การศึกษาตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกในหินเมื่อพิจารณาดาดซับในของถังเก็บไฮโดรเจนใต้ดินแรงดันสูง
A Study of Crack Initiation Locations in Rock Mass Considering Linings of High-Pressurized Hydrogen Storage Cavern

ธีรภัทร ชิณราช[1,*] พรเกษม จงประดิษฐ์[2] อภิวิชญ์ ทองรักษา[3]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: Pornkasem.jon@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน เนื่องจากมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานส่วนเกินจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน มีข้อได้เปรียบสำหรับการกักเก็บไฮโดรเจนขนาดใหญ่ สามารถเก็บแก๊สความดันสูงที่ระดับความลึกที่ไม่มาก และมีความยืดหยุ่นกับลักษณะธรณีวิทยา จากปรากฏการณ์ที่วัสดุโลหะหรือเหล็กเกิดการสูญเสียความเหนียวทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลงหลังจากการสัมผัสกับไฮโดรเจน ทำให้เกิดการวิบัติก่อนกำหนด ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์การเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน ได้เกิดข้อสงสัยว่าสามารถนำองค์ความรู้ของระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินจากการศึกษาที่ผ่านมา มาใช้โดยตรงได้หรือไม่ การศึกษานี้เสนอการตรวจสอบความท้าทายที่สำคัญในการใช้อุโมงค์เก็บไฮโดรเจนใต้ดิน โดยมุ่งเน้นที่ผลกระทบของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกในมวลหินโดยรอบอุโมงค์เก็บไฮโดรเจนใต้ดินแรงดันสูง และการนำระบบดาดซับในมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์ วิธีการเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสภาวะความเค้นที่ส่งผลต่อจุดเริ่มแตกในมวลหิน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาระบบดาดซับในด้วย ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติในมวลหินแตกต่างไปจากการวิเคราะห์ที่ไม่ได้พิจารณา นอกจากนี้ดาดคอนกรีตจะเกิดการวิบัติก่อน จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับระบบกักเก็บความดันสูงใต้ดินสำหรับพลังงานไฮโดรเจน

คำสำคัญ: อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน, พลังงานหมุนเวียน, การกักเก็บไฮโดรเจน, จุดเริ่มรอยแตก

