

การพัฒนาแบบจำลองแบบย่อส่วนแบบ 1g สำหรับการติดตามพฤติกรรม การวิบัติของมวลหินรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันสูง

จักรวาช ตันสกุล^{1*} ญัฐพล ฝัดศิริ² วรัช ก้องกิจกุล³ และ พรเกษม จงประดิษฐ์³

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ แนวคิด หลักการ และรายละเอียดของการพัฒนาชุดทดสอบแบบย่อส่วนเพื่อติดตามการวิบัติของมวลหินโดยรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันภายในสูงแบบ 1g ในห้องปฏิบัติการสำหรับการศึกษาเพื่อประเมินเสถียรภาพของถ้ำเก็บแก๊สใต้ดิน บทความอธิบายถึงองค์ประกอบหลักของระบบชุดทดสอบ ประกอบด้วยระบบให้แรงดัน หินจำลอง อุปกรณ์รับแรง วิธีการติดตามผลตอบสนอง และเทคนิคการจำลองรอยเลื่อน ชุดเครื่องมือทดสอบได้ออกแบบให้ครอบคลุมทั้งอุโมงค์รูปทรงแคบซูลและอุโมงค์แนวราบหน้าตัดวงกลม ของมวลหินที่มีความต่อเนื่องแบบไม่มีรอยเลื่อนและมีรอยเลื่อน ในแต่ละองค์ประกอบได้อธิบายถึงความจำเป็น แนวคิดหลัก เทคนิคและการพัฒนา นอกจากนี้ บทความยังได้แสดงตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้จากการใช้ชุดเครื่องมือนี้ การติดตามการวิบัติ (จุดเริ่มการวิบัติและแนวการวิบัติ) ที่เกิดขึ้นสามารถติดตามจากความหนาแน่นของความเครียดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายได้และมีความสอดคล้องกับแนวรอยแตกที่เกิดขึ้นหลังจากถอดชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเพียงพอของระบบที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาที่ได้จากชุดทดสอบที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์และความจำเป็นของชุดทดสอบในการศึกษาเรื่องนี้ โดยเฉพาะความเข้าใจใหม่ถึงรูปแบบพฤติกรรมการวิบัติเพื่อปรับปรุงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขต่อไป

คำสำคัญ : แบบจำลองทางกายภาพ, แบบจำลองแบบย่อส่วน, เครื่องมือในวิศวกรรมเทคนิคธรณี, การวิบัติในมวลหิน

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

² วิศวกร 4 กรมทางพิเศษแห่งประเทศไทย

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: jukkrawut.tun@rmutr.ac.th รับเมื่อ 25 ธันวาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 12 กันยายน 2559

Development of Scaled-Down 1g Model for Investigation on Failure Behavior of Rock Mass around High Pressurized Caverns

Jukkrawut Tunsakul^{1*}, Nathapon Fatsiri², Warat Kongkitkul³ and Pornkasem Jongpradist³

Abstract

This article presents the concept, principle and details of development of 1g physical model test equipments to investigate the failure behavior of rock mass surrounding a cavern under high internal for assessment of the stability of underground gas storage cavern. The paper describes the main components of the test system including a pressure system, synthetic rock, a support system, a detection method of rock response and a technique for fault simulation. The equipment is designed to cover both capsule and horizontal circular-tunnel shaped caverns for the continuum rock mass with and without fault. In each part of equipment development, the necessary aspects, main concept and technique to be used and detail on development are explained. In addition, some test results obtained by using this equipment are illustrated as an example to show that the developed device is effective and sufficient to be used in the studied topic. The presented results also indicate the necessity and advantage of using the developed device in the study, particularly a new understanding on failure behavior of rock mass in order to improve the numerical method for further study.

Keywords : Physical model, Scaled-down model, Geotechnical engineering apparatus, Failure in rock mass

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus.

² Engineer 4 Expressway Authority of Thailand.

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

* Corresponding author, E-mail: jukkrawut.tun@rmutr.ac.th Received 25 December 2015, Accepted 12 September 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาเครื่องมือทดสอบในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีมีส่วนสำคัญในการช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมที่แท้จริงและประเมินตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างใต้ดินรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการวางแผนและคาดการณ์ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นก่อนที่จะก่อสร้างจริงหรือแม้กระทั่งก่อสร้างตัวต้นแบบเพื่อการศึกษา (Pilot project) โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้งบประมาณในการลงทุนก่อสร้างสูง เช่น งานสาธารณูปโภคโครงสร้างใต้ดินที่เป็นลักษณะใหม่ที่ยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของวิศวกรหรือต้องเจอสภาพเงื่อนไขที่ความเข้าใจในวิทยาการยังไม่ชัดเจน เช่นการก่อสร้างอุโมงค์ สำหรับการเก็บแก๊สความดันสูงใต้ดิน หรือ เมื่อต้องขุดอุโมงค์ผ่านรอยเลื่อนหรือระนาบที่อ่อนแอ [1-2] เป็นต้น ด้วยการย่อขนาดและจัดเตรียมในห้องปฏิบัติการ

สำหรับปัญหาการเก็บแก๊สธรรมชาติแบบแรงดันสูง (Compressed Gas Energy Storage, CGES) ในอุโมงค์ในชั้นหินด้วยวิธี Lined Rock Cavern (LRC) เป็นเทคโนโลยีใหม่ในการสำรองแก๊สธรรมชาติที่ได้ริเริ่มในประเทศแถบสแกนดิเนเวียมากกว่า 20 ปี ในต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการดำเนินการก่อสร้างต้นแบบ (Pilot scale test) ในประเทศสวีเดน [3-4] ต่อมาก็ได้ทำการทดลองโดยวิธีต้นแบบที่ประเทศญี่ปุ่น [5] และประเทศเกาหลีใต้ [6-7] ถึงแม้ว่าการทดลองโดยวิธีต้นแบบเป็นวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือมาก แต่ไม่สามารถศึกษาได้หลายกรณีเพราะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง

การก่อสร้างถึงแก๊สใต้ดินความดันสูงนั้น การก่อสร้างจะอยู่ในชั้นหินใต้ดินที่มีความลึกระดับหนึ่ง ซึ่งแนวคิดของเก็บแก๊สแบบ LRC นั้นจะอาศัยการกระจายแรงดันสู่มวลหินที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นหนึ่งในเงื่อนไข

สำคัญในการออกแบบคือ เสถียรภาพของมวลหินภายใต้ความดันสูงเพื่อใช้กำหนดความลึกที่เหมาะสม ที่ผ่านมาวิธีการประเมินที่นิยมจะอยู่บนหลักการของวิธี Limit equilibrium ที่ต้องสมมติระนาบการวิบัติในการคำนวณ ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาใช้วิธีการสมมติระนาบที่ต่างกันออกไป ส่งผลให้ค่าการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับการสมมติระนาบการวิบัติดังกล่าว เพื่อที่จะประเมินระนาบการวิบัติที่เหมาะสม [8] ได้วิเคราะห์การวิบัติแบบต่อเนื่อง (Progressive failure) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ร่วมกับเอลิเมนต์สัมผัส (Interface element) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของมวลหินเนื่องจากแรงดันภายใน จากผลการศึกษาพบว่า แนวการวิบัติที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความเค้นในที่ (In-situ stress condition) เป็นหลัก ดังนั้นความเข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัยหลักดังกล่าวต่อแนวการวิบัติจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการกำหนดแนววิบัติที่เหมาะสมต่อการประเมินเสถียรภาพของมวลหินรอบถังแก๊สด้วยวิธี Limit equilibrium

