



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-30

รายงานการวิจัย

การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหิน ในสองแกน

(Design and Invention of Biaxial Loading Device
for Rock Specimens)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-30

รายงานการวิจัย

การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหิน ในสองแกน

(Design and Invention of Biaxial Loading Device
for Rock Specimens)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2556



บทคัดย่อ

อุปกรณ์ทดสอบตัวอย่างหินในสองแกนได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อหาค่าความแข็งและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินในสองแกน อุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับโครงทดสอบตัวอย่างหินที่มีใช้ทั่วไป ข้อกำหนดของการออกแบบที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรง ทนทาน ราคาถูก ง่ายต่อการใช้งาน และให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับโครงทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน คานส่งแรงกดสี่ชุดที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันใช้ส่งถ่ายแรงในแนวตั้งจากปลายด้านหนึ่งของคานมาเป็นแรงในแนวระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อกดตัวอย่างหินที่มีแท่นรองรับอยู่ แรงในแนวตั้งได้มาจากโครงทดสอบในแกนเดียวที่ใช้กันอยู่ทั่วไปพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวตั้งและแรงในแนวระนาบได้ถูกคำนวณโดยใช้เครื่องตรวจวัดแรงที่มีความแม่นยำสูงประกอบด้วยลูกเหล็กทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ติดมาตรวัดความเครียดไว้ โดยผลการสอบเทียบถูกนำมาใช้ในการหาค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในขณะที่แรงในแนวตั้งเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของคานส่งแรง ณ จุดต่างๆ ได้มีการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวในแนวระนาบของชุดหัวกดทั้งสี่ชุด เพื่อนำผลการทดสอบมาคำนวณหาความสัมพันธ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของตัวอย่างหิน การทดสอบทางกลศาสตร์ได้ถูกดำเนินการเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยการหาค่าความเค้นกดในแกนเดียว ค่าความเค้นกดในสองแกน ค่าสัมพันธ์ความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองของตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยตัวอย่างหินประกอบด้วย หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดภูกระดึง หินอ่อนชุดสระบุรี และเกลือหินชุดมหาสารคาม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินถูกตรวจวัดทั้งสามทิศทางหลักเพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยตัวอย่างหินทั้งหมดได้ถูกนำมาหา ค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นจากการทดสอบด้วยโครงทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับอุปกรณ์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ผลที่ได้ระบุว่าค่ากำลังกดในแกนเดียว กำลังกดในสองแกน และความยืดหยุ่นจากอุปกรณ์ทั้งสองชนิดใกล้เคียงกันมาก

Abstract

A uniaxial-to-biaxial load converter (UBC) has been developed to determine the biaxial compressive strength and deformability of rock specimens. The proposed device has been designed and fabricated to be compatible with most commercially available compression loading frames. The key design requirements are that it is rugged, inexpensive and easy to operate and can provide the results comparable to those of the conventional biaxial load frames. Four cantilever beams set in mutually perpendicular directions are used to transfer the vertical load on one end of the beams to two mutually perpendicular lateral loads on the rock specimen via vertical load platens. The vertical load on the UBC can be obtained from any conventional uniaxial load frame equipped with a hydraulic load cell. Calibration curves are developed to correlate the applied vertical load with the lateral loads by using a high precision electronic load cell and a reference cubical steel block mounted with two directional strain gages. The calibration results are used to calculate the lateral stresses applied on the specimen while the vertical load is increased. The vertical displacement of the cantilever beams at the point where the vertical load applied is also calibrated with the lateral movement (convergence) of the four loading platens. The results are used to calculate the elastic modulus and Poisson's ratio of the rock specimen. Series of mechanical tests have been carried out to assess the performance of the UBC by determining the uniaxial and biaxial compressive strengths, elastic modulus and Poisson's ratio of cubical rock specimens with nominal dimensions of $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. The specimens are prepared from Phra Wihan, Phu Phan and Phu Kradung sandstones, Saraburi marble and Maha Sarakham salt. The specimen deformations are monitored along the three principal directions to develop stress-strain curves from start loading until failure. The strengths and elastic parameters of these rocks are also determined by using a conventional biaxial load frame. Comparison of the results obtained from the UBC and the conventional biaxial load frame is made. The results indicate that the uniaxial and biaxial strengths and elastic parameters of all tested rocks obtained from the two devices are virtually identical.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหิน.....	9
2.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินในสองแกน.....	14
บทที่ 3 การออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงานของอุปกรณ์กดตัวอย่างหิน ในสองแกน.....	23
3.1 การออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	23
3.2 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	35
3.2.1 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของคาน ภายใต้สภาวะโมเมนต์ตัด.....	36
3.2.2 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของคานภายใต้สภาวะแรงกด.....	36
3.2.3 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของสลักเหล็กยึดคาน.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	39
4.1 วัตถุประสงค์.....	39
4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	39
บทที่ 5 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน	47
5.1 วัตถุประสงค์.....	47
5.2 ตัวอย่างหินที่นำมาใช้ทดสอบกับอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	47
5.3 ขนาดของตัวอย่างหิน.....	48
บทที่ 6 การทดสอบโดยใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	55
6.1 วัตถุประสงค์.....	55
6.2 วิธีการทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	55
บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	65
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	65
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	ก-1
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของวัสดุ Structural steel A36 (SS400).....	35
5.1 แร่องค์ประกอบหลักของหินทรายชุดโคราชที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	48
5.2 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินพระวิหารที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
5.3 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินภูพานที่ใช้ในการทดสอบ.....	51
5.4 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินภูกระดึงที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
5.5 ขนาดของตัวอย่างหินอ่อนชุดสระบุรีที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
5.6 ขนาดของตัวอย่างเกลือหินชุดมหาสารคามที่ใช้ในการทดสอบ.....	54
6.1 ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและค่ากำลังกดสูงสุดในสองแกนทดสอบด้วย อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนและโครงกดทดสอบแบบมาตรฐาน.....	58
6.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองจากการทดสอบกำลังกดสูงสุดใน แกนเดียวและกำลังกดสูงสุดในสองแกนด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน และโครงกดทดสอบแบบมาตรฐาน.....	59

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แบบดั้งเดิม ในแกนเดียวและในสามแกน.....	2
1.2	สภาวะความเค้นในสองแกนที่เกิดขึ้นบนผนังอุโมงค์และที่เสนอในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้.....	2
2.1	ผลการทดสอบหิน Shirahama sandstone โดยนำมาลงจุดด้วยเกณฑ์ของ Modified Wiebols and Cook.....	11
2.2	แผนภาพของระบบทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริงของ Haimson and Chang (2000).....	13
2.3	ผลการทดสอบหิน Dunham dolomite ของ Haimson และ Chang (2000) โดยแสดง ในรูปของความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักกลาง.....	13
2.4	เครื่องกดในสองแกนที่ใช้ในการศึกษา.....	15
2.5	การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ.....	16
2.6	การจำลองชุดรอยแตกในมวลหินด้วยลูกปืนขนาดเล็ก โดยแปรผันมุมเอียงของ ชุดรอยแตกตั้งแต่ 0° ถึง 90°.....	17
2.7	รายละเอียดของการทดสอบแรงกดในสองแกนจริงของ Kalatilake (2006).....	18
2.8	เครื่องมือและระบบการบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและ การทดสอบแรงกดในสองแกน.....	18
2.9	รูปแบบโครงโดยทั่วไปที่ใช้ในการทำ Jointed specimens.....	19
2.10	การแตกแบบ Tensile spitting และการแตกในระนาบ $\sigma_1 - \sigma_2$	19
2.11	อิทธิพลของความเค้นหลักกลางต่อค่าความแข็งของหิน Westerly granite.....	20
2.12	ตัวอย่างเกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินแกรนิต.....	21
3.1	ภาพเปอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	25
3.2	ด้านหน้าของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	25
3.3	ด้านบนของการออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	26
3.4	ภาพตัดขวางรายละเอียดการออกแบบเสาส่งแรง.....	27
3.5	รายละเอียดการออกแบบเสาส่งแรง.....	28
3.6	รายละเอียดการออกแบบตัวยึดชุดแทนกดกับเสาส่งแรง.....	29
3.7	รายละเอียดการออกแบบชุดแทนกดอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน.....	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8	รายละเอียดการออกแบบส่วนประกอบของชุดหัวกด (ด้านซ้าย-ขวา).....	31
3.9	รายละเอียดการออกแบบส่วนประกอบของชุดหัวกด (กลาง).....	32
3.10	รายละเอียดการออกแบบคานส่งแรง.....	33
3.11	รายละเอียดการออกแบบสลักกีตระหว่างชุดหัวกดกับคานส่งแรง.....	34
3.12	รายละเอียดการออกแบบสลักกีตระหว่างเสาส่งแรงกับคานส่งแรง.....	35
4.1	ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนแสดงแนวคิด ในการออกแบบและทิศทางการให้แรงกดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกน.....	40
4.2	ภาพเปอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ทำการออกแบบโดยใช้ โปรแกรม Solidworks.....	40
4.3	อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนในขณะกดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกน โดย ได้นำมาประยุกต์ใช้กับโครงกดทดสอบในแกนเดียวทั่วไป.....	41
4.4	การสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน โดยใช้โครงกดทดสอบทั่วไป ในแกนเดียว.....	42
4.5	มาตรวัดความเครียดที่ติดกับเหล็กทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์.....	42
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแกนเดียวจากอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน กับแรงในแกนเดียวจากโครงกดทดสอบในแกนเดียวแบบมาตรฐาน.....	43
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงในสองแกนจากอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน กับแรงในสองแกนจากโครงกดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน.....	44
4.8	แผนผังภาพวัตถุอิสระที่ใช้ในการคำนวณแรงของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	44
4.9	อัตราส่วนระหว่างแรงในแนวระนาบต่อแรงในแนวตั้งต่อการผันแปรมุมของคาน ส่งแรง.....	45
5.1	ตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ทั้ง 5 ชนิด.....	48
5.2	เครื่องตัดหินทราย Model ZE-LG3-570A tile cutter และตัวอย่างหินทราย ที่ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ.....	49
5.3	แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าให้มีรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเท่ากับ 54×54×54 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อทดสอบกับอุปกรณ์กดทดสอบหินในสองแกน	49
6.1	โครงกดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษา.....	56

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 ภาพตัดขวางด้านบนของโครงกตทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน.....	56
6.3 ค่ากำลังกตในแกนเดียวของตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ที่ทดสอบด้วยโครงกตทดสอบ ในแกนเดียวแบบมาตรฐาน และทดสอบด้วยอุปกรณ์กตตัวอย่างหินในสองแกนที่ ประดิษฐ์ขึ้น.....	57
6.4 ค่ากำลังกตในแกนเดียวของตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ที่ทดสอบด้วยโครงกตทดสอบ ในสองแกนแบบมาตรฐาน และทดสอบด้วยอุปกรณ์กตตัวอย่างหินในสองแกนที่ ประดิษฐ์ขึ้น.....	57
6.5 ตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด หลังการทดสอบ.....	58
6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกต ในแกนเดียวด้วยอุปกรณ์กตทดสอบแบบมาตรฐาน.....	60
6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกต ในแกนเดียวด้วยอุปกรณ์กตทดสอบแบบใหม่.....	61
6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกต ในสองแกนด้วยอุปกรณ์กตทดสอบแบบมาตรฐาน.....	62
6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกต ในสองแกนด้วยอุปกรณ์กตทดสอบแบบใหม่.....	63

บทที่ 1

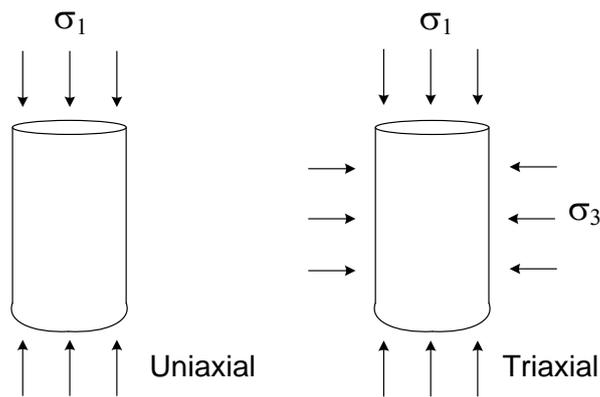
บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

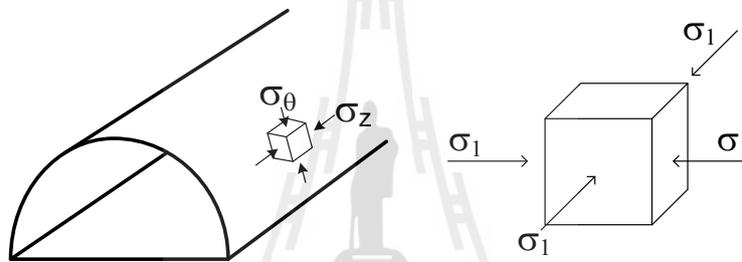
วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความเค้นกดของหินนิยมนำมาดำเนินการ 2 วิธี คือ การทดสอบแรงกดในแกนเดียว และการทดสอบแรงกดในสามแกน (ASTM D7012-10) วิธีแรกดำเนินการเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของหินในภาคสนามที่อยู่ในระดับตื้น ส่วนวิธีที่สองดำเนินการเพื่อหาค่ากำลังกดของหินที่อยู่ในระดับลึก วิธีนี้มีการให้ความดันล้อมรอบต่อตัวอย่างหินเพื่อจำลองสภาวะความเค้นในภาคสนามในระดับลึก (รูปที่ 1.1) ทั้งสองวิธีจะใช้ตัวอย่างหินที่เป็นรูปทรงกระบอกที่ได้จากภาคสนาม อย่างไรก็ตามการทดสอบทั้งสองวิธีไม่สามารถจำลองสภาวะแวดล้อมของหินในภาคสนามได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหินที่อยู่รอบผนังอุโมงค์หรือโพรงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิศวกรรมธรณีในลักษณะต่างๆ เพราะหินที่อยู่รอบผนังโครงสร้างเหล่านี้จะอยู่ภายใต้ความเค้นในสองแกน (สองทิศทาง) ที่มีค่าสูง (รูปที่ 1.2) การนำผลที่ได้จากการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและในสามแกนมาใช้ในการประเมินเสถียรภาพและออกแบบจึงไม่สมจริงและไม่เหมาะสมสำหรับหินรอบผนังโครงสร้างเหล่านี้ ดังนั้นตามหลักการแล้วจึงควรนำผลการทดสอบกำลังกดในสองแกนเข้ามาประยุกต์ใช้สำหรับหินที่อยู่บนผนังอุโมงค์ดังกล่าว

เนื่องจากอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงกดในสองแกนมีราคาแพงและหายาก อีกทั้งวิธีการทดสอบก็มีความซับซ้อน มีสถาบันวิจัยในต่างประเทศ 4-5 แห่ง เท่านั้นที่สามารถทดสอบหรือจำลองความเค้นกดในสองแกนบนตัวอย่างหินได้ และยังไม่มียุติมาตรฐานของ ASTM ที่ได้กำหนดกระบวนการการทดสอบไว้ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบและวิจัยในต่างประเทศระบุว่าเกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงกดในสองแกนจะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงกดในสามแกน ดังนั้น การสร้างเกณฑ์การแตกของหินที่อยู่รอบผนังโพรงหรืออุโมงค์ควรพัฒนามาจากผลการทดสอบหินภายใต้แรงกดในสองแกน เพราะถ้านำผลจากการกดในสามแกนมาประยุกต์ใช้จะส่งผลให้การประเมินเสถียรภาพและการออกแบบไม่เป็นในเชิงอนุรักษ์

ปัจจุบันประเทศไทยมีโครงสร้างอุโมงค์และโพรงที่อยู่ในมวลหินใต้ดินมากมาย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจำลองและทดสอบหินภายใต้แรงกดในสองแกนเพื่อประเมินเสถียรภาพของหินบนผนังโครงสร้างดังกล่าว แต่การสั่งซื้อหรือนำเข้าอุปกรณ์ทดสอบที่มีราคาแพงหลายล้านบาทจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ใหม่ที่มีราคาถูก ทนทาน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการทดสอบทั่วไปที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกสถาบันอุดมศึกษาและองค์กรภาครัฐที่ดำเนินงานเกี่ยวกับวิศวกรรมโยธาและธรณี



รูปที่ 1.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แบบดั้งเดิม ในแกนเดียว (ซ้าย) และในสามแกน (ขวา)



รูปที่ 1.2 สภาวะความเค้นในสองแกนที่เกิดขึ้นบนผนังอุโมงค์ (ซ้าย) และที่เสนอในการทดสอบในงานวิจัยนี้ (ขวา)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนเพื่อใช้จำลองสภาพของหินภายใต้ความเค้นกดในสองแกน (Biaxial compression loading) โดยใช้แนวคิดใหม่สำหรับกลไกการกดเพื่อให้มีราคาถูกลง แม่นยำ และมีความสอดคล้องกับสภาวะความเค้นจริงในภาคสนามซึ่งจะมีราคาถูกลงกว่าอุปกรณ์ปัจจุบันที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ
- 2) เพื่อให้อุปกรณ์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้และได้รับการยอมรับในวงกว้างในหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่มีกิจกรรมเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน อุโมงค์ ตัดถนน ฐานราก และเหมืองบนดินและใต้ดิน เป็นต้น ผลที่ได้จากการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นนวัตกรรมใหม่แล้วยังเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบหินในเชิงสร้างสรรค์โดยมีความสามารถในการกดด้วยแรงและทิศทางที่สมบูรณ์ในสองแกน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินในความเค้นสองแกนเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
- 3) อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนจะใช้กลไกเชิงกลศาสตร์เพื่อให้ความเค้นที่คงที่ในระดับต่างๆ โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าและระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
- 4) อุปกรณ์ใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนจะให้แรงกดสูงสุดไม่ต่ำกว่า 1200 psi
- 5) การออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนได้ใช้โปรแกรม Solidworks ในทุกองค์ประกอบของอุปกรณ์
- 6) มีการสาธิตความสามารถและประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน
- 7) หินที่คัดเลือกเพื่อใช้เป็นตัวอย่างทดสอบมี 5 ชนิด ที่มีความแตกต่างในเชิงคุณสมบัติทางกลศาสตร์
- 8) มีการเขียนคู่มือการใช้อุปกรณ์อย่างละเอียดและเป็นขั้นตอนโดยมีรูปภาพประกอบ
- 9) มีการจดสิทธิบัตรอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน
- 10) มีการเผยแพร่เทคโนโลยีโดยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และวิธีการทดสอบแรงกดสูงสุดในสองแกน วิธีการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน โดยทุกประเด็นจะนำมาศึกษาและค้นคว้าหาข้อสรุปเพื่อที่จะได้รู้ว่าการวิจัยที่คล้ายคลึงกันจะมีประโยชน์อย่างไรต่องานวิจัยที่นำเสนอ โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้ได้นำมาแสดงอย่างละเอียดในหัวข้อบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน

อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนมีส่วนประกอบหลักต่างๆ คือ โครงรับแรงกด (Frame) คานกดตัวอย่างหินในแต่ละทิศทาง และชุดหัวกดให้แรง โดยการออกแบบได้ใช้โปรแกรมสร้างแบบทางคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) สร้างเป็นแบบขึ้นมา ทุกชิ้นส่วนได้คำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of safety) ที่อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

ข้อกำหนด (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ

- สามารถรับแรงกดสูงสุดด้านข้าง (σ_2) ไม่ต่ำกว่า 10 MPa (สำหรับหินรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
- สามารถตรวจการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินได้
- วัสดุทำจากโลหะแข็งที่ไม่มีการยุบตัวที่แรงกดสูง
- สามารถให้แรงกดคงที่ในระดับต่างๆ ได้โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าและระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
- สามารถทดสอบตัวอย่างหินรูปทรงลูกบาศก์ขนาดตั้งแต่ 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึง 50×50×100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนตาม การออกแบบ

การสร้างอุปกรณ์ทดสอบต้นแบบตามข้อกำหนดทั้งหมดในขั้นตอนที่ 3 ได้ดำเนินการสร้างในห้องปฏิบัติการ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิศวกรเป็นผู้ดูแลและควบคุมการสร้างอย่างถูกต้อง แม่นยำ และปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 4 การสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน

อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ดำเนินการสอบเทียบ (Calibration) โดยใช้เครื่องตรวจวัดแรงกด (Load cell) ที่มีความละเอียดสูงในการตรวจวัดแรงกดทั้งสองแกนเพื่อให้ได้ค่าแรงกดที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งผลที่ได้จากการสอบเทียบนั้นนำมาสร้างแผนภูมิหลักเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเค้นและการเปลี่ยนรูปร่างที่อยู่บนตัวอย่างหินในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 5 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมตัวอย่างหินเพื่อนำมาทดสอบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์และสาคิอุปกรณ์ดังกล่าวว่าสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม โดยได้ทำการคัดเลือกตัวอย่างหินมาใช้ในการทดสอบแบบต่างๆ โดยอาศัยหลักการให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด (Homogeneous) หินที่เก็บมาเป็นตัวอย่างคือหินทรายชุดโคราช และหินปูนชุดสระบุรี ตัวอย่างหินได้ถูกนำมาเจาะและตัดให้ผิวเรียบในห้องทดลองที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบแต่ละชนิด โดยมีขนาดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 40 ตัวอย่าง ต่อหิน 1 ชนิด การจัดเตรียมตัวอย่างหินจะอาศัยมาตรฐานที่มีอยู่ของ ASTM standards ตัวอย่างหินที่เตรียมได้เหล่านี้จะนำมาทดสอบในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อสาคิตความสามารถของ อุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน

การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM standards การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเค้นกดสูงสุดในสองแกน ที่มีผลต่อคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ค่าอัตราส่วน Poisson's ของตัวอย่างหินได้ถูกทดสอบอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง นอกจากนั้นได้มีการทดสอบแรงกดในแกนเดียว เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการกดในสองแกนโดยมีการใช้ตัวอย่างหินจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง สำหรับหินแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 ได้ถูกนำมาตรวจสอบทางด้านความเชื่อถือได้ (Reliability) ของข้อมูลและตรวจสอบทางด้านความสัมพันธ์ทางสถิติ หลังจากการตรวจสอบได้มีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ในแต่ละการทดสอบ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้เคยทดสอบไว้แล้วโดยผู้วิจัยเอง การวิเคราะห์ได้เน้นไปที่ประสิทธิภาพ ขีดความสามารถ และความแม่นยำของอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกน เพื่อให้ได้เกณฑ์การแตกที่อยู่ในเชิงอนุรักษณ์และเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของหินที่เป็นผนังโพรงหรืออุโมงค์

ขั้นตอนที่ 8 การเขียนคู่มือสำหรับการใช้งาน

มีการเขียนคู่มือการใช้งานอุปกรณ์เพื่อใช้กวดตัวอย่างหินในสองแกนอย่างละเอียด รวมถึงไปถึงส่วน ประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ทดสอบ ความสามารถ ข้อจำกัด ขั้นตอน วิธีการทดสอบ วิธีการประมวลผล การคำนวณ รวมไปถึงฐานข้อมูลของผลการทดสอบที่ได้ทดสอบไปแล้วทั้งในและต่างประเทศ

ขั้นตอนที่ 9 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปถูกนำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

อุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่วางขายตามท้องตลาดในราคาที่เท่ากัน อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่จะมีความแม่นยำกว่า ทำให้หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหรือสนใจสามารถเป็นเจ้าของเพื่อใช้ในการทดสอบได้โดยง่ายและใช้งบประมาณน้อย

2) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

อุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้นมาในงานวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบหินในหลายรูปแบบ โดยมีปัจจัยของความเค้นด้านข้างที่เท่ากันและไม่เท่ากันเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับความเค้นจริงในภาคสนาม ซึ่งสามารถทดสอบพฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินภายใต้ความเค้นกดที่ซับซ้อน ส่งผลให้เป็นจุดกำเนิดของงานวิจัยอย่างต่อเนื่องในอนาคต

3) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน จะมีการจัดอบรมหลักสูตรระยะสั้นเพื่อเผยแพร่หลักการ วิธีการใช้งาน และการนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบแบบต่างๆ รวมไปถึงหน่วยงานราชการ เช่น กรมชลประทาน กรมทางหลวง กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงบริษัทน้ำมันทั้งในและต่างประเทศ และสถาบันการศึกษาที่มีความสนใจ

ด้านกลศาสตร์หิน เช่น สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่จะสามารถนำอุปกรณ์นี้ไปใช้ในหน่วยงานเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไปอย่างเป็นรูปธรรม

4) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เผยแพร่หลักการ วิธีการทดสอบหินด้วยอุปกรณ์เพื่อใช้ทดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้นมา รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการทดสอบอื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบของความเค้นด้านข้าง ซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับความเค้นในภาคสนาม รวมถึงการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น หน่วยงานที่สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ประโยชน์ได้จริง ได้แก่ บริษัทน้ำมัน และบริษัทที่ปรึกษาด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมต่างๆ

5) นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

อุปกรณ์ทดตัวอย่างหินในสองแกนที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นจะนำไปสู่การจดสิทธิบัตรและจำหน่ายให้หน่วยงานต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเพื่อนำไปใช้เป็นประโยชน์และสามารถจำหน่ายแก่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศได้

6) สร้างนักวิจัยใหม่

ในการศึกษานี้ได้สร้างนักวิจัยระดับปริญญาโทใหม่เพิ่มขึ้น 2 คน ซึ่งจะสร้างความสามารถและความคุ้นเคยในการทำวิจัย และจะเป็นนักวิจัยที่มีความสามารถและประสบการณ์มากขึ้นสำหรับการทำวิจัยในเรื่องอื่นๆ ต่อไป

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ

- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมปิโตรเลียม และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน

หน่วยงานภาคเอกชน อาทิ ผู้ประกอบการด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเหมืองแร่ และ วิศวกรรมปิโตรเลียม



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะสรุปผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของรูปแบบการทดสอบที่เป็นจุดเด่นของอุปกรณ์ทดสอบในสองและสามแกน งานวิจัยต่อไปนี้เป็นงานวิจัยบางชิ้นที่ดำเนินการโดยนักวิจัยในต่างประเทศซึ่งประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินและการทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินในสองแกนดังนี้

2.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหิน

Wiebols and Cook (1968) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลาง (σ_2) ของค่าความเค้นของหินบนพื้นฐานของผลการทดสอบก่อนหน้านั้น และได้พิจารณารูปแบบของค่าความเค้นหลักรอง (σ_3) มีค่าคงที่ และค่าความเค้นหลักกลางเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าความเค้นหลักรอง ($\sigma_2 = \sigma_3$) ถึง ($\sigma_2 = \sigma_1$) ซึ่งค่าความเค้นเริ่มแรกมีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดของค่าความเค้นหลักกลาง (σ_2) จากนั้นลดลงเป็นลำดับในการทดสอบความเค้นในสามแกน ($\sigma_2 = \sigma_3$)

Sibai et. al. (1997) กล่าวว่า ในการทดสอบทั่วไปการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่ได้จากการทดสอบไฮดรอลิกแฟรคเจอร์ริง (Hydraulic fracturing test) เพื่อนำไปหาความดันที่จุดแตก (Breakdown pressure, P_c) ความดันเพื่อขยายรอยแตก (Fracture reopening pressure, P_r) และความดันที่จุดปิด (Shut-in pressure, P_s) ซึ่งค่าความดันทั้ง 3 ค่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเค้นในที่ (In-situ stress) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ใช้เครื่องทดสอบแบบสามแกนจริงกับตัวอย่างหินแกรนิต ($E = 60 \text{ GPa}$, $\nu = 0.17$, 0.1% porosity, $\sigma_c = 4 \text{ MPa}$) ขนาด $50 \times 50 \times 50$ เซนติเมตร และติดตั้งเครื่องวัดความดัน (Straddle packer) ในรูที่เจาะไว้ในแท่งตัวอย่างหินซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ LVDT เข้ากับ Packer เพื่อวัดการหดตัวของรูเจาะและความกว้างของรอยแตกในขณะที่กำลังทดสอบอัดความดัน (Pressurized test) และ Closure test ในการทดสอบได้แปรผันค่าความดันด้านข้าง และมีการบันทึกค่าความดันจาก Packer ระยะห่างระหว่าง Packer ช่วงของความดันที่ใช้ในการทดสอบ และอัตราการไหลตลอดการทดสอบ ผลสรุปของการศึกษานี้คือความดันเพื่อขยายรอยแตกที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการค่าความดันทั้ง 3 ค่า ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหิน และผลจากการทดสอบพบว่าความเค้นรอบรูเจาะมีความสอดคล้องกับที่คำนวณได้จากสมการของ Kirsch (Kirsch solution)

Song และ Haimson (1997) ได้จำลองหลุมเจาะขึ้นมาในตัวอย่างหินทรายและหินแกรนิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการแตกของหินในหลุมเจาะ (Borehole breakout) และความเค้น โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกดในสามแกนจริง โดยใช้ข้อสมมติฐานที่ว่าสถานะความเค้นที่ขอบเขตรอยแตกของผนังหลุมเจาะมีค่าความแข็งที่เท่ากัน กฎเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ไม่สามารถนำมาใช้ได้ในการพิจารณาการแตกของหลุมเจาะ ซึ่งกฎเกณฑ์ของแรงกดในสามแกนจริงจะสามารถใช้ได้ดีกว่าเนื่องจากผลของ σ_2 มีความเหมาะสมต่อขอบเขตของการแตก เช่น กฎเกณฑ์ของ (1) Nadai ใช้สำหรับหินทราย และ (2) Mogi ใช้สำหรับหินแกรนิต

$$\tau_{\text{oct}} = f_1(\sigma_{\text{oct}}) \quad (2.1)$$

เมื่อ $\tau_{\text{oct}} = 1/3[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$
และ $\sigma_{\text{oct}} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

โดยที่ f_1 คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ

$$\tau_{\text{oct}} = f_2(\sigma_2^m) \quad (2.2)$$

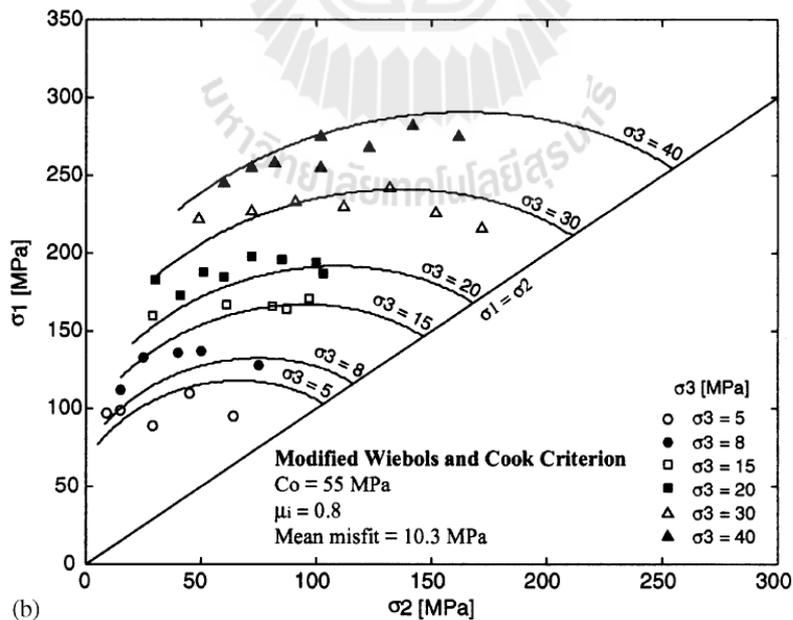
เมื่อ $\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$

โดยที่ f_2 คือ ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นทางคณิตศาสตร์ขึ้นกับชนิดหิน การวิเคราะห์แผ่นหินบาง (Thin section) มีบทบาทสำคัญต่อกลไกทางกลศาสตร์ของการแตก และค่าความแข็งขึ้นกับชนิดของหิน

Wawersik et al (1997) ได้ทำการทดสอบเชิงกลศาสตร์ภายใต้สถานะความเค้นปกติ และ Arbitrary stress path ซึ่งมีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของหิน และระบบทางธรณีวิทยาที่ซับซ้อน การทดสอบเชิงกลศาสตร์ภายใต้สถานะความเค้นจริงในสามมิติมีความจำเป็นในการประเมินสมมติฐานและพัฒนาทฤษฎีสำหรับปรากฏการณ์ เช่น ความเครียดเฉือน (Shear strain) ของรอยเลื่อนทางธรณี ผลที่ได้นำไปสู่ความสัมพันธ์ของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริงที่ใช้เปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดแบบดั้งเดิม และข้อดีที่พบในเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริงที่สามารถรับความเค้นรอบข้างที่แตกต่างกันทั้งสามทิศทางได้ และที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous)

Colmenares and Zoback (2002) ได้ทำการศึกษา 7 กฎเกณฑ์การแตกที่นิยมใช้ในการคาดการณ์ผลการทดสอบในปัจจุบันของหินที่ต่างกัน 5 ชนิด และได้ทำการหาค่าความผิดพลาดจากการฟิตข้อมูล เพื่ออธิบายแต่ละกฎเกณฑ์การแตก โดยกฎเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook (รูปที่ 2.1) and Modified Lade เป็นกฎเกณฑ์ที่ฟิตข้อมูลได้ดี เนื่องจากมีการตระหนักถึงค่าของความเค้นหลักกลาง ซึ่งปรากฏในหินต้นแฮม Dolomite และ Solenhofen limestone อย่างไรก็ตามสำหรับหินบางชนิด เช่น Shirahama sandstone และ Yuubari shale ไม่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของการแตก ซึ่งกฎเกณฑ์ Mohr–Coulomb and Hoek and Brown ก็ทำการฟิตข้อมูลได้ดีเช่นกัน ส่วนกฎเกณฑ์ Drucker–Prager ไม่สามารถทำการประเมินจุดแตกของหินได้อย่างถูกต้อง เกณฑ์ของ Mogi 1967 and Mogi 1971 เกิดจากการหาค่าการกดในสามแกนแบบดั้งเดิมและค่าการกดในสามแกนจริง ข้อเสียของกฎเกณฑ์นี้คือไม่มีการนำค่าการกดในแกนเดียวมาใช้ในการพิจารณา

Kwasniewski et al. (2003) ได้ใช้แท่งกระบอกตัวอย่างหินทรายขนาดเม็ดกลางภายใต้การให้แรงกดในแกนเดียว การให้แรงกดในสามแกนแบบธรรมดา และสภาวะการให้แรงกดในสามแกนจริง ผลการทดสอบพบว่าค่าความดันล้อมรอบไม่สามารถทำให้ตัวอย่างหินเกิดการขยายตัวภายใต้สภาวะกดในสามแกน ซึ่งค่าลบของความเครียดเชิงปริมาตรมีความสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของความเค้นกลางสูงสุด

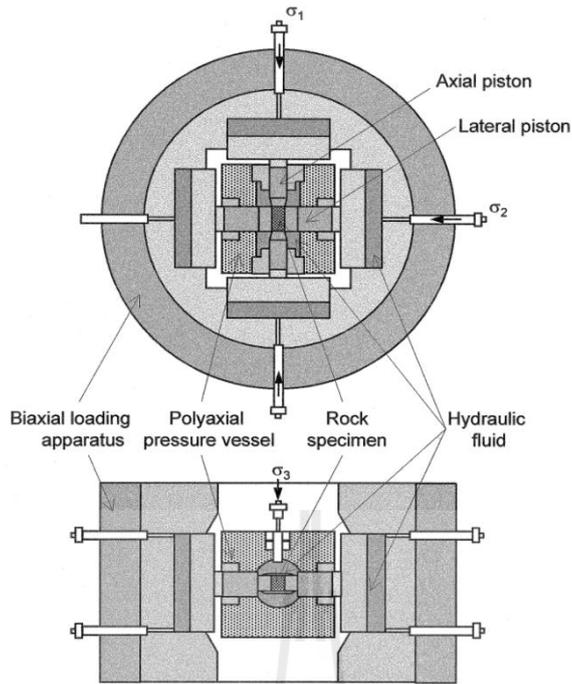


รูปที่ 2.1 ผลการทดสอบหิน Shirahama sandstone โดยนำมาลงจุดด้วยเกณฑ์ของ Modified Wiebols and Cook (Colmenares and Zoback, 2002)

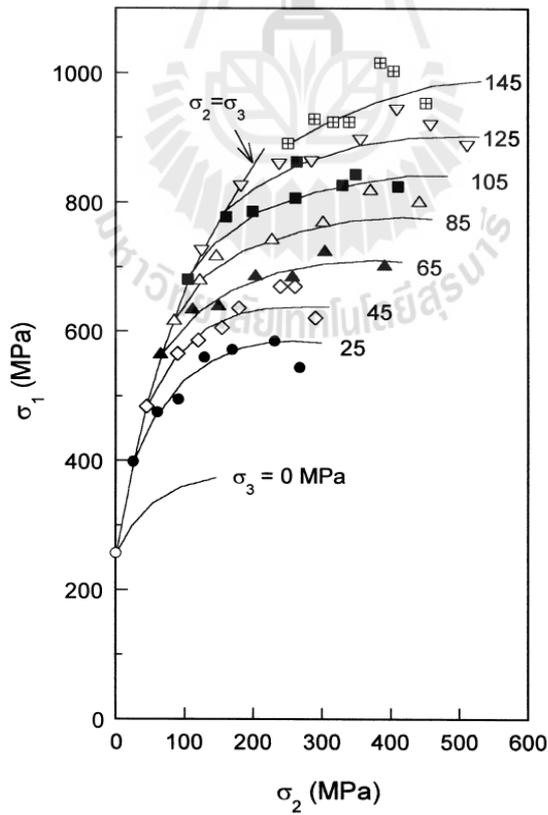
Alexeev et al. (2004) ศึกษาเครื่องมือกดในสามแกนจริงและการนำไปใช้ทำนายการระเบิดออกของถ่านหิน ซึ่งเครื่องมือกดในสามแกนจริง (True triaxial loading, TTAL) มี 2 รุ่นคือ เครื่องมือรุ่นแรกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบความเค้นในสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหิน เครื่องมือรุ่นที่สองได้มีการพัฒนาให้สามารถตรวจวัดความเค้นได้แม่นยำขึ้นและสามารถจำลองการระเบิดออกของหินอย่างทันทีทันใดได้ เครื่องมือทั้งสองรุ่นนี้สามารถเพิ่มความดันได้ 250 MPa ในสามแกนอย่างเป็นอิสระ สอดคล้องกับความลึกใต้พื้นโลกประมาณ 10,000 เมตร ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำและอิทธิพลของก๊าซมีเทนในถ่านหินที่มีผลกระทบต่อการใช้งานการระเบิดออกของถ่านหิน

Chang และ Haimson (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกของหินภายใต้ความดันในสามแกนจริง โดยทำการทดสอบค่าความแข็งของหินฮอร์นเฟล และหินเมตาไพไรต์ ที่ความลึก 2,025 ถึง 2,996 เมตร ของแนวเทือกเขาแคลเดอร์ลาในรัฐแคลิฟอร์เนียประเทศสหรัฐอเมริกา หินทั้งสองชนิดมีลักษณะแบบชั้น (Banded) และมีค่าความซึมผ่านต่ำมาก การทดสอบความต้านทานแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression tests) โดยให้แนวการวางตัวของลักษณะแบบชั้นของหินแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหินฮอร์นเฟลมีค่าความแข็งเท่ากันในทุกทิศทาง (Isotropic) และหินเมตาไพไรต์มีความไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropic) การทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial compression tests) แสดงให้เห็นว่าความแข็งของหินทั้งสองชนิดในแต่ละแนวการวางตัวของลักษณะแบบชั้นเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงต่อความดันโดยรอบ การทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริง (True triaxial compression tests) ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีมุมแนวการวางตัวของลักษณะแบบชั้นคงที่ และค่าความเค้นหลัก (σ_1) ความเค้นกลาง (σ_2) และความเค้นรอง (σ_3) มีค่าแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มค่า σ_1 อย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างหินแตก ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่แตกต่างกันของหินสองชนิดภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน และค่า σ_3 จะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของหินเมื่อไม่คำนึงถึงค่า σ_2 การวัดค่าความเครียด (Strain) ในแนวแรงกดทั้งสามแกนสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ต่อค่า σ_1 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่ในเชิงเส้นตรง

Haimson (2006) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลางบนรอยแตกเปราะของหิน (รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3) และกฎเกณฑ์การแตกอื่นๆ ผลที่ได้ อธิบายถึง 3 กลไกการแตก คือ (1) อิทธิพลของอัตราการกด (2) ประเภทของหิน และ (3) การแตกเฉือน



รูปที่ 2.2 แผนภาพของระบบทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริงของ Haimson and Chang (2000)



รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบหิน Dunham dolomite ของ Haimson และ Chang (2000) โดยแสดงในรูปของความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักกลาง

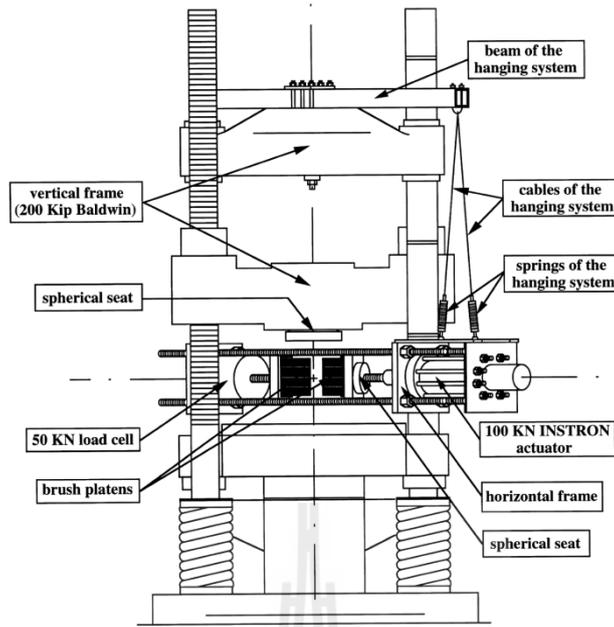
Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนา Polyaxial load frame เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดและกำลังแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับการทดสอบหินทรายสามชนิดภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็น Transversely isotropic โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ Bedding plane สัดส่วนของค่า Poisson's บนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากทิศทางขนานกับ Bedding plane ผลจากการทดสอบแรงดึงแบบ Brazillian ภายใต้แรงกดในแกนเดียวได้มีผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน

Sriapai et al. (2011) ได้ใช้ Polyaxial load frame เพื่อหาค่ากำลังกดในสามแกนจริงของเกลือหินชุดมหาสารคราม โดยใช้กฎเกณฑ์การแตกของ Coulomb และ Modified Wiebols and Cook ทำการทำนายผลการทดสอบ อยู่ในรูปของความเค้นเบี่ยงเบนและค่าความเค้นหลักกลาง โดยกฎเกณฑ์ Modified Wiebols and Cook สามารถอธิบายการแตกได้ดีกว่ากฎเกณฑ์ของ Coulomb ในสภาวะแรงกด แต่เมื่ออยู่ในสภาวะแรงดึง กฎเกณฑ์ของ Coulomb ทำนายผลได้สูงกว่าการทดสอบ 20% แต่กฎเกณฑ์ Modified Wiebols and Cook ไม่สามารถอธิบายการแตกแบบแรงดึงได้

2.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินในสองแกน

Bobet and Einstein (1998) ได้อธิบายความสัมพันธ์ของการแตกที่มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของวัสดุชนิดเปราะ โดยได้มีการตรวจวัดในตัวอย่างหินยิปซัมซึ่งใช้เป็นวัสดุในการทดสอบการกดแบบแกนเดียวและสองแกน เครื่องกดในสองแกนได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา โดยเครื่องกดให้แรงสูงสุดที่ 100 kN และ 50 kN (รูปที่ 2.4) โดยใช้ Baldwin oil pump ในการให้แรงดันด้านข้างและมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงด้วยคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ที่ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา โดยตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีการแตก 2 แบบ คือ การแตกโดยแรงดึงและการแตกโดยแรงเฉือน

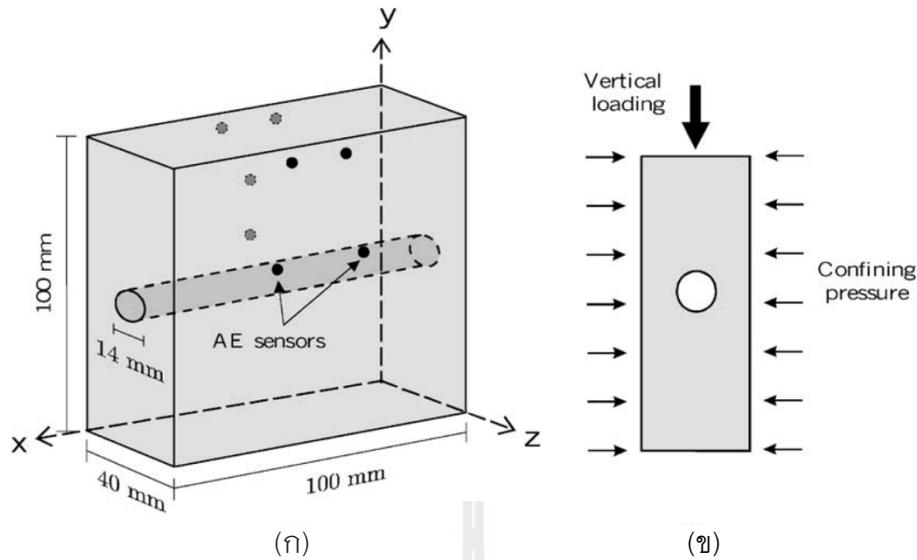
Alsayed (2002) ได้สร้างตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกกลวงซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบในการจำลองสภาวะความเค้นที่อยู่รอบๆ อุโมงค์ใต้ดินเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุทางธรณีที่อยู่ภายใต้การผันแปรแนวความเค้น ตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกกลวงได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทดสอบ Conventional triaxial cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Hoek และ Franklin ในปี 1968 และส่วนประกอบของ Internal pressure loading ที่ถูกออกแบบเป็นพิเศษ ตัวอย่างหินทรายที่ Springwell ภายใต้การทดสอบ Uniaxial, Biaxial, Triaxial และ Polyaxial compression ซึ่งให้ผลคล้ายกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม ผลลัพธ์ยืนยันถึงผลกระทบของ σ_2 ของหินที่แตกและแสดงให้เห็นสภาวะความ-



รูปที่ 2.4 เครื่องกดในสองแกนที่ใช้ในการศึกษา (Bobet and Einstein, 1988)

เค้นที่กำหนดอันส่งผลกระทบกับความแข็งแรงของหิน เครื่องมือนี้มีเป้าหมายเพื่อที่จะช่วยสร้างระบบทั่วไปในการกดทดสอบหลายแกนซึ่งมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงในการทำนายพฤติกรรมที่แท้จริงของหินและเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

