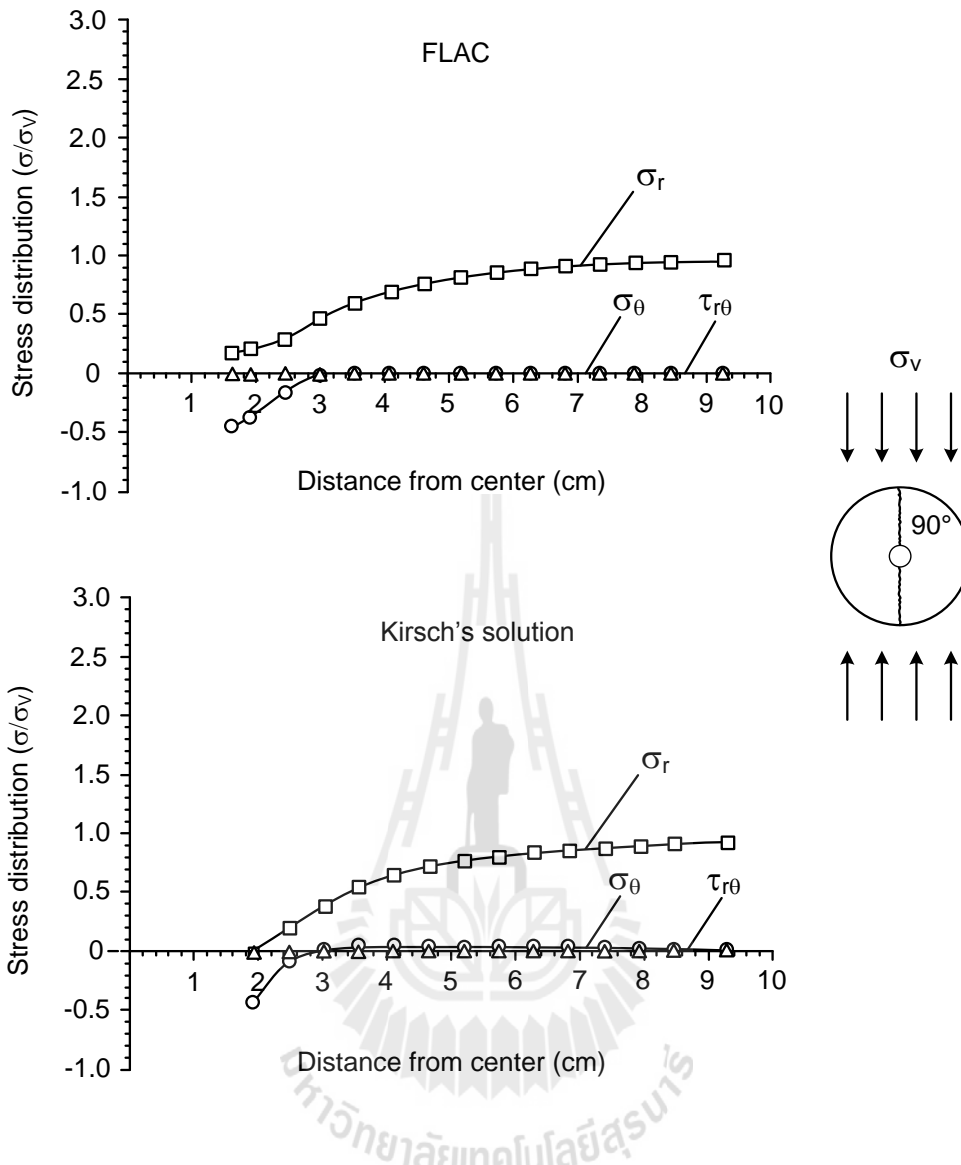
- 1) มุม 0 องศา มีการกระจายตัวของความเค้นในแนวตั้งจากลดลงแบบไฮเปอร์โบลาลตามแนวรัศมีของตัวอย่างหิน ความเค้นในแนวรัศมีมีค่า 0.4 และลดลงเข้าใกล้ 0 ไปตามแนวรัศมีของตัวอย่างหิน ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 0
- 2) มุม 45 องศา มีการกระจายตัวของความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นในแนวรัศมีต่ำกว่ามุม 0 องศา และมาบรรจบกันที่ความเค้นเท่ากับ 0.5 เป็นเส้นตรงตามแนวรัศมีของตัวอย่างหิน ความเค้นเฉือนมีค่าเริ่มต้นที่ 0.5 และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 0.7 จากนั้นมีค่าลดลงเข้าใกล้ 0.5 ตามแนวรัศมีของตัวอย่างหิน



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 0 องศา (บน) ความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ล่าง) ตามความสัมพันธ์ที่ได้จากการสมการของ Kirsch