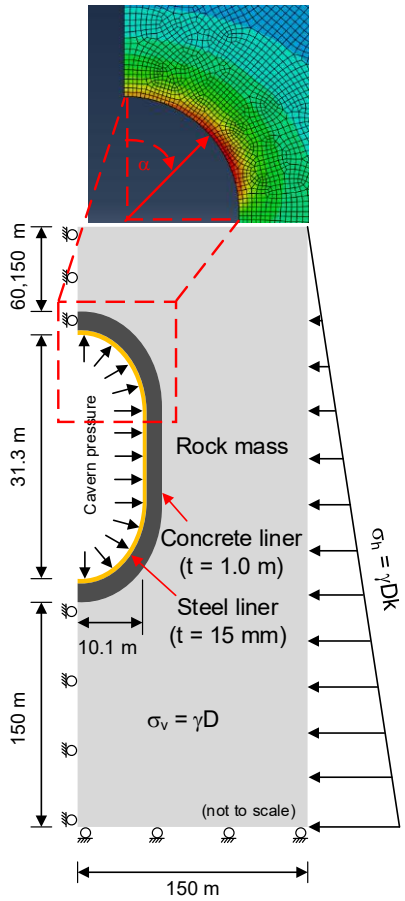
Abstract

Hydrogen has become an essential component of the energy transition because of its ability to store excess energy from renewable sources and reduce carbon emissions. Among underground storage options, Lined Rock Caverns (LRCs) offer unique advantages for large-scale hydrogen storage. They can operate at high pressures, even at shallow depths, and offer flexibility independent of geological formations, making them a promising candidate for large-scale hydrogen storage. From the phenomenon where metallic materials or steel lose ductility, causing reduced tensile strength after exposure to hydrogen, leading to premature failure, this phenomenon is called hydrogen embrittlement. The hydrogen embrittlement phenomenon leads to a dispute about adopting the knowledge from past studies of high-pressure underground storage (for gas and compressed air) to store hydrogen. This study investigates critical challenges in utilizing LRCs for hydrogen storage, focusing on the effects of in-situ stress condition on the position of crack initiation in the rock mass under high internal pressure, together with lining system consideration. A numerical approach is used to evaluate how stress conditions influence the crack initiation position. The results indicate that, when considering the lining system in the analysis, the failure initiation locations in the rock mass significantly differ from those in previous studies (without linings). The failures would first appear in the concrete lining, indicating the necessity for future study for high-pressure hydrogen storage.

Keywords: Lined Rock Caverns (LRC), Renewable energy, Hydrogen storage, Crack Initiation Location

1. บทนำ

การแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นประเด็นสำคัญระดับโลก เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งรวมถึงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 90 [1] แม้ว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ให้พลังงานที่มีเสถียรภาพ แต่ก็สร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพเช่นกัน จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการหาพลังงานทางเลือกที่สะอาดกว่า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และไฮโดรเจน [2] จากการตระหนักถึงความท้าทายเหล่านี้ ประเทศต่างๆ เช่น ออสเตรเลียและแคนาดา กำลังศึกษาการใช้ไฮโดรเจนจากพลังงานหมุนเวียนอย่างจริงจังในฐานะผู้นำด้านพลังงาน ตัวอย่างเช่น ออสเตรเลียมีเป้าหมายที่ท้าทายในการเพิ่มการผลิตไฮโดรเจนให้ได้ร้อยละ 300 ภายในปี ค.ศ. 2030 โดยวางตำแหน่งให้ไฮโดรเจนเป็นหัวใจสำคัญของยุทธศาสตร์พลังงานยั่งยืน [3] ไฮโดรเจนโดดเด่นในฐานะพลังงานทางเลือกที่ยั่งยืน เนื่องจากของเสียที่ปล่อยออกมาหลังจากผลิตพลังงานคือน้ำ ทำให้ทั่วโลกกำลังศึกษาการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจน ในการขนส่งและการกักเก็บพลังงาน การกักเก็บใต้ดินแบบความดันสูง เช่น อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Lined Rock Caverns) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ประสบความสำเร็จอย่างมากกับการกักเก็บก๊าซธรรมชาติและอากาศ



รูปที่ 2 องค์ประกอบระบบดาดซับใน และขอบเขตของแบบจำลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวแปร

ความลึกของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (เมตร)	อัตราส่วนความเค้นในที่
60	0.3, 0.8, 1.5, 3
150	0.3, 0.8, 1.5, 3

การพิจารณาสามารถจำลองให้มวลหินมีสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) โดยใช้สมบัติแบบเทียบเท่าได้โดยทอนค่าสมบัติให้ต่ำลง ในการศึกษาในครั้งนี้จึงพิจารณาให้มวลหินโดยรอบอุโมงค์เก็บแก๊ส มีสมบัติแบบไอโซทรอปิก เพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาการวิบัติภายใต้สภาวะความดันภายในสูง สำหรับโครงสร้างที่รับแรงดึงอัตราส่วนของเหล็กเสริมในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน ได้พิจารณาในค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$E_{RC} = 32860 + 194810\mu \quad (1)$$

$$\mu = \frac{A_s}{A_c - A_s} \quad (2)$$

โดยที่ μ คืออัตราส่วนการเสริมเหล็ก E_{RC} หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก (Elastic Modulus of reinforced concrete) A_s คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม และ A_c คือพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต [11]

อุโมงค์ทางเข้าสนับสนุนจะไม่รวมอยู่ในการวิเคราะห์นี้ และไม่พิจารณาขั้นตอนกระบวนการขุดในวิเคราะห์