ถึงแม้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักเช่น สภาพความเค้นในที่ ต่อแนวการวิบัติได้โดยไม่ได้มีค่าใช้จ่ายที่มาก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นการประเมินจากพฤติกรรมที่กำหนดให้กับมวลหิน โดยที่พฤติกรรมมวลหินรอบอุโมงค์ภายใต้ความดันสูงยังเพิ่งเริ่มศึกษา จึงยังไม่ได้มีความเข้าใจที่แน่ชัด การทดสอบด้วยแบบจำลองแบบย่อส่วน (Physical model test) จึงมีความจำเป็นเพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และความเข้าใจพฤติกรรมที่แท้จริงของมวลหินรอบอุโมงค์ภายใต้ความดันสูง ดังที่ได้มีการศึกษามาแล้ว [8] โดยการสมมติรูปแบบการวิบัติแบบเฉือน (Shear failure

mode) แต่ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองแบบย่อส่วน ภายหลัง [9] ระบุว่ารูปแบบการวิบัติเป็นแบบความเค้นดึง (Tensile failure mode)

บทความนี้มุ่งเน้นอธิบายแนวคิด หลักการ และองค์ประกอบที่จำเป็นในการพัฒนาชุดเครื่องมือแบบจำลองย่อส่วนในการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของมวลหิน โดยรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันภายในสูงของมวลหินที่มีความต่อเนื่องแบบมีและไม่มีรอยเลื่อน (With and without fault) ทั้งรูปแบบถังแก๊สแบบรูปทรงแคปซูล/ไซโล (Silo) และ อุโมงค์แนวราบ (Horizontal tunnel) เพื่อประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

2. ลักษณะของปัญหา สมมติฐาน และขอบเขตการศึกษา

แนวความคิดพื้นฐานของการเก็บพลังงานโดยการอัดแก๊สธรรมชาติจนเป็นแก๊สความดันสูง (CGES) ร่วมกับอุโมงค์ที่มีชั้นคาดอุโมงค์ (LRC) ได้ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้ โดยปกติระบบนี้จะมีชั้นทึบ (Impermeable layer) เป็นตัวป้องกันแก๊สรั่ว และชั้นคาดคอนกรีต (Concrete liner) เป็นตัวกระจายแรงดันเนื่องจากแก๊สไปสู่มวลหินโดยรอบ สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งศึกษารอยแตกที่เกิดขึ้นในมวลหิน ดังนั้นทั้งชั้นทึบและคอนกรีตจะไม่พิจารณาในงานวิจัยนี้ จากงานต้นแบบได้พิจารณาอุโมงค์รูปทรงแคปซูลที่มีผิววนและล่างเป็นส่วนโค้งดังแสดงในรูปที่ 1ก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ในช่วง 20-50 เมตร และ 30-115 เมตร เช่น โครงการ Granesberg ที่สวีเดน [3] แต่ทว่าด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการขุดเจาะอุโมงค์ทำให้มีแนวโน้มในการเลือกใช้การเก็บด้วยรูปแบบของอุโมงค์

แนววนอน (ดังแสดงในรูปที่ 1ข) มากขึ้น แม้ว่าการก่อสร้างจะใช้ระบบค้ำยันที่มากกว่าก็ตาม

การศึกษานี้ได้พิจารณาสภาพมวลหินที่มีและไม่มีรอยแตกขนาดใหญ่ (Fault) อยู่ใกล้กรณีศึกษาทั้งหมด จึงมี 4 กรณี ได้แก่ คือ 1) อุโมงค์รูปทรงแคปซูลกับหินที่มีความต่อเนื่อง 2) อุโมงค์รูปทรงแคปซูลกับหินที่มีรอยแตกผ่านด้านบนอุโมงค์ 3) อุโมงค์แนวราบกับหินที่มีความต่อเนื่อง และ 4) อุโมงค์แนวราบกับหินที่มีรอยแตกผ่านด้านบนอุโมงค์ โดยอาศัยระนาบสมมาตรสำหรับปัญหารูปทรงแคปซูล กับสภาพ 2 มิติแบบระนาบความเครียดสำหรับอุโมงค์แนววนอน สามารถจำลองปัญหาแค่บางส่วนได้เพื่อช่วยให้ง่ายและลดภาระในการเตรียมตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ โดยพิจารณาเพียง 1/4 ของปัญหาสำหรับกรณีที่ 1 แบบครึ่งของปัญหาสำหรับกรณีที่ 2 และแบบเต็มของปัญหาที่มีความหนา 15 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่ 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 1ค, 1ง, 1จ และ 1ฉ ตามลำดับ จากปัจจัยลดขนาด (Scaling factor) [11] ที่เลือกใช้ 1/200 ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์วงกลมและส่วนโค้งฐานแคปซูลเท่ากับ 10 เซนติเมตรในตัวอย่างทดสอบ โดยการจำลองและวิเคราะห์ความเค้นในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเพียงพอที่จะขยายขนาดปัญหาที่ศึกษาออกไป 5 เท่าคือ 50 เซนติเมตร

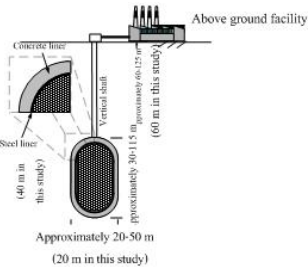
3. องค์ประกอบที่จำเป็นและข้อพิจารณา

ชุดการทดลองทางกายภาพแบบย่อส่วนแบบ 1g ได้ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้โดยพิจารณาปัจจัยลด [11] เท่ากับ 1/200 แบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนจะมีขนาดเล็กกว่างานต้นแบบทำให้ได้ข้อมูลง่าย และผลตอบแทนของข้อมูลที่เร็ว สามารถควบคุมการ

แปรเปลี่ยนของตัวแปรได้ง่ายกว่าการทดสอบแบบขนาดจริง (Full scale test) สำหรับการทดสอบซ้ำก็ สามารถทำได้ง่ายและเร็ว การติดตั้งเครื่องมือในการ ตรวจวัดค่าต่างๆ ก็สามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีการทดสอบ แบบขนาดจริง ไม่ซับซ้อน ซึ่งในการข่ส่วนนั้น จะลด ขนาดด้านมิติและคุณสมบัติของวัสดุ แต่รูปร่างคงเดิม ดังนั้นองค์ประกอบแรกที่ต้องพิจารณาคือการข่ คุณสมบัติของมวลหินให้มีค่าเพียง 1/200 เท่าจากค่าจริง ในทางปฏิบัติ

ในกระบวนการขุดอุโมงค์ในหิน ลักษณะรูปแบบ ของรอยแตกหรือรอยแยกตามธรรมชาติรวมถึง คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropy) ควรจะถูก นำมาพิจารณา โดยเฉพาะรอยแตกขนาดใหญ่ (Fault) ใน

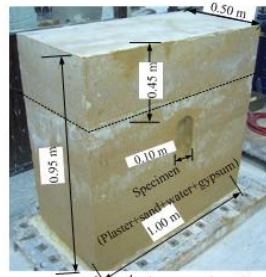
ขั้นตอนออกแบบและวางแผนสำหรับเลือกสถานที่ ก่อสร้างจึงควรเลือกวางตำแหน่งก่อสร้างในมวลหินที่ ไม่มีรอยแตก เช่น หินที่เพิ่งเกิดใหม่ (Fresh rocks) แต่ ทว่าในทางปฏิบัติอาจจะหลีกเลี่ยงเจอหินที่มีรอยแตก ไม่ได้ ดังนั้นสิ่งที่ทำได้คือการเปลี่ยนตำแหน่งอุโมงค์ เพื่อไม่ให้รอยแตกที่มีอยู่เดิมพาดผ่านอุโมงค์ แต่ก็ยังจะ มีรอยแตกอยู่ใกล้ ในการจำลองรอยแตกของหินจะ จำลองให้อยู่ในตำแหน่งเหนืออุโมงค์ เนื่องจาก ผลกระทบของแรงดันจะทำให้รอยแตกมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ ผิวดิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาหินที่มีความ ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันทั้งกรณีที่มีรอยแตกใกล้อุโมงค์ และไม่มีรอยแตก องค์ประกอบที่สองที่ต้องพิจารณาคือ การจำลองรอยแตกในมวลหินจำลอง



