



รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-10

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน

(True Triaxial Creep Test of Rock Salt)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-10

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน

(True Triaxial Creep Test of Rock Salt)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 และ 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2554

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 และ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2554



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหินชุดมหาสารคาม เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อพฤติกรรมเชิงเวลาของหิน โครงกวดทดสอบในสามแกนจริงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ความเค้นกวดที่คงที่ในสามแกนต่อตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $5.4 \times 5.4 \times 5.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติผันแปรจาก 5, 8, 11 ถึง 14 MPa ในขณะที่ค่าความเค้นเฉลี่ยจะปรับให้คงที่เท่ากับ 15 MPa สำหรับทุกตัวอย่าง สภาวะการให้แรงมีสามรูปแบบคือ การกวดในสามแกน การกวดในหลายแกน และการกวดแบบยึดในสามแกน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างถูกตรวจวัดในแนวแกนหลักเชิงเวลาต่อเนื่องถึง 21 วัน เมื่อนำผลจาก Burgers Model มาเทียบเคียงผลในเชิงสถิติในรูปแบบของความเครียดเฉือนในสามแกนต่อเวลาพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกลือหินโดยฉับพลันและการเปลี่ยนรูปร่างแบบความหนืดเชิงยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับการผันแปรของค่าความเค้นหลักกลาง อย่างไรก็ตามภายใต้ความเค้นเฉือนในสามมิติที่เท่ากัน ปัจจัยความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นหลักกลางเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อหาค่าการหดตัวของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บพลังงานอากาศอัดในชั้นเกลือหิน ผลที่ได้ระบุว่าผลการทดสอบการคืบของเกลือหินแบบสามแกนภายใต้แรงกวด (แบบดั้งเดิม) จะให้ค่าการหดตัวของโพรงเกลือในเชิงเวลาสูงกว่าการหดตัวของโพรงเกลือในสภาวะจริงที่จำลองจากผลการทดสอบในสภาวะการคืบแบบยึดตัวและแบบหลายแกน

Abstract

True triaxial creep tests have been performed to determine the effects of the intermediate principal stress on the time-dependent behaviour of the Maha Sarakham salt. A polyaxial load frame has been developed to apply constant principal stresses to cubical specimens with nominal dimensions of $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$. The applied octahedral shear stresses (τ_{oct}) vary from 5, 8, 11 to 14 MPa while the mean stress (σ_m) is maintained constant at 15 MPa for all specimens. The loading conditions includes triaxial compression ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$), polyaxial ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), and triaxial extension ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$). The specimen deformations are monitored along the three principal axes for up to 21 days. Based on the Burgers model regression analyses on the octahedral shear strain-time curves indicate that the instantaneous and visco-elastic deformations of the salt tend to be independent of the intermediate principal stress (σ_2). Under the same τ_{oct} the visco-plastic parameter of the salt increases with σ_2 . Finite difference analyses are performed to determine the time-dependent closure of a single isolated caverns used for compressed-air energy storage. Comparison of the cavern closures predicted by the creep parameters calibrated from different test conditions indicates that the (conventional) triaxial compression creep testing over-estimates the creep deformation of the in-situ salt that subjects to triaxial extension and polyaxial conditions.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	2
1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	5
2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	8
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	15
3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	15
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	15
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	21
4.1 การเตรียมโครงกดทดสอบในสามแกนจริง.....	21
4.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง.....	24
4.2.1 วิธีการทดสอบ.....	24
4.2.2 ผลการทดสอบ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดสอบการคืบในสามแกนจริง.....	24
4.3.1 วิธีการทดสอบ.....	24
4.3.2 ผลการทดสอบ.....	30
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการแตกในสามแกนจริง.....	39
5.1 การคำนวณความยืดหยุ่นของเกลื้อหิน.....	39
5.2 เกณฑ์การแตก.....	42
5.2.1 เกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook.....	42
5.2.2 เกณฑ์การแตกของ Mogi.....	43
5.2.3 เกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown.....	43
5.2.4 เกณฑ์การแตกของ Modified Lade criterion.....	46
5.2.5 เกณฑ์การแตกของ Coulomb criterion.....	48
5.2.6 เกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager.....	48
5.3 ความสามารถในการคาดคะเนผลการทดสอบ.....	54
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริง.....	57
6.1 แบบจำลองของ Burgers.....	57
6.2 การสอบเทียบค่าคงที่ของ Burgers.....	59
บทที่ 7 การจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลื้อ.....	63
7.1 คุณลักษณะของการจำลอง.....	63
7.2 ผลการจำลอง.....	63
บทที่ 8 บทสรุป.....	69
บรรณานุกรม.....	71
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง.....	17
3.2 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบการคืบในสามแกนจริง.....	18
4.1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง.....	26
4.2 ปัจจัยการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน.....	32
5.1 คุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริง.....	40
5.2 ค่าคุณสมบัติของเกลือหินที่คำนวณได้จากแต่ละเกณฑ์การแตก.....	53
5.3 ค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูลสำหรับแต่ละเกณฑ์การแตกที่ศึกษาในงานวิจัยนี้.....	55
6.1 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง.....	61
7.1 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ของโพรงในแบบจำลอง.....	64

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่.....	7
3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยล้อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบ ในสามแกนจริง.....	16
3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและ การคืบในสามแกนจริง.....	19
4.1 โครงกกดทดสอบในสามแกนจริง.....	22
4.2 องค์ประกอบของโครงกกดทดสอบในสามแกนจริง.....	22
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ใน การคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง.....	23
4.4 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบในระดับความเค้นที่ต่างกัน.....	25
4.5 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน.....	27
4.6 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน.....	28
4.7 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน.....	29
4.8 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง.....	31
4.9 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oc} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน.....	33
4.10 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน.....	34
4.11 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน.....	35
4.12 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้ สภาวะความเค้นที่แตกต่างกัน.....	37
5.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของเกลือหินในฟังก์ชันของความเค้นหลักกลาง.....	41
5.2 เกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 เกณฑ์การแตกของ Mogi เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	45
5.4 เกณฑ์การแตกของHoek & Brown เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	47
5.5 เกณฑ์การแตกของ Coulomb เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	49
5.6 เกณฑ์การแตกของ Modified Lade เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	50
5.7 เกณฑ์การแตกของ Circumscribed Drucker–Prager เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ.....	52
6.1 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers.....	58
6.2 ผลจากสอบเทียบค่าคงที่โดยใช้แบบจำลองของ Burgers ภายใต้สภาวะความเค้นต่างกัน ซึ่งความเครียดในแนวเฉือนแสดงในฟังก์ชันของเวลา.....	60
6.3 ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers แสดงในฟังก์ชันของสภาวะความเค้นต่างๆ.....	62
7.1 การจำลองช่องเหมืองและโพรงในชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC).....	64
7.2 จุดที่ผนังโพรงในการนำมาพิจารณาการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ในแต่ละสภาวะความเค้นต่างๆ.....	65
7.3 อัตราการยุบตัวของเกลือหินรอบโพรง (ร้อยละ) ที่สภาวะความเค้นต่างกันแสดงในฟังก์ชันของเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลอง FLAC.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทดสอบพฤติกรรมการคืบ (Creep behavior) ของเกลือหินในรูปแบบสากล โดยทั่วไปจะถูกจำกัดโดยให้ความเค้นกลาง σ_2 และความเค้นต่ำสุด σ_3 มีค่าเท่ากัน คือ เป็นแบบ Triaxial creep test (ASTM D7070-08) โดย σ_1 จะมีค่าความเค้นสูงสุดในแนวแกน ความเค้นทั้งสามทิศทางจะถูกออกแบบให้คงที่สำหรับตัวอย่างหินแต่ละก้อน และมีการตรวจวัดความเครียดในแนวแกนและในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงไปตามฟังก์ชันของเวลา สภาวะความเค้นดังกล่าวจะต่างกับความเค้นจริงในภาคสนาม กล่าวคือ โครงสร้างใต้ดินทั่วไป $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ซึ่งส่งผลให้ค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบแบบสากลไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนพฤติกรรม การคืบหรือการเปลี่ยนรูปร่างตามเวลาของเกลือหินได้อย่างแท้จริง ด้วยเหตุนี้การทดสอบใน สภาวะที่ความเค้นหลักไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางจึงเป็นสิ่งจำเป็น เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ การ ทดสอบความเค้นลักษณะนี้ไม่แพร่หลาย เพราะการทดสอบจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่สามารถให้ แรงกดในสามทิศทางที่ไม่เท่ากัน เช่น Polyaxial creep frame หรือ True triaxial creep frame เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบที่ได้จากสภาวะความเค้นที่ไม่เท่ากันจะสอดคล้องเป็นอย่าง ดีกับสภาวะความเค้นจริงในภาคสนาม และจะสามารถนำผลตรวจวัดที่ได้มาสอบเทียบค่าปัจจัย ในสมการควบคุมพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ (Constitutive Equations) ของเกลือหินได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติการคืบ (Creep) ของ เกลือหินที่อยู่ภายใต้ความเค้นหลัก 3 ทิศทางที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะสอดคล้องกับ สภาวะจริงในภาคสนาม ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบการคืบแบบดั้งเดิมเพื่อ ตรวจสอบความแม่นยำของสมการควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ขนาดของตัวอย่างเกลือหินคือ $54 \times 54 \times 54 \text{ mm}^3$ เป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 2) ระยะเวลาของการกักภายใต้ความเค้นระดับที่ต่างๆ จะไม่ต่ำกว่า 15 วัน และไม่ เกิน 30 วันต่อหนึ่งตัวอย่างหิน

- 3) มีการทดสอบตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 8 ตัวอย่าง ภายใต้ความเค้นกด σ_1 , σ_2 และ σ_3 ที่ต่างกัน
- 4) มีการเปรียบเทียบผลของการคืบ (การเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา) ระหว่างการทดสอบในงานวิจัยนี้กับการทดสอบแบบดั้งเดิมที่ได้ดำเนินการมาแล้ว
- 5) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง
- 6) มีการสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงเวลาในสามแกนจริง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เพื่อที่จะให้ความเค้นในสามทิศทางที่ต่างกันต่อตัวอย่างเกลือหินจึงต้องมีการจัดเตรียมเกลือหินเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมขนาด $54 \times 54 \times 54 \text{ mm}^3$ (แทนที่จะเป็นแท่งทรงกระบอกดังที่ใช้ในอดีต) โดยที่ด้านยาวทั้ง 4 ด้าน จะมีความเค้น σ_2 และ σ_3 ที่ไม่เท่ากันกดอยู่อย่างคงที่ ส่วนด้านกว้างจะมี σ_1 ให้ความเค้นคงที่สูงกว่าด้านยาว ความเค้นคงที่ดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมเพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าความเครียดในสามทิศทางได้อย่างแม่นยำในเชิงเวลา และนำไปสอบเทียบกับสมการควบคุมเพื่อคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ที่เป็นคุณสมบัติของเกลือหิน เช่น ค่าความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วน Poisson's ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น และค่าความหนืดเชิงพลาสติก เพื่อให้การสอบเทียบนี้เป็นไปอย่างครอบคลุมและแม่นยำ ในการทดสอบจะมีการใช้ค่าความเค้น σ_1 , σ_2 และ σ_3 ในแต่ละแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ต่างกันหลายระดับ ซึ่งสมการควบคุมที่สอบเทียบได้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินในเชิงเวลาได้อย่างครอบคลุมและสมบูรณ์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมวิจัย

เอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินได้ถูกค้นคว้าและทบทวน รวมไปถึงเอกสารการประชุม วารสาร และรายงานวิชาการผลที่ได้ได้สรุปไว้ในบทถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

บริษัท เกลือพิมาย จำกัด ได้ให้ความอนุเคราะห์แท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 4 เมตร จากนั้นนำมาตัดและฝนให้มีขนาด $54 \times 54 \times 108 \text{ mm}^3$ อย่างน้อย 40 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3 การจัดเตรียมเครื่องกดในสามแกนจริง

ในขั้นตอนนี้ได้นำเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial Load Frame) ที่มีอยู่มาดัดแปลงเพื่อให้แรงกดคงที่ในเชิงเวลาทั้งสามแกน จากนั้นทำการอัดแรงดันน้ำมันจาก Pressure Intensifier ส่งเข้าไปใน Load Cell เพื่อกดตัวอย่างหินในแนวแกน (σ_1) ส่วนความเค้นด้านข้างทั้งสองด้านจะใช้ระบบคาน ซึ่งมีอยู่แล้วในเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง ด้วยการปรับเปลี่ยนดังกล่าว σ_1 จะสามารถให้ความเค้นสูงถึง 100 MPa ส่วน σ_2 และ σ_3 จะจัดให้มีค่าไม่เท่ากันและให้ความเค้นสูงถึง 50 MPa

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบ

การทดสอบเริ่มต้นจากการสอบเทียบ (Calibration) ค่าแรงกดและการเคลื่อนตัวในสามทิศทางของเครื่องกดทดสอบ การกดตัวอย่างเริ่มจากการให้แรงในสามทิศทางเท่ากัน (Hydrostatic) เพื่อให้ตัวอย่างเกลียวหินเข้าสู่สภาวะความเค้นเหมือนกับในภาคสนาม จากนั้นจึงลดค่าความเค้นด้านข้างด้านหนึ่งเพื่อจำลองสภาวะ σ_3 และเพิ่มความเค้นในแนวแกน เพื่อจำลอง σ_1 จากนั้นทำการวัดค่าความเครียดทั้งสามแกนที่เกิดขึ้นตามเวลา โดยทำการทดสอบทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ภายใต้ชุดของความเค้น ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) ที่ต่างกัน โดยใช้เวลาในการทดสอบ 21 วัน อย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบได้นำไปใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ในสมการควบคุม (Governing Equations) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถรองรับการผันแปรของความเค้นและความเครียดในเชิงเวลาในสามแกนได้พร้อมๆ กับชุดของค่าคงที่ คุณสมบัติที่สำคัญได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบ $\sigma_2 = \sigma_3$ (Triaxial Creep Test) เพื่อหาความเป็นเหตุเป็นผลและเพื่อปรับปรุงสมการควบคุมเหล่านี้ต่อไป คุณสมบัติที่สำคัญคือ สัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) ความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic) และค่าความเครียดวิกฤต (Critical shear strain) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 การจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือ

โปรแกรม FLAC (Finite Difference) ถูกนำมาใช้ในการจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือในชั้นเกลือหิน การจำลองได้ใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่สอบเทียบมาจาก 2 วิธีการทดสอบคือ จากการกดในสามแกนจริง (ในงานวิจัยนี้) และจากการกดในสามแกนแบบดั้งเดิม (จากงานวิจัยที่ผ่านมา) ความคล้ายคลึงและความแตกต่างที่ได้จากการจำลองได้ถูกนำมาวิเคราะห์และศึกษาเพื่อนำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุป ได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์เล่มนี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 8 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

ผลการวิจัยจะนำเสนอในการประชุมระดับชาติหรือระดับนานาชาติและจะตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติหลังจากสิ้นสุดโครงการ

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

องค์ความรู้ทางด้านการเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา (Creep) ของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดในสามแกนที่มีค่าไม่เท่ากัน จะเป็นองค์ความรู้ใหม่สำหรับประเทศไทย หน่วยงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แก่ภาคเอกชน (บริษัทเหมืองเกลือต่างๆ) ภาครัฐ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรรมชาติและสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่เปิดสอนทางด้านกลศาสตร์หินและกลศาสตร์วัสดุธรณีวิทยา องค์ความรู้นี้จะนำไปสู่การออกแบบช่องเหมืองและโพรงเกลือที่เหมาะสม เพราะผลที่ได้จะสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าคงที่ในการควบคุมได้อย่างสมจริงและสอดคล้องกับสภาวะในภาคสนาม

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้เสนอผลสรุปที่ได้จากการทบทวนและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบหรือการเคลื่อนไหล (Creep) ที่สัมพันธ์กับความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินโดยสรุปดังต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

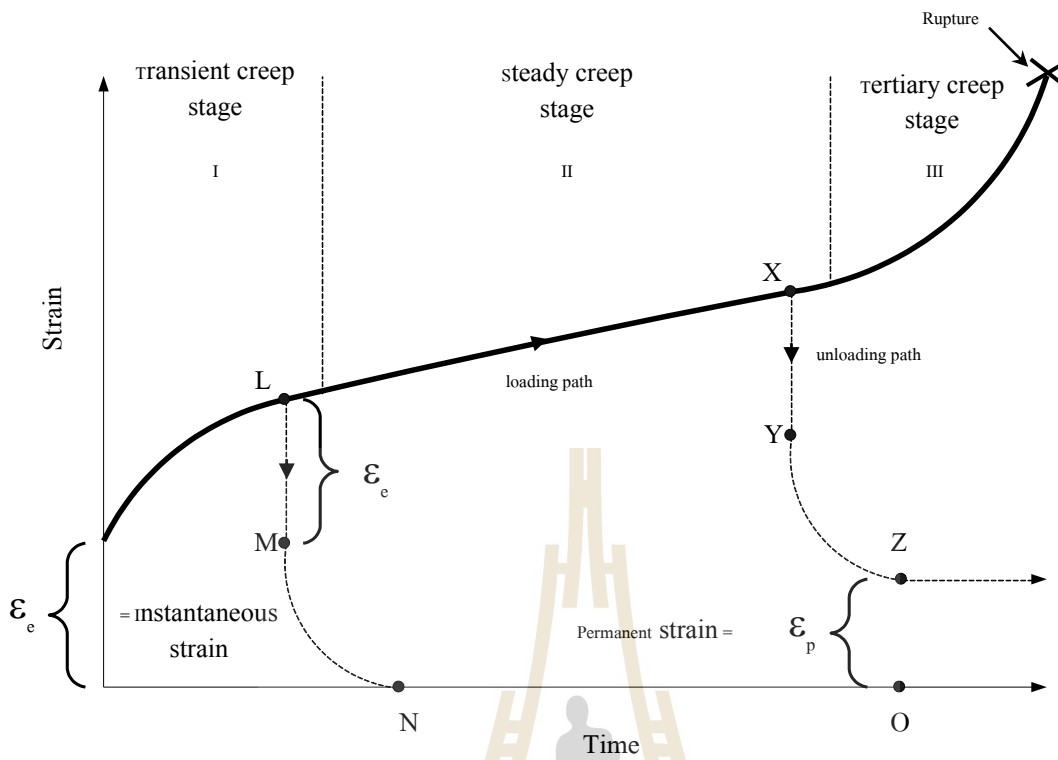
ผู้วิจัยหลายท่านเสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Choksi and Langdon, 1991; Munson and Wawersik, 1993) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งประเภท Alkali halides ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ Aubertin (1996) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่า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

Arieli et al. (1982) ได้ทำการทดสอบเกลือหินภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C และพบว่าการเคลื่อนไหลภายในผลึก (Intracrystalline) ของ Synthetic salt จะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation glide ซึ่งมีค่าความเค้นตั้งแต่ 10–20 MPa บริเวณจุดที่มีค่าความเค้นต่ำและมีอุณหภูมิสูง พบว่าการเคลื่อนไหลจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation climb และได้มีการทดสอบในเกลือหินที่เกิดตามธรรมชาติเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมในช่วงที่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อช่วงเวลาเวลาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C โดยมีอัตราความเครียดลดลงจาก 10^{-10} s^{-1} และความดันล้อมรอบเพิ่มขึ้นเป็น 30 MPa การทดสอบพบว่าการเกิดการไหลที่ความเค้นต่ำกว่า 15 MPa และอัตราความเครียดต่ำกว่า 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 และได้แนะนำว่ากระบวนการ Dislocation climb จะเป็นตัวควบคุมอัตราในช่วงนี้ การทดสอบทางด้านแรงกดและแรงดึงกับ Synthetic salt พบว่าเมื่อมีแรงกดในแนว [001] ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ผลึกจะแสดงลักษณะเป็น 3 ช่วง ของพฤติกรรม การแข็งตัว (Work hardening behavior) เมื่อเกิดการเคลื่อนใน Single {110}<110> system จะง่ายในการเกิด Glide stage หรือ Stage I ส่วนใน Stage II จะเกิดการ Hardening เนื่องจาก Second {110}<110> System ในขณะที่ Stage III จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิด Cross-slip ซึ่งผลึก

เดี่ยวจะแสดงการไหลที่ความเค้นต่ำกว่าพลีคริสต (Polycrystal) เนื่องจากยังมีการกระตุ้นจากการเลื่อนอยู่และไม่มีผลกระทบจาก Hardening และทิศทางของการกระจายตัว (Skrotzki and Haasen, 1988)

Jeremic (1994) พิจารณาลักษณะทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยแบ่งเป็นสามลักษณะคือ พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติก (Elastic and plastic behavior) และพฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) โดยพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับความเครียดเชิงยืดหยุ่นและสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ปกติแล้วเกลือหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำกว่าหินชนิดอื่นๆ ในส่วนของพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว การเปลี่ยนรูปเมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิมหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วคราวเท่านั้น แต่ในขณะที่เดียวกันเมื่อให้แรงกดที่สูงขึ้นเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดก็จะวิบัติ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะพิจารณาแยกกัน ซึ่งเกลือหินจะแสดงคุณสมบัติทั้งทางด้านความเครียดแบบยืดหยุ่นและความเครียดแบบพลาสติก ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นและพฤติกรรมเชิงพลาสติกคือ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นชั่วคราว (สามารถคืนตัวได้) ส่วนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างถาวร (ไม่สามารถคืนตัวได้) ระดับของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรขึ้นกับอัตราส่วนของความเครียดแบบพลาสติกกับความเครียดทั้งหมด การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติกสามารถสังเกตได้จากแรงกดในระยะสั้น (Short term loading) แต่ต้องมีขนาดของแรงกดสูงมาก ซึ่งพฤติกรรมเชิงพลาสติกของเกลือหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินจะไม่สามารถทนรับแรงกดต่อไปได้และจะวิบัติ การเปลี่ยนแปลงรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิในระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียว

การเปลี่ยนรูปมักจะขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากกระทำหรือการเคลื่อนไหล ซึ่งเป็นกระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกลือหินจะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2.1) คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียด



รูปที่ 2.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในแก๊สกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่
(ดัดแปลงมาจาก Jeremic, 1994).

เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase, I) 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาดังที่ (Steady-state phase, II) 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase, III) โดยเมื่อให้แรงกดในช่วงที่ 1 ที่จุด L จะทำให้ความเครียดลดลงไปยังจุด M อย่างรวดเร็ว และจะกลับไปสู่จุด O ที่จุด N ระยะ LM จะเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain, ϵ_e) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาดังที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent strain, ϵ_p)

Wanten et al. (1996) ทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปของผลึกเกลือเดี่ยว โดยผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ และทำการกดในแนว [001] การทดสอบจะทำในจุดที่มีความเครียดจาก 10^{-4} ถึง 10^{-7} s^{-1} ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 200°C โดยผลึกมีอัตราส่วนความยาวแกนผลึกเท่ากับ 1:1:1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของหลายแนว ซึ่งตัวอย่างได้แสดงถึงลักษณะของ Work hardening behavior การศึกษาทางด้าน Microstructure พบว่าเกิดความหนาแน่นของ Dislocation ค่อนข้างสูงแต่ไม่มีการเกิดในลักษณะ Cross-slip หรืออาจมีน้อย การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางด้าน Microphysics พบว่าข้อจำกัดของการเกิด Dislocation glide ขึ้นกับกลไกของการเปลี่ยนรูป

2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือเกิดการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน Fokker (1998) และ Aubertin (1996) อธิบายโดยการเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm พบว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะทางด้านจุลภาค (Microscopic) โดย Langer (1984) ซึ่งได้ศึกษาและสรุปเกี่ยวกับผลกระทบของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกกับอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยพบว่าเกลือหินที่มีผลึกหรือเม็ดเกลือขนาดเล็กที่ถูกกระทำภายใต้ความเค้นต่ำ การเคลื่อนไหลจะเกิดขึ้นจากการเลื่อนของรอยต่อระหว่างผลึกเกลือ (Dislocation climb) แต่สำหรับผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการเปลี่ยนรูปจะเกิดจากการเลื่อนของรอยแตกและรอยร้าวในผลึกเกลือ (Dislocation glide)

Franssen and Spiers (1990), Raj and Pharr (1992) และ Senseny et al. (1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปจะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กลงไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกันกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938, D2664, D3967) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดตามมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดเฉลี่ยของผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Allemandou and Dusseault (1996) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบโดย Fuenkajorn and Daemen (1988) ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก เช่น การเตรียมตัวอย่าง การตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหิน จะพบว่าในบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกขึ้นได้ง่าย นั่นคือ เกลือหินมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปตามเวลาหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างและใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตราความเค้นสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลายาวแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

ผลกระทบของวิถึความเค้น (Stress history) ต่อพฤติกรรมเกลือหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านตระหนักถึง (Lindner and Brady, 1984; Senseny, 1984; Nair and Boreasi, 1970; Lux and Heusermann, 1983; Versluis and Lindner, 1984; Munson and Dawson, 1984; Donath et al., 1988) สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการภายใต้ความเค้นคงที่ผลลัพธ์ที่ได้จะง่ายต่อการแปลความหมาย ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบในภาคสนามโดยต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปเนื่องจากวิถึความเค้นที่กระทำ ในการทดสอบพบว่าตัวอย่างเกลือหินที่ถูกกระทำด้วยความเค้นเดียวกันจะมีการเคลื่อน

โหลที่แตกต่างกันถ้าตัวอย่างเกลือหินนั้นมีวิถีความเค้นที่มากกระทำแตกต่างกัน แต่เกลือหินมีความจำที่ไม่ถาวรโดยเมื่อถูกกระทำในเวลาที่ยาวขึ้นจะพบว่าพฤติกรรมของเกลือหินจะมีลักษณะเหมือนกันโดยไม่คำนึงถึงวิถีความเค้น Wawersik and Hannum (1980) ทำการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial tests) กับเกลือหิน โดยกำหนดตามวิถีความเค้นที่ต่างกันสามรูปแบบประกอบด้วยการให้แรงดันด้านข้างคงที่ ให้ความเค้นเฉื่อยคงที่ และแรงในแนวแกนคงที่ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะถูกให้แรงภายใต้แรงกดสามแกนแบบชั้นบันได ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าความเครียดหลักน้อยที่สุดและความเครียดหลักมากที่สุด มีค่ามากที่สุดภายใต้การทดสอบตามวิถีความเค้นแบบให้แรงดันด้านข้างคงที่ และมีค่าน้อยที่สุดตามวิถีความเค้นแบบให้แรงในแนวแกนคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหิน Lux and Rokahr (1984) ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมกับการทดสอบสามแกนแบบแรงดึง (Extension triaxial tests) ผลจากการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบในช่วงระยะสั้นและระยะยาว สำหรับช่วงการทดสอบระยะสั้นค่ากำลังรับแรงของเกลือหินจะขึ้นกับสถานะของความเค้นและความเค้นเฉื่อย ในส่วนของผลการทดสอบระยะยาวพบว่าค่าการยุบตัวของเกลือหินเนื่องจากการคืบของการทดสอบในสามแกนแบบแรงดึงจะให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติในภาคสนามรอบโพรงเกลือ Hunsche and Albrecht (1990) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นสถิต (Hydrostatic stress) อุณหภูมิ ค่ากำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength) และวิถีความเค้น โดยทำการทดสอบกับเกลือหินภายใต้แรงกดสามแกนแบบให้แรงเป็นจริง ผลจากการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลด (Load parameter) ที่ถูกใช้วัดเป็นตัวกลางการเปรียบเทียบได้ให้ผลต่างกันจากการทดสอบวิถีความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลดดังกล่าวเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถของกำลังรับแรงของวัสดุ ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงของเกลือหินขึ้นกับวิถีความเค้น Allemandou and Dusseault (1993) ทำการทดสอบเกลือหินด้วยวิธีการคืบแบบวัฏจักรภายใต้แรงกดสามแกน (Triaxial cyclic creep tests) จุดประสงค์ของการทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของวิถีความเค้น Octahedral stress และ Deveriatoric stress ที่มีต่อพฤติกรรมการคืบของเกลือหิน ในส่วนผลกระทบของวิถีความเค้นได้ใช้การทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมและสามแกนแบบลดแรงดันด้านข้าง (Radial-unloading triaxial test) พบว่าการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าวิธีลดแรงดันด้านข้าง แต่ค่ากำลังรับแรงที่ตำแหน่งความเครียดสูงสุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน Aubertin et al. (1999) และ Yahya et al. (2000) ทำการทดสอบแบบอัตราความเครียดโดยเกลือหินจะถูกกระทำภายใต้แรงสามแกนแบบดั้งเดิม และแบบลดแรงดันด้านข้าง (Reduced triaxial extension) ซึ่งแรงกดดังกล่าวจะถูกให้แรงดันด้านข้างค่อนข้างสูงโดยจะพิจารณาให้เกลือหินมีพฤติกรรมความเป็นพลาสติกสูง (Fully plastic) จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมี

ผลกระทบต่อพฤติกรรมกรการให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหิน Jandakaew (2003) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเกลือหินโดยการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบดั้งเดิมและแบบลดความดันด้านข้าง และศึกษาพฤติกรรมของมวลเกลือรอบโพรงเกลือโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลความสำคัญของผลกระทบของวิถีความเค้นต่อโพรงกักเก็บในมวลเกลือหิน ผลการทดสอบระบุว่าที่ความเค้นเท่ากันตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าตัวอย่างที่ทดสอบแบบลดความดันด้านข้าง โดยความเหน็ดแข็งยืดหยุ่นและความเหน็ดแข็งพลาสติกของเกลือหินที่สอบเทียบได้จากวิธีการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าสูงกว่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบดั้งเดิมเล็กน้อย สำหรับการทรุดตัวของผิวดินและการหดตัวของโพรงที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าน้อยกว่าจากการทดสอบแบบดั้งเดิมร้อยละ 31.6 และร้อยละ 25.7 สำหรับแบบจำลองรูปทรงกลม ส่วนแบบจำลองรูปทรงกระบอกมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30.1 และร้อยละ 23.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินจะขึ้นกับวิถีความเค้น โดยการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างให้ผลที่สอดคล้องกับความเค้นในภาคสนามมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม แต่วิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมแสดงผลการเคลื่อนไหลและคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินเป็นไปในเชิงอนุรักษ์มากกว่า

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก โดยจะทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและทำให้ความเหน็ดของเกลือหินลดลง (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 โดยปกติเกลือหินจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับอุณหภูมิ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น กล่าวคือ จะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Hamami et al., 1996) นอกจากนั้นแล้วอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลาและช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Senseny et al., 1986; Handin et al., 1984; Lama and Vutukuri, 1978, Dreyer, 1973) ซึ่งกฎพฤติกรรมของเกลือหินที่ได้จะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยพิจารณาเป็นตัวแปรหนึ่งที่อยู่ในสมการความสัมพันธ์ แต่จะไม่คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิถ้าทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบควรจะควบคุมให้มีค่าคงที่

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกลือหินเปลี่ยนไป โดยความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996; Cleach et al., 1996) เนื่องจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเยิ้มขึ้นมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการจะต้องป้องกันความชื้นด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น ซึ่งความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte et al. (1996); Bonte (1996) และ Adler et al. (1996) โดยการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูงด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกลือจะมีความต้านแรงกดลดลงซึ่งจากเดิมเกลือหินที่แห้งปกติมีกำลัง 30 MPa ก็มีกำลังลดลงเหลือเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเพียง 7% Varo and Passaris (1977) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep tests) ของตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์ภายใต้การผันแปรของค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidities, R. H.) ต่างๆ กัน ระดับของความชื้นถูกควบคุมโดยใช้ท่อปิดที่บรรจุสารเคมีประเภทแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) และลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 60°C โดยค่าของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 13 ถึง 87% ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่บรรยากาศจะมีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 75% เมื่อเกลือหินเกิดกระบวนการละลายทำให้เกิดการเคลื่อนไหลมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนรูปของเกลือหินมากขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างเกลือหินไปแช่ในน้ำเกลือพบว่าอัตราการเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยตัวอย่างจะเกิดการวิบัติได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากกระบวนการละลาย

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้ได้แก่ Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน บางกรณีจะลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตามเพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวกีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน ทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต้องเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992) สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกที่พบในเกลือหินจะมีขนาดและปริมาณที่ต่างกัน โดยตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สิ่งเจือปนที่พบจะเป็นแร่เหล็กและแร่ดินซึ่งแทรกอยู่ระหว่างผลึกหรือชั้นหิน นอกจากนั้นยังมีผู้วิจัยเสนอว่าลักษณะของสิ่งเจือปนที่พบอยู่ในเกลือหินตามธรรมชาติประกอบด้วย 3 รูปแบบ ด้วยกัน คือ 1) สิ่งเจือปนที่กระจายอยู่ระหว่างผลึกเกลือหรือแทรกตัวเป็นกลุ่ม 2) น้ำที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของผลึกเกลือหรือปรากฏในลักษณะน้ำเกลือแทรกอยู่ระหว่างผลึก และ 3) ประจุไอออนของ K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Br^- และ I^- ซึ่งตรึงอยู่ในโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเกลือ

หินบริสุทธิ์ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ รวมทั้งเกลือหินที่มี $MgCl_2$ 0.6% และเกลือหินที่มี KCl 0.1% เป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ (Handin et al., 1984) ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของเกลือหิน โดย Senseny (1984) ศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างกับการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และ 50 มม. โดยสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length to diameter ratio, L/D) เท่ากับสาม จากนั้นทำการทดสอบแรงกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิต่างๆ 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 แต่หากเนื้อหินมีรอยแตกหรือรอยร้าวสิ่งเหล่านี้จะสามารถประสานตัวโดยกระบวนการ Recrystallization

ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดแม้แต่ในต่างประเทศที่ได้เคยทำการทดสอบการคืบของเกลือหินในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) แม้จะมีนักวิจัยหลายท่านตระหนักว่าผลกระทบของความเค้นที่ไม่เท่ากัน (Anisotropic Stress Field) และวิถีของความเค้น (Stress Path) จะมีผลกระทบต่อความเครียดในเชิงเวลาของเกลือหิน

บทที่ 3

การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอนและวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน รวมถึงขนาด รูปร่าง และจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ

3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดถูกคัดเลือกมาจากแท่งตัวอย่างซึ่งได้ขุดเจาะจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) ของหมวดหินมหาสารคามในแอ่งโคราช โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เกลือพิมาย จำกัด โดยนำมาตัดและฝนให้ผิวเรียบในห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ

3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุดใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ในเชิงความเรียบและความขนานกันของแต่ละด้าน ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่มีรอยแตกร้าวหรือรูพรุนที่เกิดจากการซารุดหรือละลายบนแท่งตัวอย่าง การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เลื่อยไฟฟ้า (รูปที่ 3.1) เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วจะนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ ถ้าพบว่าหน้าตัดของตัวอย่างไม่ได้ฉากหรือมีรอยแตกมากเกินไปจะนำไปตัดใหม่อีกครั้งจนได้แท่งตัวอย่างที่สมบูรณ์ โดยแต่ละตัวอย่างได้ใช้ปากกาสีชนิดติดถาวรเขียนหมายเลขกำกับและใช้พลาสติกหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความชื้นและการละลาย ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาตัดเรียบร้อยแล้วจะมีขนาด $54 \times 54 \times 108 \text{ mm}^3$ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length-to-diameter ratio, $L/D = 2.0$) เท่ากับ 2.0 การเตรียมตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกตามรูปแบบของการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในเบื้องต้นเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกนจริง ตัวอย่างเกลือหินมากกว่า 40 ตัวอย่าง ได้ถูกเตรียมไว้สำหรับการทดสอบทั้งสองรูปแบบนี้ ตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แสดงขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง



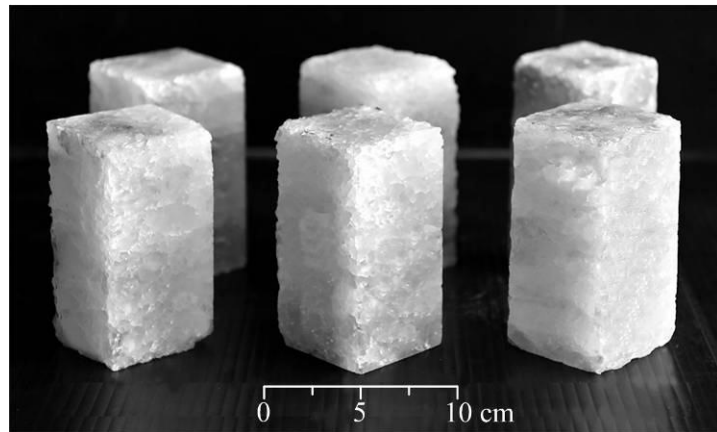
รูปที่ 3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง

ตารางที่ 3.1 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM
สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง

Specimen No.	Depth (m)	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
MS-PX-34	253.75-253.85	52.1	54.3	108.6	2.14
MS-PX-08	179.66-179.77	56.2	57.4	104.8	2.24
MS-PX-37	208.40-208.50	53.9	52.7	105.4	2.26
MS-PX-42	211.60-211.70	55.0	55.3	109.6	2.24
MS-PX-20	244.47-244.57	54.0	55.1	106.2	2.19
MS-PX-22	246.21-246.31	57.5	55.1	106.2	2.32
MS-PX-23	245.50-245.60	53.3	54.5	109.0	2.19
MS-PX-36	208.50-208.60	54.7	51.2	102.4	2.18
MS-PX-44	210.05-219.15	56.0	54.9	109.7	2.28
MS-PX-38	211.20-211.30	55.7	56.1	102.2	2.19
MS-PX-02	178.13-178.23	55.0	54.5	109.0	2.25
MS-PX-32	208.60-208.70	53.8	54.5	109.0	2.29
MS-PX-33	254.05-254.15	54.4	53.5	107.0	2.30
MS-PX-05	256.43-256.53	53.4	54.3	108.6	2.20
MS-PX-31	201.70-201.80	51.5	55.0	105.0	2.22
MS-PX-35	200.45-200.56	54.3	55.6	101.2	2.00
MS-PX-43	209.95-210.05	54.1	54.3	108.6	2.19
MS-PX-40	211.40-211.50	55.5	55.3	110.6	2.15
MS-PX-27	264.41-264.51	55.4	54.4	108.8	2.10
MS-PX-28	263.31-263.41	54.7	54.7	109.4	2.14
MS-PX-29	264.67-264.77	54.9	57.5	105.0	2.22
MS-PX-47	210.35-210.45	54.0	56.6	103.2	2.32
MS-PX-41	211.50-211.60	56.0	56.1	102.2	2.23
MS-PX-48	210.45-210.55	57.3	55.4	110.8	2.20
MS-PX-45	210.15-210.25	56.6	54.8	109.6	2.12
MS-PX-49	210.55-210.65	54.0	54.7	109.4	2.30
MS-PX-12	201.23-201.33	57.0	55.7	101.4	2.17
MS-PX-13	201.60-201.70	56.0	56.2	102.4	2.27
MS-PX-19	244.37-244.47	54.2	55.6	101.2	2.26
MS-PX-25	245.10-245.20	55.3	57.1	104.2	2.13
MS-PX-50	210.65-210.75	54.5	56.4	102.8	2.19
MS-PX-46	210.25-210.35	56.9	56.1	102.2	2.16
MS-PX-10	179.93-180.31	57.1	53.5	107.0	2.35
MS-PX-18	251.79-250.85	54.9	54.5	109.0	2.18
MS-PX-52	212.11-212.21	56.1	56.7	103.4	2.23