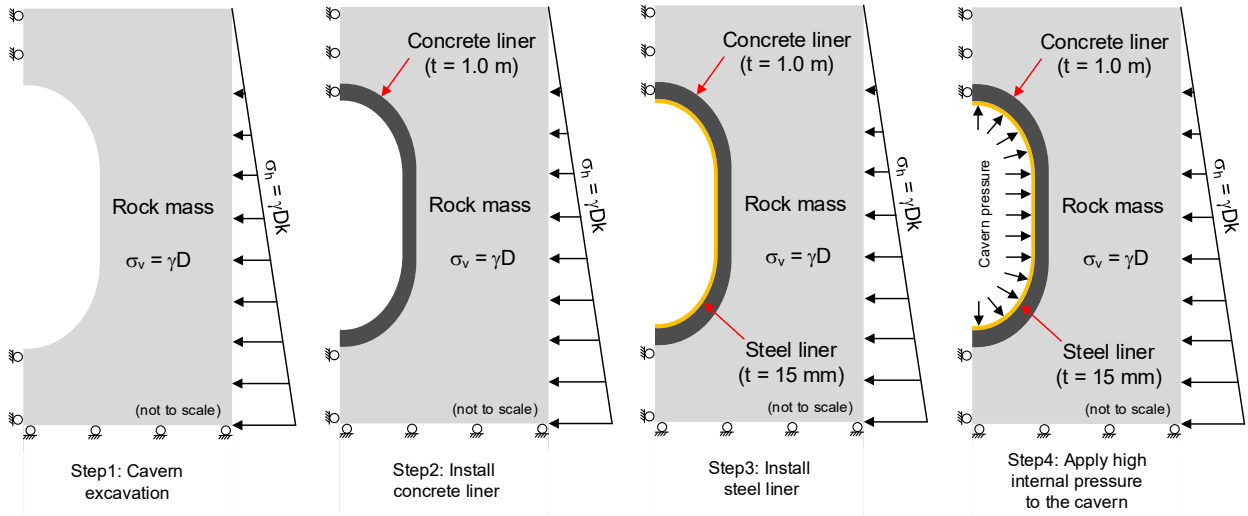
การศึกษาในครั้งนี้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric study) สภาวะความเค้นในที่ (In-situ stress condition) โดยพิจารณาความลึกของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Cavern depth) อยู่ลึกจากผิวดิน 60 และ150 เมตร และอัตราส่วนความเค้นในที่ (In-situ stress ratio) 0.3, 0.8, 1.5 และ 3.0 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนความเค้นในที่ของมวลหินส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการทางธรณีวิทยาในพื้นที่นั้น ๆ อย่างไรก็ตามในช่วงความลึกที่ศึกษา อัตราส่วนความเค้นในที่ที่ตรวจวัดได้จากข้อมูลในอดีตแสดงค่าที่กระจัดกระจายในช่วง 0.3-3.0 ในการศึกษานี้ จึงได้หนดอัตราส่วนความเค้นในที่ ในช่วงที่กำหนดเพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่หลากหลายทางธรณีวิทยา

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

2.2.1 การจำลอง สมบัติของวัสดุระบบดาดซับใน (Lining system) และมวลหินโดยรอบ (Rock mass)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) ประกอบด้วยดาดเหล็กซับในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน และมวลหินโดยรอบ โดยอุโมงค์เก็บแก๊สมีรูปทรงแบบไซโล (Silo shape) วางในแนวตั้ง มีรัศมี 10.1 เมตร สูง 31.3 เมตร ดาดเหล็กซับใน และดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน มีความหนา 15 มิลลิเมตร และ 1 เมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับมวลหินโดยรอบกำหนดให้ลึกจากฐานอุโมงค์เก็บแก๊ส 150 เมตร (y-axis) และกว้างออกไปในแนวรัศมี 150 เมตร (x-axis)

ในการศึกษากำหนดการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการสมมาตรแนวแกน (Axis-symmetry) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสมบัติของดาดเหล็กซับในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน และมวลหินโดยรอบ สมมติให้เป็นพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นโดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
มวลหินโดยรอบ (Rock mass) [12]		
ความหนาแน่น	2651	kg/m^3
โมดูลัสยืดหยุ่น	6.66	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน (Concrete lining) [10]		
ความหนาแน่น	2500	kg/m^3
โมดูลัสยืดหยุ่น	37.7	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
กำลังอัดสูงสุด 28 วัน	38	MPa
กำลังดึงสูงสุด	2.9	MPa
ความหนาดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก	1000 (1)	mm (m)
ดาดเหล็กซับใน (Steel lining) ชนิด S355 [10]		
ความหนาแน่น	8000	kg/m^3
โมดูลัสยืดหยุ่น	200	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.3	-
กำลังคราก	355	MPa
กำลังดึงประลัย	490	MPa
ความหนาดาดเหล็กซับใน	15 (0.015)	mm (m)

โดยในการจำลองนี้จะพิจารณาขั้นตอนกระบวนการหลังจากการขุดเสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการติดตั้งดาดคอนกรีตเสริมเหล็กซับใน และดาดเหล็กซับในหลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊สไปตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2.2 การจำลองและการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง

การจำลองตาข่ายใช้แบบ Four-node axisymmetric quadrilateral element (CAX4R) การกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง มีผลต่อการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้หลักการสมมาตรแนวแกนดิ่ง (Y-Axis of symmetry) และกำหนดขอบเขตจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ด้านล่างของแบบจำลอง และในด้านขวาของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง

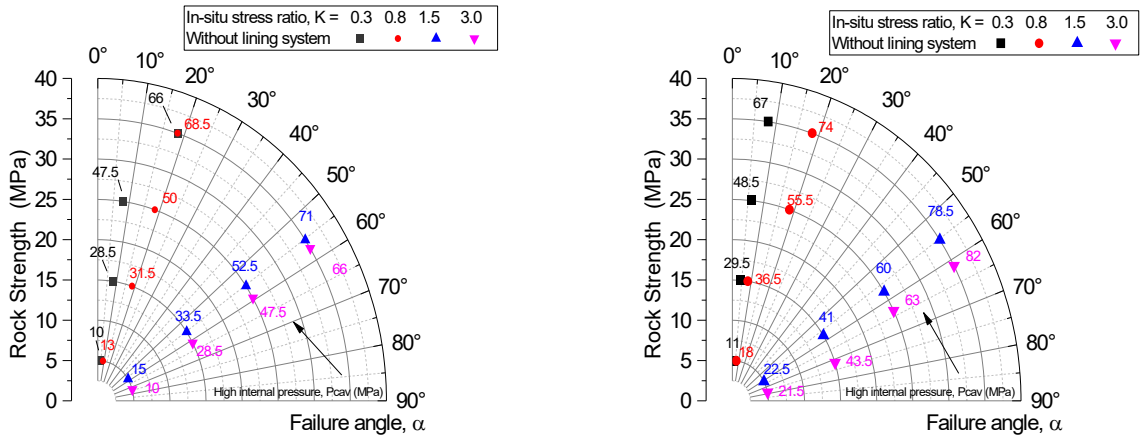
3. การวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบไม่พิจารณาระบบดาดซับใน (Without lining system)

จากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) เพื่อหาตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติในมวลหินโดยไม่พิจารณาระบบดาดซับใน (Without lining system) สำหรับที่กรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ น้อยกว่า 1 ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติที่มวลหินจะเกิดบริเวณด้านบนของอุโมงค์ ช่วงมุมวิบัติต่ำ 0–20 องศา เมื่อเพิ่มกำลังของมวลหินส่งผลให้ตำแหน่งจุดเริ่มวิบัติเปลี่ยนแปลงโดยมีมุมวิบัติที่เพิ่มขึ้น