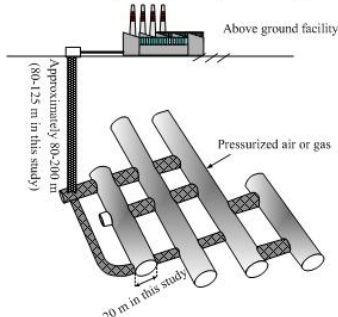
ก)รูปแบบอุโมงค์รูปทรงแคบขุด



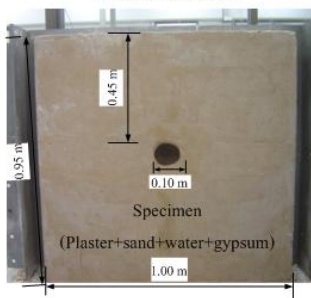
ค) 1/4อุโมงค์รูปทรงแคบขุดกับ หินที่มีความต่อเนื่อง



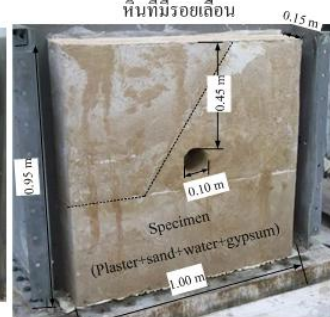
ง) 1/2อุโมงค์รูปทรงแคบขุดกับ หินที่มีรอยเลื่อน



ข)รูปแบบอุโมงค์แนวนอน



จ) อุโมงค์แนวนอนกับหินที่มีความต่อเนื่อง



ฉ) อุโมงค์แนวนอนกับหินที่มีรอยเลื่อน

รูปที่ 1 ลักษณะอุโมงค์และการจำลองในแต่ละกรณี (พัฒนาจาก [10])

องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาอันดับ 3 คือชุดชิ้นส่วนสำหรับขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบตามรูปที่ 1ค-1จ และชิ้นส่วนประกอบเพื่อรองรับตัวอย่างขณะทดสอบและขณะให้แรงดันสูงในช่องว่างที่เป็นตำแหน่งของอุโมงค์ข้อพิจารณาสำคัญคือสะดวกต่อการประกอบและถอดหรือ มีความแข็งแรงที่มั่นใจว่าปลอดภัย และสามารถมองเห็นตัวอย่างขณะทดสอบได้ด้วยเพื่อติดตามผลตอบสนองของมวลหินหรืออุปกรณ์อื่นเพื่อตัดสินใจสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากระดับของแรงดันที่ทดสอบต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้หินจำลองรอบช่องว่างเกิดการวิบัติเป็นรอยแตก ลำดับถัดไปองค์ประกอบที่ 4 คือระบบให้แรงดัน ที่ประกอบไปด้วย 1) ให้ความเค้นแก่มวลหินเป็นการจำลองความเค้นในหิน และ 2) แรงดันภายในช่องว่างที่เป็นตำแหน่งของอุโมงค์ โดยที่มาของปัญหาหลักคืออิทธิพลของสภาพความเค้นในหินที่ประกอบไปด้วยความเค้นในแนวตั้งและแนวราบ ดังนั้นประเด็นหลักคือระบบนี้ต้องสามารถให้แรงดันในแต่ละด้านของตัวอย่าง และในช่องว่างอย่างเป็นอิสระแก่กัน แรงดันต้องเสถียรและมีขนาดสูงพอ และระบบต้องปลอดภัย โดยที่วัสดุหินจำลองสร้างจากทรายผสมวัสดุประสาน (อธิบายในหัวข้อถัดไป) ด้วยขนาดเม็ดของทรายที่เล็กและอยู่ภายใต้การบีบอัด (Compression) ถึงแม้เกิดรอยแตกขึ้นระหว่างทดสอบ อาจไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ จะมีขั้นตอนการถอนแรง (Unload) ด้วยการลดแรงดันที่ให้แก่ตัวอย่างก่อนหรือชุดทดสอบออกจากตัวอย่าง กระบวนการดังกล่าวอาจทำให้เกิดรอยแตกขึ้นซึ่งไม่ใช่รอยแตกจากการให้ความดันภายในอุโมงค์ระหว่างทดสอบ การสังเกตรอยแตกจากตัวอย่างด้วยตาเปล่าหลังหรือชุดทดสอบออกจากตัวอย่างจึงอาจให้ผลที่

คลาดเคลื่อน นอกจากนี้รายละเอียดผลตอบสนองของมวลหินระหว่างทดสอบควรต้องติดตามด้วยเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรม ดังนั้นระบบติดตามผลตอบสนองของมวลหินระหว่างทดสอบจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ประกอบการทดสอบซึ่งเป็นองค์ประกอบสุดท้าย

4. องค์ประกอบของชุดเครื่องมือทดสอบ

ส่วนนี้อธิบายแนวคิด และการพัฒนาองค์ประกอบของชุดเครื่องมือทดสอบในแต่ละส่วน

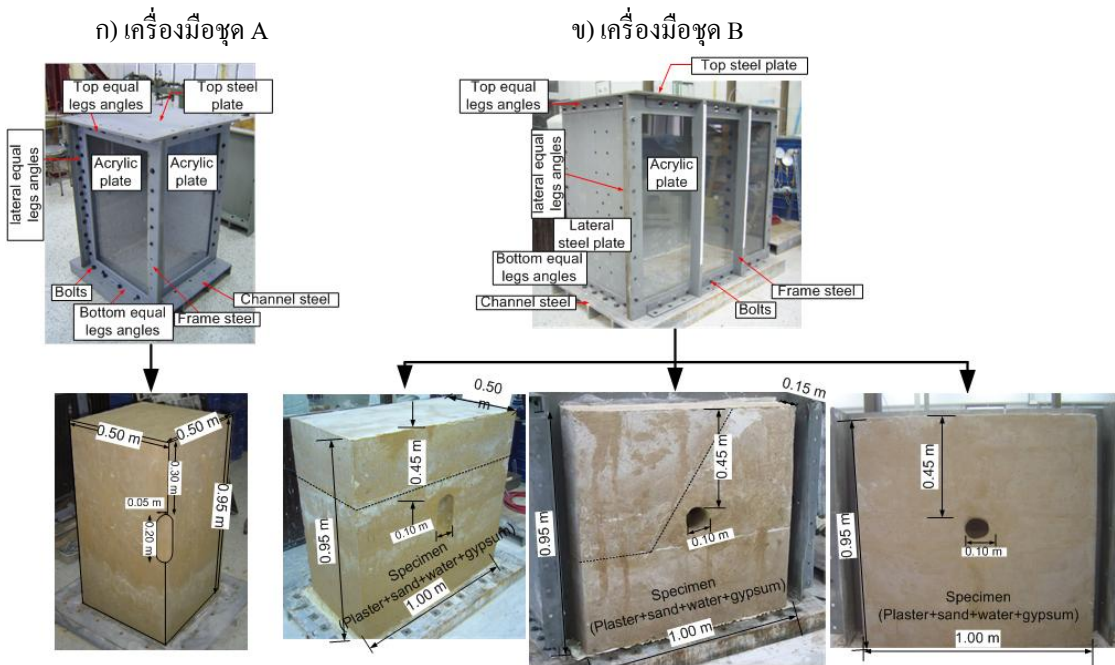
4.1 อุปกรณ์รับแรงและขึ้นรูป

ดังที่ได้ระบุไว้ว่าชุดอุปกรณ์ทดสอบต้องมีความแข็งแรง วัสดุหลักที่ใช้ในการทำเครื่องมือทดสอบจึงประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กมีหน้าที่เป็นฐาน และแผ่นด้านข้างในการรองรับน้ำหนักและแรงดัน อย่างไรก็ตามในการดำเนินการทดสอบจำเป็นต้องสามารถมองเห็นและติดตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ด้วย แผ่นอะคริลิกใสที่หนาและแข็งแรงจึงถูกเลือกมาใช้เป็นแผ่นด้านข้างที่ต้องการมองเห็นตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดของวัสดุสามารถดูได้จาก [9] ส่วนประกอบจะต้องถอดประกอบได้โดยง่ายและมีความแข็งแรง ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ระบบยึดด้วยสลักเกลียวในงานวิจัยนี้เพื่อรองรับการทดสอบที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2 ชุดเครื่องมือได้ถูกออกแบบเป็น 2 ชุดดังนี้

