



รหัสโครงการ 2-1/53

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด

Invention of Loading Device for
Testing Rock Tensile Strength under Compression

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2553

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2552 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัย-
กลศาสตร์ธรณี ในการประดิษฐ์และทดสอบผล และ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงาน
การวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย
กุมภาพันธ์ 2553

บทคัดย่อ

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดถูกออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อให้ความเค้นดึงในแกนเดียวต่อตัวอย่างหินที่มีรูปร่างแบบ Dog-bone อุปกรณ์นี้สามารถวัดสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของภายใต้ความเค้นดึงในแกนเดียวและความเค้นกดในแกนเดียวในตัวอย่างหินก้อนเดียวกัน ความสามารถของอุปกรณ์ดังกล่าวถูกประเมินด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาลำดับและคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของตัวอย่างหินที่จัดเตรียมจากหินทรายชุดภูพาน หินอ่อนจากสระบุรี และหินปูนจากสระบุรี โดยมีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อกำหนดขนาด รูปร่าง และตัวอย่างหินที่เหมาะสม ที่ให้ความเค้นดึงในทิศทางเดียวที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน และมีการแตกภายใต้แรงดึงที่จุดกึ่งกลางก่อนที่จะเกิดการแตกภายใต้แรงเฉือนที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างหิน ผลที่ได้ระบุว่า อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ โดยหินทุกชนิดที่ทดสอบค่ากำลังดึงแบบตรงในแกนเดียวจะมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบแบบบราซิลและแบบวงแหวนอย่างชัดเจน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองภายใต้แรงดึงในแกนเดียวจะต่ำกว่าค่าที่ได้ภายใต้แรงกดในแกนเดียว ความแตกต่างนี้สัมพันธ์กับปริมาณและการกระจายตัวของความพรุนและรอยร้าวในเนื้อหิน หินทรายที่มีรูพรุนและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดหินต่ำจะมีความแตกต่างระหว่างความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงในแกนเดียวกับความยืดหยุ่นภายใต้แรงกดในแกนเดียวสูง ในขณะที่หินที่มีเนื้อแน่นกว่าได้แก่หินอ่อนและหินปูนที่ทดสอบจะมีความแตกต่างระหว่างความยืดหยุ่นดังกล่าวต่ำกว่า ซึ่งปรากฏการณ์นี้บ่งชี้ว่าความพรุนในเนื้อหินสามารถขยายตัวออกภายใต้แรงดึงได้ง่ายกว่าการยุบตัวภายใต้แรงกด ด้วยเหตุนี้ หินจึงมีความยืดหยุ่นหรือความเหนียวภายใต้แรงกดสูงกว่าภายใต้แรงดึง

Abstract

A compression-to-tension load converter is developed in this research to apply unidirectional tensile stress to dog-bone shaped rock specimen. The device also allows a measurement of the rock elastic modulus and Poisson's ratio under uniaxial tensile and compressive stresses on the same specimen. Its performance is assessed by laboratory determining direct tensile strength and stiffness of the intact specimens prepared from Phu Phan sandstone, Saraburi limestone and Saraburi marble. A series of finite difference analyses is performed to obtain the specimen configurations that provide unidirectional tensile stresses at the specimen mid-section, and that the tensile failure is induced in the mid-section before any compressive shear failure occurs at the specimen ends. The results indicate that the CTC device well performs in accordance with the proposed objective as evidenced by the test results. For all tested rocks the direct tensile strengths are clearly lower than the Brazilian and ring tensile strengths. The elastic moduli and Poisson's ratios under uniaxial tension are lower than those under uniaxial compression. The discrepancies relate to the amount and distribution of the pore spaces and micro-fissures, and the bond strength of cementing materials. The porous and relatively poor-bonding sandstone shows a greater difference between the tensile and compressive elastic moduli compared to those of the dense and well bonding marble and limestone. It is postulated that the effort required to dilate the pore spaces under tensile loading is lower than that to contract them under compressive loading. As a result these rocks tend to be stiffer under compression than under tension.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล.....	9
2.2 การทดสอบกำลังดึงแบบสี่จุดกด.....	10
2.3 การทดสอบดึงแบบวงแหวน.....	11
2.4 การทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยน.....	11
2.5 ข้อดีของการทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	12
บทที่ 3 การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบกำลังภายใต้แรงกด	13
3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์.....	13
3.2 รายละเอียดในการออกแบบ.....	13
3.3 ข้อดีของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	27
4.1 วัตถุประสงค์.....	27
4.2 แบบจำลอง.....	27
4.3 ผลการจำลอง.....	27
บทที่ 5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	33
5.1 วัตถุประสงค์.....	33
5.2 ตัวอย่างหิน.....	33
5.3 การทดสอบกำลังดึงในทิศทางเดียว.....	33
5.4 การทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกด.....	36
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลงานวิจัย.....	41
บรรณานุกรม.....	43
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด.....	ก-1
ภาคผนวก ข การประชาสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี.....	ข-2
ภาคผนวก ค บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการระหว่างประเทศ.....	ค-1
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่ากำลังกดของวิธีการทดสอบแบบตรงและแบบอ้อม	34
5.2 คุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกด	40
ข-1 ผู้เข้าอบรมถ่ายถอดเทคโนโลยีอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด	ข-3

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน.....	15
3.2 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน.....	16
3.3 ภาพแยกองค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด.....	17
3.4 ภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดในขณะ ที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน.....	19
3.5 ภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดในขณะ ที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน.....	20
3.6 ภาพด้านล่างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด.....	21
3.7 ภาพด้านบนของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด.....	22
3.8 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน.....	23
3.9 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน.....	24
4.1 รูปร่างและขนาดของแบบจำลองของตัวอย่างหิน แบบที่ 1 และแบบที่ 2.....	28
4.2 โค้งขยายแบบจำลอง แบบที่ 1 และแบบที่ 2.....	28
4.3 เวกเตอร์ความเค้น แบบที่ 1 และแบบที่ 2.....	29
4.4 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 1 ภายใต้แรงดึง.....	30
4.5 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 1 ภายใต้แรงกด.....	30
4.6 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 3 ภายใต้แรงดึง.....	30
4.7 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 3 ภายใต้แรงกด.....	31
5.1 ตัวอย่างหิน หินปูนจากสระบุรี หินอ่อนจากสระบุรี และหินทรายภูเขา.....	34
5.2 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบตรง หินทรายภูเขา หินอ่อนจากสระบุรี และหินปูนจากสระบุรี.....	35
5.3 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินทรายภูเขา.....	37
5.4 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินอ่อนจากสระบุรี.....	38
5.5 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินปูนจากสระบุรี.....	39

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 องค์ประกอบของการทดสอบหากำลังดึงภายใต้แรงกด.....	ก-1
ก-2 องค์ประกอบของการทดสอบหาคุณสมบัติความยืดหยุ่นและกำลังดึง.....	ก-2
ข-1 การอบรมและเผยแพร่วิธีการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติของหินภายใต้แรงกด	ข-1
ข-2 การเข้าเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 4.....	ข-2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ค่ากำลังดึงสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างใต้ดิน ค่าเหล่านี้จะเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบความกว้างสูงสุดของอุโมงค์ที่เจาะอยู่ในชั้นหิน ในปัจจุบันค่ากำลังดึงสูงสุดแบบตรง (Direct tensile strength) ของหินไม่สามารถหาได้โดยง่ายเนื่องจากตัวอย่างหินที่ได้มามักจะเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งได้จากหลุมเจาะสำรวจในมวลหิน การดึงแท่งตัวอย่างหินให้ขาดและมีการกระจายตัวของความเค้นตามแนวรอยแตกให้มีความสม่ำเสมอเป็นสิ่งทำได้ยาก ดังนั้นในทางปฏิบัติที่ผ่านมาจึงนิยมใช้การทดสอบกำลังดึงแบบอ้อม อาทิ การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (Brazilian tension test) การทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวน (Ring tension test) และการทดสอบกำลังดึงแบบการงอด้วยการกดสี่จุด (Four-point bending test) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวความเค้นที่กระจายตัวอยู่บนรอยแตกจะไม่มีค่าสม่ำเสมอ โดยมีการผันแปรในเชิงพื้นที่ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของ ผลกระทบของ "Stress gradient" นอกจากนี้รอยแตกจะไม่อยู่ในสภาวะความเค้นดึงอย่างบริสุทธิ์ โดยส่วนใหญ่จะมีความเค้นกดในทิศทางตั้งฉากเข้ามาประกอบด้วย

การทดสอบกำลังดึงแบบตรงสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถทดสอบคุณสมบัติความแข็งและความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกดของวัสดุทางวิศวกรรม เช่น เหล็ก คอนกรีต เซรามิก และวัสดุสังเคราะห์ทั่วไป เครื่องทดสอบดังกล่าวมักจะมีราคาสูง (หลายล้านบาท) ถึงแม้จะเป็นเครื่องที่มีขนาดเล็กก็ตาม ส่วนเครื่องให้แรงดึงที่มีขนาดใหญ่อาจมีราคาสูงหลายสิบล้านบาทขึ้นกับอุปกรณ์เสริมที่นำมาช่วยในการตรวจวัด ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ เครื่องที่สามารถให้แรงกดเพียงอย่างเดียวจะมีราคาค่อนข้างถูก (หลักหมื่นบาท) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องที่มีขนาดเล็กและใช้แม่แรงแบบมือกดและมีกำลังแรงไม่สูงนัก แต่เครื่องกดราคาถูกเหล่านี้ไม่สามารถทดสอบกำลังดึงแบบตรงของหินได้

ในขบวนการการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างหิน เครื่องที่มีอยู่ในปัจจุบันมีข้อเสียและข้อจำกัดหลายประการ คือ

- 1) เครื่องทดสอบกำลังกดและกำลังดึงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถใช้ทดสอบคุณสมบัติของหินภายใต้แรงดึงได้ เนื่องจากหินเป็นวัสดุที่มีความเปราะ ส่วนใหญ่มีค่ากำลังดึงน้อยกว่ากำลังกดกว่า 10 เท่า ไม่สามารถนำมาตัดหรือหล่อหลอมให้เป็นแผ่นบางยาวที่มีปลายกว้างกว่าส่วนกลาง ไม่สามารถนำมาเจาะรูกลมขนาดเล็กเพื่อเกี่ยวกับคานในเครื่องกดทดสอบด้วยเหตุนี้ตัวอย่างหินจึงไม่สามารถนำมาดึงด้วยเครื่องที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้

2) เครื่องที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติภายใต้แรงกดไปสู่ภายใต้แรงดึงได้อย่างต่อเนื่องภายในตัวอย่างทดสอบเดียวกันสำหรับวัสดุเปราะ เช่น คอนกรีตและหิน เนื่องจากรูปร่างของตัวอย่างที่กำหนดสำหรับการทดสอบภายใต้แรงดึงจะต่างกับรูปร่างของตัวอย่างที่เหมาะสมในการทดสอบภายใต้แรงกด

3) เครื่องทดสอบที่ให้แรงดึงได้มักจะมีราคาสูงมาก ซึ่งจะมีอยู่ที่สถาบันการศึกษาและสถาบันวิจัยใหญ่ๆ เท่านั้น ผู้ประกอบการขนาดเล็ก เช่น บริษัทที่ปรึกษาทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี ส่วนใหญ่จะไม่มีเครื่องที่สามารถให้แรงดึง แต่ผู้ประกอบการขนาดเล็กเหล่านี้มักจะมีเครื่องให้แรงกดขนาดเล็ก ซึ่งจะมีราคาถูกกว่ามาก แต่เครื่องให้แรงกดเพียงอย่างเดียวก็ไม่สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติของหินภายใต้แรงดึงได้

4) เนื่องจากการที่ไม่สามารถดึงหินในแนวตรงได้ จึงมีการค้นคิดกรรมวิธีทางอ้อมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติกำลังดึงสูงสุด และความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของตัวอย่างหิน เช่น การดึงทางอ้อมแบบบราซิล การกดคานหินแบบสี่จุด การดึงแบบวงแหวน แต่กรรมวิธีทางอ้อมเหล่านี้ไม่สามารถให้แรงดึงอย่างแท้จริงต่อตัวอย่างหิน กล่าวคือ ความเค้นดึงบนหน้าตัดของแนวที่จะทำให้เกิดรอยแตกจะไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่จะผันแปรไปตามระยะทางบนหน้าตัดนั้น ซึ่งเรียกว่าผลกระทบของ "Stress Gradient" ส่งผลให้ค่ากำลังดึงสูงสุดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่ากำลังดึงสูงสุดที่ได้จากการดึงแบบแนวตรงหลายเท่า ค่าเหล่านี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลหินในภาคสนาม นอกจากนี้ กรรมวิธีทางอ้อมเหล่านี้จะไม่สามารถให้ความเค้นดึงแบบบริสุทธิ์ แต่มักจะมีความเค้นกดในทิศทางที่ตั้งฉากกับความเค้นดึงเสมอ ส่งผลให้ค่ากำลังดึงสูงสุดที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากค่าจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ 1) เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดให้สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องทดสอบขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทั่วไปที่มีราคาถูกและใช้กันอย่างแพร่หลาย และ 2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและขีดความสามารถของอุปกรณ์ดังกล่าวโดยการทดสอบหาค่ากำลังดึงสูงสุดแบบตรง และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการ การทดสอบนี้จะดำเนินการควบคู่กับผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) การประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถดึงแท่งตัวอย่างหินทุกชนิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร (ขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบหินทั่วไป) ให้ขาดออกจากกัน และมีค่าความเค้นดึงที่เท่ากันตามแนวรอยแตก

2) ใช้โปรแกรม Solid Work เพื่อช่วยในการออกแบบรายละเอียดและองค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ

3) กำหนดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FLAC) เพื่อกำหนดรูปร่างและขนาดของตัวอย่างหินที่เหมาะสม

4) ทดสอบประสิทธิภาพและขีดความสามารถของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยมีการทดสอบตัวอย่างหินไม่ต่ำกว่า 3 ชนิด ในแต่ละชนิดมีการทดสอบไม่ต่ำกว่า 5 ตัวอย่าง

5) จัดอบรมแก่บุคลากรในองค์กรของรัฐบาลหรือประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและนำเทคโนโลยีนี้เผยแพร่แก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง

6) เขียนคู่มือการใช้เครื่องมืออย่างละเอียดและเป็นขั้นตอนโดยมีรูปถ่ายประกอบ

7) ยื่นจดสิทธิบัตรเครื่องมือ วิธีการใช้ และวิธีการประมวลผล

8) เผยแพร่เทคโนโลยีโดยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะแบ่งการค้นคว้าและศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นหลัก คือ วิธีการทดสอบแบบดึงทางอ้อม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหินเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ภายใต้แรงดึงทุกประเด็นจะถูกนำมาศึกษาและค้นคว้าหาข้อสรุปเพื่อให้ทราบว่ามีการวิจัยใดบ้างที่คล้ายคลึงกันและจะมีประโยชน์อย่างไรต่องานวิจัยที่นำเสนอ โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้จะนำมาแสดงอย่างละเอียดในรายงานขั้นสุดท้าย ส่วนรายงานของเอกสารอ้างอิงที่สมบูรณ์จะเขียนในรูปของบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบระบบกลไกการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด

การออกแบบจะใช้โปรแกรม Solid work สร้างเป็นแบบขึ้นมา โดยทุกชิ้นส่วนจะมีการคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety) เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย โดยมีข้อกำหนดสำคัญ (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ

- สามารถเปลี่ยนจากแรงกดเป็นแรงดึงได้โดยตรง
- วัสดุทำจากเหล็กแข็งที่ไม่มีการยุบตัวเมื่อมีแรงกดสูง
- มีกลไกที่สามารถเปลี่ยนจากแรงดึงกลับมาเป็นแรงกดได้
- ทนทานและมีราคาถูก

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

มีการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างหินเพื่อกำหนดรูปร่างและขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับขนาดและข้อกำหนดของอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FLAC) เข้ามาศึกษา โดยในเบื้องต้นนี้จะสมมติให้หินมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดตามที่ออกแบบ

เมื่อทำการออกแบบแล้วเสร็จ จะดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบตามข้อกำหนดทั้งหมดในขั้นตอนที่ 2 ที่ห้องปฏิบัติการ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิศวกรเป็นผู้ดูแลและควบคุมการสร้างอย่างถูกต้อง แม่นยำ และปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 5 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ผู้วิจัยจะดำเนินการจัดเตรียมตัวอย่างหินเพื่อนำมาทดสอบ โดยมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อแสดงขีดความสามารถของเครื่องและเพื่อสาธิตว่าเครื่องสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม ด้วยการคัดเลือกตัวอย่างหิน 3 ชนิด มาใช้ในการทดสอบ โดยนำมาเจาะและตัดให้มีเรียบ จากนั้นนำตัวอย่างหินไปกลึงเพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการก่อนทำการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ภายใต้แรงดึง

ในขั้นตอนนี้ได้มีการทดสอบกำลังดึงแบบตรงเพื่อหาค่ากำลังดึงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้กำลังดึงของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ชนิดละไม่ต่ำกว่า 5 ตัวอย่าง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังดึงแบบอ้อม

ขั้นตอนที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 6 เสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำผลมาทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือ และความแม่นยำของค่าที่วัดได้ และอธิบายความแตกต่างของกำลังดึงของหินแบบตรงกับกำลังดึงของหินแบบอ้อม

ขั้นตอนที่ 8 การเขียนคู่มือสำหรับการใช้งาน

ดำเนินการร่างคู่มือการใช้อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษเพื่อเตรียมพร้อมในการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ขั้นตอนที่ 9 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ คือ

- 1) อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด
- 2) คู่มือการทดสอบซึ่งพร้อมที่จะผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
- 3) บทความตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ 1 ฉบับ
- 4) บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ 1 ฉบับ
- 5) องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกำลังดึงสูงสุดของหินแบบตรงที่จะนำไปสู่การพัฒนาบัณฑิตศึกษาในอนาคต
- 6) สิทธิบัตรของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

และผลงานวิจัยที่เสนอมานี้ยังมีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี ดังนี้

1) แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเป็นอุปกรณ์ที่จะใช้ทดสอบหาลำดับกำลังดึงแท้จริงโดยไม่จำเป็นต้องซื้อเครื่องมือทดสอบกำลังดึงที่มีอยู่ในท้องตลาดซึ่งมีราคาสูงมาก ทำให้หน่วยงาน และผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็กที่เกี่ยวข้องสามารถเป็นเจ้าของเพื่อใช้ในการทดสอบได้โดยง่ายและประหยัดงบประมาณ

2) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาในงานวิจัยนี้สามารถนำมาทดสอบหาค่ากำลังดึงที่แท้จริงได้ รวมไปถึงการหาคณะสมบัติเชิงกลศาสตร์ต่างๆ ที่อยู่ภายใต้แรงดึง ซึ่งส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น และจะเป็นเครื่องแรกในโลก

3) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

ผู้วิจัยได้จัดอบรมหลักสูตรระยะสั้น เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีให้เกิดความเข้าใจระบบการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดให้กับหน่วยงานราชการ เช่น กรมชลประทาน กรมทางหลวง กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงบริษัทน้ำมันทั้งในและต่างประเทศ และสถาบันการศึกษาที่มีความสนใจด้านกลศาสตร์หิน เช่น สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่จะสามารถนำเครื่องมือนี้ไปใช้ในหน่วยงานเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป อย่างเป็นรูปธรรม

4) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เผยแพร่หลักการและวิธีการทดสอบหินด้วยอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด รวมถึงการนำผลการทดสอบไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางวิศวกรรมที่อยู่ภายใต้แรงดึง ส่งผลให้การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น หน่วยงานที่สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ประโยชน์ได้จริง ได้แก่ บริษัทเหมืองแร่ และบริษัทที่ปรึกษาด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีต่างๆ

5) นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

อุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นจะนำไปสู่การจดสิทธิบัตร และจำหน่ายให้หน่วยงานและองค์กรต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและ
สหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง
พลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธาและ
วิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 8) ศูนย์วิจัย บริษัทเหมืองแร่ และบริษัทที่ปรึกษาในต่างประเทศ

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้สรุปวิธีการทดสอบกำลังดึงของหินที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล การทดสอบกำลังดึงแบบกดสี่จุด การทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวน และการทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยน โดยข้อดีของวิธีต่างๆ ได้สรุปไว้ในส่วนท้ายของบทนี้

2.1 การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล

การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (Brazilian tensile test) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหา กำลังดึงสูงสุดของหินที่จุดวิบัติ (Brazilian tensile strength) การทดสอบเช่นนี้ถูกพิจารณาว่าเป็น การทดสอบความเค้นดึงสูงสุดของหินโดยอ้อม แต่ก็นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถ ทดสอบได้ง่าย ตัวอย่างหินจะมีรูปร่างเป็นแผ่นกลม ISRM กำหนดว่าตัวอย่างหินควรมี เส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 54 มิลลิเมตร และมีความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.50 มาตรฐาน ASTM จะกำหนดให้ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 49 มิลลิเมตร และมี L/D อยู่ระหว่าง 0.50-0.75 โดยใช้ตัวอย่างหินมากกว่า 10 ชิ้น สำหรับหินแต่ละชนิด วิธีการ ทดสอบคือ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราประมาณ 0.5-1.0 MPa/s ตัวอย่างหินจะสัมผัสกับแท่นกดของเครื่องกดเป็นแนวเส้นซึ่งเป็นลักษณะของ Line load แรงกด จะทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการกด ความเค้นดึงนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุด กึ่งกลางของวงกลม และที่จุดนี้也将มีความเค้นกดอยู่ในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของการกด ซึ่งจะตั้ง ฉากกับความเค้นดึงและมีขนาดเป็น 3 เท่า ของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ความเค้น สำหรับตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลจะอยู่ในสมมติฐานของความเค้นระนาบ (Plane stress) ดังนั้น ความเค้นที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นวงกลมจะมีค่าเป็นศูนย์

ถ้าตัวอย่างหินอยู่ภายใต้แรงกดเท่ากับ P ที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างหิน ความเค้น ดึงที่ตั้งฉากอยู่กับแนวกดสามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma_x = -2P/\pi DL \quad (2.1)$$

และที่จุดนี้ความเค้นกดที่ตั้งฉากอยู่จะเท่ากับ

$$\sigma_y = 6P/\pi DL \quad (2.2)$$

$$\sigma_z = 0$$

σ_x จะมีค่าเป็นลบเพราะเป็นแรงดึง ส่วน σ_y จะมีค่าเป็นบวกเพราะเป็นแรงกดและจะมีค่าเป็นสามเท่าของ σ_x ส่วน σ_z จะมีค่าเป็นศูนย์เพราะการวิเคราะห์สมมติให้ตัวอย่างหินอยู่ในข้อกำหนดของความเค้นระนาบ (Plane stress)

ถ้า P เป็นแรงกดที่จุดวิบัติค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลที่หินจะได้รับ (σ_B) สามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma_B = 2P/\pi DL \quad (2.3)$$

ค่ากำลังดึงที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบนี้จะมีผลกระทบจากค่าความเค้นกดที่ตั้งจากอยู่ ณ จุดแตก ดังนั้น ค่าที่คำนวณได้จึงไม่ได้มาจากค่าความเค้นดึงอย่างบริสุทธิ์ และทำให้ผลที่ได้มีความไม่น่าเชื่อถือ

2.2 การทดสอบกำลังดึงแบบสี่จุดกด

การทดสอบกำลังดึงแบบกดสี่จุด (Four-point bending test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเค้นดึงสูงสุดของหิน (Goodman, 1989) ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพหลังคาของเหมืองใต้ดินหรืออุโมงค์ที่ขุดเจาะอยู่ในชั้นหินตะกอนที่มีแนวชั้นหินอยู่ในระนาบ ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบกดสี่จุดจะคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของความเค้นในชั้นหินที่ประกอบเป็นหลังคาอุโมงค์ ซึ่งความเค้นกดสูงสุดของหินที่ได้จากการทดสอบแบบกดสี่จุดจะนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีนี้ได้เหมาะสมกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

วิธีการทดสอบ คือ นำหินรูปแท่งทรงกระบอกมาทำการกดตามขวางด้วยสี่จุด จุดกด 2 จุดอยู่ด้านบนตรงส่วนกลาง และ 2 จุดด้านล่างอยู่ตรงส่วนปลาย โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกดเท่ากัน (L) ซึ่งจะทำให้เกิดการโค้งงอและจะมีความเค้นดึงสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน โดยระยะห่างของจุดกดจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งความเค้นดึงสูงสุด (T) สามารถคำนวณได้

$$T = \frac{16PL}{3\pi d^3} \quad (2.4)$$

โดยที่ P = แรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติของแท่งหิน
 L = ระยะห่างระหว่างจุดกดสี่จุด
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งหินตัวอย่าง

ค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบกดสี่จุด (T) นี้บางตำราเรียกว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแตก (Modulus of rupture) เป็นที่น่าสังเกตประการหนึ่งว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบกดสี่จุดของ

หินชนิดหนึ่งจะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบบราซิลเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวแตกของหิน (Stress gradient)

2.3 การทดสอบดึงแบบวงแหวน

การทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวนมีรูปแบบการทดสอบคล้ายคลึงกับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลแต่แผ่นกลมของตัวอย่างหินจะมีรูตรงกลาง ในขณะที่ทดสอบจะให้แรงกดแบบเส้นตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินรูปวงแหวน รอยแตกแบบดึงจะเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวของวงด้านในของวงแหวน ซึ่งค่ากำลังดึงสูงสุดของการทดสอบนี้คำนวณไว้โดย Fuenkajorn and Daemen (1986)

$$\sigma_R = 2PK/\pi Dt \quad (2.5)$$

โดยที่ σ_R = ค่ากำลังดึงสูงสุดแบบวงแหวน
 P = ค่าแรงกดแบบเส้นที่จุดแตก
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวอย่างหินรูปวงแหวน
 t = ความหนาของตัวอย่างหิน และ
 K = ค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนของรัศมีวงในต่อวงนอกของตัวอย่างหินรูปวงแหวน

การทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวนนี้จะมีผลกระทบของ Stress Gradient ด้วย โดยความเค้นดึงสูงสุดจะอยู่ที่จุดตัดระหว่างแนวกดกับขอบวงในของตัวอย่างหิน และจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นความเค้นกดที่จุดกดที่อยู่ขอบนอกของตัวอย่างหิน

2.4 การทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยน

การทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยน หรือ Modified Tension Test (MTT) ที่นำเสนอโดย Blümel (2000) ในการประชุม EUROCK 2000 เป็นวิธีการทดสอบแบบใหม่เพื่อหาค่ากำลังดึงของหิน โดยที่ตัวอย่างหินจะเป็นลักษณะทรงกระบอกซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตแบบพิเศษที่ทำให้เกิดความเค้นดึงไปในทิศทางเดียวกันในแง่ตัวอย่าง โดยวิธีการทดสอบจะยึดถือตามมาตรฐานของเครื่องมือทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวมาใช้ ซึ่งจากการประเมินผลลัพธ์จากวิธี Modified Tension Test พบว่าเป็นวิธีที่ง่ายและเมื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการแต่จะไม่ให้ค่ากำลังดึงโดยตรงของตัวอย่างหินหรือคอนกรีตที่แท้จริง ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบจะมีลักษณะทรงกระบอกที่มีการเจาะแหว่งตัวอย่างด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนและด้านล่างต่างกัน จากนั้นจะให้แรงกดที่วงในด้านบน และให้แรงกดแบบแหวนที่

ด้านล่างโดยใช้เครื่องทดสอบทั่วไป ซึ่งการแตกแบบดึงจะเกิดขึ้นในพื้นที่ระหว่างรอยเจาะที่ครอบกันอยู่ โดยวิธีนี้จะให้ค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน σ_{MTT} ซึ่งคำนวณมาจากแรงกดสูงสุด F_{max} และพื้นที่หน้าตัดระหว่างรอยเจาะรูปวงแหวน A_{TZ} ซึ่งจะขึ้นกับรัศมีวงนอกและรัศมีวงใน ของแท่งตัวอย่างที่เจาะครอบด้านบนและด้านล่าง

2.5 ข้อดีของการทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

การทดสอบโดยอ้อมด้วยวิธีแบบบราซิล แบบวงแหวน และแบบจุดกดสี่จุดนั้น แนวรอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบของ Stress gradient เข้ามาเกี่ยวข้อง และที่จุดรอยแตกของหินจะไม่อยู่ภายใต้ความเค้นดึงอย่างบริสุทธิ์ แต่จะมีความเค้นกดในทิศทางที่ตั้งฉากเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ส่วนการทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยนของ Blümel (2000) รูปทรงเรขาคณิตของหินที่อยู่ภายใต้แรงดึงจะเป็นรูปวงแหวนซึ่งจะมีผลกระทบของผิวภายในของวงแหวนเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ตัวอย่างหินที่นำมาใช้จะต้องเป็นตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะสามารถเจาะร่องวงแหวน 2 ขนาด ซ้อนกันและสวนทางกันได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวยังไม่เป็นที่ยอมรับในวงการวิชาการ