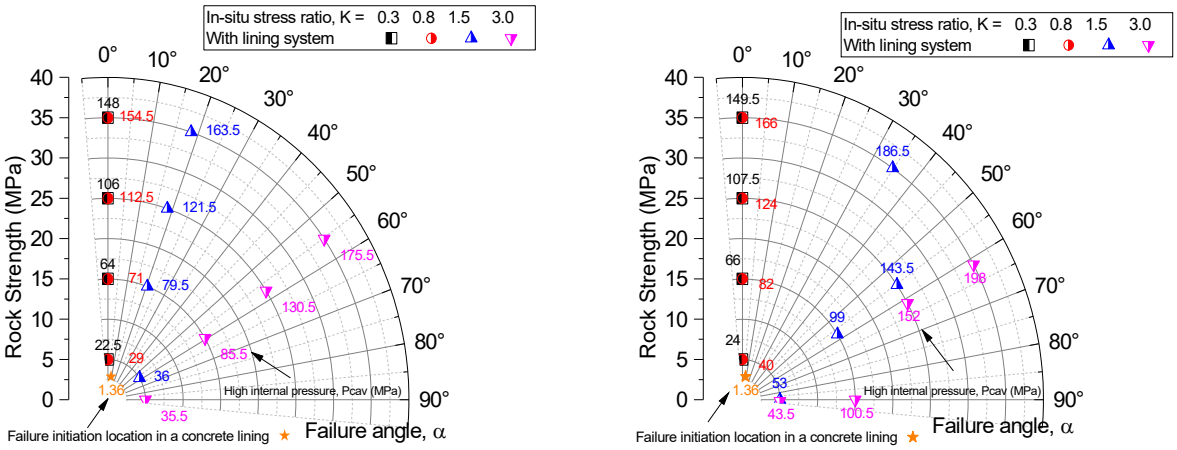
สำหรับในกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ มากกว่า 1 นั้นอิทธิพลของแรงดันด้านข้างจะมากกว่าแรงดันด้านบน ทำให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติที่มวลหินจะเกิดบริเวณด้านข้างของอุโมงค์ ช่วงมุมวิบัติ 55–65 องศา เมื่อเพิ่มกำลังของมวลหินส่งผลให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติเปลี่ยนแปลงโดยมีมุมวิบัติลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อความดันในอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินสูงขึ้น ทำให้อิทธิพลของอัตราส่วนความเค้นในที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ทั้งความลึก 60 เมตรและ 150 เมตร

อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของความลึกอุโมงค์จะทำให้ค่าแรงดันในอุโมงค์ที่จะทำให้เกิดจุดเริ่มวิบัติในมวลหินมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความลึกอุโมงค์จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงดันดินด้านบน และแรงดันดินด้านข้าง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนสำหรับกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่มากกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 4



ก) ความลึก 60 เมตร ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 4 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบไม่พิจารณาระบบดาดซับใน



ก) ความลึก 60 เมตร ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 5 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบพิจารณาระบบดาดซับใน

3.2 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบพิจารณาระบบดาดซับใน (With lining system)

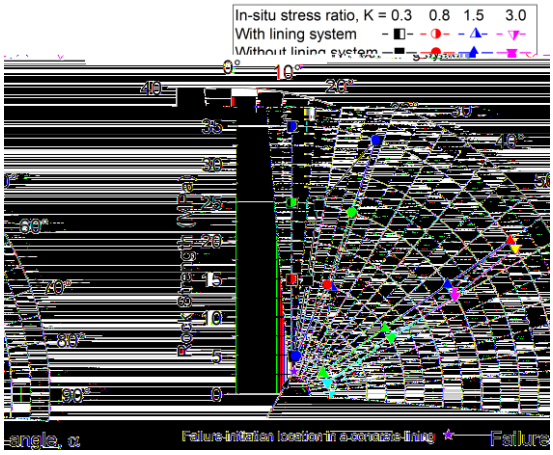
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.1 พบว่าอัตราส่วนความเค้นในที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นในมวลหินโดยรอบ อย่างไรก็ตามระบบดาดซับในยังคงมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการกระจายและถ่ายแรงดันจากแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊สไปสู่มวลหิน ระบบดาดซับในได้รับแรงดันก่อนแล้วจึงกระจายไปให้มวลหิน ทำให้ค่าแรงดันที่จะทำให้เกิดจุดเริ่มวิบัติในมวลหินมีค่าที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5

จากผลการเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 6 เห็นได้ชัดว่าตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติสำหรับระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่พิจารณาระบบดาดซับใน จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างออกไปจากระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่ไม่ได้พิจารณาระบบดาดซับใน เนื่องจากระบบดาดซับในทำให้เกิดการกระจายของความเค้นใหม่ทำให้มุมการวิบัติในมวลหินลดลงไปจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

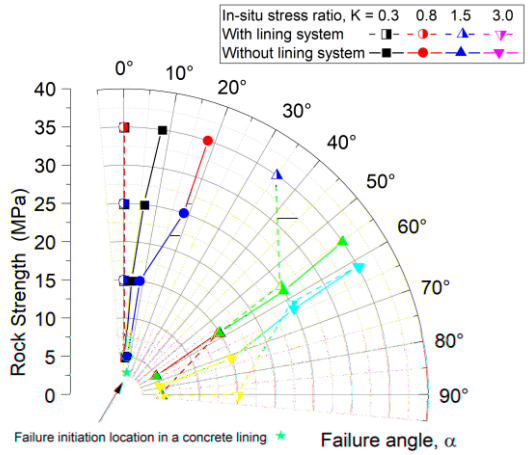
แม้ว่าการพิจารณาระบบดาดซับในจะระบุว่าระดับแรงดันในการกักเก็บแก๊สที่มวลหินโดยรอบจะเกิดการวิบัติจะมีค่ามากขึ้น เมื่อตรวจสอบค่าความเค้นในดาดซับในทั้งสองแล้ว พบว่าค่าความเค้นดึงในดาดคอนกรีตซับในสูงกว่าความสามารถการรับแรงดึงของคอนกรีต โดยมุมวิบัติที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณด้านบน อีกทั้งการเพิ่มกำลังรับแรงดึงของดาดคอนกรีตซับในให้สูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อมุมการวิบัติของดาดคอนกรีตซับใน

อิทธิพลของค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ ไม่ได้ส่งผลต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกเพียงอย่างเดียว แต่ยังส่งผลต่อระดับแรงดันของแก๊สที่เก็บภายในอุโมงค์อีกด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกัน ทั้งแบบที่พิจารณาและไม่พิจารณาระบบดาดซับใน ดังแสดงในรูปที่ 7

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้นกับระบบดาดซับในและมวลหินเพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาและลดความซับซ้อนในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีความสมเหตุสมผลเพียงพอในแง่ของการศึกษาขั้นต้นเพื่อระบุตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติ โดยเน้นความสนใจไปที่ช่วงเริ่มต้นของการวิบัติ แนวทางดังกล่าวอาจไม่สะท้อนพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะใกล้วิบัติได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากคอนกรีตจะวิบัติก่อนและจะแสดงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear behavior) โดยเฉพาะการแตกร้าวในแรงดึง