เครื่องมือชุด A (รูปที่ 2ก) ถูกออกแบบเพื่อใช้กับการทดสอบปัญหาอุโมงค์รูปแคปซูลแนวตั้ง (Silo) อุโมงค์รูปแคปซูลแนวตั้งจะจำลองปัญหาให้เป็น 1/4 ของแคปซูลสำหรับปัญหาแบบมวลหินที่ไม่มีรอยเลื่อน

เครื่องมือชุด B (รูปที่ 2ข) ถูกออกแบบเพื่อใช้ทดสอบสามกรณี 1) กรณี 1/2 แคปซูลแนวตั้งร่วมกับการ

พิจารณาปัญหาแบบมีรอยเลื่อนพาดผ่าน นอกจากนั้น ความเครียดทั้งที่มีและไม่มีรอยเลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับอุโมงค์ที่วางตัวแนวราบจะจำลองแบบระนาบ



รูปที่ 2 ลักษณะของปัญหาและเครื่องมือทดสอบ (พัฒนาจาก [10])

สำหรับเครื่องมือชุด B ที่ใช้กับปัญหาแบบระนาบ ความเครียดที่หนา 15 เซนติเมตรและปัญหากรณี 1/2 แคปซูล ที่ตัวอย่างต้องหนา 50 เซนติเมตร ได้ออกแบบให้เครื่องมือชุด B สามารถปรับความหนา ให้รองรับตัวอย่างระหว่าง 10-50 เซนติเมตรได้ รายละเอียดอื่น ๆ รวมถึงวิธีการติดตั้งสามารถดูได้จาก [12] โดยที่ตัวอย่างจะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์รับแรงเพื่อ บรรจุลงม (ดูหัวข้อ 4.4) ในช่องว่างระหว่างตัวอย่าง กับอุปกรณ์รับแรงและเพื่อป้องกันเกิดรอยข่วนหรือ ความเสียหายแก่แผ่นอะคริลิกใส จึงไม่สามารถใช้ อุปกรณ์รับแรงในการขึ้นรูปตัวอย่างได้ ยกเว้นชิ้นส่วน ฐานและด้านที่เป็นแผ่นเหล็ก เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย

การศึกษานี้ออกแบบเป็นแบบหล่อไม้ดังรูปที่ 3 ซึ่งยังคง เป็นระบบใช้ระบบยึดด้วยสลักเกลียว แบบไม้ที่ใช้ใน การขึ้นรูป จะแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังรูปที่ 3ก) ข) และ ค) ตามลำดับ แบบไม้ในรูปที่ 3ก) ซึ่งมีขนาด ภายใน 500×500×950 มม³ ใช้สำหรับสร้างตัวอย่างหิน จำลองปัญหา 1/4 แคปซูล รูปที่ 3ข) ใช้สำหรับสร้าง ตัวอย่างทดสอบของปัญหาอุโมงค์วางตัวในแนวราบ ของทั้งหินที่มีความต่อเนื่องแบบมีและไม่มีรอยเลื่อน พาดผ่าน ซึ่งมีขนาดภายใน 150×1,000×950 มม³ สำหรับปัญหาของรูปทรงแคปซูลที่มีรอยเลื่อนพาดผ่าน จะจำลองปัญหาครึ่งเดียวและมีขนาดภายใน 500×1,000×950 มม³ ดังแสดงในรูปที่ 3ค)

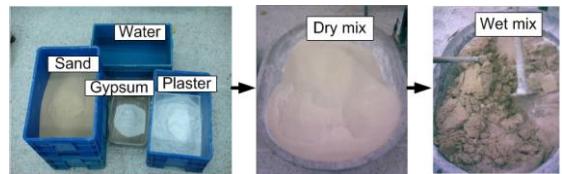
4.2 หินจำลองและการเตรียมหินจำลอง

ในการเลือกวัสดุมาเป็นตัวแทนของหินที่อยู่รอบอุโมงค์จะต้องมีคุณสมบัติที่ไม่แข็งเกินไปเพื่อเป็นไปตามกฎเกณฑ์ของปัจจัยลดขนาดและอยู่ในขอบเขตความสามารถของเครื่องมือทดสอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบหินจำลองเพื่อให้เหมาะสมกับความสามารถของเครื่องมือในการทดสอบ การสร้างหินจำลองในครั้งนี้ได้มีการลดค่าความแข็งแรงลงมาโดยพิจารณาถึงปัจจัยลดขนาด อีกทั้งในการเลือกวัสดุมาเป็นหินจำลองได้มีการเลือกวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ดังนั้นได้ใช้ส่วนผสมของ ปูนปลาสเตอร์ ทราย น้ำ [13]



ก) 1/4แคปซูล ข) อุโมงค์แนวราบ ค) ครึ่งแคปซูล
 รูปที่ 3 แบบไม้ในการเตรียมตัวอย่าง

หลังจากการทำ Trial mix โดยกำหนดให้ค่าความแข็งแรงอัดแกนเดียว (Uniaxial compression strength) อยู่ในช่วง 0.15-0.2 MPa อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 1:15:4 โดยน้ำหนัก โดยใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน นอกจากนั้น ยิปซั่ม ได้ถูกใส่เพิ่ม 0.2 เท่าของปูนปลาสเตอร์โดยน้ำหนัก เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์เพราะต้องทำงานกับปริมาตรส่วนผสมขนาดใหญ่ หินจำลองดังกล่าวได้ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ Uniaxial compression test, Brazilian tensile test, Direct shear test ซึ่งค่าคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 1 การสร้างหินจำลองเพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบจะดำเนินการผสมด้วยมือโดยเริ่มจากนำอัตราส่วนของส่วนผสมที่เตรียมไว้มาทำการผสมแห้ง (ปูนปลาสเตอร์ ทราย และยิปซั่ม) ดังในรูปที่ 4ข)



ก) วัตถุดิบในการผสม ข) ผสมแห้ง ค) ผสมเปียก
 รูปที่ 4 ขั้นตอนการผสมตัวอย่าง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของหินจำลอง

ปริมาณ	หน่วย	ต้นแบบ	แบบจำลอง	ปัจจัยลดขนาด(1g)*[9]
หน่วยน้ำหนัก, γ	kN/m ³	20	20	1
หน่วยแรงเค้นสูงสุด, σ_c	MPa	36	0.18	N
หน่วยแรงดึงสูงสุด, σ_t	MPa	2.6	0.013	N
โมดูลัสความยืดหยุ่น, E	MPa	5,000	25	N
อัตราส่วนปริมาตรของ, V	-	0.2	0.2	1
แรงยึดเหนี่ยว, C	MPa	11	0.055	N
มุมของแรงเสียดทานภายใน, ϕ	องศา	32	32	1

* : ต้นแบบ/แบบจำลอง = n= 200 สำหรับการศึกษครั้งนี้

หลังจากส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันแล้วก็จะผสมเป็ยอกโดยการใส่น้ำ (รูปที่ 4ค) หลังจากผสมเข้ากันดีแล้ว ก็จะดำเนินการเทลงแบบไม้ที่เตรียมไว้ ก่อนการเทส่วนผสมเป็ยอกลงในแบบไม้ แบบไม้ถูกห่อด้วยพลาสติกเพื่อ่ง่ายสำหรับการถอดแบบ สำหรับการเท



ก) แบบ 1/4 แคปซูล ข) แบบอุโมงค์แนวราบ

รูปที่ 5 ตัวอย่างการเทตัวอย่างในแบบ

4.3 เทคนิคการจำลองรอยเลื่อน

รอยแตกของหินในธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางด้านแรงเสียดทานที่ต่างกัน แรงเสียดทานที่มากก็จะส่งผลให้หินมีคุณสมบัติคล้ายหินที่มีความต่อเนื่อง (Continuous rock mass) ซึ่งจะให้เสถียรภาพที่ดีกว่ารอยแตกที่มีแต่ดินหรือวัสดุเหลวในช่องว่าง เพื่อการใช้งานอย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้ได้ใช้กรณีศึกษาที่วิกฤตที่สุดคือไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless) มาจำลองรอยเลื่อนของทั้งกรณีที่อยู่โมดูลครึ่งแคปซูลและอุโมงค์วางตัวแนวราบจะมีกระบวนการสร้างรอยเลื่อนให้มีคุณสมบัติเหมือนกันเป็นแบบไม่มีแรงเสียดทาน โดยระหว่างเตรียมตัวอย่างจะแบ่งเทตัวอย่างผสมเป็ยอกสองครั้ง ซึ่งครั้งแรกจะเทถึงตำแหน่งระบบรอยเลื่อนแล้วปล่อยให้แห้ง

