



การพัฒนาสมการแสดงคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของเกลื่อนหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี

กัญญา ไกรปรุ และ ธนิษฐา ทองประภา*

หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4422 3363 อีเมล: thanittha@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.003

รับเมื่อ 20 พฤษภาคม 2565 แก้ไขเมื่อ 18 กรกฎาคม 2565 ตอปรับเมื่อ 9 สิงหาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 9 มกราคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของเกลื่อนหินชุดมหาสารคามที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี แบบจำลองการคืบของหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีถูกพัฒนาจากสมการของ Amadei ให้อยู่ในรูปค่าคงที่ของเบอเกอร์และมุมการวางตัวของชั้นหิน งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการคืบในแกนเดียวกับตัวอย่างเกลื่อนหินที่มีระนาบการวางตัวของชั้นหิน (β) ผันแปรตั้งแต่ 0 45 60 75 ถึง 90 องศา ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลการทดสอบระบุว่า ความเครียดในแนวแกนและแนวด้านข้างมีค่าสูงสุดเมื่อแนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบของชั้นหิน ($\beta = 0^\circ$) และมีค่าต่ำสุดเมื่อแนวแรงกดขนานกับระนาบของชั้นหิน ($\beta = 90^\circ$) การวิเคราะห์เชิงถดถอยระบุว่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น และความหนืดเชิงพลาสติกมีค่าสูงขึ้นเมื่อมุม β มากขึ้น แบบจำลองการคืบของหินแบบ ทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีสามารถคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นปรากฏและอัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏเชิงเวลาของเกลื่อนหินภายใต้สถานะที่ชั้นหินมีระนาบการวางตัวแตกต่างกันได้ และสามารถใช้ในการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของโครงสร้างใต้ดิน เช่น เสาค้ำยันและผนังด้านข้างของเหมืองเกลื่อนหินได้

คำสำคัญ: การคืบของหิน ระนาบชั้นหิน แบบจำลองแบบเบอเกอร์ เกลื่อนหินมหาสารคาม



Development of Constitutive Equations for Time-Dependent Behavior of Transverse Isotropic Rock Salt

Kanya Kraipru and Thanittha Thongprapha*

Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 4422 3363, E-mail: thanittha@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.003

Received 20 May 2022; Revised 18 July 2022; Accepted 9 August 2022; Published online: 9 January 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this study is to determine the time-dependent properties of transverse isotropic Maha Sarakham rock salt. The transverse isotropic creep models have been derived in the form of Burgers parameters and bedding plane orientations based on Amadei's solutions. Uniaxial creep tests have been performed on the rock salt specimens with bedding plane orientations (β) varying from 0, 45, 65, 75, to 90° to compare with the proposed creep models. The axial and lateral strains of rock salt specimens are the largest when the loading direction is normal to the bedding plane ($\beta = 0^\circ$) and smallest when parallel to the bedding plane ($\beta = 90^\circ$). Regression analyses of the results indicate that the elastic, viscoelastic, and viscoplastic parameters increase with increasing angle. The transverse isotropic creep models are capable of predicting the measured creep strains and determining the apparent time-dependent Young's modulus and Poisson's ratios of rock salt under various bedding orientations. The transverse isotropic creep models can be used to predict the time-dependence deformation of underground structures such as salt pillars and mine sidewalls.

Keywords: Creep, Bedding Plane, Burgers Model, Maha Sarakham Salt

Please cite this article as: K. Kraipru and T. Thongprapha, "Development of Constitutive Equations for Time-Dependent Behavior of Transverse Isotropic Rock Salt," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 2, pp. 1-11, ID. 242-066081, Apr.-Jun. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

เกลือหินชุดมหาสารคามในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีการวางตัวเป็นระนาบและมักพบลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีเนื่องจากชั้นของการตกผลึกและแร่เจือปน ได้แก่ แอนไฮไดรต์ โพแทช ยิปซัม และแร่ดินเหนียว ซึ่งแร่เจือปนเหล่านี้อาจแทรกอยู่ระหว่างชั้นหรือกระจายตัวอยู่ระหว่างผลึกของเกลือหิน ลักษณะทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีนี้ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน Jeremic [1] พบว่า ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของเกลือหินจากประเทศโปแลนด์มีค่าต่ำสุดเมื่อมุมระหว่างแนวแกนที่ตั้งฉากกับระนาบชั้นหินและแนวแรงในแกนหลัก (β) เท่ากับ 45 องศา Sukjaroen และคณะ [2] พบว่า ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของเกลือหินมีค่าต่ำสุดเมื่อมุม β เท่ากับ 60 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในหินขนวนหินดินดาน [3] หินทราย หินทรายแป้ง หินโคลน [4], [5] หินปูน หินแกรนิต และหินชีสต์ [6] และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแปรผันตามมุม β [7]–[9] Thongprapha และคณะ [10] พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกนของเกลือหินมีค่าต่ำสุดเมื่อมุม β เท่ากับ 0 องศา และสูงสุดเมื่อมุม β เท่ากับ 90 องศา เกลือหินจะมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีเป็นแบบไอโซทรอปีภายใต้ความเค้นล้อมรอบสูงกว่า 30 เมกะปาสคาล โดยค่ากำลังรับแรงกดในทุกมุม β จะมีค่าเท่ากัน Dubey [11] พบว่า ภายใต้อัตราการกดต่ำจะมีการแตกแบบแรงดึงเนื่องจากผลกระทบของทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี ลักษณะทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีมีผลกระทบต่อการพฤติกรรมการคืบ โดยผลกระทบจะลดลงเมื่ออัตราการกดสูงขึ้น [12] ผลสรุปข้างต้นบ่งชี้ว่าหินที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงเวลาของเกลือหิน ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบทางด้านวิศวกรรมธรณีของเกลือหิน จึงควรพิจารณามุมของระนาบชั้นหินร่วมด้วยเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว

นักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาสมการสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีต่อคุณสมบัติของหิน โดย Amadei [13] ได้พัฒนาสมการ

ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวบนตัวอย่างหินที่มีระนาบชั้นหินตั้งฉากและขนานกับทิศทางการเจาะ Hatzor และคณะ [14] ได้พัฒนาสมการสำหรับวิเคราะห์การยุบตัวและขยายตัวของเกลือหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี Zhang และคณะ [15] ใช้สมการแบบจำลองการคืบแบบ ubhm ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองแมกซ์เวลล์ แบบจำลองเคลวิน และแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นแบบวิโคพลาสติก ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของหินที่มีการวางตัวแบบชั้นในสองมิติ และต่อมาได้มีการวิเคราะห์แบบสามมิติพบว่า แบบจำลอง ubhm [16] สามารถอธิบายพฤติกรรมการคืบทุกช่วงของหินได้ และประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้ในการประเมินความปลอดภัยของอุโมงค์ที่หินโดยรอบมีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี Luo และคณะ [17] พัฒนาสมการจำลองการคืบแบบวิโคอีลาสติกสำหรับหินเนื้ออ่อนและหินเนื้อแข็งวางตัวสลับชั้นกันโดยระนาบระหว่างชั้นตั้งฉากและขนานกับแนวแรง อย่างไรก็ตามพบว่า ยังไม่มีการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้การผันแปรมุมของระนาบชั้นหิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการจำลองการคืบของเกลือหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีเพื่อนำมาใช้ในการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหิน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ได้มุ่งเน้นในหินที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี ซึ่งจะมีสมบัติเหมือนกันในทิศทางของระนาบหนึ่งและคุณสมบัติจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบนั้น เมื่อพิจารณาภายใต้ระบบแกน x, y และ z จะกำหนดให้แกน x และแกน y ทำมุมตั้งฉากกันในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนหมุนสมมาตรรอบแกน z ในกรณีนี้ชั้นหินวางตัวขนานกับทิศทางของแนวแกน y ($\beta = 90^\circ$) ระนาบ $y-z$ จะเป็นระนาบที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในทิศทางแกน y และแกน z เรียกว่า ระนาบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี (ระนาบการ

วางตัวของชั้นหิน) ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติด้วยค่าคงที่ของความยืดหยุ่นจำนวน 5 ค่า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวส์ซองในระนาบสมมาตร $y-z$ ($E_y = E_z$ และ ν_{yz}) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวส์ซองในแกน x (E_x และ $\nu_{yx} = \nu_{xz}$) และค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นในแกน x (G_{xy}) แต่ในกรณีที่ชั้นหินวางตัวตั้งฉากกับทิศทางของแนวแกน y ($\beta = 0^\circ$) ระบายทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี คือ ระบายสมมาตรของแกน $z-x$

Amadei [13] พัฒนาสมการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีภายใต้การรับแรงอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Stress) ตามกฎของฮุก โดยกำหนดให้สมการประกอบด้วยค่าคงที่ 5 ค่า ได้แก่ E (E_y ที่ $\beta = 90^\circ$), E' (E_y ที่ $\beta = 0^\circ$), ν (ν_{yz} ที่ $\beta = 90^\circ$), ν' (ν_{yx} ที่ $\beta = 90^\circ$) และ G' (G_{xy} ที่ $\beta = 90^\circ$) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x , y และ z (ε_x , ε_y และ ε_z) กับความเค้น (σ) อธิบายได้ดังสมการที่ (1)

$$\varepsilon_x = a_{12}\sigma; \quad \varepsilon_y = a_{22}\sigma; \quad \varepsilon_z = a_{23}\sigma \quad (1)$$

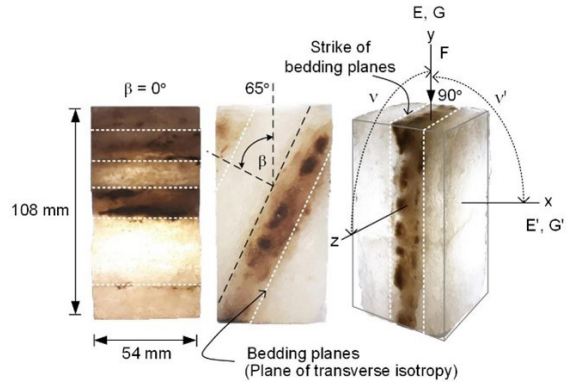
โดย a_{12} , a_{22} และ a_{23} คือ องค์ประกอบของเมทริกซ์ Compliance ที่อยู่ในฟังก์ชันของค่าคงที่และมุมของระบายทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี (β) แสดงดังสมการที่ (2)-(4)

$$a_{12} = -\frac{\nu'}{E'} \sin^4 \beta - \frac{\nu}{E'} \cos^4 \beta + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E'} - \frac{1}{G'} \right) \quad (2)$$

$$a_{22} = \frac{\cos^4 \beta}{E'} + \frac{\sin^4 \beta}{E} + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu'}{E'} \right) \quad (3)$$

$$a_{23} = -\frac{\nu'}{E'} \cos^2 \beta - \frac{\nu}{E} \sin^2 \beta \quad (4)$$

