



รหัสโครงการ SUT7-719-52-24-72

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลือหิน
โดยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

**Determination of Salt Creep Properties
by Modified Point Load Testing**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-52-24-72

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลือหิน
โดยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

**Determination of Salt Creep Properties
by Modified Point Load Testing**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพณรงค์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็องขจร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 และ 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2553

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี
งบประมาณ 2552-2553 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงาน
หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี ในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย
ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2553

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อพัฒนาการทดสอบแบบใหม่สำหรับหาค่าคุณสมบัติเชิงเวลาของเกลื่อหินในห้องปฏิบัติการ การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงเวลาของหน่วยเกลื่อหินชั้นกลางและชั้นล่างในชุดหินมหาสารคาม ตัวอย่างเกลื่อหินถูกจัดเตรียมเป็นรูปแผ่นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 มม. และ 101 มม. อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิม ต่างกันตรงหัวกดได้ถูกตัดเรียบและพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลมแทนที่จะเป็นรูปครึ่งทรงกลม หัวกดจะให้แรงกดที่ในแนวแกนของตัวอย่างหิน การยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวแกนของตัวอย่างหินจะถูกตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน หรือจนกระทั่งเกิดการแตกของหิน นอกจากนี้จะมีการทดสอบการกดแบบวัฏจักรสำหรับจุดกดแบบปรับเปลี่ยนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวด้วย เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลื่อหินภายใต้รูปแบบของการกดที่ต่างกัน ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนจะวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและการคืบของตัวอย่างเกลื่อหิน โดยสมมติว่าเกลื่อหินเหล่านั้นมีพฤติกรรมการคืบเป็นไปตามกฎของ Burgers ความน่าเชื่อถือของการทดสอบการคืบโดยใช้วิธีจุดกดแบบปรับเปลี่ยน ได้ถูกประเมิน โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดสอบการคืบในสามแกนแบบดั้งเดิม ผลจากงานวิจัยระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่วัดได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวมีค่าสอดคล้องกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงยืดหยุ่นและความหนืดเชิงพลาสติกที่วัดได้จากการทดสอบการคืบด้วยวิธีจุดกดแบบปรับเปลี่ยน มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าที่วัดได้ด้วยวิธีการทดสอบการคืบในสามแกนแบบดั้งเดิม ผลจากงานวิจัยบอกเป็นนัยว่าผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีจุดกดแบบปรับเปลี่ยนจะให้ค่าการเปลี่ยนรูปในเชิงเวลาของเกลื่อหินในภาคสนามที่สูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

Abstract

The objective of this research is to develop a new testing technique to determine the creep properties of rock salt in the laboratory. A modified point load (MPL) testing technique is proposed to assess the time-dependent properties of the Middle and Lower salt members of the Maha Sarakham formation. The salt specimens are prepared to obtain rock disk specimens with diameters of 48 and 101 mm. The test apparatus is similar to that of conventional point load test, except that the loading points are cut flat to have a circular cross-sectional area instead of a half-spherical shape. The point loading platens apply constant axial loads to the circular disk specimens. The induced axial deformation is monitored for various applied axial stresses up to 30 days or until failure occurs. Cyclic loading is also used for the MPL testing and for the uniaxial compression testing to determine the true elastic modulus of the salt under different loading configurations. Supported by the numerical simulations the MPL test results are used to determine the elastic and creep parameters of the rock salt by assuming that the salt creep behavior follows the Burgers behavior. The reliability of the MPL creep testing technique is assessed by comparing its results with those of the conventional triaxial creep testing. The results indicate that the elastic modulus obtained from the MPL cyclic loading test and the uniaxial compression tests are similar. The visco-elastic and visco-plastic coefficients obtained from the MPL creep testing are about half of those obtained from the conventional triaxial creep testing. The findings suggest that the MPL test results may predict a greater time-dependent deformation of the in-situ salt than do the conventional testing method.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	5
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	9
2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	11
2.2.1 ผลกระทบของขนาดผลึก.....	11
2.2.2 ผลกระทบของอัตราแรงกดในการทดสอบ.....	13
2.2.3 ผลกระทบของวิถีความเค้น.....	13
2.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	15
2.2.5 ผลกระทบของสิ่งเจือปนในเกลือหิน.....	16
2.2.6 ผลกระทบของขนาดตัวอย่างทดสอบ.....	16
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	19
3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	19
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	25
4.1 การทดสอบการกดแบบวัฏจักรในแกนเดียว.....	25
4.2 การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร.....	27
4.3 การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบ.....	34
4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน.....	39
บทที่ 5 การวิเคราะห์	47
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น.....	47
5.2 การสอบเทียบ.....	52
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย	59
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร	ก-1
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบแต่ละวิธี	21
4.1 สรุปผลการทดสอบแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่างหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน $L/D = 2.5$	28
4.2 สรุปผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm ที่อัตราส่วน $t/d = 2$	35
4.3 ปัจจัยการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm	40
4.4 ปัจจัยการทดสอบความคืบในแกนเดียวและสามแกนของเกลือหิน	43
5.1 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์	53
5.2 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 4 โดยใช้สมการเชิง คณิตศาสตร์	53
5.3 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC)	53
5.4 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 4 โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC)	54
5.5 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในสามแกน	56
5.6 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในแกนเดียว	57
5.7 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบในแต่ละวิธี	58

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแบบวัฏจักรในแกนเดียว โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วนความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) คงที่เท่ากับ 2.5.....	21
3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยกดแบบวัฏจักร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนา 50 mm.....	22
3.3 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยกดแบบวัฏจักร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm และมีความหนา 50 mm.....	22
3.4 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลื่อหินด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนา 50 mm.....	23
3.5 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลื่อหินด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm และมีความหนา 50 mm.....	23
3.6 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 54 mm และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.0.....	24
4.1 ตัวอย่างเกลื่อหินในขณะทดสอบแบบวัฏจักรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน L/D = 2.5.....	26
4.2 ผลการทดสอบการกดในแกนเดียวเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลื่อหิน.....	26
4.3 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 18.3 MPa.....	28
4.4 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 18.3 MPa.....	29
4.5 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 17.3 MPa.....	29
4.6 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 16.4 MPa.....	30
4.7 ค่าความเค้นกดสูงสุดในฟังก์ชันของจำนวนรอบของการกด.....	30
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบแบบวัฏจักร.....	31

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของจำนวนรอบการกดแบบวัฏจักร.....	31
4.10 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบแบบวัฏจักรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน $L/D = 2.5$	32
4.11 หัวกดแบบดั้งเดิม (Conventional) และหัวกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified) ได้ถูกพัฒนา ขึ้นเพื่อใช้ทดสอบการคืบของเกลือหินในแกนเดี่ยว.....	32
4.12 ตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด (t/d) เท่ากับ 2.....	33
4.13 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลือหิน ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm.....	33
4.14 ค่าความเค้นกดสูงสุดในฟังก์ชันของจำนวนรอบการกดระหว่างตัวอย่างเกลือหินที่มี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm กับ 101 mm.....	35
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบจุดกดแบบ ปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm..	36
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของจำนวนรอบการกดทดสอบจุดกดแบบ ปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm..	37
4.17 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm.....	38
4.18 ตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm มีความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง หัวกด (t/d) เท่ากับ 2.....	38
4.19 ผลการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างเกลือหินที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm.....	41
4.20 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm.....	42
4.21 ตัวอย่างเกลือหินที่บรรจุในหม้อแรงดันสำหรับการทดสอบการคืบในสามแกน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm.....	43
4.22 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้น ผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 35, \sigma_2 = 5, \sigma_3 = 5$ MPa.....	44

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้น ผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 39, \sigma_2 = 3, \sigma_3 = 3$ MPa.....	44
4.24 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้น ผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 40, \sigma_2 = 10, \sigma_3 = 10$ MPa..	45
4.25 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้น ผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 50, \sigma_2 = 5, \sigma_3 = 5$ MPa.....	45
4.26 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้น ผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 31, \sigma_2 = 7, \sigma_3 = 7$ MPa.....	46
4.27 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของ เวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 20$ MPa.....	46
4.28 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของ เวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 14$ MPa.....	47
4.29 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของ เวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 18$ MPa.....	47
5.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสอบเทียบ ค่าคงที่ในตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกภายใต้จุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขได้สรุปไว้ในรูปนี้ด้วย.....	50
5.2 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) ได้นำมาแสดงในฟังก์ชันของ D/d.....	50
5.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) ได้นำมาแสดงในฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น(E).....	51
5.4 เปรียบเทียบผลจากการสอบเทียบค่าคงที่ระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) กับสมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 และ 4 ตามลำดับ.....	54
5.5 การสอบเทียบค่าคงที่ที่ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 mm ซึ่งมีการผันแปรค่าความเค้นในแนวแกนและความเค้นล้อมรอบ ($[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3], \tau_{oct}$)	56
5.6 การสอบเทียบค่าคงที่ที่ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลือหิน ซึ่งมีการผันแปรความเค้น คงที่ในแนวแกนต่างๆ กัน ($[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$).....	57

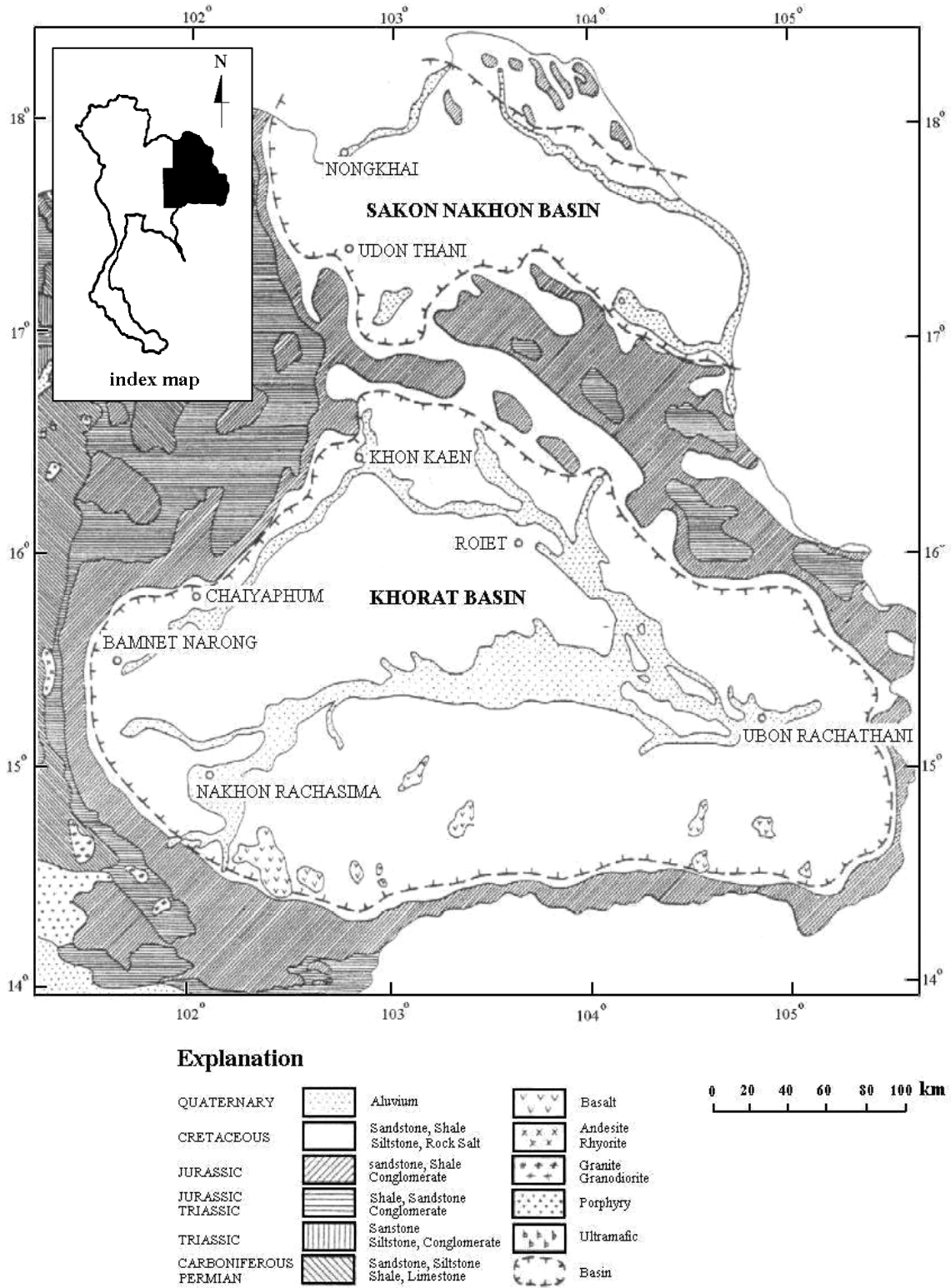
บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง (รูปที่ 1.1) เกลือหินจึงเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศอย่างหนึ่งซึ่งจะสามารถพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน อาทิ การทำเหมืองแร่โพแทชที่จังหวัดอุดรธานีและจังหวัดชัยภูมิ รวมถึงการทำเหมืองละลายโพรงเกลือที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา นอกจากนี้ยังมีการผลิตเกลือสินเธาว์โดยวิธีสูบน้ำบาดาลที่มีความเค็มขึ้นมาสกัดหรือตากแห้ง ประโยชน์อีกประการหนึ่งของชั้นเกลือหินคือสามารถนำมาใช้เป็นกากเก็บพลังงานในรูปของอากาศภายใต้แรงดัน ใช้เป็นกากเก็บของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และกากนิวเคลียร์ที่ได้มาจากโรงพยาบาลและห้องปฏิบัติการต่างๆ งานวิจัยเหล่านี้ได้ดำเนินการวิจัยอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาอย่างต่อเนื่อง (กิตติเทพ เพ็ญขจร, 2543, 2544; วารสารนิวเคลียร์ปริทัศน์, 2543)

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดในการนำเกลือขึ้นมาใช้คือการทำให้แผ่นดินทรุดในระดับที่รุนแรงซึ่งอาจเกิดจากการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดจากการออกแบบที่ใช้ฐานข้อมูลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ไม่เพียงพอหรือคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การเกิดแผ่นดินทรุดที่มีผลมาจากการทำเหมืองใต้ดินหรือการทำโพรงละลายใต้ดินในชั้นเกลือหินมีกลไกที่ซับซ้อน ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ควบคุมคือคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน ลักษณะเด่นของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ทำให้ซับซ้อนและแตกต่างจากคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินทั่วไปคือ เกลือหินมีพฤติกรรมที่หลากหลายที่เกิดขึ้นหรือที่ตอบสนองต่อแรงที่มากระทำพร้อมๆ กัน พฤติกรรมเหล่านี้คือ ความยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงพลาสติก และการวิรูปที่ขึ้นกับเวลา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการวิจัยและศึกษาในต่างประเทศอย่างหลากหลาย เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมเหล่านี้อย่างแท้จริง ได้มีการตั้งทฤษฎีและกฎเกณฑ์มากมายเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากระทำกับการวิรูปและการวิบัติของเกลือหินในสภาวะแวดล้อมต่างๆ และได้มีการตั้งมาตรฐานการทดสอบสำหรับเกลือหิน โดยเฉพาะ (ASTM D4405-1988, D4406-1998, D7070-2004) เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลจากห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการสอบเทียบ (Calibration) ค่าคงที่มากมายที่ใช้อยู่ในกฎเกณฑ์ต่างๆ อย่างไรก็ตามการทดสอบเหล่านี้จะมีราคาสูงมาก และใช้เวลาในการทดสอบสำหรับแต่ละตัวอย่างหินที่ยาวนาน โดยทั่วไปราคาของเครื่องมือและค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินที่จะใช้ในการทดสอบเชิงกลศาสตร์จะสูงกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับหินทั่วไปประมาณ 10 เท่า เป็นอย่างน้อย และอีกประการหนึ่งเวลาที่จะต้องใช้ในการทดสอบเกลือหินแต่



รูปที่ 1.1 เกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือแสดงในพื้นที่สีขาว (พิทักษ์ รัตนจรรักษ์, 2533)

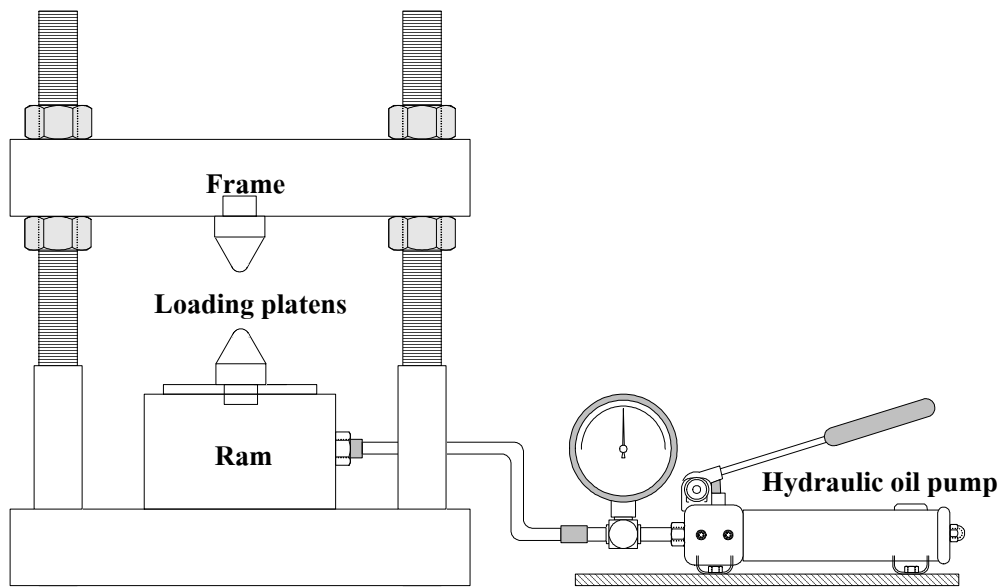
ละตัวอย่างภายใต้แรงกดที่กำหนดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความหนืด (Viscosity) ของเกลือหินจะใช้เวลาอย่างน้อย 30-60 วัน ในขณะที่การทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหินทั่วไปจะใช้เวลาเพียง 15-30 นาที เท่านั้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้การทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนของตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบอย่างมาก ซึ่งจากประสบการณ์ที่ผ่านมาข้อจำกัดนี้ส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่สามารถทดสอบตัวอย่างเกลือหินได้มากเท่าที่ควรจะทำ หรือส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินเลย ข้อบกพร่องหรือการละเลยเช่นนี้ทำให้โครงสร้างทางวิศวกรรม (โพรงหรืออุโมงค์) ในชั้นเกลือหินไม่มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เท่าที่ควรจะเป็น หรือทำให้เกิดความไม่แน่นอนหรือความไม่น่าเชื่อถือของโครงสร้างนั้น ๆ เนื่องจากโครงสร้างเหล่านั้นได้ถูกออกแบบมาจากฐานข้อมูลทางด้านคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ไม่เพียงพอ และอีกประการหนึ่งคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความแปรปรวนมากทั้งในเชิงความลึกและในเชิงพื้นที่ (นเรศ สัตยารักษ์ และคณะ, 2530; นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ ผลจันทร์, 2533; ปกรณ์ สุวานิช, 2521; สมเกียรติ จันทรมหา, 2530) ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ใช้เป็นตัวแทนอย่างแท้จริง (Representative properties) ในภาคสนามจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบจำนวนตัวอย่างเกลือหินมากมายเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้างใดๆ

จากความพยายามที่จะลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบคุณสมบัติของเกลือหิน ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาการทดสอบแบบใหม่เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของเกลือหินที่ถูกต้องและครบถ้วน โดยการนำวิธีการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified Point Load Testing, MPL) ที่ได้มีการดัดแปลงรูปร่างหน้าตัดของจุดกดมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายกลไกการเปลี่ยนรูปของเกลือหิน และเพื่อคำนวณหาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่น (Visco-elasticity) และเชิงพลาสติก (Visco-plasticity)

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการ คือ คิดค้นวิธีการทดสอบแบบใหม่ที่มีราคาถูก ได้ผลรวดเร็ว แม่นยำ และง่ายกว่าวิธีเดิม เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบหรือการเคลื่อนไหล (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นและความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน โดยใช้การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวงกว้าง สำหรับหน่วยงานของรัฐและเอกชนที่มีกิจกรรมเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นเกลือหิน เช่น การสร้างอุโมงค์หรือโพรง เหมืองเกลือหินหรือโพแทสใต้ดิน เป็นต้น ดังนั้น วิธีใหม่ที่จะนำเสนอจากผลของงานวิจัยนี้จะต้องพัฒนามาจากเครื่องมือที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เครื่องทดสอบแบบจุดกด (รูปที่ 1.2) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างจริงจัง อนึ่งการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าสามารถให้ผลที่เกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินทั่วไป



รูปที่ 1.2 เครื่องทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

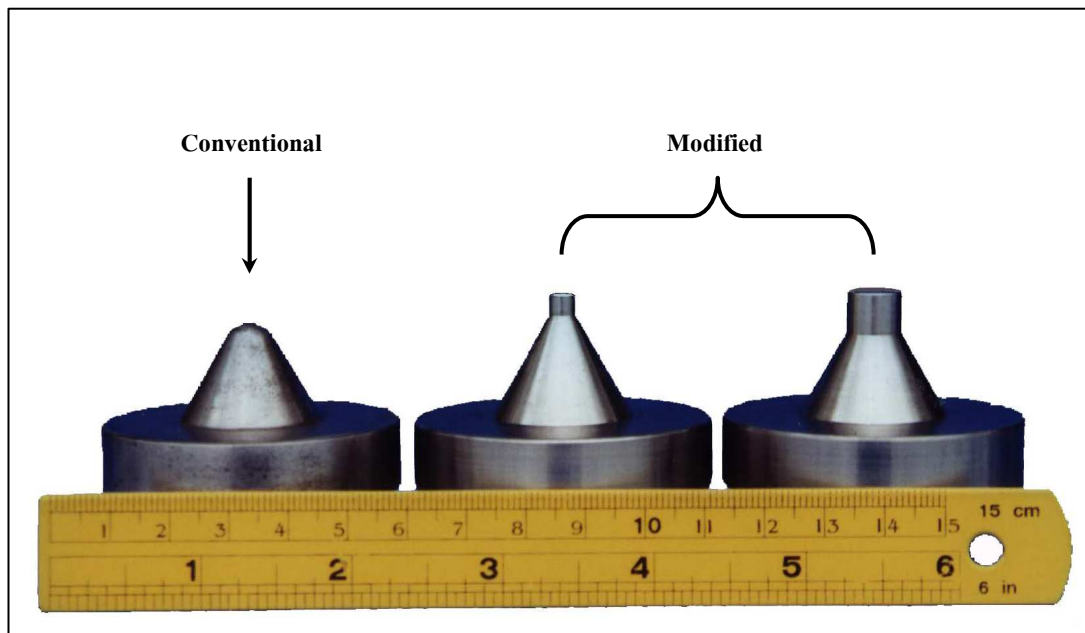
งานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับ

- 1) การทดสอบเกลือหินเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะประกอบด้วยการทดสอบการคืบ (Creep) ในสามแกน และการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน โดยแต่ละตัวอย่างจะทดสอบไม่น้อยกว่า 30 วัน เพื่อสร้างฐานข้อมูลไว้เปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบใหม่
- 2) การสอบเทียบหาคุณสมบัติของเกลือหิน งานวิจัยนี้จะไม่ครอบคลุมถึงการศึกษาวิเคราะห์และทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติของเกลือหิน กล่าวคือ การทดสอบและวิเคราะห์จะทำที่อุณหภูมิห้อง (Ambient temperature) เท่ากับอุณหภูมิห้อง
- 3) การทดสอบจะใช้เกลือหินที่มีอยู่ในประเทศไทยเท่านั้น โดยแบ่งตัวอย่างเกลือหินได้ชุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) หรือเกลือชั้นล่าง (Lower salt)
- 4) คุณสมบัติการคืบหรือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่จะศึกษาในที่นี้จะเน้นไปที่ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elasticity) และเชิงพลาสติก (Visco-plasticity) โดยจะแทนด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่กำหนดการวิรูปตามกาลเวลาในระยะยาว และความหนืดเชิงยืดหยุ่น จะนำมาศึกษาคุณสมบัติการวิรูปของเกลือหินตามกาลเวลาในระยะสั้น
- 5) จะมีการสอบทานผลการทดสอบที่ได้จากวิธีใหม่กับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิม

4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (MPL) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ได้ถูกพัฒนาและพิสูจน์แล้วว่าหัวกดแบบปรับเปลี่ยนจากหัวมน โคนมาเป็นหัวตัดเรียบสามารถคำนวณหาค่าความต้านแรงกด (Compressive Strength) ที่แม่นยำกว่าการประมาณค่าจากการทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิม (Conventional Point Load Test, CPL) อีกทั้งการทดสอบแบบ MPL สามารถคำนวณค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ของหิน ซึ่งการทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิม (CPL) ไม่สามารถทำได้ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544; Tepnarong, 2001; Fuenkajorn, 2002)

ต่อมาได้มีการพัฒนาการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนจนสามารถทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และค่ารับกำลังสูงสุดในสามแกนซึ่งแสดงอยู่ในรูปของค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction) ปรากฏว่า ได้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบมาตรฐาน ASTM (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548; Tepnarong and Fuenkajorn, 2004; Tepnarong, 2007) งานวิจัยที่กล่าวมานี้ปัจจุบันได้ถูกดำเนินการยื่นจดสิทธิบัตรตามคำขอเลขที่ 0701000199 0701000200 และ 0701000201 ไว้เมื่อวันที่ 18 มกราคม 2550



รูปที่ 1.3 หัวกดแบบดั้งเดิม (Conventional) และหัวกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified) ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น
เพื่อใช้ทดสอบหาค่าความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าความต้านแรงกดสูงสุดในสาม
แกน แรงดึงสูงสุด และแรงกดล้มประสิทธิภาพของความยืดหยุ่น

ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาการทดสอบต่อจากเดิมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของเกลือหินที่ถูกต้องและครบถ้วนในเชิงของความยืดหยุ่นและความเป็นพลาสติก ทั้งในระยะสั้น (Short Term) และระยะยาว (Long Term) การทดสอบที่ใช้หวักดแบบตัดเรียบจะนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายกลไกการเปลี่ยนรูปและการแตกของหินภายใต้ความดัน โดยจะสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรการคืบในสามแกน (Triaxial Compressive Creep Parameter) ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อหาค่าเหล่านี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงมาก แต่การทดสอบแบบใหม่ที่จะมีการพัฒนานี้มีราคาถูก และสามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างรวดเร็ว และทำให้บริษัทที่ปรึกษา บริษัทสำรวจ หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถลดต้นทุน และลดการใช้พลังงานในการทดสอบคุณสมบัติของหินที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและวิเคราะห์ได้

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบแบบใหม่นี้จะสอดคล้องกับทฤษฎีใหม่ที่ดั่งขึ้น และสามารถนำหวักดแบบปรับเปลี่ยนไปประยุกต์ใช้กับเครื่องทดสอบแบบเก่าที่มีอยู่และใช้อยู่ทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นจากการทดสอบและการขนส่งตัวอย่าง ซึ่งการประหยัดพลังงานนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง เวลา รวมไปถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ด้วย นอกจากนี้จะเป็นการแก้ปัญหาพื้นฐานหลักที่ทุกหน่วยงานที่ทำงานด้านภาคสนามต้องประสบเช่นเดียวกัน ดังนั้นการแก้ปัญหาตามข้อเสนอดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถขยายผลไปสู่หน่วยงานหรือบริษัทต่างๆ ที่มีปัญหาในลักษณะเดียวกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าการแก้ปัญหานี้จะสามารถแก้ปัญหาได้ทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ

5. หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยทันทีและง่ายต่อผู้ใช้ หน่วยงานภาครัฐที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ประกอบด้วย องค์กรที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาทรัพยากรและวิศวกรรมเกลือหิน อาทิ กรมทรัพยากรธรณี กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และองค์การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย เป็นต้น หน่วยงานภาคเอกชนประกอบด้วย บริษัทสำรวจและออกแบบ และบริษัทเหมืองแร่ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเกลือหิน ในส่วนของสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา ก็สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ศึกษาต่อ หรือนำไปปรับปรุงให้มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้ในระดับบัณฑิตศึกษา เป็นต้น

6. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยจะแบ่งเป็น 10 ขั้นตอน คือ

- 1) การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) การออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงานของเครื่องทดสอบ
- 3) การเก็บและจัดเตรียมเกลื่อหินตัวอย่าง
- 4) การศึกษาทางด้านทฤษฎีของกลไกการเปลี่ยนรูปของเกลื่อหิน
- 5) การทดลองในห้องปฏิบัติการ
- 6) การสอบเทียบหาค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง
- 7) การวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 8) การเขียนคู่มือสำหรับการใช้งาน
- 9) การสรุปผลและการเขียนรายงาน
- 10) การถ่ายทอดเทคโนโลยี

วิธีและผลการดำเนินงานตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น ได้อธิบายไว้ในบทต่อไป

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้เสนอผลสรุปที่ได้จากการทบทวนและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบหรือการเคลื่อนไหล (Creep) ที่สัมพันธ์กับความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน รวมไปถึงการศึกษากลไกการทำงานของเครื่องทดสอบทั้งแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบ โดยข้อสรุปในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาวิธีการทดสอบแบบใหม่ที่เสนอมาในโครงการวิจัยนี้

2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ผู้วิจัยหลายท่านเสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Chokski and Langdon, 1991; Munson and Wawersik, 1993) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งประเภท Alkali halides ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ Aubertin (1996) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินและสรุปว่า เกลือหินมีคุณสมบัติแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียวหรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงพลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับ Fuenkajorn and Daemen (1988), Fokker and Kenter (1994) และ Fokker (1995, 1998)

Arieli et al. (1982) ได้ทำการทดสอบเกลือหินภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C และพบว่า การเคลื่อนไหลภายในผลึก (Intracrystalline) ของ Synthetic salt (เกลือที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ) จะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation glide (การเคลื่อนตัวตามแนว cleavages) ซึ่งมีค่าความเค้นระหว่าง 10-20 MPa บริเวณจุดที่มีค่าความเค้นต่ำและมีอุณหภูมิสูง พบว่าการคืบหรือเคลื่อนไหลจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation climb (การเคลื่อนตัวตามแนวรอยต่อระหว่างผลึก) และได้มีการทดสอบในเกลือหินที่เกิดตามธรรมชาติเพื่อเข้าใจพฤติกรรมในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C โดยมีอัตราการความเครียดลดลงจาก 10^{-10} s^{-1} ที่ความดันล้อมรอบ 30 MPa การทดสอบพบว่า การเกิดการไหลที่ความเค้นต่ำกว่า 15 MPa จะมีอัตราการความเครียดต่ำกว่า 10^{-10} s^{-1} ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงการเคลื่อนไหลโดยกระบวนการ Dislocation glide และเพื่อศึกษาถึงอัตราที่ควบคุมทางด้านกลศาสตร์ Wawersik (1988) พบว่าการเกิด Cross-slip ของ Screw dislocations จะมีอัตราที่ค่อนข้างจำกัด Carter and Hansen (1983) สังเกตการเกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อหิน (Subgrain) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200°C ได้มีข้อเสนอแนะว่ากระบวนการ Dislocation climb จะเป็นตัวควบคุมอัตราในช่วงนี้ การทดสอบทางด้านแรงกดและ

แรงดึงกับ Synthetic salt พบว่าเมื่อมีแรงกดในแนว [001] ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ผลึกจะแสดงพฤติกรรมเป็น 3 ช่วง การแข็งตัว (Work hardening behavior) เมื่อเกิดการเลื่อนใน Single {110}<110> system จะเกิดใน Stage I ส่วนใน Stage II จะเกิดการ Hardening เนื่องจาก Second {110}<110> System ในขณะที่ Stage III จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดโดย Cross-slip ซึ่งผลึกเดี่ยวจะแสดงการไหลที่ความเค้นต่ำกว่าผลึกชุด (Polycrystal) เนื่องจากยังมีการกระตุ้นจากการเลื่อนอยู่และไม่มีผลกระทบจาก Hardening และทิศทางของการกระจายตัว (Skrotzki and Haasen, 1988)

Jeremic (1994) พิจารณาลักษณะทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยแบ่งเป็นสามลักษณะคือ พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงพลาสติก (Elastic and plastic behavior) และพฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) โดยพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการแตกแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับความเครียดเชิงยืดหยุ่นและสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ ปกติแล้วเกลือหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าหินอื่นๆ ในส่วนของพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว (yield stress) การเปลี่ยนรูปเมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิมหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วขณะเท่านั้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อให้แรงกดที่สูงขึ้นเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือ ความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดก็จะวิบัติ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะพิจารณาแยกกัน ซึ่งเกลือหินจะแสดงคุณสมบัติทั้งทางด้านความเครียดแบบยืดหยุ่นและความเครียดแบบพลาสติก ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นและพฤติกรรมเชิงพลาสติกคือ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นชั่วคราว (สามารถคืนตัวได้) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างถาวร (ไม่สามารถคืนตัวได้) ระดับของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเครียดแบบพลาสติกกับความเครียดทั้งหมด การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติกสามารถสังเกตได้จากแรงกดในระยะสั้น (Short term loading) แต่ต้องมีขนาดของแรงกดสูงมาก ซึ่งพฤติกรรมเชิงพลาสติกของเกลือหินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินจะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะวิบัติ การเปลี่ยนแปลงรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียว

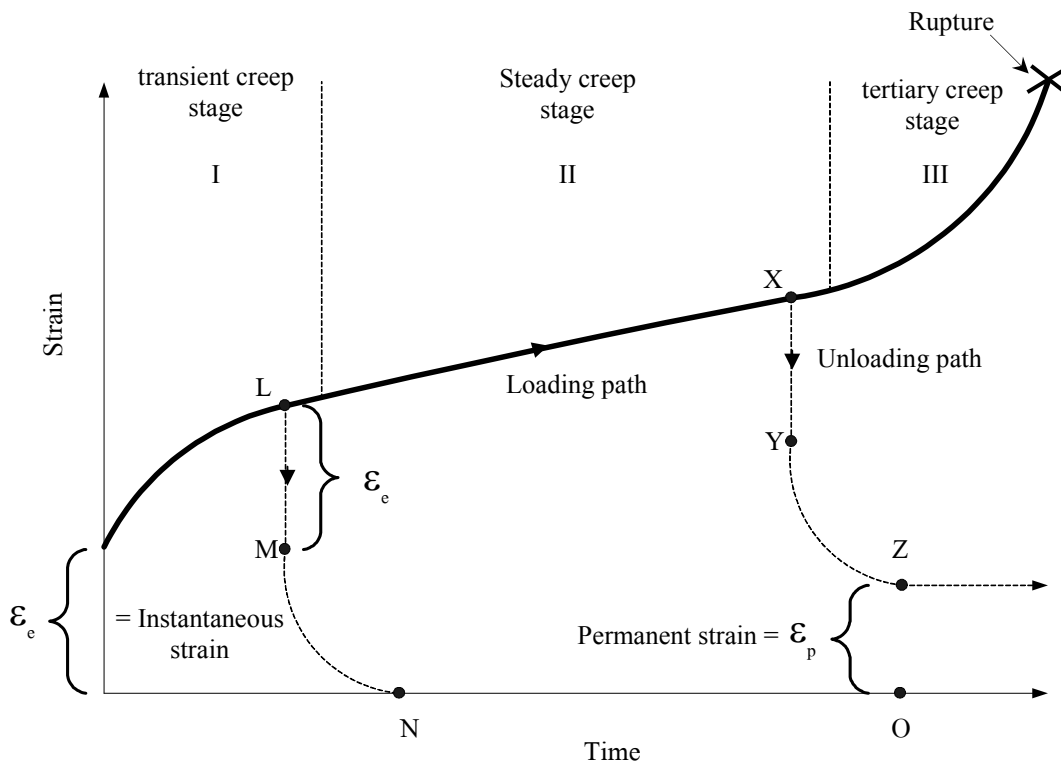
การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากกระทำหรือการเคลื่อนไหลเป็นกระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกลือหิน จะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2.1) คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase, I) 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase, II) 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase, III) โดยเมื่อให้แรงกดในช่วงที่ 1 ที่จุด L ทำให้ความเครียดลดลงอย่างรวดเร็วไปยังจุด M และจะกลับไปสู่จุด O ที่จุด N ระยะ LM จะเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain, ϵ_e) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent strain, ϵ_p)

2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือเกิดการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

2.2.1 ผลกระทบของขนาดผลึก

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน Fokker (1998) และ Aubertin (1996) อธิบายโดยการเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm พบว่า ผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะทางด้านจุลภาค (Microscopic) โดย Langer (1984) ที่ได้ศึกษาและสรุปเกี่ยวกับผลกระทบของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกกับอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยพบว่าเกลือหินที่มีผลึกหรือเม็ดเกลือขนาดเล็กที่ถูกกระทำภายใต้ความเค้นต่ำ การเคลื่อนไหลจะเกิดขึ้นจากการเลื่อนของรอยต่อระหว่างผลึกเกลือ (Dislocation climb) แต่สำหรับผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการเปลี่ยนรูปจะเกิดจากการเลื่อนของรอยแตกและรอยร้าวในผลึกเกลือ (Dislocation glide)



รูปที่ 2.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่ (ดัดแปลงมาจาก Jeremic, 1994)

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2548) และ Kensakoo et al. (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดผลึกต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินชุดมหาสารคามและสรุปว่า ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์จะเพิ่มขึ้นถ้าเกลือหินมีผลึกใหญ่ขึ้น และจะมีการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้กลไกแบบ Dislocation Glide ในทางตรงกันข้ามเกลือหินที่ประกอบด้วยผลึกที่มีขนาดเล็กหรือละเอียดจะเปลี่ยนรูปร่างใต้แรงกดแบบ Dislocation Climb ซึ่งจะส่งผลให้ความเหน็ดเชิงพลาสติกมีค่าต่ำลง

Franssen and Spiers (1990), Raj and Pharr (1992) และ Senseny et al. (1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938, D2664, D3967) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดตามมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างต้องมีขนาดประมาณ 54 mm หรือมากกว่าสิบเท่าของขนาดเฉลี่ยของผลึก

2.2.2 ผลกระทบของอัตราแรงกดในการทดสอบ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามเวลาหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างและใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปร่างไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสถานะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตราแรงกดสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลายาวแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปร่างไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

2.2.3 ผลกระทบของวิถีความเค้น

ผลกระทบของวิถีความเค้น (Stress history) ต่อพฤติกรรมเกลือหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านให้ความสนใจ (Lindner and Brady, 1984; Senseny, 1984; Nair and Borezi, 1970; Lux and Heusermann, 1983; Versluis and Lindner, 1984; Munson and Dawson, 1984; Donath et al., 1988) สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการภายใต้ความเค้นคงที่ ผลลัพธ์ที่ได้จะง่ายต่อการแปลความหมาย ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบในภาคสนาม

โดยต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปเนื่องจากวิถีความเค้นที่มากระทำ ในการทดสอบพบว่า ตัวอย่างเกลือหินที่ถูกกระทำด้วยความเค้นเดียวกันจะมีการเคลื่อนไหลที่ต่างกันถ้าตัวอย่างเกลือหินนั้นมีวิถีความเค้นที่มากระทำแตกต่างกัน แต่เกลือหินมีความจำ (ที่เกิดจากการประสานตัวของผลึก) ที่ไม่ถาวรโดยเมื่อถูกกระทำในเวลาที่นานขึ้นจะพบว่าพฤติกรรมของเกลือหินจะมีลักษณะเหมือนกันคือไม่คำนึงถึงวิถีความเค้น Wawersik and Hannum (1980) ทำการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial tests) กับเกลือหิน โดยกำหนดวิถีความเค้นที่ต่างกันสามรูปแบบประกอบด้วยการให้แรงดันด้านข้างคงที่ ให้ความเค้นเฉลี่ยคงที่ และให้แรงในแนวแกนคงที่ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะถูกให้แรงภายใต้แรงกดสามแกนแบบขึ้นบันได ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าความเครียดหลักน้อยที่สุดและความเครียดหลักมากที่สุด มีค่ามากที่สุดภายใต้การทดสอบตามวิถีความเค้นแบบให้แรงดันด้านข้างคงที่ และมีค่าน้อยที่สุดตามวิถีความเค้นแบบให้แรงในแนวแกนคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหิน Lux and Rokahr (1984) ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมกับการทดสอบสามแกนแบบแรงดึง (Extension triaxial tests) สามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบในช่วงระยะสั้นและระยะยาว สำหรับช่วงการทดสอบระยะสั้นค่ากำลังรับแรงของเกลือหินจะขึ้นกับสถานะของความเค้นและความเค้นเฉลี่ย ในส่วนของผลการทดสอบระยะยาวพบว่า ค่าการยุบตัวของเกลือหินเนื่องจากการคืบของการทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่า การวิบัติของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติในภาคสนามรอบโพรงเกลือ Hunsche and Albrecht (1990) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นสถิต (Hydrostatic stress) อุณหภูมิ ค่ากำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength) และวิถีความเค้น โดยทำการทดสอบกับเกลือหินภายใต้แรงกดสามแกนแบบให้แรงเป็นจริง ผลจากการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลด (Load parameter) ที่ถูกใช้วัดเป็นตัวกลางการเปรียบเทียบได้ให้ผลต่างกันจากการทดสอบวิถีความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลดดังกล่าวเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถของกำลังรับแรงของวัสดุ ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงของเกลือหินขึ้นกับวิถีความเค้น Allemandou and Dusseault (1993) ทำการทดสอบเกลือหินด้วยการคืบแบบวัฏจักรภายใต้แรงกดสามแกน (Triaxial cyclic creep tests) จุดประสงค์ของการทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของวิถีความเค้น Octahedral stress และ Deveriatoric stress ที่มีต่อพฤติกรรมการคืบของเกลือหิน ในส่วนของผลกระทบของวิถีความเค้นได้ใช้การทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมและสามแกนแบบลดแรงดันด้านข้าง (Radial-unloading triaxial test) พบว่าการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าวิธีลดแรงดันด้านข้าง แต่ค่ากำลังรับแรงที่ตำแหน่งความเครียดสูงสุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน Aubertin et al. (1999) และ Yahya et al. (2000) ทำการทดสอบแบบอัตราความเครียด

โดยเกลือหินจะถูกกระทำภายใต้แรงสามแกนแบบดั้งเดิม และแบบลดแรงคั้นด้านข้าง (Reduced triaxial extension) ซึ่งแรงกดดังกล่าวจะถูกทำให้แรงคั้นด้านข้างค่อนข้างสูงโดยจะพิจารณาให้เกลือหินมีพฤติกรรมความเป็นพลาสติกสูง (Fully plastic) จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลกระทบต่อพฤติกรรมทำให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหิน Jandakaew (2003) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยการทดสอบการเคลื่อนไหลสามแกนแบบดั้งเดิมและแบบลดความคั้นด้านข้าง และศึกษาพฤติกรรมของมวลเกลือรอบโพรงเกลือโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลความสำคัญของผลกระทบของวิถีความเค้นต่อโพรงกักเก็บในมวลเกลือหิน ผลการทดสอบระบุว่าที่ความเค้นเท่ากันตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าตัวอย่างที่ทดสอบแบบลดความคั้นด้านข้าง โดยความเหน็ดแข็งยืดหยุ่นและความเหน็ดแข็งพลาสติกของเกลือหินที่สอบเทียบได้จากวิธีการทดสอบแบบลดความคั้นด้านข้างมีค่าสูงกว่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบดั้งเดิมเล็กน้อย

2.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก ทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและทำให้ความเหน็ดแข็งของเกลือหินลดลง (Broek and Heilbron, 1998) การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest et al., 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับอุณหภูมิ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยวบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยวบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น กล่าวคือ จะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Hamami et al., 1996) นอกจากนั้นแล้ว อัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Senseny et al., 1986; Handin et al., 1984; Lama and Vutukuri, 1978, Dreyer, 1973) ซึ่งกฎพฤติกรรมของเกลือหินที่ได้จะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยพิจารณาเป็นตัวแปรหนึ่งที่อยู่ในสมการความสัมพันธ์ แต่จะไม่คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิถ้าทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบควรจะควบคุมให้มีค่าคงที่