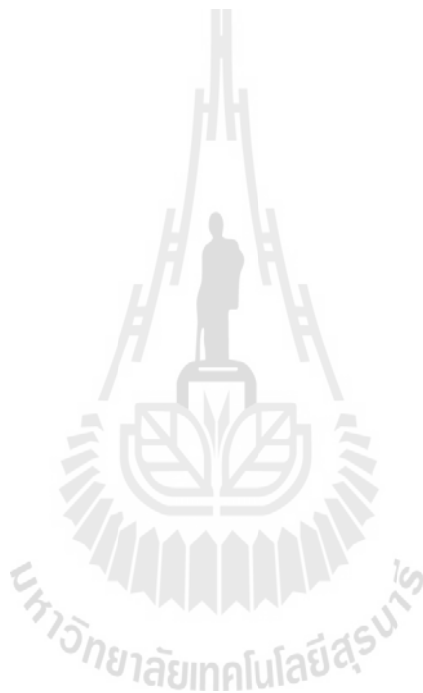
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 45 องศา (บน) ความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ล่าง) ตามความสัมพันธ์ที่ได้จากการของ Kirsch



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือน ในสภาวะความเค้นกดในแกนเดียวเท่ากับ 1.85 MPa มุมสังเกตการณ์เท่ากับ 90 องศา (บน) ความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (ล่าง) ความสัมพันธ์ที่ได้จากการของ Kirsch

- 3) มุม 90 องศา มีการกระจายตัวของความเค้นในแนวรัศมีเริ่มต้นที่ 0 เพิ่มขึ้นแบบไฮเปอร์โบลิตามแนวแกนรัศมีของตัวอย่างหิน โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.9 ความเค้นในแนวตั้งฉากมีค่าเริ่มต้นที่ -0.4 และเพิ่มขึ้นแบบไฮเปอร์โบลิตามค่าเข้าใกล้ 0 ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 0

จากผลการจำลองเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นรอบหลุมเจาะภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถนำความสอดคล้องนี้ไปใช้อธิบาย เปรียบเทียบ และยืนยันพฤติกรรมการไหลในรอยแตกได้ในบทย่อยต่อไป



บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อศึกษาความซึมผ่านของรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะด้วยการผันแปรขนาดและทิศทางของความเค้นกดในแนวตั้ง

กิจกรรมที่ได้ดำเนินการประกอบด้วย การออกแบบวิธีการทดสอบ การเตรียมตัวอย่าง การทดสอบ และการจำลองความซึมผ่านในรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะด้วยการผันแปรทิศทางขนาดและทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อรอยแตก เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยคำนวณจาก Equivalent cubic law aperture กับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันผลการทดสอบ

ผลการทดสอบระบุว่า ค่าความซึมผ่านของรอยแตกที่ตัดผ่านหลุมเจาะจะถูกควบคุมด้วยความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบรอยแตก โดยความซึมผ่านจะมีค่าต่ำเมื่อระนาบรอยแตกตั้งฉากกับความเค้นกดในแนวตั้ง ($\theta = 0, 180$ องศา) ความซึมผ่านในรอยแตกมีค่าสูงเมื่อระนาบรอยแตกขนานกับความเค้น ($\theta = 90, 270$ องศา) โดยที่ค่าความซึมผ่านในรอยแตกของแนวการวางตัวของระนาบรอยแตกทั้งสองแนวนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากความเค้นเฉือน

ผลกระทบของความเค้นเฉือนจะเริ่มส่งผลต่อค่าความซึมผ่านในรอยแตกก็ต่อเมื่อแนวรอยแตกถูกเบี่ยงเบนออกจากแนวการวางตัวของทั้งสองแนวข้างต้น โดยที่อิทธิพลของความเค้นเฉือนที่มีต่อค่าความซึมผ่านนั้นค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากความขรุขระและความต่างระดับของผิวรอยแตก ซึ่งเป็นปัจจัยที่ซับซ้อนและยากต่อการควบคุม จึงส่งผลให้ยากต่อการแปลความหมายแม้กระนั้นความเค้นเฉือนที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลทำให้ความซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแนวการวางตัวที่มุม 0 และ 90 องศา ซึ่งไม่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้น

การศึกษาและการทดสอบนี้อยู่บนสมมติฐานที่ว่าตัวอย่างหินไม่มีค่าความซึมผ่านในเนื้อหินและความเค้นในแนวรัศมีไม่มีผลกระทบต่อการไหลในรอยแตก ผลการทดสอบจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเค้นตั้งฉากมีผลกระทบโดยตรงที่จะทำให้ค่าความซึมผ่านในรอยแตกลดลงประมาณ 10 เท่า ขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของความเค้นที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ค่าความแกร่งเฉือนและค่าความแกร่งตั้งฉากของหินเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาร่วมศึกษา เนื่องจากเป็นตัวแปรในการกำหนดการเปิดเผยอเมื่อรอยแตกถูกกระทำโดยความเค้น