โดยที่ E และ E' คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ขนานและตั้งฉากกับทิศทางแนวระดับของระบายชั้นหิน ตามลำดับ ν คือ อัตราส่วนปัวส์ซองบนระบายชั้นหิน ν' คือ อัตราส่วนปัวส์ซองบนระบายระหว่างแกนที่ตั้งฉากและขนานของระบายชั้นหิน G' คือ โมดูลัสต้านแรงเฉือนบนระบายที่



รูปที่ 1 ตัวอย่างเกลือหินที่ถูกเตรียมเพื่อทดสอบการคืบในแกนเดียว

ตั้งฉากกับระบายชั้นหิน และ β คือ มุมระหว่างแกนที่ตั้งฉากกับระบายชั้นหินและทิศทางของแนวแรง (รูปที่ 1) โดย G' คำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{1}{G'} = \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E'} + \frac{2\nu'}{E'} \right) \quad (5)$$

เนื่องจากหินที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีจะมีคุณสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของระบายชั้นหิน จึงมีการพัฒนาสมการที่ใช้หาค่าคงที่เพื่อเป็นตัวแทนของคุณสมบัติในทิศทางของระบายชั้นหินใดๆ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1)-(5) ค่าดังกล่าว คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นปรากฏ ($E_{y(\beta)}$) อัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏบนระบายระหว่างแกน y และแกน x ($\nu_{yx(\beta)}$) และอัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏบนระบายระหว่างแกน y และแกน z ($\nu_{yz(\beta)}$) ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$E_{y(\beta)} = \frac{1}{a_{22}}; \quad \nu_{yx(\beta)} = -\frac{a_{12}}{a_{22}}; \quad \nu_{yz(\beta)} = -\frac{a_{23}}{a_{22}} \quad (6)$$

โดยข้อดีของสมการวิเคราะห์คุณสมบัติระบายทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีของ Amadei [13] คือ สามารถหาค่าคงที่ในการคำนวณได้จากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และสามารถจำลองพฤติกรรมของหินที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีได้ครอบคลุม แต่ยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของหินได้

2.2 การพัฒนาสมการสำหรับจำลองการคืบของหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี

แบบจำลองการคืบในหินที่มีลักษณะแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีถูกพัฒนาขึ้นจากสมการการวิเคราะห์คุณสมบัติทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีของ Amadei [13] ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงในรูปแบบการแปลงลาปลาซ กำหนดให้เกลือหินมีพฤติกรรมการคืบแบบเบอเกอร์ เนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมการคืบของเกลือหินได้เหมาะสมที่สุด [18] โดยได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของหินที่มีมุมของระนาบชั้นหินแตกต่างกัน สมมุติฐานของการพัฒนาแบบจำลองการคืบของหินสำหรับงานวิจัยนี้คือ กำหนดให้เกลือหินมีพฤติกรรมการคืบตามแบบจำลองกลุ่มวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Viscoelastic Material) ที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและแบบหนืดร่วมกัน มีความสัมพันธ์กับหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Material) ภายใต้การใช้ทฤษฎีบทการซ้อนทับ (Superposition Principle)

จากสมการที่ (1)–(5) สามารถเขียนในรูปของการแปลงลาปลาซด้วยตัวแปร “s” ดังสมการที่ (7)–(9)

$$\hat{\varepsilon}_x(s) = \hat{a}_{12}(s) \hat{\sigma}(s) = -\hat{\sigma}(s) \left(\frac{\hat{\nu}'(s)}{\hat{E}'(s)} \right) A \quad (7)$$

$$\hat{\varepsilon}_y(s) = \hat{a}_{22}(s) \hat{\sigma}(s) = \hat{\sigma}(s) \left[\left(\frac{1}{\hat{E}'(s)} \right) (B) + \left(\frac{1}{\hat{E}(s)} \right) (C) \right] \quad (8)$$

$$\hat{\varepsilon}_z(s) = \hat{a}_{23}(s) \hat{\sigma}(s) = -\hat{\sigma}(s) \left[\left(\frac{\hat{\nu}'(s)}{\hat{E}'(s)} \right) (D) + \left(\frac{\hat{\nu}(s)}{\hat{E}(s)} \right) (F) \right] \quad (9)$$

และ

$$A = \left(\sin^4 \beta + \cos^4 \beta + \frac{\sin^2 2\beta}{2} \right)$$

$$B = \left(\cos^4 \beta + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \right), C = \left(\sin^4 \beta + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \right)$$

$$D = \cos^2 \beta; F = \sin^2 \beta$$

ความเค้น σ เป็นตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้น ตัวแปร $\hat{\sigma}(s)$ แทนด้วย $\frac{\sigma}{s}$

