ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250493

รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-10

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน

(True Triaxial Creep Test of Rock Salt)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

b00256442

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250493

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 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความ-ช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2554

บทคัดย่อ

250493

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหินชุดมหาสารคาม เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อพฤติกรรมเชิงเวลาของหิน โครงกดทดสอบในสามแกนจริงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ความเค้นกดที่คงที่ในสามแกนต่อตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 5.4×5.4×5.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติผันแปรจาก 5, 8, 11 ถึง 14 MPa ในขณะที่ค่าความเค้นเฉลี่ยจะปรับให้คงที่เท่ากับ 15 MPa สำหรับทุกตัวอย่าง สภาวะการให้แรงมีสามรูปแบบคือ การกดในสามแกน การกดในหลายแกน และการกดแบบยืดในสามแกน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างถูกตรวจวัดในแนวแกนหลักเชิงเวลาต่อเนื่องถึง 21 วัน เมื่อนำผลจาก Burgers Model มาเทียบเคียงผลในเชิงสถิติในรูปแบบของความเครียดเฉือนในสามแกนต่อเวลาพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกลือหินโดยฉับพลันและการเปลี่ยนรูปร่างแบบความหนืดเชิงยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับการผันแปรของค่าความเค้นหลักกลาง อย่างไรก็ตามภายใต้ความเค้นเฉือนในสามมิติที่เท่ากัน ปัจจัยความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นหลักกลางเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อหาค่าการหดตัวของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บพลังงานอากาศอัดในชั้นเกลือหิน ผลที่ได้ระบุว่าผลการทดสอบการคืบของเกลือหินแบบสามแกนภายใต้แรงกด (แบบดั้งเดิม) จะให้ค่าการหดตัวของโพรงเกลือในเชิงเวลาสูงกว่าการหดตัวของโพรงเกลือในสภาวะจริงที่จำลองจากผลการทดสอบในสภาวะการคืบแบบยืดตัวและแบบหลายแกน

Abstract

250493

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 5.4×5.4×5.4 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 .....

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 การคำนวณความยืดหยุ่นของเกลือหิน 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 การจำลองช่องเหมืองและโพรงเกลือ 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

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่ 7

3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง 16

3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง 19

4.1 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง 22

4.2 องค์ประกอบของโครงกดทดสอบในสามแกนจริง 22

4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง 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}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นที่แตกต่างกัน 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