2.2.5 ผลกระทบของสิ่งเจือปนในเกลือหิน

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้ ได้แก่ Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน บางกรณีจะลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวที่กีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน สิ่งเจือปนทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์ โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992) สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกที่พบในเกลือหินที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีปริมาณต่างกัน (Winchell, 1948) โดยตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สิ่งเจือปนที่พบจะเป็นแร่เหล็กและแร่ดินซึ่งแทรกอยู่ระหว่างผลึกหรือชั้นหิน นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยเสนอว่าลักษณะของสิ่งเจือปนที่พบอยู่ในเกลือหินตามธรรมชาติประกอบด้วย 3 รูปแบบ คือ 1) สิ่งเจือปนที่กระจายอยู่ระหว่างผลึกเกลือหรือแทรกตัวเป็นกลุ่ม 2) น้ำที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของผลึกเกลือหรือปรากฏในลักษณะน้ำเกลือแทรกอยู่ระหว่างผลึก และ 3) ประจุไอออนของ K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Br^- และ I^- ซึ่งตรึงอยู่ในโครงสร้างผลึก และได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเกลือหินบริสุทธิ์ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ เกลือหินที่มี $MgCl_2$ 0.6% และเกลือหินที่มี KCl 0.1% เป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ (Handin et al., 1984)

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2548) ได้ศึกษาผลกระทบเชิงกลศาสตร์ของสิ่งเจือปนที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์ในตัวอย่างเกลือหินและสรุปว่าค่ากำลังกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงจาก 27 MPa จนถึงประมาณ 40 MPa ในขณะที่แร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนเพิ่มจาก 0 จนถึงเกือบ 100% นอกจากนั้นผลกระทบรวมระหว่างคุณสมบัติของเกลือหินกับแร่แอนไฮไดรต์ทำให้สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหินเพิ่มขึ้นจาก 22 GPa (เกลือหินบริสุทธิ์) ไปจนถึง 36 GPa ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดจะไม่มีผลกระทบจากแร่แอนไฮไดรต์ถ้าปริมาณของแอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

2.2.6 ผลกระทบของขนาดตัวอย่างทดสอบ

ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของเกลือหิน โดย Senseny (1984) ศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างกับการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase)

และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 50 มม. โดยสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Length to diameter ratio, L/D) เท่ากับ 3 เมื่อทำการทดสอบแรงกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ผลจากการทดสอบพบว่าขนาดของตัวอย่างมีผลกระทบในช่วง Transient phase แต่ไม่มีผลกระทบในช่วง Steady-state phase ซึ่งความเครียดที่ได้ในช่วง Transient phase ของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นกฎพฤติกรรมเกลือหินที่พัฒนาได้จากข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากช่วง Transient creep จะมีค่าการเปลี่ยนรูปของเกลือหินสูง Mirza (1984) และ Mirza et al. (1980) ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ได้จากช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่เช่นกัน โดยทำการทดสอบเกลือหินที่ได้จากเสาค้ำยัน (Pillars) จากการทดสอบพบว่าผลกระทบของขนาดตัวอย่างมีการเปลี่ยนรูปน้อยมาก โดยเฉพาะเกลือหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากๆ ซึ่งตามธรรมชาติของเกลือหินมักไม่ปรากฏรอยแตกหรือรอยร้าวในเนื้อหิน แต่หากเนื้อหินมีรอยแตกหรือรอยร้าวสิ่งเหล่านี้จะสามารถประสานตัวด้วยกระบวนการ Recrystallization

บทที่ 3

การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน รวมถึงขนาด รูปร่าง และจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ

3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดถูกคัดเลือกมาจากแท่งตัวอย่างซึ่งได้ขูดเจาะจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เกลือพิมาย จำกัด แท่งตัวอย่างเกลือหินถูกนำมาตัดและฝนให้ผิวเรียบในห้องทดสอบที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบแต่ละชนิด

3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุด ใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่มีรอยแตก ร้าว หรือ รุพุนที่เกิดจากการชำรุดหรือละลายบนแท่งตัวอย่าง การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เครื่องตัดหินที่มีน้ำเกลืออิมัลชันหล่อเลี้ยงใบมีด น้ำเกลืออิมัลชันเตรียมมาจากการละลายเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะเดียวกันเพื่อป้องกันผลกระทบในการละลายเกลือหินระหว่างการตัด เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วจะนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ ถ้าพบว่าหน้าตัดของตัวอย่างไม่ได้ฉากหรือมีรอยแตกมากเกินไปจะนำไปตัดใหม่อีกครั้งจนได้แท่งตัวอย่างที่สมบูรณ์ จากนั้นนำตัวอย่างเกลือหินที่ตัดเสร็จแล้วมาแช่น้ำด้วยผ้าแห้งแล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้แห้งในห้องป้องกันความชื้นก่อนนำมาขัดปลายทั้งสองข้างต่อไป โดยแต่ละตัวอย่างได้ใช้ปากกาสีชนิดติดถาวรเขียนหมายเลขกำกับและใช้พลาสติกหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความชื้นและการละลาย ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาตัดและกลึงเรียบร้อยแล้วจะมีสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length-to-diameter ratio, L/D) แปรผันตามชนิดของการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกตามรูปแบบของการทดสอบ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดมี 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบแบบวัฏจักรในแกนเดียว (Uniaxial cyclic loading test) การทดสอบนี้จะใช้เกลือหิน 5 ตัวอย่าง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) คงที่เท่ากับ 2.5

2) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร (MPL cyclic loading test) การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างเกลือหินเป็นรูปแผ่นกลม (Circular disk) ซึ่งแปรผันเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 48 mm ไปถึง 101 mm ซึ่งอัตราส่วนความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกดมีค่า (t/d) เท่ากับ 2 โดยจะทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างหินต่อหนึ่งขนาด

3) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบ (MPL creep test) การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างเกลือหินเป็นรูปแผ่นกลม อัตราส่วนความหนาของตัวอย่างเกลือหินต่อขนาดหัวกด (t/d) เท่ากับ 2 โดยจะทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างหินต่อหนึ่งขนาดแปรผันเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 48 mm ไปถึง 101 mm

4) การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep tests) ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 54 mm และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.0 ทั้งหมดจำนวน 5 ตัวอย่าง

โดยขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมไว้สำหรับการทดสอบทั้ง 4 รูปแบบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบแต่ละวิธี

Methods	L/D ratio	D/d ratio	Nominal Diameter (mm)	Nominal Length (mm)	Number of Specimens
Uniaxial Cyclic Loading Test	2.5	-	48	120	5
MPL Cyclic Loading Test	2.0	2.0	48	50	5
	2.0	4.0	101	50	5
MPL Creep Test	2.0	2.0	48	50	5
	2.0	4.0	101	50	5
Triaxial Creep Test	2.0	-	54	108	5



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแบบวัฏจักรในแกนเดียว โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วนความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) คงที่เท่ากับ 2.5



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยกดแบบวัฏจักร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนา 50 mm



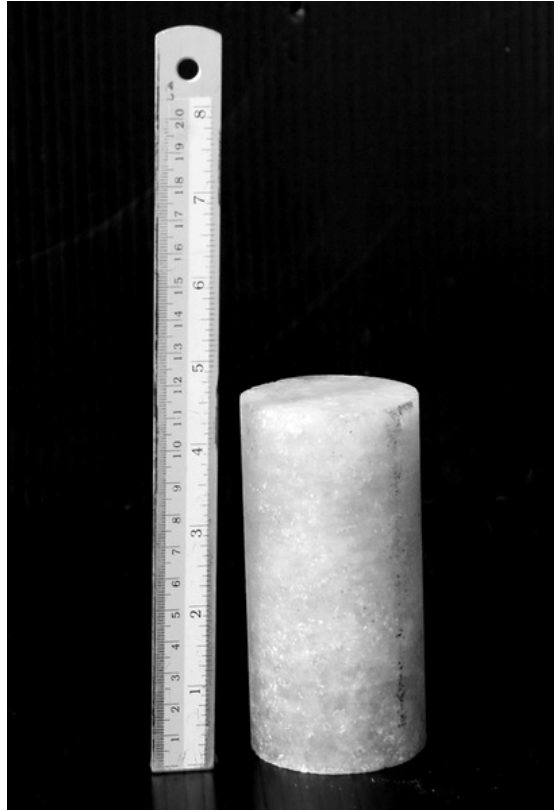
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยกดแบบวัฏจักร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm และมีความหนา 50 mm



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลือหินด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนา 50 mm



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการคืบของเกลือหินด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm และมีความหนา 50 mm



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลื่อหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหล
ในสามแกน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 54 mm และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.0

บทที่ 4

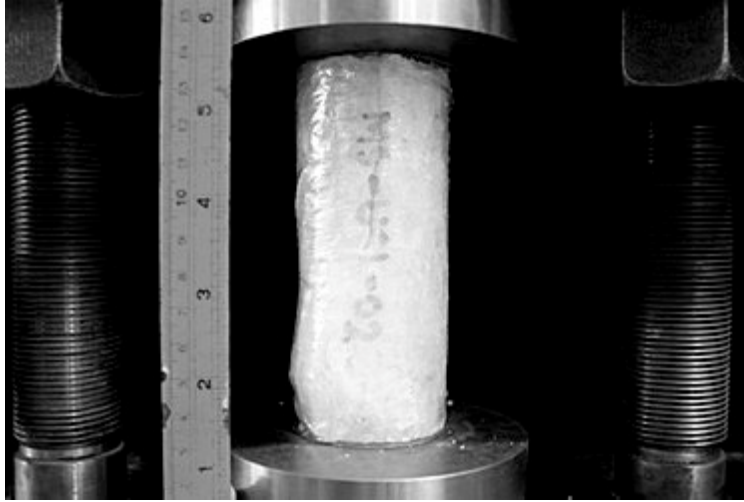
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเหนียวยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plasticity) ที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหิน และเพื่อสอบทานผลที่ได้จากการทดสอบ งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทดสอบหลายชุด และได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM Standards โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น การทดสอบการกดแบบวัฏจักรในแกนเดียว (Uniaxial cyclic loading test) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร (MPL cyclic loading test) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบ (MPL creep test) และการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep tests)

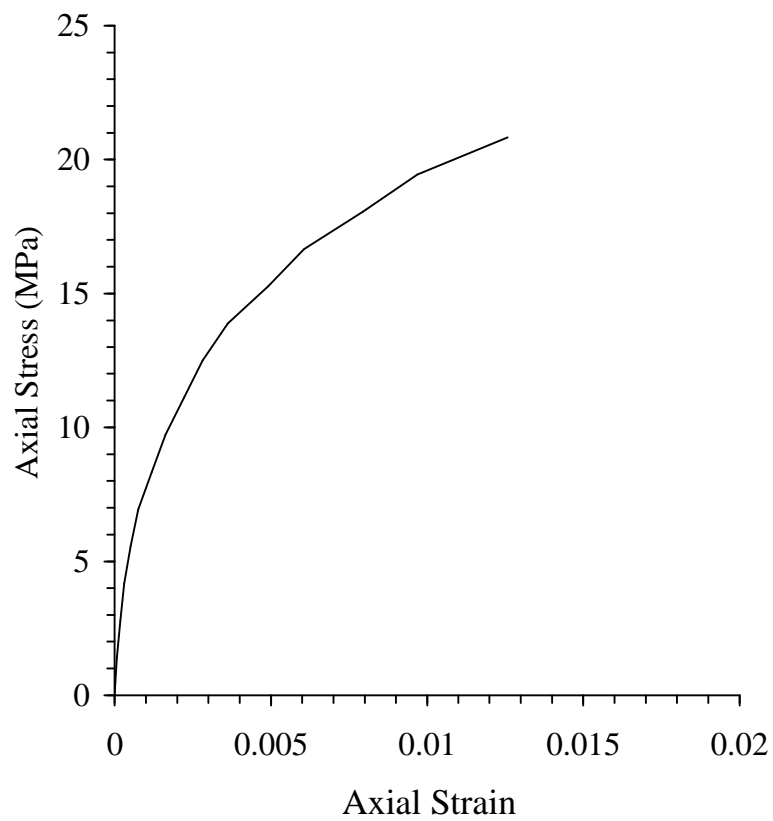
4.1 การทดสอบการกดแบบวัฏจักรในแกนเดียว (Uniaxial cyclic loading test)

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังกดของเกลือหินภายใต้แรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ซึ่งทำให้รู้ถึง Fatigue strength ของเกลือหินภายใต้แรงกดสูงสุดและต่ำสุดที่ระดับต่างๆ กัน วิธีการทดสอบนี้จะคล้ายคลึงกับวิธีการทดสอบแรงกดในแกนเดียว (รูปที่ 4.1) แต่เป็นการทดสอบในลักษณะที่ตัวอย่างเกลือหินอยู่ภายใต้แรงกดขึ้น-ลงอย่างต่อเนื่อง ขนาดของแรงที่กระทำมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านแรงกดสูงสุด การทดสอบโดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบด้วยอัตราคงที่ มีวิธีการทดสอบด้วยการใช้เครื่องกดทดสอบ SBEL PLT-75 ซึ่งจะให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างเกลือหินจนถึงแรงกดสูงสุดที่กำหนดไว้ก่อนจากนั้นจึงลดแรงกดที่เหลือค่าต่ำสุดตามที่กำหนดไว้ในแต่ละตัวอย่างจนกระทั่งแรงกดลดลงต่ำสุดอยู่ที่ 0.1 MPa การทดสอบจะกระทำซ้ำอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ 0.3 Hz ผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะบ่งบอกถึงความสามารถสูงสุดของเกลือหินในการรับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงกดที่เข้าซ้นหรือแรงกดแบบวัฏจักร และให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหิน ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) คงที่เท่ากับ 2.5 การทดสอบนี้ใช้เกลือหินทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่างแรกจะถูกกดให้แตกในรอบเดียว เพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุด (รูปที่ 4.2) และเพื่อใช้ค่านี้นี้กำหนดกำลังกดแบบวัฏจักรสำหรับแต่ละตัวอย่างต่อไป

การคำนวณค่าความเค้นและความเครียดจะเป็นไปตามสมการที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกดในแกนเดียว การคำนวณสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) จะใช้ผลต่างของความเค้น ($\Delta\sigma$) ในช่วงแรกของการลดแรงกดในแต่ละรอบวัฏจักรแล้วนำมาหารด้วยผลต่างของความเครียด ($\Delta\varepsilon$) ที่เกิดจากความเค้นดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบแบบวัฏจักรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน $L/D = 2.5$



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการกดในแกนเดียวเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลือหิน

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (4.1)$$

ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในแกนเดียวได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสะสมที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการกดของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งมีการให้ความเค้นกดแบบวัฏจักรผันแปรจาก 16.4 MPa ถึง 18.3 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเฉลี่ยและความผันแปรเท่ากับ 13.6 ± 4.6 GPa รูปที่ 4.7 แสดง S-N curve หรือ Fatigue curve สำหรับเกลือหิน โดยที่ค่าความเค้นสูงสุด (S) สัมพันธ์กับจำนวนรอบ (N) ดังสมการที่ (4.2)

$$S = 20.63N^{-0.033} \text{ MPa} \quad (4.2)$$

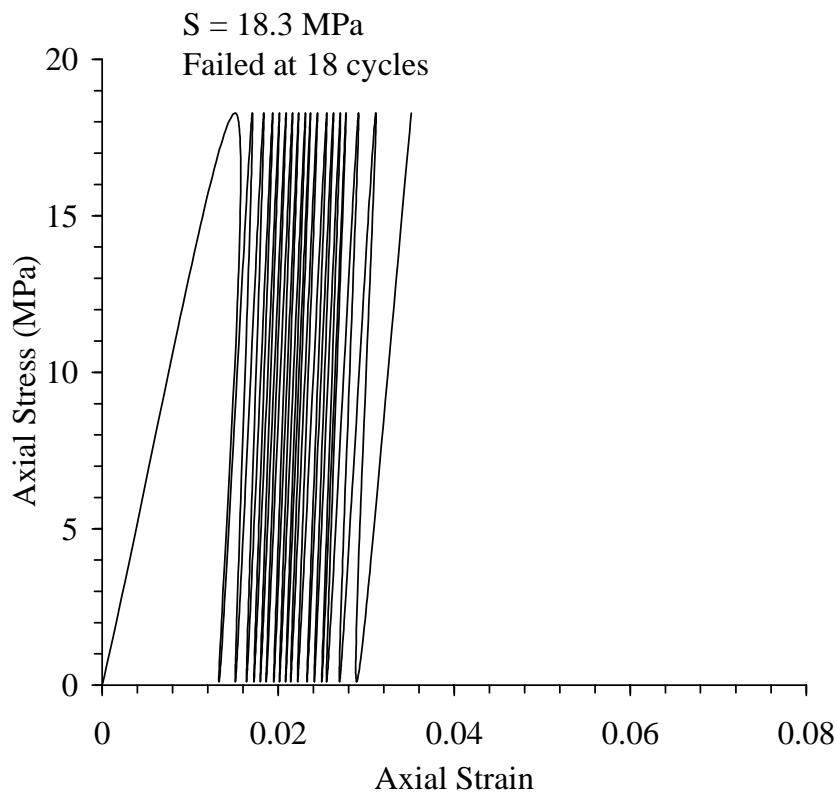
เมื่อนำความเครียดสะสมในแต่ละรอบของการกดมาสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการกดทดสอบสำหรับแต่ละตัวอย่างจะได้กราฟที่คล้ายคลึงกับการทดสอบความคืบ (Creep test) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะลดลงอย่างฉับพลันในช่วง 10-50 รอบแรกของการกด จากนั้นค่าความยืดหยุ่นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังทำการทดสอบ

4.2 การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร (MPL cyclic loading test)

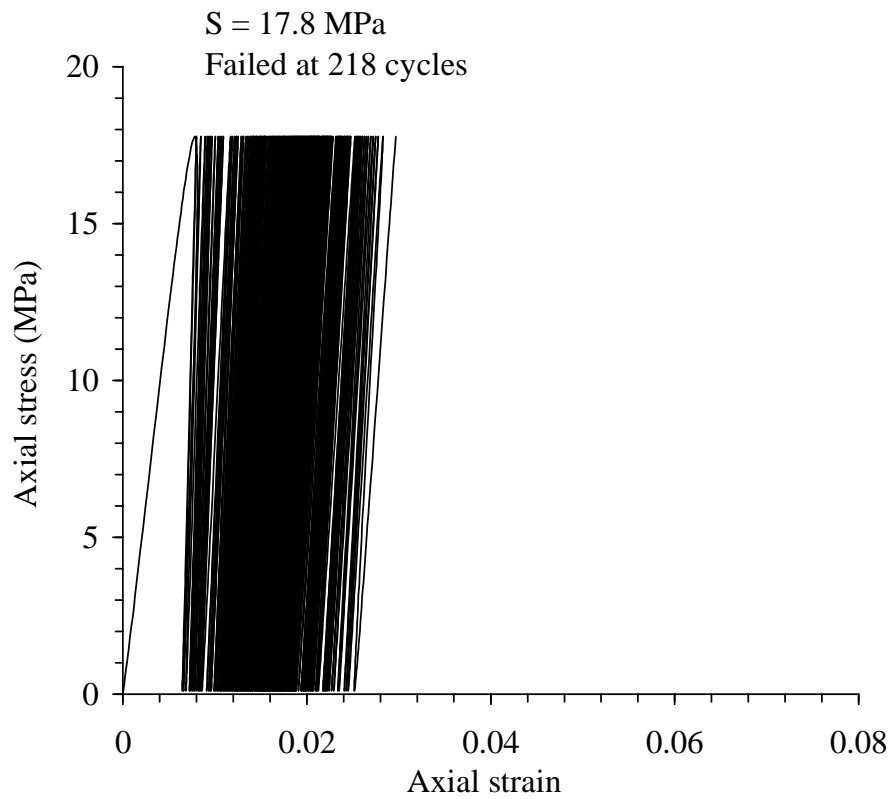
ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงานเครื่องทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยมีการออกแบบระบบกลไกการทำงานของเครื่องให้เหมาะสมกับการทดสอบเกลือหิน การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (MPL) ได้ถูกพัฒนาห้วงกดแบบปรับเปลี่ยนจากห้วงมนโค้งมาเป็นห้วงตัดเรียบ (รูปที่ 4.11) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหินจากการทดสอบแบบวัฏจักรนี้จะคล้ายคลึงกับการทดสอบการกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร (Uniaxial cyclic loading test) การทดสอบจะใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดต่างกันมีลักษณะเป็นรูปแผ่นกลม (Circular disk) ซึ่งแปรผันเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 48 mm ไปถึง 101 mm โดยที่อัตราส่วนความหนาของหินตัวอย่างต่อเส้นผ่าศูนย์กลางห้วงกดมีค่า (t/d) คงที่เท่ากับ 2 ซึ่งจะทำให้การทดสอบ 5 ตัวอย่างหินในแต่ละขนาด การทดสอบได้ลดแรงกดลงต่ำสุดอยู่ที่ 1 MPa จะกระทำซ้ำอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ 0.3 Hz (รูปที่ 4.12) การให้แรงกดจะมีขนาดขึ้นลงอย่างมีระบบจนกระทั่งเกลือหินแตก โดยที่ตัวอย่างแรกจะถูกกดให้แตกในรอบเดียว เพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุด (รูปที่ 4.13) และเพื่อใช้ค่านี้นำมาหาค่ากำลังกดแบบวัฏจักรสำหรับแต่ละตัวอย่างต่อไป จากนั้นนำค่าของจำนวนรอบการกดไปสร้างความสัมพันธ์กับการทดสอบแบบมาตรฐานเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหิน

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่างหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.5

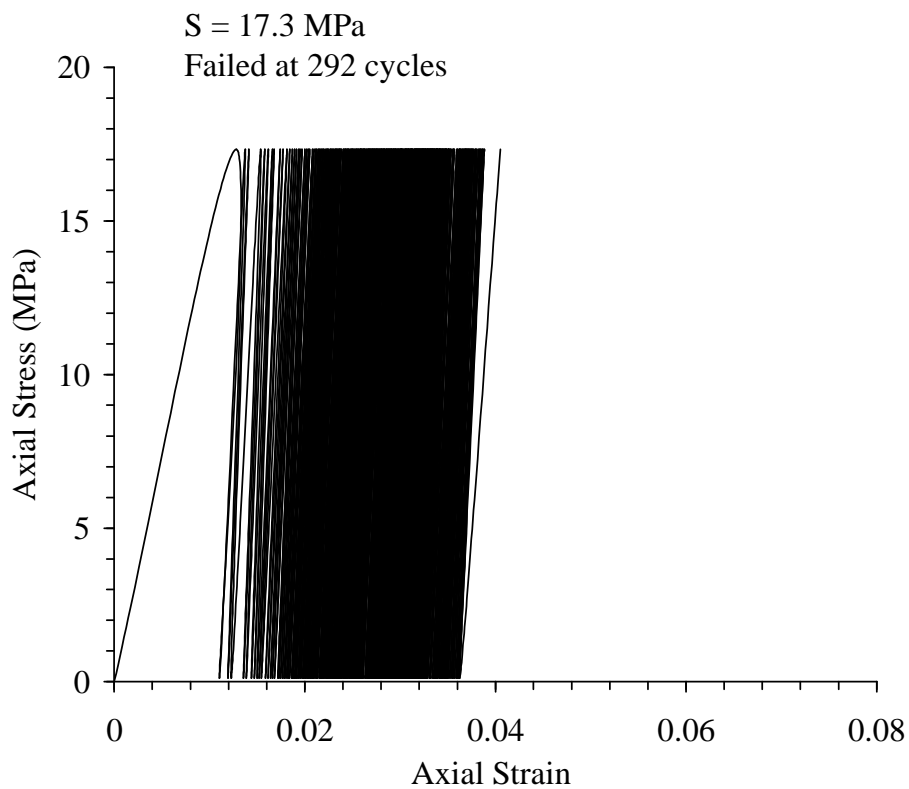
Specimen Number	Depth (m)	Density (g/cc)	Maximum Stress (MPa)	Number of Cycles	Elastic Modulus (GPa)
MS-UCL-01	340.20-340.38	2.14	20.8	1	21.1
MS-UCL-02	340.40-340.55	2.15	17.8	218	11.2
MS-UCL-03	341.07-341.30	2.14	17.3	292	10.5
MS-UCL-04	341.42-341.59	2.16	18.3	18	15.0
MS-UCL-05	341.63-341.79	2.15	16.4	501	10.3