กำหนดให้เกลือหินอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นอุทกสถิต (Hydrostatic Stress) และใช้สัมประสิทธิ์ความหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic Coefficients) และตัวดำเนินการเวลา (Time Operators) ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$\hat{E}_\nu(s) = \frac{9K \hat{Q}_1}{\hat{Q}_1 + 6K \hat{P}_1}, \hat{\nu}_\nu(s) = \frac{3K \hat{Q}_1 - \hat{Q}_1}{\hat{Q}_1 + 6K \hat{P}_1} \quad (10)$$

$$\hat{E}'_\nu(s) = \frac{9K \hat{Q}'_1}{\hat{Q}'_1 + 6K \hat{P}'_1}, \hat{\nu}'_\nu(s) = \frac{3K \hat{Q}'_1 - \hat{Q}'_1}{\hat{Q}'_1 + 6K \hat{P}'_1} \quad (11)$$

โดย $\hat{E}_\nu(s)$ และ $\hat{E}'_\nu(s)$ คือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบวิสโคอีลาสติกที่ขนานและตั้งฉากกับทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหิน $\hat{\nu}_\nu(s)$ คือ อัตราส่วนปัวส์ของแบบวิสโคอีลาสติกบนระนาบชั้นหิน $\hat{\nu}'_\nu(s)$ คือ อัตราส่วนปัวส์ของแบบวิสโคอีลาสติกบนระนาบระหว่างแกนที่ตั้งฉากและขนานของระนาบชั้นหิน และ $\hat{P}'_1, \hat{P}_1, \hat{Q}'_1$ และ \hat{Q}_1 คือ ตัวดำเนินการเชิงเวลาที่อยู่ในรูปของค่าคงที่ของแบบจำลองเบอเกอร์ E_1, E_2, η_1 และ η_2 โดยตัวดำเนินการแปลงลาปลาซของแบบจำลองเบอเกอร์ (Transformed Operators) [19] แสดงดังสมการ

$$\hat{P}_1 = 1 + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2} \right) s + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} s^2,$$

$$\hat{Q}_1 = \eta_1 s + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} s^2$$

$$\hat{P}'_1 = 1 + \left(\frac{\eta'_1}{E'_1} + \frac{\eta'_1}{E'_2} + \frac{\eta'_2}{E'_2} \right) s + \frac{\eta'_1 \eta'_2}{E'_1 E'_2} s^2,$$

$$\hat{Q}'_1 = \eta'_1 s + \frac{\eta'_1 \eta'_2}{E'_2} s^2$$

E_1 และ E'_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 1 ที่ขนานและตั้งฉากกับแนวระดับของระนาบชั้นหิน η_1 และ η'_1



คือ ความหนืดเชิงพลาสติกที่ขนานและตั้งฉากกับแนวระดับของระนาบชั้นหิน E_2 และ E'_2 คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 2 ที่ขนานและตั้งฉากกับแนวระดับของระนาบชั้นหิน η_2 และ η'_2 คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่นที่ขนานและตั้งฉากกับแนวระดับของระนาบชั้นหิน

นำสมการที่ (10) และ (11) และตัวดำเนินการเชิงเวลาแบบเบอเกอร์แทนในสมการที่ (7)–(9) และแก้สมการโดยการดำเนินการลาปลาซผกผัน ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ขึ้นกับเวลาและความเค้นของเกลือหินแบบทรานส์เวอร์สไอโซโทรปี้ ได้ดังสมการที่ (12)

$$\varepsilon_x(t) = a_{12}(t)\sigma; \varepsilon_y(t) = a_{22}(t)\sigma; \varepsilon_z(t) = a_{23}(t)\sigma \quad (12)$$

และองค์ประกอบของ Compliance Matrix a_{12} , a_{22} และ a_{23} ที่ขึ้นกับเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13)–(15)

$$a_{12}(t) = -\left[\left(\frac{1}{3}G - \frac{1}{9K}\right)A\right] \quad (13)$$

$$a_{22}(t) = \left[\left(\frac{2}{3}G + \frac{1}{9K}\right)B + \left(\frac{2}{3}H + \frac{1}{9K}\right)C\right] \quad (14)$$

$$a_{23}(t) = -\left[\left(\frac{1}{3}G - \frac{1}{9K}\right)D + \left(\frac{1}{3}H - \frac{1}{9K}\right)F\right] \quad (15)$$

โดยที่

$$G = \left(\frac{1}{E'_1} + \frac{t}{\eta'_1} + \frac{1}{E'_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E'_2 t}{\eta'_2}\right)\right)\right) \quad (16)$$

$$H = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right)\right)\right) \quad (17)$$