ตารางที่ 3.2 ขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM
สำหรับการทดสอบการคืบในสามแกนจริง

Specimen No.	Depth (m)	σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	τ_{oct} (MPa)	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
MS-PCR-02	209.68– 209.80	5.10	5.10	34.80	14.0	55.7	56.6	113.8	2.18
MS-PCR-11	255.67– 256.02	7.20	7.20	30.60	11.0	55.9	55.7	112.2	2.18
MS-PCR-13	238.22– 238.28	9.35	9.35	26.30	8.0	56.8	56.1	113.4	2.15
MS-PCR-16	162.82– 162.88	11.45	11.45	22.10	5.0	56.2	57.1	115.8	2.17
MS-PCR-21	235.10– 235.25	0.00	22.50	22.50	11.0	57.4	55.7	113.2	2.14
MS-PCR-20	234.45– 234.51	3.62	20.69	20.69	8.0	56.8	57.9	112.8	2.18
MS-PCR-18	202.14– 202.26	7.90	18.55	18.55	5.0	58.1	55.6	111.2	2.17
MS-PCR-15	162.88– 162.94	3.20	7.20	34.60	14.0	55.6	58.2	116.6	2.17
MS-PCR-19	204.02– 204.06	6.21	8.21	30.58	11.0	55.5	58.4	113.6	2.14
MS-PCR-14	268.32– 268.38	8.34	10.34	26.32	8.0	53.4	58.2	114.8	2.17
MS-PCR-17	162.74– 162.86	9.25	14.25	21.50	5.0	56.7	56.9	113.8	2.21



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง



บทที่ 4

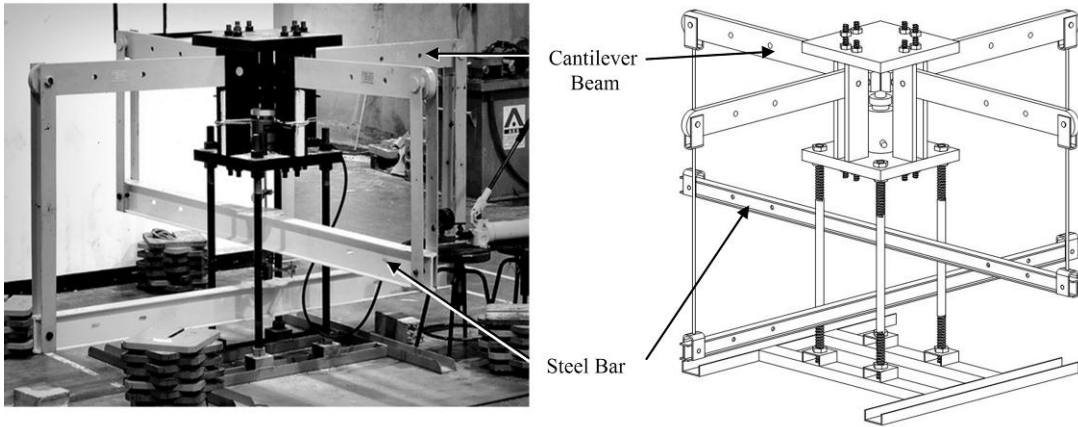
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้บรรยายถึงคุณลักษณะของโครงกดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial Load Frame) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในเบ้าตันเพื่อหาค่ากำลังกดในสามแกนจริง (True triaxial strength) และการทดสอบการคืบในสามแกนจริง (True triaxial creep) โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM Standard

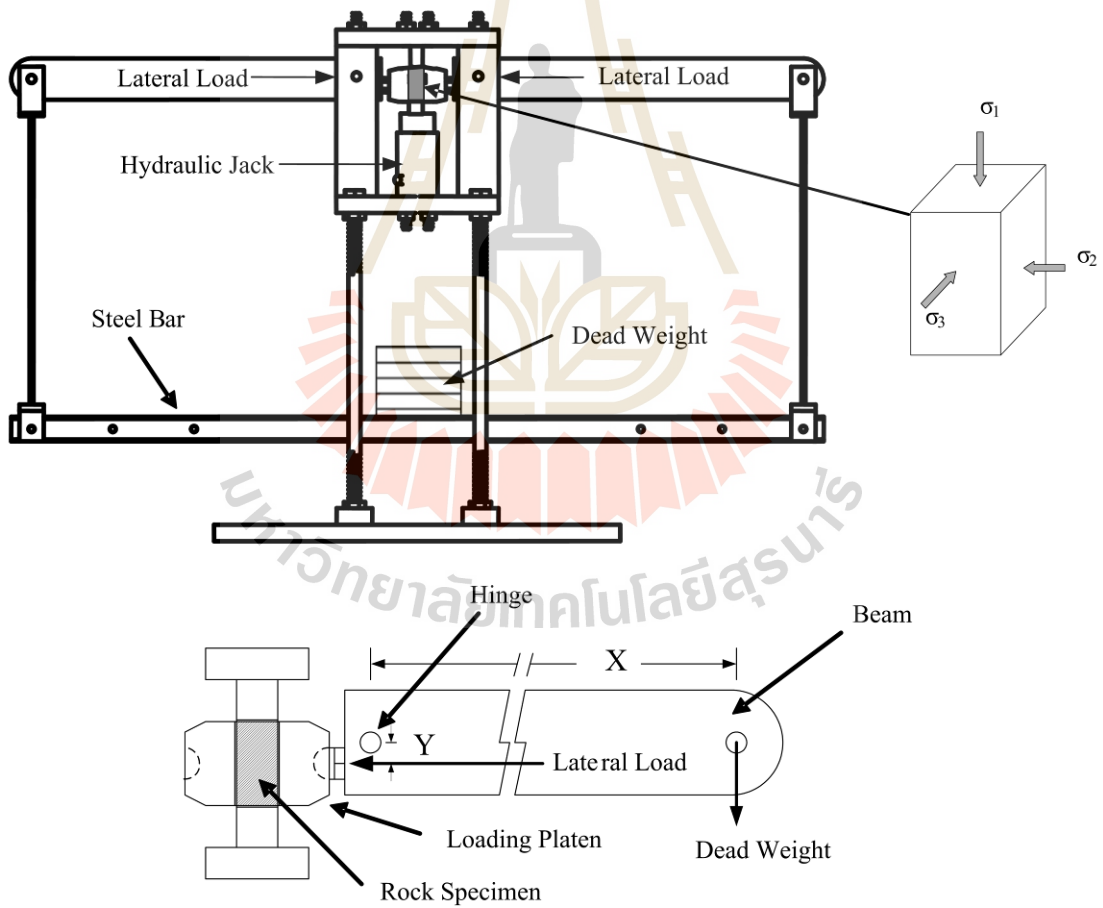
4.1 การเตรียมโครงกดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

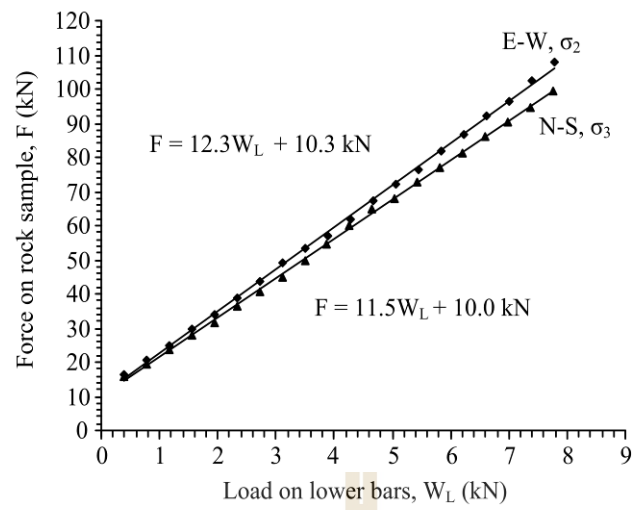
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแขนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนัก เพื่อให้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Walsri, et al., 2009)



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อกำหนดค่ากำลังกุดสูงสุดในสามแกนจริง

4.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังกุดในสามแกนจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าแรงกุดสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหิน ซึ่งทำการทดสอบกับเกลือหินทั้งหมด 35 ตัวอย่าง โดยกำหนดให้ค่าความเค้นหลักทรง (σ_3) และค่าความเค้นหลักกลาง (σ_2) มีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแตก ซึ่ง σ_2 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 80 MPa และ σ_3 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 20 MPa

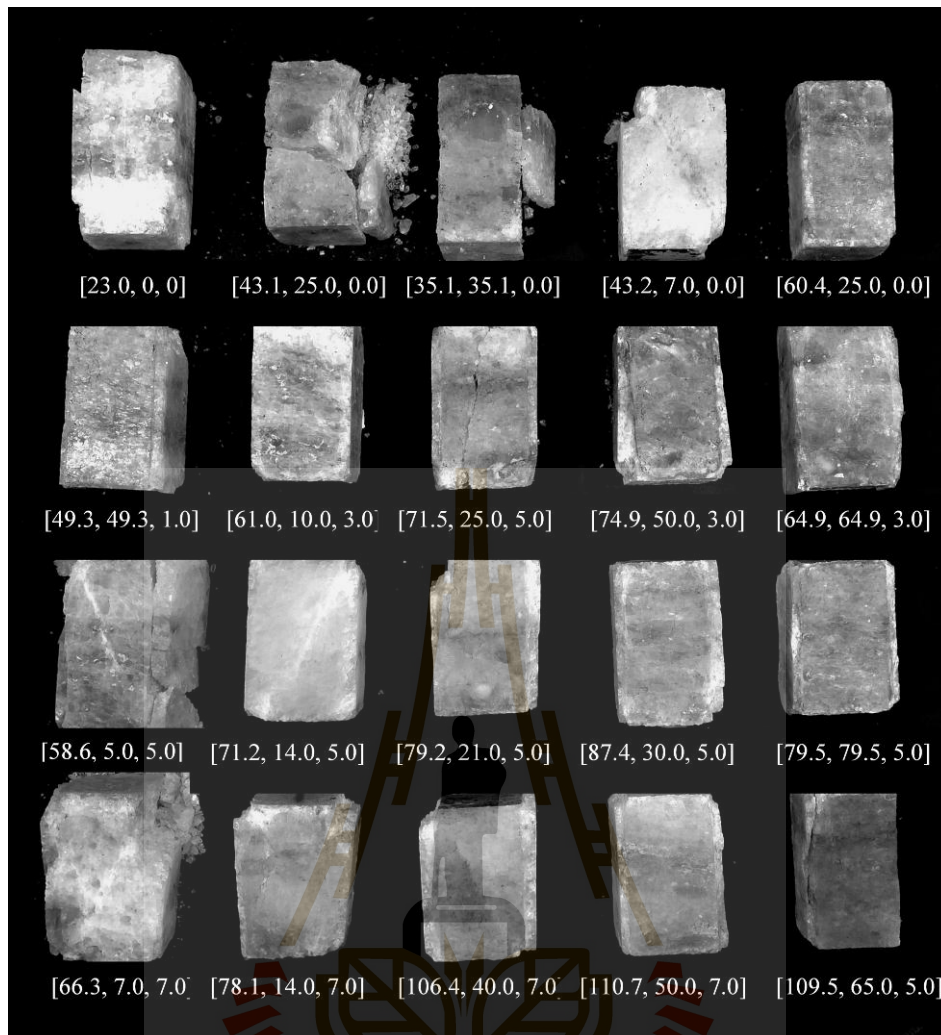
4.2.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางของความเค้นและแนวการวางตัวของชั้นหินบนแท่งตัวอย่าง การคำนวณค่าความเครียดจะคำนวณจากค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกน พร้อมกับการใส่แรงกระทำบนตัวอย่างหิน จากนั้นจะทำการบันทึกค่าความเค้นที่จุดแตกของตัวอย่างหินแล้วนำมาพิจารณารูปแบบการแตก ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังกุดสูงสุดในสามแกนจริง รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังกุดสูงสุดในสามแกนจริงในระดับความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า [$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$] ในระดับที่ต่างกัน

4.3 การทดสอบการคืบในสามแกนจริง

4.3.1 วิธีการทดสอบ

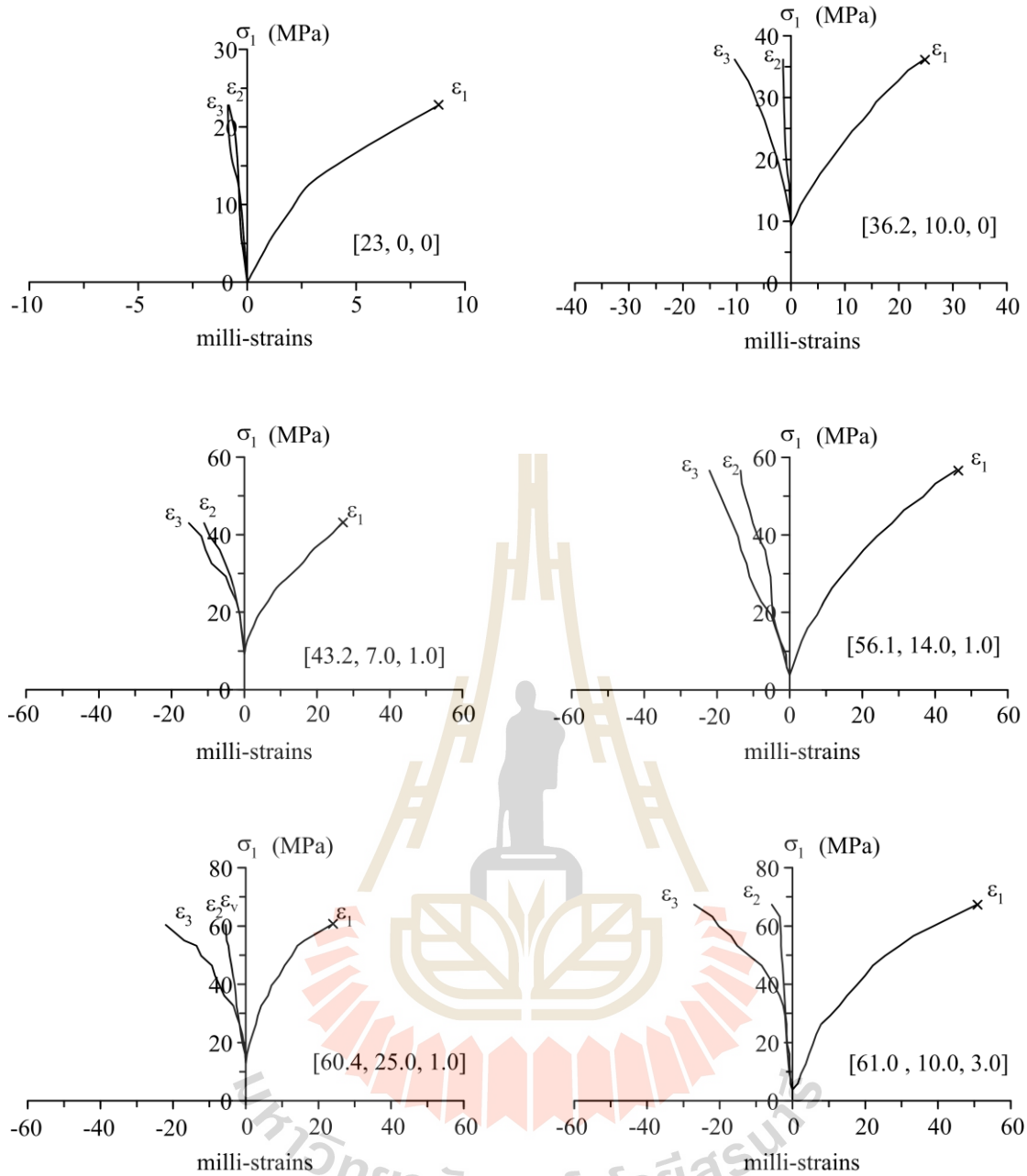
การทดสอบการคืบในสามแกนจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent deformation) การทดสอบการคืบในสามแกนจริงได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบการคืบในสามแกนแบบกุด (ดั้งเดิม) ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) การทดสอบการคืบในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) และการทดสอบการคืบในสามแกนแบบขยายตัว ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องปกติ ก่อนทำการทดสอบจะต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) ค่าแรงและการเคลื่อนตัวในสามทิศทางของโครงทดสอบ (Polyaxial load frame) จากนั้นเริ่มทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยการให้แรงในสามทิศทางเท่ากัน (Hydrostatic) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_m) กระทำต่อตัวอย่างเกลือหินคงที่เท่ากับ 15 MPa ทั้งสามทิศทาง เพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินเข้าสู่สภาวะความเค้นเหมือนกับสภาวะจริงในภาคสนาม โดยให้ความเค้นคงที่ไปจนกว่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกลือหินจะหยุดลง จากนั้นทำการลดค่าความเค้นด้านข้างด้านหนึ่งเพื่อจำลองสภาวะ σ_3 และเพิ่มความเค้นในแนวแกนเพื่อจำลองสภาวะ σ_1 แล้วทำการบันทึกค่าการยุบตัวทั้ง



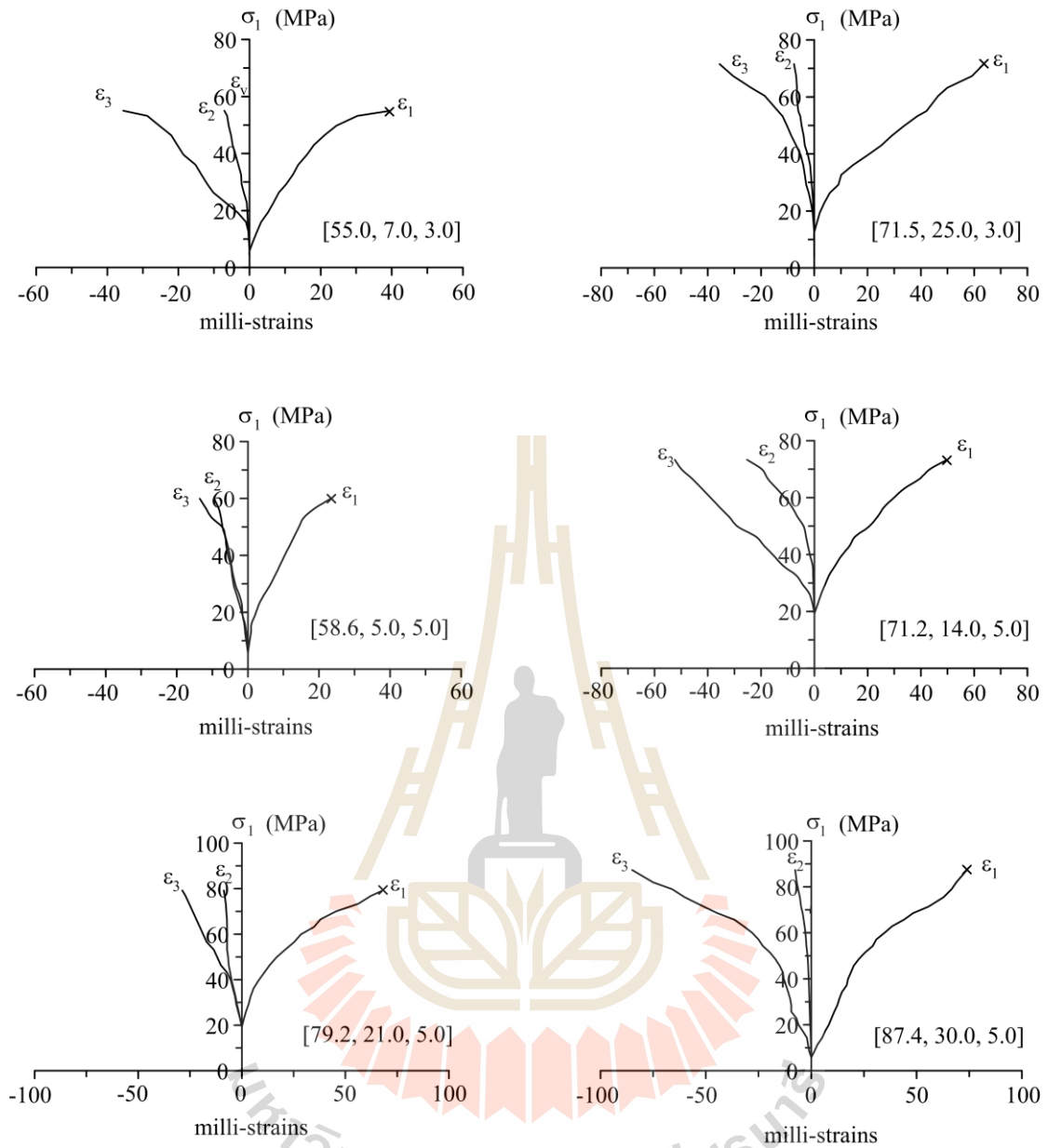
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเกลือหินหลังจากการทดสอบในระดับความเค้นที่ต่างกัน ตัวเลขในวงเล็บแสดง $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ที่จุดแตก