Fakhimi et al. (2002) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างหินทรายขนาด $40 \times 100 \times 100$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่เจาะรูจนทะลุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร โดยให้ความเค้นใน 2 ทิศทาง (รูปที่ 2.5) แรงดันด้านข้างมีขนาดเท่ากับ 7.5 MPa เพื่อจำลองพฤติกรรมการวิบัติของหินรอบอุโมงค์ที่หินมีคุณสมบัติเป็นหินเปราะ (Brittle rock) ในการทดสอบได้มีการบันทึกขนาดของแรงกดในแนวแกนและการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินทั้งในแนวแกนและด้านข้างจนเกิดการวิบัติ และได้มีการตรวจหารอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหินด้วยเทคนิคคลื่นเสียง (Acoustic emission technique) ผลที่ได้ระบุว่ารอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างของอุโมงค์และแพร่กระจายทำมุมเฉียงออกไปทั้งสองข้าง ซึ่งรอยแตกขนาดเล็กนี้จะรวมตัวกันเป็นรอยแตกแบบเฉือน (Shear fracture) ในที่สุด และมีการเคลื่อนตัวของหินบริเวณผนังด้านข้างของอุโมงค์เข้ามาในอุโมงค์ด้วย ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้มีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม Particle Flow Code (PFC^{2D}) เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของหินและการวิบัติรอบอุโมงค์ โดยแบบจำลองดังกล่าวสร้างจาก Element รูปวงกลมขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของหินได้อาศัยแรงเสียดทานและแรงดึงดูดระหว่าง Element ค่าคงที่สำหรับใส่ให้กับโปรแกรมได้แก่ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

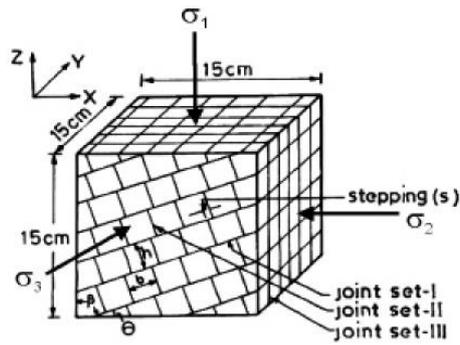


รูปที่ 2.5 การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ (ก) รูปร่างของตัวอย่างและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรอยแตกขนาดเล็ก (ข) ลักษณะและทิศทางของแรงที่กระทำบนตัวอย่าง (Fakhimi et al., 2002)

อัตราส่วนของบัวซอง และความเค้นสูงสุดในการกดแกนเดียวได้จากการสอบเทียบจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้ผลที่สอดคล้องกันกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Sahouryeh et al. (2002) ได้อธิบายการทดลองและการวิเคราะห์รอยแตกในสามมิติภายใต้การกดในสองแกน โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน รวมถึงตัวอย่างเรซินโปร่งใส รอยแตกที่เกิดขึ้นขนานไปกับทิศทางการให้แรง โดยสามารถสังเกตพฤติกรรมได้อย่างชัดเจนภายใต้การให้แรงในแกนเดียว โดยมีการจำกัดรอยแตกที่เกิดขึ้น ซึ่งการเพิ่มของค่าความเค้นหลักกลางทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแตกเกิดขึ้น

Tiwari and Rao (2004) ได้ศึกษาพฤติกรรมของมวลหินภายใต้ความเค้นสามแกนจริง โดยการนำเอาก้อนอิฐบล็อกหรือลูกปูนขนาดเล็ก ($\sigma_c = 13.5 \text{ MPa}$) มาเรียงกันให้เป็นแท่งตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากับ 15 เซนติเมตร เพื่อจำลองเสมือนว่าเป็นมวลหินจริง ตัวอย่างถูกสร้างขึ้นมาให้มีมุมเอียงของระนาบรอยแตก (รอยแตกชุดที่ 1) ซึ่งวัดเทียบกับแนวระนาบพื้นแปรตั้งแต่ 0° ถึง 90° (รูปที่ 2.6) โดยเครื่องทดสอบในสามแกนจริงที่ใช้ถูกสร้างโดย Rao and Tiwari (2002) ผลการทดสอบระบุว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุด (309.2%) เมื่อระนาบของรอยแตกเอียง 60° ($\theta = 60^\circ$) และต่ำสุด (24.2%) เมื่อระนาบเอียงทำมุม 90° ($\theta = 90^\circ$) จากการเพิ่มขนาดของความเค้นกลาง (σ_2) ในทิศทางการเอียงตัวของระนาบรอยแตกชุดที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์



$$\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$$

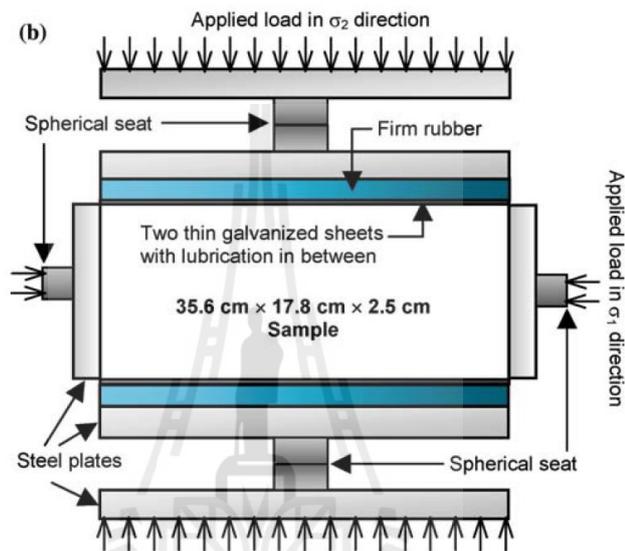
$$s = 0, 0.25, 0.50, 0.75 \text{ of 'b'}$$

รูปที่ 2.6 การจำลองชุดรอยแตกในมวลหินด้วยลูกปุ่นขนาดเล็ก โดยแปรผันมุมเอียงของชุดรอยแตกตั้งแต่ 0° ถึง 90° (Tiwari and Rao, 2004)

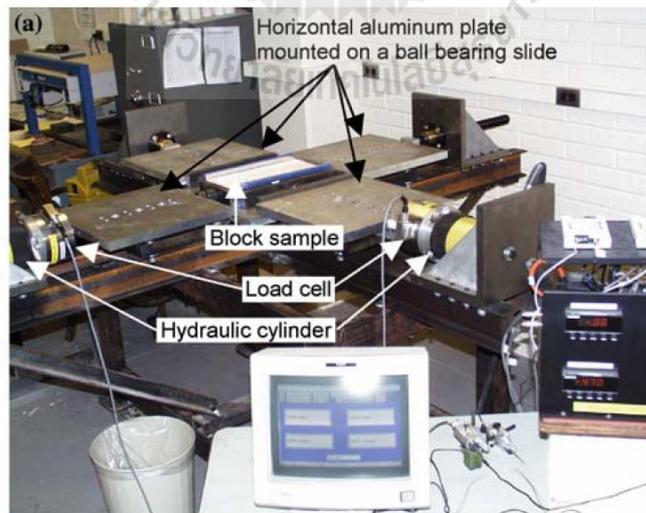
ความยืดหยุ่น (E_j) และกำลังต้านทานแรงกดในแกนหลักเพิ่มขึ้น ตัวอย่างส่วนมากจะมีการวิบัติในรูปแบบของการเคลื่อนตัวผ่านระนาบรอยแตกที่จำลองขึ้น ส่วนผลกระทบจากการจัดเรียงลูกปุ่นในรูปแบบอื่น (เพื่อจำลองการเกิดการยึดเหนี่ยวในรูปแบบที่ต่างกัน) และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของความเค้นกลางและความเค้นรองต่อความแข็งนั้นยังมีการศึกษาน้อยและยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด

Zhu et al. (2005) ได้ทำการจำลองรอยแตกรอบการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินภายใต้สภาวะความเค้นในสองแกน โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ RFA (Rock Failure Process Analysis) ซึ่งจะรวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าคุณสมบัติความแข็งของมวลหิน ในแบบจำลองเชิงตัวเลขของมวลหินได้มีการตระหนักถึงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของ Weibull ที่ซึ่งการกระจายตัวของตัวแปรดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม อีกคุณสมบัติของแบบจำลองนี้คือยังไม่ได้มีการตั้งสมมุติฐานภายใต้การวิบัติที่เกิดขึ้น ซึ่งรอยแตกอาจจะเกิดขึ้นอย่างเป็นธรรมชาติ และสามารถแสดงถึงความหลากหลายของกลไกการรวมความเค้นได้ คุณสมบัติที่ต่างกันเหล่านี้ได้ทำให้ความสามารถในกระบวนการจำลอง RFA ได้พิจารณาถึงกระบวนการเกิดรอยแตกแรกเริ่ม การขยายตัวและรวมตัวของรอยแตกรอบการขุดเจาะภายใต้สภาวะความเค้นที่หลากหลาย RFA ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์นี้เพื่อจำลองกระบวนการเกิดขึ้นของรอยแตกที่เกิดขึ้นสามแบบคือ แบบรูปวงกลม แบบรูปวงรีและแบบส่วนกลับรูปตัวยู ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการจำลองด้วยวิธีดังกล่าวนี้ นอกจากจะใช้ได้กับรูปแบบของรอยแตกที่ได้กล่าวถึงแล้วยังสามารถทำการทำนายรูปแบบของรอยแตกที่จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความเค้นที่หลากหลายได้อีกด้วย โดยรูปแบบของรอยแตกและกลไกของการวิบัติได้ถูกแสดงภายใต้สภาวะแรงกดที่หลากหลายได้

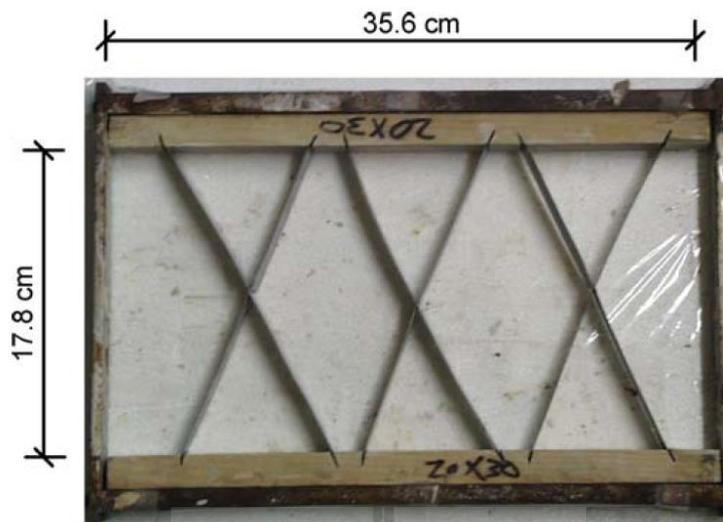
Kulatilake et al. (2006) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อเกณฑ์การแตกใหม่ของมวลหิน ภายใต้สภาวะแรงกดในสองแกน เพื่อหาสภาวะการแตกและค่าความแข็งของหินที่ถูกทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังกดในแกนเดียวและค่ากำลังกดในสองแกน (รูปที่ 2.7 ถึงรูปที่ 2.10) เกณฑ์การแตกของหินได้ถูกแสดงในรูปแบบสามมิติ โดยผลการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิด คือแบบ Intact model และแบบ Jointed model ได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเกณฑ์การแตกในมวลหินที่เป็นแบบ non-linear ภายใต้สภาวะแรงกดในสองแกน



รูปที่ 2.7 รายละเอียดของการทดสอบแรงกดในสองแกนจริงของ Kalatilake et al. (2006)



รูปที่ 2.8 เครื่องมือและระบบการบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบแรงกดในสองแกน (Kalatilake et al., 2006)



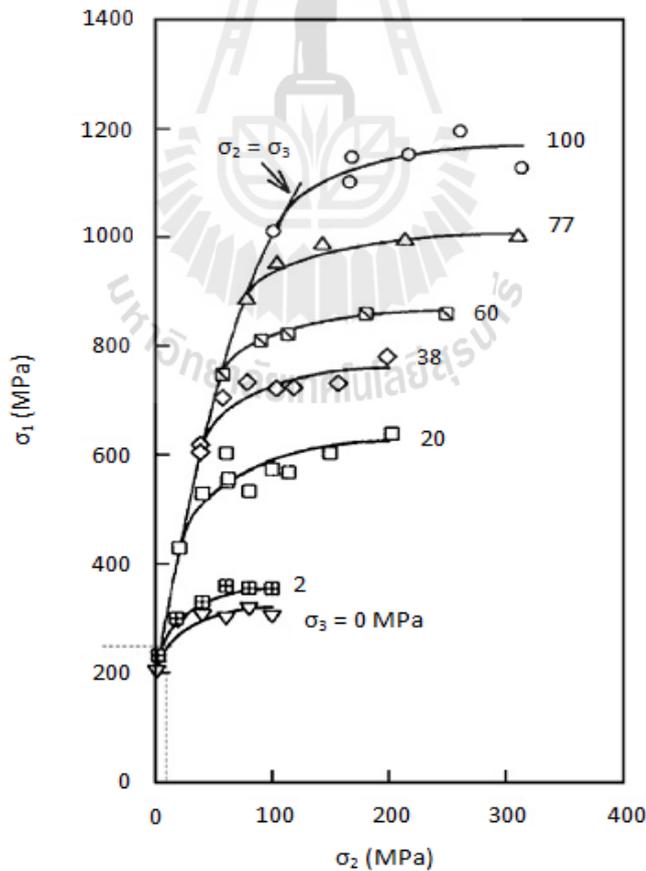
รูปที่ 2.9 รูปแบบโครงขึงโดยทั่วไปที่ใช้ในการทำ Jointed specimens (Kalatilake et al., 2006)



รูปที่ 2.10 การแตกแบบ Tensile spitting และการแตกในระนาบ $\sigma_1 - \sigma_2$
(Kalatilake et al., 2006)

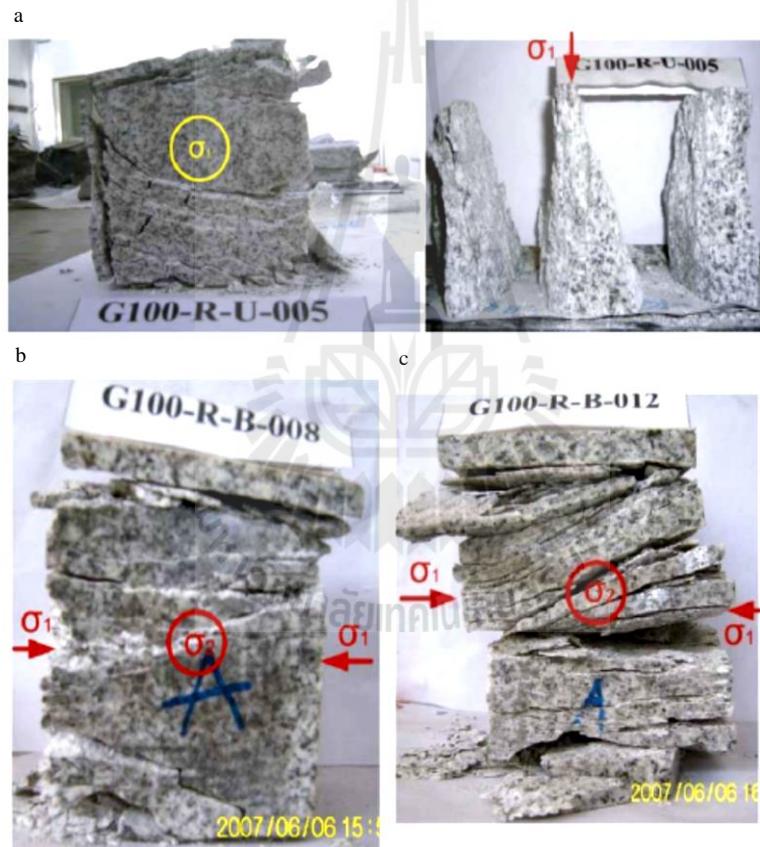
Tiwari and Rao (2006) ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพในการทดสอบการกดสามแกน และการกดทดสอบในสามแกนจริงของมวลหินที่จะถูกนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้น ตัวอย่างหินประกอบด้วยรอยแตกที่ต่อเนื่องจำนวน 3 ชุด ที่ได้เตรียมมาจาก Block ของแบบจำลองวัสดุ Sand lime การทดสอบได้ใช้ระบบกดทดสอบในสามแกนจริง (TTS) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (Strain hardening) ความเครียดที่ลดลง (Strain softening) และพฤติกรรมเชิงพลาสติกของมวลหินที่ถูกจำลองซึ่งขึ้นกับรูปร่างเชิงเรขาคณิตของรอยแตกและสภาวะความเค้น

Cai (2008) ได้ทำการศึกษาความเค้นหลักกลางในรอยแตกของหินและค่าความแข็งของหินที่อยู่ใกล้ขอบเขตอุโมงค์ด้วย FEM / DEM โดยสภาวะแรง $\sigma_3 = 0$, σ_1 และ $\sigma_2 \neq 0$ ที่บริเวณผนังอุโมงค์ (รูปที่ 2.11) เมื่อ σ_1 คือค่าความเค้นหลักสูงสุด σ_2 คือค่าความเค้นหลักกลาง และ σ_3 คือค่าความเค้นหลักรอง การศึกษาเชิงตัวเลขจะขึ้นอยู่กับการทดสอบแรงกดบนตัวอย่างหินที่เป็นไปตามสภาวะของความเค้นและยังพบว่าความเค้นหลักกลางมีข้อจำกัดที่มีอิทธิพลกับค่าความแข็งสูงสุดของหินที่อยู่บริเวณการขุดเจาะอุโมงค์



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของความเค้นหลักกลางต่อค่าความแข็งของหิน Westerly granite (Cai, 2008)

Yun et al. (2010) ได้อธิบายการทดสอบในสองแกนของหินแกรนิตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 75, 100 และ 125 มิลลิเมตร ได้ทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบในสองแกนที่ได้พัฒนาขึ้น โดยมีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 500 เมตริกตัน ในแต่ละทิศทาง และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ วัดการเปลี่ยนแปลงของแรงและรูปร่าง โดยใช้อัตราการกดที่ 1.25 และ 125 kN/s และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงระหว่าง 4–30 $\mu\text{m/s}$ โดยเกณฑ์การแตกของหิน (รูปที่ 2.12) ซึ่ง กฎเกณฑ์การแตกในสองแกนทั้ง Mohr–Coulomb และ Hoek–Brown ไม่ได้มีการตระหนักถึง ผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลาง สามารถสรุปได้ว่ากฎเกณฑ์การแตกทั้งสองนั้นไม่ เหมาะสมกับสภาวะความเค้นในสองแกน (Biaxial loading condition) และสภาวะความเค้นในแนว ราบ (Plane stress)



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินแกรนิต (a) แรงกดในแกนเดียว (b) แรงกดในสองแกน Path1 (c) แรงกดในสองแกน Path2 (Yun et al., 2010)

บทที่ 3

การออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงาน ของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

อุปกรณ์สำหรับกดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกนมีส่วนประกอบหลัก คือ โครงรับแรงกด (Frame) คานกดตัวอย่างหินในแต่ละทิศทาง และชุดหัวกดให้แรง โดยการออกแบบได้ใช้โปรแกรมสร้างแบบทางคอมพิวเตอร์ (Solidworks) เครื่องกดทดสอบในสองแกนได้มีการคำนวณหาค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

ข้อกำหนด (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ

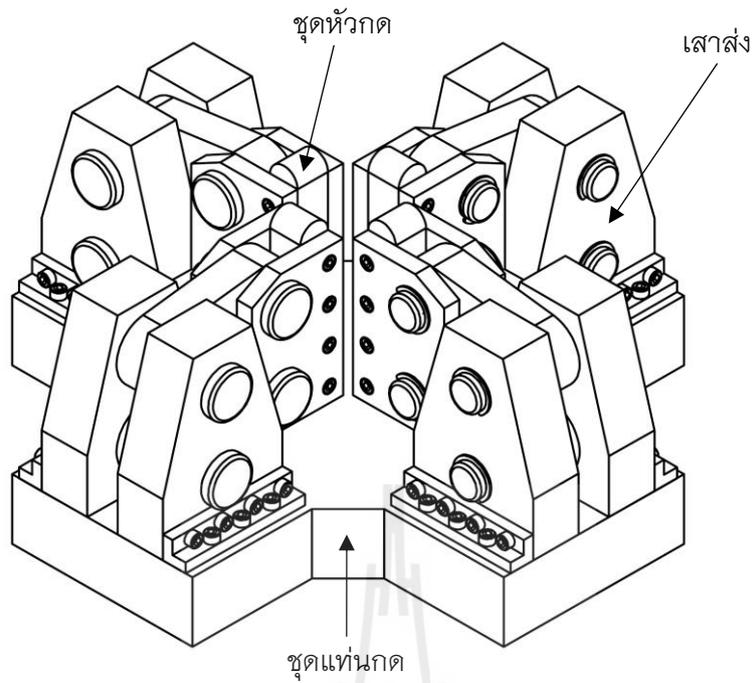
- สามารถรับแรงสูงสุดด้านข้าง (σ_2, σ_3) ไม่ต่ำกว่า 10 MPa (สำหรับตัวอย่างหินหน้าตัด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
- สามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินได้
- วัสดุทำจากโลหะแข็งที่ไม่มีการยุบตัวที่แรงกดสูง
- สามารถให้แรงกดคงที่ในระดับต่างๆ ได้โดยไม่ใช้ไฟฟ้าและระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
- สามารถทดสอบตัวอย่างหินตั้งแต่ขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึงขนาด 50×50×100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

3.1 การออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

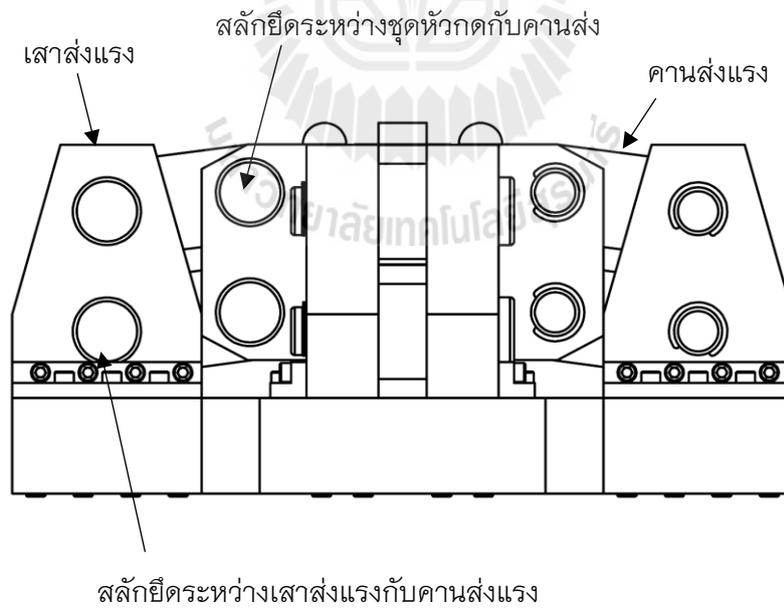
การออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนมีกลไกการถ่ายแรงกดในทิศทางเดียวที่อยู่ในแนวตั้งจากโครงกดทดสอบที่มีอยู่ทั่วไป ให้แรงในแนวตั้งมาอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันในแนวระนาบ อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนนี้ถูกออกแบบโดยอาศัยหลักกลศาสตร์แบบคานงัด โดยที่ตัวอย่างหินจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า แรงในแนวระนาบที่ให้จะอยู่ด้านข้างทั้งสี่ด้านของตัวอย่างหิน ส่วนในแนวตั้งจะไม่มีแรงกดบนตัวอย่างหิน เพื่อให้เกิดแรงกดในสภาวะสองทิศทางในแนวระนาบ การออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนจะใส่ตัวอย่างหินไว้ที่จุดกึ่งกลางของหัวกดให้แรง ในขณะที่ทดสอบจะใส่อุปกรณ์และตัวอย่างหินไว้ในโครงกดทดสอบ เมื่อให้แรงด้านบนและด้านล่างต่ออุปกรณ์ตัวอย่างหิน แรงดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงในแนวระนาบสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน เมื่อแรงกดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นแรงในแนวระนาบก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน ซึ่งสัดส่วนนี้ถูกกำหนดโดยมุมและระยะของคานกด โดยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนจะใช้โลหะที่มีความแข็งแรงสูงและสามารถกดหินทั่วไปให้แตก