ส่วนผสมเป็ยอกลงในแบบไม้จะแบ่งการเทเป็นชั้นๆ เพื่อควบคุมคุณภาพและความหนาแน่นของหินจำลอง เทจนตัวอย่างเต็มแบบไม้ดังแสดงในรูปที่ 5 ระหว่างเทมีการเก็บตัวอย่างไปทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพ

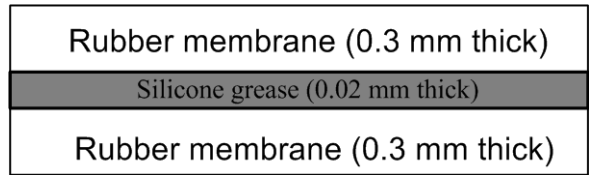
สามวัน โดยในการทำชั้นแรกจะมีการใช้แบบไม้เพื่อสร้างรอยเลื่อน (ที่เป็นระบบเอียง) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนมุมการเอียงได้ (รูปที่ 6)



ก) แบบอุโมงค์แนวราบ ข) ครึ่งแคปซูล

รูปที่ 6 การสร้างรอยเลื่อน (พัฒนาจาก [10])

หลังจากทิ้งไว้สามวันการเทส่วนผสมเป็ยอกครั้งที่สองก็จะเททับลงไป โดยที่ก่อนเทตัวอย่างผสมเป็ยอกครั้งที่สอง จะนำจาระบีซิลิโคนสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) มาใช้เพื่อลดแรงเสียดทานให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีแผ่นยางธรรมชาติที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตร ห่อหุ้มอยู่ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 7 หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างอีก 4 วัน จึงถอดแบบไม้เพื่อเตรียมการทดสอบต่อไป



ก) การสร้างรอยเลื่อนให้ไม่มีแรงเสียดทาน

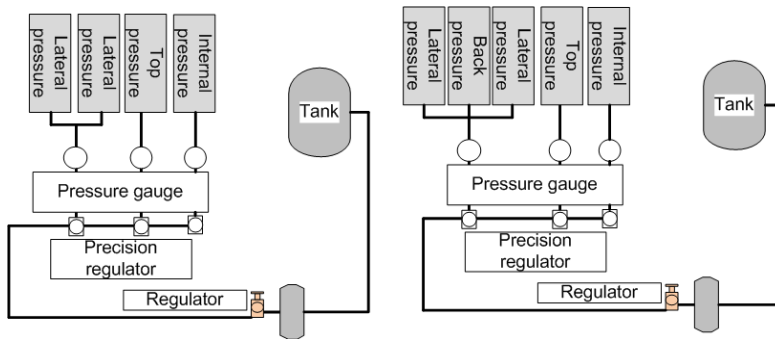
ข) ฟังการเตรียมรอยเลื่อน

รูปที่ 7 การสร้างรอยเลื่อนที่ไม่มีแรงเสียดทาน

4.4 ระบบให้แรง

ในการออกแบบระบบให้แรงดันในครั้งนี้ได้ให้แรงดันด้วยระบบลม (Pneumatic) ผ่านไปยังตุ้มลมที่แยกจากกันเพื่อควบคุมแรงดันให้มีค่าไม่เท่ากันได้ ในการควบคุมแรงดันจะใช้เครื่องเรกูเลเตอร์ปรับแรงดันแบบ

ละเอียด (Precision regulators) เพื่อให้ครอบคลุมกรณีศึกษา แผ่นผังแรงดันได้ถูกออกแบบเป็นสองชุดคือแบบแรกใช้กับการทดสอบกรณีที่หินมีความต่อเนื่องแบบไม่มีรอยเลื่อนและมีรูปทรง 1/4 แคปซูล ดังแสดงในรูปที่ 8ก)



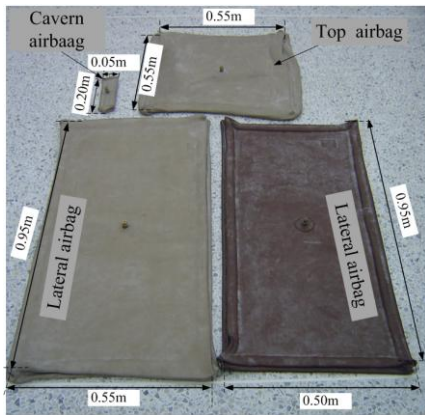
ก)

ข)

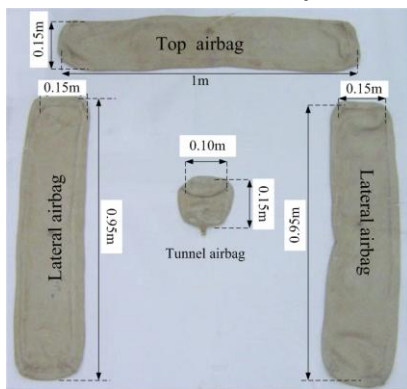
รูปที่ 8 แผ่นผังแรงดัน (พัฒนาจาก [9] และ [10])

สำหรับกรณีอุโมงค์แนวราบของหินที่มีความต่อเนื่องแบบมีและไม่มีรอยเลื่อนพาดผ่านและกรณีที่มีรอยเลื่อนในอุโมงค์ทรงครึ่งแคปซูลจะทำการให้แรงดันตามแผนผังในรูปที่ 8ข) สำหรับตุ้มลมให้แรงดันสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9ก) ข) และ ค) ตามลำดับ รูปที่ 9ก) เป็น

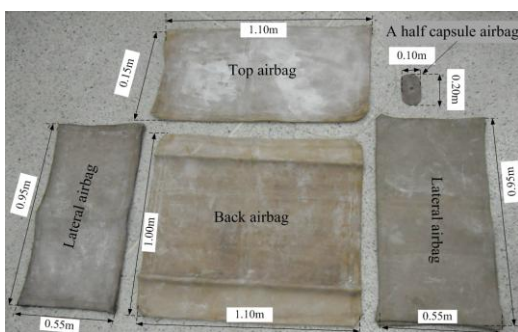
ตุ้มลมที่ใช้สำหรับการทดสอบกรณีหินที่มีความต่อเนื่องแบบไม่มีรอยเลื่อนและมีรูปทรง 1/4 แคปซูล กรณีอุโมงค์แนวราบของหินที่มีความต่อเนื่องแบบมีและไม่มีรอยเลื่อนพาดผ่านจะใช้ตุ้มลมในรูป 9ข) ส่วนกรณีที่มีรอยเลื่อนในอุโมงค์ทรงครึ่งแคปซูลใช้ตุ้มลมในรูปที่ 9ค)



(ก) สำหรับ 1/4 แคปซูล



(ข) สำหรับอุโมงค์แนวราบ

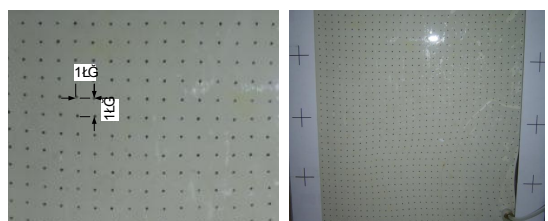


(ค) สำหรับครึ่งแคปซูล

รูปที่ 9 ลักษณะถุงลมให้แรงดันของแต่ละกรณี (พัฒนาจาก [9] และ [10])