โดย K คือ มอดูลัสด้านการบีบอัด โดยมอดูลัสด้านการบีบอัด สามารถคำนวณจาก

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (18)$$

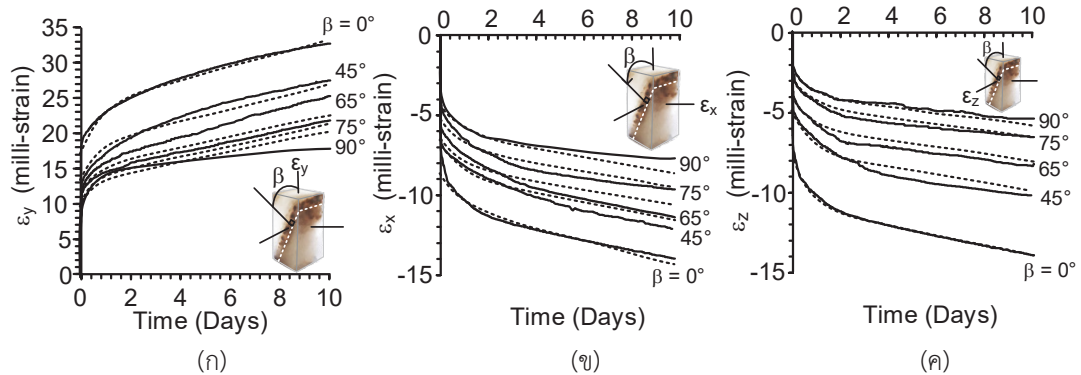
โดย p คือ แรงกด และ Δ คือ ความเครียดเชิงปริมาตร

นอกจากนี้ได้พัฒนาสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นปรากฏเชิงเวลา ($E_{y(\beta)}(t)$) อัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏเชิงเวลาบนระนาบระหว่างแกน y และแกน x ($\nu_{yx(\beta)}(t)$) และอัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏเชิงเวลาบนระนาบระหว่างแกน y และแกน z ($\nu_{yz(\beta)}(t)$) ณ เวลา t เพื่อหาค่าคงที่สำหรับใช้เป็นตัวแทนของคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของระนาบชั้นหินที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน แสดงดังสมการที่ (19)

$$E_{y(\beta)}(t) = \frac{1}{a_{22}(t)}; \nu_{yx(\beta)}(t) = -\frac{a_{12}(t)}{a_{22}(t)}; \nu_{yz(\beta)}(t) = -\frac{a_{23}(t)}{a_{22}(t)} \quad (19)$$

2.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองการคืบ

แบบจำลองการคืบได้ถูกนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมกรการคืบในแกนเดียวของเกลือหินในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลอง โดยตัวอย่างเกลือหินชุดมหาสารคามถูกรวบรวมจากเหมืองแร่โพแทชของบริษัท ไทยคาลิ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา นำมาจัดเตรียมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด $54 \times 54 \times 108$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยมีมุมระหว่างแนวแกนที่ตั้งฉากกับระนาบชั้นหินและแนวแรงในแกนหลัก (β) ผันแปรตั้งแต่ 0, 45, 65, 75 ถึง 90 องศา และทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหินจะต้องขนานกับด้านใดด้านหนึ่งของตัวอย่างหินเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1 การทดสอบการคืบในแกนเดียวจะใช้เครื่อง Consolidation Load Frame [20] ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7070-08 [21] ในงานวิจัยนี้ให้แรงกดในแนวแกนมีค่าคงที่เท่ากับ 10 เมกกะปาสคาล และทำการติดตั้งเกจเพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัว 3 ด้าน (รูปที่ 1) คือ 1) การเคลื่อนตัวในแนวแกน (แกน y) 2) การเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างที่ขนานกับทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหิน (แกน z) และ 3) การเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างที่ตั้งฉากกับทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหิน (แกน x) ระหว่างการทดสอบได้มีการจดบันทึกระยะการเคลื่อนตัวและเวลา โดยงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการทดสอบตัวอย่างละ 10 วัน เกลือหินมีความหนาแน่นเฉลี่ย 2.16 ± 0.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกน y (ก) ความเครียดในแนวแกน x (ข) และความเครียดในแนวแกน z (ค) กับเวลาภายใต้มุมของระนาบชั้นหินที่ได้จากผลการทดสอบ (เส้นทึบ) และที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองการคืบ (เส้นประ)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบการคืบในห้องปฏิบัติการ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกน (ϵ_y) ความเครียดในแนวด้านข้างที่ขนาน (ϵ_z) และตั้งฉาก (ϵ_x) กับทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหินกับเวลา แสดงในรูปที่ 2 (เส้นทึบ) จากแผนภูมิแสดงการเปลี่ยนรูปของเกลียวหินปรากฏ 3 ช่วง คือ ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ ผลกระทบของทรานส์เวอร์สไอโซทรอปีส่งผลต่อความเครียดของระนาบชั้นหินอย่างเห็นได้ชัด ความเครียดทั้ง 3 แกน จะมีค่าลดลงเมื่อมุม β เพิ่มขึ้น และ ϵ_x มีค่าสูงกว่า ϵ_z ในทุกมุม β การวิเคราะห์ความเครียดในแนวแกนและแนวด้านข้าง ถูกนำมาพิจารณาร่วมกันในรูปของความเครียดเฉือนแบบสามมิติ (γ_{oct}) ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 (เส้นทึบ) โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger และ Cook [22]

$$\gamma_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (20)$$

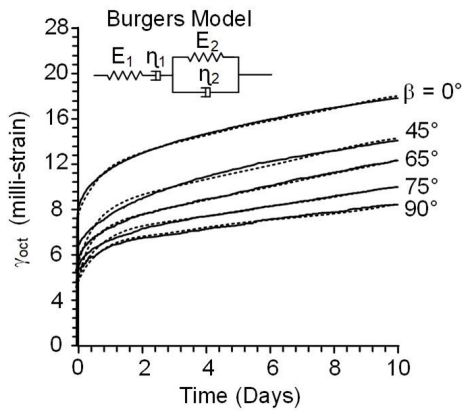
โดยที่ ϵ_1 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักสูงสุด ϵ_2 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักกลาง และ ϵ_3 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักต่ำสุด