ได้ การเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินทั้งสี่ทิศทางสามารถตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่ให้แรงกดโดยใช้มาตรวัดการยุบตัวติดเข้ากับหัวกดบนผิวตัวอย่างหินทั้งสี่ทิศทาง

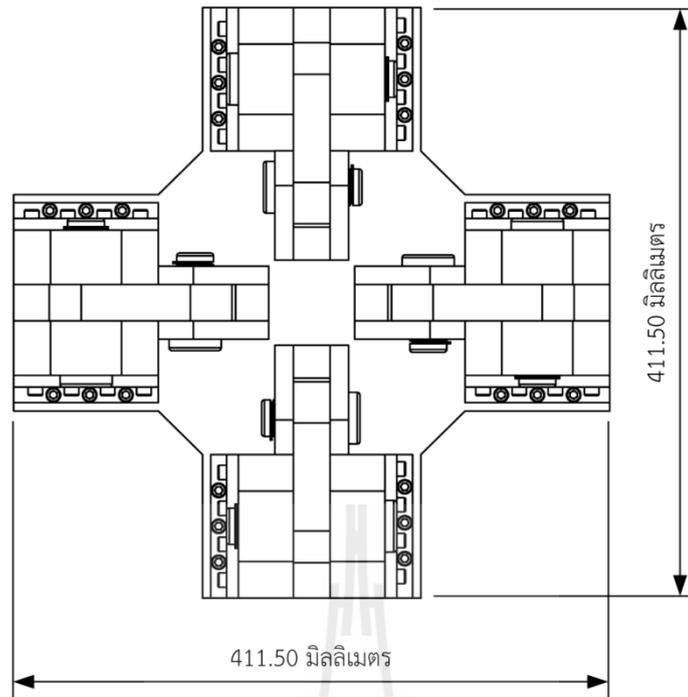
อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนมีความสมมาตรทั้งด้านบน-ด้านล่าง ด้านหน้า-ด้านหลัง และด้านซ้าย-ด้านขวา กล่าวคือ สามารถให้แรงกดในสองแกนที่สามารถปรับระดับแรงกดได้หลากหลาย ซึ่งอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนดังกล่าวนี้เป็นกลไกในการกดตัวอย่างหินในสองแกนทางด้านข้างที่ต้องการให้มีแรงกดคงที่อย่างแท้จริง ซึ่งในแต่ละทิศทางอาจมีแรงเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ได้เสนอนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก มีความแข็งแรง ทนทาน สะดวกในการบำรุงรักษา และสามารถให้แรงกดตัวอย่างหินได้อย่างคงที่และสม่ำเสมอโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนประกอบด้วยชุดแท่นกดที่ยึดติดกับเสาส่งแรงกดที่ถูกจัดวางให้ตั้งฉากกับชุดแท่นกดทั้งสี่ด้านเพื่อทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงไปยังคานส่งแรง คานส่งแรงจะถ่ายแรงไปยังชุดหัวกดที่ประกบอยู่กับตัวอย่างหินทั้งสี่ทิศทาง โดยสามารถหาผลกระทบบของหินภายใต้การทดสอบสภาวะความเค้นในสองแกน (Biaxial creep testing) การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของหินในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength testing) และการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของหินในสองแกน (Biaxial compressive strength testing) รูปที่ 3.1 แสดงภาพเปอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนประกอบด้วยชุดหัวกด เสาส่งแรง และชุดแท่นกดของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน เนื่องจากการออกแบบมีความสมมาตรกันทั้งสี่ด้าน คือ ด้านหน้า-ด้านหลัง และด้านซ้าย-ด้านขวา รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านหน้าของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประกอบด้วยคานส่งแรง สลักยึดระหว่างชุดหัวกดกับคานส่งแรง เสาส่งแรง และสลักยึดระหว่างเสาส่งแรงกับคานส่งแรง โดยคานส่งแรงทำหน้าที่ถ่ายแรงไปยังชุดหัวกด รูปที่ 3.3 แสดงภาพด้านบนของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน โดยชุดแท่นกดของอุปกรณ์มีขนาดเท่ากับ 411.5×411.5 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร รูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางเสาส่งแรงประกอบด้วยรูสำหรับใส่สลักยึดระหว่างเสาส่งแรงกับคานส่งแรงจำนวน 2 รู ด้านใต้ของเสาส่งแรงประกอบด้วยรูยึดระหว่างเสาส่งแรงกับชุดแท่นกดของอุปกรณ์จำนวน 8 รู รูปที่ 3.5 แสดงภาพด้านหน้าของเสาส่งแรงประกอบด้วยรูด้านหน้าของเสาส่งแรงจำนวน 4 รู เพื่อยึดประกบกับตัวยึดเสาส่งแรงกับส่วนฐาน รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดตัวยึดชุดแท่นกดกับเสาส่งแรง ด้านบนมี 3 รู สำหรับยึดชุดแท่นกดทดสอบและด้านข้างมี 4 รู สำหรับยึดเสาส่งแรง รูปที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของชุดแท่นกดของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน ประกอบด้วยภาพตัดขวางของชุดแท่นกดมีความหนาเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร รูปที่ 3.8 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบของชุดหัวกด (ด้านซ้าย-ขวา) ประกอบด้วยรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู ทางด้านซ้ายสำหรับใส่สลักยึดชุดหัวกด



รูปที่ 3.1 ภาพเปอร์สเปกทีฟของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

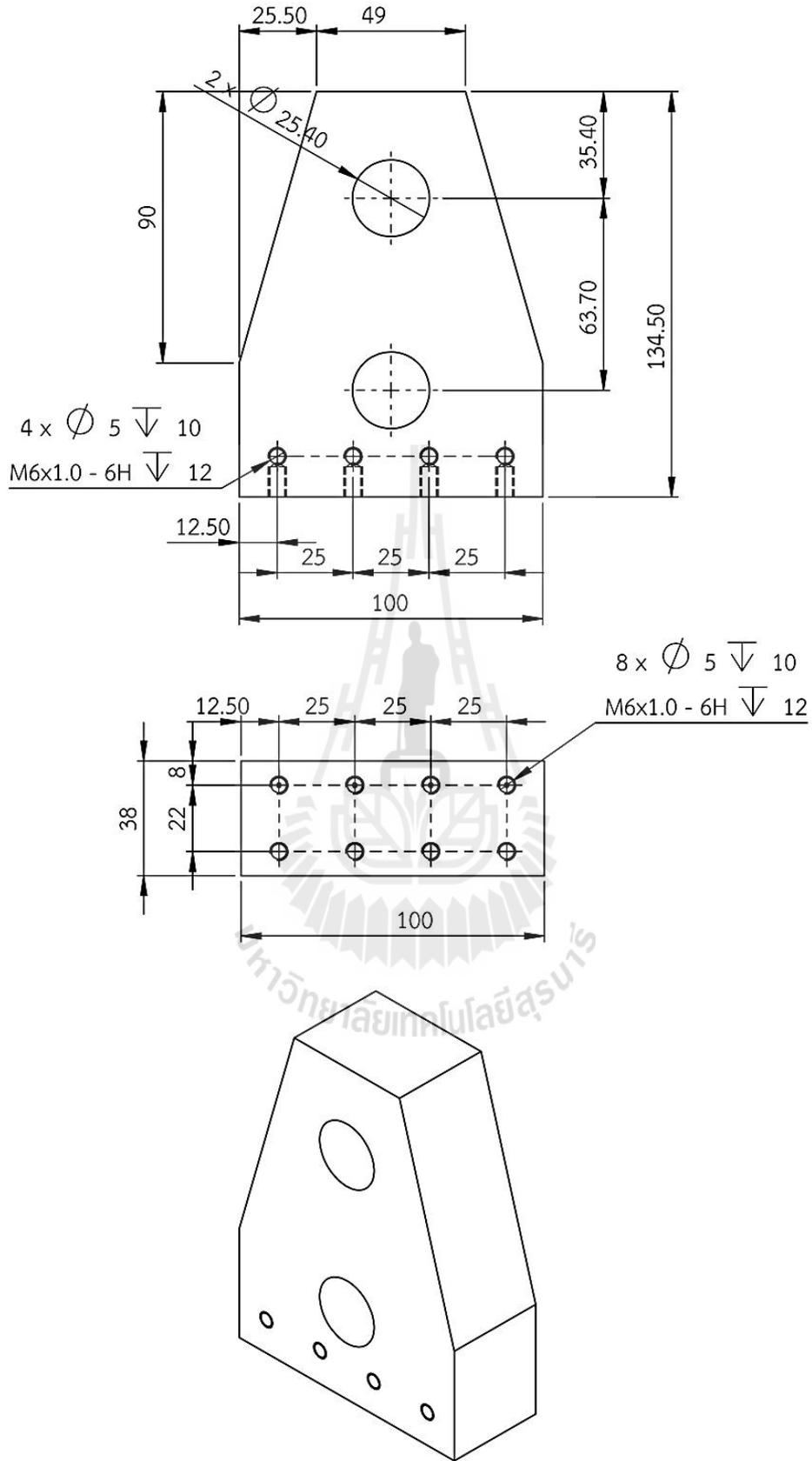


รูปที่ 3.2 ด้านหน้าของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

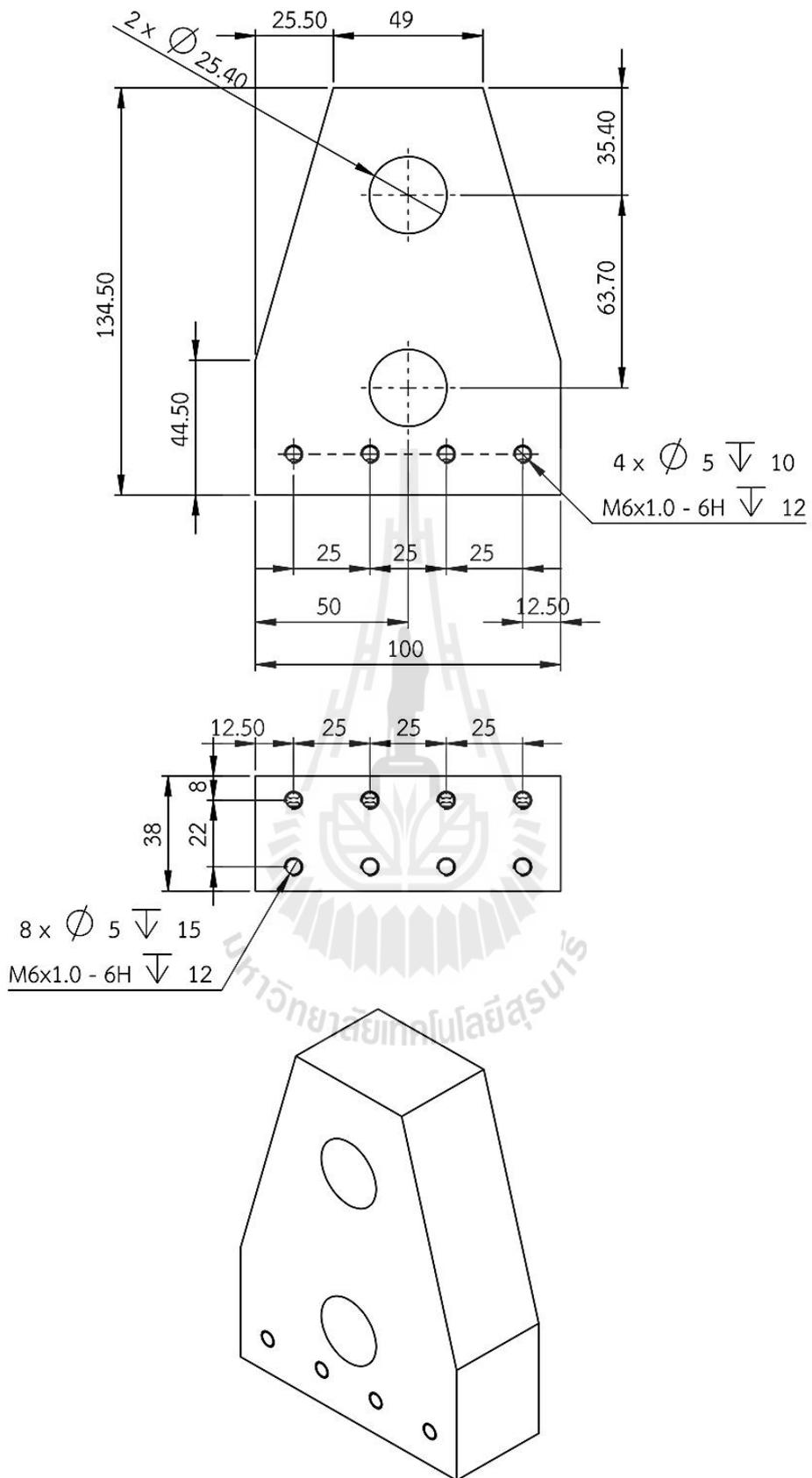


รูปที่ 3.3 ด้านบนของการออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

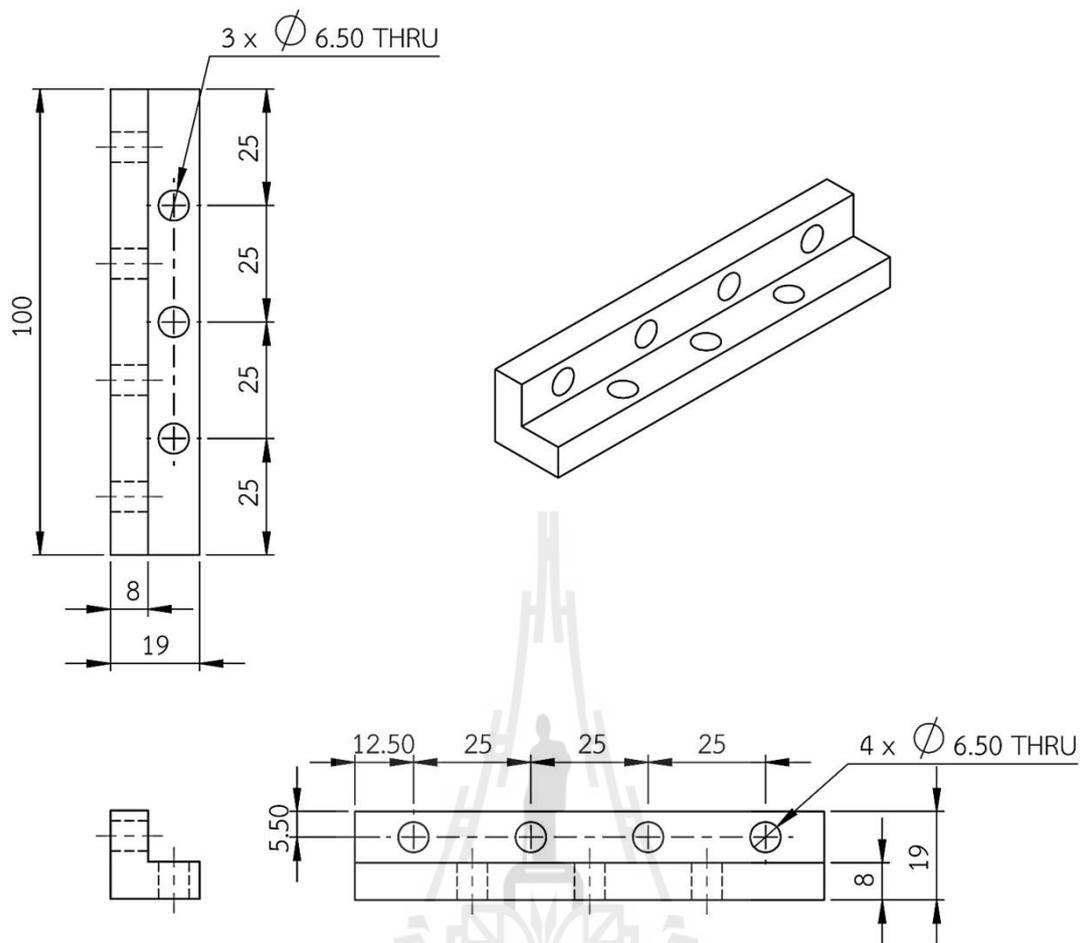




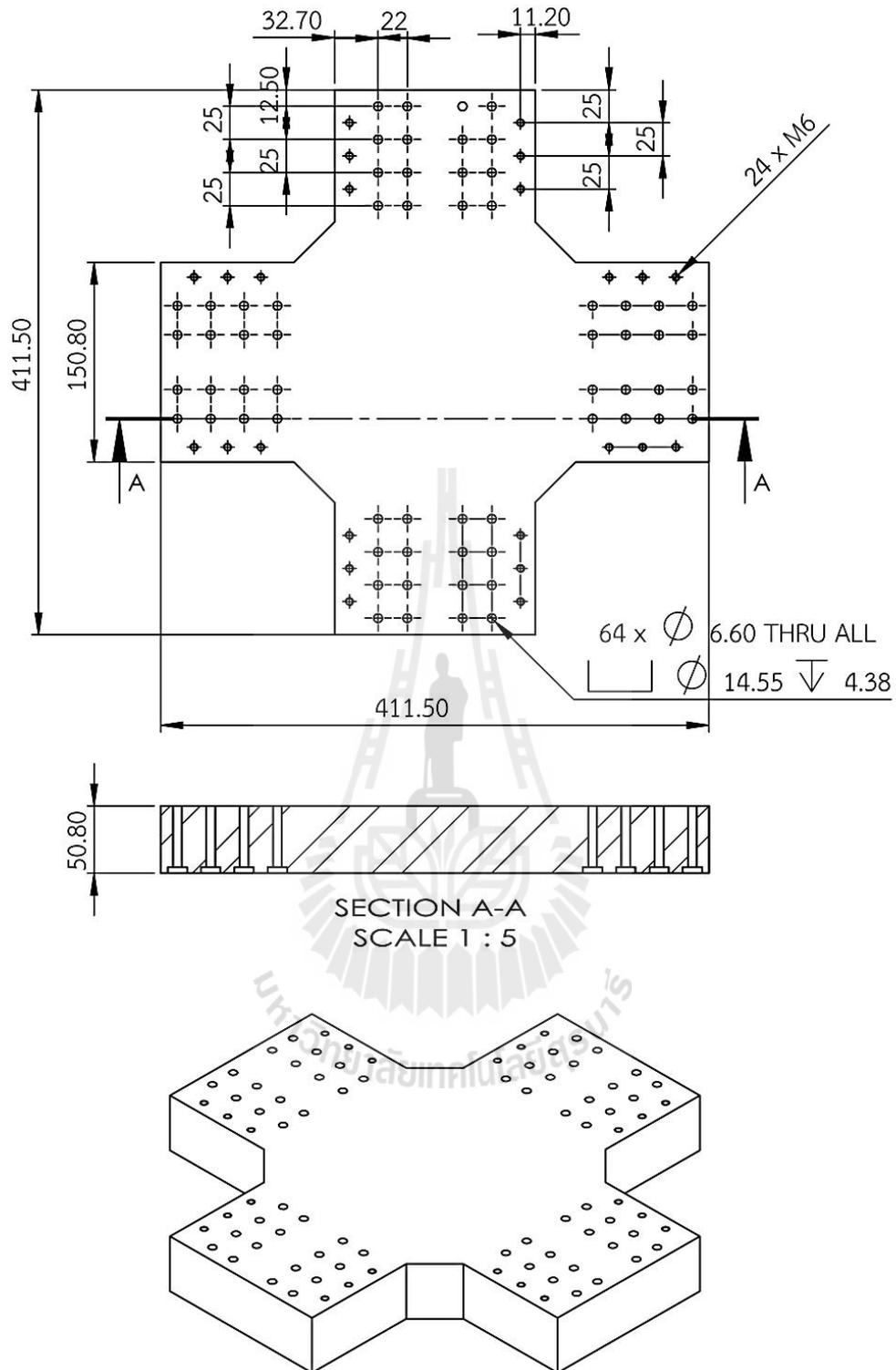
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางรายละเอียดการออกแบบเสาแข็งแรง



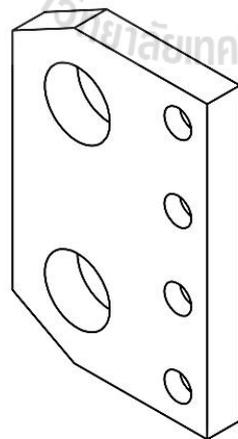
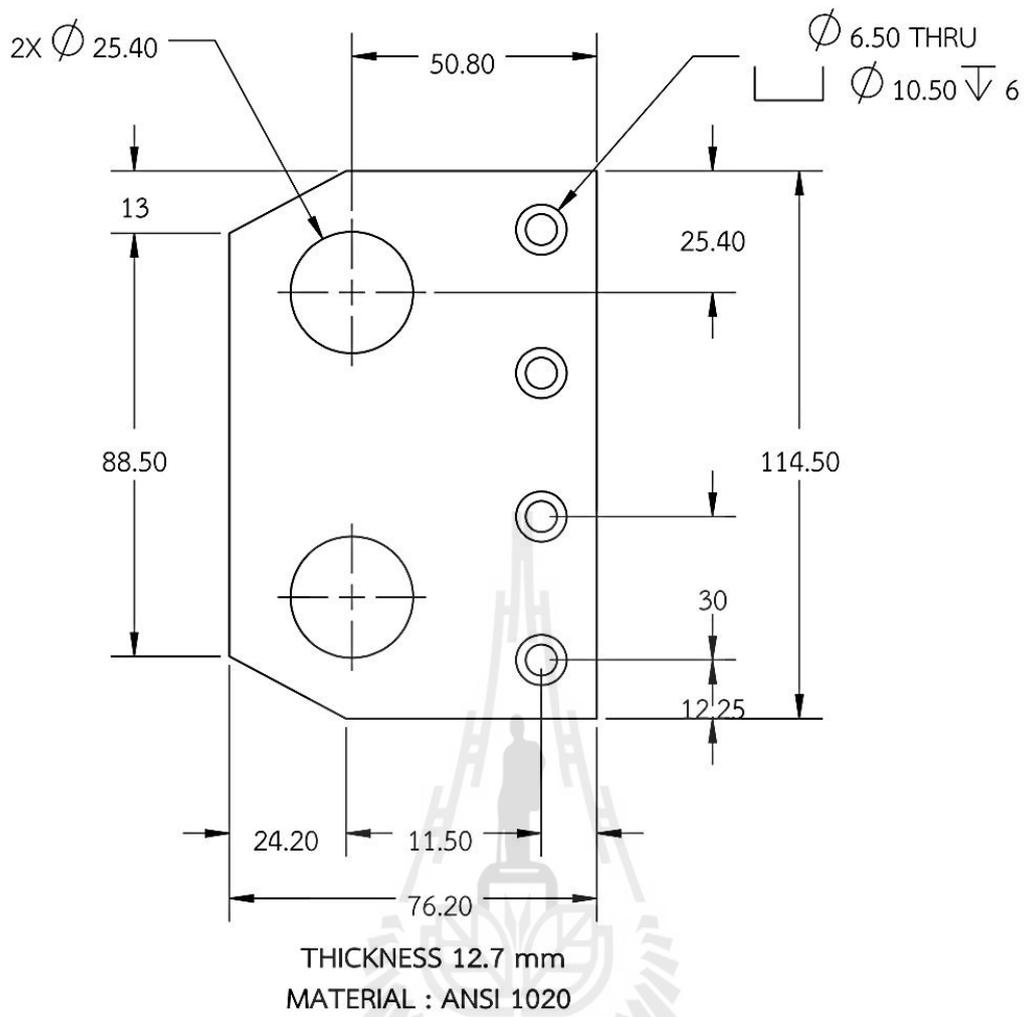
รูปที่ 3.5 รายละเอียดการออกแบบเสาส่งแรง (ต่อ)