4.5 วิธีติดตามผลตอบสนอง

การติดตามพฤติกรรมโดยการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Photogrammetric analysis) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการติดตามการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มแรงดันภายในในการคำนวณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้ใช้ Four-node plane isoparametric element ในการคำนวณ [14] ในการดำเนินการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้มีการวัดจุดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร บนแผ่นยางธรรมชาติที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำการเป็นตะแกรง (Grid) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 10x10 มิลลิเมตร² ดังแสดงในรูปที่ 10ก) ในงานวิจัยนี้จำนวนตะแกรงมีขนาด 50 หลัก X 90 แถวรวมทั้งหมด = 4,500 จุด หลังจากนั้นแผ่นยางธรรมชาติดังกล่าวถูกนำมาแนบกับแผ่นอะคริลิกใส โดยมีจารบีซิลิโคนสุญญากาศหนา 0.05 มิลลิเมตร เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างแผ่นยางธรรมชาติและอะคริลิกใส [15] (รูปที่ 10ข) ในการดำเนินการทดสอบจะทำการถ่ายรูปทุกๆการเปลี่ยนแปลงครั้ง หลังจากดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้นภาพถ่ายถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์หาค่าความเครียด ซึ่งขั้นตอนการได้มาของความเครียดจะมีขั้นตอนการทำงานดังตารางที่ 2



ก) ตะแกรง(Mesh)

ข) การติดตั้งยางธรรมชาติ

รูปที่ 10 การเตรียมการวิเคราะห์ภาพถ่าย

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการได้มาของความเครียดโดยการวิเคราะห์ภาพถ่าย

ขั้นตอน	คำอธิบาย
1. เลือกรูป	เลือกรูปที่สนใจที่จะนำมาวิเคราะห์
2. ปรับแก้รูปให้ชัด	ปรับแก้โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop
3. การหาพิกัด	หาพิกัดของจุดบนแผ่นยางธรรมชาติโดยโปรแกรม Digitize
4. เรียงพิกัด	เรียงพิกัดโดยใช้โปรแกรม MATLAB
5. ตรวจสอบพิกัด	ตรวจสอบการเรียงตัวของพิกัดโดยโปรแกรม Origin pro 7.5
6. คำนวณหาค่าความเครียด	คำนวณความเครียด เช่น $\epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{vol}, \gamma_{max}, \gamma_{xy}$ โดยโปรแกรม MATLAB
7. พล็อตความเครียด	พล็อตความเครียดโดยโปรแกรม Surfer 6

5. การทดสอบด้วยแบบจำลองแบบย่อส่วน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการติดตั้งก่อนการทดสอบ และการทดสอบรวมถึงตัวอย่างผลการทดสอบ หลังจากการเตรียมตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้ว เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะถูกติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 11 การจำลองกรณี 1/4 แคปซูล ไม่มีรอยเลื่อนแสดงในช่องซ้ายมือ กรณีครึ่งแคปซูล มีรอยเลื่อนอยู่ในช่องกลางและกรณีอุโมงค์ แนวราบของทั้งมีรอยเลื่อนและไม่มียรอยเลื่อนซึ่งจะมีขั้นตอนการติดตั้งที่เหมือนกัน ได้แสดงไว้ในช่องขวามือ

5.1 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือ

ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือมีขั้นตอนดังนี้

-หลังจากเตรียมตัวอย่างหินจำลองแล้ว (รูปที่ 11ก-1, 11ข-1 และ 11ค-1) แผ่นเหล็กด้านข้างทั้งหมดจะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันและยึดด้วยฐานของเครื่องมือ

พร้อมทั้งทำการใส่ตุ้มลงด้านข้างเพื่อให้แรงดัน (รูปที่ 11ก-2, 11ข-2 และ 11ค-2) สำหรับด้านที่มีการติดตั้งอะคริลิกใส ตุ้มลงเพื่อให้แรงดันภายในจะถูกติดตั้งลงไปด้วย (รูปที่ 11ก-2)

-ตุ้มลงด้านบนเพื่อการจำลองแรงดันในแนวตั้งจะถูกติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 11ก-3, 11ข-3 และ 11ค-3

-แผ่นเหล็กด้านบนจะถูกนำมาประกอบแล้วยึดเข้าด้วยกันกับแผ่นเหล็กและแผ่นอะคริลิกใส พร้อมทั้งทำการติดตั้งระบบควบคุมการให้แรงดันดังแสดงในรูปที่ 11ก-4, 11ข-4 และ 11ค-4

-จัดตำแหน่งกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล ซึ่งมีระยะห่างจากด้านหน้าตัวอย่างหรืออะคริลิกใสประมาณ 1 เมตร

5.2 ขั้นตอนการสอบ

หลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว การทดสอบทุกกรณีจะมีขั้นตอนที่เหมือนกัน เพื่อเป็น

การจำลองค่าหน่วยแรงในที่เกิดการทดสอบจะเริ่มจากการให้แรงดันด้านข้างและด้านบน (และด้านล่างสำหรับกรณีครึ่งแคบซูลกับหินที่มีรอยเลื่อน) โดยให้แรงดันด้วยอัตราประมาณ 5 kPa/min จนถึงค่าที่ตั้งไว้แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง โดยที่แรงดันภายในยังคงไม่มีการให้แรงดัน หลังจากผ่านไป 1 ชั่วโมง จะทำการให้แรงดันภายในด้วยอัตราคงที่ประมาณ 10 kPa/min โดยแต่ละการเพิ่มขึ้นของแรงดันภายในจะบันทึกภาพถ่ายด้วย การทดสอบจะหยุดทดสอบเมื่อจุดที่สร้างขึ้นบนขงธรรมชาติมีการเคลื่อนที่ที่มากซึ่งเชื่อว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติไปแล้ว หลังจากนั้นก็จะนำภาพถ่ายมาวิเคราะห์ค่าความเครียดต่อไป

5.3 ผลการทดสอบ

หลังจากทดสอบเสร็จแล้วก็จะทำการถอดเครื่องมือออกโดยเริ่มจากแผ่นอะคริลิกเพื่อทำการถ่ายภาพและสังเกตการวิบัติที่เกิดขึ้นในบทความวิจัยนี้เลือกกรณีของ 1/4 แคบซูลของหินที่ไม่มีรอยเลื่อนมาแสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งเป็นกรณีของอัตราส่วนความเค้นในที่ (k) เท่ากับ 0.5 และความเค้นในแนวตั้ง (σ_v) เท่ากับ 12.5 kPa การทดสอบได้ให้แรงดันภายในจนตัวอย่างมีการเคลื่อนที่ที่มั่นใจว่าเกิดการวิบัติ ภาพถ่ายที่ระดับแรงดันต่างกันได้ถูกนำมาวิเคราะห์และแสดงผลในรูปแบบของการเลือกรูปดังรูปที่ 12ก-1, ก-2 และก-3 ความเครียดหลักดังรูปที่ 12 ข-1, ข-2 และข-3 ความเครียดเฉือนสูงสุดดังรูปที่ 12ค-1, ค-2 และค-3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้

ว่าระหว่างเพิ่มแรงดันภายในมีการรวมตัวของความเครียดเพิ่มขึ้นเป็นแถบ สำหรับกรณีนี้จะเห็นได้ว่าการรวมตัวของค่าความเครียดเกิดขึ้นชัดเจนบริเวณด้านบนของอุโมงค์มีทิศทางขึ้นผิวด้านบน รายละเอียดต่างๆของผลกรณีนี้แสดงใน [9] รวมถึงการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระบุว่า การวิบัติเกิดขึ้นภายใต้รูปแบบความเค้นดึง (Tensile failure) ไม่ใช่ความเค้นเฉือนอย่างที่คาดการณ์ไว้ก่อนหน้านี้ [8] จะเห็นได้ว่าการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนมีประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างใต้ดินใหม่ที่มีความเข้าใจยังไม่ชัดเจน เมื่อพิจารณาที่สถานะการวิบัติ รูปที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ร่วมกับภาพถ่ายของตัวอย่างหลังจากถอดชุดทดสอบของทั้งกรณี 1/4 แคบซูล (รูปที่ 13ก-1 และ ข-1) และอุโมงค์ (รูปที่ 13ก-2 และ ข-2) ที่วางตัวในหินที่ไม่มีรอยเลื่อนที่ k เท่ากับ 0.5 และ 3 กับ σ_v เท่ากับ 12.5 kPa จากผลการทดสอบพบว่าแนวการรวมตัวของค่าความเครียดเกิดขึ้นสอดคล้องกับแนวรอยแตกที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง นอกจากนี้แนวรอยแตกที่เกิดขึ้นมีลักษณะต่างกันตามค่า k แม้ว่ารูปทรงอุโมงค์จะลักษณะต่างกัน จะเห็นว่าการเทคนิคการติดตามผลตอบสนองด้วยภาพถ่ายทำให้สามารถจำแนกหรือระบุแนววิบัติที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะหากมีรอยแตกที่เกิดจากการถอนแรง (ดูรายละเอียดเพิ่มใน [10]) และช่วยให้สามารถขยายการใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในงานศึกษาต่อไปได้อย่างมั่นใจ [16]