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง

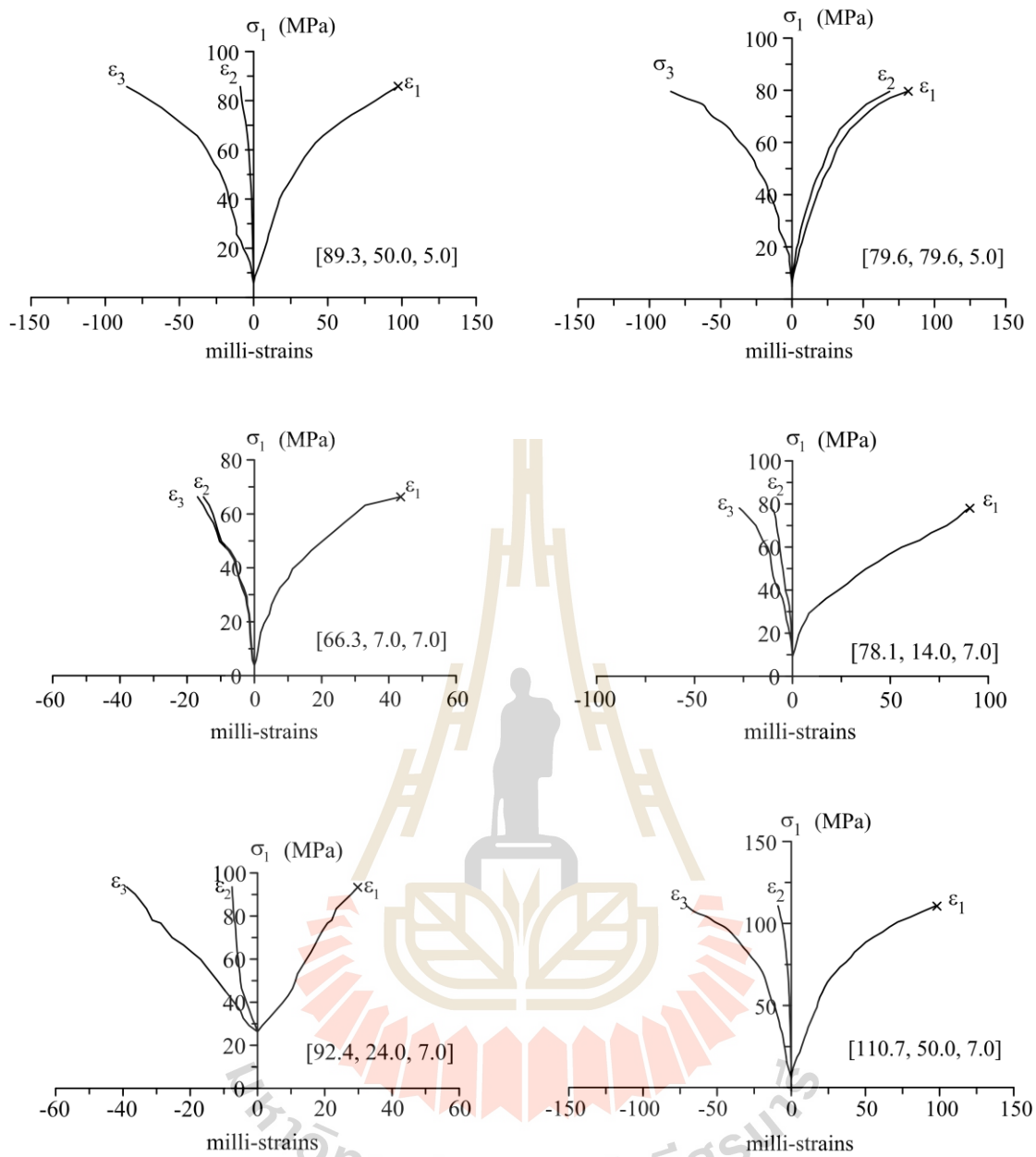
Specimen number	Depth (m)	Failure Stresses			Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
		σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)		
MS-PX-34	253.75-253.85	0	0	23.0	22.4	0.35
MS-PX-08	179.66-179.77		10.0	36.2	20.7	0.36
MS-PX-37	208.40-208.50		25.0	43.1	23.3	0.42
MS-PX-42	211.60-211.70		35.1	35.1	-	-
MS-PX-20	244.47-244.57	1.0	1.0	26.5	25.3	0.46
MS-PX-22	246.21-246.31		7.0	43.2	18.5	0.39
MS-PX-23	245.50-245.60		14.0	56.1	20.6	0.40
MS-PX-36	208.50-208.60		25.0	60.4	19.3	0.40
MS-PX-44	210.05-219.15		35.0	62.5	-	-
MS-PX-38	211.20-211.30		49.3	49.3	-	-
MS-PX-02	178.13-178.23	3.0	3.0	45.1	22.5	0.25
MS-PX-32	208.60-208.70		7.0	55.0	19.8	0.39
MS-PX-33	254.05-254.15		10.0	61.0	23.1	0.40
MS-PX-05	256.43-256.53		14.0	66.0	15.8	0.38
MS-PX-31	201.70-201.80		25.0	71.5	26.9	0.42
MS-PX-35	200.45-200.56		40.0	75.0	24.3	0.36
MS-PX-43	209.95-210.05		50.0	74.9	-	-
MS-PX-40	211.40-211.50		64.9	64.9	-	-
MS-PX-27	264.41-264.51	5.0	5.0	58.6	23.4	0.42
MS-PX-28	263.31-263.41		14.0	71.2	20.8	0.40
MS-PX-29	264.67-264.77		21.0	79.2	18.0	0.35
MS-PX-47	210.35-210.45		30.0	87.4	21.4	0.39
MS-PX-41	211.50-211.60		40.0	91.6	-	-
MS-PX-48	210.45-210.55		50.0	89.3	23.1	0.39
MS-PX-45	210.15-210.25		65.0	85.0	-	-
MS-PX-49	210.55-210.65		79.6	79.6	24.1	0.42
MS-PX-12	201.23-201.33	7.0	7.0	66.3	22.1	0.37
MS-PX-13	201.60-201.70		14.0	78.1	20.0	0.37
MS-PX-19	244.37-244.47		24.0	92.4	16.0	0.43
MS-PX-25	245.10-245.20		40.0	106.4	-	-
MS-PX-50	210.65-210.75		50.0	110.7	20.2	0.43
MS-PX-46	210.25-210.35		65.0	109.5	-	-
MS-PX-10	179.93-180.31	10.0	10.0	79.6	21.7	0.39
MS-PX-18	251.79-250.85	12.0	12.0	81.8	22.7	0.42
MS-PX-52	212.11-212.21	20.0	20.0	106.4	21.9	0.39
Mean \pm Standard Deviation					21.5 \pm 2.6	0.40 \pm 0.04



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน

สามแกนต่อเวลาอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.001 mm การบันทึกผลจะทำทุก 1 นาที ในช่วงแรกของการทดสอบ และจะขยายเวลาบันทึกออกไปจนถึงสี่ครั้งต่อหนึ่งวันหลังจากที่ทดสอบไปแล้ว 5 วัน โดยทำการทดสอบกับแท่งตัวอย่างเกลียวหินทั้งหมด 12 ตัวอย่างภายใต้ชุดของความเค้น $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ที่ต่างกันและค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) มีค่าเท่ากับ 5.0, 8.0, 11.0 และ 14.0 MPa การทดสอบจะใช้เวลา 21 วันต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_m) และค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_m = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]/3 \quad (4.1)$$

$$\tau_{oct} = [1/3] \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.2)$$

โดยที่

σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย

τ_{oct} คือ ความเค้นในแนวเฉือน

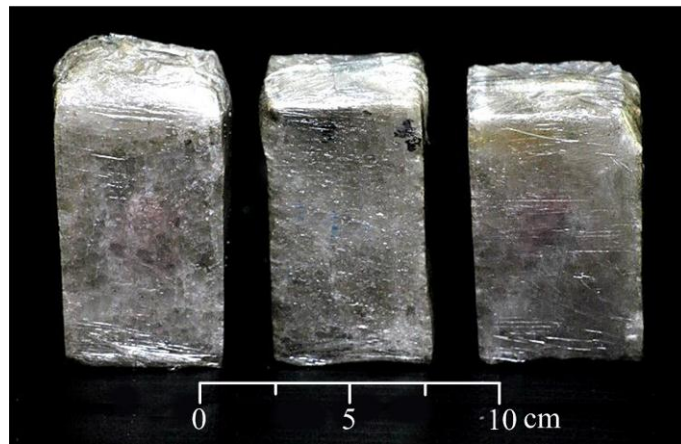
σ_1 คือ ความเค้นหลักในแนวแกน

σ_2 คือ ความเค้นหลักกลาง

σ_3 คือ ความเค้นหลักรอง

4.3.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.8 แสดงแท่งตัวอย่างเกลียวหินบางส่วนหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง ซึ่งตัวอย่างเกลียวหินบางส่วนเกิดการยุบตัวและมีรอยแตกเล็กน้อยตัดผ่านตามแนวของผลึก ปัจจัยการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลียวหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ผลของความเครียดทั้งสามทิศทางที่ทำการตรวจวัดในเชิงเวลาของการทดสอบการคืบในสามแกนจริงได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) ในฟังก์ชันของเวลา โดยค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ อยู่ในระดับที่ต่างกันดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11 ซึ่งการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของเกลียวหินปรากฏเป็น 3 ช่วง คือ 1) เมื่อให้แรงกดในช่วงแรกอย่างทันทีทันใด จะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับ ความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain) 2) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และ 3) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent strain) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเครียดนั้นเกิดจากการที่หินมีค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) เพิ่มขึ้น



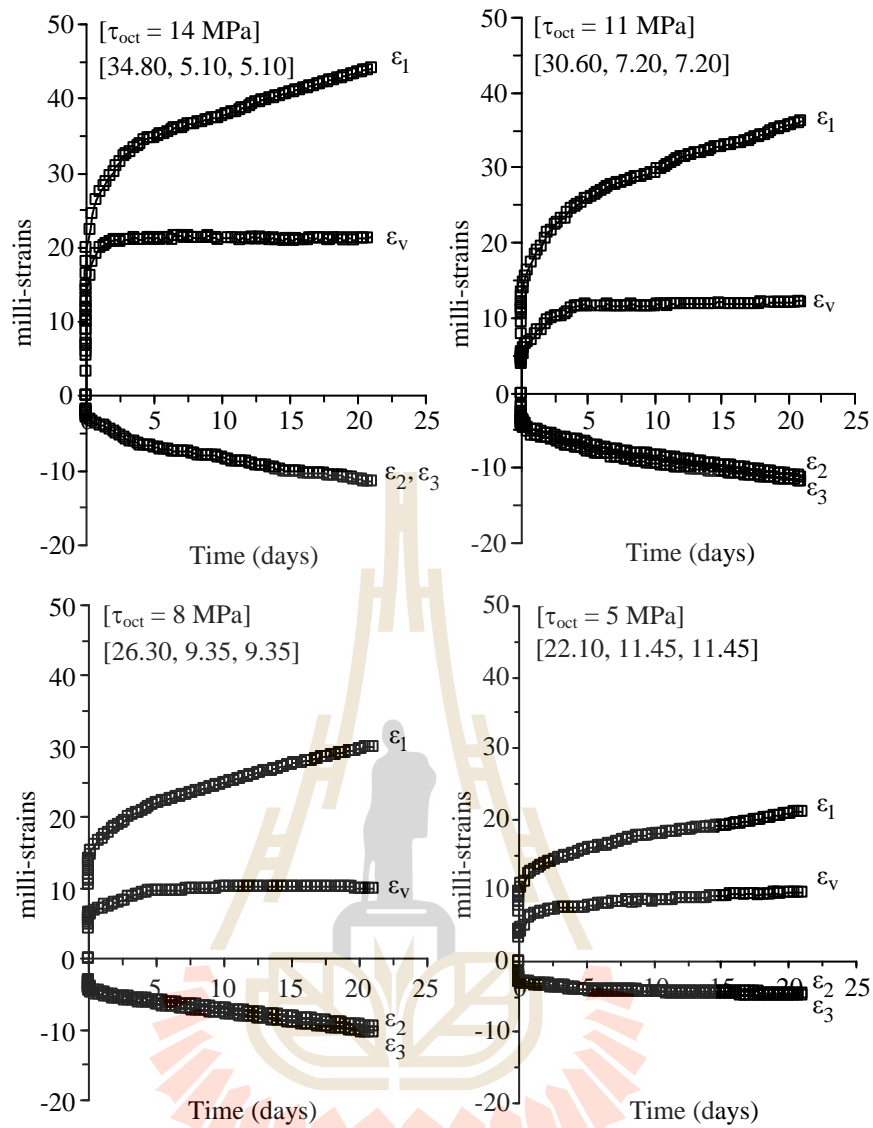
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเกล็ดหินบางส่วนหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง



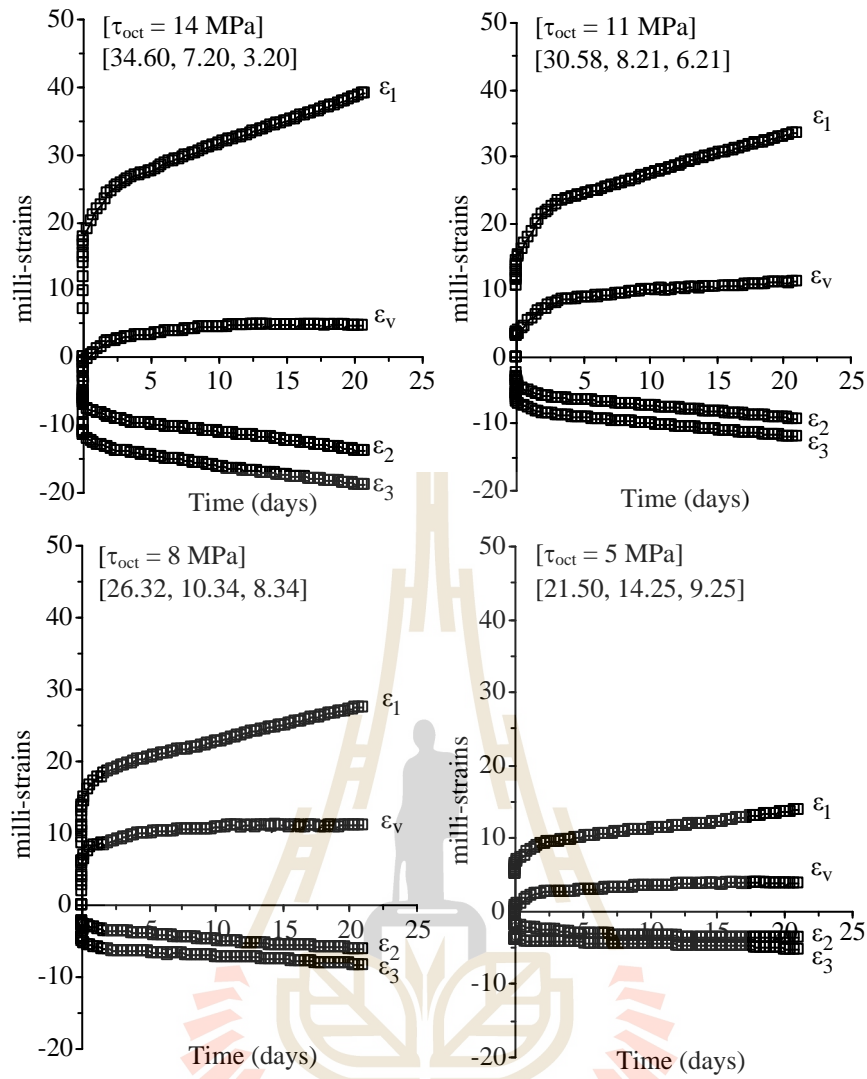
ตารางที่ 4.2 ปัจจัยการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน

Specimen No.	Test Conditions	Depth (m)	Applied Constant Stresses			τ_{oct} (MPa)	Time (days)
			σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)		
2	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$	209.68–209.08	5.1	5.1	34.8	14.0	21
11		255.67–256.02	7.2	7.2	30.6	11.0	21
13		238.22–238.28	9.4	9.4	26.3	8.0	21
16		162.82–162.88	11.5	11.5	22.1	5.0	21
20	$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$	162.88–162.94	3.2	7.2	34.6	14.0	21
19		204.02–204.06	6.2	8.2	30.6	11.0	21
14		268.32–268.38	8.3	10.3	26.3	8.0	21
17		162.74–162.80	9.3	14.3	21.5	5.0	21
21	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$	235.10–235.25	0.0	22.5	22.5	11.0	2 (hours)
4		253.64–253.75	3.0	21.0	21.0	8.0	21
8		208.30–208.40	5.0	20.0	20.0	7.0	21
18		202.14–202.26	7.9	18.6	18.6	5.0	21

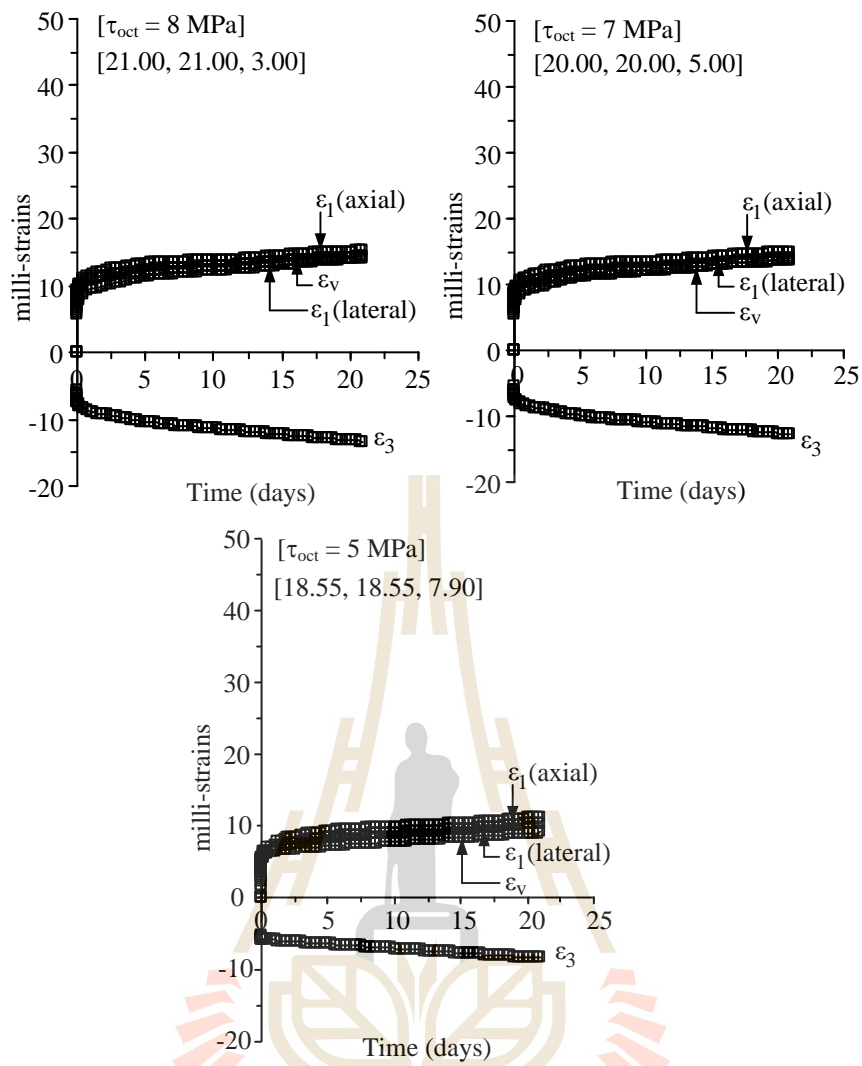




รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oc} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสถานะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเค้นดัดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน

ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger & Cook (1979) ได้ถูกนำมาใช้หาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเกลือหินในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา โดยใช้ความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) ดังสมการ

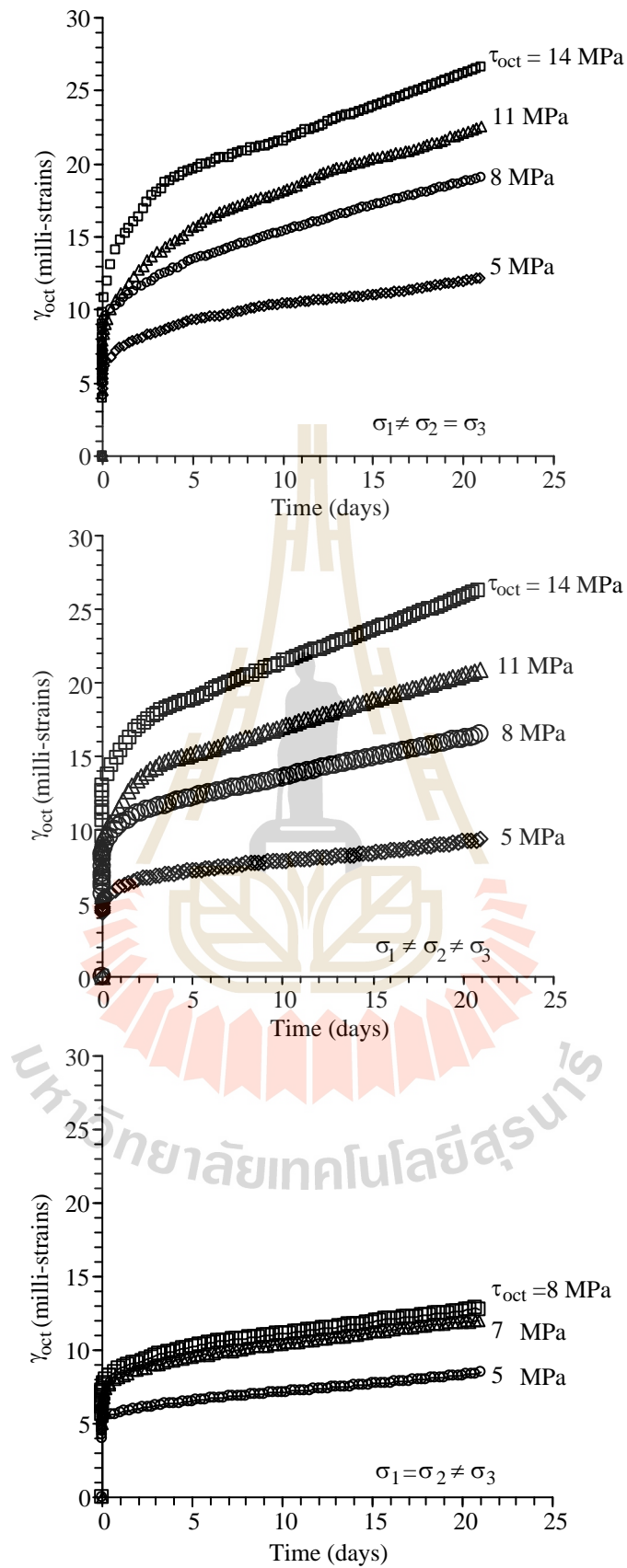
$$\gamma_{oct} = [1/3] \cdot [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$\gamma_{oct} = \tau_{oct} / 2G \quad (4.4)$$

โดยที่

- γ_{oct} คือ ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ
- G คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง
- ϵ_1 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักสูงสุด
- ϵ_2 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักกลาง
- ϵ_3 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักต่ำสุด

พฤติกรรมของเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลาได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาในสภาวะความเค้นที่ ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$), ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) และ ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) ซึ่งการวิเคราะห์ผลจะแสดงอย่างละเอียดในบทต่อไป



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการแตกในสามแกนจริง

เนื้อหาในบทนี้เสนอวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงของเกลือหิน โดยนำกฎเกณฑ์การแตกหลากหลายวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาเปรียบเทียบความสามารถในการคาดคะเนผลการทดสอบ

5.1 การคำนวณความยืดหยุ่นของเกลือหิน

ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงสามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองได้โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.5 ± 2.6 GPa และ 0.40 ± 0.04 ตามลำดับ (ตารางที่ 5.1) โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger and Cook (1979) คือ

$$G = (1/2) (\tau_{oct, e} / \gamma_{oct, e}) \quad (5.1)$$

$$3\sigma_{m, e} = (3\lambda + 2G) \varepsilon_{v, e} \quad (5.2)$$

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (5.3)$$

$$\nu = \lambda / 2(\lambda + G) \quad (5.4)$$

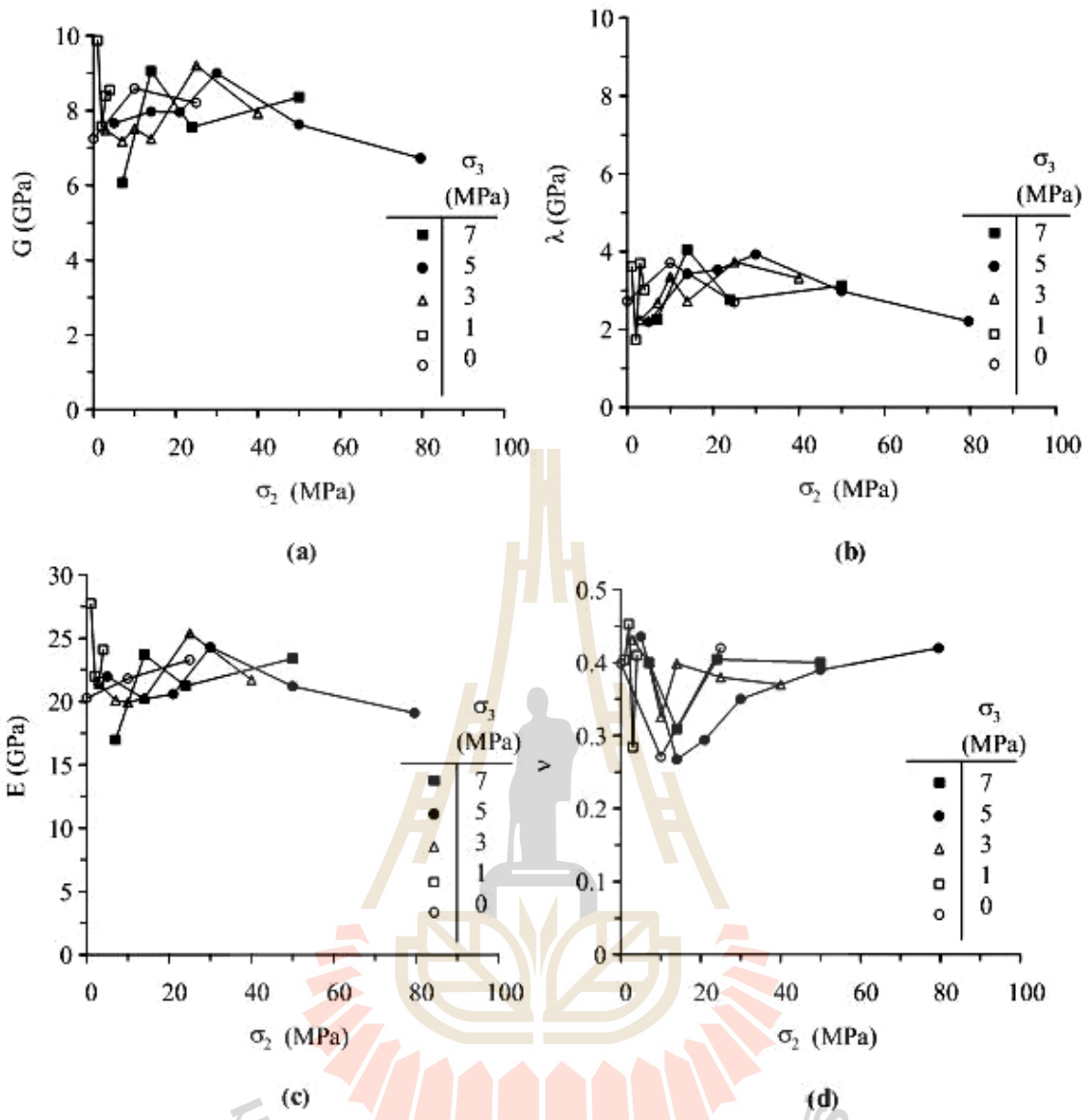
โดยที่

- E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
- G คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง
- ν คือ อัตราส่วนปัวซอง
- λ คือ ค่าคงที่ของ Lamé
- $\varepsilon_{v, e}$ คือ ความเครียดเชิงปริมาตรที่จุด Elastic
- $\tau_{oct, e}$ คือ ความเค้นในแนวเฉือนที่จุด Elastic
- $\gamma_{oct, e}$ คือ ความเครียดในแนวเฉือนที่จุด Elastic
- $\sigma_{m, e}$ คือ ความเค้นเฉลี่ยที่จุด Elastic

ผลที่ได้ระบุว่า ค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินทั้ง 4 ค่าจะไม่ขึ้นกับความเค้นหลักกลาง (σ_2) การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้จะเกิดจากความแปรปรวนของคุณสมบัติในเนื้อเกลือหิน รูปที่ 5.1 แสดงค่าปัจจัยความยืดหยุ่นทั้ง 4 ค่า ในฟังก์ชันของความเค้นหลักกลาง

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริง

Specimen number	$\tau_{\text{oct,e}}$ (MPa)	$\gamma_{\text{oct,e}}$ ($\times 10^{-3}$)	$\sigma_{\text{m,e}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{v,e}}$ ($\times 10^{-3}$)	G (GPa)	λ (GPa)	E (GPa)	ν
56	10.8	0.75	16.3	0.72	7.25	2.72	20.3	0.40
7	15.3	0.89	25.7	0.91	8.59	3.71	21.8	0.27
55	17.7	1.08	30.6	1.25	8.20	2.70	23.3	0.42
20	12.0	0.61	18.8	0.62	9.87	3.61	27.7	0.40
22	18.9	1.25	30.7	1.51	7.57	1.73	22.0	0.45
23	23.8	1.42	39.8	1.43	8.40	3.70	21.6	0.28
54	24.8	1.45	42.9	1.64	8.55	3.01	24.1	0.41
61	19.8	1.32	32.0	1.48	7.47	2.24	21.4	0.43
53	24.4	1.70	39.1	1.74	7.18	2.68	20.1	0.40
52	26.7	1.78	43.3	1.73	7.52	3.36	19.9	0.33
5	28.4	1.96	46.9	2.07	7.25	2.72	20.3	0.40
57	29.6	1.61	50.8	1.71	9.20	3.74	25.4	0.38
35	30.6	1.93	53.3	2.06	7.92	3.31	21.7	0.37
27	25.3	1.65	41.6	1.90	7.65	2.19	22.0	0.44
28	30.8	1.93	50.6	1.93	7.97	3.43	20.2	0.27
29	33.5	2.10	56.2	2.12	7.96	3.53	20.6	0.29
47	36.3	2.02	62.1	2.08	9.00	3.93	24.3	0.35
48	36.5	2.39	63.4	2.62	7.63	2.98	21.2	0.39
49	37.5	2.79	56.5	2.81	6.73	2.21	19.1	0.42
12	28.0	2.31	47.1	2.49	6.06	2.26	17.0	0.40
13	34.0	1.88	55.5	1.83	9.05	4.05	23.7	0.31
19	39.1	2.59	65.6	2.81	7.56	2.75	21.2	0.40
50	45.3	2.71	78.6	3.01	8.36	3.12	23.4	0.40
10	32.8	1.98	56.5	2.05	8.29	3.66	21.4	0.29
58	32.9	1.51	58.1	1.64	10.9	4.57	29.9	0.37
59	40.7	2.65	75.5	2.96	7.67	3.39	20.5	0.34
60	43.2	2.41	85.0	2.92	9.33	3.48	26.1	0.40
Average					8.12±1.01	3.14±0.67	22.2±2.74	0.37±0.05



รูปที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของเกลือหินในฟังก์ชันของความเค้นหลักกลาง

5.2 เกณฑ์การแตก

เกณฑ์การแตกที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์การแตกในสามแกนจริงของเกลือหิน ประกอบด้วยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook, Mogi 1971, Modified Lade, Coulomb, Hoek and Brown และ Drucker-Prager โดยเกณฑ์การแตกทั้งหมดได้ทำการศึกษาอย่างละเอียดโดย Haimson (2006) and Colmenares and Zoback (2002) ซึ่งสามารถอธิบายสั้นๆ ได้ดังนี้

5.2.1 เกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook

เกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook ได้ถูกนำเสนอโดย Zhou (1994) ซึ่งได้ทำการพัฒนามาจากเกณฑ์การแตกของ Wiebols and Cook (1968) อาศัยหลักการที่ว่า พื้นฐานของพลังงานที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการแตกของรอยแตก เนื่องจากเกิดการเลื่อนไหลของพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook ได้นำเสนอในรูปของ $J_2^{1/2}$ ที่จุดแตกในฟังก์ชัน J_1 คือ

$$J_2^{1/2} = A + BJ_1 + CJ_1^2 \quad (5.5)$$

โดยค่าคงที่ A, B และ C ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหินและค่าความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3) ค่าความเค้นยึดติด (c) และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบการกดในสามแกนแบบดั้งเดิม (Colmenares and Zoback, 2002) คือ

$$C = \frac{\sqrt{27}}{2C_1 + (q-1)\sigma_c - \sigma_c} \times \left(\frac{C_1 + (q-1)\sigma_c - \sigma_c}{2C_1 + (2q+1)\sigma_c - \sigma_c} - \frac{q-1}{q+2} \right) \quad (5.6)$$

โดยที่

$$C_1 = (1 + 0.6\mu_i) \sigma_c$$

σ_c = ค่าความเค้นกดในแกนเดียว

$$\mu_i = \tan\phi$$

$$q = \{(\mu_i^2 + 1)^{1/2} + \mu_i\}^2 = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$$

$$B = \frac{\sqrt{3}(q-1)}{q+2} - \frac{C}{3}(2\sigma_c + (q+2)\sigma_3) \quad (5.7)$$

$$A = \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} - \frac{\sigma_c}{3}B - \frac{\sigma_c^2}{9}C \quad (5.8)$$

และเกณฑ์การแตกนี้ยังสามารถเขียนในรูปของความเค้นหลักสูงสุดที่จุดแตกได้ดังนี้

$$\sigma_1 = \left[\frac{6(\psi - \chi) - 3(A + B\sigma_m)}{C\sigma_m} \right] - (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (5.9)$$

โดยที่ $\psi = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$

$$\chi = (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)$$

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการคาดคะเนจากเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook criterion ในรูปของแผนภูมิ $J_2^{1/2} - J_1$ และ $\sigma_1 - \sigma_2$ ซึ่งผลปรากฏว่าเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook สามารถอธิบายผลกระทบของความเค้นหลักกลางได้ดี

5.2.2 เกณฑ์การแตกของ Mogi

เกณฑ์การแตกของ Mogi ได้เสนอ $\tau_{oct,f}$ ที่จุดแตกในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ย ($\sigma_{m,2}$) โดยได้ใช้ความสัมพันธ์แบบยกกำลัง (You, 2009) คือ

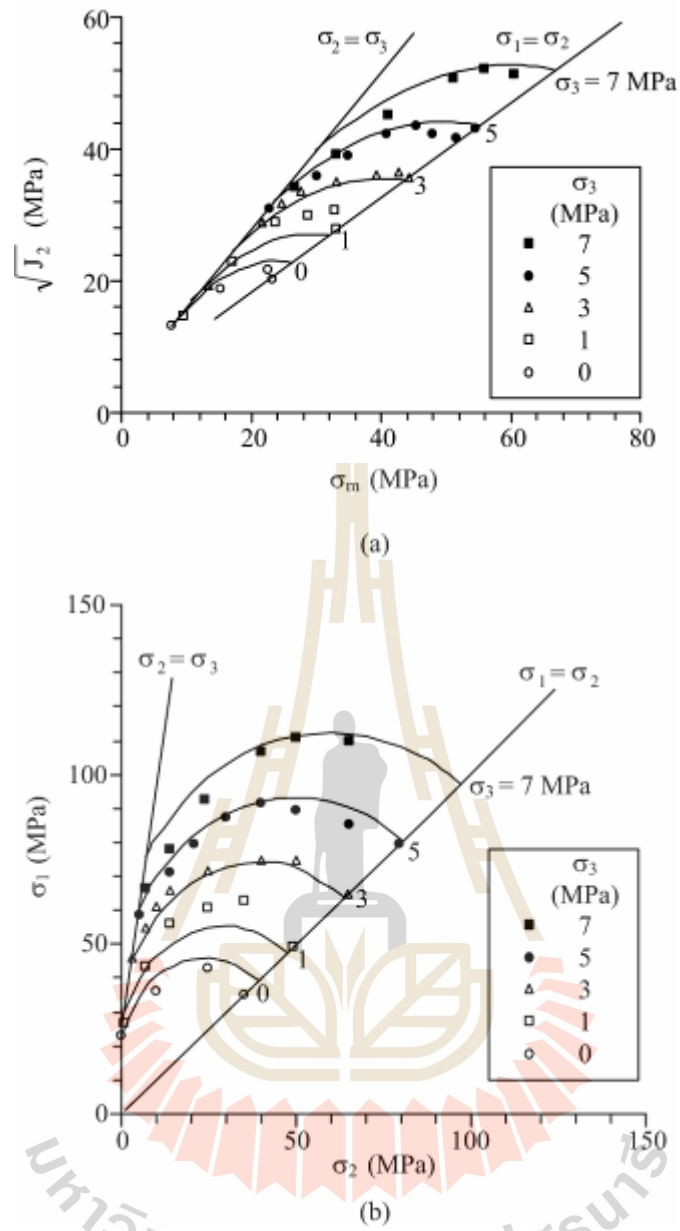
$$\tau_{oct,f} = A' \sigma_{m,2}^{B'} \quad (5.10)$$

$$\sigma_{m,2} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (5.11)$$

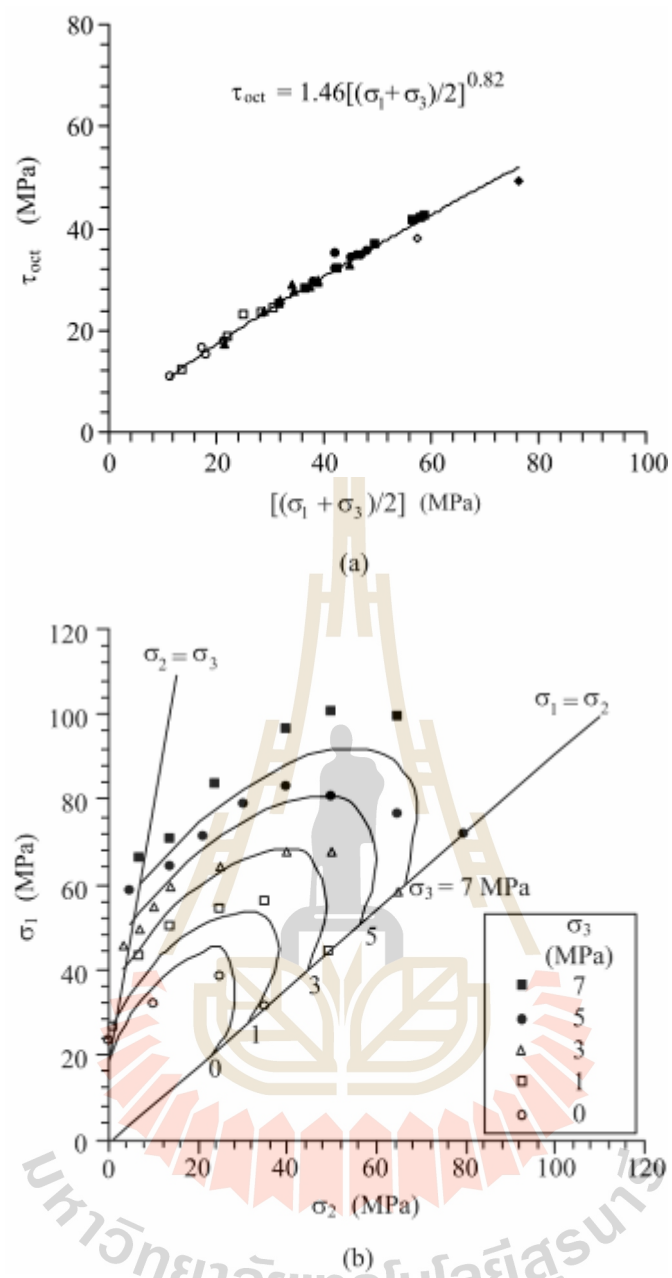
โดยที่ A และ B คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุหิน รูปที่ 5.3a แสดงค่าสมการของ Mogi ซึ่งเกณฑ์การแตกของ Mogi มีแนวโน้มในการคาดคะเนความแข็งแรงของเกลือหินได้ดีที่ค่าความเค้นหลักต่ำสุดและมีค่าน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 5.3b

5.2.3 เกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown

เกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown เกิดจากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นหลักสูงสุดและค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่จุดแตกของหิน (Hoek and Brown, 1980) สามารถเขียนได้ดังสมการ



รูปที่ 5.2 เหน้การแตกของ Modified Wiebols and Cook (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)



รูปที่ 5.3 เกลนซ์การแตกของ Mogi (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \quad (5.12)$$

โดยที่ m และ s คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหินที่เกิดจากการแตกของ σ_1 and σ_3 สำหรับตัวอย่างเกลือที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่า $s=1$ และ $m=20.2$ เกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown สามารถเขียนในรูปของ J_2 and $\sigma_{m,2}$ ได้ดังสมการ

$$J_2^{1/2} = \frac{2}{\sqrt{3}} (\sigma_{m,2}) \quad (5.13)$$

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการคาดคะเนจากเกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown ในรูปของแผนภูมิ $J_2^{1/2} - J_1$ และ $\sigma_1 - \sigma_2$ ปรากฏว่าเกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown ไม่มีการพิจารณาความเค้นหลักกลางที่จุดแตก จึงไม่สามารถทำการอธิบายเกลือหินภายใต้สภาวะกำลังกดในสามแกนจริงและกำลังกดในสามแกนแบบขยายตัวได้

5.2.4 เกณฑ์การแตกของ Modified Lade criterion

เกณฑ์การแตกของ Modified Lade ถูกพัฒนาโดย Ewy (1999) ซึ่งทำการพัฒนาต่อยอดมาจาก Lade and Duncan (1975) โดยทำการพิจารณาความเค้นในแกนหลักที่จุดแตกดังสมการ

$$(I_1')^3 / I_3' = 27 + \eta \quad (5.14)$$

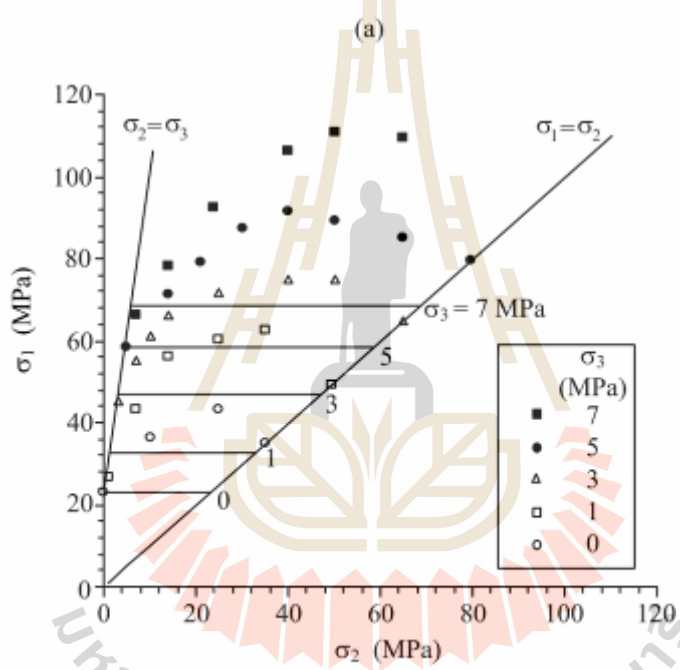
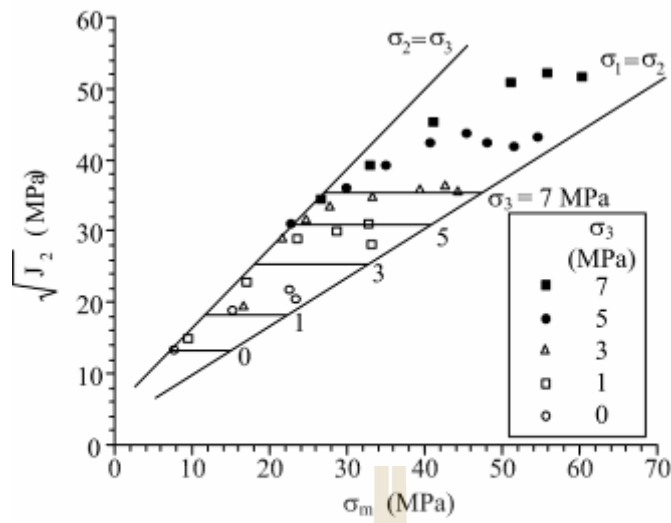
โดยที่

$$I_1' = (\sigma_1 + S) + (\sigma_2 + S) + (\sigma_3 + S)$$

$$I_3' = (\sigma_1 + S)(\sigma_2 + S)(\sigma_3 + S)$$

โดยที่ S และ η คือค่าคงที่ของวัสดุ S คือค่าความสัมพันธ์ของความเค้นยึดติดของหิน ในขณะที่ η คือความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในของหิน ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยตรงจากกฎเกณฑ์การแตกของ Mohr-Coulomb คือค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในของหิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$S = S_0 / \tan \phi$$



รูปที่ 5.4 เกล็ดการแตกของHoek & Brown (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)

$$\eta = 4(\tan\phi)^2 (9 - 7\sin\phi)/(1 - \sin\phi)$$

$$S_0 = \sigma_c/(2q^{1/2})$$

$$q = \{(\mu_i^2 + 1)^{1/2} + \mu_i\}^2 = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$$

จากผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริงพบว่า คุณสมบัติ S มีค่าเท่ากับ 3.66 และ η มีค่าเท่ากับ 88.33 ในรูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการคาดคะเนจากเกณฑ์การแตกของ Modified Lade ในรูปของแผนภูมิ $J_2^{1/2} - J_1$ และ $\sigma_1 - \sigma_2$ ปรากฏว่าเกณฑ์การแตกของ Modified Lade ทำการคาดคะเนความเค้นที่จุดแตกได้สูงกว่าผลการทดสอบของเกลือหินในทุก ระดับของค่าความเค้นหลักต่ำสุด (σ_3)

5.2.5 เกณฑ์การแตกของ Coulomb criterion

เกณฑ์การแตกของ Coulomb สามารถเขียนในรูปของ J_2 และ J_1 (Jaeger et al., 2007) ได้ดังสมการ

$$J_2^{1/2} = \frac{2}{\sqrt{3}} [\sigma_m \sin\phi + c \cdot \cos\phi] \quad (5.15)$$

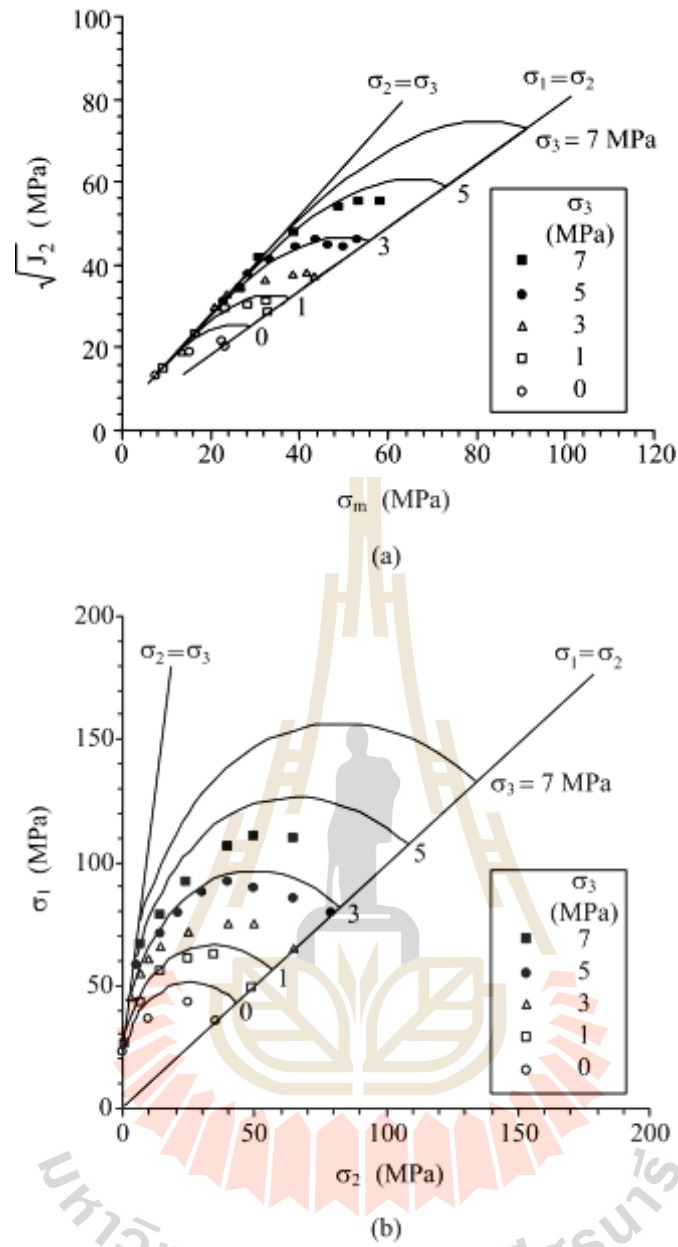
และสามารถแสดงในรูปของความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดที่จุดแตก คือ

$$\sigma_1 = \sigma_c + \tan^2(\pi/4 + \phi/2)\sigma_3 \quad (5.16)$$

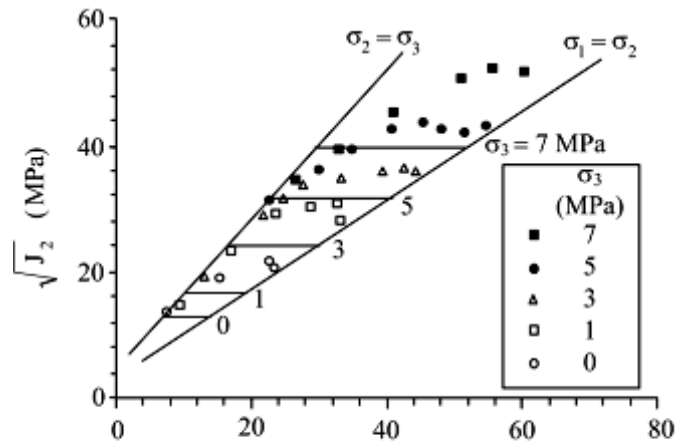
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการคาดคะเนจากเกณฑ์การแตกของ Coulomb ในรูปของแผนภูมิ $J_2^{1/2} - J_1$ และ $\sigma_1 - \sigma_2$ ซึ่งเกณฑ์การแตกของ Coulomb จะมีความคล้ายคลึงกับเกณฑ์การแตกของ Hoek & Brown กล่าวคือเกณฑ์การแตกของ Coulomb ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลางที่จุดแตกจึงเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถอธิบายความแข็งแรงของเกลือหินได้

5.5.6 เกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager

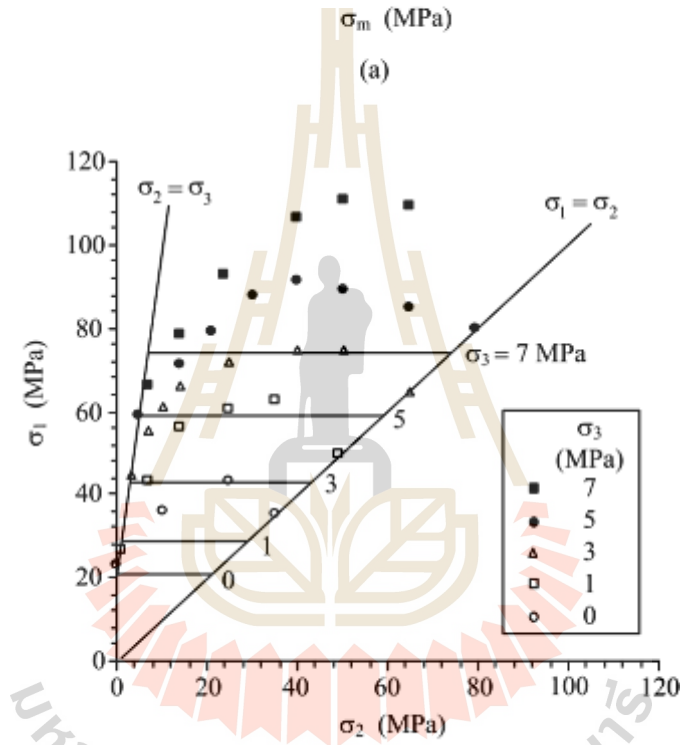
เกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager ได้พัฒนามาจากกฎเกณฑ์ของ Von Mises โดยใช้จุดคลากของดินในการอธิบายพฤติกรรมเชิงพลาสติก (Colmenares and Zoback, 2002) ดังสมการ



รูปที่ 5.5 เหน้การแตกของ Modified Lade (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)



(a)



(b)

รูปที่ 5.6 เกณฑ์การแตกของ Coulomb (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)

$$J_2^{1/2} = \kappa + \alpha \sigma_m \quad (5.17)$$

โดยที่ α และ κ คือ ความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในและความเค้นยึดติดของวัสดุตามลำดับ ซึ่งเกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือเกณฑ์การแตกของ Inscribed Drucker-Prager และเกณฑ์การแตกของ Circumscribed Drucker-Prager สำหรับเกณฑ์การแตกของ Inscribed Drucker-Prager จะให้

$$\alpha = \frac{3 \sin \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}} \quad (5.18)$$

$$\kappa = \frac{2\sigma_c \cos \phi}{2\sqrt{q}\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}} \quad (5.19)$$

เกณฑ์การแตกของ Circumscribed Drucker-Prager จะให้

$$\alpha = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (5.20)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{3}\sigma_c \cos \phi}{\sqrt{q}(3 - \sin \phi)} \quad (5.21)$$

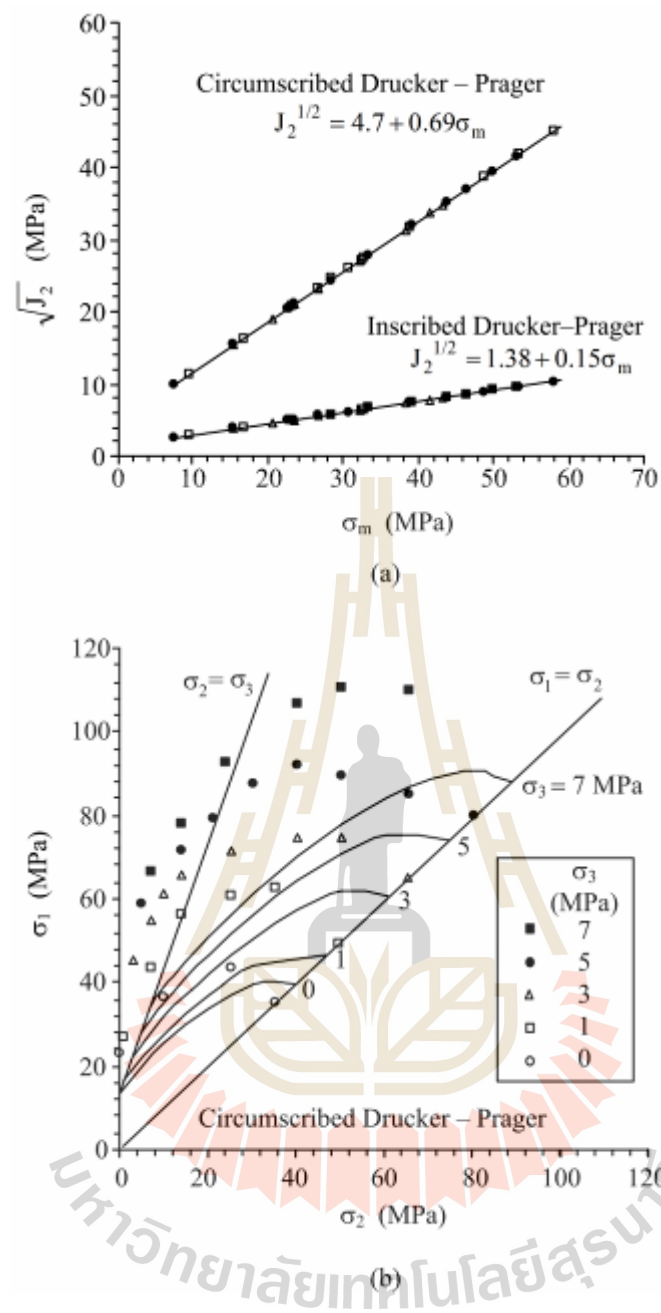
ค่าคงที่ α และ κ ทั้งแบบ Inscribed และแบบ Circumscribed ของเกณฑ์การแตกนี้สามารถคำนวณได้จากผลลัพธ์จากการทดสอบกำลังกดในสามแกนซึ่งแสดงในรูปที่ 5.7 เกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager ยังสามารถแสดงในรูปของความเค้นหลักสูงสุดที่จุดแตก คือ

$$\sigma_1 = \frac{2(\psi - \chi) - \kappa}{\alpha} - (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (5.22)$$

$$\text{โดยที่ } \psi = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$$

$$\chi = (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)$$

รูปที่ 5.7b เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการคาดคะเนเกณฑ์การแตกแบบ Circumscribed Drucker-Prager และผลการทดสอบในฟังก์ชันของ $\sigma_1 - \sigma_2$ เกณฑ์การแตกแบบ Circumscribed Drucker-Prager สามารถคาดคะเนความเค้นแตกได้ต่ำกว่าความแข็งของเกลียวหินในทุกสภาวะของความเค้น ค่าคุณสมบัติของเกลียวหินจากแต่ละเกณฑ์การแตกได้ทำการสรุปไว้ในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.7 เหน้การแตกของ Circumscribed Drucker-Prager (เส้น) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ (จุด)

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติของเกลือหินที่คำนวณได้จากแต่ละเกณฑ์การแตก

Criteria	Calibrated Parameters
Modified Wiebols and Cook	$\sigma_3 = 0$, $A = 2.031$ MPa, $B = 1.746$, $C = -0.036$ MPa ⁻¹ $\sigma_3 = 1$, $A = 1.698$ MPa, $B = 1.739$, $C = -0.030$ MPa ⁻¹ $\sigma_3 = 3$, $A = 1.281$ MPa, $B = 1.733$, $C = -0.022$ MPa ⁻¹ $\sigma_3 = 5$, $A = 1.027$ MPa, $B = 1.732$, $C = -0.017$ MPa ⁻¹ $\sigma_3 = 7$, $A = 0.853$ MPa, $B = 1.732$, $C = -0.014$ MPa ⁻¹
Mogi	$A' = 1.46$ $B' = 0.82$
Hoek & Brown	$m = 20.2$ $s = 1$
Modified Lade	$S = 3.66$ MPa $\eta = 88.33$
Coulomb	$\phi = 50$ degrees $c = 5$ MPa
Drucker-Prager (Circumscribed)	$\alpha_c = 0.69$ $\kappa_c = 4.7$ MPa
Drucker-Prager (Inscribed)	$\alpha_i = 0.15$ $\kappa_i = 1.38$ MPa

5.3 ความสามารถในการคาดคะเนผลการทดสอบ

การคาดคะเนเกณฑ์การแตกในเกลือหินสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยมีดัชนีชี้วัดคือความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูล (Mean Misfit) ซึ่งเป็นวิธีการที่คล้ายคลึงกับ Colmenares and Zoback (2002) โดยเกณฑ์การแตกที่มีค่า Mean Misfit น้อยจะชี้ให้เห็นถึงผลการคาดคะเนที่ดีของเกณฑ์การแตกนั้น ความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูล (\bar{s}) แต่ละเกณฑ์การแตกสามารถทำการคำนวณได้โดย (Riley et al., 1988):

$$\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i \quad (5.23)$$

โดยที่

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sigma_{1j}^{\text{calc}} - \sigma_{1j}^{\text{test}})^2}$$

$\sigma_{1j}^{\text{calc}}$ = ความเค้นหลักสูงสุดจากการคาดคะเนการแตก

$\sigma_{1j}^{\text{test}}$ = ความเค้นหลักสูงสุดจากผลการทดสอบ

N = จำนวนของจุดข้อมูลที่ใช้คำนวณ

M = จำนวนของชุดข้อมูลที่ใช้คำนวณ

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการคำนวณความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูล ซึ่งผลกระทบของความเค้นหลักกลางของเกลือหินสามารถอธิบายได้เป็นอย่างดีด้วยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook โดยมีค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูลเท่ากับ 3.5 MPa เกณฑ์การแตกของ Mogi จะสามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้ดีที่ค่าความเค้นหลักต่ำสุดมีค่าน้อย โดยมีค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูล เท่ากับ 9.6 MPa เกณฑ์การแตกของ Modified Lade สามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้สูงกว่าผลการทดสอบในทุกระดับของความเค้นหลักต่ำสูงสุด ค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูลเท่ากับ 15.4 MPa เกณฑ์การแตกของ Coulomb และเกณฑ์การแตกของ Hoek and Brown ไม่สามารถอธิบายความแข็งของเกลือหินได้ เนื่องจากทั้งสองกฎเกณฑ์ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของความเค้นหลักกลาง ทั้ง Circumscribed และ Inscribed ของเกณฑ์การแตกของ Drucker-Prager จะทำนายผลการทดสอบได้ต่ำกว่าความเค้นหลักสูงสุดในทุกสภาวะของความเค้น โดยให้ค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูลเท่ากับ 19.5 และ 34.7 MPa ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูลสำหรับแต่ละเกณฑ์การแตกที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

Criterion	Mean Misfit (MPa)
Modified Wiebols and Cook	3.5
Mogi	9.6
Hoek & Brown	18.6
3-D Hoek & Brown	15.6
Modified Lade	15.4
Coulomb	17.7
Drucker-Prager (Circumscribed)	19.5
Drucker-Prager (Inscribed)	34.7

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริง

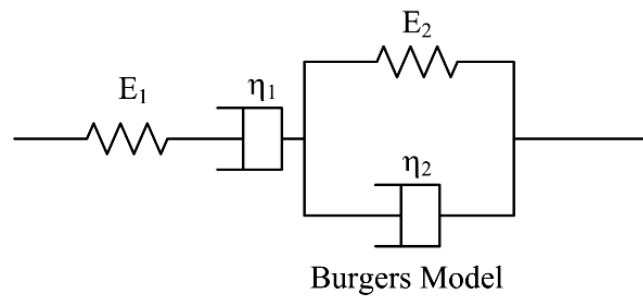
พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา (Creep) ของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดในสามแกนที่มีค่าไม่เท่ากันได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ขั้นสูงของ Jaeger and Cook (1979) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานแบบจำลองของ Burgers เนื้อหาในบทนี้แสดงรายละเอียดและขั้นตอนของการวิเคราะห์ผล

6.1 แบบจำลองของ Burgers

ผลที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนจริงถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบ (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงของ Jaeger and Cook (1979) ได้ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นสมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) เพื่อใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ให้อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองของ Burgers โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงในรูปแบบ Laplace transformation จึงได้สมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง รูปที่ 6.1 แสดงองค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers ซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงที่ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 ความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลา ที่พัฒนาโดยใช้ Laplace Transformation สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma_{oct}(t) = \tau_{oct} \left[\frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t \cdot E_2}{\eta_2}\right) \right\} \right] \quad (6.1)$$

โดยที่	$\gamma_{oct}(t)$	คือ ความเครียดในแนวเฉือนเชิงเวลา
	τ_{oct}	คือ ความเค้นในแนวเฉือน ซึ่งเป็นค่าคงที่เชิงเวลาสำหรับแต่ละตัวอย่างเกลือหิน
	E_1	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
	E_2, η_2	คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น
	η_1	คือ ค่าความหนืดเชิงพลาสติก
	t	คือ เวลา



รูปที่ 6.1 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers



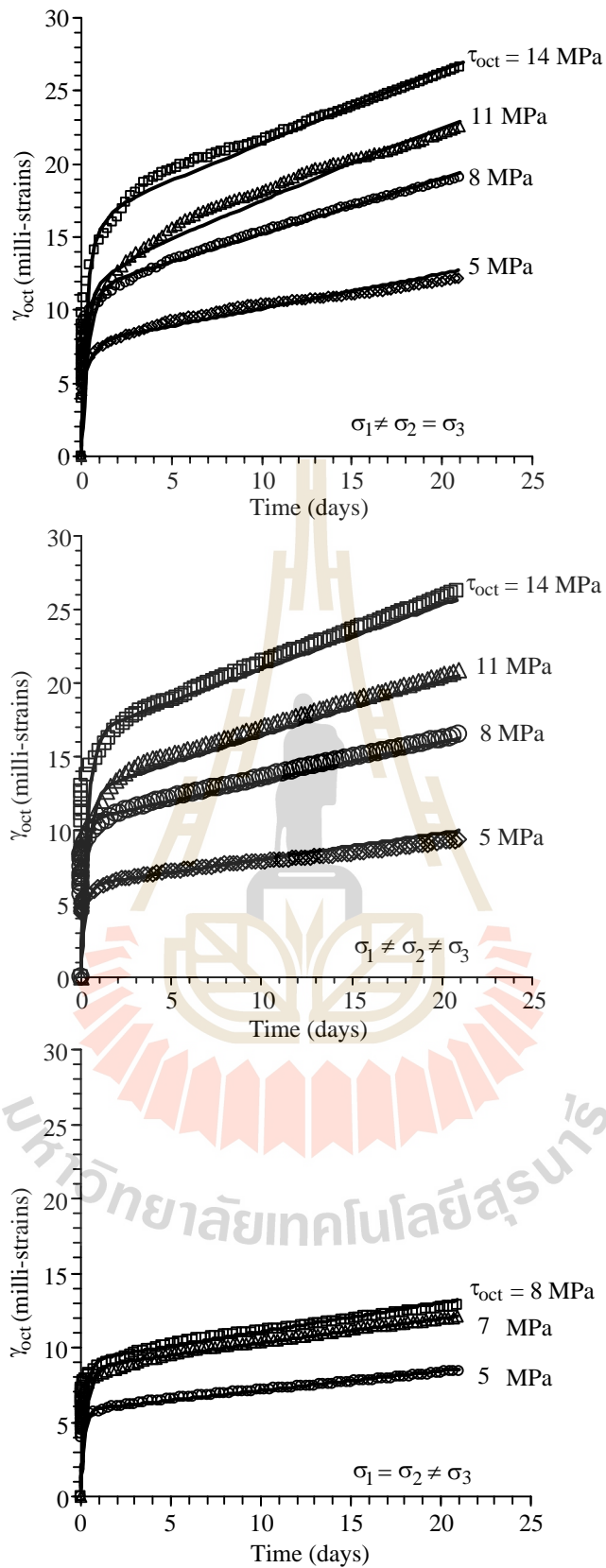
6.2 การสอบเทียบค่าคงที่ของ Burgers

การสอบเทียบค่าคงที่นี้ได้ใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (SPSS) ผลจากการสอบเทียบค่าคงที่โดยใช้แบบจำลองของ Burgers ภายใต้สภาวะความเค้นเฉือนคงที่ในระดับต่างกันของแต่ละตัวอย่างได้แสดงไว้ในแผนภูมिरูปที่ 6.2 ซึ่งความเครียดในแนวเฉือนแสดงในฟังก์ชันของเวลาของการทดสอบ แผนภูมิได้นำเสนอการเปรียบเทียบชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนจริงทั้งสามสภาวะความเค้นกับชุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่ ผลจากการสอบเทียบสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ได้คือค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการสอบเทียบข้อมูลว่ามีประสิทธิภาพดีมากน้อยเพียงใดดังสมการ

$$k = \frac{\sum(\gamma_{\text{oct}} - \bar{\gamma}_{\text{oct}})(\gamma'_{\text{oct}} - \bar{\gamma}'_{\text{oct}})}{\sqrt{\sum(\gamma_{\text{oct}} - \bar{\gamma}_{\text{oct}})^2 \sum(\gamma'_{\text{oct}} - \bar{\gamma}'_{\text{oct}})^2}} \quad (6.2)$$

โดยที่	k	คือ ค่าสหสัมพันธ์
	γ_{oct}	คือ ความเครียดในแนวเฉือนที่ได้จากการทดสอบ
	γ'_{oct}	คือ ความเครียดในแนวเฉือนที่ได้จากการสอบเทียบ
	$\bar{\gamma}_{\text{oct}}$	คือ ความเครียดในแนวเฉือนเฉลี่ย

ตารางที่ 6.1 สรุปผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers ของการทดสอบการคืบในสามแกนจริง ตารางดังกล่าวได้แสดงรูปแบบของการทดสอบ ค่าความเค้นในแนวเฉือน ค่าคงที่ของ Burgers และค่าสหสัมพันธ์ รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ของชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers ในฟังก์ชันของสภาวะความเค้นต่างๆ ผลจากการวิเคราะห์ระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) ที่วัดได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนจริงมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกัน โดยมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับความเค้นหลักกลาง (σ_2) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Sriapai and Fuenkajorn (2010) คือค่าความยืดหยุ่นมีแนวโน้มไม่ขึ้นกับความเค้นหลักกลาง ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2 , η_2) ที่ได้จากการสอบเทียบของการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) ที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนแบบขยายตัว ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) มีค่ามากที่สุดและมีแนวโน้มสูงเมื่อความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดผลกระทบมาจากค่าความเค้นหลักกลาง ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบมีค่าผันแปรจาก 0.94–0.98 สามารถบ่งบอกได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมีการเบี่ยงเบนของข้อมูลเพียงเล็กน้อยและมีประสิทธิภาพในการสอบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ดี



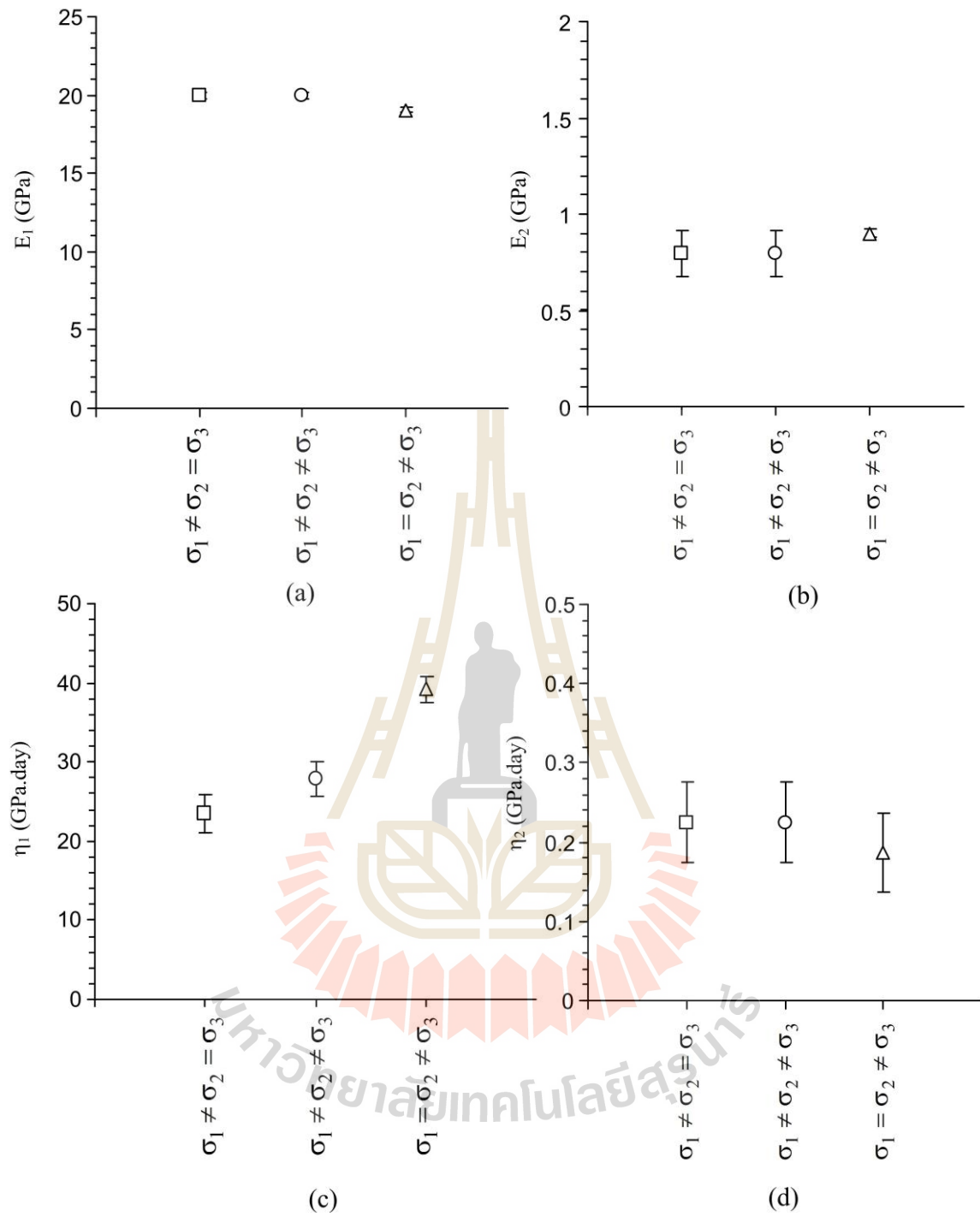
รูปที่ 6.2 ผลจากสอบเทียบค่าคงที่โดยใช้แบบจำลองของ Burgers ภายใต้สภาวะความเค้นต่างกัน ซึ่งความเครียดในแนวเฉือนแสดงในฟังก์ชันของเวลา

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง

Test conditions	τ_{oct} (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa.day)	η_2 (GPa.day)	Correlations coefficient
$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$	14.0	18.9	0.91	26.5	0.30	0.95
	11.0	21.2	0.90	24.0	0.20	0.96
	8.0	19.6	0.70	22.0	0.20	0.97
	5.0	20.1	0.67	21.1	0.20	0.97
$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$	14.0	18.9	0.90	30.0	0.30	0.95
	11.0	21.3	0.90	29.0	0.20	0.98
	8.0	19.6	0.70	27.0	0.20	0.96
	5.0	20.1	0.70	25.0	0.20	0.96
$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$	11.0*	-	-	-	-	-
	8.0	19.8	0.92	41.0	0.23	0.95
	7.0	19.2	0.87	39.0	0.20	0.94
	5.0	18.1	0.91	37.5	0.13	0.94

* ตัวอย่างหินเกิดการวิบัติในเวลาอันรวดเร็วจึงไม่สามารถสอบเทียบค่าคงที่ได้





รูปที่ 6.3 ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers แสดงในฟังก์ชันของสภาวะความเค้นต่างๆ

บทที่ 7

การจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือ

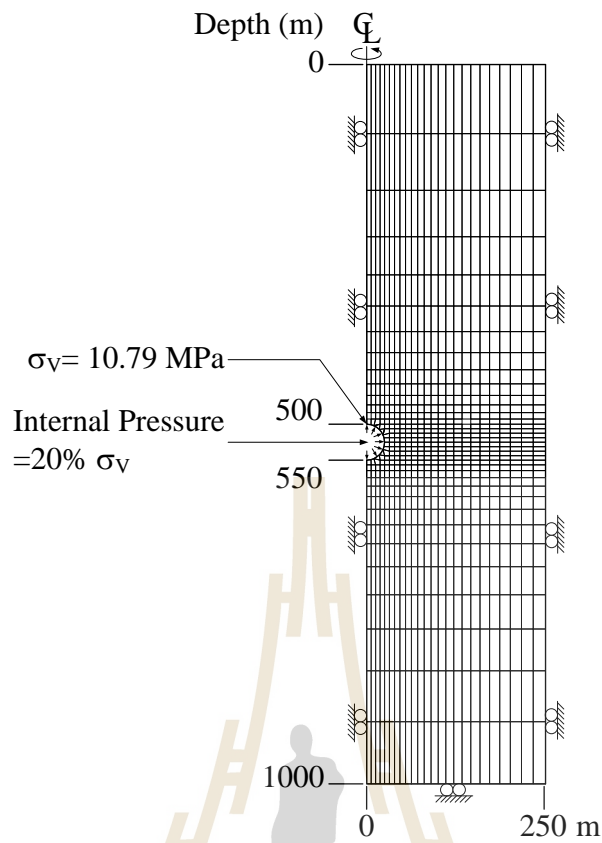
จุดประสงค์ของการจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือคือ เพื่อทำการประเมินเสถียรภาพของโพรงกักเก็บอากาศอัดในชั้นเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาและพฤติกรรมของเกลือหินภายใต้สภาวะคล้ายจริงในภาคสนามด้วยการนำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) มาใช้ในการจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือ

7.1 คุณสมบัติของการจำลอง

โปรแกรม FLAC (Finite Difference) พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Itasca (1994) ได้นำมาใช้ในการจำลองช่องเหมืองและโพรงในชั้นเกลือหิน โดยการวิเคราะห์ได้จำลองลักษณะของโพรงเกลือเป็นแนวแกนสมมาตร (Axis-symmetry planes) คือ แนวตั้งตามแนวแกนของโพรง ดังนั้นการจำลองความเค้นและความเครียดจึงทำเพียงแค่ 1/2 ของโพรงเกลือทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 7.1 ซึ่งโพรงเกลือได้ถูกสมมติให้อยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร โดยมีรัศมีของโพรงเท่ากับ 25 เมตร และความสูงของโพรง 50 เมตร สภาวะความเค้นที่แท้จริงในภาคสนาม (In-situ stress) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการให้ความเค้นที่ระดับของหลังคาโพรงหรือที่ระดับความลึก 500 m ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับ 10.79 MPa และได้จำลองความเค้นภายในโพรง (Internal pressure) ให้มีค่าเท่ากับ 20% ของความเค้นที่แท้จริงในภาคสนาม การจำลองจะใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ได้จากการสอบเทียบการทดสอบการคืบในสามแกนจริงซึ่งมี 3 รูปแบบ คือ การทดสอบการคืบในสามแกนแบบกด (ดั้งเดิม) ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) การทดสอบการคืบในสามแกนจริงหรือหลายแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) และการทดสอบการคืบในสามแกนแบบยึดตัว ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$)