ผลการทดสอบการคืบในห้องปฏิบัติการถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของตัวอย่างเกลียวหินภายใต้ผลกระทบของทรานส์เวอร์สไอโซทรอปี ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปสอบเทียบเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาในรูปของความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลียวหินโดยใช้สมการความเครียดเฉือนเชิงเวลาในสามมิติ ($\gamma_{oct}(t)$) ที่อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองเบอเกอร์ [22] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (21) และ (22)

$$\gamma_{oct}(t) = \tau_{oct} \left[\frac{1}{E_{1,i}} + \frac{t}{\eta_{1,i}} + \frac{1}{E_{2,i}} \left(1 - e^{-\frac{E_{2,i}t}{\eta_{2,i}}} \right) \right] \quad (21)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (22)$$

โดยที่ τ_{oct} คือ ความเค้นในแนวเฉือน $E_{1,i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 1 แท้จริง $E_{2,i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 2 แท้จริง $\eta_{1,i}$ คือ ค่าความหนืดเชิงพลาสติกแท้จริง $\eta_{2,i}$ คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่นแท้จริง และ t คือ เวลา การสอบเทียบค่าที่ได้ใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ [23] รูปที่ 3 แสดงผลการสอบเทียบค่า (เส้นประ) ซึ่งมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (เส้นทึบ)



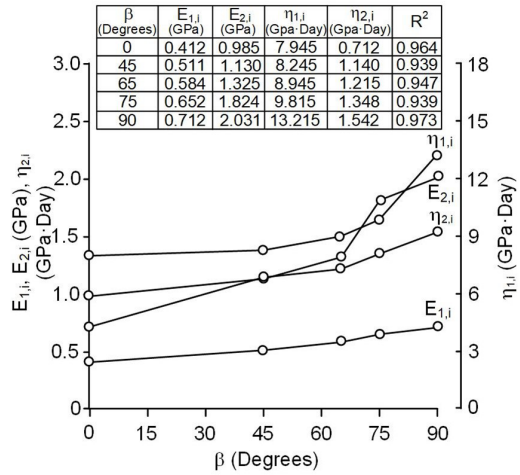
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวเฉือนกับเวลาที่ได้จากผลการทดสอบ (เส้นทึบ) และจากการสอบเทียบค่า (เส้นประ)

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.9 รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ $E_{1,i}$, $E_{2,i}$, $\eta_{1,i}$ และ $\eta_{2,i}$ ของแบบจำลองเบอเกอร์กับมุม β พบว่าค่าคงที่เหล่านี้มีค่าสูงขึ้นเมื่อมุม β สูงขึ้น

3.2 ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองการคืบในหินที่มีลักษณะทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปี

แบบจำลองการคืบของหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีสามารถคำนวณค่าความเครียดที่ขึ้นกับเวลา ณ มุม β ใด ๆ โดยใช้สมการที่ (12)–(18) และตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1 โดย E'_1 , E'_2 , η'_1 และ η'_2 คือ ค่าคงที่เทียบเท่าแท้จริงจากการทดสอบที่มุม β เท่ากับ 0 องศา และ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 คือ ค่าคงที่เทียบเท่าแท้จริงจากการทดสอบที่มุม β เท่ากับ 90 องศา

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ขึ้นกับเวลาในแนวแกน ϵ_x , ความเครียดที่ขึ้นกับเวลาในแนวด้านข้างที่ขนาน ϵ_z และตั้งฉาก ϵ_x กับทิศทางแนวระดับของระนาบชั้นหินจากแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 2 (เส้นประ) ความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองประเมินได้จากค่าเฉลี่ยความไม่สอดคล้องกับแบบจำลอง (Mean Misfit; \bar{s}) [24] โดยหาได้จากสมการที่ (23)

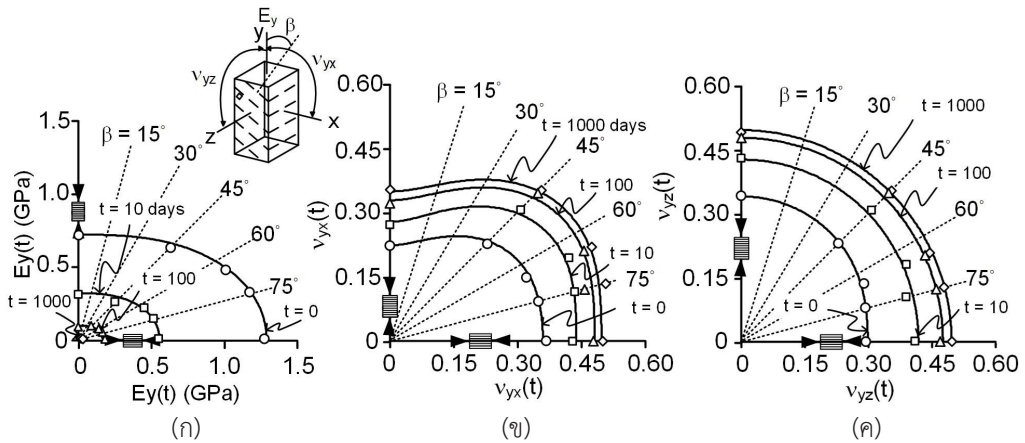


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ $E_{1,i}$, $E_{2,i}$, $\eta_{1,i}$ และ $\eta_{2,i}$ กับมุมของระนาบชั้นหิน

$$\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_i^m s_i \text{ เมื่อ } s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (d_{calc} - d_{test})^2} \quad (23)$$