(ก) กรณี 1/4 แคนซูล ไม่มีรอยเลื่อน



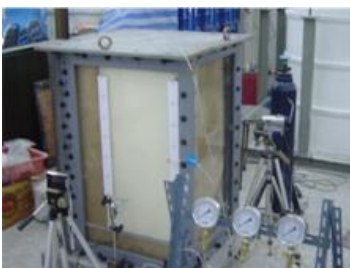
(ก-1)



(ก-2)



(ก-3)



(ก-4)

(ข) กรณี ครึ่ง แคนซูล มีรอยเลื่อน



(ข-1)



(ข-2)



(ข-3)



(ข-4)

(ค) กรณี อุโมงค์แนวราบของทั้ง มีรอยเลื่อนและไม่มีรอยเลื่อน



(ค-1)



(ค-2)



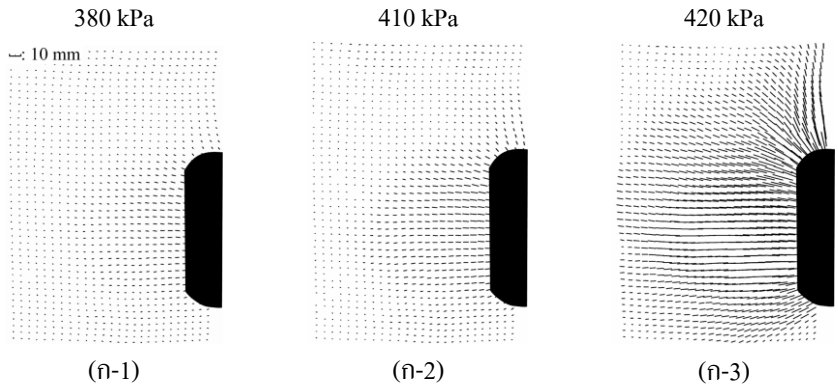
(ค-3)



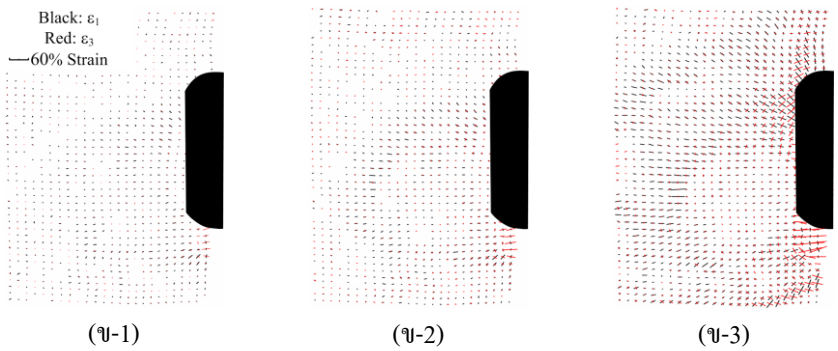
(ค-4)

รูปที่ 11 การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ สำหรับกรณี (ก) กรณี 1/4 แคนซูล ไม่มีรอยเลื่อน (ข) กรณี ครึ่ง แคนซูล มีรอยเลื่อน และ (ค) กรณี อุโมงค์แนวราบของทั้ง มีรอยเลื่อนและไม่มีรอยเลื่อน

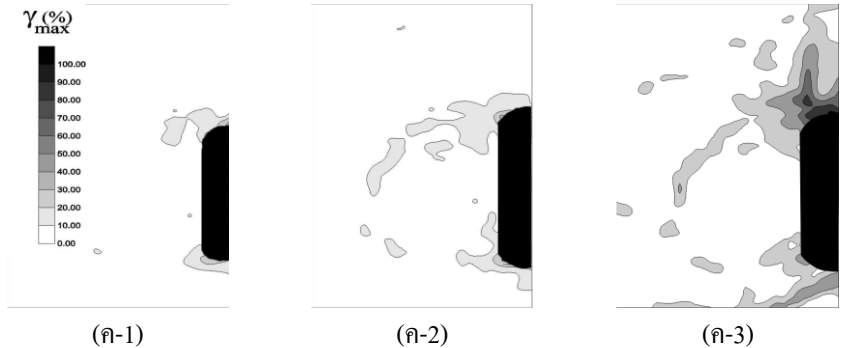
ก) การพัฒนาของการ
 เสี่ยงรูป (δ)



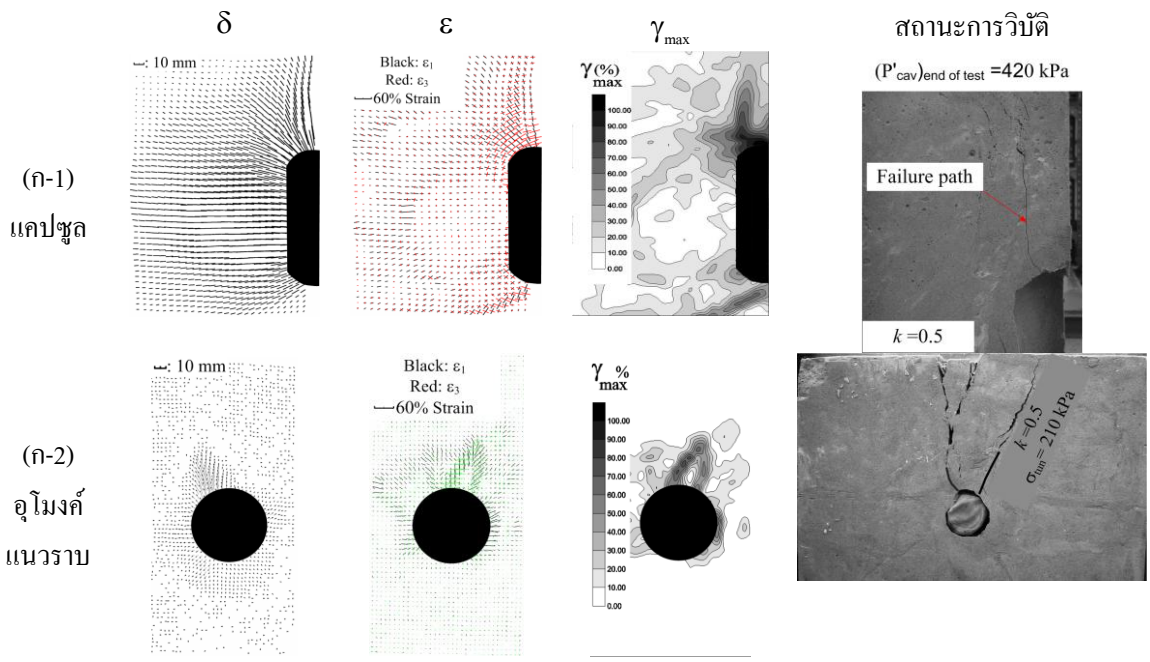
ข) ความเครียดหลัก (ϵ)