บทที่ 3

การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบกำลังภายใต้แรงกด

3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด สร้างขึ้นโดยใช้หลักการทางกลศาสตร์ ประกอบด้วยชุดโครงโลหะแข็ง 2 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วย แท่นกด ชุดแผ่นดัน และเสาส่งผ่านแรง 2 เสา ซึ่งโครงเหล็กดังกล่าวถูกจัดวางให้อยู่ในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เพื่อทำหน้าที่ดันปลายด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินที่ต้องการทดสอบที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างชุดโครงโลหะแข็ง ซึ่งการส่งผ่านแรงกดจากคานกดด้านบนของเครื่องทดสอบทั่วไปไปยังปลายล่างของแท่งตัวอย่างหิน และส่งแรงกดจากคานด้านล่างไปยังปลายด้านบนของแท่งตัวอย่างหินทำให้เกิดแรงดึงขึ้นที่ส่วนกลางของแท่งตัวอย่างหิน โดยอุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนเป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบแรงกดของแท่งตัวอย่างหินได้ ด้วยการหมุนเสายึดทั้ง 4 เสา (2 เสาต่อชุด) ให้ทำมุม 90 องศา ส่งผลให้แรงกดที่ส่งมาจากเครื่องทดสอบจะเปลี่ยนเป็นแรงกดของแท่งตัวอย่างหินโดยตรง โดยไม่มีแรงมาดันมารบกวนแท่งตัวอย่างหินในขณะที่ต้องการทดสอบหินภายใต้แรงกด

การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องทดสอบขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยทั่วไป และสามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ดังกล่าวให้ใช้สำหรับการทดสอบแรงกดของหินได้สะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้อุปกรณ์ดังกล่าวยังมีความทนทาน ราคาถูก ใช้งานง่าย และให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำปราศจากผลของ Stress Gradient ที่มักเกิดขึ้นจากการทดสอบกำลังดึงแบบอ้อมทั่วไป

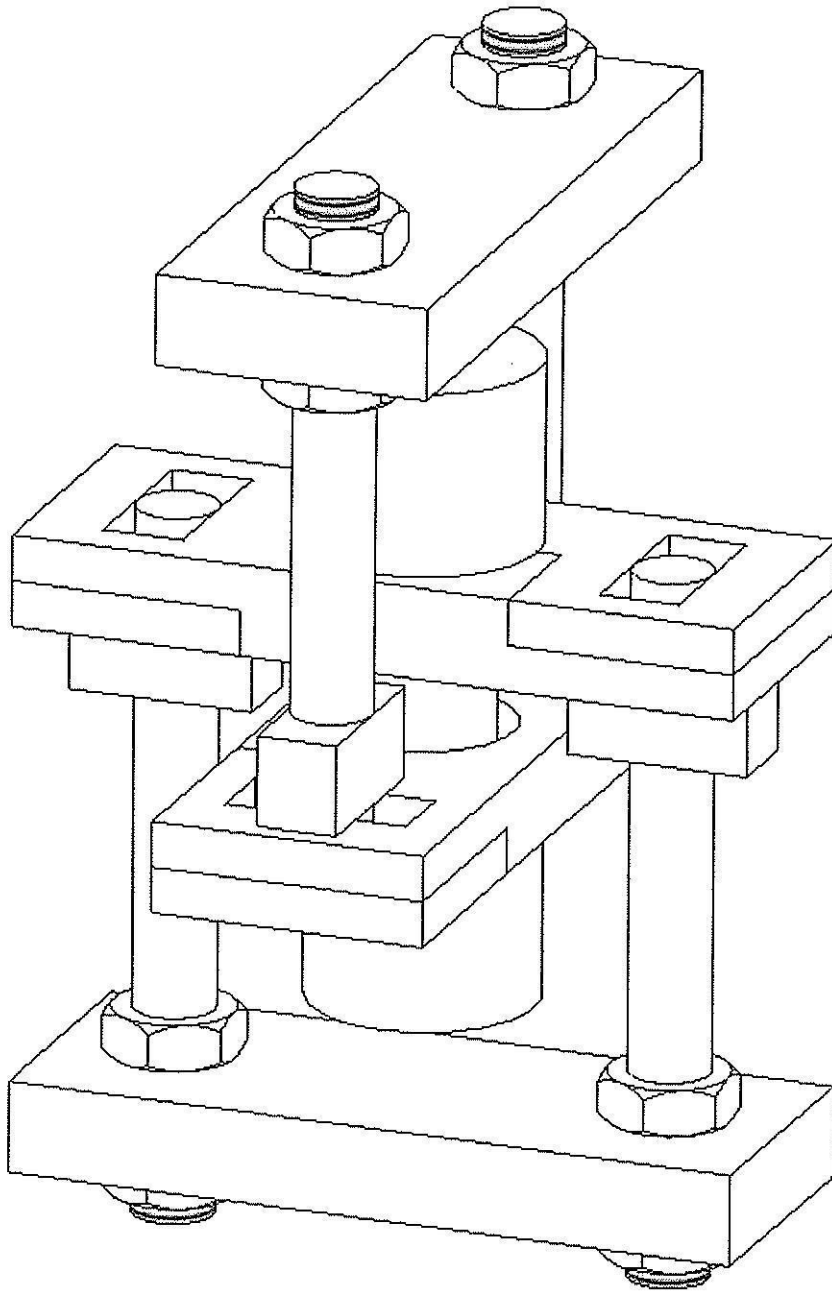
3.2 รายละเอียดในการออกแบบ

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดประกอบด้วยตัวอย่างหินที่ต้องการทดสอบ ชุดโครงโลหะแข็ง 2 ชุด ซึ่งประกอบด้วย แท่นกดที่ถูกจัดเรียงสลับบน-ล่าง และตั้งฉากซึ่งกันและกัน ตรงปลายของแท่นกดทั้งสองด้านมีรูกลมทะลุผ่าน ซึ่งรูถูกเจาะไว้เพื่อยึดเสาส่งผ่านแรงอย่างน้อย 1 เสา โดยมีวงแหวนเกลียวเหล็กยึดทั้งด้านบนและด้านล่างของแท่นกด ปลายอีกด้านหนึ่งจะมีสลักดันซึ่งจะยันอยู่กับชุดแผ่นดัน โดยโครงโลหะดังกล่าวถูกจัดวางให้อยู่ในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในการทดสอบกำลังดึงของหิน สลักดันจะอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเสาส่งผ่าน ซึ่งยันอยู่กับชุดแผ่นดันเพื่อวางขวางอยู่บนรูทะลุเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างน้อย 1 อัน โดยที่ชุดแผ่นดันประกอบด้วยแผ่นโลหะแข็งอย่างน้อย 2 แผ่น ที่สมมาตรกันแต่วางสลับกัน ที่จุดกึ่งกลางของความยาวของชุดแผ่นดันมีรูกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหิน

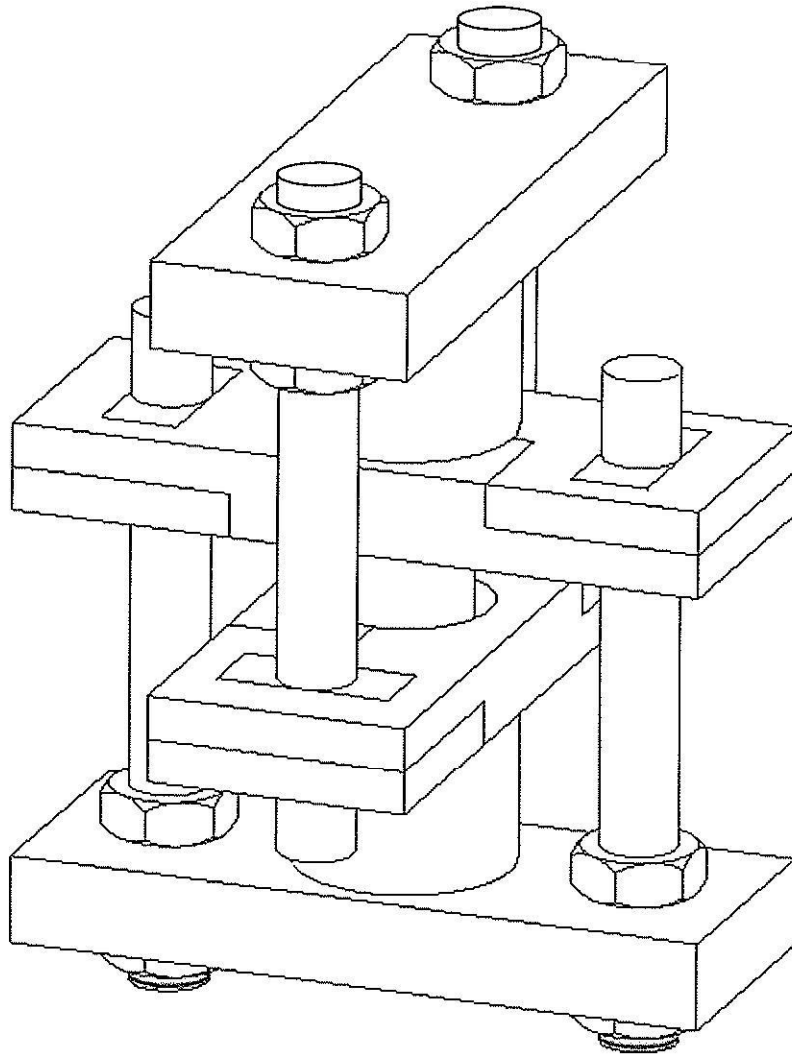
รูปที่ 3.1 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ซึ่งประกอบด้วย ชุดโครงโลหะแข็ง 2 ชุด จัดเรียงสลับบน-ล่าง และตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน แต่ละชุดโครงโลหะแข็งประกอบด้วยแท่นกดรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว ที่ปลายทั้งสองด้านเจาะรูกลมเส้นผ่าศูนย์กลางไม่มากเกินกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสายึดส่งผ่านแรงสำหรับการยึดเสาส่งผ่านแรง การยึดเสาส่งผ่านแรงเข้ากับแท่นกดทำได้โดยการใช้วงแหวนเกลียวเหล็กเป็นตัวยึด ทั้งด้านบนและด้านล่างของแท่นกด เสาส่งผ่านแรงจะวางอยู่ในแนวตั้ง โดยปลายอีกด้านหนึ่งจะมีสลักดันรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเชื่อมติดอยู่ที่ส่วนปลายของเสาส่งผ่านแรงในขณะทดสอบกำลังดึงของหิน สลักดันจะยื่นอยู่กับชุดแผ่นดัน คือ วางวางอยู่บนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชุดแผ่นดัน ประกอบด้วยแผ่นโลหะแข็ง 2 แผ่น ที่สมมาตรกันแต่วางสลับกันอยู่ ที่จุดกึ่งกลางของความยาวของชุดแผ่นดันมีรูกลมเพื่อให้ช่วงกลางของตัวอย่างหินสามารถสอดผ่านได้

รูปที่ 3.2 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน ซึ่งสามารถจัดเรียงได้จากการหมุนเสาส่งผ่านแรงเท่ากับ 90 องศา สลักดันจะสอดลงในช่องของชุดแผ่นดันจึงทำให้แท่นกดทั้งสองแนบสัมผัสกับปลายทั้งสองของตัวอย่างหิน ในลักษณะเช่นนี้เสาส่งผ่านแรงจะปราศจากแรงมากระทำ เพราะตัวอย่างหินจะรับแรงกดโดยตรงจากแท่นกด

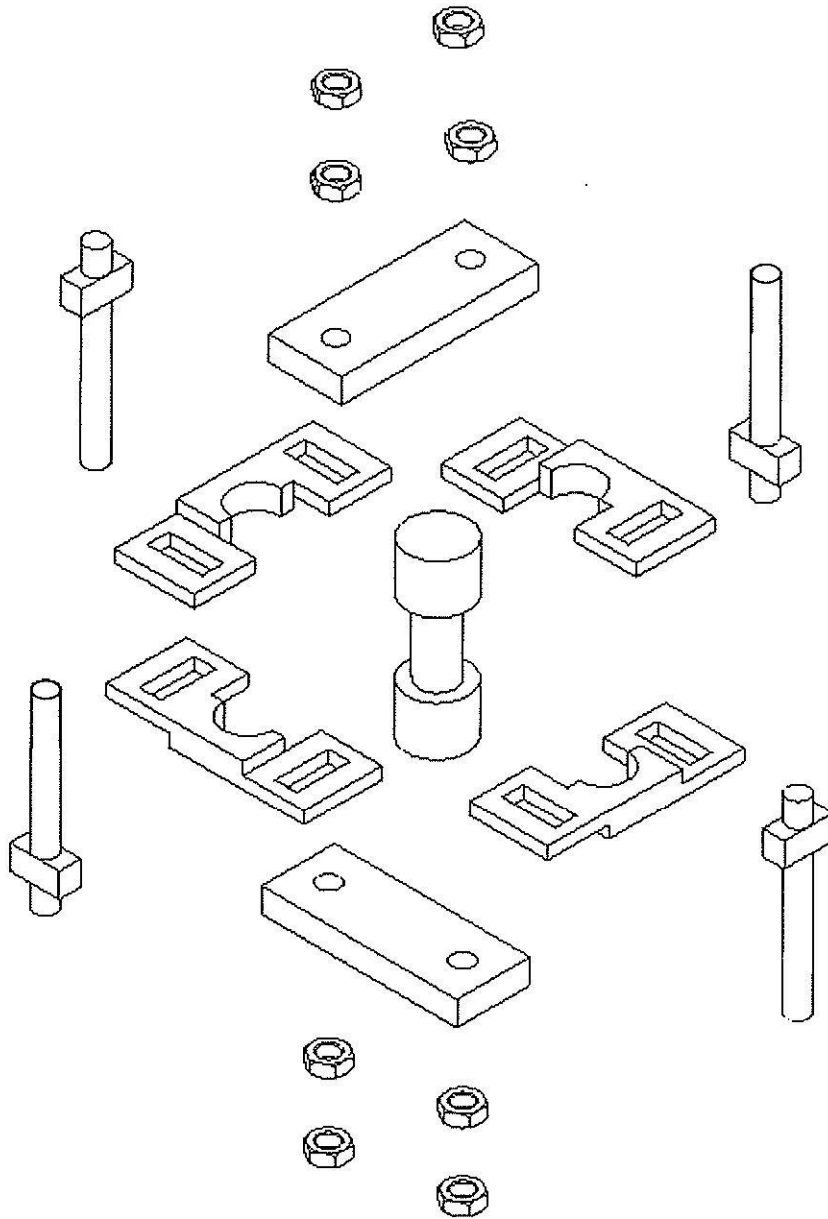
รูปที่ 3.3 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟแยกองค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ซึ่งแสดงรูปร่างของตัวอย่างหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปลายทั้งสองด้านมากกว่าส่วนกลาง ความยาวของตัวอย่างหินเมื่อแบ่งเป็น 3 ช่วง จะได้ช่วงกลางยาว 3 ส่วน และปลายทั้งสองยาวข้างละ 2 ส่วน ที่ปาด้านในของตัวอย่างหินถูกกลึงไว้สำหรับรองรับแรงดันที่กระทำโดยชุดแผ่นดันซึ่งมี 2 ชุด ชุดละหนึ่งด้านของตัวอย่างหิน ซึ่งแต่ละชุดแผ่นดันประกอบด้วยแผ่นโลหะแข็ง 2 แผ่น มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.5 นิ้ว ที่ช่วงปลาย และหนาไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว ที่ช่วงกลาง โดยออกแบบให้มีการสลับพื้นปลาเพื่อให้แนบสนิทเมื่อประกอบเข้าด้วยกัน แต่ละข้างของแผ่นโลหะแข็งของชุดแผ่นดันจะออกแบบให้เป็นรูรูปครึ่งวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางซึ่งเมื่อประกอบ 2 แผ่นเข้าด้วยกัน ชุดแผ่นดันจะมีรูกลมตรงกลางแผ่นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งใหญ่กว่าส่วนกลางของตัวอย่างหิน แต่จะเล็กกว่าส่วนปลายทั้งสองของตัวอย่างหิน และชุดแผ่นดันจะมีรูทรงแปดเหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้สลักดันที่เชื่อมติดอยู่ที่ปลายของเสาส่งผ่านแรงลอดผ่านเข้าไปได้พอดีในขณะทดสอบกำลังดึงของหิน แต่เมื่อหมุนเสาส่งผ่านแรงให้วาง 90 องศา สลักดันจะวางยื่นอยู่บนชุดแผ่นดันอย่างมั่นคงเมื่อต้องการให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน ปลายอีกด้านหนึ่งของแต่ละเสาส่งผ่านแรงจะมีเกลียวยึดติดกับวงแหวนเหล็กเพื่อยึดเสาส่งผ่านแรงเข้ากับแท่นกดอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน



รูปที่ 3.2 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน



รูปที่ 3.3 ภาพแยกองค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด

รูปที่ 3.4 แสดงภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน ซึ่งในการจัดรูปแบบเช่นนี้ชุดแผ่นดินทั้งสองจะขึ้นอยู่กับปา ด้านในของตัวอย่างหิน โดยที่แท่นกดบนและล่างจะรับแรงกดจากเครื่องกดทดสอบใดๆ มาอีกที่ หนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสลักดินที่เชื่อมติดอยู่กับเสาส่งผ่านแรงจะวางขวางและขึ้นอยู่กับชุดแผ่นดิน

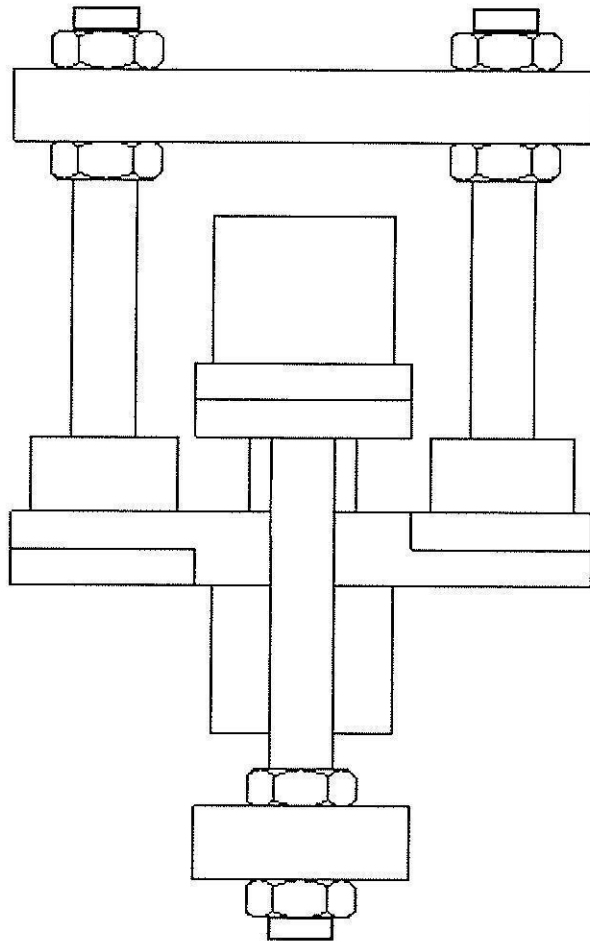
รูปที่ 3.5 แสดงภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน ในการจัดรูปแบบเช่นนี้แท่นกดจะแนบสัมผัสอยู่บนผิวปลาย ทั้งสองของตัวอย่างหิน แท่งส่งผ่านแรงจะสอดอยู่ในรูทะลุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปลายทั้งสองด้าน ของชุดแผ่นดิน ส่งผลให้แรงกดจากเครื่องกดทดสอบสามารถกดลงบนแท่งตัวอย่างหินผ่านแท่น กด

รูปที่ 3.6 แสดงภาพด้านบนของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรง กด ซึ่งแสดงชุดแผ่นดินที่ตั้งฉากอยู่กับแท่นกดและชุดแผ่นดินมีรูทะลุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถ ให้แท่งส่งผ่านแรงทะลุผ่านได้ ส่วนด้านบนของแท่นกดจะมีวงแหวนเหล็กช่วยยึดแท่งส่งผ่านแรง ไว้ตลอดเวลา

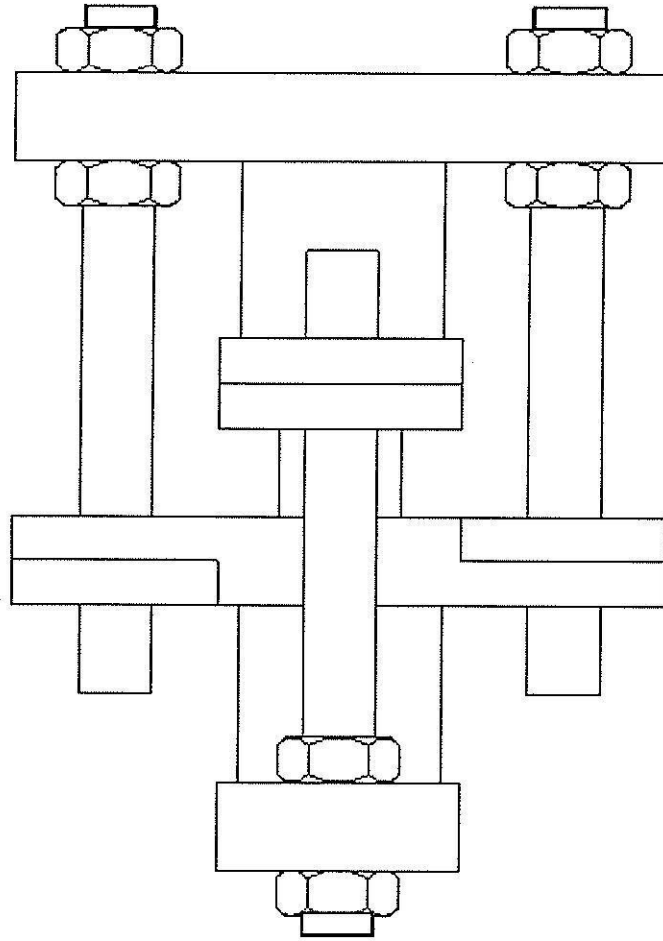
รูปที่ 3.7 แสดงภาพด้านล่างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรง กด ซึ่งแสดงแท่นกดที่ตั้งฉากอยู่กับชุดแผ่นดินมีลักษณะสลับกับภาพด้านบนของอุปกรณ์ทดสอบ คุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.8 แสดงภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหิน ภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน แสดงรูปทรงเรขาคณิตของตัวอย่างหินโดยมีชุด แผ่นดินขึ้นอยู่กับด้านในทั้งสองปลายของตัวอย่างหินก่อให้เกิดแรงดันขึ้นที่ส่วนกลางของ ตัวอย่างหิน ในขณะที่ทดสอบและแสดงสลักดินที่เชื่อมติดอยู่กับเสาส่งผ่านแรง โดยที่สลักดินจะเป็น ตัวดินชุดแผ่นดินให้ติดกับปาของตัวอย่างหิน

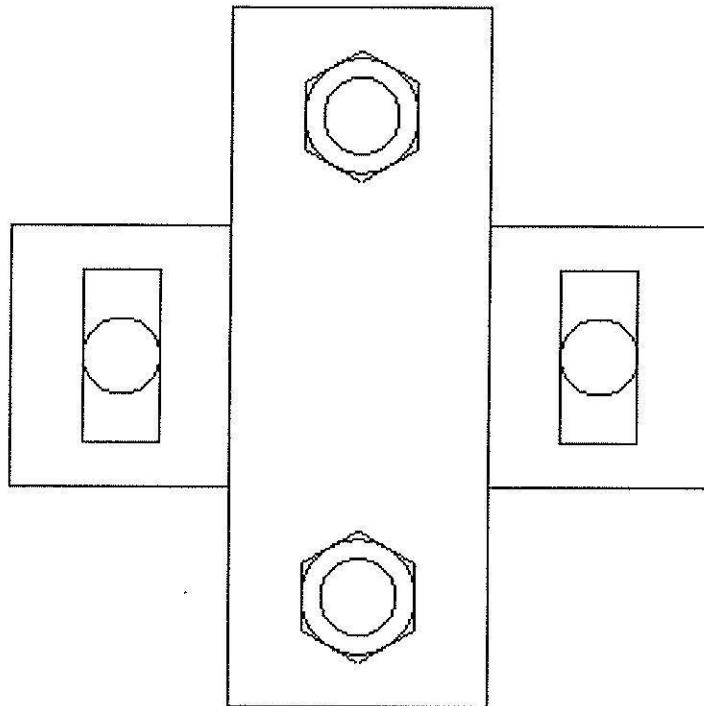
รูปที่ 3.9 แสดงภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหิน ภายใต้แรงกด ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน ซึ่งการจัดรูปแบบเช่นนี้คือ เสาส่งผ่านแรงถูก หมุนด้วยมุม 90 องศา จึงทำให้สามารถสอดลงไปในรูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในชุดแผ่นดิน ดังนั้นแท่น กดทั้งบนและล่างจึงเลื่อนลงมาแนบสัมผัสกับปลายทั้งสองของตัวอย่างหิน



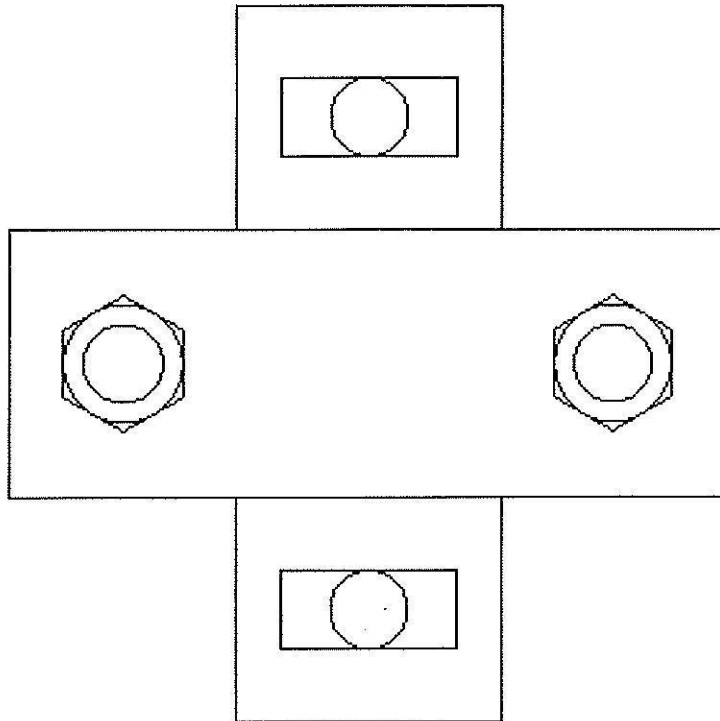
รูปที่ 3.4 ภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน



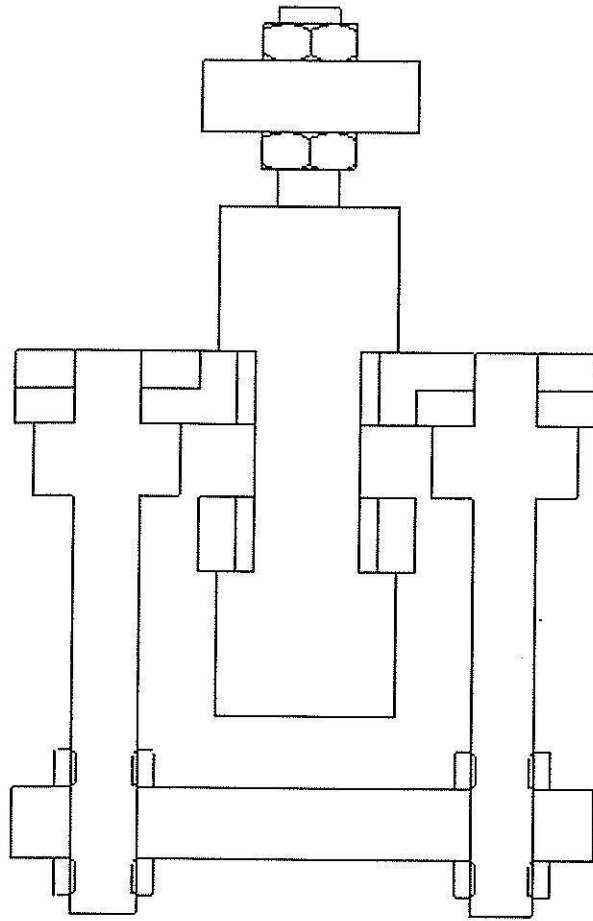
รูปที่ 3.5 ภาพด้านข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน



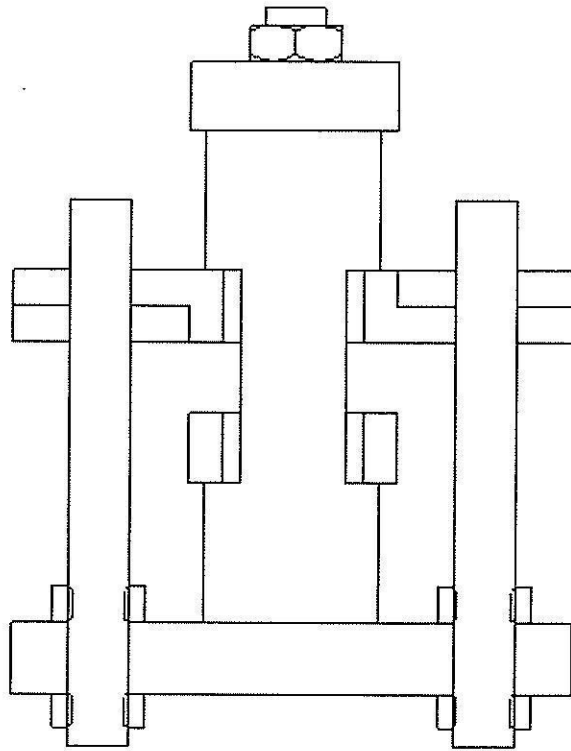
รูปที่ 3.6 ภาพด้านล่างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด



รูปที่ 3.7 ภาพด้านบนของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด



รูปที่ 3.8 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด
ในขณะที่ให้แรงดึงต่อตัวอย่างหิน



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด
ในขณะที่ให้แรงกดต่อตัวอย่างหิน

3.3 ข้อดีของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบราคาถูกทั่วไปที่มีอยู่แพร่หลายทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ซึ่งเครื่องเหล่านั้นไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการดึง สิ่งประดิษฐ์ใหม่นี้ยังสามารถให้แรงดึงอย่างบริสุทธิ์และสม่ำเสมอในทิศทางเดียวบนแนวที่จะเกิดรอยแตกของตัวอย่างหิน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะไม่มีผลกระทบจาก Stress Gradient หรือจากความเค้นกดตั้งเช่นที่เกิดขึ้นกับการทดสอบทางอ้อมทั่วไป ที่มักมีการส่งผ่านแรงกดจากคานกดด้านบนไปยังปลายล่างของแท่งตัวอย่างหิน และส่งแรงกดจากคานด้านล่างไปยังปลายด้านบนของแท่งตัวอย่างหิน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นที่ส่วนกลางของแท่งตัวอย่างหินเพื่อให้แรงดึงที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีความสม่ำเสมอบนพื้นหน้าตัดของรอยแตกที่จะเกิดขึ้น การเปลี่ยนแรงกดของเครื่องทดสอบให้เป็นแรงดึงในตัวอย่างหินให้ค่าที่ไม่ใช่แรงกดที่แท้จริง ในขณะที่ผลที่ได้จากการทดสอบจากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ตามการประดิษฐ์นี้ให้ค่าที่ถูกต้อง แม่นยำ และชัดเจน จึงสามารถนำมาวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ในการออกแบบได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวเกิดจากการใช้ชุดโครงโลหะแข็ง 2 ชุด ชุดหนึ่งทำหน้าที่ดันปลายด้านบนของตัวอย่างหิน และอีกชุดหนึ่งทำหน้าที่ดันปลายด้านล่างแต่ละชุดประกอบด้วย แท่นกด ชุดแผ่นดัน และเสาส่งผ่านแรงอย่างน้อย 2 เสา สำหรับชุดบนแท่นกดทำหน้าที่รับแรงกดจากคานกดด้านบนของเครื่องทดสอบ แต่จะไม่สัมผัสส่วนบนของแท่งตัวอย่างหินจึงส่งแรงนั้นผ่านเสายึดไปสู่ชุดแผ่นดันที่ทำหน้าที่ดันป่าด้านล่างแท่งตัวอย่างหิน ในทางที่คล้ายกันแท่นกดสำหรับชุดล่างทำหน้าที่รับแรงกดจากคานส่งของเครื่องทดสอบและส่งแรงนั้นผ่านเสายึดไปสู่ชุดแผ่นดันที่ทำหน้าที่ดันป่าด้านบนของแท่งตัวอย่างหิน ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชุดนี้จะวางซ้อนกันหมุนตั้งฉากซึ่งกันและกัน อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนเป็นแท่นกดได้ซึ่งจะให้แรงกดกับแท่งตัวอย่างหิน การสลับเปลี่ยนจากการดึงเป็นการกดสามารถทำได้โดยง่ายภายในเวลาไม่กี่วินาที คือ ทำการหมุนเสายึดของชุดโครงโลหะทั้ง 2 ชุด ให้ทำมุม 90 องศา กับตำแหน่งเดิม การหมุนนี้จะทำให้สลักดันรูปสี่เหลี่ยมทะลุผ่านรูที่เจาะเอาไว้บนชุดแผ่นดัน จึงทำให้แท่นกดทั้งสองวางตัวแนบสัมผัสอยู่กับปลายบนและปลายล่างของแท่งตัวอย่างหิน ดังนั้น แรงกดที่ส่งมาจากเครื่องทดสอบจะเปลี่ยนเป็นแรงกดของแท่งตัวอย่างหินโดยตรง ในกรณีนี้เสายึดทุกเสาจะปราศจากแรงเพราะจะเลื่อนผ่านรูที่เจาะไว้บนชุดแผ่นดันอย่างอิสระ จึงไม่มีแรงส่งมาที่ชุดแผ่นดัน ส่งผลให้ไม่มีแรงมาดันที่ป่าของแท่งตัวอย่างหินในขณะที่ต้องการทดสอบหินภายใต้แรงกด

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์นี้สามารถแก้ไขปัญหาและข้อจำกัดของเครื่องทดสอบกำลังกดและกำลังดึงทั่วไป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องทดสอบขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทั่วไปที่มีราคาถูกและใช้กันอย่างแพร่หลาย กล่าวคือ จะเพิ่มขีดความสามารถของเครื่องกดทั่วไปให้สามารถดึงตัวอย่างหินได้

2) สามารถสลับเปลี่ยนจากการดึงตัวอย่างหินเป็นการกดตัวอย่างหินได้อย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่วินาที ดังนั้น ตัวอย่างหินก้อนเดียวกันจึงสามารถทดสอบภายใต้แรงดึงแล้วสลับมาเป็นแรงกด หรือสลับไปสลับมาได้หลายครั้งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดสอบในลักษณะนี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อองค์ความรู้ด้านกลศาสตร์หิน และสามารถนำผลมาใช้ในการออกแบบหลังคาของอุโมงค์หรือเพดานของช่องเหมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบบนพื้นฐานของความเรียบง่าย ทนทาน ราคาถูก และสะดวกต่อการติดตั้งและใช้งาน ด้วยเหตุนี้สถาบันการศึกษาและผู้ประกอบการขนาดเล็กจึงสามารถซื้อได้ในราคาถูกกว่าเครื่องทดสอบกำลังกดและกำลังดึงทั่วไปที่มีราคาแพง เพราะสถาบันและผู้ประกอบการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีเครื่องกดทดสอบแบบง่าย ๆ อยู่แล้ว จึงเพียงแค่นำอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ใหม่นี้ไปติดตั้งเพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องกดทดสอบให้สามารถดึงหินหรือวัสดุทางวิศวกรรมขึ้นได้

4) ให้ความเค้นดึงอย่างบริสุทธิ์ที่ส่วนกลางของแท่งตัวอย่างหิน ดังนั้นผลที่ตรวจวัดได้จึงเป็นผลที่ถูกต้องและแม่นยำ ปรากฏจากผลกระแทบของ Stress Gradient และความเค้นกดที่จะเกิดขึ้นจากการทดสอบกำลังดึงแบบอ้อมทั่วไป

บทที่ 4

การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข คือ เพื่อจำลองการกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังดึงในแกนเดียว และหาคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงในแกนเดียวและภายใต้แรงกดในแกนเดียว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ รูปร่างและขนาดของตัวอย่างหินที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการประเมินความสามารถของอุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้

4.2 แบบจำลอง

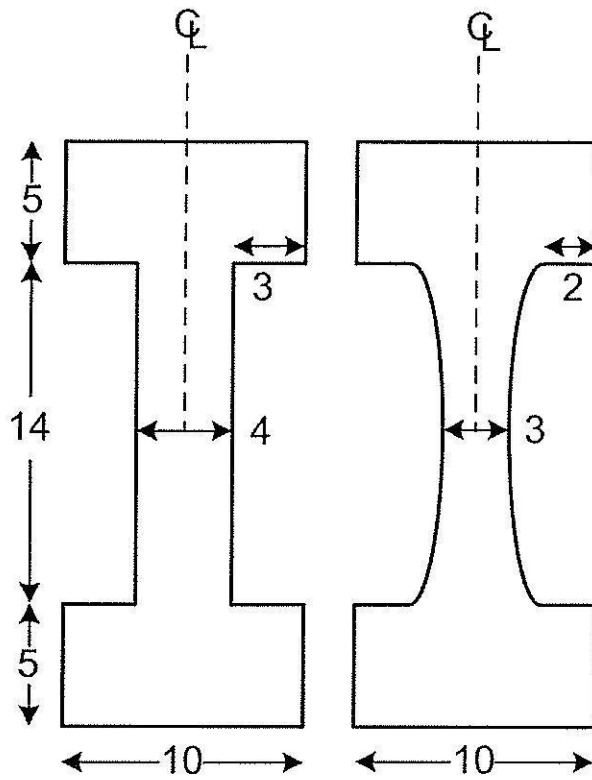
แบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม FLAC (Itasca, 1992) มาช่วยในการจำลองรูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองของตัวอย่างหิน 2 แบบ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นเมื่อแบบจำลองอยู่ภายใต้แรงกดและแรงดึงที่ปลายทั้งสองด้าน การจำลองในงานวิจัยนี้สมมติให้หินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) โดยการจำลองจะอยู่ภายใต้สมมติฐานของแกนสมมาตร (Axis symmetry) และเนื่องจากหินมีระนาบสมมาตรที่จุดกึ่งกลางของความยาว ดังนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างหินทั้งสองแบบจึงมีเพียงหนึ่งในสี่ของรูปจริงเท่านั้น ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงโครงข่ายของแบบจำลอง

วัตถุประสงค์หลักของการจำลองคือเพื่อตรวจสอบว่า

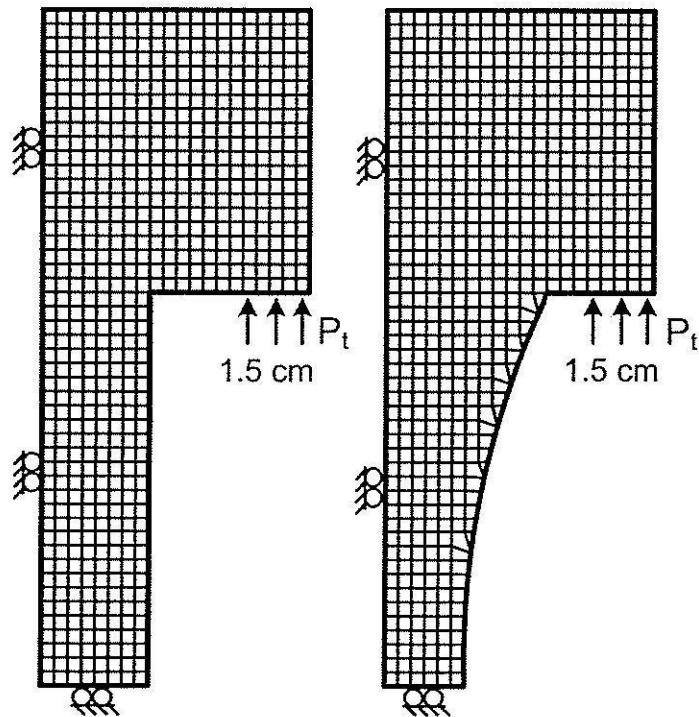
- 1) ตัวอย่างหินจะแตกภายใต้แรงดึงที่จุดกึ่งกลางของความยาว
- 2) ความเค้นดึงที่กระจายตัวที่จุดกึ่งกลางนั้นจะต้องมีระดับสม่ำเสมอ
- 3) ไม่มีความเค้นกดหรือความเค้นเฉือนเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน
- 4) ตัวอย่างหินจะแตกภายใต้แรงดึงที่จุดกึ่งกลางก่อนที่จะแตกภายใต้ความเค้นเฉือนที่ปลายทั้งสองข้าง
- 5) เมื่อให้ความเค้นกดที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างหินจะเกิดความเค้นกดที่มีขนาดสม่ำเสมอที่จุดกึ่งกลางของความยาวของตัวอย่างหินด้วย

4.3 ผลการจำลอง

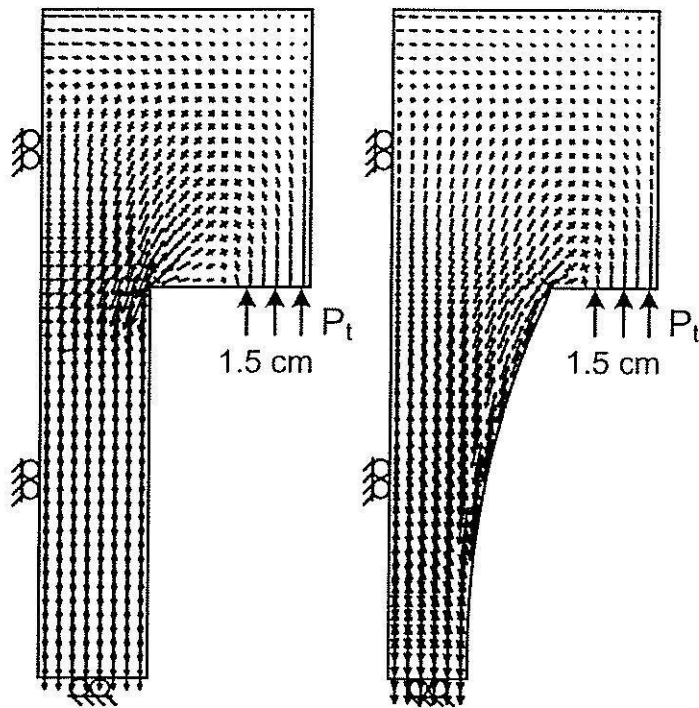
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างของเวกเตอร์ความเค้นที่เป็นผลจากการจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ภายใต้การทดสอบความเค้นดึง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ 1 จะมีการรวมตัวของความเค้นที่มุมบนและล่าง ซึ่งอาจทำให้ตัวอย่างหินขาดภายใต้ความเค้นเฉือนที่ปลายบนและล่าง



รูปที่ 4.1 รูปร่างและขนาดของแบบจำลองของตัวอย่างหิน แบบที่ 1 (ซ้าย) และแบบที่ 2 (ขวา) ตัวเลขในรูปมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