บรรณานุกรม

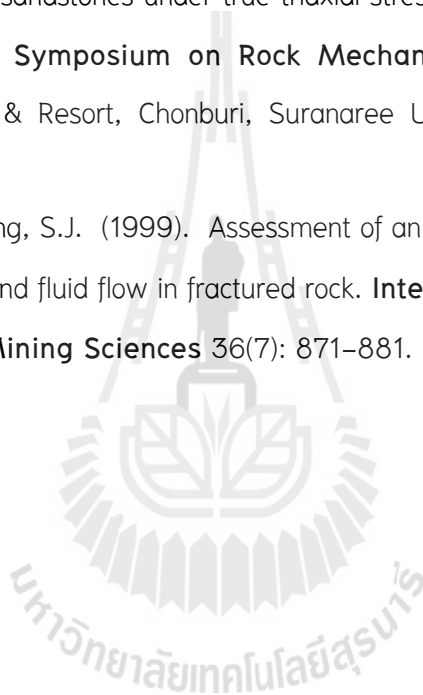
- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2552a) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหินภายใต้ความดันล้อมรอบ, รายงานวิจัย รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-35 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ทูลสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ, 101 หน้า
- Akkrachattrarat, N., Suanprom, P., Buaboocha, J. and Fuenkajorn, K. (2009). Flow testing of sandstone fractures under normal and shear stresses. In **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**. March, 12–13, Jomtien Palm Beach Hotel & Resort, Chonburi, Suranaree University of Technology, pp. 319–334.
- Auradou, A., Drazer, G., Boschan, A., Hulin, J.P. and Koplik, J. (2006). Flow channeling in a single fracture induced by shear displacement. **Geothermics**. 35(5–6): 576–588.
- 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 and 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: 249–268.
- 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.
- Barr, M. V., and Hocking, G. (1976). Borehole Structural Logging Employing a Pneumatically Inflatable Impression Packer. **Proceeding – Symposium on Exploration for Rock Engineering**, Johannesburg (pp 29–34). Rotterdam: Balkema.

- 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.
- Bates, R., and Jackson, J. A. (eds.). (1980). **Glossary of Geology** (2nd ed.). Falls Church, Va.: American Geological Institute.
- Brady, B. H. G., and Brown, E. T. (1985). **Rock Mechanics for Underground Mining** London: Chapman & Hall.
- 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.).
- 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.).
- 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.
- 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.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1990). **Underground excavations in rock**. London, UK, Institution of Mining and Metallurgy, pp. 102–106.
- Indraratna, B., and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Itasca (1992). **User Manual for FLAC–fast langrangian analysis of continua, version 4.0**. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.

- Iwai, K. (1976). **Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics**. London: Chapman & Hall.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics** (4th ed.). London: Chapman & Hall.
- 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.
- Kranz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T., and Scholz, C. H. (1979). The Permeability of Whole and Jointed Barre Granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 16: 225–334.
- Lawn, B. R., and Wilshaw, T. R. (1975). **Fracture of Brittle Solids**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lee, C.H., and Farmer, I. (1993). **Fluid Flow in Discontinuities Rocks**. London: Chapman & Hall.
- 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., Vaittinen, T.A., Vuopio, J.A. and Polla, J.P. (1997). Simulation of heterogeneous flow in a natural fracture under varying normal stress. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 34(3–4): 565.
- Obcheoy, J., Aracheeploha S., and Fuenkajorn, K. (2011). Fracture permeability under normal and shear stresses. **In Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics**. March, 10–11, Springfield@Sea Resort and Spa, Cha-am, Suranaree University of Technology, pp. 133–140.

- Pollard, D. D., and Aydin, A. (1988). Progress in Understanding Jointing Over The Past Century. **Geological Society of America Bulletin**. 100: 1181–1204.
- Pyrak-Nolte, L.J. and Morris, 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.
- Ranjith, P. G. and Viete, D. R. (2011). Applicability of the ‘cubic law’ for non-Darcian fracture flow. **Petroleum Science and Engineering**. In Press, Accepted Manuscript, Available online 7 August 2011.
- 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.
- Singh, A. B., (1997). Study of Rock Fracture by Permeability Method. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 123(7): 601–608.
- Smith, L. C., Mase, C. W. and Schwartz, F. W. (1987). Estimation of Fracture Using Hydraulic and Tracer Tests. **28th U.S. Symposium on Rock Mechanics**, University of Arizona, Tucson, June 29th to July 1st, pp. 453–463.
- 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.
- Suanprom, P., Obcheoy, J., and Fuenkajorn, K. (2009). Permeability of Rock Fractures under Shear Stresses. **EIT-JSCE Joint International Symposium Geotechnical Infrastructure Asset Management**, Bangkok, Thailand.

- Tsang, Y. W. (1992). Usage of Equivalent Apertures for Rock Fractures as Derived From Hydraulic and Tracer Tests. **Water Resour. Res.**, 28(5): 1451–1455.
- Twiss, R. J., and Moores, E. M. (1992). **Structural Geology**. New York: W. H. Freeman and Company.
- Walsh, J. B. (1981). Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 18: 429–434.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwan, R. and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses. In **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**. March, 12–13, Jomtien Palm Beach Hotel & Resort, Chonburi, Suranaree University of Technology, pp. 199–218.
- 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 Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 36(7): 871–881.



ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการทดสอบด้านกลศาสตร์หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี และเป็นสมาชิกสามัญตลอดชีพของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย