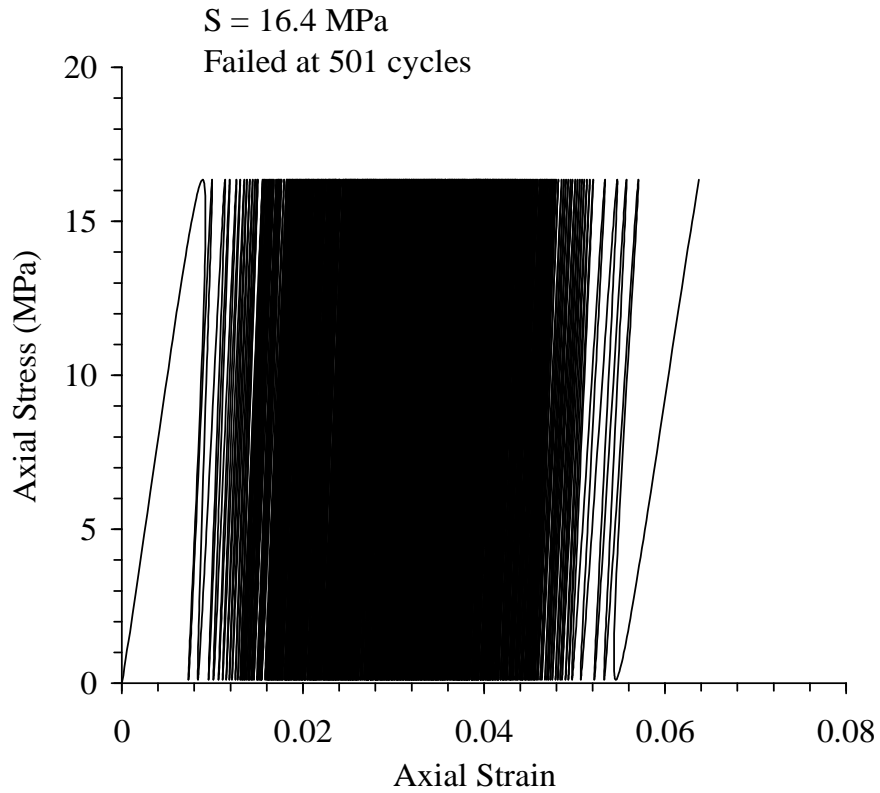
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 18.3 MPa



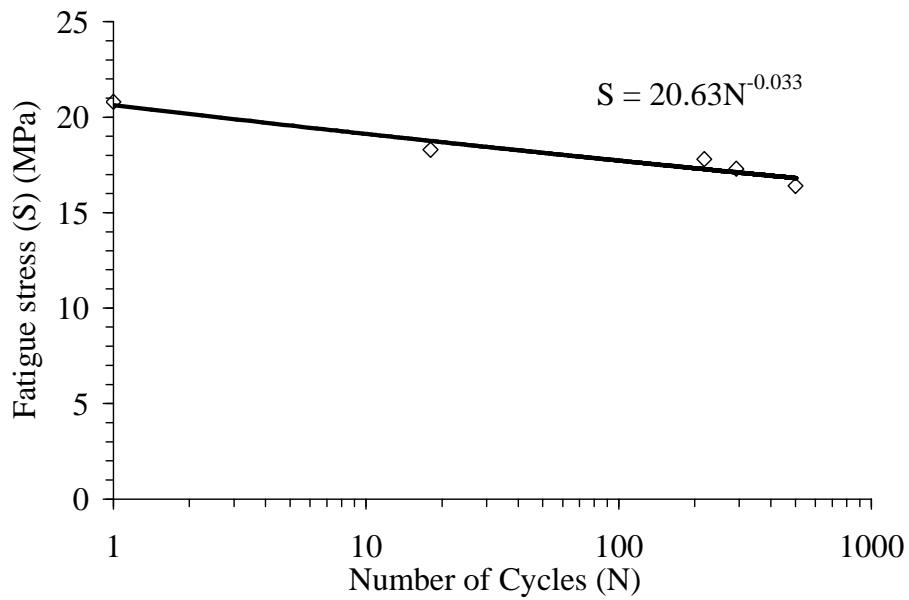
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 17.8 MPa



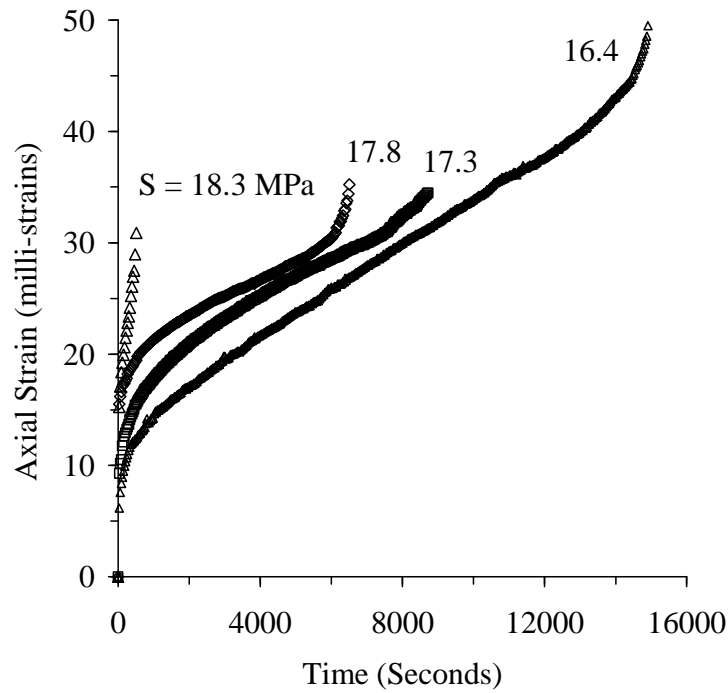
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 17.3 MPa



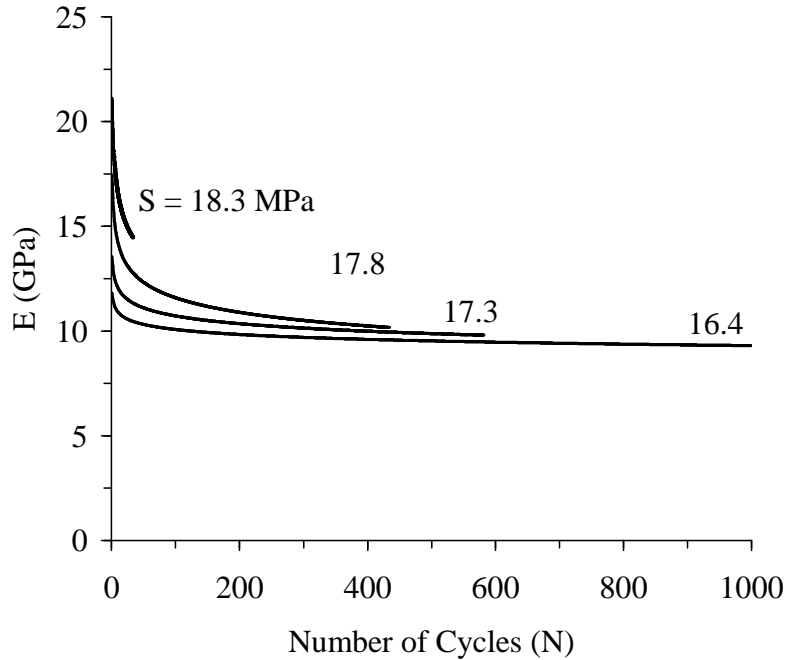
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 16.4 MPa



รูปที่ 4.7 ค่าความเค้นกดสูงสุดในฟังก์ชันของจำนวนรอบของการกด



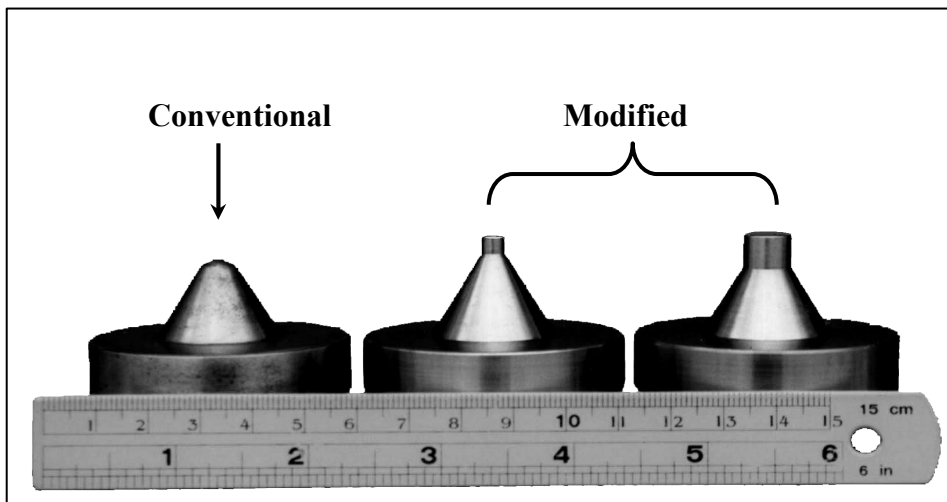
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบแบบวัฏจักร



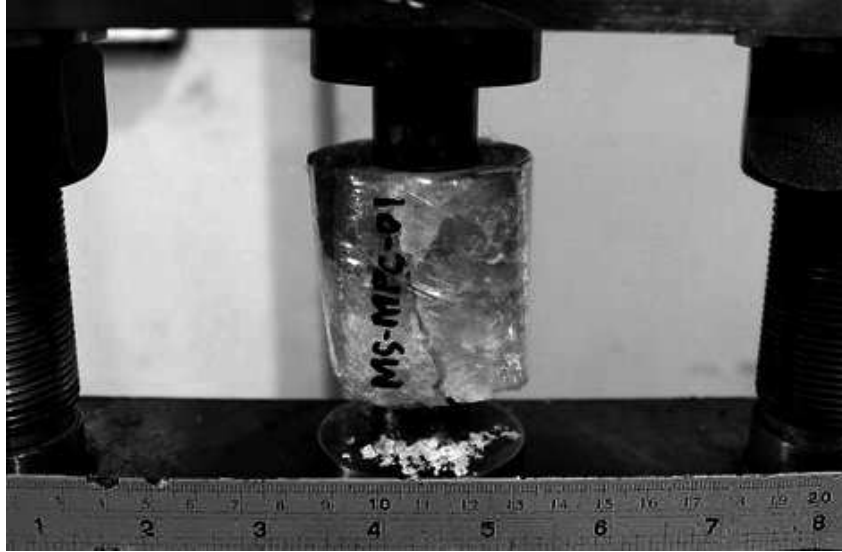
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของจำนวนรอบการกดแบบวัฏจักร



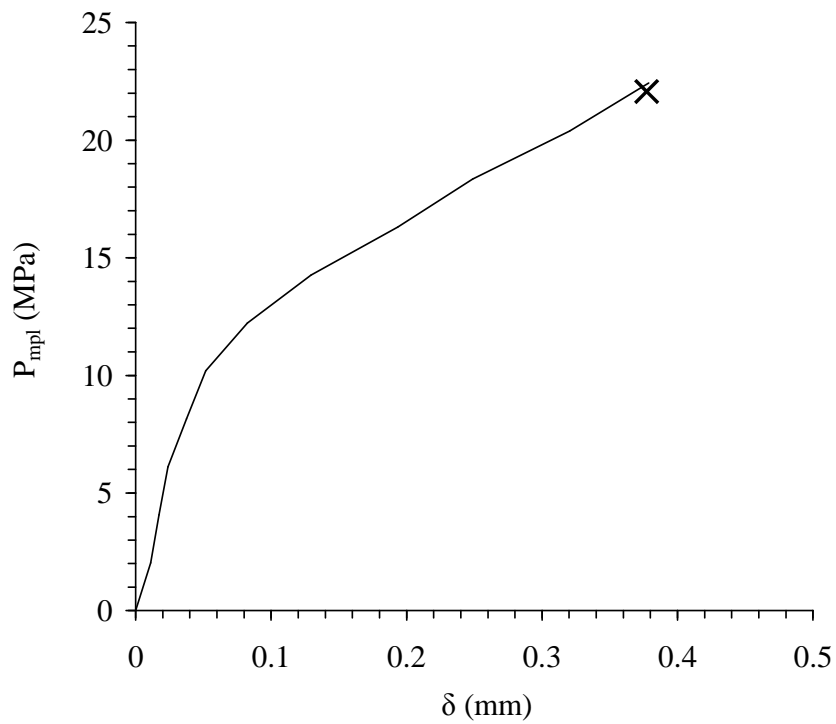
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างเกลื่อหินหลังจากการทดสอบแบบวัฏจักรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และอัตราส่วน $L/D = 2.5$



รูปที่ 4.11 หัวกดแบบดั้งเดิม (Conventional) และหัวกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดสอบการคืบของเกลื่อหินในแกนเดียว



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และมีความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด (t/d) เท่ากับ 2



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลือหิน ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm

การคำนวณที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน ซึ่งจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันการยุบตัว (Displacement function, $\Delta P/\Delta \delta$) และค่าความเค้นสูงสุด (P) สามารถคำนวณได้จากการนำค่าแรงกดแตก (p_f) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของหัวกด ดังสมการที่ (4.3)

$$P = p_f / (\pi d^2/4) \text{ MPa} \quad (4.3)$$

โดยที่ P คือความเค้นกดที่เกิดการวิบัติ p_f คือ แรงกดที่จุดวิบัติ และ d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดที่ใช้

ผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างหินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 แผนภูมิตารางละเอียดของการทดสอบในชุดนี้ได้ให้ไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและการเคลื่อนตัวในแนวแกนสะสมที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของแรงกดของแต่ละตัวอย่างเกลือหิน ที่กำหนดค่าความเค้นกดแบบวัฏจักรผันแปรจาก 16.3 MPa ถึง 32 MPa รูปที่ 4.14 แสดง S-N curve หรือ Fatigue curve โดยที่ค่าความเค้นสูงสุด (S) สัมพันธ์กับจำนวนรอบ (N) สำหรับเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ

$$S = 23.92N^{-0.053} \quad \text{MPa} \quad (4.4)$$

$$S = 34.61N^{-0.035} \quad \text{MPa} \quad (4.5)$$

เมื่อนำความเครียดสะสมในแต่ละรอบของการกดมาสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการกดทดสอบสะสมแต่ละตัวอย่าง จะได้กราฟที่คล้ายคลึงกับการทดสอบความคืบ (Creep test) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะลดลงอย่างฉับพลันในช่วง 10-50 รอบแรกของการกด จากนั้นค่าความยืดหยุ่นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 4.16) รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังทำการทดสอบ

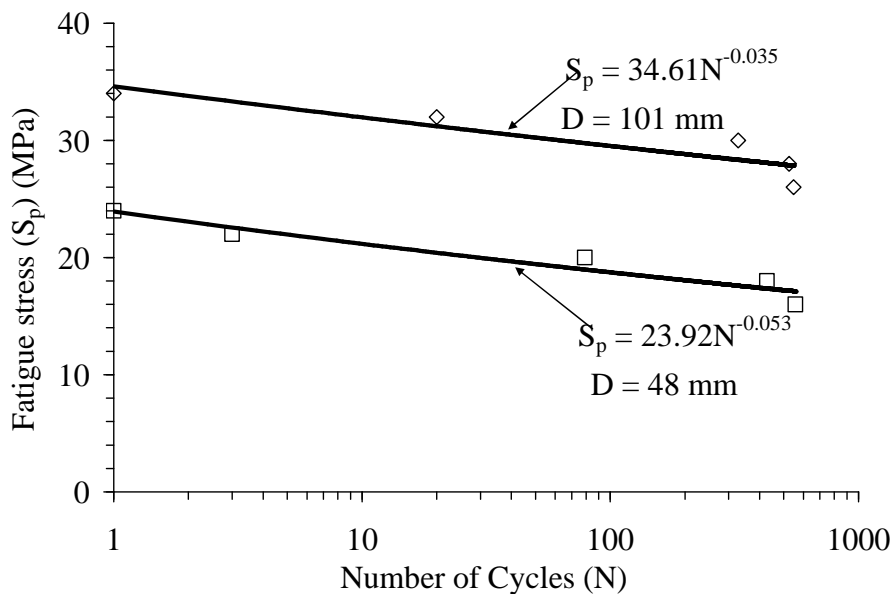
4.3 การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบ

(MPL creep test)

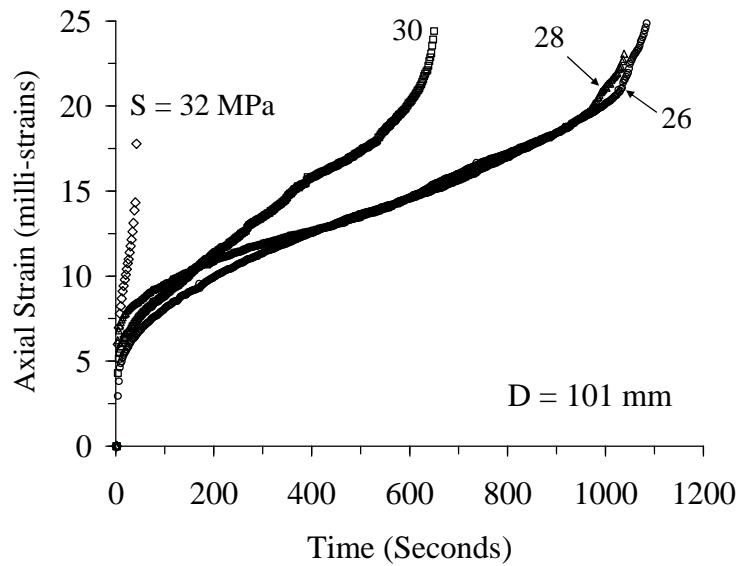
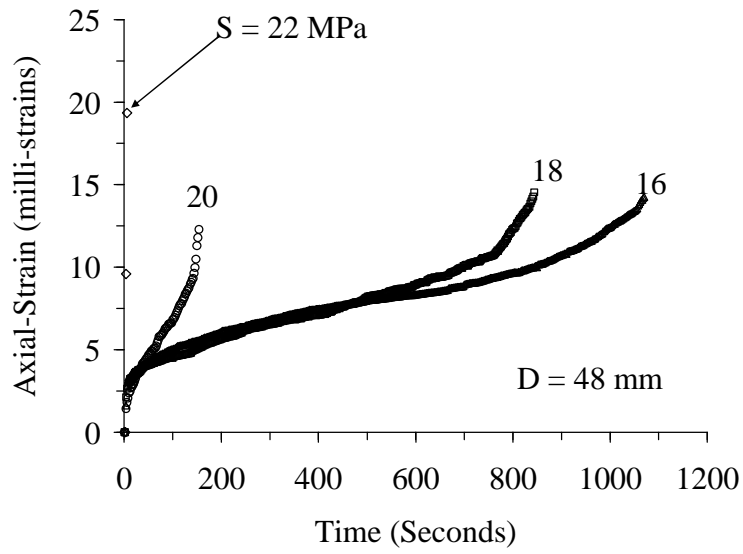
การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบหรือการเคลื่อนไหล (MPL creep test) จะใช้ตัวอย่างเกลือหินเป็นรูปแผ่นกลม (Circular disk) และจะทดสอบที่อัตราส่วนความหนาของตัวอย่างเกลือหินต่อขนาดหัวกด (t/d) เท่ากับ 2 (รูปที่ 4.18) โดยแปรผันเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 48 mm ไปถึง 101 mm มีการทดสอบ 5 ตัวอย่างในแต่ละขนาด ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่างเกลือหิน
ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm ที่อัตราส่วน $t/d = 2$

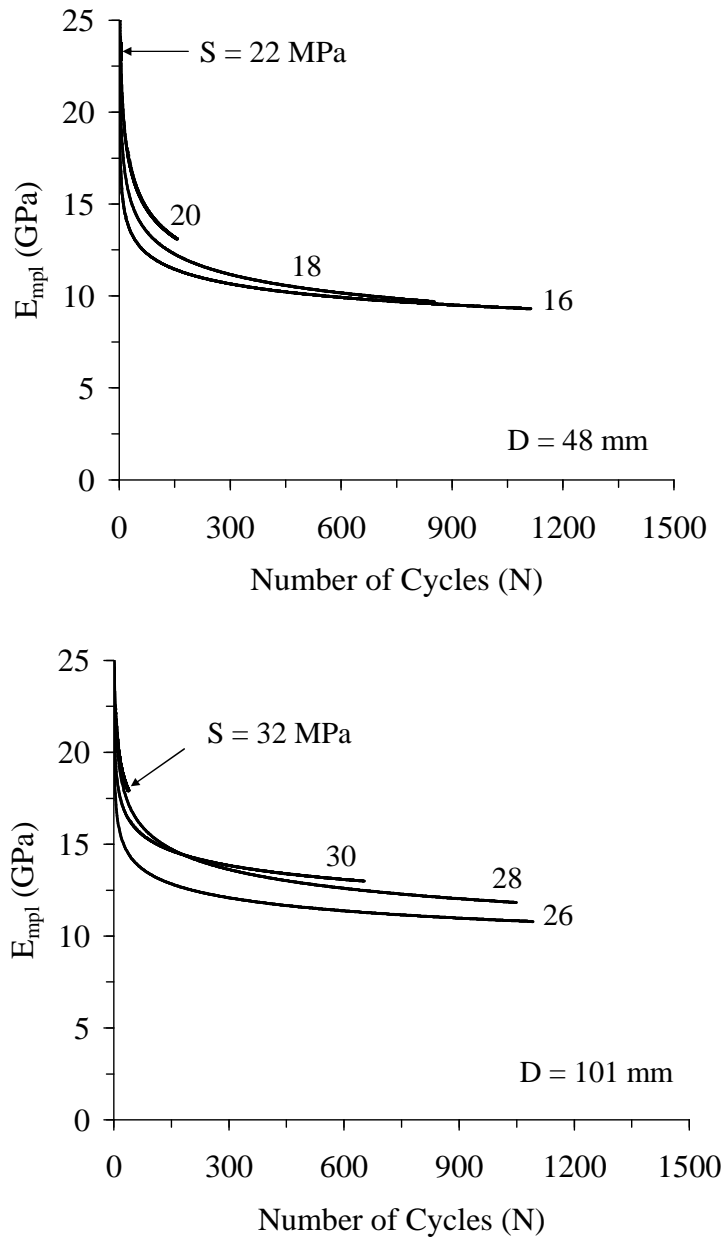
Specimen Number	Diameter (mm)	Depth (m)	Density (g/cc)	Maximum Pressure (MPa)	Number of Cycles	Elastic Modulus (GPa)
MS-MPC2-01	48	365.31-365.40	2.16	24	1	23.0
MS-MPC2-02		365.44-365.50	2.15	22	3	22.5
MS-MPC2-03		365.21-365.30	2.14	18	428	13.5
MS-MPC2-04		366.20-366.33	2.15	16	558	10.4
MS-MPC2-05		366.35-366.44	2.14	20	79	10.0
MS-MPC4-01	101	220.05-220.20	2.14	34	1	21.1
MS-MPC4-02		220.23-220.29	2.15	32	20	16.5
MS-MPC4-03		222.25-222.42	2.16	30	328	13.0
MS-MPC4-04		222.51-222.63	2.15	28	526	12.5
MS-MPC4-05		224.15-224.24	2.15	26	548	11.3