รูปที่ 3.6 รายละเอียดการออกแบบตัวยึดชุดแทนกดกับเสาส่งแรง

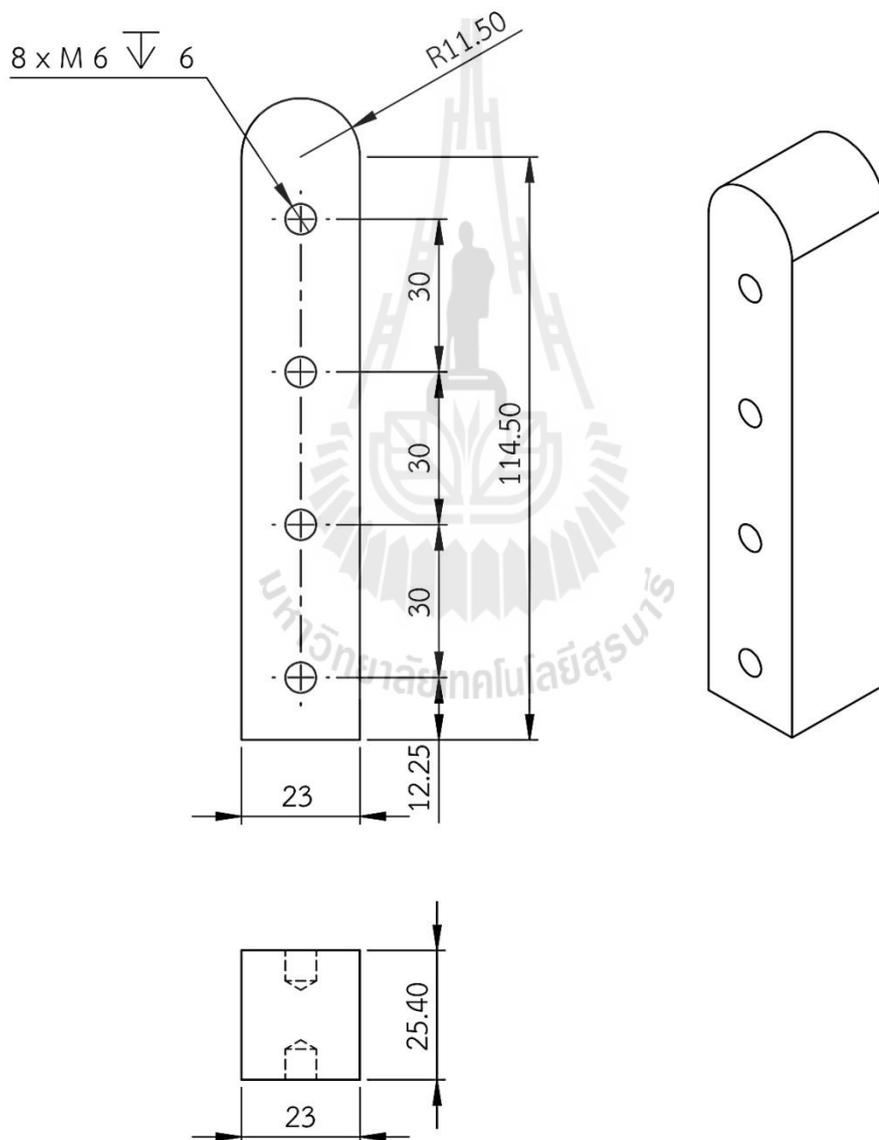


รูปที่ 3.7 รายละเอียดการออกแบบชุดแท่นกวดอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน

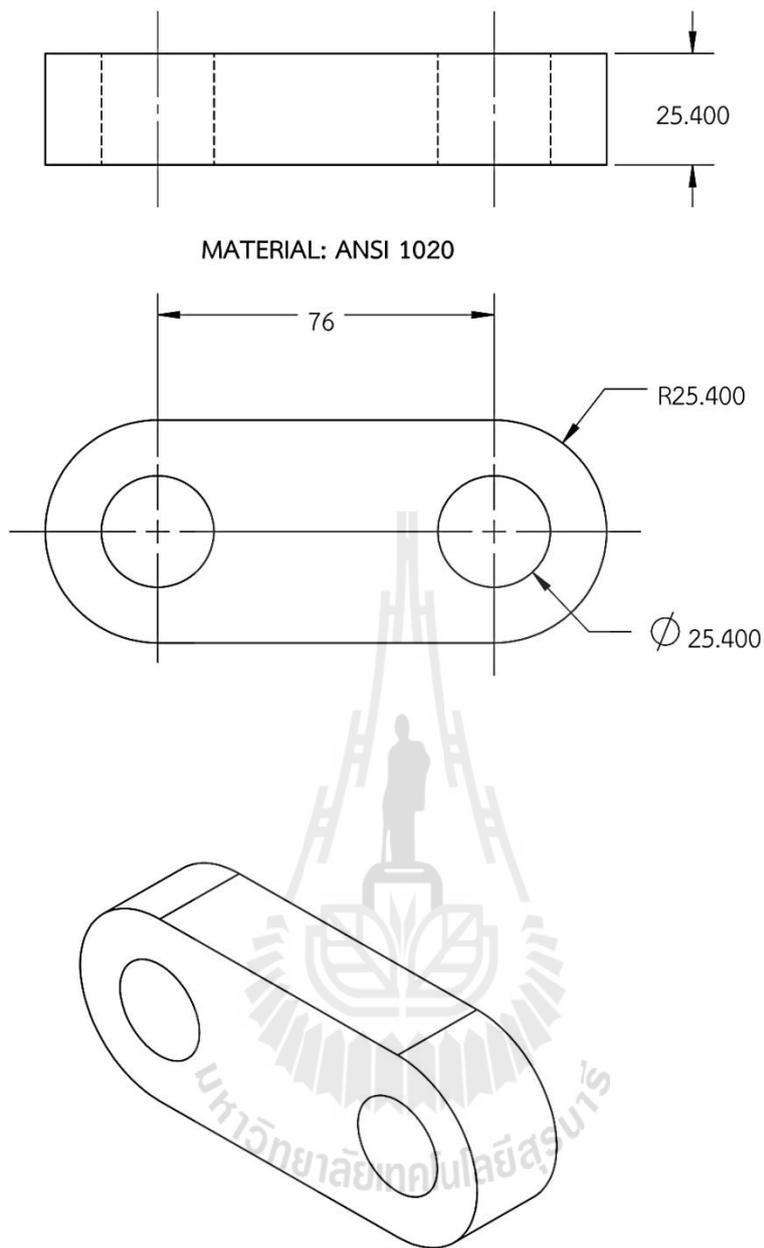


รูปที่ 3.8 รายละเอียดการออกแบบส่วนประกอบของชุดหัวกด (ด้านซ้าย-ขวา)

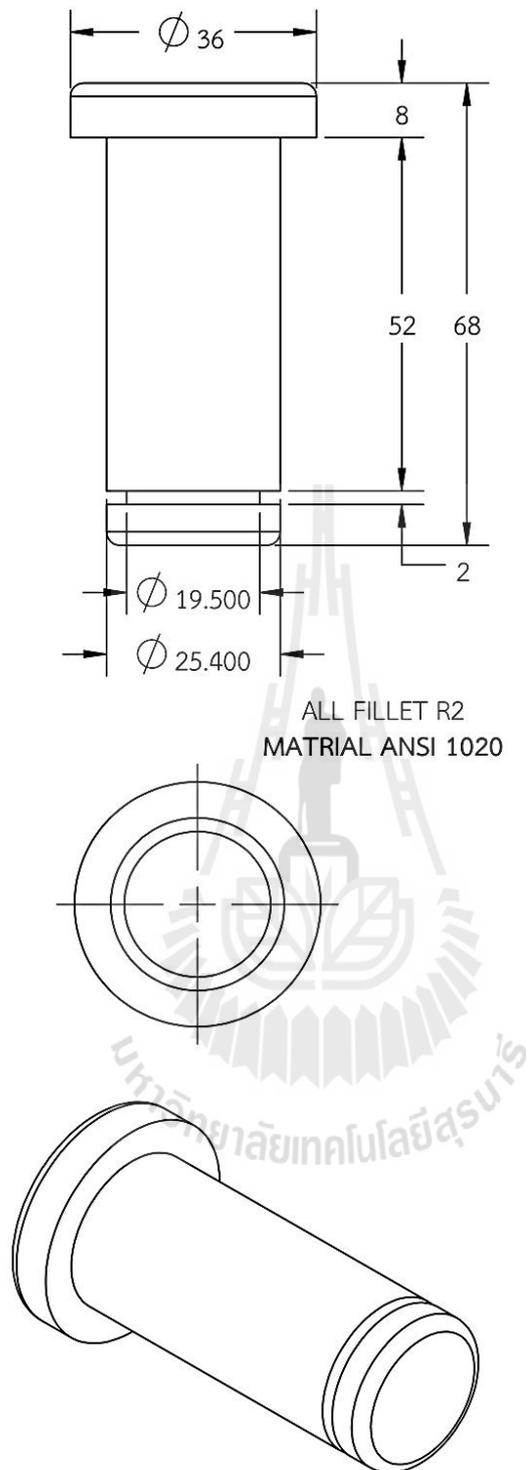
กับคานส่งแรง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร สำหรับใสน็อตยึดประกอบชุดหัวกด โดยชุดหัวกดด้านซ้าย-ขวามีความหนาเท่ากับ 12.7 มิลลิเมตร รูปที่ 3.9 แสดงรายละเอียด ส่วนประกอบของชุดหัวกด (ส่วนกลาง) มี 4 รู สำหรับใสน็อตยึดชุดหัวกด รูปที่ 3.10 แสดงรายละเอียดคานส่งแรงมีความหนาเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร มี 2 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร สำหรับใสน็อตยึด รูปที่ 3.11 แสดงรายละเอียดสลักยึดชุดหัวกดกับคานส่งแรงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 68 มิลลิเมตร รูปที่ 3.12 แสดงรายละเอียดสลักยึดเสาส่งแรงกับคานส่งแรงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 117.5 มิลลิเมตร



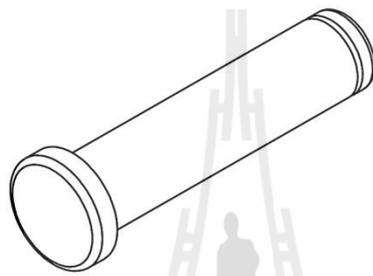
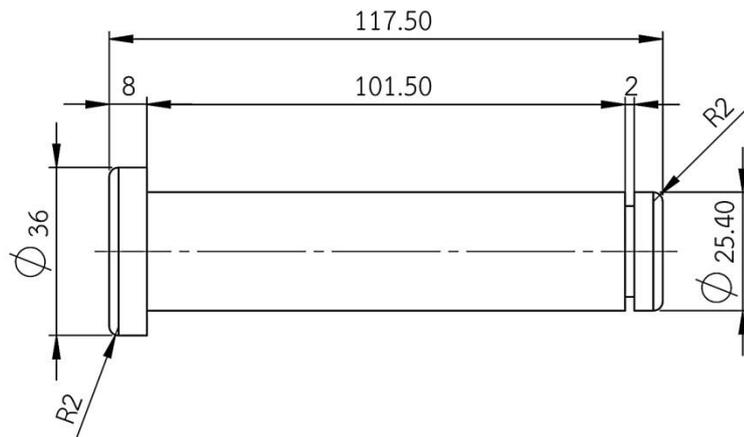
รูปที่ 3.9 รายละเอียดการออกแบบส่วนประกอบของชุดหัวกด (กลาง)



รูปที่ 3.10 รายละเอียดการออกแบบคานส่งแรง



รูปที่ 3.11 รายละเอียดการออกแบบสลักยึดระหว่างชุดหัวกดกับคานส่งแรง



รูปที่ 3.12 รายละเอียดการออกแบบสลักยึดระหว่างเสาแข็งแรงกับคานแข็งแรง

3.2 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

วัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนคือ Structural steel A36 (SS400) โดยคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ Structural steel A36 (SS400), (Hibbeler, 2008)

Density (Mg/m ³)	Poisson's Ratio (ν)	Modulus of Elasticity (GPa)	Modulus of Rigidity (GPa)	Yield Strength (MPa)		Ultimate Strength (MPa)	
				Tension	Compression	Tension	Compression
7.86	0.32	200	75	250	250	400	400

3.2.1 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของคาน ภายใต้สภาวะโมเมนต์ดัด

(Bending condition)

ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคานในสภาวะโมเมนต์ดัดสามารถคำนวณได้จาก (Hibbeler, 2008)

$$\sigma_{\max} = Mc/I \quad (3.1)$$

- โดย σ_{\max} คือ หน่วยแรงตึงฉากสูงสุดที่เกิดบริเวณจุดบนหน้าตัดของคานที่ห่างจากแกน Neutral axis มากที่สุด
- M คือ โมเมนต์ลัพท์ภายใน (Internal moment) ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดรอบแกน Neutral axis
- I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) พื้นที่หน้าตัดของคานรอบแกน neutral axis
- c คือ ระยะตั้งฉากจากแกน neutral axis ถึงจุดบนหน้าตัดของคาน

ผลลัพธ์การคำนวณจากสมการที่ (1) (กำหนด Maximum pump pressure: 3,000 psi) มีดังนี้

$$M = 1947.332 \text{ N-m}$$

$$I = 2.775 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$c = 0.0254 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 178.242 \text{ MPa}$$

และค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคาน (Factor of safety, FS) มีค่าเท่ากับ 1.403

3.2.2 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของคานภายใต้สภาวะแรงกด

(Compressive condition)

ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคานในสภาวะโมเมนต์ดัดสามารถคำนวณได้จาก (Hibbeler, 2008)

$$P_{cr} = (\pi^2 EI)/L^2 \quad (3.2)$$

- โดย P_{cr} คือ แรงวิกฤติที่คานทำให้เกิดการโก่งเดาะ
 E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ของวัสดุที่ใช้ทำคาน
 I คือ ค่าที่น้อยที่สุดของโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของคาน
 L คือ ความยาวของคาน

ผลลัพธ์การคำนวณจากสมการที่ (2) มีดังนี้

$$F_{max} = 21,932.796 \text{ kN (Maximum load per beam)}$$

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$I = 2.775 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$\sigma_{yield} = 250 \text{ MPa}$$

$$L = 0.1268 \text{ m}$$

$$P_{cr} = 34,068.595 \text{ kN}$$

และค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคาน (Factor of safety, FS) มีค่าเท่ากับ 1.553

3.2.3 การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของสลักเหล็กยึดคาน

(Circular steel bolt)

ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคานในสภาวะโมเมนต์ดัดสามารถคำนวณได้จาก (Hibbeler, 2008)

$$\tau_{max} = 4V/3A \quad (3.3)$$

- โดย τ_{max} คือ ค่าสูงสุดของหน่วยแรงเฉือน (Maximum shear stress)
 V คือ แรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของสลัก
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของสลัก

ผลลัพธ์การคำนวณจากสมการที่ (3.3) มีดังนี้

$$\sigma_{u, shear} = 220 \text{ MPa}$$

$$V = 26,775 \text{ kN}$$

$$A = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\tau_{max} = 70.455 \text{ MPa}$$

และค่าสัดส่วนความปลอดภัยของคาน (Factor of safety, FS) มีค่าเท่ากับ 3.123

บทที่ 4

อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

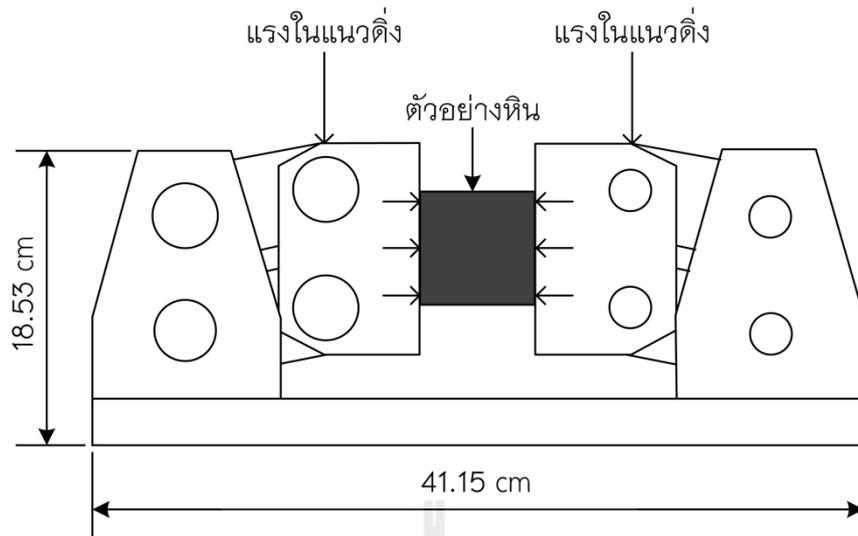
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายการประดิษฐ์อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน และการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน อุโมงค์ ตัดถนน ฐานราก และเหมืองบนดินและใต้ดิน อุปกรณ์ต้นแบบที่ได้ถูกออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนสำหรับจำลองสภาวะของหินภายใต้ความเค้นกดในสองแกน (Biaxial compression loading) โดยใช้แนวคิดใหม่สำหรับกลไกการกดบนตัวอย่างหินเพื่อให้มีความแม่นยำ มีความสอดคล้องกับสภาวะความเค้นจริงในภาคสนามและมีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ปัจจุบันที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ

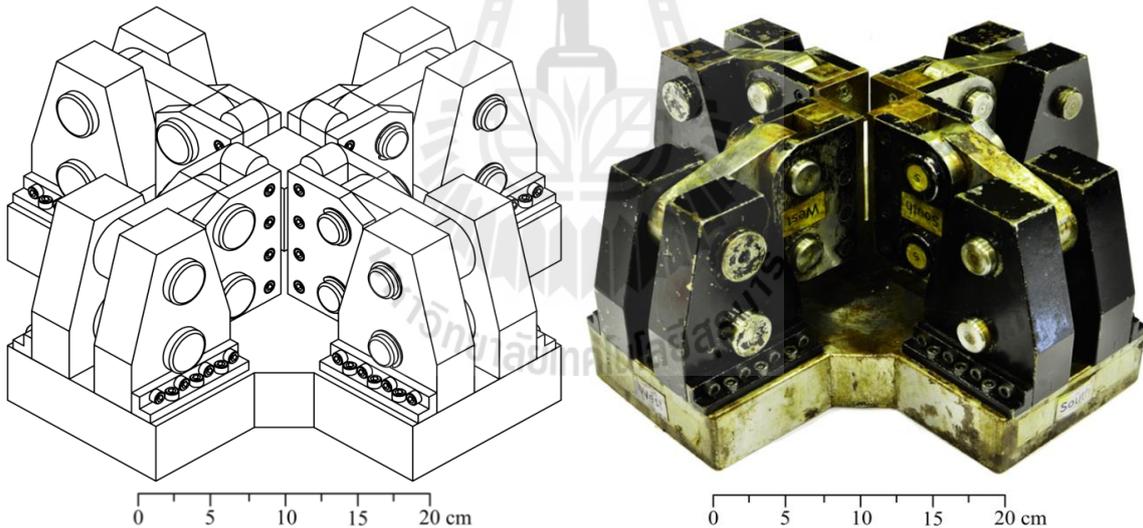
เมื่อดำเนินการออกแบบระบบกลไกการทำงานของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนเสร็จแล้ว จึงได้ทำการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบตามข้อกำหนดทั้งหมดในบทที่ 3 ในห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิศวกรเป็นผู้ดูแลและควบคุมการสร้างอย่างถูกต้อง แม่นยำ และปลอดภัย รายละเอียดของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3

4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

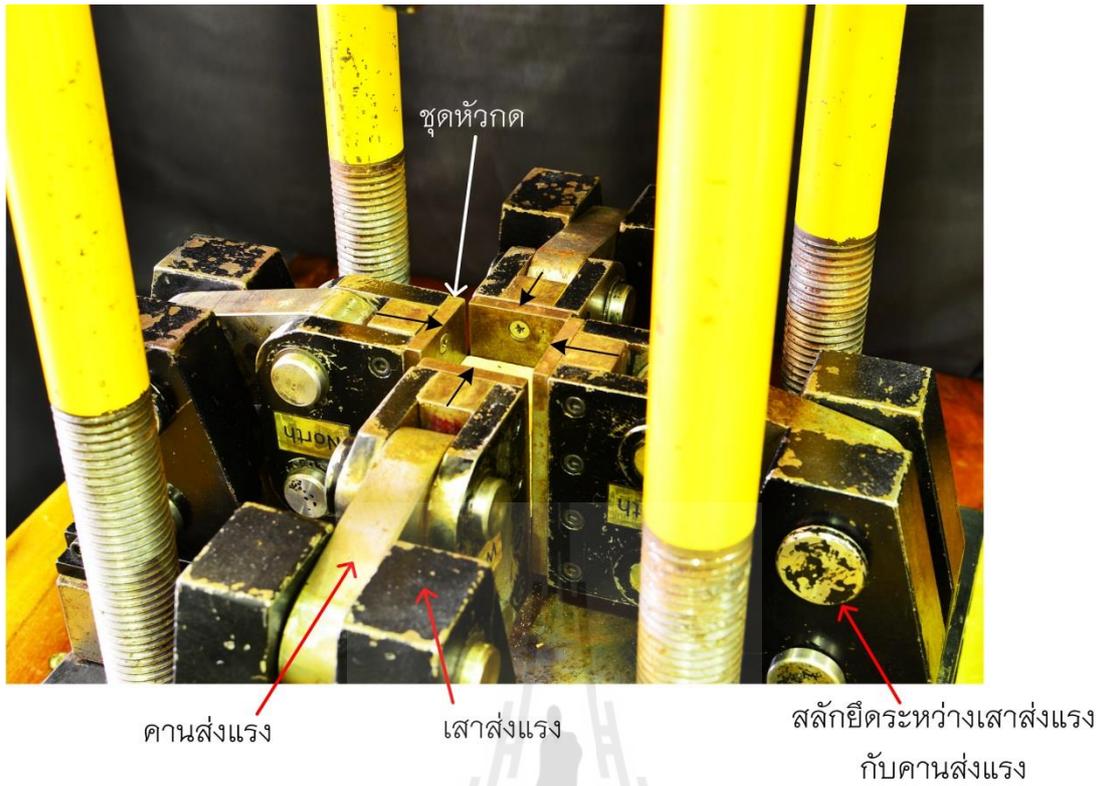
อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน (Uniaxial-to-biaxial load converter, UBC) ที่ได้สร้างขึ้นดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้ถูกทำการสอบเทียบ (Calibration) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยใช้เครื่องตรวจวัดแรง (Electronic load cell) อ่านค่าที่ได้จากมาตรวัดความเครียด (Strain gage) ที่ติดไว้กับเหล็กทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (รูปที่ 4.5) การสอบเทียบสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ ตามการทดสอบกล่าวคือ การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกน โดยค่าความเครียดที่อ่านจากเครื่องตรวจวัดแรงได้นำไปคำนวณหาค่าความเค้น ณ แรงนั้นๆ ซึ่งรูปแบบการสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อใช้กดตัวอย่างหินในสองแกนได้ดำเนินการควบคุมไปกับการสอบเทียบเครื่องทดสอบมาตรฐาน อัตราส่วนแรงในแนวระนาบต่อแรงในแนวตั้ง (F_H/F_V) สามารถคำนวณหาค่าการยุบตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบด้วยการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของชุดหัวกดทดสอบ ซึ่งแรงด้านข้างสูงสุดที่ถูกออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ 150 kN ปัมไฮดรอลิกที่ให้แรงในแนวแกนมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 75 ตัน อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดตั้งแต่ 25×25×25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึง 65×65×100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร



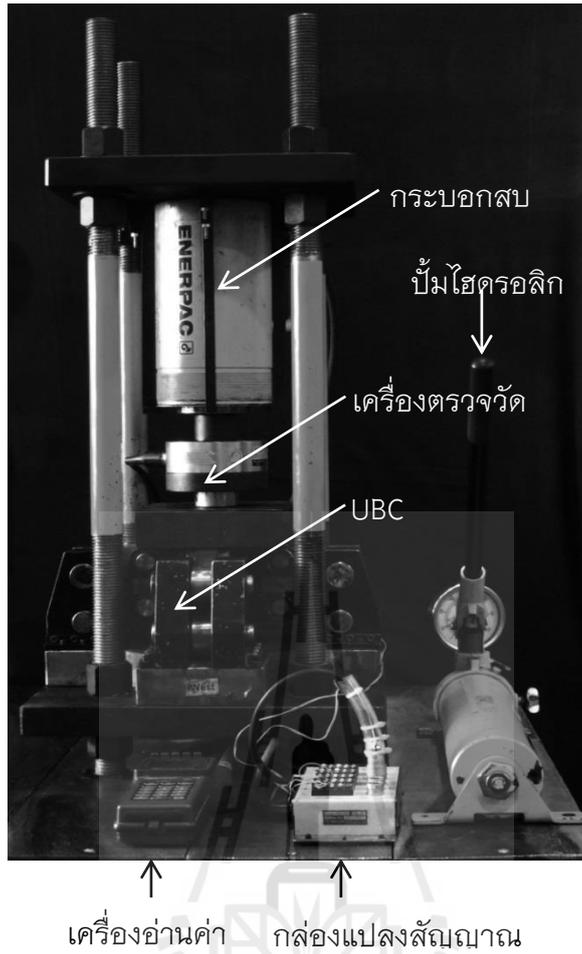
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนแสดงแนวคิดในการออกแบบและทิศทางการให้แรงกดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกน



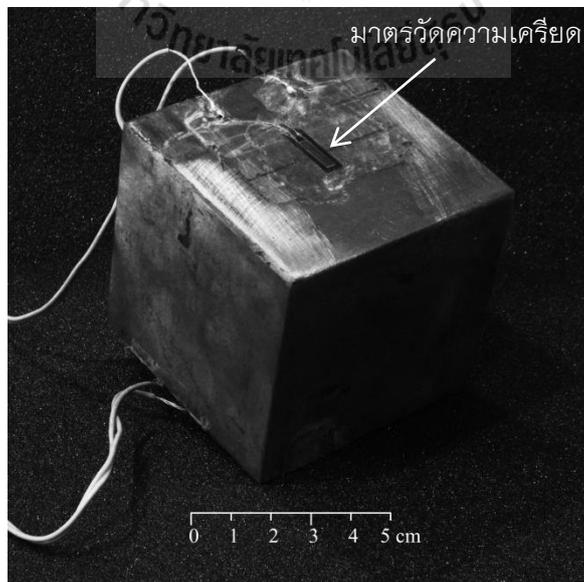
รูปที่ 4.2 ภาพเปอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks (ซ้าย) อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ (ขวา)



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนในขณะกดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกน โดยได้นำมาประยุกต์ใช้กับโครงกดทดสอบในแกนเดียวทั่วไป

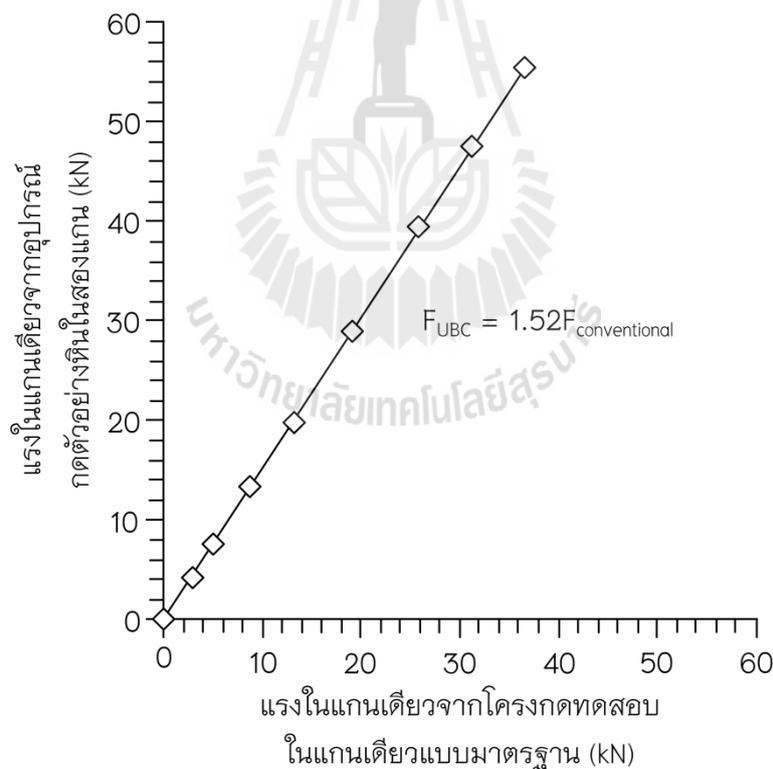


รูปที่ 4.4 การสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน โดยใช้โครงกดทดสอบทั่วไปในแกนเดียว

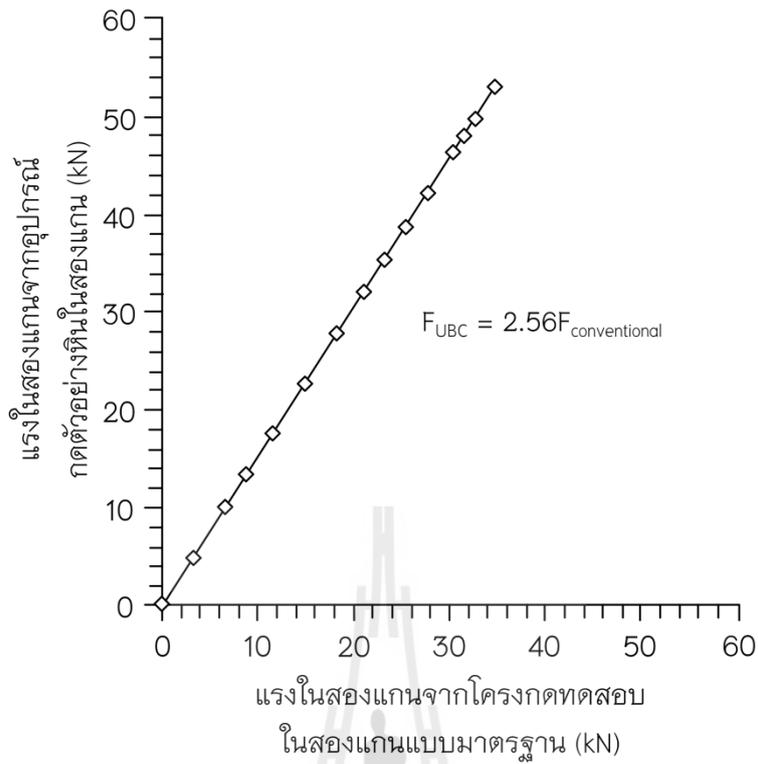


รูปที่ 4.5 มาตรวัดความเครียดที่ติดกับเหล็กทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

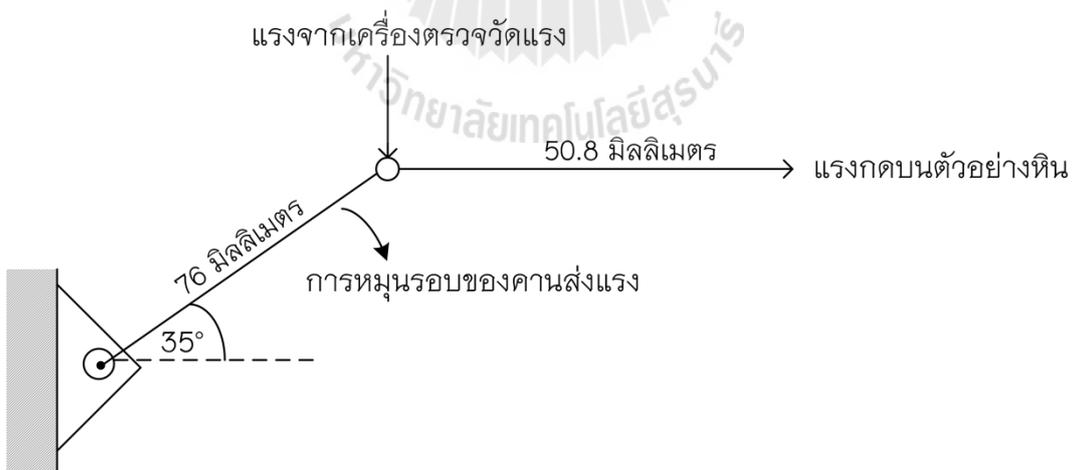
โดยรายละเอียดในการสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนภายในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนกับโครงกดในแกนเดียวและรูปที่ 4.7 แสดงการสอบเทียบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนกับโครงกดในสองแกน นอกจากนี้ได้มีการคำนวณแรงของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนในหนึ่งทิศทาง โดยได้กำหนดให้ส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์เป็นวัสดุแข็ง (Hibbeler, 2010) แรงในแนวระนาบสามารถคำนวณโดยใช้แผนผังภาพวัตถุอิสระ (Free Body Diagram, FBD) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 แรงในแนวตั้งสามารถเพิ่มขึ้นได้จากปัมไฮดรอลิกซึ่งแรงในแนวระนาบแปรผันตรงกับแรงในแนวตั้ง โดยมุมที่เหมาะสมของคานส่งแรงมีค่าเท่ากับ 35° ผลจากการคำนวณสมดุลสถิต (Static equilibrium) ของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนคือ $F_h = 1.4F_v$ หรือแรงในแนวระนาบมีค่าประมาณ 70% ของแรงในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.9 อัตราส่วนที่คำนวณได้จะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการหาค่ากำลังกดของหินในแนวระนาบ (F_h) โดยที่ F_v เป็นแรงที่วัดได้จากโครงกดทดสอบในแกนเดียวทั่วไป



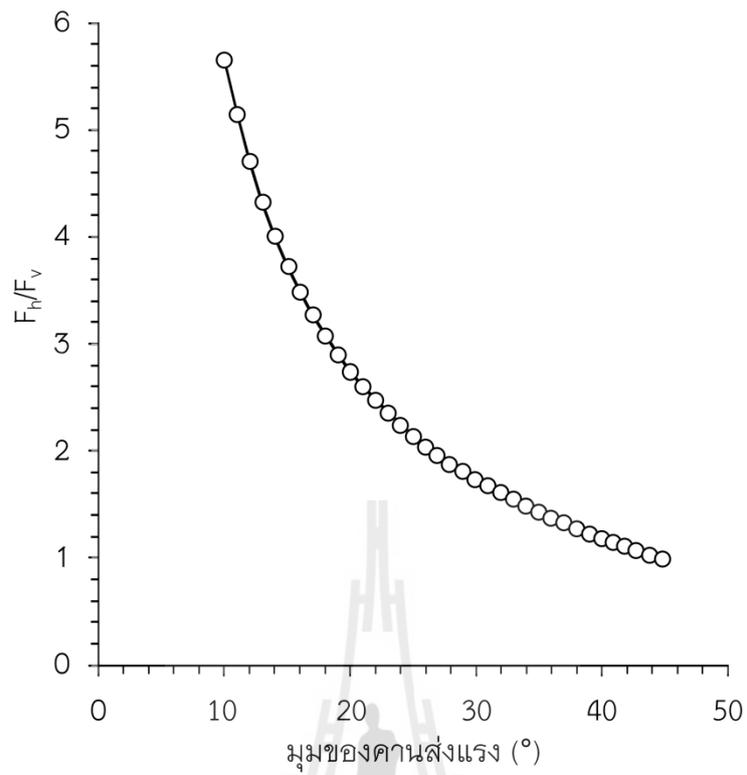
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแกนเดียวจากอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน (F_{UBC}) กับแรงในแกนเดียวจากโครงกดทดสอบในแกนเดียวแบบมาตรฐาน ($F_{conventional}$)



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงในสองแกนจากอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน (F_{UBC}) กับแรงในสองแกนจากโครงกวดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน ($F_{conventional}$)



รูปที่ 4.8 แผนผังภาพวัตถุอิสระที่ใช้ในการคำนวณแรงของอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน



รูปที่ 4.9 อัตราส่วนระหว่างแรงในแนวระนาบต่อแรงในแนวตั้งต่อการผันแปรมุมของคานส่งแรง (F_H/F_V ratio)

บทที่ 5

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

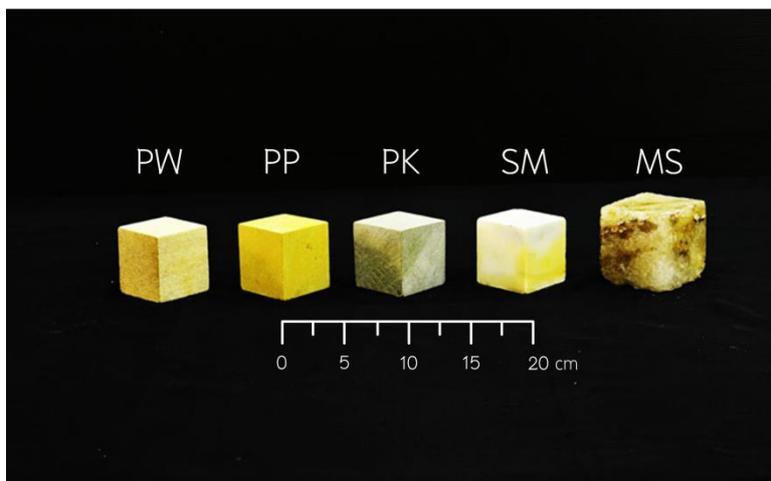
5.1 วัตถุประสงค์

การจัดเตรียมตัวอย่างหินเพื่อนำมาทดสอบในสองแกนมีจุดประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นและเพื่อสาธิตว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม โดยได้ใช้ตัวอย่างหิน 5 ชนิด มาทำการทดสอบหาค่าความแข็งของหินในแกนเดียวและในสองแกน

5.2 ตัวอย่างหินที่นำมาใช้ทดสอบกับอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

ตัวอย่างหินที่เลือกมาใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ได้แก่ หินทรายชุดโคราชประกอบด้วย ชั้นหินพระวิหาร (PW) ภูพาน (PP) และ ภูกระดึง (PK) หินอ่อนชุดสระบุรี (SM) และเกลือหินชุดมหาสารคาม (MS) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยตัวอย่างหินที่ได้เตรียมขึ้นนี้มีไม่น้อยกว่า 20 ตัวอย่าง ต่อ 1 ชนิดหิน ตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ถูกจัดเตรียมขึ้นเพื่อทดสอบ 4 รูปแบบ คือ (1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวโดยใช้โครงกดทดสอบทั่วไป (2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวโดยใช้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น (3) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกนโดยใช้โครงกดทดสอบทั่วไปและ (4) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกนโดยใช้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างหินทรายชุดโคราชที่มีความพรุนและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง อีกทั้งยังกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งโครงสร้างทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มีโอกาสที่จะก่อสร้างในชั้นหินดังกล่าวในการจัดเตรียมตัวอย่างหินเบื้องต้นได้ทำการตัดหินเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โดยคัดเลือกตัวอย่างหินที่มีความสมบูรณ์มาใช้ในการทดสอบ กล่าวคือ ต้องเป็นตัวอย่างหินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีการแตกเกิดขึ้นมาก่อน คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าเป็นหินทรายที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยหินทรายชุดนี้มีแร่องค์ประกอบ ได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่แอลไบท์ แร่กาไลไนท์ แร่เฟลด์สปาร์ และแร่ไมกา ดังแสดงในตารางที่ 5.1 (Thosuwat, 2009) ตัวอย่างหินอ่อนชุดสระบุรีที่ได้นำมาใช้ในการทดสอบมีแร่องค์ประกอบคือ แร่แคลไซต์ 100% (1-5 มิลลิเมตร) (Kemthong and Fuenkajorn, 2007)



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ทั้ง 5 ชนิด

ตารางที่ 5.1 แร่องค์ประกอบหลักของหินทรายชุดโคราชที่นำมาใช้ในการทดสอบ
(Thosuwan, 2009)

Rock name	Density (g/cc)	Color	Compositions				
			Quartz (%)	Albite (%)	Kaolinite (%)	Feldspar (%)	Mica (%)
PW sandstone	2.35	white	99.47	–	0.53	–	–
PP sandstone	2.45	yellow	98.40	–	–	–	1.60
PK sandstone	2.63	green	48.80	46.10	5.10	–	–

5.3 ขนาดของตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ได้ถูกนำมาตัดให้ผิวเรียบด้วยเครื่องตัดหินทราย Model ZE-LG3-570A tile cutter (รูปที่ 5.2) ในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบแต่ละชนิด โดยตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด และหินอ่อนชุดสระบุรีถูกตัดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ส่วนตัวอย่างเกลือหินชุดมหาสารคามถูกตัดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 54×54×54 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (รูปที่ 5.3) โดยรายละเอียดของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.6 ตัวอย่างหินมีความฉากผิวขนาบกันไม่เกิน 0.01 นิ้ว (0.25 มิลลิเมตร) ของพื้นที่หน้าตัดและขนาดของตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไม่ต่ำกว่า 47 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM D4543-08



รูปที่ 5.2 เครื่องตัดหินทราย Model ZE-LG3-570A tile cutter (บน) และตัวอย่างหินทราย
ที่ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ (ล่าง)



รูปที่ 5.3 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าให้มีรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมจัตุรัส
ขนาดเท่ากับ 54×54×54 ลูกบาศก์มีลิเมตร เพื่อทดสอบกับอุปกรณ์
กดทดสอบหินในสองแกน

ตารางที่ 5.2 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินพระวิหารที่ใช้ในการทดสอบ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
PW-UCS-01	52.30	50.30	51.30	2.17
PW-UCS-02	50.45	49.50	51.30	2.19
PW-UCS-03	50.40	51.60	49.50	2.23
PW-UCS-04	51.20	49.70	50.45	2.23
PW-UCS-05	50.50	51.10	51.30	2.21
PW-UCS-06	50.40	51.45	49.50	2.22
PW-UCS-07	52.75	50.40	51.45	2.26
PW-UCS-08	50.95	52.40	50.40	2.25
PW-UCS-09	50.85	51.10	51.30	2.20
PW-UCS-10	49.40	50.70	50.90	2.22
PW-BI-01	49.79	50.50	51.58	2.26
PW-BI-02	50.67	50.22	50.80	2.31
PW-BI-03	50.45	49.20	50.60	2.23
PW-BI-04	50.50	51.48	51.28	2.23
PW-BI-05	50.35	50.40	103.5	2.25
PW-BI-06	50.40	50.20	103.1	2.23

ตารางที่ 5.3 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินภูพานที่ใช้ในการทดสอบ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
PP-UCS-01	51.10	51.05	50.80	2.42
PP-UCS-02	51.25	51.45	49.50	2.40
PP-UCS-03	50.35	51.10	51.40	2.39
PP-UCS-04	51.40	49.85	50.80	2.41
PP-UCS-05	51.90	51.60	51.00	2.41
PP-UCS-06	51.40	51.45	49.50	2.45
PP-UCS-07	52.05	50.40	50.25	2.44
PP-UCS-08	50.70	50.25	50.15	2.43
PP-UCS-09	50.85	51.10	51.30	2.40
PP-UCS-10	49.40	50.70	50.90	2.42
PP-BI-01	49.00	50.65	51.00	2.39
PP-BI-02	50.37	49.50	51.12	2.38
PP-BI-03	50.30	51.00	50.80	2.42
PP-BI-04	50.45	50.08	50.45	2.40
PP-BI-05	50.08	50.80	51.08	2.39
PP-BI-06	50.01	49.92	49.92	2.36

ตารางที่ 5.4 ขนาดของตัวอย่างหินทรายชั้นหินภูกระดึงที่ใช้ในการทดสอบ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
PK-UCS-01	50.00	50.95	50.80	2.51
PK-UCS-02	50.50	50.75	51.45	2.54
PK-UCS-03	50.15	51.40	50.80	2.50
PK-UCS-04	50.12	50.30	49.82	2.53
PK-UCS-05	51.28	51.10	48.74	2.56
PK-UCS-06	51.00	51.15	49.50	2.54
PK-UCS-07	50.70	50.68	50.25	2.53
PK-UCS-08	50.00	51.30	50.15	2.56
PK-UCS-09	51.40	49.85	50.80	2.50
PK-UCS-10	51.90	51.60	51.00	2.52
PK-BI-01	50.89	51.20	50.50	2.51
PK-BI-02	50.37	49.92	51.58	2.54
PK-BI-03	50.30	48.44	51.00	2.55
PK-BI-04	51.48	48.00	51.48	2.50
PK-BI-05	50.59	51.40	51.28	2.51
PK-BI-06	49.64	50.30	51.10	2.53

ตารางที่ 5.5 ขนาดของตัวอย่างหินอ่อนชุดสระบุรีที่ใช้ในการทดสอบ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
SM-UCS-01	50.40	54.54	49.50	2.65
SM -UCS-02	51.80	50.42	51.15	2.66
SM -UCS-03	50.00	49.62	50.68	2.67
SM -UCS-04	50.40	51.45	49.50	2.66
SM -UCS-05	52.75	50.40	51.45	2.65
SM -UCS-06	50.95	52.40	50.40	2.65
SM -UCS-07	50.85	51.10	51.30	2.66
SM -UCS-08	49.40	50.70	50.90	2.67
SM -UCS-09	51.00	51.45	51.30	2.65
SM -UCS-10	50.70	50.70	50.15	2.66
SM -BI-01	50.54	50.10	51.30	2.67
SM -BI-02	49.00	50.00	51.58	2.67
SM -BI-03	51.39	48.44	50.50	2.65
SM -BI-04	50.89	51.20	50.50	2.66
SM -BI-05	51.73	49.92	51.58	2.65
SM -BI-06	50.65	48.44	51.00	2.67

ตารางที่ 5.6 ขนาดของตัวอย่างเกลือหินชุดมหาสารคามที่ใช้ในการทดสอบ

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)
MS-UCS-01	56.50	57.80	54.31	2.14
MS -UCS-02	54.30	53.85	54.34	2.24
MS -UCS-03	55.50	57.00	54.20	2.26
MS -UCS-04	54.30	54.30	54.30	2.24
MS -UCS-05	54.45	55.50	55.30	2.19
MS -UCS-06	55.20	54.60	55.50	2.32
MS -UCS-07	54.50	54.70	54.45	2.19
MS -UCS-08	55.10	55.10	55.30	2.18
MS -UCS-09	54.25	56.05	54.80	2.28
MS -UCS-10	54.35	54.45	55.35	2.19
MS -BI-01	54.05	57.00	54.48	2.25
MS -BI-02	55.60	55.10	54.26	2.29
MS -BI-03	55.25	57.20	54.80	2.30
MS -BI-04	54.40	54.65	54.58	2.20
MS -BI-05	56.18	55.40	54.50	2.22
MS -BI-06	57.25	56.30	55.10	2.00

บทที่ 6

การทดสอบโดยใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

6.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความแข็งของตัวอย่างหิน 5 ชนิด โดยหาค่าความเค้นกดสูงสุดในสองแกนที่มีผลต่อคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν) ภายใต้สภาวะความเค้นในสองแกนที่เท่ากันอย่างสม่ำเสมอที่ความเค้นหลักกลางและความเค้นหลักต่ำสุดเท่ากัน ($\sigma_2 = \sigma_3$)

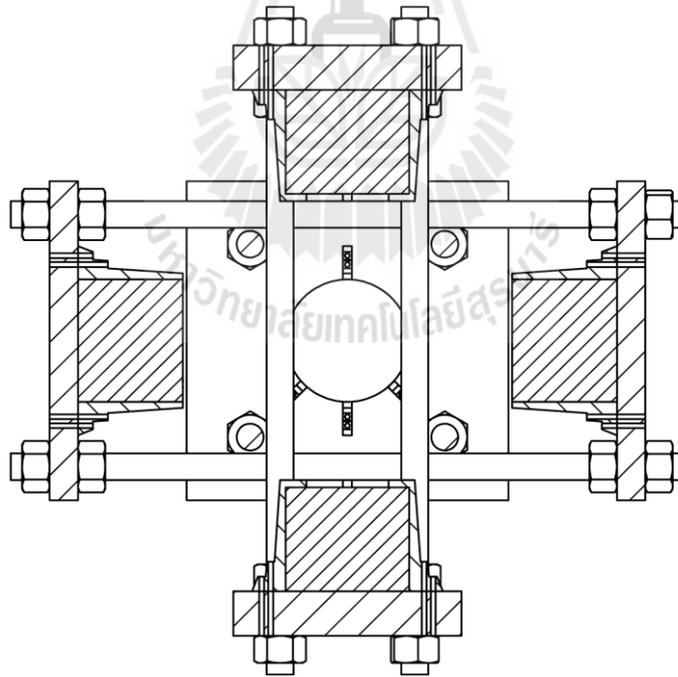
6.2 วิธีการทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

วิธีการทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนได้นำแผ่นลดแรงเสียดทาน (Neoprene sheet) มาใช้ในการทดสอบเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างหินกับพื้นที่หน้าตัดของชุดหัวกด ระหว่างการทดสอบได้มีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินในรูปของความเครียดในแนวแกนหลักเมื่อทำการให้แรง โดยค่าความเค้นวิบัติในระหว่างการทดสอบได้ทำการจดบันทึกและเกณฑ์การวิบัติของตัวอย่างหินได้รับตรวจสอบจากผู้วิจัย ซึ่งอัตราส่วนปัวซองและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินได้ทำการคำนวณในช่วงที่ไม่เกิน 50% ของค่าความเค้นหลักสูงสุด ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเพื่อหาค่าความแข็งของตัวอย่างหินภายใต้สภาวะที่ไม่มี ความเค้นล้อมรอบทั้งหมดได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างการทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนกับโครงสร้างทดสอบในแกนเดียวและในสองแกนแบบมาตรฐาน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D7012-04) และ ISRM (Brown, 1981) ด้วยโครงสร้างทดสอบตัวอย่างหินในสองแกนแบบมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2

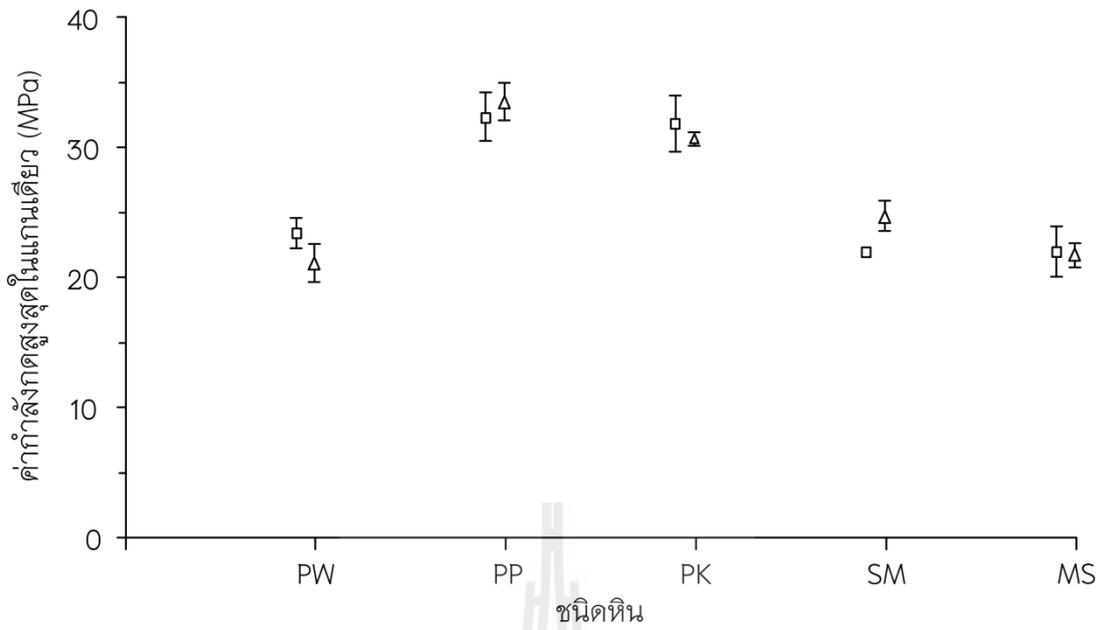
ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสองแกนเปรียบเสมือนเป็นการจำลองสภาวะภายในอุโมงค์หรือช่องเหมืองใต้ดินที่มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนมากที่สุดและมวลหินอยู่ในสภาวะความเค้นกดในสองแกน ซึ่งความเค้นในแนวสัมผัส (Tangential stress) และความเค้นในแนวแกน (Axial stress) มีค่าสูงสุด จึงใช้เป็นตัวแทนของความเค้นหลัก ในขณะที่ความเค้นในแนวรัศมีมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 แสดงผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสองแกน ซึ่งตัวอย่างหินหลังการทดสอบทั้ง 5 ชนิด แสดงดังรูปที่ 6.5 ในตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสองแกนจากการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์กดหินในสองแกน



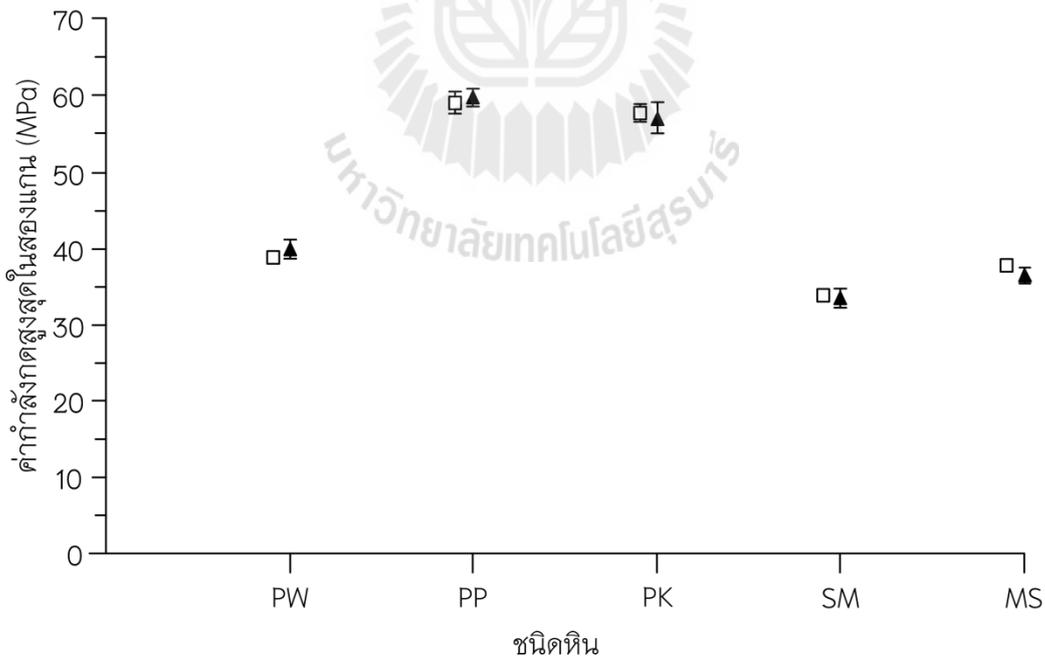
รูปที่ 6.1 โครงกวดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษา



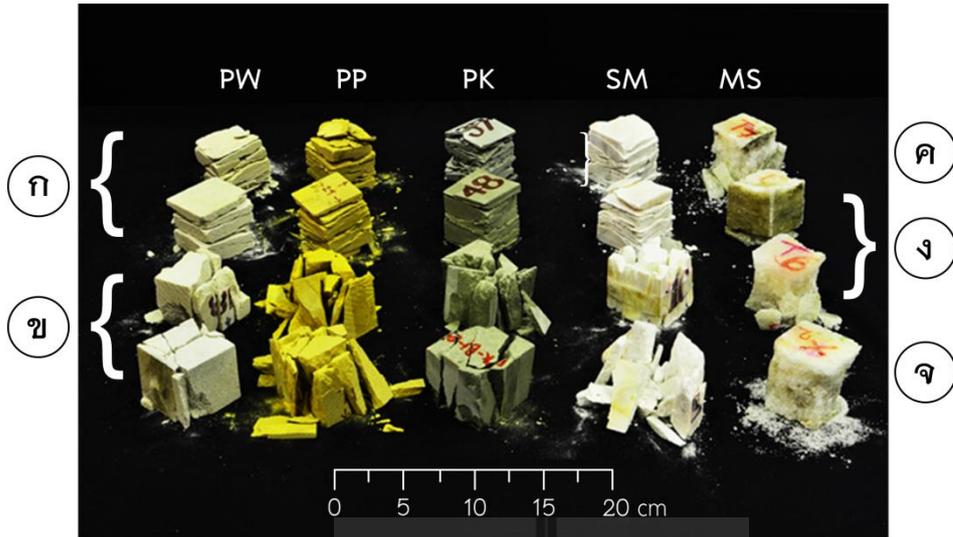
รูปที่ 6.2 ภาพตัดขวางด้านบนของโครงกวดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6.3 ค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ที่ทดสอบด้วยเครื่องกดทดสอบในแกนเดียวแบบมาตรฐาน (□) และทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้น (Δ)



รูปที่ 6.4 ค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด ที่ทดสอบด้วยเครื่องกดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน (□) และทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนที่ประดิษฐ์ขึ้น (▲)



การทดสอบ

- ก) กำลังกดสูงสุดในแกนเดียว
ข) กำลังกดสูงสุดในสองแกน

อุปกรณ์ทดสอบ

- ค) โครงกดทดสอบในแกนเดียวแบบมาตรฐาน
ง) อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน
จ) โครงกดทดสอบในสองแกนแบบมาตรฐาน

รูปที่ 6.5 ตัวอย่างหินทั้ง 5 ชนิด หลังการทดสอบ

ตารางที่ 6.1 ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและค่ากำลังกดสูงสุดในสองแกนทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนและโครงกดทดสอบแบบมาตรฐาน

การทดสอบ	อุปกรณ์ทดสอบ	PW	PP	PK	SM	MS
ความเค้นกด ในแกนเดียว (MPa)	โครงกด มาตรฐาน	23.4±1.2	32.3±1.9	31.8±2.2	22	21.9±1.9
	อุปกรณ์กด ตัวอย่างหินใน สองแกน	21.1±1.5	33.4±1.5	30.7±0.5	24.7±1.1	21.7±0.9
ความเค้นกด ในสองแกน (MPa)	โครงกด มาตรฐาน	39	59±1.4	57.7±1.2	34	37.9±0.6
	อุปกรณ์กด ตัวอย่างหินใน สองแกน	39.9±1.2	59.8±1.1	57.1±1.9	33.5±1.2	36.5±0.9

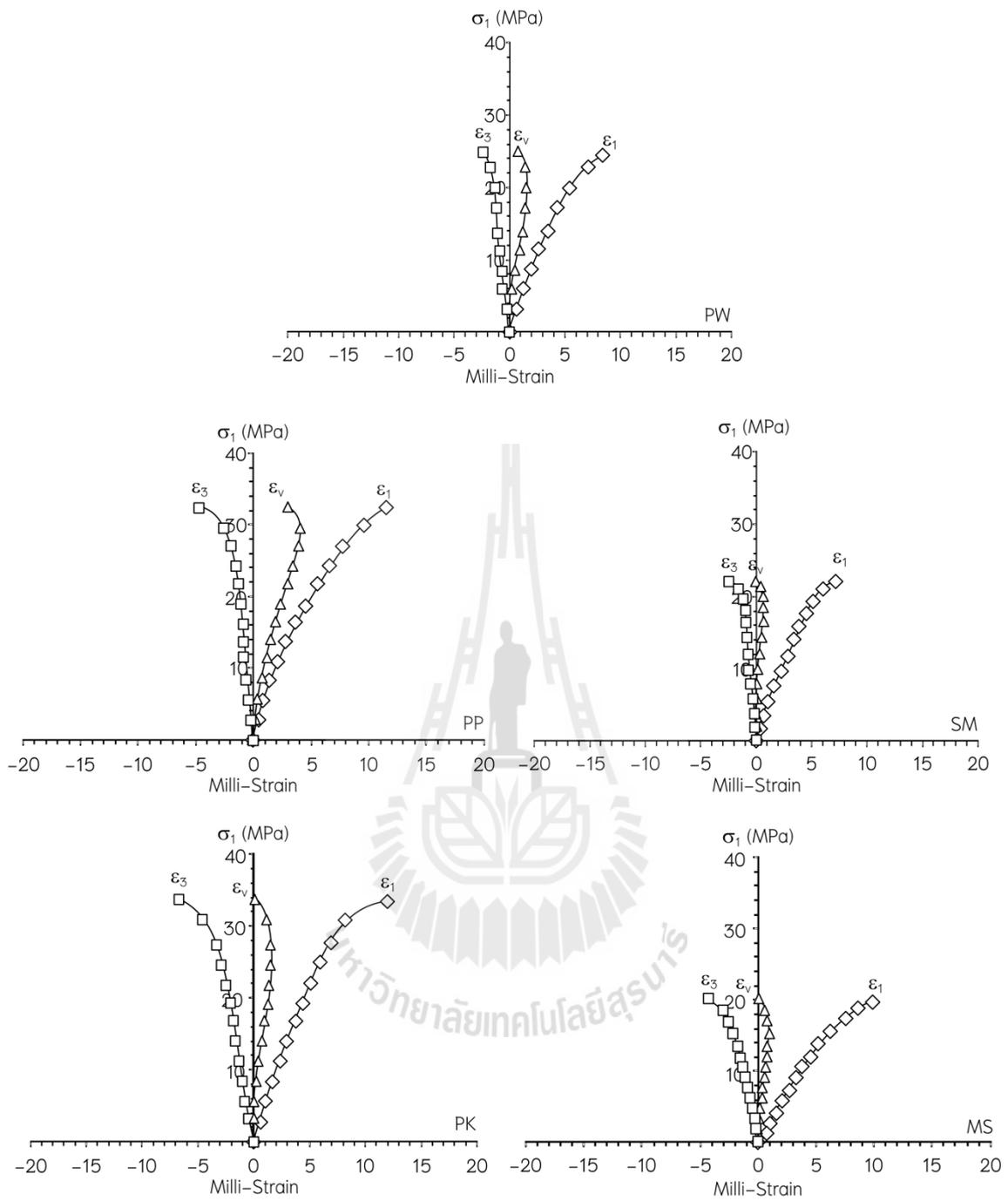
ที่ประดิษฐ์ขึ้นและโครงการทดสอบแบบมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองได้มีการคำนวณในทิศทางตั้งฉากและขนานกับ Bedding plane ของตัวอย่างหินดังแสดงในตารางที่ 6.2 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบทั้งสี่แบบแสดงดังรูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.9 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราปัวซองสามารถคำนวณได้จากสมการ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

$$\varepsilon = \sigma/E - \nu\sigma/E$$

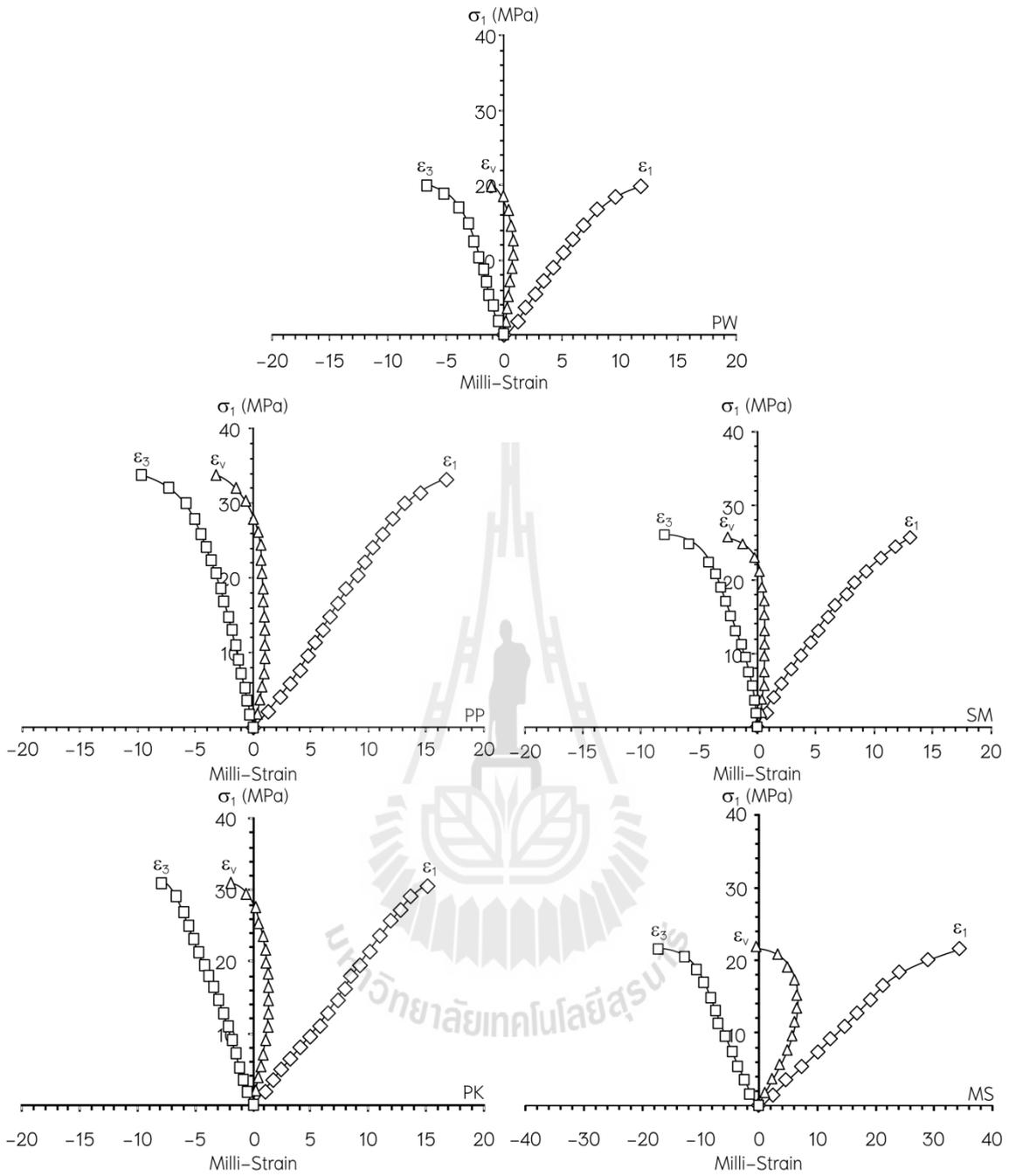
โดยที่ ε คือ ค่าความเครียด
 σ คือ ค่าความเค้น
 E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
 ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

ตารางที่ 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) จากการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและกำลังกดสูงสุดในสองแกนด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนและโครงการทดสอบแบบมาตรฐาน

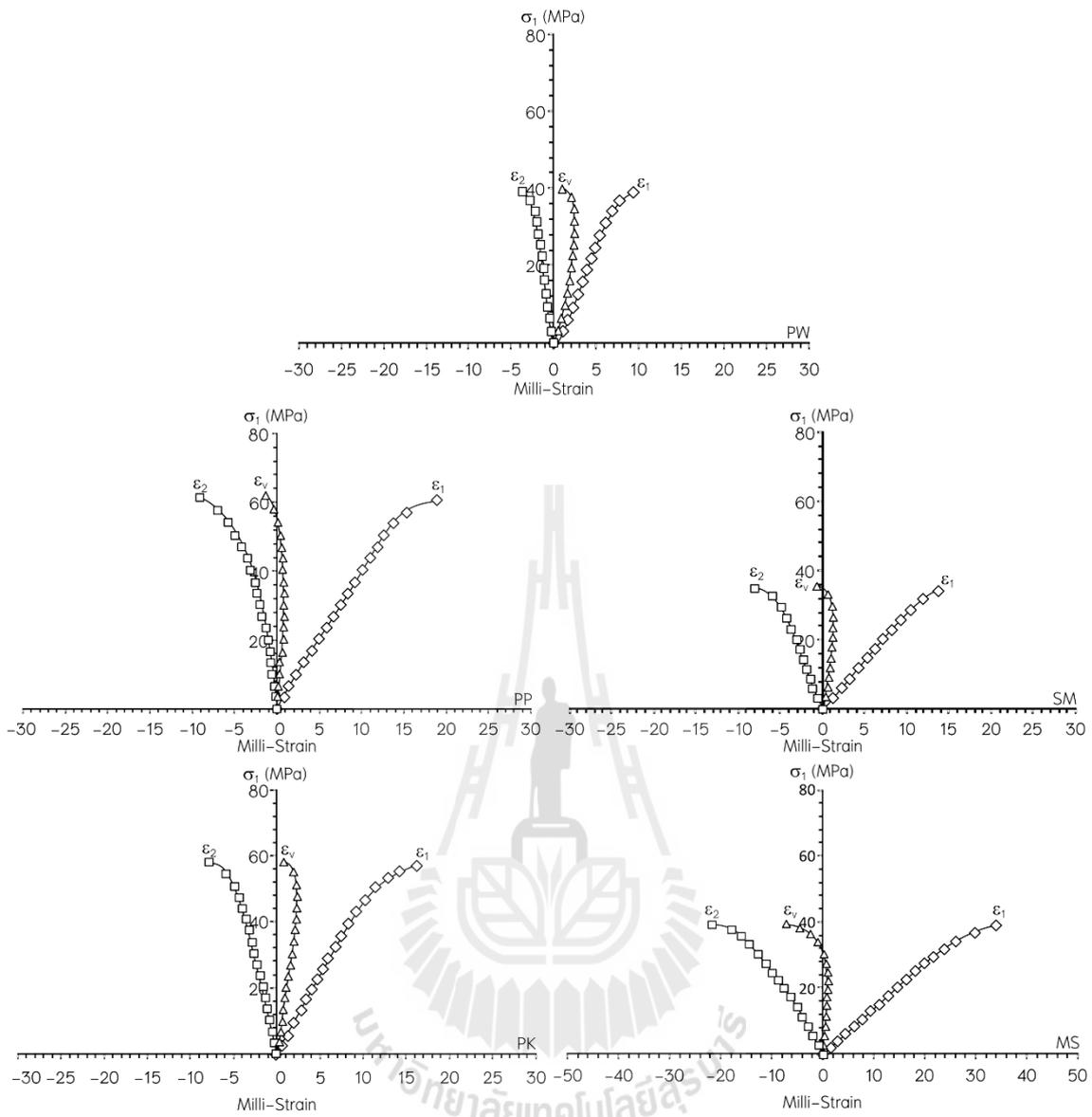
การทดสอบ	อุปกรณ์ทดสอบ	PW		PP		PK		SM		MS	
		E (GPa)	ν								
ความเค้นกดในแกนเดียว	โครงการมาตรฐาน	11.3	0.30	11.4	0.32	10.3	0.26	25.1	0.18	21.6	0.40
	อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	11.9	0.28	11.5	0.35	10.4	0.23	25.5	0.18	20.7	0.39
ความเค้นกดในสองแกน	โครงการมาตรฐาน	11.7	-	11.2	0.33	11.9	0.26	24.8	-	20.3	-
	อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน	11.2	-	10.4	-	12.1	-	-	-	20.2	0.43