7.2 ผลการจำลอง

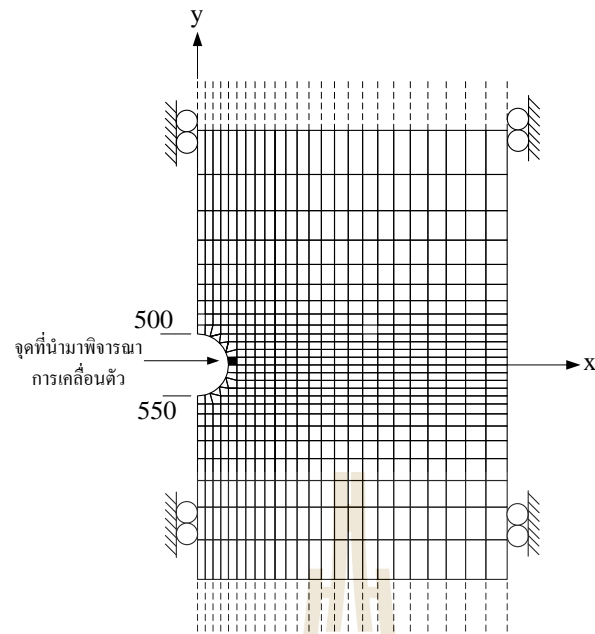
ค่าคงที่ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2, η_2) และค่าความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) จากการสอบเทียบโดยใช้แบบจำลองของ Burgers (ในบทที่ 6) ทั้ง 3 รูปแบบ ของการทดสอบถูกนำไปใช้ในการจำลองโพรงเกลือ โดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปเชิงเวลาของเกลือหินที่อยู่รอบโพรง ตารางที่ 7.1 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของโพรงในแบบจำลองโดยพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนตัวในแกน x เท่านั้นและจุดที่นำมาพิจารณาคือจุดที่ผนังโพรงดังรูปที่ 7.2 ผลการจำลองการเคลื่อนตัวในแต่ละสภาวะความเค้นมีความแตกต่างกันน้อยเนื่องจากค่าคงที่ต่างๆ ของ Burgers (E_1, E_2, η_1 และ η_2) มีความละเอียดอ่อนมากโดยเฉพาะในขั้นตอนการสอบเทียบค่าโดยใช้แบบจำลองของ



รูปที่ 7.1 การจำลองช่องเหมืองและโพรงในชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC)

ตารางที่ 7.1 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ของโพรงในแบบจำลอง

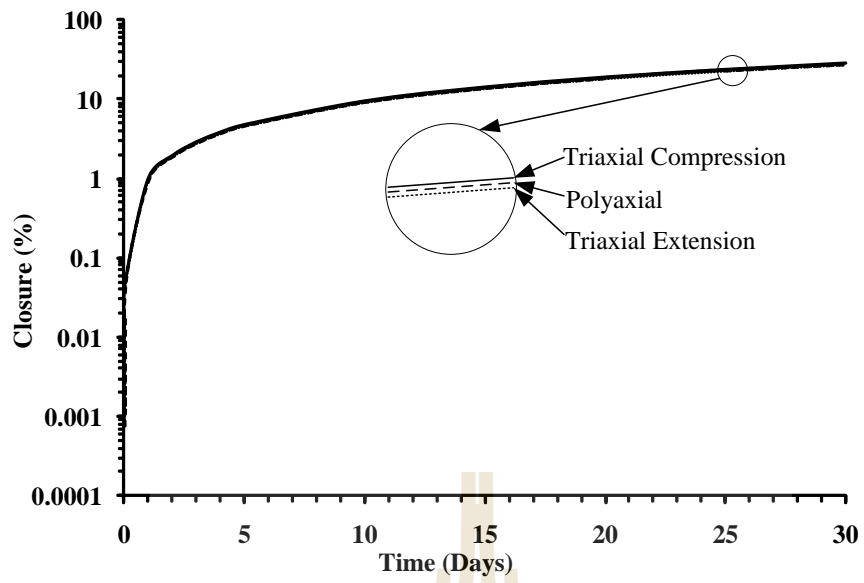
Time (Days)	Closure (%)		
	Triaxial Compression ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$)	Polyaxial ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)	Triaxial Extension ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$)
1	0.9832	0.9812	0.9796
2	1.9168	1.9120	1.9080
3	2.8500	2.8428	2.8364
4	3.7828	3.7732	3.7648
5	4.7160	4.7040	4.6920
10	9.3800	9.3560	9.3320
15	14.0400	14.0040	13.9720
20	18.6960	18.6520	18.6120
25	23.3520	23.3000	23.2520
30	28.0040	27.9440	27.8880



รูปที่ 7.2 จุดที่ผนังโพรงในการนำมาพิจารณาการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ในแต่ละสภาวะความเค้นต่างๆ

Burgers ส่งผลให้ค่าที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องแท้จริงที่สภาวะต่างๆ ถึงแม้ว่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าความแตกต่างของแต่ละสภาวะความเค้นไม่ถึง 1% แต่ในสภาวะจริงผลต่างเพียง 1% ในแบบจำลองมีค่าประมาณ 10,000 m³ ของโพรงกักเก็บ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการการสอบเทียบเพื่อให้ได้ผลดีที่สุดตามเวลาที่เอื้ออำนวย ซึ่งผลการจำลองระบุว่า การเคลื่อนตัวของโพรงที่สภาวะความเค้นต่างๆ มีความแตกต่างกันโดยเริ่มจากการเคลื่อนตัวที่สภาวะการทดสอบการคืบในสามแกนแบบกดที่มีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่การทดสอบการคืบในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกนแบบยึดตัวที่มีค่าน้อยที่สุด ในรูปที่ 7.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงในเชิงเวลาได้ ซึ่งแสดงในรูปแบบร้อยละของการยุบตัวในฟังก์ชันของเวลา โดยมีการให้สภาวะความเค้นรอบโพรงที่แตกต่างกัน โดยที่สภาวะการคืบในสามแกนแบบกดแสดงอัตราการยุบตัวของเกลือหินรอบโพรงมากที่สุด และมีอัตราการยุบตัวน้อยที่สุดในสภาวะการคืบในสามแกนแบบยึดตัว





รูปที่ 7.3 อัตราการยุบตัวของเกลือหินรอบโพรง (ร้อยละ) ที่สภาวะความเค้นต่างกันแสดงในฟังก์ชันของเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลอง FLAC

บทที่ 8

บทสรุป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติการคืบ (Creep) ของเกลือหินที่อยู่ภายใต้ความเค้นหลักในสามทิศทางที่ไม่เท่ากัน (การทดสอบในสามแกนจริง) ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะสอดคล้องกับสภาวะจริงในภาคสนาม ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบการคืบแบบดั้งเดิม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

การทดสอบได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินจากชุดมหาสารคาม มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $5.4 \times 5.4 \times 5.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบใช้โครงทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial load frame) เพื่อให้ความเค้นกดคงที่ในเชิงเวลา แต่สามารถมีค่าต่างกันในแต่ละทิศทาง นอกจากนี้ยังมีการทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินในสามทิศทางด้วย เพื่อนำผลที่ได้มากำหนดค่าความเค้นกดที่เหมาะสมในการทดสอบการคืบในสามแกนจริง ซึ่งผลที่ได้ระบุว่าค่าความเค้นเฉลี่ยใน 3 มิติ ควรผันแปรจาก 5, 8, 11 ถึง 14 MPa ในขณะที่ความเค้นเฉลี่ยทั้งสามแกนถูกปรับให้คงที่เท่ากับ 15 MPa สำหรับทุกตัวอย่าง นอกจากนี้การทดสอบการคืบในสามแกน (ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐานสากล ASTM) การกดในหลายแกน และการกดแบบยึดในสามแกนได้มีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินในแนวแกนหลักทั้งสามในเชิงเวลาอย่างต่อเนื่องถึง 21 วัน

ผลจากการทดสอบระบุว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินโดยฉับพลัน และแบบความหนืดเชิงยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับการผันแปรของค่าความเค้นหลักกลาง กล่าวคือ ไม่ขึ้นกับสภาวะการกดที่ต่างกันทั้งสามแกนราบใดที่อยู่ภายใต้ความเค้นเฉือนในสามมิติที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามปัจจัยความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหิน (การเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาแบบถาวร) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นหลักกลางเพิ่มขึ้น กล่าวคือมีค่าต่ำที่สภาวะการกดแบบสามแกน และมีค่าสูงขึ้นในสภาวะการกดแบบหลายแกนและแบบยึดในสามแกน ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับโพรงกักเก็บพลังงานอากาศอัดในชั้นเกลือหินพบว่า เมื่อนำผลการทดสอบการคืบแบบสามแกนภายใต้แรงกด (แบบดั้งเดิม) มาใช้ในการจำลองจะให้ค่าการหดตัวของโพรงในเชิงเวลาสูงกว่าการหดตัวของโพรงในสภาวะจริงที่จำลองโดยใช้ผลการทดสอบที่ได้จากสภาวะการคืบแบบยึดในสามแกน และแบบการกดในหลายแกน

บรรณานุกรม

- Adler, P. M., Zazovsky, A., Baranger, Ph., Bonte, G., Laurens, J. F., and Sureau, J. F. (1996). Hydrodynamic aspect of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 249–261). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Al–Ajmi, A. M. and Zimmerman, R.W. (2005). Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 42: 431–439.
- Alexeev, A. D., Revva, V. N., Alyshev, N. A. and Zhitlyonok, D. M. (2004). True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction. **Int. J. Coal. Geol.** 58: 245–250.
- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1993). Healing processes and transient creep of salt rock. In A. Anagnostopoulos (ed.). **Geotechnical Engineering of Hard Soils–Soft Rocks**. 1–3: 1581–1590. Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema.
- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1996). Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 207–218). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Arieli, A., Heard, H. C., and Mukherjee, A. K. (1982). Deformation modelling in sodium chloride intermediate and elevated temperatures. In R. W. Rohde and J. L. Swearingen (eds). **Mechanical Testing for Deformation Model Development** (pp. 342–365). Philadelphia: ASTM Spec. Technical Publications.
- ASTM D2664. 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). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2938. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

- ASTM D3967. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4543–08. Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7070–08. Standard test method for creep of rock core under constant stress and temperature. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.09). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Aubertin, M. (1996). On the physical origin and modeling of kinematics and isotropic hardening of salt. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 1–18). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Aubertin, M., Gill, D. E., and Ladanyi, B. (1992). Modeling the transient inelastic flow of rock salt. In **Proceedings of the 7th 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 rock salt: Basic considerations for semi–brittle behavior. In **Proceedings of the 4th International Symposium on Plasticity and its Current Applications** (pp. 92). Baltimore.
- Benz, T. and Schwab, R. (2008). A quantitative comparison of six rock failure criteria. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 45: 1176–1186.
- Berest, P., Brouard, B., and Durup, G. (1998). Behavior of sealed solution–mined caverns. In **Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 511–524). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Billiotte, J., Guen, L. C., Deveughele, M., and Brulhet, J. (1996). On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis–France). In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 221–230). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Bonte, G. (1996). Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 263–267). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Broek, W. M. G. T. and Heilbron, H. C. (1998). Influence of salt behavior on the retrievability of radioactive waste. In **Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 561–573). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Cai, M. (2008). Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries—Insight from numerical modeling. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 45: 763–772.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rock salt. **Structural Geology.** 15 (10): 1257–1272.
- Carter, N. L. and Hansen, F. D. (1983). Creep of rocksalt. **Tectonophysics.** 92: 275–333.
- Chokski, A. H. and Langdon, T. G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. **Materials Science and Technology.** 7: 577–584.
- Cleach, 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. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 231–236). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Colmenares, L. B. and Zoback, M. D. (2002). A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 39: 695–729.
- Cristescu, N. and Hunsche, U. (1996). A comprehensive constitutive equation for rock salt determination and application. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 191–205). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Donath, F., Meyer, B., Hume, H., and Karakouzian, M. (1988). Core aging and storage effects study of Avery Island Salt. **Waste Management'88.** Arizona. Tuscon.

- Dreyer, W. (1973). **The Science of Rock Mechanics, Part 1: The Strength Properties of Rocks**. Cleveland: Trans Tech Publications.
- Duncanl, E. J. S. and Lajtail, E. Z. (1993). The creep of potash salt rocks from saskatchewan. **Journal of Geotechnical and Geological Engineering**. 11: 159–184.
- Ewy R (1999) Wellbore–stability predictions by use of a modified Lade criterion. **SPE Drill Completion**. 14(2): 85–91.
- Fokker, P. A. (1995). **The behavior of salt and salt caverns**. Ph. D. Thesis, Delft University of Technolgy.
- Fokker, P. A. (1998). The micro–mechanics of creep in rock salt. In **Proceedings of the 4th 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**. 45: 201–213.
- Fuenkajorn, K. and Archeeploha, S. (2010). Prediction of cavern configurations from subsidence data. **Engineering Geology**. 110: 21–29.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. **Engineering Geology**. 112(1–4): 43–52.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. (1988). Boreholes closure in salt. **Technical Report prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report No. NUREG/CR–5243 RW**. University of Arizona.
- Garcia, E. G. and Estrada, J. H. (1998). Study of correlation between creep tests and variable deviator stress tests in samples of rock salt from Tuzandépetl Dome, Veracruz, Mexico. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 35(4/5): 559–562.
- Haimson, B. (2006). True triaxial stresses and the brittle fracture of rock. **Pure and Applied Geophysics**. 163: 1101–1113.

- Haimson, B. and Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 37: 285–296.
- Hamami, M. (2006). Experimental and numerical studies of rock salt strain hardening. **Geotechnical and Geological Engineering.** 24: 1271–1292.
- 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 3rd 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., 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 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 199–206). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Hardy, H. R. (1996). Application of the Kaiser effect for the evaluation old in-situ stress in salt. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt** (pp. 85–100). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hoek, E. and Brown, E. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. **J. Geotech. Eng. Div.** 106(GT9): 35–1013.
- Hunsche, U. E. and Albrecht, H. (1990). Results of true triaxial strength tests on rock salt. **Engineering Fracture Mechanics.** 35: 867–877.
- Hunsche, U. and Schulze, O. (1996). Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 237–248). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Itasca (1992). **User Manual for FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0.** Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics.** London: Chapman and Hall.

- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W., (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics**. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- 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.
- Jin, J. and Cristescu, N. D. (1998). An elastic/viscoplastic model for transient creep of rock salt. **International Journal of Plasticity**. 14(1-3): 85-107.
- Lade, P. Duncan, J. (1975). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesion less soil. **J. Geotech. Eng. Div. ASCE** 101: 1037-1053.
- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978). **Handbook on Mechanical Properties of Rocks (Vols. II, III): Series on Rock and Soil Mechanics**. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Langer, M. (1984). The rheological behaviour of rock salt. In **Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp.201-240). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Lindner, E. N. and Brady, B. H. G. (1984). Memory aspects of salt creep. In **Proceedings of the 1st Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 241-273). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Ling, W., Yang, C., Zhao, Y., Dusseault, M. B., and Liu, J. (2007). Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 44: 400-411.
- 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 6th 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 1st Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 169-179). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Mirza, U. A. (1984). Prediction of creep deformations in rock salt pillars. In **Proceedings of the 1st 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 5th International Symposium on Salt** (pp. 379–392). Cleveland, Ohio: The Northern Ohio Geological Society.
- Munson, D. E. (1997). Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 34(2): 233–247.
- Munson, D. E. and Dawson, P. R. (1984). Salt Constitutive Modeling Using Mechanism Maps. In **Proceedings of the 1st 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 7th International Congression of the Rock Mechanics** (vol. 3, pp. 1797–1810). A.A. Balkema.
- Nair, K. and Boreisi, A. P. (1970). Stress analysis for time dependent problems in rock mechanics. In **Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics** (Vol. 2, No. 4, pp. 531–536). Belgrade.
- Nicolae, M. (1999). Non–Associated Elasto–Viscoplastic Models for Rock Salt. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 37: 269–297.
- Peach, C. J. (1996). Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 153–166). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Pestrenin, V. M. and Pestrenina, I. V. (2010). Nonlinear Hereditary Model of the Prestressed Salt Rock. **Journal of Mining Science.** 46(1): 21–27.
- 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): 347–352.

- Reddy, K. R., Saxena, S. K., and Budiman, J. S. (1992). Development of a true triaxial testing apparatus. **Geotechnical Testing Journal** 35(2): 89–105.
- Richards, J. (1993). **Plasticity and Creep. Theory, Examples, and Problems.** English Edition Editor, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York.
- Riley K. F., Hobson M. P., and Bence S. J. (1998). **Mathematical methods for physics and Engineering.** Cambridge University Press, Cambridge. 1008p.
- Samsri, P., Sriapai, T., Walsri, C., and Fuenkajorn, K. (2011). Polyaxial creep testing of rock salt. In **Proceedings of the 3rd Thailand Symposium on Rock Mechanics.** (pp 125–132). Phetchaburi, Thailand.
- Schneefub, J. and Droste, J. (1996). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 373–380). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Senseny, P. E. (1984). Specimen size and history effects on creep of salt. In **Proceedings of the 1st 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 behavior of rock salt: phenomenology and micro–mechanisms. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 29. 4: 363–37.
- Senseny, P. E., Pfeifle, T. W., and Mellegard, K. D. (1986). Exponential time constitutive law for Palo Duro Unit 4 salt from the J. Friemel No. 1 Well. **Technical Report, BMI/ONWI–595, prepared by RE/SPEC Inc., for the Office of Nuclear Waste Isolation.** Columbus, OH: Battelle Memorial Institute.
- Skrotzki, W. and Haasen, P. (1988). The role of cross–slip in the steady–state creep of salt. In **Proceedings of the 2nd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 69–81). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Smart, B. G. D. (1995). A true triaxial cell for testing cylindrical rock specimens. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 32(3): 269–275.
- Sriapai, T. and Fuenkajorn, K. (2010). Polyaxial strengths of Maha Sarakham salt. In **Proceeding of the 6th Asian Rock Mechanics Symposium.** New Delhi, India.

- Staudtmeister, K. and Rokahr, R. B. (1997). Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 34: 300.
- Tiwari R.P. and Rao K.S. (2004). Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 41(3): 1–6.
- Tiwari, R.P. and Rao, K. S. (2006). Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement. **Engineering Geology.** 84: 112–129.
- 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.
- Wanten, P. H., Spiers, C. J., and Peach, C. J. (1996). Deformation of NaCl single crystals at $0.27T_m < T < 0.44T_m$. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 117–128). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Warren, J. (1999). **Evaporites: Their Evolution and Economics**. Blackwell Science, Oxford.
- Wawersik, W. R. (1988). Alternatives to a power-law creep model for rock salt at temperatures below 160 °C. In **Proceedings of the 2nd 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., Carlson, L. W., Holcomb, D. J., and Williams, R. J. (1997). New method for true-triaxial rock testing. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 34(3–4): 365–385.
- Weidinger, P., Hampel, A., Blum, W., and Hunshe, U. (1997). Creep behaviour of natural rock salt its description with the composite model. **Materials Science and Engineering A.** 234–236: 646–648.

- Wendai, L. (2000). Regression analysis, liner regression and probit regression In 13 chapters. **SPSS for Windows: statistical analysis**. Publishing House of Electronics Industry. Beijing.
- Wiebols, G. A. and Cook, N. G. W. (1968). An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 5: 529–549.
- Yahya, O. M. L., Aubertin, M., and Julien, M. R. (2000). A unified representation of the plasticity: Creep and relaxation behavior of rock salt. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 37(5): 787–800.
- Yang, C., Daemen, J. J. K., and Yin, J. (1999). Experimental investigation of creep behaviour of salt rock. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 36: 233–242.
- Yang, X. L., Zou, J. F., and SUI, Z. R. (2007). Effect of intermediate principal stress on rock cavity stability. **Journal Central South University Technology.** 14(s1): 165–169.
- You, M. (2009). True–triaxial strength criteria for rock. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 46: 115–127.
- Zhang, L. and Zhu, H. (2007). Three–dimensional hoek–brown strength criterion for rocks. **J. Geotech. Geoenviron . Eng.** 133(9): 1128–1135.
- Zhou, S. A. (1994). Program to mode the initial shape and extent of bore hole breakout. **Computer Geosci.** 20(7/8): 1143–1160.

ประวัตินักวิจัย

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