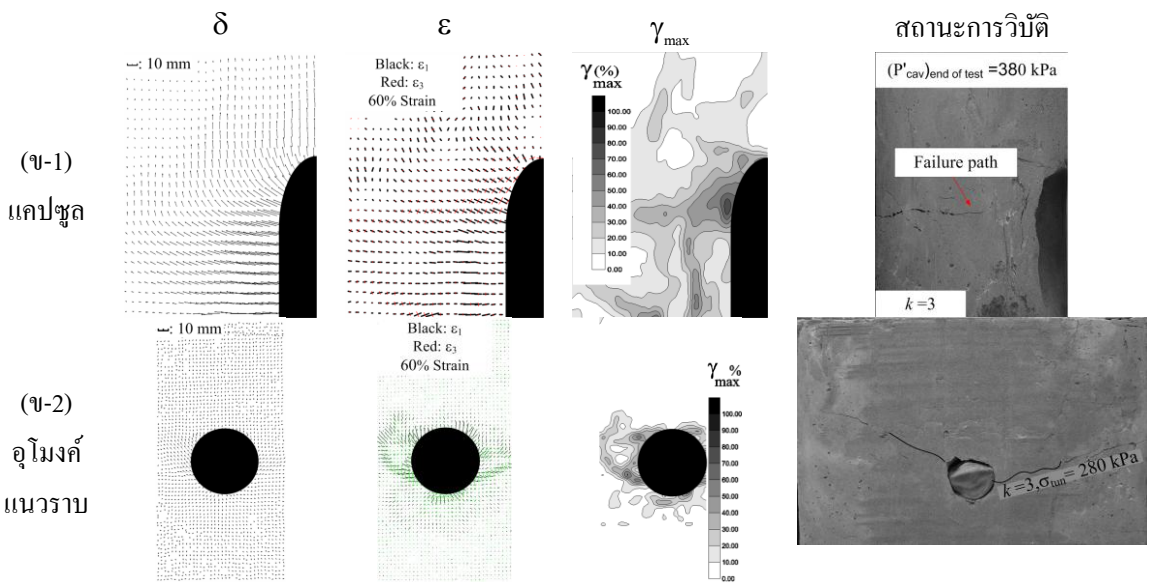
ค) ความเครียดเฉือน
 สูงสุด (γ_{max})



รูปที่ 12 ตัวอย่างของ ก) การพัฒนาของการเสี่ยงรูป ข) ความเครียดหลัก และ ค) ความเครียดเฉือนสูงสุด ของกรณี อัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ 0.5 และความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 12.5 kPa (ปรับปรุงจาก [10])



ก) $k=0.5$



ข) $k=3$

รูปที่ 13 ตัวอย่างความหนาแน่นของการเสียรูป (หลักที่1) ความเครียดหลัก (หลักที่2) ความเครียดเฉือนสูงสุด (หลักที่ 3) และภาพถ่ายการวิบัติ (หลักที่4) ที่สถานะการวิบัติด้วยอัตราส่วนความเค้นในที่เท่ากับ ก) 0.5 และ ข) 3 (พัฒนาจาก [10] และ [16])

6. สรุปผลและวิเคราะห์ผล

บทความนี้เสนอการพัฒนาเครื่องมือเพื่อทดสอบแบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วน เพื่อใช้ในการติดตามพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้นในมวลหินภายใต้แรงดันสูง ซึ่งได้นำเสนอ แนวคิด ข้อพิจารณา ในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ วิธีการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดสอบ รวมถึงเทคนิคต่างๆ ซึ่งสามารถทดสอบได้ครอบคลุมถึงหิน กรณีที่ลักษณะของอุโมงค์มีรูปร่างต่างกัน ลักษณะหินที่มีความต่อเนื่องแบบที่มีและไม่มีรอยแตกใก้ลอุโมงค์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของเครื่องมือชุดทดสอบนี้ ที่ช่วยให้

- 1) เข้าใจพฤติกรรมการวิบัติของมวลหินรอบถึงเก็บแก๊สใต้ดินความดันสูงที่เป็นโครงสร้างใต้ดินแบบใหม่
 - 2) ยืนยันปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการวิบัติดังกล่าว ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนความเค้นในที่
 - 3) ช่วยปรับเทียบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้พัฒนาขึ้นให้ใช้ศึกษาต่อไปในอนาคตได้อย่างมั่นใจขึ้น
- อย่างไรก็ตามเครื่องมือดังกล่าวยังมีจุดบกพร่องคือไม่สามารถควบคุมแรงดันด้านข้างให้มีค่าแปรเปลี่ยนตามความลึกของหิน แต่ก็เพียงพอที่จะสามารถนำไปตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขได้ ณ ปัจจุบัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 6002) และขอขอบคุณการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Jeon, J. Kim, Y. Seo, and C. Hong, “Effect of a Fault and Weak Plane on the Stability of a Tunnel in Rock - a Scaled Model Test and Numerical Analysis”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, 2004, pp. 1-6.
- [2] F. Huang, H. Zhu, Q. Xu, Y. Cai and X. Zhuang, “The Effect of Weak Interlayer on the Failure Pattern of Rock Mass around Tunnel Scaled Model Test and Numerical Analysis”, *Tunnelling and Underground Space Technology* 35, 2013, pp. 207- 218.
- [3] J. Johansson, “High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns-Cavern Wall Design Principles”, Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden. 2003.
- [4] L. Mansson, P. Marion, and J. Johansson, “Demonstration of the LRC Gas Storage Concept in Sweden”, *World Gas Conference, Amsterdam, Netherlands*, 2006, pp. 404-420.
- [5] Japan Gas Association, “Development of Advanced Natural Gas Storage Technology”, In: *Annual report* , 2008, pp. 3–9.
- [6] KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), “Development of Underground Energy Storage System in Lined Rock Cavern”, *Ministry of Knowledge Economy*, 2010, Seoul.

- [7] D. Park, H.M. Kim, D.W. Ryu, B.H. Choi and K.C. Han, “Probability-Based Structural Design of Lined Rock Caverns to Resist High Internal Gas Pressure”, *Engineering Geology* 153, 2013, pp. 144-151.
- [8] P. Jongpradist, P. Kanhasing and S.Youwai, “FEM Analysis for Stability Assessment Against Ground Uplift of High Pressure Gas Storage Cavern”, *Proceedings of the 1st SEATUC Symposium, The Twin Towers, Thailand, 2007*, pp. 74-79.
- [9] J. Tunsakul, P. Jongpradist, W. Kongkitkul, A. Wonglert, and S. Youwai, "Investigation of Failure Behavior of Continuous Rock Mass around Cavern under High Internal Pressure", *Tunnelling and Underground Space Technology* 34, 2013, pp. 110-123.
- [10] P. Jongpradist, J. Tunsakul, W. Kongkitkul, N. Fadsiri, G. Arangelovski and S.Youwai, “High Internal Pressure Induced Fracture Patterns in Rock Masses Surrounding Caverns: Experimental Study using Physical Model Tests”, *Engineering geology* 197, 2015, pp. 158- 171.
- [11] D.M. Wood, “Geotechnical Modeling”, Spon Press, 2004.
- [12] J. Tunsakul, “Investigation and Simulation of Failure in Rock Mass around High Pressure Gas Storage Caverns”, Ph.D. Thesis, Civil engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Thailand. 2013.
- [13] B. Indraratna, “Development and Application of a Synthetic Material to Simulate Soft Sedimentary Rocks”, *Geotechnique* 40, 1990, pp. 189–200.
- [14] W. Kongkitkul, “Effects of Material Viscous Properties on the Residual Deformation of Geosynthetic-Reinforced Sand”, Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Faculty of Engineering, the University of Tokyo, Japan. 2004.
- [15] F. Tatsuoka, F. Molenkamp, T. Torii and T. Hino, “Behavior of Lubrication Layers of Platens in Element Test”, *Soils and Foundations* 24, 1984, pp. 113–128.
- [16] J. Tunsakul, P. Jongpradist, P. Soparat, W. Kongkitkul, and P. Nanakorn, “Analysis of Fracture Propagation in a Rock Mass Surrounding a Tunnel under High Internal Pressure by the Element-Free Galerkin Method”, *Computers and Geotechnics* 55, 2014, pp. 78-90.