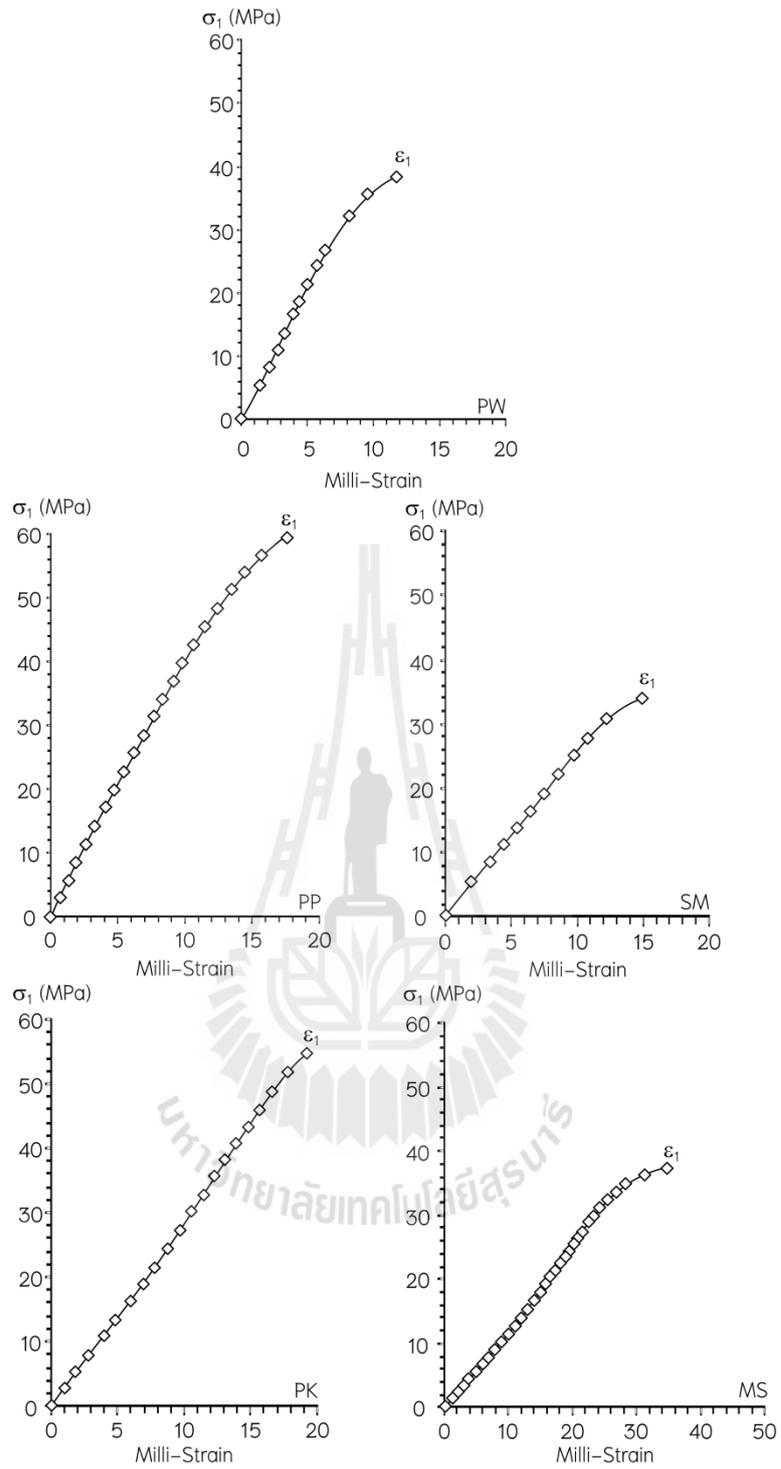
รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกดในแกนเดียวด้วยอุปกรณ์ทดสอบแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกดในแกนเดียวด้วยอุปกรณ์ทดสอบแบบใหม่



รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกดในสองแกนด้วยอุปกรณ์ทดสอบแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบการกดในสองแกนด้วยอุปกรณ์ทดสอบแบบใหม่

บทที่ 7

บทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนเพื่อใช้จำลองสภาวะของตัวอย่างหินภายใต้ความเค้นกดในสอง โดยอุปกรณ์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่นี้มีราคาถูก มีผลการทดสอบที่แม่นยำ และมีความสอดคล้องกับสภาวะความเค้นจริงในภาคสนาม โดยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้และคาดว่าจะได้รับการยอมรับในวงกว้างจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่มีกิจกรรมการก่อสร้างในชั้นหิน ได้แก่ การสร้างเขื่อน อุโมงค์ ตัดถนน ฐานราก เหมืองบนดินและเหมืองใต้ดิน เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างหิน 5 ชนิด ในการทดสอบเพื่อแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนและสาธิตว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งตัวอย่างหินได้มาจาก 5 แหล่ง คือ หน่วยหินทรายชั้นพระวิหาร หน่วยหินทรายชั้นภูพาน หน่วยหินทรายชั้นภูกระดึง หินอ่อนชุดสระบุรี และเกลือหินชุดมหาสารคาม โดยได้แบ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการออกเป็น 4 การทดสอบ ดังนี้ (1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวแบบธรรมดา (2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน (3) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกนแบบธรรมดาและ (4) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกนด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

ค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบด้วยอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบด้วยเครื่องกดทดสอบในแกนเดียวและในสองแกนแบบมาตรฐาน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการออกแบบอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนมีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบตัวอย่างหินภายใต้สภาวะความเค้นกดในสองทิศทางอย่างแท้จริง ($\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$) ผลการทดสอบที่ได้ถูกนำไปใช้ประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์หรือช่องเปิดของเหมืองใต้ดิน โดยอุปกรณ์ทดสอบที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีข้อได้เปรียบกว่าเครื่องกดทดสอบที่ใช้อยู่ทั่วไปคือมีราคาถูก สะดวกในการบำรุงรักษา ง่ายต่อการนำไปใช้ และสามารถให้แรงกดบนตัวอย่างหินในสองแกนได้อย่างแท้จริงตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ ซึ่งประสิทธิภาพของอุปกรณ์กดทดสอบที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์กดทดสอบแบบมาตรฐาน สามารถเปรียบเทียบได้จากค่าความแข็งที่ได้จากการกดทดสอบตัวอย่างหินที่มีความสอดคล้องกัน วัสดุที่เลือกใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์แบบใหม่นี้สามารถหาซื้อได้ง่ายและได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ ส่งผลให้มีราคาถูกกว่าเครื่องกดทดสอบทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดเวลาในการทดสอบกว่าเครื่องกดทดสอบทั่วไป มีความ-

สะดวกและง่ายต่อการทดสอบการกดตัวอย่างหินมากยิ่งขึ้น กล่าวคือสามารถนำตัวอย่างหินที่ต้องการกดทดสอบใส่เข้ากับชุดหัวกดทดสอบของอุปกรณ์ทดสอบ แล้วทำการกดทดสอบตัวอย่างหินโดยให้แรงด้วยก้านกระบอกลูกสูบแนวตั้งได้ทันที อีกทั้งยังมีความถูกต้อง แม่นยำ ในการตรวจวัดขณะทำการทดสอบกดตัวอย่างหินอีกด้วย

7.2 ข้อแนะนำสำหรับการวิจัยในอนาคต

อุปกรณ์กดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกนที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมานี้มีจุดด้อย คือ (1) ยังไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าความเครียดต่ำสุดที่ผิวของตัวอย่างหินที่ทำการทดสอบ (2) ไม่สามารถกดทดสอบตัวอย่างหินที่มีค่าความแข็งแรงในแกนเดียวเกิน 40 MPa (3) มีค่าความเสียหายค่อนข้างสูง (4) มีน้ำหนักมากซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าหน่วยแรงที่ทำการตรวจวัดจากการทดสอบ และ (5) มุมของคานส่งแรงมีผลต่อการทดสอบค่อนข้างมาก โดยตัวอย่างหินที่ทำการกดทดสอบจะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยข้อปรับปรุงของอุปกรณ์กดทดสอบตัวอย่างหินในสองแกนมีดังนี้ (1) ทำการปรับเปลี่ยนมาตรฐานการเคลื่อนตัวให้สามารถทำการตรวจวัดค่าความเครียดต่ำสุดที่ผิวของตัวอย่างหินทดสอบ (2) ทำการออกแบบค้ำยันหรือปรับเปลี่ยนชุดกดทดสอบตัวอย่างหินของอุปกรณ์กดทดสอบแบบใหม่ให้สามารถกดทดสอบตัวอย่างหินที่มีค่าความแข็งแรงในแกนเดียวมากกว่า 40 MPa (3) ทำการออกแบบและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบของค่าความเสียหาย (4) ทำการปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ให้มีน้ำหนักเบาขึ้นและมีความแข็งแรงทนทานมากกว่าวัสดุเดิม และ (5) อาจจะมีการออกแบบชุดหัวกดทดสอบแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบมุมของคานส่งแรง เป็นต้น

ในอนาคตอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนสามารถทำการทดสอบหาผลกระทบของหินภายใต้การทดสอบสภาวะความเค้นในสองแกนจริง (Biaxial creep testing) สำหรับตัวอย่างหินที่มีความยืดหยุ่นสูงเช่นเกลือหิน การทดสอบตัวอย่างหินชนิดอื่นก็มีความสำคัญ โดยสามารถผันแปรขนาดของตัวอย่างหินที่ทำการทดสอบตั้งแต่ 25×25×25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึง 65×65×100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อเน้นความหลากหลายของชนิดหินที่แพร่กระจายในประเทศไทย และเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ด้านนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เพ็ญขจร (2546). กลศาสตร์หินพื้นฐาน, บริษัท อีซีเอ็นพีเอ็นท์ โปรดักส์, กรุงเทพฯ
- 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. *International Journal of Coal Geology*, Volume 58, Issue 4, pp. 245–250.
- Alsayed, M.I. (2002). Utilising the hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 39, Issue 3, pp. 355–366.
- ASTM D 4543–08 (2008). Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.09.
- ASTM D 7012–04 (2010). Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.09.
- ASTM D 7012–10 (2010). Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.09.
- Bobet, A. and Einstein, H.H. (1998). Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 47, Issue 7, pp. 863–888.
- Brown, E. T. (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM suggested methods. The commission on rock testing method. *International Society of Rock Mechanics*, Pergamon Press, Oxford.
- Cai, M. (2008). Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries–Insight from numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 45, pp. 763–772.

- Chang, C. and Haimson, B. (2005). Non-dilatant deformation and failure mechanism in two Long Valley Caldera rocks under true triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 42, pp. 402–414.
- 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. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 39, pp. 695–729.
- Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T. and Labuz, J.F. (2002). Simulation of failure around a circular opening in rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 39, pp. 507–515.
- Haimson, B. (2006). True triaxial stresses and the brittle fracture of rock. *Pure and Applied Geophysics*, Volume 163, pp. 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. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 37, Issue 1–2, pp. 285–296.
- Hibbeler, R. C. (2008). *Mechanics of Materials*. Prentice–Hall, Singapore, 910 pp.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Engineering Mechanics Statics*. Prentice–Hall, Singapore, 655 pp.
- Hoek, E. and Franklin, J.A., (1968). A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Volume 77, pp. A22–26.
- ISRM (1981). Suggested Method for Rock Characterization. Testing and Monitoring. Pergamon, Oxford.
- Kemthong, R. and Fuenkajorn, K. (2007). Prediction of joint shear strengths of ten rock types using field-identified parameters. *Proceedings of the First Thailand Rock Mechanics Symposium*. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology, pp. 195–209.

- Kulatilake, P.H., Park, J. and Malama, B. (2006). A new rock mass failure criterion for biaxial loading conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 24, pp. 871–888.
- Kwasniewski, M., Takahashi, M., and Li, X. (2003). Volume changes in sandstone under true triaxial compression conditions. ISRM 2003–Technology Roadmap for Rock Mechanics. *South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 683–688.
- Mogi, K. (1967). Effect of the intermediate principal stress on rock failure. *Journal of Geophysical Research*, Volume 72, No. 20, pp. 5117–5131.
- Mogi, K. (1971). Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Journal of Geophysical Research*, Volume 76, No. 5, pp. 1255–1269.
- Rao, K.S. and Tiwari, R.P. (2002). *Physical simulation of jointed model materials under biaxial and true triaxial stress states*. Research Report, IIT Delhi, India. p. 30.
- Sahouryeh, E., Dyskin, A.V. and Germanovich, L.N. (2002). Crack growth under biaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 69, Issue 18, pp. 2187–2198.
- Sibai, M., Henry, J.P. and Gros, J.C. (1997). Hydraulic fracturing stress measurement using a true triaxial apparatus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 34, Issue 3–4, pp. 289.e1–289.e10.
- Song, I. and Haimson, B.C. (1997). Polyaxial strength criteria and their use in estimating in situ stress magnitudes from borehole breakout dimensions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 34, Issue 3–4, pp. 116.e1–116.e16.
- Sriapai, T., Samsri, P. and Fuenkajorn, K. (2011). Polyaxial strengths of Maha Sarakham salt. *Proceedings of the Third Thailand Rock Mechanics Symposium*. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology, pp. 79–87.
- Thosuwan, R. (2009). *Development of true triaxial load frame using cantilever system*. M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand. p. 34.

- Tiwari, R.P. and Rao, K.S. (2004). Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 41, No. 3, p. 433.
- Tiwari, R.P. and Rao, K.S. (2006). Post failure behavior of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement. *Engineering Geology*, Volume 84, pp. 112–129.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwat, R. and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses. *Proceedings of the Second Thailand Rock Mechanics Symposium*. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology, pp. 199–218.
- Wawersik, W. R., Carlson, L.W., Holcomb D. J. and Williams, R.J. (1997). New method for true-triaxial rock testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Volume 34, Issue 3, pp. 365–365.
- Wiebols, G.A. and Cook, N.G.W. (1968). An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 5, Issue 6, pp. 529–549.
- Yun, X., Mitri, H.S., Yang, X. and Wang, Y. (2010). Experimental investigation into biaxial compressive strength of granite. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 47, No. 2, pp. 334–341.
- Zhu, W.C., Liu, J., Tang, C.A., Zhao, X.D. and Brandy, B.H. (2005). Simulation of progresses around underground excavations under biaxial compression. *Tunnelling and underground space technology*, Volume 20, Issue 3, pp. 231–247.

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คู่มือการใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน

คู่มือการใช้อุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกนรูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์กดตัวอย่างหินในสองแกน โดยวิธีการทดสอบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

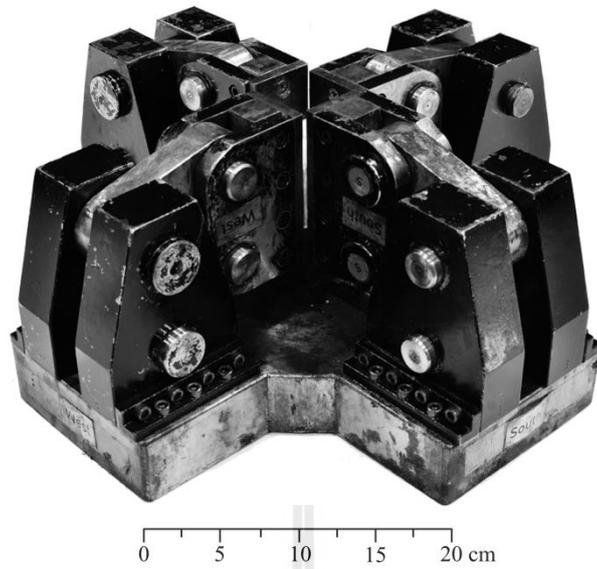
- 1.1 ตัวอย่างหินที่จะนำมาใช้ในการทดสอบต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous)
- 1.2 ค่าความแข็งของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในระดับปานกลาง (ค่าความแข็งในแกนเดียวไม่เกิน 40 MPa)
- 1.3 นำหินที่จะทดสอบมาตัดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดตั้งแต่ $25 \times 25 \times 25$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึง $65 \times 65 \times 100$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยตัวอย่างหินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยแสดงดังรูปที่ 2
- 1.4 วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหินที่ต้องการทดสอบ พร้อมทั้งทำการจดบันทึกค่าและหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหินชนิดนั้นๆ

2. การติดตั้งตัวอย่างหิน

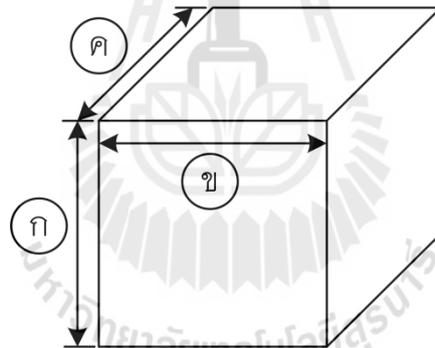
- 2.1 ติดแผ่นลดแรงเสียดทานเข้ากับตัวอย่างหินที่ต้องการจะทดสอบเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชุดหัวกดทดสอบกับตัวอย่างหิน
- 2.2 นำตัวอย่างหินที่ได้จากการจัดเตรียมมาใส่ในอุปกรณ์ทดสอบ
- 2.3 ยกชุดหัวกดให้อยู่ตำแหน่งสูงสุด จากนั้นนำตัวอย่างหินมาใส่ระหว่างกลางของชุดหัวกดทดสอบ
- 2.4 ปรับตำแหน่งชุดหัวกดลงมาประกบหน้าของตัวอย่างหิน โดยปรับระดับชุดหัวกดให้อยู่ในตำแหน่งที่เท่ากันในแนวระนาบ (รูปที่ 3)

3. การทดสอบความเค้นกดในแกนเดียวและความเค้นกดในสองแกน

- 3.1 กำหนดทิศทางของชุดหัวกดทั้งสี่ด้าน คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก
- 3.2 การทดสอบความเค้นกดในแกนเดียวจะใช้ชุดหัวกดทดสอบสองด้าน คือ ทิศเหนือ-ใต้ หรือทิศตะวันออก-ตะวันตก
- 3.3 การทดสอบความเค้นกดในสองแกนจะใช้ชุดหัวกดทดสอบทั้งสี่ด้าน



รูปที่ 1 องค์ประกอบของอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน



รูปที่ 2 ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบกำลังกดในสองแกน

- (ก) สามารถปรับแปรขนาดตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ถึง 100 มิลลิเมตร
- (ข) สามารถปรับแปรขนาดตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ถึง 65 มิลลิเมตร
- (ค) สามารถปรับแปรขนาดตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ถึง 65 มิลลิเมตร

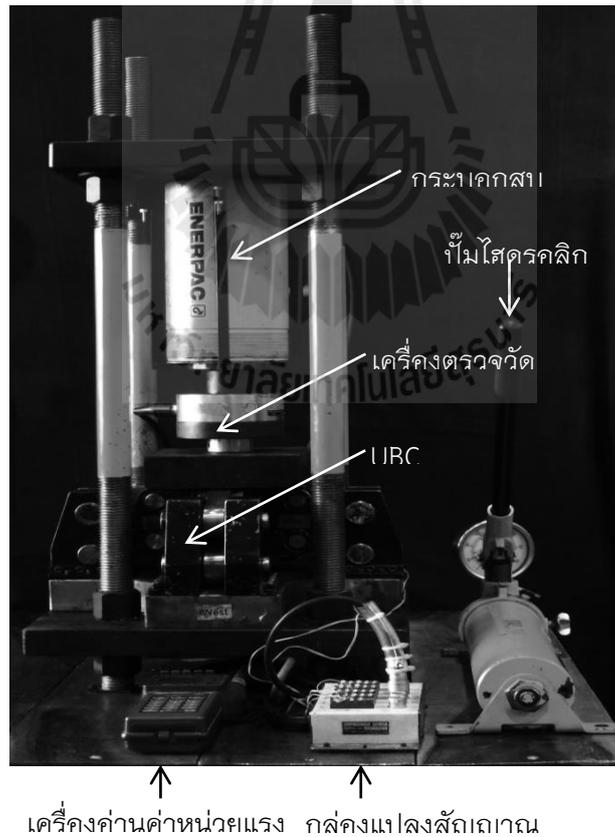


รูปที่ 3 การนำตัวอย่างหินใส่ในชุดหัวกวดของอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน

- 3.4 เมื่อติดตั้งตัวอย่างหินลงในอุปกรณ์ทดสอบแล้ว นำแผ่นลดแรงเสียดทานใส่บนชุดหัวกวดเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างชุดหัวกวดกับแผ่นเหล็ก
- 3.5 นำแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางไว้บนชุดหัวกวด โดยปรับระยะของแผ่นเหล็กให้อยู่ตรงกลางอุปกรณ์ทดสอบพอดี
- 3.6 ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (ความละเอียด 0.01 kN) และมาตรวัดการเคลื่อนตัว (ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร)
- 3.7 เริ่มทำการทดสอบโดยให้แรงในแนวตั้งจากปั๊มไฮดรอลิก
- 3.8 อ่านข้อมูลที่ได้ตรวจวัดจากมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและเครื่องตรวจวัดแรง พร้อมทั้งจดบันทึกข้อมูล
- 3.9 ทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ
- 3.10 ถอดมาตรวัดการเคลื่อนตัวออกจากโครงกวดทดสอบ
- 3.11 ปลดความดันจากปั๊มไฮดรอลิก แล้วนำเครื่องตรวจวัดแรงและแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสออกจากโครงกวดทดสอบ
- 3.12 นำตัวอย่างหินออกจากอุปกรณ์กวดตัวอย่างหินในสองแกน เพื่อนำไปวิเคราะห์เกณฑ์เกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินและบันทึกข้อมูลอื่นๆ ต่อไป

4. การตรวจวัดอุปกรณ์ทดสอบตัวอย่างหินในสองแกน

- 4.1 การตรวจวัดแรงในแนวตั้งจากโครงกดทดสอบที่กดลงบนอุปกรณ์ทดสอบ โดยนำเครื่องตรวจวัดแรง (Load cell) วางไว้บนแผ่นเหล็ก โดยเชื่อมต่อกับระบบเครื่องตรวจวัดแรงกับเครื่องอ่านค่าหน่วยแรง (Digital force meter) และกล่องแปลงสัญญาณ (Switching box) แสดงดังรูปที่ 4
- 4.2 ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง โดยค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จะถูกนำไปหาค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนของตัวอย่างหินที่ได้จากขั้นตอนการสอบเทียบอุปกรณ์ทดสอบ
- 4.3 ให้แรงในแนวตั้งจากปั๊มไฮดรอลิก โดยให้ก้านกระบอกสูบแนบติดกับเครื่องตรวจวัดแรง
- 4.4 ทำการตั้งค่าเริ่มต้นที่ศูนย์ของมาตรวัดการเคลื่อนตัวและเครื่องอ่านค่าหน่วยแรง
- 4.5 เริ่มทำการทดสอบ พร้อมทั้งอ่านและจดบันทึกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากมาตรวัดการเคลื่อนตัวและเครื่องอ่านค่าหน่วยแรงทุกๆ อัตราการให้แรง 0.5 ถึง 1.0 MPa/s ตามมาตรฐาน ASTM D7012-10



รูปที่ 4 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์กดหินในสองแกนกับโครงกดทดสอบทั่วไปในแกนเดียว เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งสูงสุดในสองแกนของตัวอย่างหิน

5. การคำนวณและเสนอผลการทดสอบ

5.1 นำผลที่ได้จากการอ่านค่าและจุดบันทึกการทดสอบจากเครื่องตรวจวัดแรงและมาตรวัดการเคลื่อนตัวมาคำนวณหาค่าความแข็งแรงของตัวอย่างหินตามประเภทของการทดสอบดังนี้ (1) การทดสอบความเค้นกดในแกนเดียวดังสมการ (1) และ (2) การทดสอบความเค้นกดในสองแกนดังสมการ (2) ดังนี้

$$F_{\text{conventional}} = 1.52F_{\text{UBC}} \quad (1)$$

$$F_{\text{conventional}} = 2.56F_{\text{UBC}} \quad (2)$$

โดยที่ $F_{\text{conventional}}$ คือ แรงจากโครงกดทดสอบแบบมาตรฐาน (kN)
 F_{UBC} คือ แรงจากอุปกรณ์กดทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้น (kN)

5.2 นำค่าความแข็งแรงที่ได้จากการคำนวณแต่ละประเภทการทดสอบลงจุดแสดงค่าความแข็งแรงของตัวอย่างหินทดสอบแต่ละชนิดและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5.3 คำนวณหาความสัมพันธ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) จากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain curve) พร้อมทั้งแสดงในรูปของตารางผลการทดสอบ โดยค่าสัมพันธ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราปัวซองสามารถคำนวณได้จากสมการ (3) (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

$$\varepsilon = \sigma/E - \nu\sigma/E \quad (3)$$

โดยที่ ε คือ ค่าความเครียด
 σ คือ ค่าความเค้น
 E คือ ค่าสัมพันธ์ความยืดหยุ่น
 ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

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