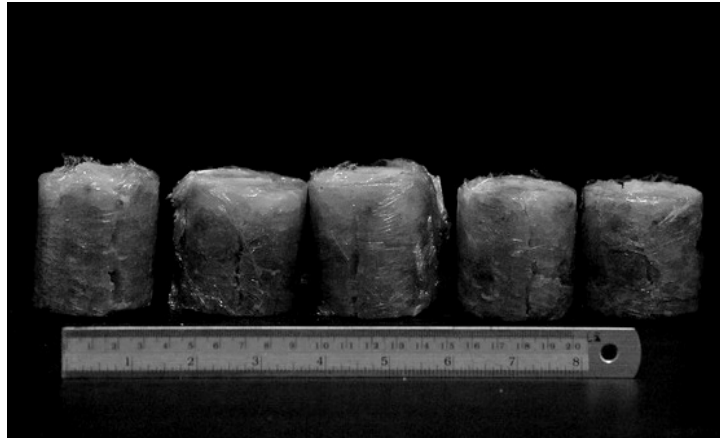
รูปที่ 4.14 ค่าความเค้นกดสูงสุดในฟังก์ชันของจำนวนรอบการกดระหว่างตัวอย่างเกลือหินที่มี
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm กับ 101 mm



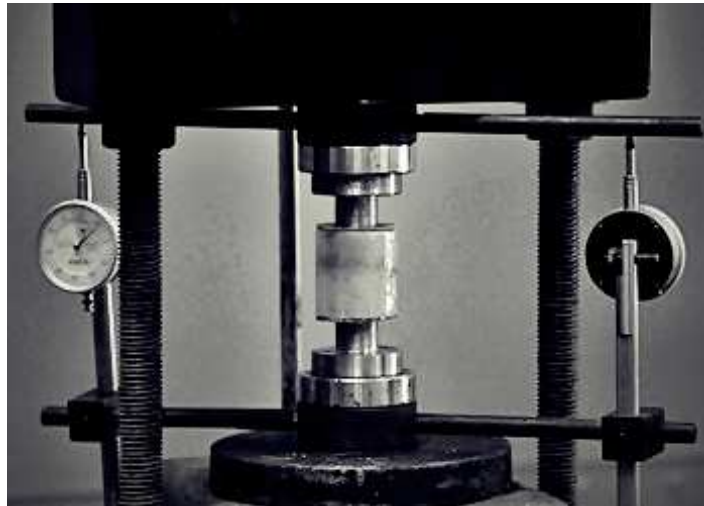
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของจำนวนรอบการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างเกลื่อหินหลังการทดสอบจุกกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวิฎจักร
ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างเกลื่อหินในขณะที่ทดสอบการคืบโดยใช้จุกกดแบบปรับเปลี่ยนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
48 mm และ 101 mm มีความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด (t/d) เท่ากับ 2

จุดกดแบบปรับเปลี่ยนด้วยหินตัวอย่างที่มีขนาดต่างกันจะสามารถบ่งบอกถึงผลกระทบของความดันล้อมรอบ (σ_3) และสามารถหาจุดแบ่งระหว่างความดันล้อมรอบที่เกิดขึ้นและความต้านแรงกดที่ใช้ต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ของเกลือหินในบทต่อไป

การทดสอบนี้ใช้เวลาดำเนินการไม่น้อยกว่า 30 วันต่อ 1 ตัวอย่าง โดยมีการผันแปรค่าความเค้นกดคงที่จาก 8 MPa ถึง 25 MPa ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลาที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังทำการทดสอบ

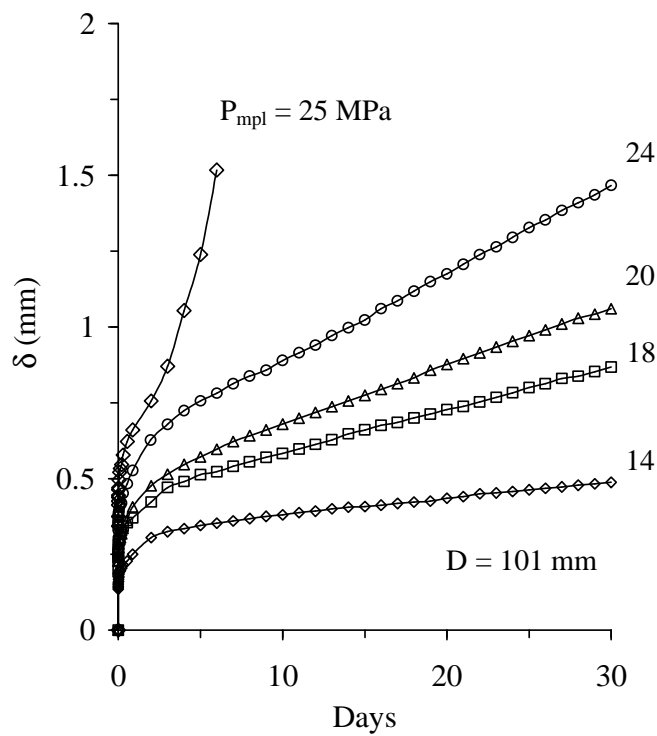
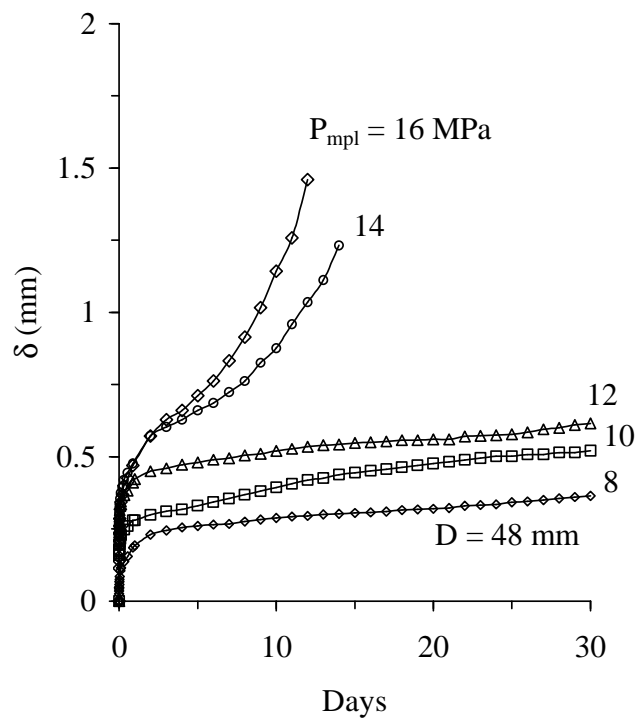
4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep tests)

ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep tests) จะนำมาใช้ในการหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนที่ขึ้นกับเวลา โดยคำนวณหาค่าการเปลี่ยนรูปตามเวลา (Time-dependent deformation) ผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ของเกลือหิน เครื่องมือที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย เครื่องกดทดสอบแบบให้แรงกดคงที่ (Consolidation machine) ปัมไฮดรอลิกสำหรับให้ความดันล้อมรอบด้านข้างแบบมือโยก และหม้อความดัน (Hoek-Franklin Cell) (รูปที่ 4.21) ซึ่งตัวอย่างเกลือหินภายในจะถูกหุ้มด้วยปลอกยางเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันไฮดรอลิกสัมผัสกับตัวอย่างเกลือหิน และได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องปกติ ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มม. และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.0 ทั้งหมดจำนวน 5 ตัวอย่าง

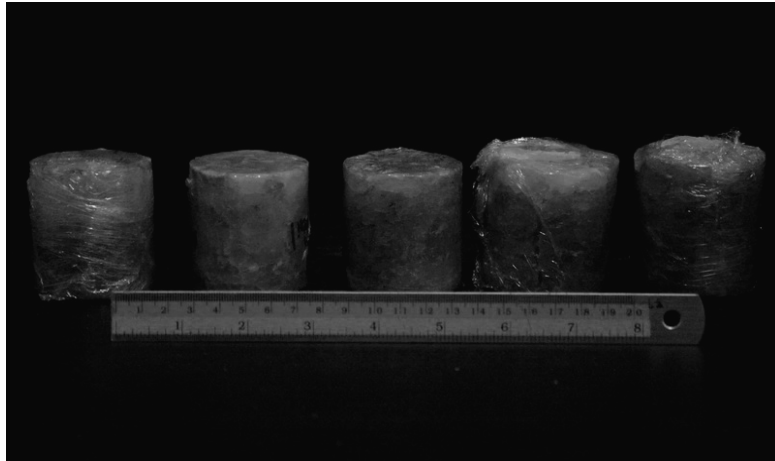
ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 ส่วนรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2 , ϵ_3) ในฟังก์ชันของเวลา โดยมีการผันแปรค่าความเค้นกดคงที่จาก 35 MPa ถึง 50 MPa และมีการกำหนดให้ความดันล้อมรอบหินตัวอย่าง (σ_2 , σ_3) มีค่าผันแปร 3-10 MPa การทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบหินตัวอย่างไม่น้อยกว่า 21 วันต่อ 1 ตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพิ่มเติมสำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.29 โดยแต่ละตัวอย่างเกลือหินมีการให้ความเค้นคงที่ต่างๆ กัน เป็นจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งในการทดสอบแต่ละตัวอย่างใช้เวลาไม่น้อยกว่า 30 วัน

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm

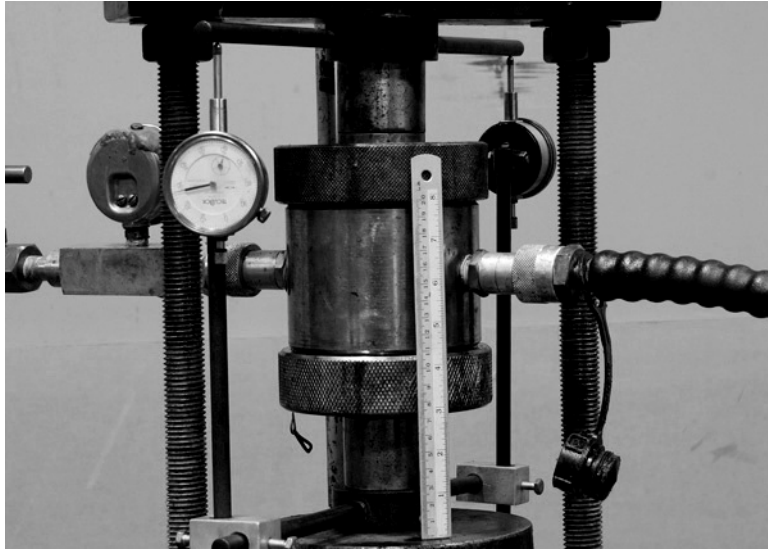
Specimen Number	Diameter (mm)	Depth (m)	Density (g/cc)	Constant Axial Stress, P_{mpl} (MPa)	Time (Days)
MS-MCR2-01	48	345.15-345.28	2.16	16	12
MS-MCR2-02		346.21-346.29	2.15	14	14
MS-MCR2-03		345.35-345.40	2.21	12	30
MS-MCR2-04		346.42-346.51	2.17	10	30
MS-MCR2-05		346.55-346.64	2.16	8	30
MS-MCR4-01	101	208.15-209.23	2.15	25	6
MS-MCR4-02		209.45-209.54	2.17	24	30
MS-MCR4-03		209.61-209.70	2.19	20	30
MS-MCR4-04		208.05-208.12	2.15	18	30
MS-MCR4-05		211.37-211.52	2.16	14	30



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างเกลือหิน ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm



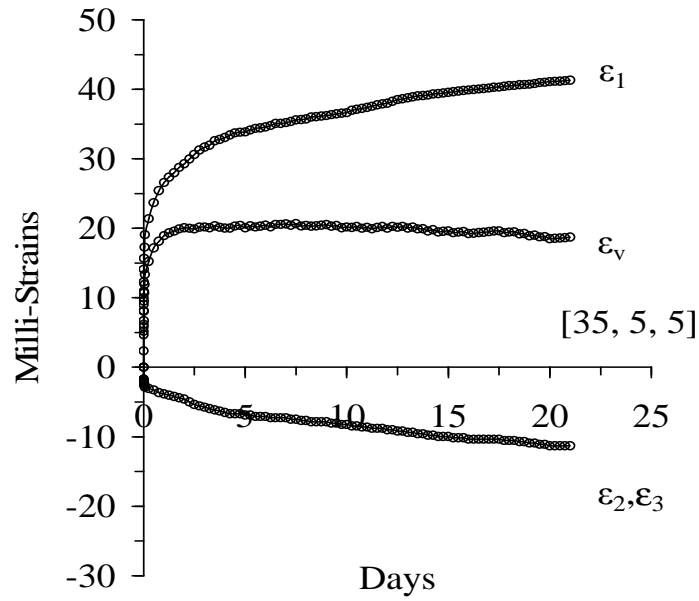
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยน
ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm และ 101 mm



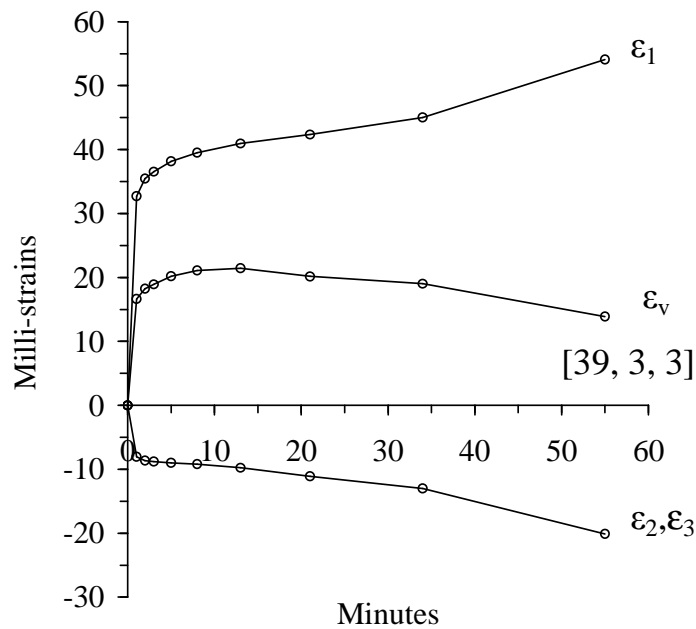
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างเกลือหินที่บรรจุในหม้อแรงดันสำหรับการทดสอบการคืบในสามแกน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm

ตารางที่ 4.4 ปัจจัยการทดสอบความคืบในแกนเดียวและสามแกนของเกลือหิน

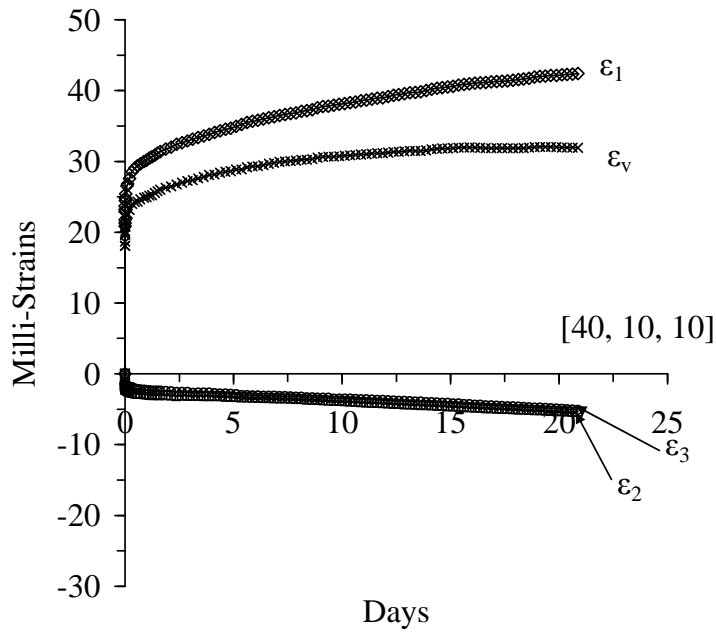
Specimen Number	Depth (m)	Density (g/cc)	Constant Axial Stress (MPa)	Confining Pressure (MPa)	Time (Days)
MS-UCR-01	255.43-255.60	2.18	20	0	55 min
MS-UCR-02	255.71-255.84	2.16	14	0	30
MS-UCR-03	255.85-255.97	2.17	18	0	1
MS-TCR-01	250.21-250.42	2.17	39	3	55 min
MS-TCR-02	250.45-250.59	2.15	35	5	21
MS-TCR-03	252.36-252.54	2.17	40	10	21
MS-TCR-04	251.20-251.39	2.16	50	5	21
MS-TCR-05	255.67-256.02	2.17	31	7	21



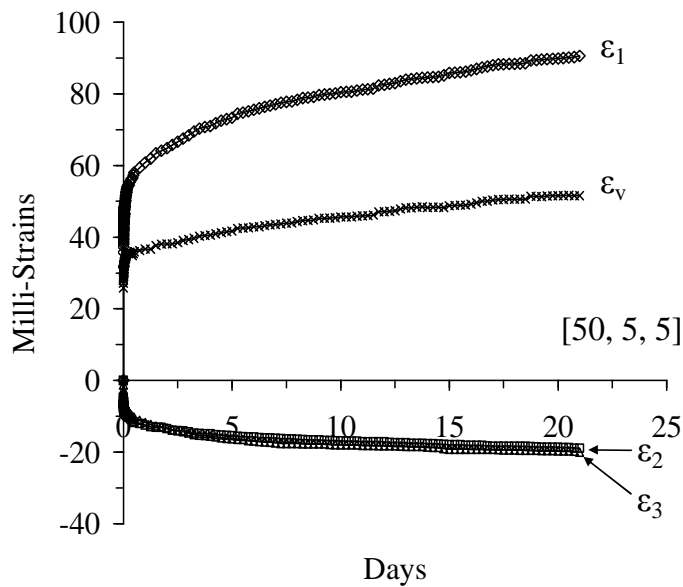
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 35, \sigma_2 = 5, \sigma_3 = 5$ MPa



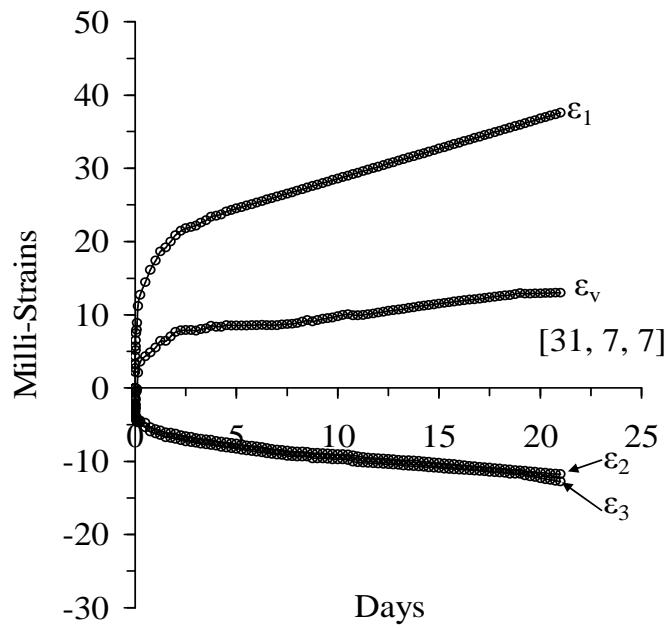
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 39, \sigma_2 = 3, \sigma_3 = 3$ MPa



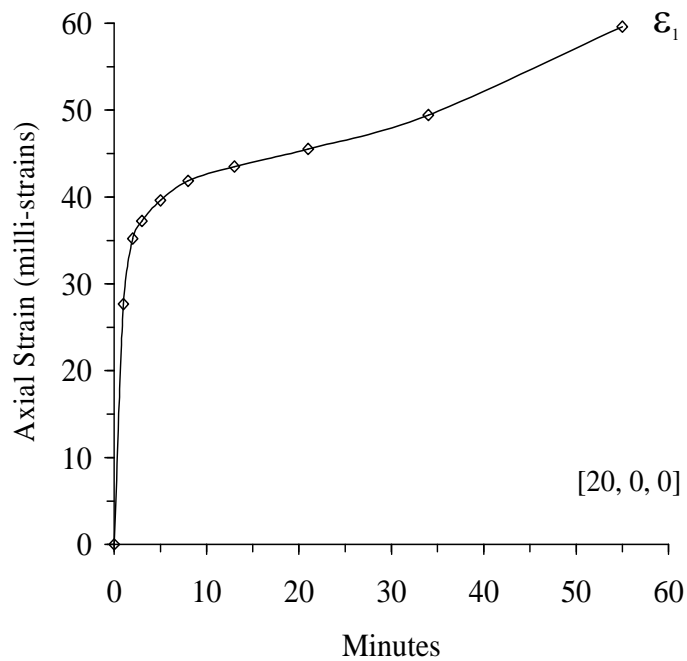
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเค้นในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 40, \sigma_2 = 10, \sigma_3 = 10$ MPa