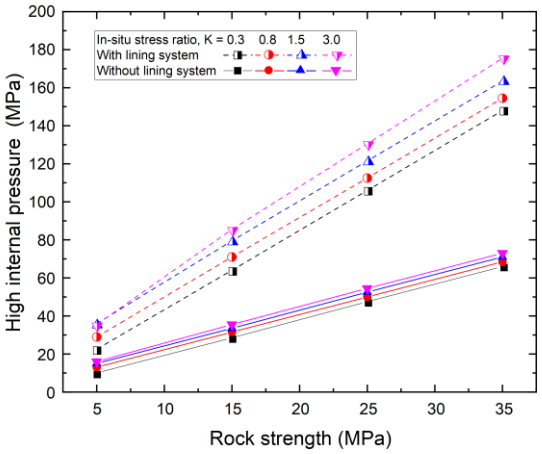


ก) ความลึก 60 เมตร

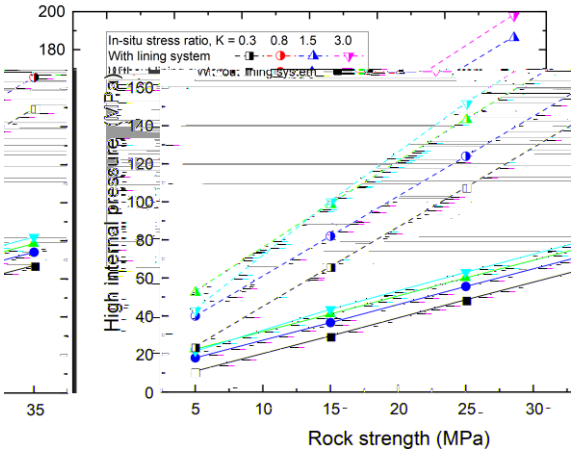


ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 6 การเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นวิบัติสำหรับระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่พิจารณาระบบดาดซับใน และไม่พิจารณาระบบดาดซับใน



ก) ความลึก 60 เมตร



ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 7 ระดับแรงดันในอุโมงค์เก็บแก๊สของอุโมงค์แบบพิจารณาและไม่พิจารณาระบบดาดซับใน

ก่อนการเริ่มวิบัติในมวลหิน เพื่อเพิ่มความสมจริงในการวิเคราะห์ในอนาคต ควรพิจารณาการนำแบบจำลองพฤติกรรมวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น Concrete Damage Plasticity model สำหรับดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก และอาจใช้ Hoek-Brown model สำหรับมวลหิน ในการวิเคราะห์

จากแนวคิดหลักของการศึกษาที่ผ่านมา ที่ไม่พิจารณาระบบดาดซับในในการวิเคราะห์เพราะสามารถยอมให้ดาดคอนกรีตวิบัติได้ตราบเท่าที่ยังช่วยถ่ายแรงดันไปยังมวลหินโดยรอบ แต่ผลการตรวจสอบนี้บ่งบอกว่า การวิบัติของดาดคอนกรีตไม่ได้เกิดพร้อมๆกัน แต่เกิดเป็นเฉพาะที่ ก่อน (Localization) ดังนั้น 1) การออกแบบในอนาคต เพื่อป้องกันความเสี่ยงการกระจุกตัวของความเค้นในดาดเหล็กที่อาจส่งผลต่อ Hydrogen Embrittlement ต้องพิจารณาเพิ่มความแกร่งและความแข็งแรงให้ดาดคอนกรีต ซึ่งอาจอยู่ในรูปของการเพิ่มเหล็กเสริม 2) ตำแหน่งจุดเริ่มการแตกและการพัฒนารอยแตกในมวลหินเพื่อกำหนดวิธีการประเมิน Uplift จากงานวิจัยที่ผ่านมา จำเป็นต้องพิจารณาใหม่สำหรับ LRC ที่ใช้กักเก็บไฮโดรเจน

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ ที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติในมวลหินโดยรอบทั้งกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาระบบดาดซับใน

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ ส่งผลต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังส่งผลต่อขีดจำกัดในการเก็บแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊ส
2. การเพิ่มขึ้นของความลึกอุโมงค์จะเพิ่มขีดความสามารถในกักเก็บแก๊สในระดับแรงดันสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนสำหรับกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ มากกว่า 1
3. ระบบดาดซับในทำให้เกิดการกระจายความเค้นใหม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติในมวลหินโดยรอบเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ในงานก่อนหน้าที่ไม่ได้พิจารณาระบบดาดซับใน ในการวิเคราะห์
4. แม้ว่าระบบดาดซับในจะมีส่วนช่วยในการกระจายและถ่ายแรงดันจากด้านในอุโมงค์เก็บแก๊สออกไปสู่มวลหินโดยรอบ อย่างไรก็ตามระบบดาดซับในจะถึงจุดวิบัติก่อน

5. อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกำลังรับแรงดึงของดาดคอนกรีตซับในให้สูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อมุมการวิบัติในดาดคอนกรีตซับใน