พบว่าค่าเฉลี่ยความไม่สอดคล้องกับแบบจำลองความเครียดที่ขึ้นกับเวลา $\epsilon_x(t)$, $\epsilon_z(t)$ และ $\epsilon_x(t)$ มีค่าเท่ากับ 1.949, 2.453 และ 0.927 Milli-strain ตามลำดับ ซึ่งถือว่า มีค่าต่ำ จึงระบุได้ว่าแบบจำลองการคืบของหินแบบทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีสามารถจำลองผลกระทบของทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีต่อความเครียดที่ขึ้นกับเวลาได้ดี

สมการที่ (19) สามารถคำนวณหา $E_{y(\beta)}(t)$, $v_{yx(\beta)}(t)$ และ $v_{yz(\beta)}(t)$ โดยงานวิจัยนี้พิจารณาที่เวลา t เท่ากับ 0 (ยังไม่มีพฤติกรรมเชิงเวลา) 10 วัน 100 วัน และ 1000 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ลักษณะทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นปรากฏเชิงเวลาและอัตราส่วนปัวส์ซองปรากฏเชิงเวลาจากแบบจำลองมีลักษณะเป็นวงรี และผลการคำนวณจากแบบจำลองการคืบ (เส้นทึบ) สามารถคำนวณค่าดังกล่าวได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ (จุดข้อมูล) โดยค่าเฉลี่ยความไม่สอดคล้องกับการจำลอง $E_y(t)$, $v_{yx}(t)$ และ $v_{yz}(t)$ มีค่าเท่ากับ 0.02, 0.01 และ 0.01 เมกกะปาสคาลตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นปรากฏเชิงเวลา ($E_y(t)$) (ก) อัตราส่วนปัวส์ของปรากฏเชิงเวลาบนระนาบระหว่างแกน y กับแกน x ($v_{yx}(t)$) (ข) และอัตราส่วนปัวส์ของปรากฏเชิงเวลาบนระนาบระหว่างแกน y กับแกน z ($v_{yz}(t)$) (ค) กับมุมของระนาบชั้นหิน

ตารางที่ 1 ค่าคงที่แท้จริงในการคำนวณแบบจำลองการคืบของหินแบบทรานซ์เวอร์สไฮโซทรอปี้

E_1' (GPa)	E_2' (GPa)	η_1' (GPa·Day)	η_2' (GPa·Day)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa·Day)	η_2 (GPa·Day)	K (GPa)
0.412	0.985	7.945	0.712	0.712	2.031	13.215	1.542	2.110

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดสอบการคืบภายใต้แรงกดในแกนเดียวเพื่อศึกษาผลกระทบของทรานซ์เวอร์สไฮโซทรอปี้ต่อคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินพบว่า เมื่อเกลือหินมี β เท่ากับ 0 องศา จะมีความเครียดทั้งในแนวแกนและแนวด้านข้างสูงที่สุด เนื่องจากแรงที่มากระทำจะทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตกตามแนวระนาบการวางตัวของชั้นหินได้ง่าย ตัวอย่างหินที่มีมุม $0 < \beta < 90^\circ$ จะมีความเครียดอยู่ในช่วงระหว่างตัวอย่างหินที่มีมุม β เท่ากับ 0 และ 90 องศา ซึ่งเป็นลักษณะการวางตัวของระนาบชั้นหินที่มีความใกล้เคียงกับระนาบการเกิดแรงเฉือนตามธรรมชาติ และตัวอย่างหินที่มี β เท่ากับ 90 องศา จะมีความเครียดทั้งในแนวแกนและแนวด้านข้างต่ำที่สุด เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Xu และคณะ [16] และ Wu และคณะ [25] หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเมื่อมุม β สูงขึ้น ความเครียดจะมีค่าลดลง เป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์

ความยืดหยุ่นที่จะมีค่าสูงขึ้นตามมุม β ([2], [7]–[9])

สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 1 แท้จริง ($E_{1,i}$) สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 2 ($E_{2,i}$) ความหนืดเชิงพลาสติก ($\eta_{1,i}$) และความหนืดเชิงยืดหยุ่น ($\eta_{2,i}$) มีค่าสูงขึ้นเมื่อมุม β สูงขึ้น

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองการคืบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถจำลอง $E_{y(\beta)}(t)$, $v_{yx(\beta)}(t)$ และ $v_{yz(\beta)}(t)$ ที่มีมุมการวางตัวของระนาบชั้นหินใด ๆ ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

แบบจำลองสามารถจำลองความเครียดที่ขึ้นกับเวลาได้ดี เมื่อมุม β เท่ากับ 0 องศา และ 90 องศา แต่สำหรับมุมอื่น ๆ ยังคงค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากในสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ตัวแปรในการคำนวณจากการทดสอบเพียง 2 ทิศทาง คือทิศทางที่ขนานและตั้งฉากกับแนวระดับของระนาบชั้นหิน ในอนาคตควรมีการศึกษา