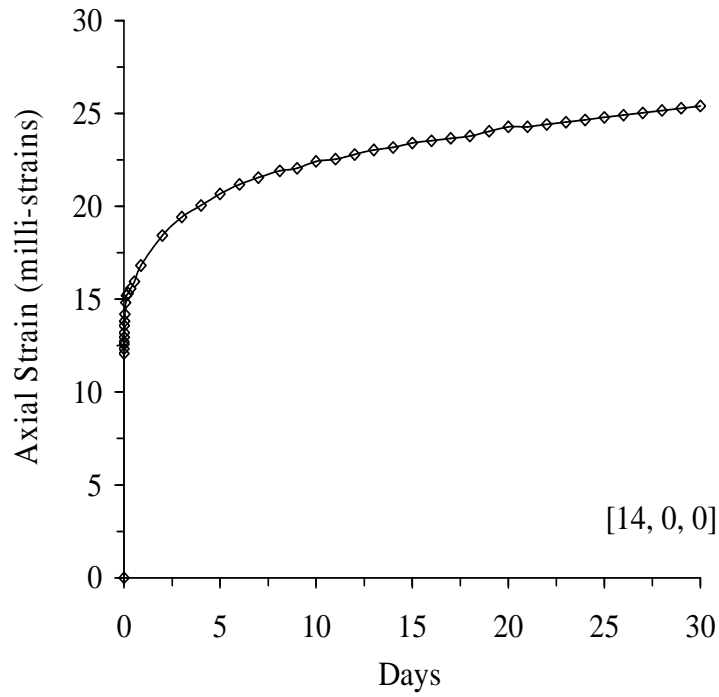
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเค้นในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 50, \sigma_2 = 5, \sigma_3 = 5$ MPa



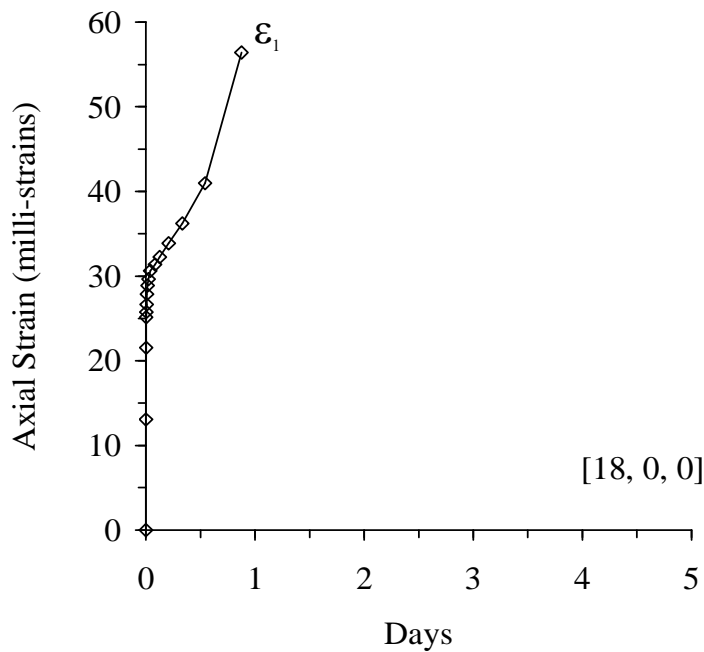
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบการคืบในสามแกน ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 31, \sigma_2 = 7, \sigma_3 = 7$ MPa



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 20$ MPa



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 14$ MPa



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่า $\sigma_1 = 18$ MPa

บทที่ 5

การวิเคราะห์

เนื้อหาในบทนี้เสนอวิธีการคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร และการสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบ (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) ของเกลือหิน

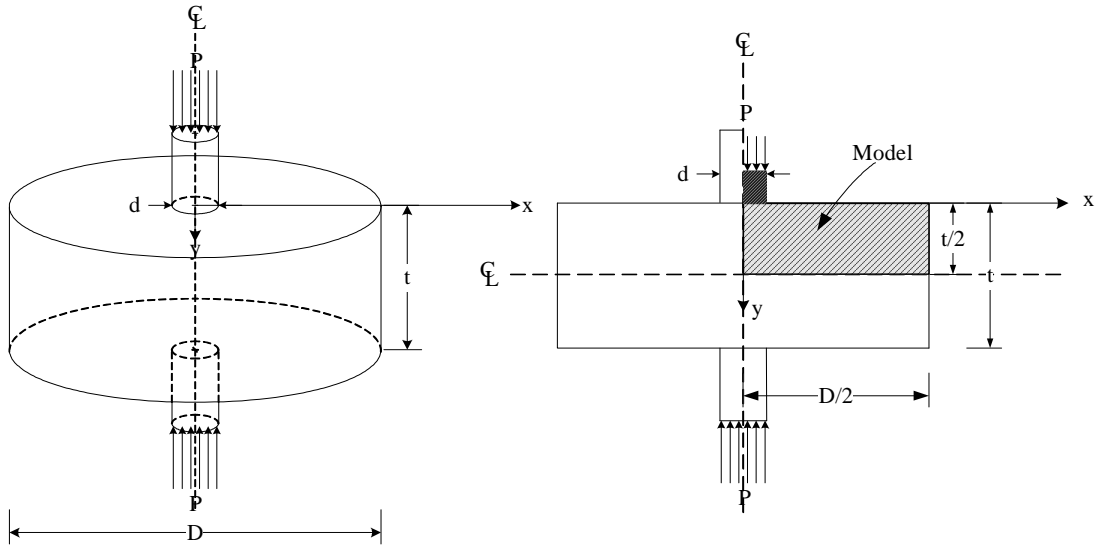
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

การคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินรูปแผ่นกลม (Circular disk) ที่มีขนาดต่างกัน ซึ่งแปรผันเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 48 mm ไปถึง 101 mm โดยที่อัตราส่วนความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด (t/d) มีค่าคงที่เท่ากับ 2 ที่ได้ทดสอบและตรวจวัดการยุบตัวของหัวกดตามค่าแรงกด โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นของจุดกด (ΔP) กับการเปลี่ยนแปลงการยุบตัวของหัวกด ($\Delta \delta$) ดังรูปในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนและการเปลี่ยนแปลงการยุบตัวของหัวกด ($\Delta P/\Delta \delta$) จากความชันของแผนภูมิในช่วงที่ปล่อยให้ค่าของความเค้นลดลง (Unloading curve)

รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิเคราะห์และสอบเทียบค่าคงที่ อีกทั้งยังสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันการยุบตัวต่ออัตราส่วนของขนาดตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งเลือกค่าที่มีอัตราส่วนของขนาดตัวอย่างหินต่อขนาดของหัวกดเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เนื่องจากตัวอย่างเกลือหินมีความสมมาตรในแนวตั้งและแนวนอน จึงจำลองเพียงแค่ ¼ ส่วนของตัวอย่างหินทั้งชิ้น ผลจากการคำนวณจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะได้ค่าอัตราส่วนของฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) ที่แสดงในฟังก์ชันของอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด (D/d) ดังรูปที่ 5.2 และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยการแทนค่า $\Delta P/\Delta \delta$ ที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบ

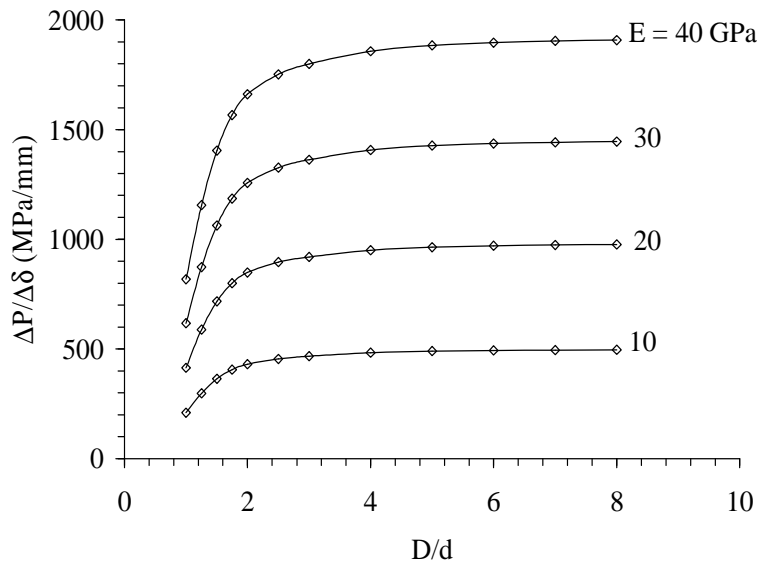
ตัวอย่างการคำนวณจากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยุบตัวของหัวกดของตัวอย่าง MS-MPC-02 สามารถตรวจวัดค่า $\Delta P/\Delta \delta$ ได้เท่ากับ 1007.1 MPa/mm (รูปที่ ก-1) จากขนาดของตัวอย่างหินที่มีค่าของ D/d เท่ากับ 2 สามารถนำค่า $\Delta P/\Delta \delta$ ไปแทนค่าในสมการที่ (5.1) โดยที่ α และ β คือค่าคงที่ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 5.3)

$$\Delta P/\Delta \delta = \alpha \cdot E + \beta \tag{5.1}$$

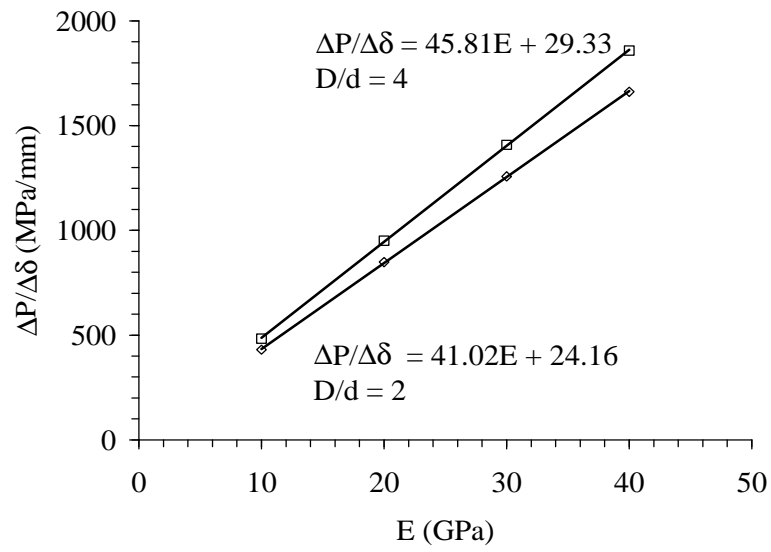


D = Specimen diameter d = Point load diameter
 P = Applied pressure t = Specimen thickness
 x = Horizontal distance from loading point
 y = Vertical distance from loading point

รูปที่ 5.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสอบเทียบค่าคงที่ ในตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกภายใต้จุดกดแบบปรับเปลี่ยน โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในการ คำนวณเชิงตัวเลขได้สรุปไว้ในรูปนี้ด้วย



รูปที่ 5.2 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) ได้นำมาแสดงในฟังก์ชันของ D/d



รูปที่ 5.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) ได้นำมาแสดงในฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E)

ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรสามารถคำนวณได้จาก $E = (1007.1-24.16)/41.02 = 23.9$ GPa โดยผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหินทั้ง 2 ขนาด ได้แสดงไว้ในบทที่ 4

5.2 การสอบเทียบ

ผลการทดสอบหาการคืบที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (MPL creep test) การทดสอบการคืบในสามแกน (Triaxial creep test) และการทดสอบการคืบในแกนเดียว (Uniaxial creep test) ถูกนำมาสอบเทียบ (Calibration) เพื่อหาค่าความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ประกอบกับการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ชั้นสูงในการคำนวณหาเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตัวแปรและค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องในการนำไปเปรียบเทียบผล

การทดสอบหาการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยน (MPL creep test) สามารถนำผลการทดสอบของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 และ 4 มาสอบเทียบ (Calibration) หาค่าความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน (ตารางที่ 5.1–5.2) โดยผู้วิจัยได้มีการพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ประกอบกับการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ชั้นสูง (FLAC) เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตัวแปรและค่าคงที่ที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 5.3–5.4) จากทั้งสองวิธีสำหรับนำไปเปรียบเทียบผล (รูปที่ 5.4) ในเบื้องต้น สมการเชิงคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการสอบเทียบมีการพัฒนามาจากสมการหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของ Tepnarong, 2001 (สมการที่ 5.2) จากนั้นได้มีการพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบของ Burgers ดังแสดงในสมการที่ (5.3)

$$E_{mpl} = \left(\frac{L}{\alpha_E}\right)\left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta}\right) \quad (5.2)$$

$$\Delta \delta(t) = \frac{L \Delta P}{\alpha_E} \left[\frac{1}{9K} + \frac{2}{3} \left[\frac{t}{\eta_1} + \left(\frac{1}{E_2} + \frac{(\eta_2 - 1)}{\eta_1 E_2} + \frac{(1 + \eta_2)}{E_1} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right) \right] \right] \quad (5.3)$$

โดยที่	$\delta(t)$	คือ การยุบตัวของตัวอย่างหินภายใต้การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนที่ขึ้นกับเวลา
	L	คือ ความหนาของตัวอย่างหิน
	ΔP	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่จุดกด
	α_E	คือ ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากระเบียบคำนวณเชิงตัวเลขทางคอมพิวเตอร์ (Tepnarong, 2001)
	K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ก้อน

ตารางที่ 5.1 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์

Test Method	Axial stress (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
MPL creep test (D/d = 2)	8	1.80	1.30	16.00	1.10
	10	1.80	1.30	11.00	1.00
	12	1.90	1.30	11.00	1.00
	14	1.80	1.20	4.50	0.80
	16	1.80	1.00	2.50	0.40
	Mean±SD	1.82±0.04	1.22±0.13	9.00±5.47	0.86±0.28

ตารางที่ 5.2 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 4 โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์

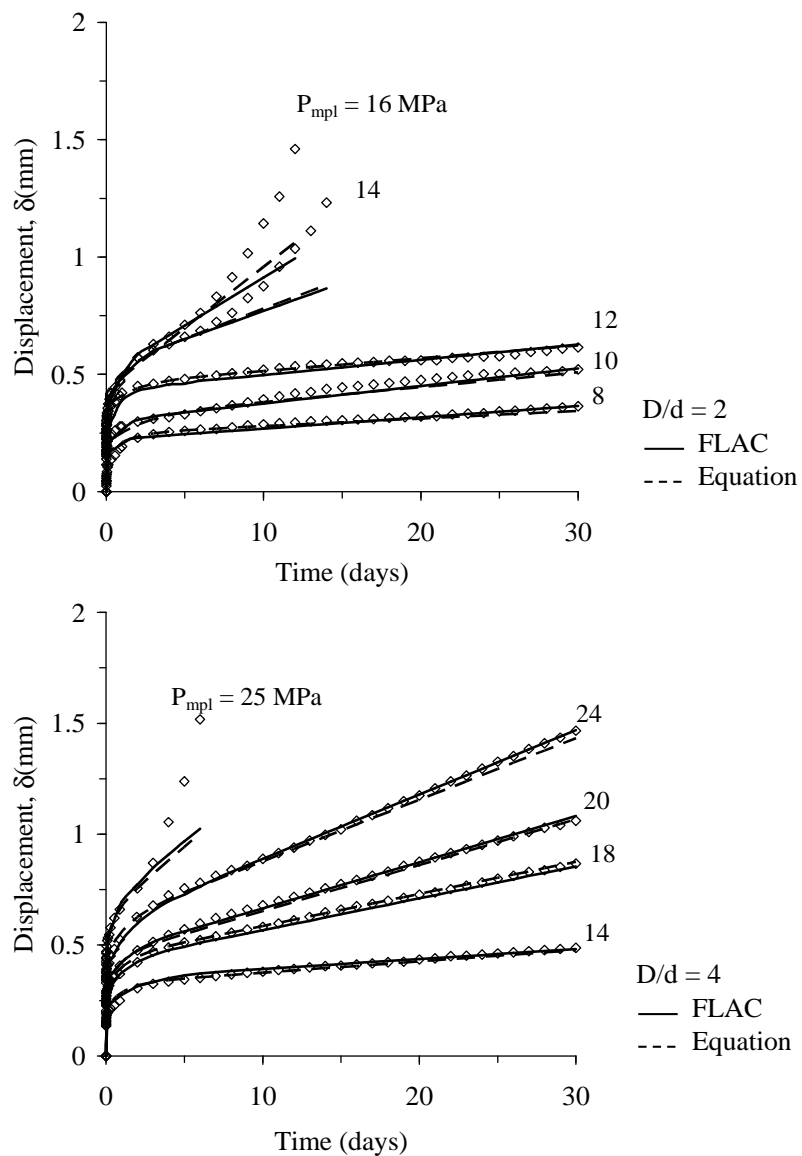
Test Method	Axial stress (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
MPL creep test (D/d = 4)	14	2.00	1.10	19.00	1.20
	18	1.90	1.10	9.00	0.80
	20	2.00	1.00	7.00	0.60
	24	1.90	1.00	5.60	0.60
	25	1.80	0.60	2.50	0.10
	Mean±SD	1.9±0.08	0.96±0.21	8.62±6.27	0.66±0.39

ตารางที่ 5.3 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC)

Test Method	Axial stress (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
MPL creep test (D/d = 2)	8	0.86	0.37	16.0	0.80
	10	0.86	0.27	14.9	0.76
	12	0.58	0.24	13.7	0.53
	14	0.58	0.20	3.0	0.40
	16	0.58	0.20	2.0	0.40
	Mean±SD	0.69±0.16	0.26±0.07	9.92±6.83	0.58±0.19

ตารางที่ 5.4 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 4 โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC)

Test Method	Axial stress (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
MPL creep test ($D/d = 4$)	14	0.81	0.37	14.90	0.72
	18	0.75	0.37	11.90	0.72
	20	0.75	0.37	4.40	0.74
	24	0.84	0.37	2.80	0.60
	25	0.66	0.38	1.51	0.49
	Mean \pm SD	0.76 ± 0.07	0.37 ± 0.004	7.10 ± 5.94	0.65 ± 0.11



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลจากการสอบเทียบค่าคงที่ระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) กับสมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 และ 4 ตามลำดับ

- K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ก้อน
 E_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
 E_2, η_2 คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น
 η_1 คือ ค่าความหนืดเชิงพลาสติก

ผลการทดสอบการคืบในสามแกน (Triaxial creep test) ของตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 54 mm และอัตราส่วน L/D เท่ากับ 2.0 ทั้งหมด 5 ตัวอย่าง นำไปสอบเทียบเพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ ซึ่งได้มีการพัฒนามาจากสมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Burgers (สมการที่ (5.4) โดยมีการพัฒนาความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ให้อยู่ในฟังก์ชันของความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) ผลที่ได้จากสอบเทียบค่าคงที่ของการทดสอบการคืบในสามแกนได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.5 และการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากการสอบเทียบค่าคงที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.5

$$\gamma_{oct} = \tau_{oct} \left[\frac{E_2 t}{\eta_1 \eta_2} - \frac{1}{\eta_1} (1 - \exp(\frac{-E_2 t}{\eta_2})) + (\frac{E_2}{\eta_2 E_1} + \frac{1}{\eta_2} + \frac{1}{\eta_1}) (1 - \exp(\frac{-E_2 t}{\eta_2})) + \frac{1}{E_1} \exp(\frac{-E_2 t}{\eta_2}) \right] \quad (5.4)$$

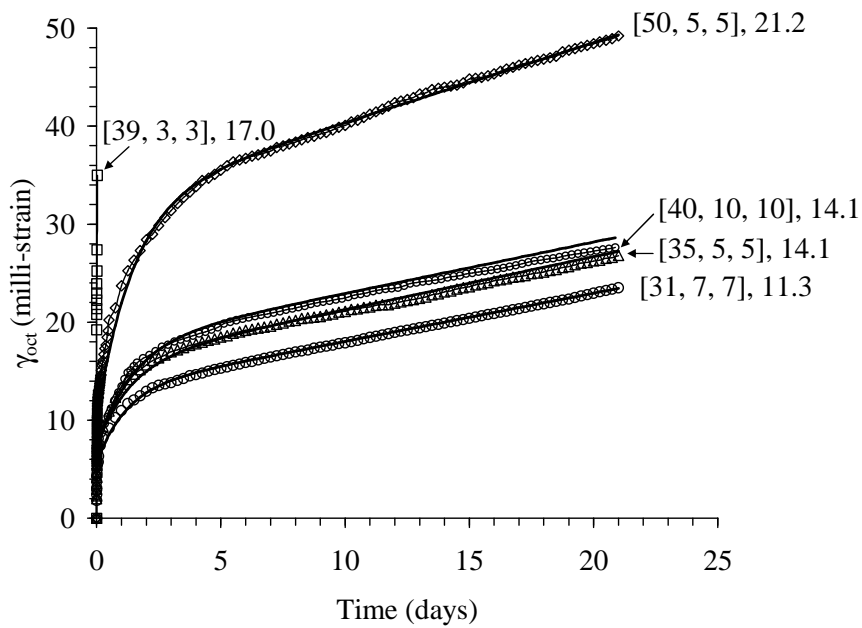
ผลการทดสอบการคืบในแกนเดียว (Uniaxial creep test) ของตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง นำไปสอบเทียบเพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน ซึ่งได้มีการพัฒนามาจากสมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Burgers (สมการที่ (5.5) โดยมีการพัฒนาความเครียดในเชิงเวลา ($\varepsilon(t)$) ในฟังก์ชันของความเค้นคงที่ (σ_0) ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ของการทดสอบการคืบในแกนเดียวได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.6 และการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากการสอบเทียบค่าคงที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.6

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right) \right] \quad (5.5)$$

ผลจากการสอบเทียบค่าคงที่ของการทดสอบทั้งสามรูปแบบที่กล่าวมานี้ สามารถนำไปเปรียบเทียบกันในแต่ละวิธีดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในสามแกน

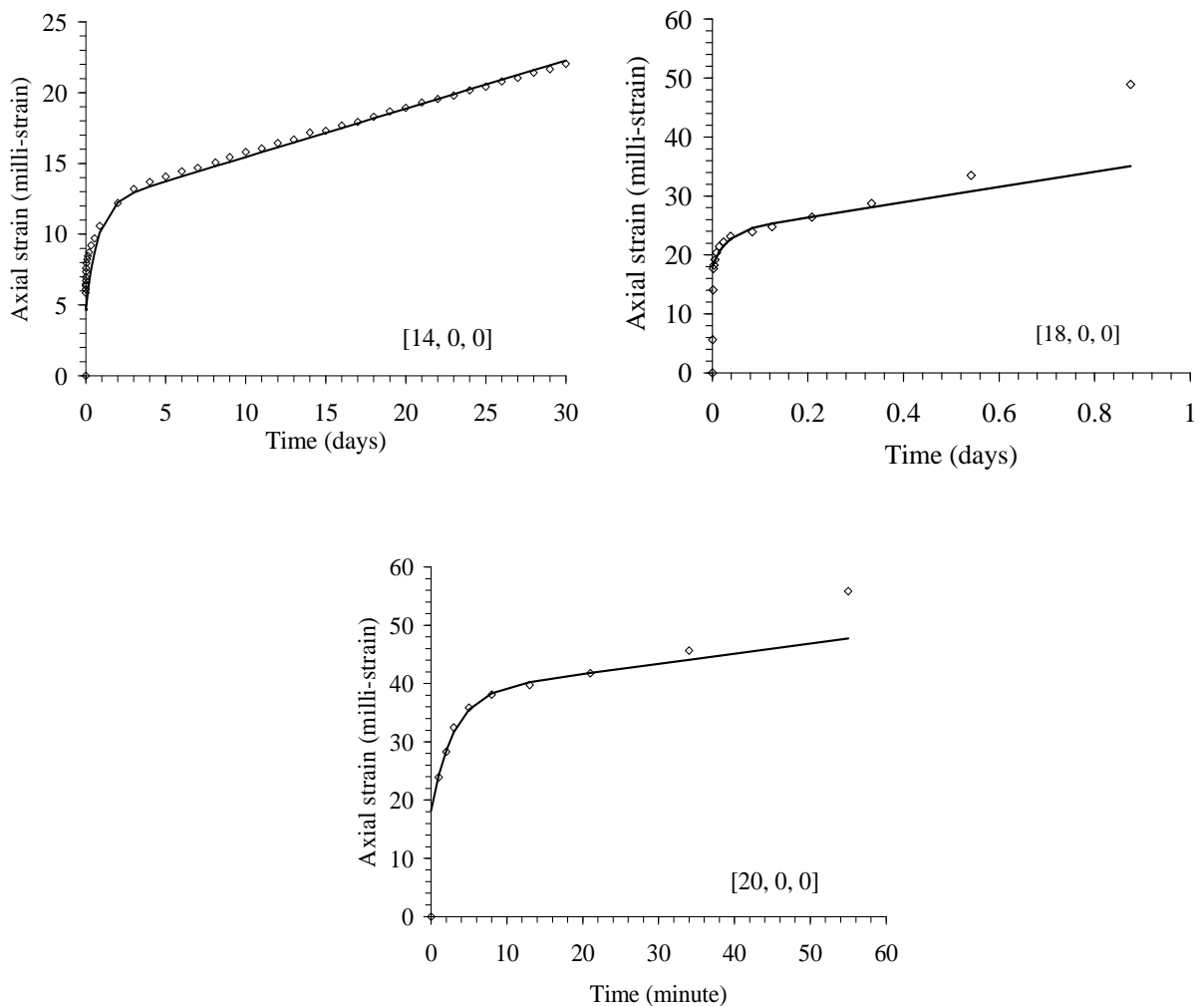
Test Method	Axial stress (MPa)	Confining pressure (MPa)	τ_{oct} (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
Triaxial creep tests	31	7	11.3	2.0	1.20	20.0	1.38
	35	5	14.1	1.9	0.98	19.0	1.35
	39	3	14.1	-	-	-	-
	40	10	16.9	2.0	0.78	19.0	1.10
	50	5	21.2	2.1	0.58	18.0	0.84
	Mean \pm SD				2.00 \pm 0.08	0.89 \pm 0.27	19.0 \pm 0.82



รูปที่ 5.5 การสอบเทียบค่าคงที่โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลื้อหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ซึ่งมีการผันแปรค่าความเค้นในแนวแกนและความเค้นล้อมรอบ ($[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3], \tau_{oct}$)

ตารางที่ 5.6 ผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในแกนเดียว

Test Method	Axial stress (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
Uniaxial creep test	14	3.00	1.90	40.00	1.40
	18	1.00	3.10	1.40	0.09
	20	1.10	1.00	0.08	0.002
	Mean \pm SD	1.70 \pm 1.13	2.00 \pm 1.05	13.83 \pm 22.68	0.50 \pm 0.78



รูปที่ 5.6 การสอบเทียบค่าคงที่ที่ใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของเกลื้อหิน ซึ่งมีการผันแปรความเค้นคงที่ในแนวแกนต่างๆ กัน ($[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$)

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบในแต่ละวิธี

Test Methods	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)
MPL Creep Test (D/d = 2)	1.82±0.04	1.22±0.13	9.00±5.47	0.86±0.28
FLAC (D/d = 2)	0.69±0.16	0.26±0.07	9.92±6.83	0.58±0.19
MPL Creep Test (D/d = 4)	1.90±0.08	0.96±0.21	8.62±6.27	0.66±0.39
FLAC (D/d = 4)	0.76±0.07	0.37±0.004	7.10±5.94	0.65±0.11
Uniaxial Creep Test	1.70±1.13	2.00±1.05	13.83±22.68	0.50±0.78
Triaxial Creep Test	2.00±0.08	0.89±0.27	19.0±0.82	1.17±0.30

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ คิดค้นวิธีการทดสอบแบบใหม่ที่มีราคาถูกลง รวดเร็ว แม่นยำ และง่ายกว่าวิธีเดิม เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบ ที่เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นและความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน โดยใช้การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน และยังมี การทดสอบการคืบในแกนเดียวและการคืบในสามแกน เพื่อสร้างข้อมูลกลศาสตร์พื้นฐานเพื่อหา ความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกที่ขึ้นกับเวลาไว้สำหรับเปรียบเทียบผล การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรซึ่งสามารถนำไปคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหิน ได้ โดยนำค่าที่คาดคะเนนั้นไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรใน แกนเดียว ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

การคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหินจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างเกลือหินขนาดต่างกันที่มีลักษณะเป็นรูป แผ่นกลม (Circular disk) ซึ่งผันแปรอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด มีค่า (D/d) คงที่เท่ากับ 2 และ 4 โดยที่อัตราส่วนความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกดมีค่า (t/d) คงที่เท่ากับ 2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร ด้วยการแทนค่าในกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทาง คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้อัตราส่วนของฟังก์ชันการยุบตัว $(\Delta P/\Delta \delta)$ ที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด (D/d) ผลที่ได้จากการคาดคะเนค่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่แท้จริงของเกลือหินจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบการกดแบบวัฏจักรในแกนเดียวซึ่ง เป็นวิธีดั้งเดิมแล้ว การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ของเกลือหินมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ผลจากการทดสอบการคืบของเกลือหินสามารถสอบเทียบหาค่าคงที่ของคุณสมบัติการ คืบได้ โดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของเกลือหินที่มีขนาด D/d เท่ากับ 2 และ 4 มาเปรียบเทียบกับกัน โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนในรูปแบบของ Burgers มาใช้ในการสอบเทียบ ผลที่ได้พบว่า ค่าคงที่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นและความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือ หินที่มีอัตราส่วน D/d เท่ากับ 2 มีแนวโน้มสูงกว่าเกลือหินที่มีอัตราส่วน D/d เท่ากับ 4 เล็กน้อยและ เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ของเกลือหินทั้งสองอัตราส่วนจากการสอบเทียบโดยใช้โปรแกรมทาง คอมพิวเตอร์ขั้นสูง (FLAC) ค่าที่ได้จากเกลือหินที่มีอัตราส่วน D/d เท่ากับ 4 ซึ่งมีแนวโน้มที่สูงกว่า

เกลื่อหินที่มีอัตราส่วน D/d เท่ากับ 4 เล็กน้อย แต่ก็พบว่าค่าที่ได้มานั้นมีความใกล้เคียงกันเนื่องจากมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่มาก นอกจากนี้เมื่อนำค่าที่ได้จากการสอบเทียบทั้งการทดสอบหาการคืบโดยใช้จุดกดแบบปรับเปลี่ยนของเกลื่อหินที่มีอัตราส่วน D/d เท่ากับ 2 และ 4 การทดสอบการคืบในแกนเดียวและการทดสอบการคืบในสามแกนมาเปรียบเทียบกันพบว่า ค่าคงที่ต่างๆ ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีความแตกต่างกันบ้างตรงที่ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของเกลื่อหินที่ได้จากการทดสอบการคืบในแกนเดียวและการทดสอบการคืบในสามแกนมีแนวโน้มสูงกว่าการทดสอบการคืบด้วยวิธีจุดกดแบบปรับเปลี่ยน ทั้งนี้อาจเกิดจากผลกระทบของขนาด (size effect) และวิถีความเค้นของตัวอย่างเกลื่อหิน อย่างไรก็ตามการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนซึ่งเป็นการทดสอบวิธีใหม่นี้ยังคงให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ ถูกต้อง รวดเร็วและสอดคล้องเมื่อเทียบกับการทดสอบแบบดั้งเดิม และยังสามารถทดสอบตัวอย่างหินได้หลายรูปแบบในเวลาอันสั้นทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นตัวแทนของมวลหินที่จะทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางธรณีวิทยาตามที่ต้องการ

บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การวิเคราะห์และออกแบบโครงที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยใช้วิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-46 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 82 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข รหัสโครงการ SUT7-719-42-12-16 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 44 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลายสำหรับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-59 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 130 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การค้นคว้าทางทฤษฎีและปฏิบัติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีจุดกดของหินกับความต้านแรงกดและแรงดึงของหิน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินด้วยการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจากลักษณะทางศิลาวิทยา รหัสโครงการ SUT-719-47-24-18, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 130 หน้า
- นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533, เกลือหินใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, หน้า 1-14.
- ปกรณ์ สุวานิช, 2521, แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 22, กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 24 หน้า.
- พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์, 2533, อิทธิพลของชั้นเกลือหินต่อสภาพดินเค็มในภาคอีสาน, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 15-25.
- ไพรัตน์ เจริญกิจ, 2544, แนวคิดการจัดการทรัพยากรเกลือหินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย, การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหะการและปิโตรเลียมครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 24-26 ตุลาคม 2544, กรุงเทพฯ, หน้า 1-5.

วารสารนิเวศวิทยปริทัศน์, 2543, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และ
สิ่งแวดล้อม, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม.

สมเกียรติ จันทรมหา, 2530, หน้าตาโดมเกลือใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากร
ธรณี ครั้งที่ 4 13-14 สิงหาคม 2530, สำนักงานเลขานุการกรม, กรมทรัพยากรธรณี, หน้า
301-317.

Allemandou, X. and Dusseault, M. B., 1996, Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results
and discussions, Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt,
Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp.
207-218.

ASTM D2664, 1998, Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core
specimens without pore pressure measurements, In Annual Book of ASTM Standards
Vol. 04.08.

ASTM D2938, 1998, Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core
specimens, In Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.08.

ASTM D3148, 1998, Standard test method for Elastic Moduli of intact rock core specimens in
uniaxial compression, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D4405, 1998, Standard test method for creep of cylindrical soft rock core specimens in
uniaxial compressions, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D4406, 1998, Standard test method for creep of cylindrical rock core specimens in triaxial
compression, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D4543, 1998, Standard practice for preparing rock core specimens and determining
dimensional and shape tolerances, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D5731, 1995. Standard test method for determination of the point load strength index of
rock, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D7012, 2007. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core
specimens, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09.

ASTM D7070, 2004, Standard test method for creep of rock core under constant stress and
temperature, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09.

Atkinson, B. K., and Meredith, P. G. (1987). Experimental fracture mechanics data for rocks and
minerals. In B. K. Atkinson (ed.). Fracture mechanics of rocks (pp. 477-525). San
Diego: California.

- Aubertin, M., 1996, On the physical origin and modeling of kinematic and isotropic hardening of salt, Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 1-18.
- Aubertin, M., Gill, D. E., and Ladanyi, B., 1992. Modeling the transient inelastic flow of rock salt. In Proceedings of the Seventh Symposium on Salt (vol. 1, pp. 93-104). Netherlands: Elsevier Science Pub.
- Aubertin, M., Julien M. R., Servant, S., and Gill, D. E., 1999. A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rocks. *Canadian Geotechnical Journal*. 36 (4): 660-674.
- Aubertin, M., Sgaoula, J. and Gill, D. E., 1993, Constitutive modeling of rocksalt: Basic considerations for semi-brittle behavior, Proc. Fourth Int. Symp. On Plasticity and It's Current Applications, Baltimore, pp. 92(1-4).
- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D. E., 1993. Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior. In Proceedings of the Fourth International Symposium on Plasticity and it's Current Applications (pp. 92). Baltimore.
- Barber, D. J., 1990, Regimes of plastic deformation processes and microstructure, An overview, *Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks*, Unwin Hyman, pp. 138-178.
- Baud, P., Zhu, W., and Wong, T. F., 2000. Failure mode and weakening effect of water on sandstone. *Journal of Geophysical Research*. 105: 16371-16389.
- Bell, F. G., 1978. The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones Northumberland England. *Engineering Geology*. 12: 1-29.
- Berest, P., Brouard, B. and Durup, G., 1998, Behavior of sealed solution-mined caverns, Proceedings Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 511-524.
- Bieniawski, P. W. and Bieniawski, Z. T., 1994, Design principles and methodology applied to solution mined salt caverns, Presented at the 1994 Spring Meeting in Houston, Texas, April 24-27, 1994.
- Billiotte, J., Guen, L. C., Deveughele, M and Brulhet, J, 1996, On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis-France), *Mechanical Behavior of Salt III*, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, September 14-16, 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany, pp. 221-230.

- Bonte, G., 1996, Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 263-267). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Boozer, G. D., Hiller, K. H., and Serdengecti, S., 1963, Effect of Pore fluids on the deformation behavior of Rock Subjected to Triaxial Compression. In Proceedings of the fifth Symposium on the Rock Mechanics (pp. 579-624). University of Minnesota. Golden, Colorado school of mines.
- Brace, W. F., 1961. Dependence of fracture strength of on grain size. In Proceedings of the Fourth Symposium on the Rock Mechanics (pp. 99-103). Pennsylvania University.
- Brace, W. F., and Riley, L., 1972. Static Uniaxial Deformation of 15 Rocks to 30 kb. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 9: 3939-3953.
- Brock, W. M. G. T., and Heilbron, H. C. 1998, Influence of salt behavior on the retrievability of radioactive waste, Proceedings Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Clausthal, Germany, Trans Tech Publications, pp. 561-573.
- Brown, E.T. (eds.) 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods. International Society for Rock Mechanics: Pergamon Press.
- Carter, N. L., and Hansen, F. D., 1983, Creep of rocksalt: a review. Tectonophysics. 92: 275-333.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E. and Handin, J., 1993, Rheology of rocksalt, Structural Geology, 15(10), pp. 1257-1272.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J., 1993. Rheology of rock salt. Structural Geology. 15 (10): 1257-1272.
- Chen, Z., Wang, M. L., and Lu, T., 1997, Study of Tertiary Creep of Rock Salt, Journal of engineering mechanics, Volume 123, Number 1, p. 77.
- Chokski, A. H., and Langdon, T. G., 1991. Characteristics of creep deformation in ceramics. Materials Science and Technology. 7: 577-584.
- Cleac'h, J. M. L., Ghazali, A., Deveughele, H., and Brulhet, J, 1996, Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behavior of various halitic rocks, Mechanical Behavior of Salt III, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, September 14-16, 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany, pp. 231-236.

- Cristescu, N. and Hunsche, U., 1996, A comprehensive constitutive equation for rock salt determination and application, Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 191-205.
- Cristescu, N. D., 1993, A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 2, Great Britain, pp. 125-140.
- Cristescu, N. D., 1996, Stability of large underground caverns in rock salt, North American rock mechanics, symposium 2nd, 1996 Jun, Montreal, Canada, A. A. Balkema, pp. 101-108.
- Cristescu, N., 1993, Constitutive equation for rock salt and mining applications, Seventh symposium on salt, Vol. 1, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., pp. 105-115.
- Cristescu, N., and Hunsche, U., 1996. A comprehensive constitutive equation for rock salt determination and application. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 191-205). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Crouch, S.L., 1972, A note on post-failure stress-strain path dependence in Norite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 9: 197-204.
- DeVries, K. L., Mellegard, K. D., and Callahan, G. D., 2002, Salt damage criterion proof-of-concept research. Topical report, DE-FC26-00NT41026 prepared for the U.S. Department of Energy. Pennsylvania.
- Farmer, I. W., 1983. Engineering Behavior of Rock (2nd ed.). New York: Chapman and Hall.
- Farmer, I. W., and Gilbert, M. J., 1984. Time dependent strength reduction of rock salt. In Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 3-18). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Fokker, P. A., 1995, The behavior of salt and salt caverns. Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.
- Fokker, P. A., 1998, The micro-mechanics of creep in rock salt. In Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 49-61). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Fokker, P. A., and Kenter, C. J., 1994. The micro mechanical description of rock salt plasticity. In Eurock'94 (pp. 705-713). Rotterdam: A.A. Balkema.

- Franssen, R. C. M. and Spiers, C. J., 1990, Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250-350°C, *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*, Geological Society Special Publication No. 45, pp. 201-213.
- Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen, 1988, "Borehole Closure in Salt," *Key Questions in Rock Mechanics: Proceedings of the 29th U.S. Symposium*, June 13-15, University of Minnesota, Minneapolis, pp. 191-198.
- Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen, 1992, "An Empirical Strength Criterion for Heterogeneous Tuff," *Engineering Geology: An International Journal*, Elsevier Science Publishing Co., Vol. 32, pp. 209-223.
- Fuenkajorn, K. and K. Wetchasat, 2001 "Rock Salt Formations as Potential Nuclear Waste Repository," Sixth Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering Conference, Chulalongkorn University, Bangkok, Oct. 24-26. (Published in CD Rom)
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Geohydrological Integrity of CAES in Rock Salt," *Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference*, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, CA, pp. 4.1-4.21.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1993, "Numerical Simulation of Strain-Softening and Dilation of Rocks Salt," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 30, pp. 1303-1306, presented at the 34th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 27-30, University of Wisconsin, Madison.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1994, "Dilation-Induced Permeability Increase around Caverns in Rock Salt," *Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium*, University of Texas at Austin, June 1-3, pp. 648-656.
- Fuenkajorn, K. and Tepnarong, P., 2001, Size and stress gradient effects on the modified point load strengths of Saraburi Marble. In 6th Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering Conference. Bangkok, Thailand
- Fuenkajorn, K., 1999, "Geohydrological Integrity of Storage Caverns in Salt Formations," *Symposium on Mineral, Energy and Water Resources of Thailand*, October 23-24, Chulalongkorn University, Bangkok, pp. 270-275.
- Fuenkajorn, K., 2002, Modified point load test determining uniaxial compressive strength of intact rock. In *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunneling Association of Canada*

- Fuenkajorn, K., 2002, "Design Guideline for Salt Solution Mining in Thailand," Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 13, No. 1, pp. 1-8.
- Fuenkajorn, K., and Jandakaew, M., 2003, Compressed-air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects. In Proceedings of the Thirty-Eighth Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering (pp. 377-391). University of Reno: Nevada.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D., and Jandakaew, M., 2003, Healing of rock salt fractures. In Proceedings of the Thirty-Eighth Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering (pp. 393-408). University of Reno: Nevada.
- Goodman, R. E., 1989, Introduction to Rock Mechanics. New York: John Wiley & Sons.
- Guangzhi, Y., He, L. and Xuefn, X., 1988, The effect of the stress path on strength of rock. In Proceedings of the Twenty Ninth U.S. Symposium on Rock Mechanics (pp. 95-101). Rotterdam: A. A. Balkema.
- Hadizadeh, J., and Law, R., 1991, Water Weakening of Sandstone and Quartzite Deformed at Various Stress and Strain Rates. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 28(5): 431-439.
- Hamami, M., Tijani, S. M., and Vouille, G., 1996, A methodology for the identification of rock salt behavior using multi-step creep tests. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 53-66). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Handlin, J., Russell, J. E., and Carter, N. L., 1984, Transient Creep of Repository Rocks. Final Report: Mechanistic Creep Laws for Rock Salts, BMI/ONWI-550, Prepared by Texas A & M research Foundation for Office of Nuclear Waste Isolation. Columbus, OH: Battelle Memorial Institute.
- Hansen, F. D., 1984, Physical and mechanical variability of natural rock salt. In Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 23-39). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hansen, F. D., Senseny, P. E., Pfeifle, T. W., and Vogt, T. J., 1987. Influence of impurities on creep of salt from the Palo Duro Basin. In Proceedings of the Twenty-Ninth U.S. Symposium on Rock Mechanics (pp. 199-206). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Hardy, H. R., 1982, Basic studies associated with the design of salt caverns for the storage of pressurized fluids, A.A. Balkema, Netherlands, pp. 903-921.