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้จากงานวิจัยก่อนหน้าของระบบ LRC กักเก็บก๊าซหรืออากาศ ไม่สามารถนำมาใช้กับการกักเก็บไฮโดรเจนได้โดยตรง เนื่องจากแนวความคิดระบบ LRC ไม่สนใจการวิบัติของดาดคอนกรีตและการเสียรูปของดาดเหล็กซับในตราบเท่าที่แรงดันภายในยังถ่ายไปสู่มวลหินโดยรอบได้และดาดเหล็กไม่วิบัติ และยังช่วยป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส แต่การนำมาใช้กักเก็บไฮโดรเจนโดยตรงนั้นหากดาดคอนกรีตวิบัติและทำให้เกิดการเสียรูปและความเค้นกระจุกตัว (Localization) จะนำไปสู่การเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน ณ ตำแหน่งดังกล่าว และส่งผลให้ดาดเหล็กซับในสูญเสียความเหนียวทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลง และเกิดการวิบัติตามมาในที่สุด

การศึกษาในอนาคตควรมีการพิจารณาถึงความเหนียวของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นระบบดาดซับใน เช่นอัตราส่วนการเสริมเหล็กในดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้กลไลที่ซับซ้อนขึ้นในการวิเคราะห์รอยแตกร้าวในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กให้การวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมหลังการวิบัติของดาดคอนกรีต การตรวจสอบเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนผลลัพธ์ของแบบจำลอง ให้การประเมินความปลอดภัยของระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินสมบูรณ์ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลฐาน ปีงบประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

[1] SEI, I., ODI, Climate Analytics, CICERO, and UNEP, *The Production Gap: The discrepancy between countries' planned fossil fuel production and global production levels consistent with limiting warming to 1.5°C or 2°C*. 2019.

[2] REN21, (2023) *Renewables 2023 Global Status Report*. REN21 Secretariat, pp.

[3] Hassan, Q., Viktor, P., J. Al-Musawi, T., Mahmood Ali, B., Algburi, S., Alzoubi, H.M., Khudhair Al-Jiboory, A., Zuhair Sameen, A., Salman, H.M. and Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus*, 48, pp. 100545.

[4] Patanwar, Y.K., Kim, H.M., Deb, D. and Gujjala, Y.K. (2024). Underground storage of hydrogen in lined rock caverns: An overview of key components and hydrogen embrittlement challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, pp. 116-133.

[5] Rutqvist, J., Kim, H.M., Ryu, D.W., Synn, J.H. and Song, W.K. (2012). Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, pp. 71-81.

[6] Kim, H.M., Rutqvist, J., Jeong, J.H., Choi, B.H., Ryu, D.W. and Song, W.K. (2013). Characterizing Excavation Damaged Zone and Stability of Pressurized Lined Rock Caverns for Underground Compressed Air Energy Storage. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, pp. 1113-1124.

[7] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Kongkitkul, W., Wonglert, A. and Youwai, S. (2013). Investigation of failure behavior of continuous rock mass around cavern under high internal pressure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, pp. 110-123.

[8] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Kim, H.M. and Nanakorn, P. (2018). Evaluation of rock fracture patterns based on the element-free Galerkin method for stability assessment of a highly pressurized gas storage cavern. *Acta Geotechnica*, 13, pp. 817-832.

[9] Damasceno, D.R., Spross, J. and Johansson, F. (2023). Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 119-129.

[10] Damasceno, D.R., Spross, J. and Johansson, F. (2023). Effect of rock joints on lined rock caverns subjected to high internal gas pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 1625-1635.

[11] Qu, T. and Xu, R. (2013). The Influence of Ratio of Reinforcement to Modulus of Elasticity of Reinforce Concrete Component. *Advanced Materials Research*, 859, pp. 233-237.

[12] Thongraksa, A., Punya-in, Y., Jongpradist, P., Kim, H.M. and Jamsawang, P. (2021). Failure behaviors of rock masses around highly pressurized cavern: Initiation and modes of failure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, pp. 104058.