เพิ่มเติมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว

แบบจำลองสามารถสะท้อนผลกระทบของทรานซ์เวอร์สไอโซทรอปีต่อคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินได้ และนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของเสาค้ำยันและผนังด้านข้างของเหมืองเกลือหินเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนามมากยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) และสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (คปท.) ภายใต้สัญญาเลขที่ PHD/0215/2561 จึงขอขอบพระคุณที่อนุญาตให้เผยแพร่บทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. K. Jeremic, *Rock Mechanics in Salt Mining*, A.A. Balkema: Netherlands, 1994.
- [2] N. Sukjaroen, T. Thongprapha, K. Artkhonghan, and K. Fuenkajorn, "Effects of transverse isotropy on compressive strength and elastic properties of rock salt," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 32, no. 1, pp. 47–54, 2021 (in Thai).
- [3] R. McLamore and K.E. Gray, "The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 89, no. 1, pp. 62–73, 1967.
- [4] A. A. Al-Harhi, "Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone," *Saudi Arabia. Engineering Geology*, vol. 50, no. 1–2, pp. 49–57, 1998.
- [5] K. Colak, and T. Unlu, "Effect of transverse anisotropy on the Hoek-Brown strength parameter 'mi' for intact rocks," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, no. 6, pp. 1045–1052, 2004.
- [6] O. Saeidi, V. Rasouli, R. G. Vaneghi, R. Gholami, and S. R. Torabi, "A modified failure criterion for transversely isotropic rocks," *Geoscience Frontiers*, vol. 5, no. 2, pp. 215–225, 2014.
- [7] L. Yun-si, Z. Xiao, and Y. Quan, "The five elastic parameters for the anisotropy of slate under the influence of different bedding orientations," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 17, pp. 3695–3707, 2012.
- [8] H. Kim, J. W. Cho, I. Song, and K. B. Min, "Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea," *Engineering Geology*, vol. 147, pp. 68–77, 2012.
- [9] C. Cheng, X. Li, and H. Qian, "Anisotropic failure strength of shale with increasing confinement: behaviors, factors and mechanism," *Materials*, vol. 10, no. 11, pp. 1310, 2017.
- [10] T. Thongprapha, K. Tengpakwaen, J. J. K. Daemen, and K. Fuenkajorn, "Effect of confining pressures on transverse isotropy of Maha Sarakham salt," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 152, 2022.
- [11] R. K. Dubey, "Bearing of structural anisotropy on deformation and mechanical response of rocks: An experimental example of rocksalt deformation under variable compression rates," *Journal of the Geological Society of India*, vol. 91, pp. 109–114, 2018.
- [12] R. K. Dubey and V. K. Gairola, "Influence of structural anisotropy on creep of rocksalt from Simla Himalaya, India: An experimental

- approach,” *Journal of Structural Geology*, vol. 30, no. 6, pp. 710–718, 2008.
- [13] B. Amadei, “Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 33, no. 3, pp. 293–325, 1996.
- [14] Y. H. Hatzor and E. P. Heyman, “Dilation of anisotropic rock salt: Evidence from mount sedom diapir,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 102, no. B7, pp. 14853–14868, 1997.
- [15] J. Zhang, X. Zhang, Z. Huang, and H. Fu, “Transversely isotropic creep characteristics and damage mechanism of layered phyllite under uniaxial compression creep test,” *Environmental Earth Sciences*, to be published, 2021.
- [16] G. Xu, C. He, J. Yan, and G. Ma, “A new transversely isotropic nonlinear creep model for layered phyllite and its application,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 7, pp. 5387–5408, 2019.
- [17] G. Luo, W. Yang, C. Bo, L. Zhang, K. Duan, W. Jing, and Y. Zhao, “Viscoelastic analysis of the creep characteristics of interlayered rock specimens under uniaxial compression,” *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 37–60, 2021.
- [18] N. A. Ghavidel, A. Nazem, M. Heidarzadeh, M. Moosavi, and H. Memarian, “Identification of rheological behavior of salt rock at elevated temperature, case study: Gachsaran evaporative formation, Iran,” presented at ISRM Regional Symposium-EUROCK, Vigo, Spain, May. 26–28, 2014.
- [19] W.N. Findley, J.S.Lai, and K. Onaran, *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, Dover, New York, 1976.
- [20] M. Jandakaew, “Stress-path dependency of rock salt,” presented at the First Thailand Symposium on Rock Mechanics, Greenery Resort, Khao Yai, Nakhon Ratchasima, Thailand, sep. 13–14, 2007.
- [21] *Standard test methods for creep of rock core under constant stress and temperature*, ASTM D7070-08, 2021.
- [22] J. C. Jaeger and N. G. W. Cook, *Fundamentals of Rock Mechanics*, London: Chapman and Hall, 1979.
- [23] L. Wendai, “In 13 chapters. SPSS for windows: Statistical analysis,” in *Regression analysis, linear regression and probit regression*, Beijing, China: House of Electronics Industry, 2000.
- [24] K. F. Riley, M. P. Hobson, and S. J. Bence, *Mathematical Methods for Physics and Engineering*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [25] C. Wu, Q. Chen, S. Basack, and S. Karekal, “Laboratory investigation on rheological properties of greenschist considering anisotropy under multi-stage compressive creep condition,” *Journal of Structural Geology*, vol. 114, pp. 111–120, 2018.