- Hardy, H. R., 1996, Application of the Kaiser effect for the evaluation old in-situ stress in salt. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt (pp. 85-100). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hoek, E., 1965, Rock fracture under static stress conditions. PhD Thesis, Cape Town University.
- Hunsche, U. and Schulze, O., 1996, Effect of humidity & confining pressure on creep of rock salt, Mechanical behavior of salt, Series on soil and rock mechanics, Vol. 20, Trans Tech Publications, pp. 237-248.
- Hunsche, U. E., 1993, Failure behaviour of rock salt around underground cavities, Seventh symposium on salt, Vol. 1, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., pp. 59-65.
- Inoue, A., Kawakami, H. and Fujii, T., 1998, The effect of loading path on mechanical responses of a glass fabric composite at low cyclic fatigue under tension/torsion biaxial loading. In American Society for Composite (ASC) the 13th Annual Technical Conference. Maryland.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). Fundamentals of Rock Mechanics. London: Chapman and Hall.
- Jandakaew, M., 2003, Experimental assessment of stress path effects on salt deformation. M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Jeremic, M. L., 1994, Rock Mechanics in Salt Mining (530 pp.). Rotherdam: A.A. Balkema.
- Kensakoo, T., Phueakphum, D. and Fuenkajorn F., 2007, Mechanical properties of Maha Sarakham salt as affected by inclusions, Proceedings of the First Thailand Rock Mechanics Symposium, Thailand, Sep. 12-13.
- Langer, M., 1984, The Rheological Behaviour of Rock Salt. In Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp.201-240). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Lee, D.H., Juang, C.H., Chen, J.W., Lin, H.M. and Shieh, W.H., 1999, Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 36: 857-870.
- Lindner, E. N., and Brady, B. H. G., 1984, Memory aspects of salt creep. In Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt (pp. 241-273). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

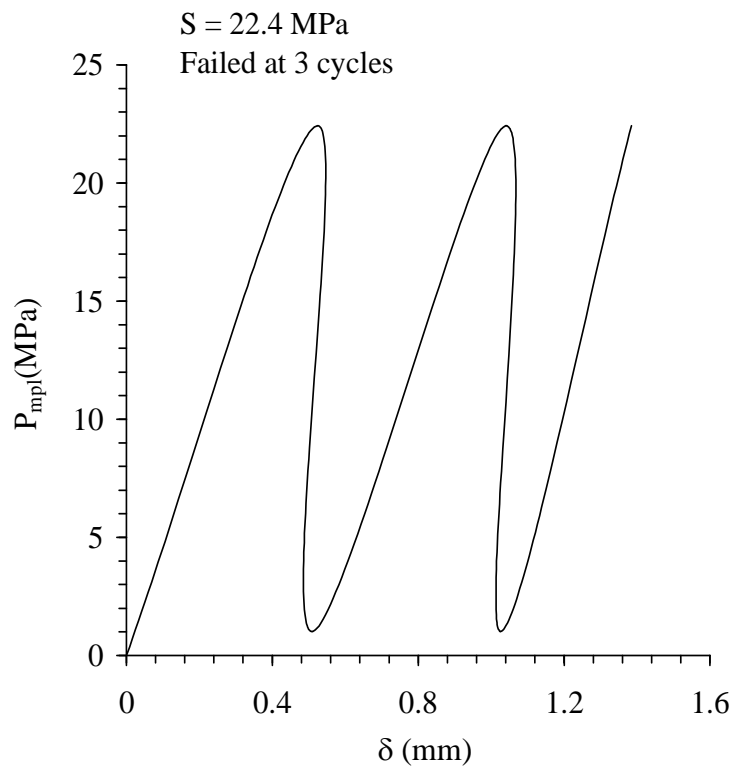
- Lux, K. H., and Heusermann, S., 1983, Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for the Verification of Theoretical Material Laws. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Salt (Vol. 1, pp. 417-435). Alexandria, VA: Salt Institute.
- Lux, K. H., and Rokahr, R., 1984, Laboratory investigations and theoretical statements as a basis for the design of cavern in rock salt formation. In Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt (pp. 169-179). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Millar, D.L. & Calderbank, P.A. (1995) On the Investigation of a Multilayer Feedforward Neural-Network Model of Rock Deformability Behavior, Proc. 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo (eds. Fujii, T.), Rotterdam: Balkema, pp. 933-938.
- Mirza, U. A., 1984, Prediction of creep deformations in rock salt pillars. In Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 311-337). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Mirza, U. A., Potts, E. L. J., and Szeki, A., 1980, Influence of Volume on Creep Behavior of Rock Salt Pillars. In A. H. Coogan and L. Hauber (eds). In Proceedings of the Fifth International Symposium on Salt (pp. 379-392). Cleveland, Ohio: The Northern Ohio Geological Society.
- Munson, D. E., and Dawson, P. R., 1984, Salt Constitutive Modeling Using Mechanism Maps. In Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt (pp. 717-737). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Munson, D. E., and Wawersik, W. R., 1993, Constitutive modeling of salt behavior - State of the technolog. In Proceedings of the Seventh International Congression of the Rock Mechanics (vol. 3, pp. 1797-1810). A.A. Balkema.
- National Bureau of Standard Monograph 167., 1981, Physical Properties Data for Rock Salt. Washington: U.S. Government printing office.
- Olsson, W. A., 1974, Grain Size Dependence of Yield Stress in Marble. Journal of Geophysics Research. 79(32): 4859-4862.
- Onodera, T. F., and Asoka Kumara, H. M., 1980, Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. Bulletin of the International Association for Engineering Geology. 22: 173-177.

- Peach, C. J., 1996, Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 153-166). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Phueakphum, D., 2003, Compressed-air energy storage in rock salt of the Maha Sarakham Formation. M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Plookphol, T., 1987, Engineering properties of the evaporite in the Khorat Plateau. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Raj, S. V. and Pharr, G. M., 1992, Effect of temperature on the formation of creep substructure in sodium chloride single crystal, *American Ceramic Society*, 75 (2), pp. 347-352.
- Schneefub, J., Droste, J., 1996, Thermomechanical effects in backfilled drifts, Mechanical Behavior of Salt III, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, September 14-16, 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany, pp. 373-380
- Senseny, P. E., 1984, Specimen size and history effects on creep of salt. In Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt (pp. 369-379). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Senseny, P. E., Handin, J. W., Hansen, F. D. and Russell, J. E., 1992, Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 29, no.4, pp. 363-378.
- Serata S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Formulation of A Constitutive Equation for Salt," Proc. Seventh International Symposium on Salt, April 6-9, Kyoto, Japan, published by Elsevier Science Publishers, B.V, Amsterdam, Vol. 1, pp. 483-488.
- Stormont, J.C. and K. Fuenkajorn, 1994, "Dilation-Induced Permeability Changes in Rock Salt," Proc. 8th International Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, West Virginia, May 22-28, pp. 1296-1273.
- Swanson, S.R. and Brown, W.S., 1971, An observation of loading path independence of fracture in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 8: 277-281.
- Tepnarong, P., 2001, Theoretical and experimental studies to determine compressive and tensile strengths of rocks, using modified point load testing. M.Eng. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

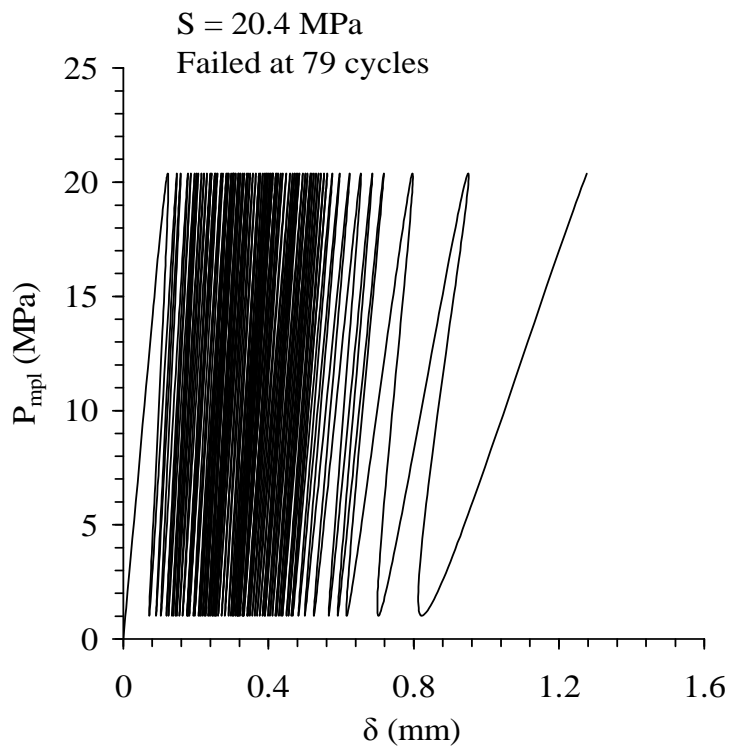
- Tepnarong, P., 2002, Theoretical and experimental studies to determine compressive and tensile strengths of rocks, using modified point load testing. M.S. Thesis, School of Geotechnology, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Tepnarong, P., 2007, Estimation of Triaxial Compressive Strength of Rocks using Modified Point Load Testing, Proceedings of the First Thailand Rock Mechanics Symposium, Thailand, Sep. 12-13.
- Tepnarong, P., and Fuenkajorn, K., 2004, Determination of elasticity and strengths of intact rocks using modified point load test. In Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ASRM, Vol. 2 (pp 397-392). Millpress, Rotterdam.
- Varo, L., and Passaris, E. K. S., 1977, The Role of Water in the Creep Properties of Halite. In Proceedings of the Conference on Rock Engineering (pp. 85-100). University of Newcastle upon Tyne. England.
- Versluis, S., and Lindner, E., 1984, Geotechnical behaviour of salt under repository conditions: Radioactive waste management. In Proceedings of an International Conference (Vol. 3, pp. 433-441). Seattle, Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D., and Saluja, S. S., 1974, Handbook on Mechanical Properties of Rocks (Vol. 1). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Watchasat, K., 2002, Assessment of Mechanical Performance of Rock Salt Formations for Nuclear Waste Repository in Northeastern Thailand, M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima, Thailand, 178 pp.
- Wawersik, W. R., 1988, Alternatives to a power-law creep model for rock salt at temperatures below 160 °C. In Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 103-126). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Wawersik, W. R., and Hannum, D. W., 1980, Mechanical behavior of New Mexico rock salt in triaxial compression up to 200 °C. *Journal of Geophysical Research*. 85: 891-900.
- Wawersik, W. R., and Preece, D. S., 1981, Creep testing of salt-procedure, problems and suggestions. In Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt (pp. 421-449). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Yahya, O. M. L., Aubertin, M., and Julien, M. R., 2000, A unified representation of the plasticity: Creep and relaxation behavior of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 37(5): 787-800.

ภาคผนวก ก

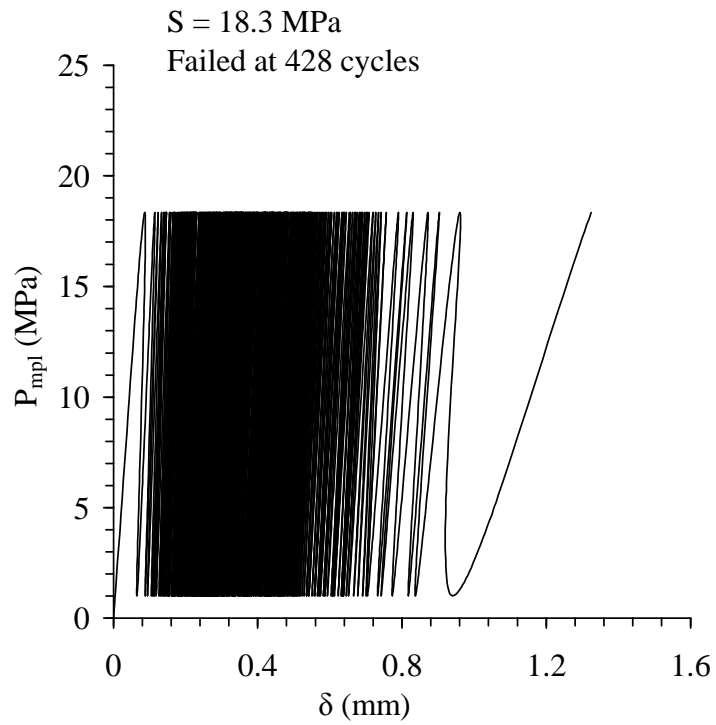
ผลการทดสอบจุดกวดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร



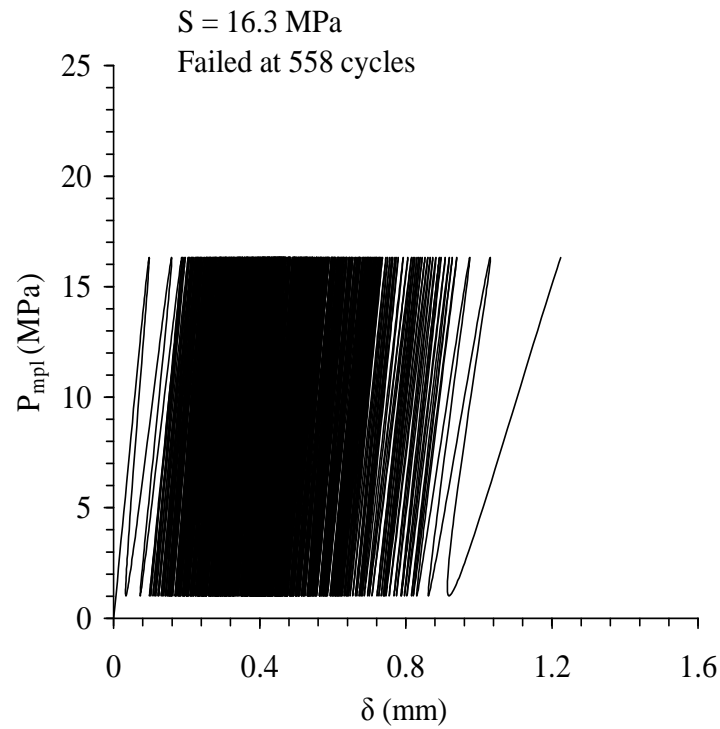
รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 22.4 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm



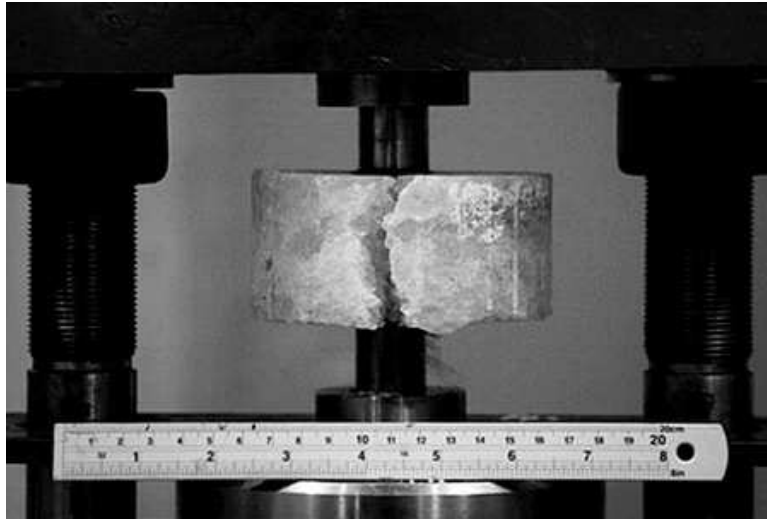
รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 20.4 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm



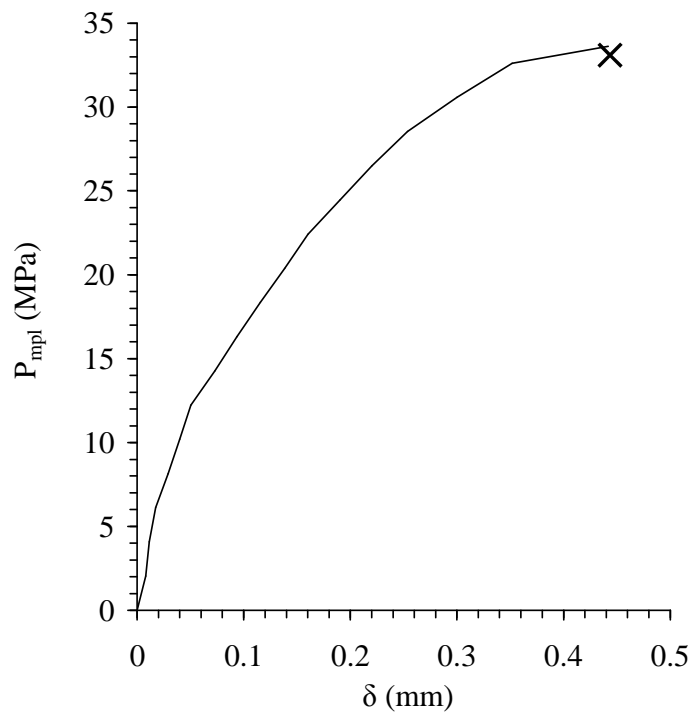
รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุด
เท่ากับ 18.3 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm



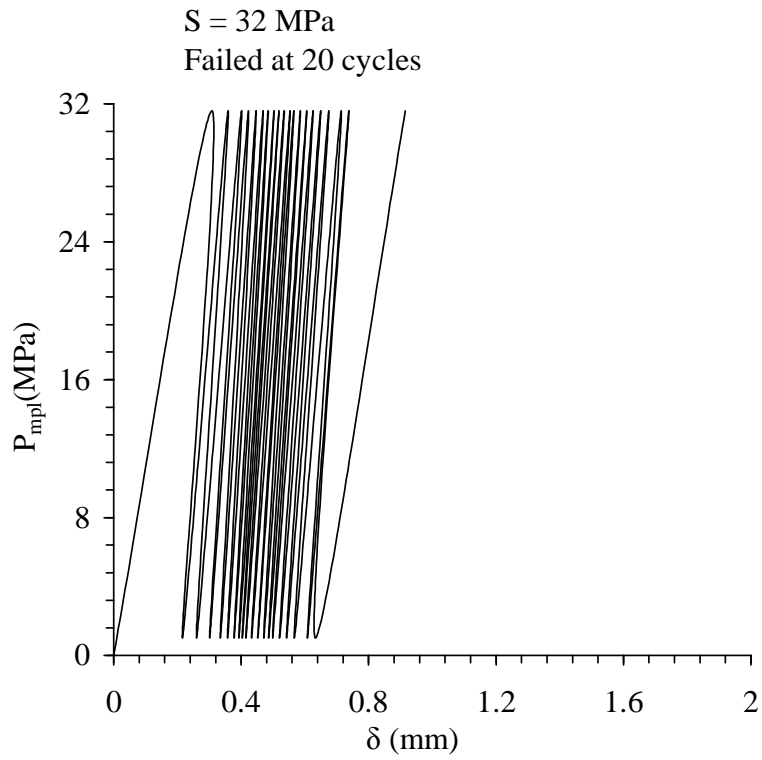
รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุด
เท่ากับ 16.3 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm



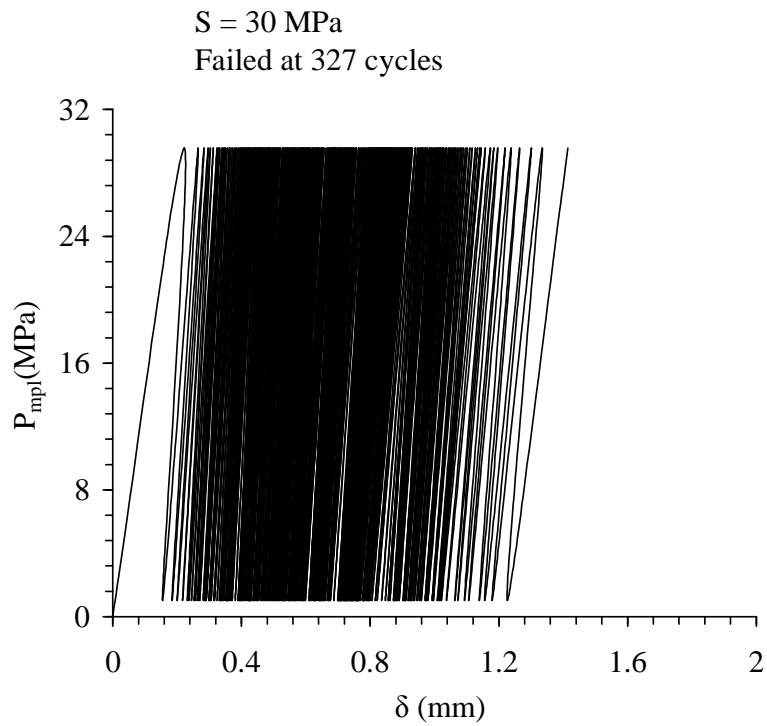
รูปที่ ก-5 ตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm และมีความหนาของตัวอย่างหินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด (t/d) เท่ากับ 2



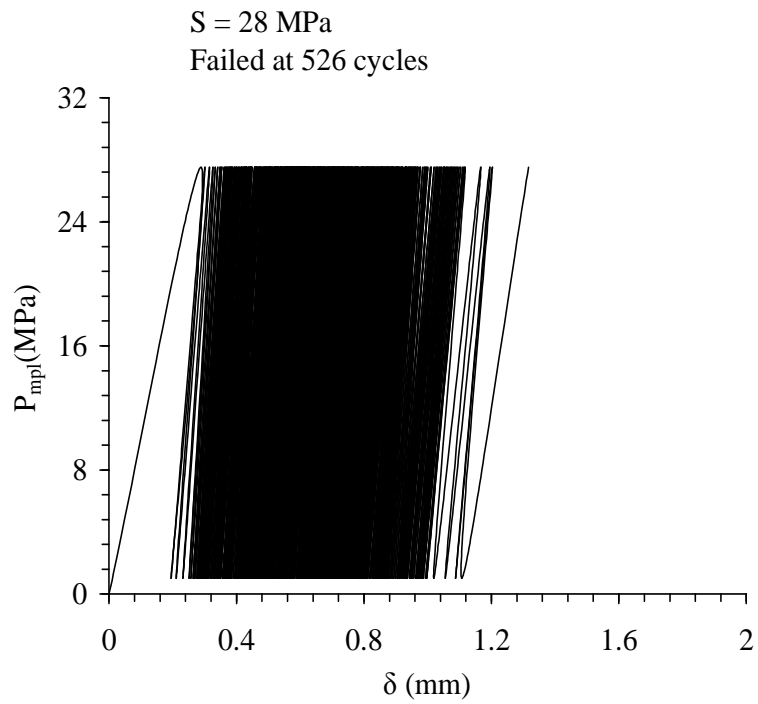
รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลือหิน โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



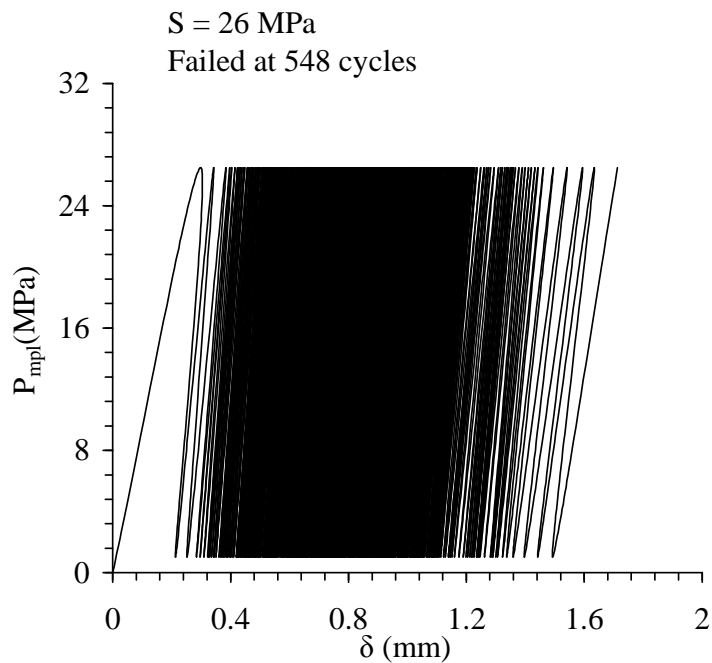
รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 32 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ 30 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



รูปที่ ก-9 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุด เท่ากับ 28 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



รูปที่ ก-10 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักรด้วยความเค้นกดสูงสุด เท่ากับ 26 MPa โดยตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



รูปที่ ก-11 ตัวอย่างเกลื่อหินหลังจากการทดสอบจุกกดแบบปรับเปลี่ยนแบบวัฏจักร
มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101 mm



รูปที่ ก-12 ตัวอย่างเกลื่อหินขณะทดสอบการคืบในแกนเดียวซึ่งมีขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$



รูปที่ ก-13 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบการคืบในแกนเดียวซึ่งมีขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$



รูปที่ ก-14 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm

ประวัตินักวิจัย

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