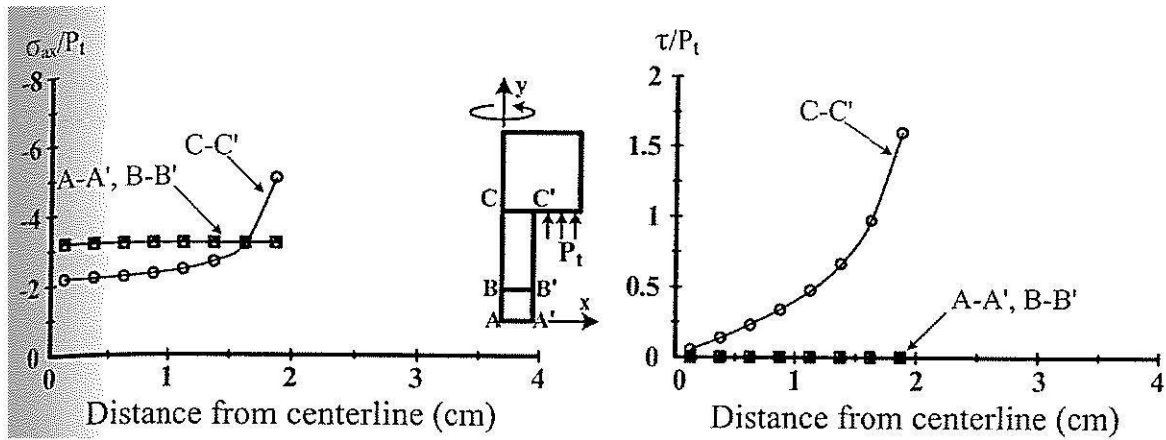


รูปที่ 4.2 โครงข่ายแบบจำลอง แบบที่ 1 (ซ้าย) และแบบที่ 2 (ขวา)

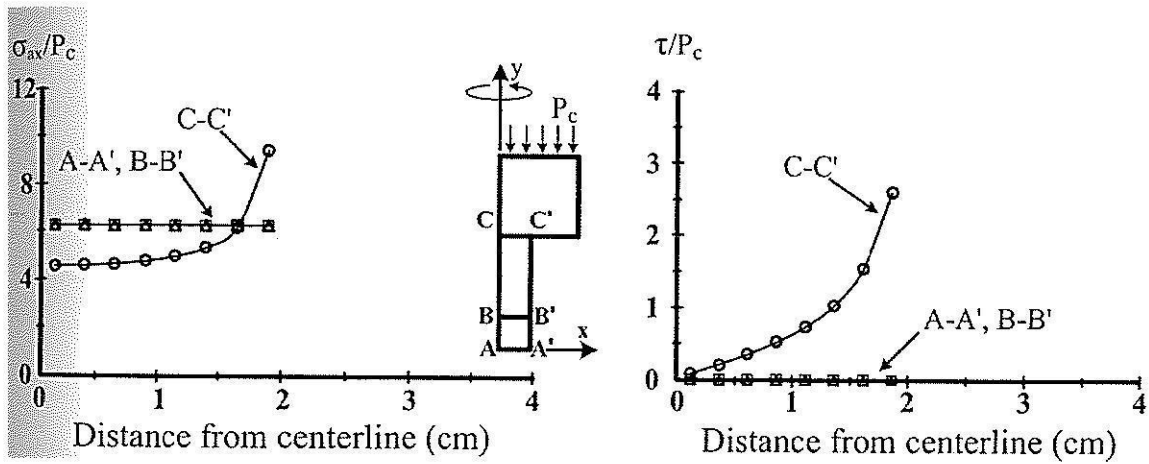


รูปที่ 4.3 เวกเตอร์ความเค้น แบบที่ 1 (ซ้าย) และแบบที่ 2 (ขวา)

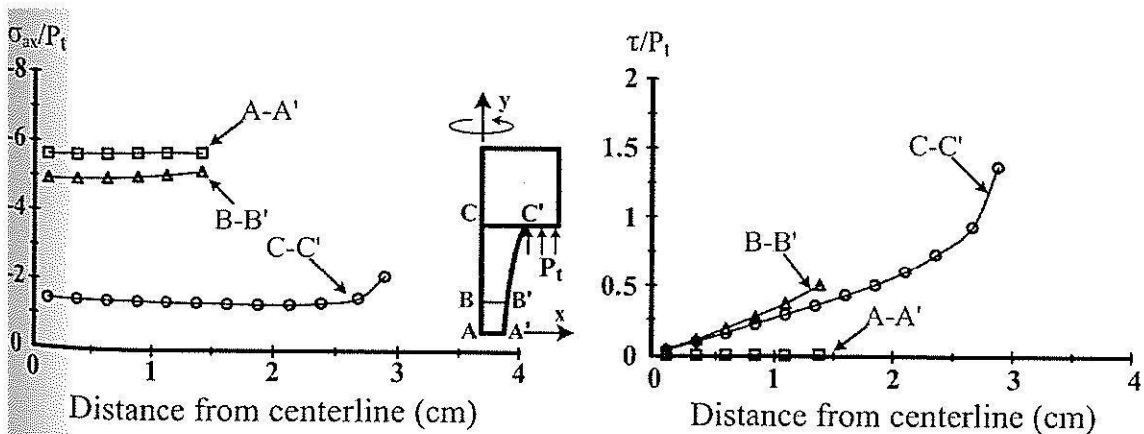
ก่อนที่จะขาดภายใต้ความเค้นดึงที่ส่วนกลางของตัวอย่างหิน ในขณะที่ตัวอย่างหินแบบที่ 2 จะมีการกระจายตัวของความเค้นตามแนวโค้งของตัวอย่างหินอย่างสม่ำเสมอและไม่รวมตัวอยู่ที่เดียวกัน ดังนั้น จึงมีแนวโน้มว่าตัวอย่างหินแบบที่ 2 จะขาดภายใต้แรงดึงที่จุดกึ่งกลางก่อนที่จะแตกภายใต้แรงเฉือนที่ปลายทั้งสองด้าน เพื่อแสดงการกระจายตัวของความเค้นในส่วนต่างๆ ของตัวอย่างหินในแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จึงมีการคำนวณค่าความเค้นในแนวระนาบที่ระดับต่างๆ ของตัวอย่างหิน ทั้งภายใต้แรงดึงและแรงกด รูปที่ 4.4 แสดงระดับความเค้นในแนวแกน (σ_{ax}) และแนวเฉือน (τ) ต่อความเค้นที่ให้เพื่อให้เกิดแรงดึงในตัวอย่าง (P_t) ตัวอย่างหินแบบที่ 1 ซึ่งถึงแม้ว่าความเค้นเฉือนจะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่าง แต่ความเค้นในแนวแกนจะมีค่าสูงสุดใกล้กับจุดที่ให้แรง ซึ่งในลักษณะนี้ตัวอย่างหินอาจเกิดการแตกที่ปลายด้านบนและด้านล่างได้ก่อนที่จะขาดภายใต้แรงดึงที่จุดกึ่งกลาง รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างหินแบบที่ 1 ภายใต้ความเค้นกด (P_c) รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้นในแนวแกนและแนวเฉือนของตัวอย่างหินแบบที่ 2 สำหรับการทดสอบภายใต้แรงดึง ซึ่งผลที่ได้ระบุชัดเจนว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดจะเกิดที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน (ระนาบ A - A') อีกทั้งที่จุดกึ่งกลางนี้จะมีค่าความเค้นเฉือนเป็นศูนย์ กล่าวคือ ตัวอย่างหินอยู่ภายใต้ความเค้นดึงอย่างบริสุทธิ์ รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือนสำหรับตัวอย่างหินแบบที่ 2 ภายใต้ความเค้นกด จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นกดสูงสุดที่ระนาบ A - A' มีระดับของความเค้นสม่ำเสมอและเป็นความเค้นกดในแกนเดียวอย่างบริสุทธิ์ กล่าวคือ มีค่าความเค้นเฉือน ณ จุดนี้เป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 4.7



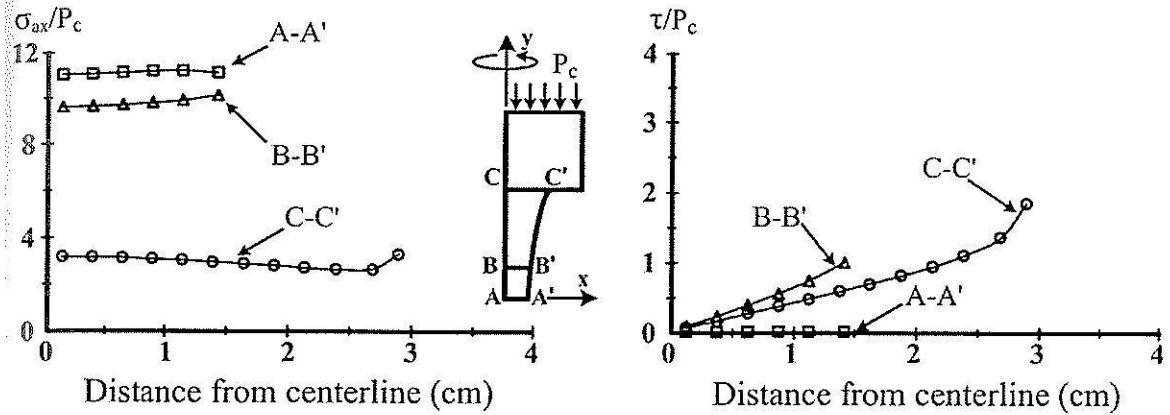
รูปที่ 4.4 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 1 ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 4.5 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 1 ภายใต้แรงกด



รูปที่ 4.6 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 3 ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 4.7 ความเค้นในแนวแกนและความเค้นเฉือน ของการจำลองแบบที่ 3 ภายใต้แรงกด

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์สรุปได้ว่า รูปร่างของตัวอย่างหินที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดควรเป็นแบบที่ 2 เพราะจะให้ความเค้นดึงสูงสุดแบบบริสุทธิ์และสม่ำเสมอที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินเมื่อทำการทดสอบภายใต้แรงดึงและจะทำให้ความเค้นกดสูงสุดสม่ำเสมอและบริสุทธิ์ที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างเมื่อทดสอบตัวอย่างหินภายใต้แรงกด

บทที่ 5

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ เพื่อทดสอบความสามารถของอุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงตัวอย่างหิน การทดสอบกำลังดึงสูงสุด และการทดสอบสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปริมาตรของหินภายใต้แรงกดและแรงดึงในแกนเดียว

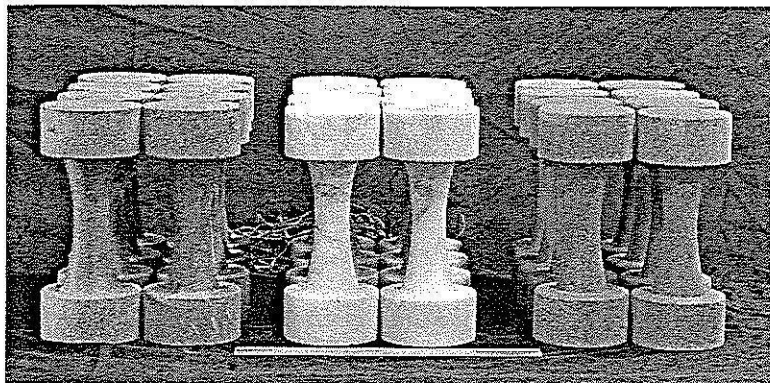
5.2 ตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ได้มาจากหินทรายชุดภูพาน หินอ่อนจากสระบุรี และหินปูนจากสระบุรี (เรียกโดยย่อในรายงานนี้คือ PP sandstone, SB marble และ SB limestone ตามลำดับ) เหตุผลที่หินทั้ง 3 ชนิด ถูกคัดเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีเนื้อละเอียดและสม่ำเสมอ มีรอยแตกน้อย และง่ายต่อการจัดเตรียม โดยได้มีการตัดและกลึงแต่งตัวอย่างหินให้มีรูปร่างและขนาดเป็นไปตามข้อกำหนดแบบที่ 2 กล่าวคือ มีความยาว 24 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ 10 เซนติเมตร ส่วนหัวของปลายทั้งสองด้านมีความยาว 5 เซนติเมตร ที่ส่วนกลางมีความยาวเท่ากับ 14 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดเท่ากับ 3 เซนติเมตร ที่จุดกึ่งกลางของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางนี้ถูกขยายขึ้นถึง 6 เซนติเมตรที่ปลายด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินดังรูปที่ 5.1

5.3 การทดสอบกำลังดึงในทิศทางเดียว

การทดสอบกำลังดึงในทิศทางเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างหิน 5 ชิ้น สำหรับตัวอย่างหินแต่ละชนิด โดยนำตัวอย่างหินที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นใส่ในโครงกดทดสอบที่มีแรงไฮดรอลิกเพื่อให้แรงกดต่ออุปกรณ์ดังกล่าว จากการออกแบบนี้จะทำให้เกิดแรงดึงสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของความยาวของแท่งตัวอย่างหิน การทดสอบจะให้อัตราแรงดึงที่คงที่เท่ากับ 1 MPa/s จนกระทั่งหินเกิดการแตกและขาดออกจากกัน ค่ากำลังดึงในแกนเดียวสามารถคำนวณได้จาก ค่าแรงดึงที่จุดวิบัติหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่เกิดรอยแตก ผลที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 และรูปของตัวอย่างหินบางชิ้นที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.2

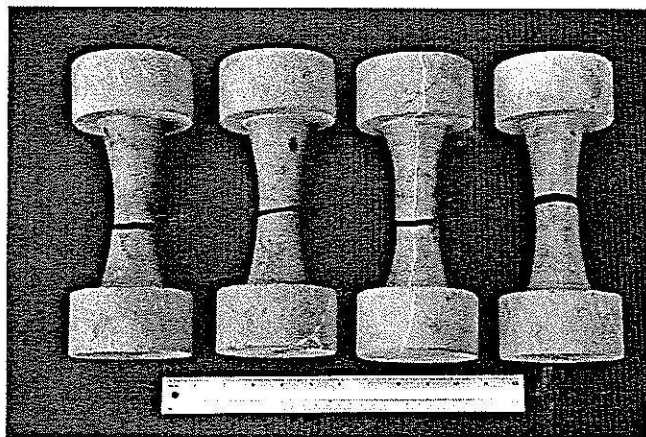
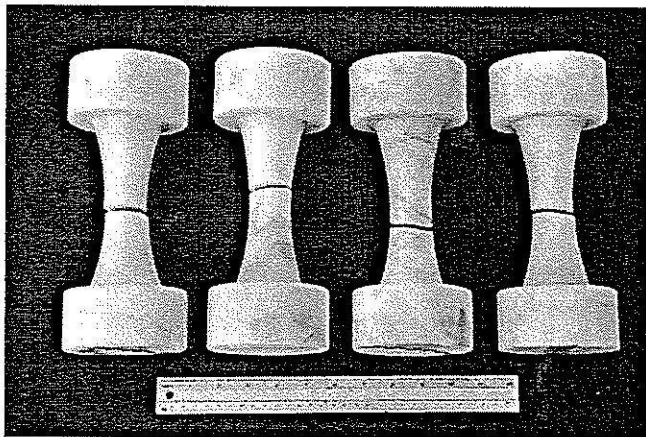
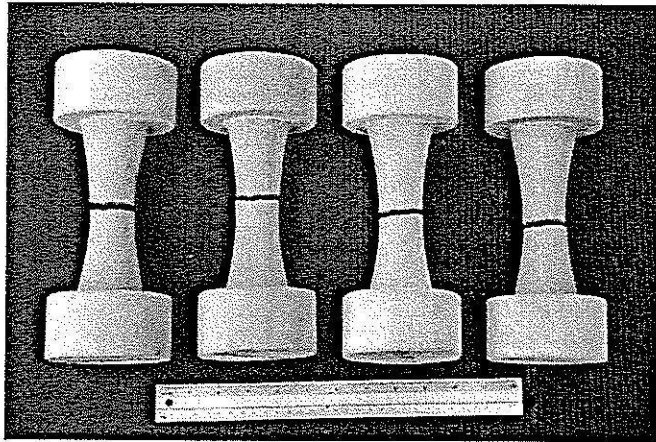
เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบข้างต้นกับวิธีการทดสอบที่ใช้ในปัจจุบัน ได้มีการทดสอบค่ากำลังดึงเพิ่มเติมโดยใช้วิธีการทดสอบกำลังดึงแบบอ้อม (Brazilian Tensile Strength) และวิธีการทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวน (Ring Tensile Strength) การทดสอบแบบบราซิลได้ดำเนินการทดสอบและเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM (D 3967) โดย



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างหิน หินปูนจากสระบุรี (ซ้าย) หินอ่อนจากสระบุรี (กลาง) และหินทรายชุดภูพาน (ขวา)

ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังกดของวิธีการทดสอบแบบตรงและแบบอ้อม

Rock types	Density (g/cc)	Direct tensile strength (MPa)	Brazilian tensile strength (MPa)	Ring tensile strength (MPa)
PP sandstone	2.36 ± 0.12	6.49 ± 0.22	10.68 ± 0.70	16.10 ± 3.00
SB marble	2.65 ± 0.08	6.33 ± 0.62	8.02 ± 0.25	20.59 ± 1.24
SB limestone	2.81 ± 0.05	9.31 ± 0.65	10.90 ± 0.19	23.18 ± 1.70



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบตรง หินทรายชุดภูพาน (บน)
หินอ่อนจากสระบุรี (กลาง) และหินปูนจากสระบุรี (ขวา)

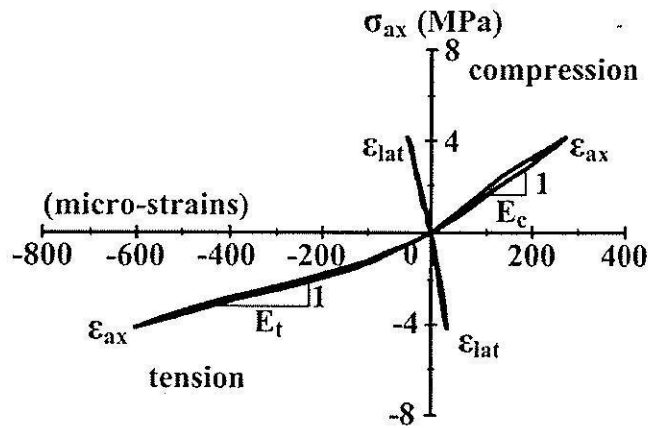
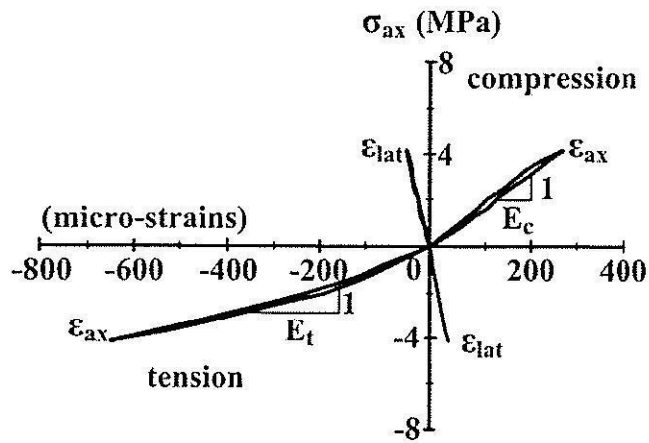
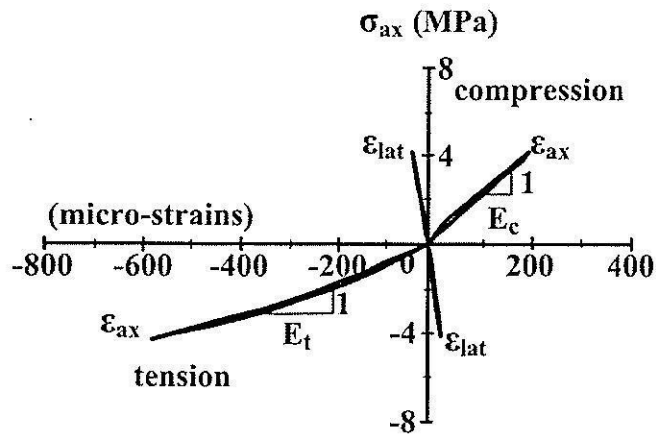
ตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ส่วนตัวอย่างหินที่ได้ในการทดสอบ กำลังตั้งแบบวงแหวนมีความหนา 5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของวงนอกและวงในของวงแหวน 10 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ การทดสอบทั้งสองวิธีใช้ตัวอย่างหิน 3 ชิ้น ต่อหิน 1 ชนิด การคำนวณค่ากำลังตั้งที่ได้จะใช้วิธีที่เสนอโดย Jaeger and Cook (1979)

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังที่ได้จาก 3 วิธี พบว่า วิธีการทดสอบกำลังตั้งแบบวงแหวนให้ค่ากำลังตั้งสูงสุดซึ่งเป็นผลมาจาก Stress gradient ที่มีค่าสูง กล่าวคือ มีการผันแปรของความเค้นตั้งบนรอยแตกมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 วิธี ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปที่ให้ไว้โดย Jaeger and Cook (1979) สำหรับหินทั้ง 3 ชนิดที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ ค่ากำลังตั้งแบบตรงหรือแบบทิศทางเดียวที่ได้จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังตั้งอีก 2 วิธี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Plinninger et al. (2004) เป็นที่น่าสังเกตว่าความแตกต่างระหว่างค่ากำลังตั้งในแกนเดียวกับค่ากำลังตั้งแบบบราซึลสำหรับหินทรายชุดภูพานมีค่าสูงประมาณร้อยละ 40 ซึ่งสูงกว่าความแตกต่างที่ทดสอบจากหินอ่อนและหินปูนจากสระบุรี โดยที่หินเนื้อแน่นทั้งสองชนิดนี้มีความแตกต่างระหว่างค่ากำลังตั้งในแกนเดียวกับค่ากำลังตั้งแบบบราซึลเพียงร้อยละ 15-21 ข้อสังเกตนี้บ่งบอกเป็นนัยว่าความแตกต่างของค่ากำลังตั้งแบบบราซึลและแบบแกนเดียวจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนและรอยร้าวของเนื้อหิน

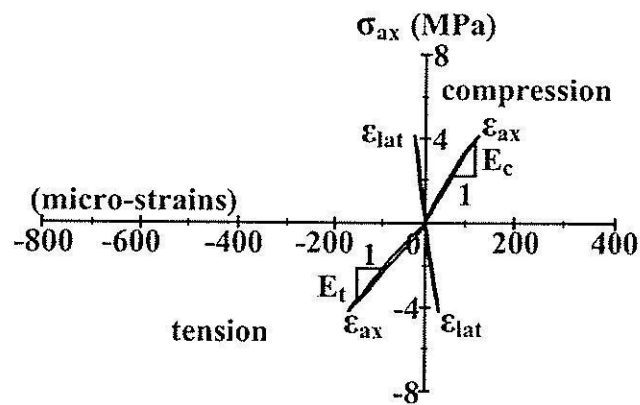
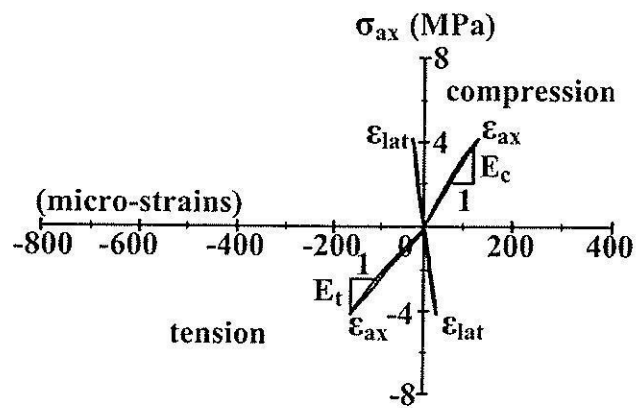
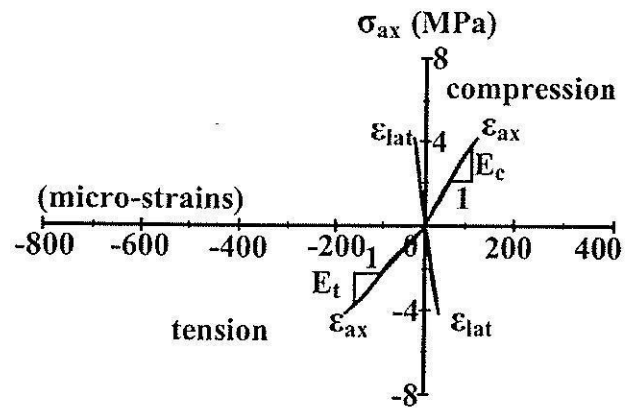
5.4 การทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกด

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวของของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ภายใต้แรงดึงและแรงกดในแกนเดียว ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด จะถูกนำมาจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบชนิดละ 3 ชิ้น โดยมีรูปร่างและขนาดเหมือนกับตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบกำลังตั้งแบบตรงในหัวข้อที่ 5.3 ในการทดสอบนี้จะให้ความเค้นกดสลับกับความเค้นตั้งบนตัวอย่าง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4 MPa และมีการวัดค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างในแนวแกนและในแนวเส้นรอบวงโดยใช้ Strain gages การทดสอบในชุดนี้จะไม่กดให้เกิดการวิบัติขึ้นในตัวอย่าง ผลที่ได้จะนำมาลงจุดโดยให้ความเค้นในแนวแกน (σ_{ax}) ในฟังก์ชันของความเครียดในแนวแกนและเส้นรอบวง (ϵ_{ax} , ϵ_{lat}) รูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับหินทรายชุดภูพาน หินอ่อนจากสระบุรี และหินปูนจากสระบุรี ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวของคำนวณจากเส้นสัมผัสที่จุดความเค้นสูงสุด (4 MPa)

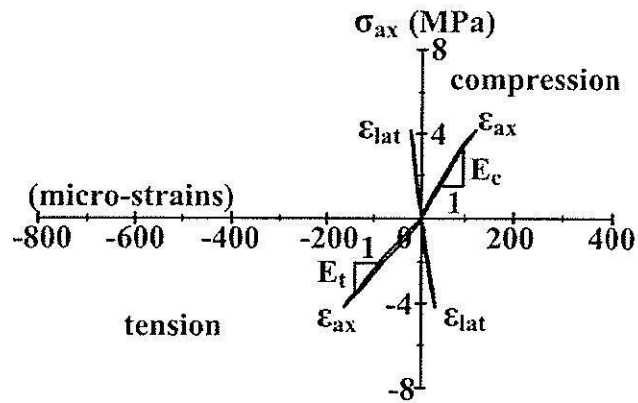
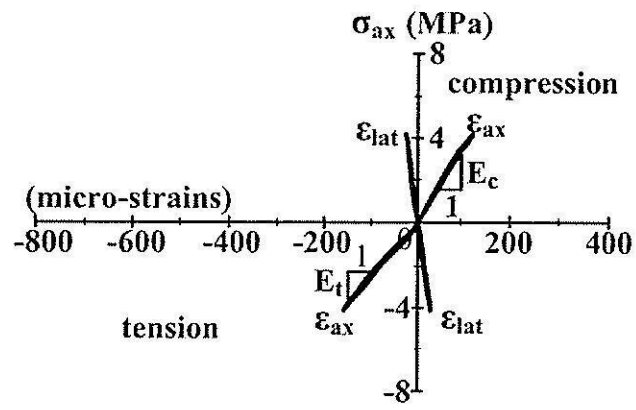
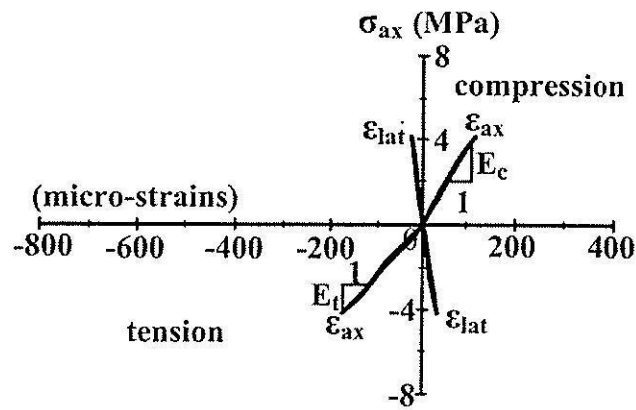
ตารางที่ 5.2 สรุปผลการคำนวณคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ที่ได้จากแรงกดในแกนเดียวและแรงดึงในแกนเดียว โดยสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง (E_t) จะต่ำกว่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่วัดได้ภายใต้แรงกดในแกนเดียว (E_c) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบที่เสนอโดย Jianhong et al. (2009) โดยอัตราส่วนของปัวของที่วัดได้จากตัวอย่างหินภายใต้แรงดึงในแกนเดียว (ν_t) จะต่ำกว่าค่าที่วัดได้ภายใต้แรงกดในแกนเดียว (ν_c) ซึ่งสอดคล้องกับการคาดคะเนของ Gercek (2007)



รูปที่ 5.3 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินทรายชุดภูพาน



รูปที่ 5.4 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินอ่อนจากสระบุรี



รูปที่ 5.5 ความเค้นและความเครียดภายใต้แรงดึงและแรงกดที่วัดได้จากหินปูนจากสระบุรี

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกด

Rock types	Elastic modulus (GPa)		Poisson's Ratio	
	E_c	E_t	ν_c	ν_t
PP sandstone	16.23±1.95	6.73±0.35	0.17±0.011	0.05±0.005
SB marble	41.66±2.08	34.43±0.95	0.19±0.010	0.15±0.003
SB lime-stone	37.15±0.99	26.13±1.06	0.21±0.012	0.18±0.005

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลงานวิจัย

อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกดที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้ผลตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ กล่าวโดยย่อคือ สามารถทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างหินภายใต้แรงดึงในแกนเดียวและสามารถให้ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงในแกนเดียวและภายใต้แรงกดในแกนเดียวได้เป็นอย่างดี ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จากหินทั้ง 3 ชนิด มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของนักวิจัยในต่างประเทศ

วิธีการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของความยืดหยุ่นภายใต้แรงกดของหินที่เสนอในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการเปรียบเทียบคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงและแรงกดเท่านั้น ผู้วิจัยไม่มีจุดประสงค์ที่จะใช้วิธีการดังกล่าวมาใช้แทนวิธีมาตรฐาน (ASTM) เพื่อหาคุณสมบัติของหินภายใต้แรงกด

ผลการทดสอบของหินทั้ง 3 ชนิด ที่ได้ในงานวิจัยนี้ได้นำไปสู่องค์ความรู้ใหม่ที่สำคัญ

คือ

1) ค่ากำลังดึงสูงสุดแบบตรงจะต่ำกว่าค่ากำลังดึงสูงสุดที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบอ้อมเสมอ ความแตกต่างนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกายภาพของหินแต่ละชนิด ตัวอย่างหินมีรูพรุนและมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดหินหรือผลึกต่ำ ความแตกต่างระหว่างค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบแบบตรงและแบบอ้อมจะมีค่าสูง แต่สำหรับหินที่มีเนื้อแน่น มีความพรุนน้อยและมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดหินกับผลึกดี ความแตกต่างระหว่างค่ากำลังดึงของการทดสอบแบบตรงและแบบอ้อมจะมีไม่มากนัก

2) สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซองที่วัดจากตัวอย่างหินภายใต้แรงดึงในแกนเดียวจะต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากตัวอย่างหินภายใต้แรงกดในแกนเดียวอย่างมาก ความแตกต่างนี้คาดว่าเกิดจากปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุน รอยร้าว และรอยต่อระหว่างผลึกแร่ ซึ่งข้อสรุปนี้มีหลักฐานมาจากการทดสอบข้างต้น กล่าวคือ หินทรายชุดภูพานที่มีความพรุนค่อนข้างมากและมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดแร่ค่อนข้างต่ำจะให้ความแตกต่างระหว่าง E_t และ E_c สูง คือประมาณร้อยละ 60 ในขณะที่หินปูนและหินอ่อนจากสระบุรีที่มีเนื้อแน่นกว่าและมีการยึดติดระหว่างผลึกค่อนข้างดีจะมีความแตกต่างระหว่าง E_t และ E_c ประมาณร้อยละ 20-30 เท่านั้น

3) แรงกดในแกนเดียวและแรงดึงในแกนเดียวจะให้ค่าอัตราส่วนของปัวซองต่างกันเช่นกัน โดยมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อหินเป็นหลัก กล่าวคือ ถ้าหินมีเนื้อแน่นและมีรูพรุนน้อย ค่าอัตราส่วนของปัวซองที่วัดได้จากแรงกดในแกนเดียวและแรงดึงในแกนเดียวจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับหินที่มีความพรุนสูงและมีแรงยึดติดระหว่างเม็ดหินไม่ดีนักจะให้ค่าอัตราส่วนของปัวซองที่ได้จากแรงดึงในแกนเดียวต่ำกว่าค่าที่ได้จากแรงกดในแกนเดียวอย่างมาก

4) ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ระบุว่า การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมได้ดินที่ต้องอาศัยค่ากำลังดึงสูงสุดของหินมากำหนดปัจจัยของความปลอดภัยควรใช้ค่ากำลังดึงที่ได้จากแรงดึงในแกนเดียวมาประเมินเสถียรภาพและออกแบบ เพราะถ้าใช้ค่ากำลังดึงที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบอ้อม (Brazilian Tension Test และ Ring Tension Test) ซึ่งให้ค่าสูงกว่าความเป็นจริงอาจส่งผลให้ผลการออกแบบนั้นไม่อยู่ในเชิงอนุรักษ์

บรรณานุกรม

- ASTM C1583/C1583M-04. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM C496-96. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D2936-08. Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D3967-95. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D7012. 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. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D638-08. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Blümel, M., 2000. Improved Procedures for Laboratory Rock Testing. Proc. EUROCK 2000 Symposium. Aachen, Essen, pp.573-578.
- Chen, S.-C., Pan, E., Amadei, E., 1998. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 35, 43-61.
- Claesson, J., Boholi, B., 2002. Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39, 991-1004.
- Cody K. Parker, Jennifer E. Tanner, Jorge L. Varela, 2007. Evaluation of ASTM Methods to Determine Splitting Tensile Strength in Concrete, Masonry, and Autoclaved Aerated Concrete. Journal of ASTM International. 4, 1-12.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K., 1986. Shape Effect on Ring Test Tensile Strength. Key to Energy Production: Proc. 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics.

- University of Alabama, Tuscaloosa, pp. 155-163.
- Gercek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44, 1-13.
- Gnanendran, T.C., Piratheepan, J., 2009. Indirect Diametrical Tensile Testing with Internal Displacement Measurement and Stiffness Determination. *Geotechnical Testing Journal*. 32, 1-10.
- Goodman, R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, New York
- Nahlawi, H., Chakrabarti, S., Kodikara, J., 2004. A Direct Tensile Strength Testing Method for Unsaturated Geomaterials. *Geotechnical Testing Journal*. 27, 1-6.
- Hondros, G., 1959. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) tests with particular reference to concrete. *Australian Journal of Applied Sciences*. 10, 243-268.
- Hu, G., Wang, Y., Xie, P., Pan, Z., 2004. Tensile strength for splitting failure of brittle particles with consideration of poisson's ratio. *China Particuology*. 22, 41- 247.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int. J. Rock. Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, 99-103.
- ISRM, 1981. *Suggested Method for Rock Characterization. Testing and Monitoring*. Pergamon, Oxford.
- Itasca, 1992. *User Manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0*. Itasca Consulting Group Inc, Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. W., 1979. *Fundamentals of Rock Mechanic*. Chapman and Hall, London, pp. 169-173.
- Jianhong, Y., Wu, F.Q., Sun, J.Z., 2009. Estimation of the tensile elastic modulus using brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 568-576.
- Liao, J.J., Yang, T.-M., Hsieh, Y.-H., 1997. Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 837-849.
- Liao, K. and Tan, Y. M. E., 2001. In situ tensile strength degradation of glass fiber in polymer composite. *Scripta Materialia*. 44, 785-789.
- Luis F. Vesga, 2009. Direct Tensile-Shear Test (DTS) on Unsaturated Kaolinite Clay. *Geotechnical Testing Journal*. 32, 397-409.
- Ohoka, M., Funato, A. and Takahashi, Y., 1997. Tensile test using hollow cylindrical specimen. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 3-4.

- Plinninger, J.R., Thomee, B., Wolski, K., 2004. The modified test (MTT) – evaluation and testing experiences with a new and simple direct tension test. Proc. the EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Schubert (ed.), pp. 545-548
- Sulukcu, S. and Ulusay, R., 2001. Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 1091-1111.
- Tepnarong, P., 2001. Theoretical and Experimental Studies to Determine Compressive and Tensile Strength of Rock, Using Modified Point Load Testing. M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Wang, Q. Z., Jia, X. M., Zhang, Z.X., Lindqvist, P.-A., 2003. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 245-253.
- Yagiz, S., 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 24, 66-74.
- Yu, Y., Yin, J. and Zhong, Z., 2005. Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43, 623-627.
- Yu, Y., Zhang, J. and Zhang, J., 2009. A modified Brazilian disk tension test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 421-425.
- Zi, G., Oh, H. and Park S.K., 2008. A novel indirect test method to measure the biaxial tensile strength of concretes and other quasibrittle materials. *Cement and Concrete Research.* 38, 751 – 756

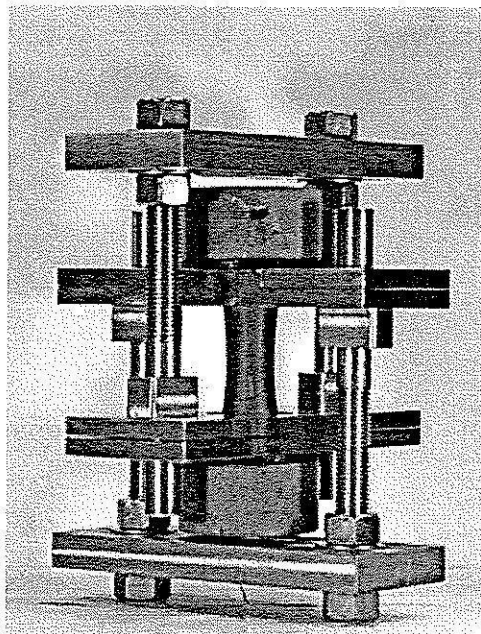
ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึง
ของหินภายใต้แรงกด

คู่มือการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึง ของหินภายใต้แรงกด

วิธีการทดสอบกำลังดึงของหินในแกนเดียว สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

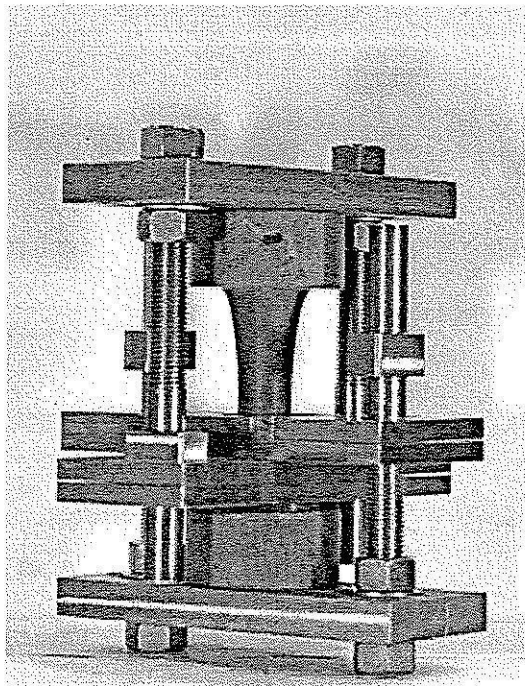
- 1) ประกอบชุดแผ่นดินเข้าด้วยกัน 2 ชุด ที่ส่วนกลางของตัวอย่างหิน
- 2) ประกอบตัวอย่างหินและชุดแผ่นดินเข้ากับเสาส่งผ่านแรงและแท่นกดที่วางหงายอยู่ โดยให้ชุดแผ่นดินด้านบนวางอยู่บนสลักตันที่หมุนตั้งฉากกับรูบนแผ่นดิน
- 3) นำแท่นกดชุดที่สองที่ประกอบเข้ากับเสาส่งผ่านแรงวางไว้ตรงส่วนบนของตัวอย่างหิน โดยให้สลักตันวางขวางอยู่กับรูของชุดแผ่นดินที่อยู่ด้านล่างดังรูปที่ ก-1
- 4) นำองค์ประกอบทั้งหมดข้างต้นใส่เข้าไปในเครื่องกดหิน โดยให้แท่นกดวางตัวอย่างอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวแกนของตัวอย่างหิน
- 5) ในกรณีที่มีการกดวัดค่าความเครียดด้วย Strain gages ให้ต่อสายไฟความต้านทานเข้ากับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแล้วตั้งค่าให้เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้แรงกดควรน้อยกว่าร้อยละ 50 ของกำลังดึงของตัวอย่างหินที่ส่วนกลางของแท่งตัวอย่างหิน
- 6) ให้แรงกดต่อองค์ประกอบทั้งหมด โดยแรงกดนั้นจะส่งผ่านแท่นกดบนและล่าง ซึ่งจะส่งผ่านแรงไปยังจุดแผ่นดินด้วยเสาส่งผ่านแรง
- 7) เพิ่มแรงกดขึ้นตามลำดับจนกระทั่งหินขาดออกจากกัน
- 8) ค่าแรงกดที่วัดได้ที่จุดวิกฤติจะนำมาใช้คำนวณกำลังดึงสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างหินนั้น โดยนำไปหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างหินในตำแหน่งที่มีรอยแตกเกิดขึ้น



รูปที่ ก-1 องค์ประกอบของการทดสอบหาลำกำลังดึงภายใต้แรงกด

วิธีการทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของภายใต้แรงกด สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนไว้ดังนี้

- 1) ประกอบชุดแผ่นดัดเข้าด้วยกัน 2 ชุด ที่ส่วนกลางของตัวอย่างหิน
- 2) นำตัวอย่างหินและชุดแผ่นดัดที่ประกอบแล้วสวมไว้บนแท่นกดที่วางหงายอยู่ โดยให้สลักดัดสอดเข้าไปในรูรูปสี่เหลี่ยมที่เจาะอยู่ในชุดแผ่นดัด ดังนั้น ชุดแผ่นดัดทั้งสองชุดจะเลื่อนมาที่ส่วนล่างของตัวอย่างหิน
- 3) นำแท่นกดและชุดเสาส่งผ่านแรงอีกชุดหนึ่งวางบนตัวอย่างหิน โดยใช้สลักดัดสอดเข้าไปในรูของชุดแผ่นดัดชุดล่าง (รูปที่ ก-2)
- 4) นำองค์ประกอบทั้งหมดใส่เข้าไปในเครื่องกด โดยให้ตัวอย่างหินอยู่ในแนวแรงกดของเครื่องกด
- 5) ในกรณีที่มีการตรวจวัดสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของภายใต้แรงกดด้วย Strain gages ให้ต่อสายไฟความต้านทานเข้ากับอุปกรณ์อ่านและตั้งค่าเท่ากับศูนย์
- 6) เพิ่มแรงกดขึ้นตามลำดับ ในขณะที่มีการอ่านค่าความเครียดไม่ควรให้แรงกดเกินกว่าร้อยละ 50 ของกำลังกดสูงสุดของหินที่คำนวณได้ที่ส่วนกลางของแท่งตัวอย่างหิน
- 7) ในกรณีที่ต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของภายใต้แรงดึงของตัวอย่างเดียวกันนี้ ให้เลื่อนชุดแผ่นดัดให้ติดกับป่าของตัวอย่างหิน แล้วหมุนสลักดัดให้ตั้งฉากกับรูบนแผ่นดัด ซึ่งจะทำให้แท่นกดด้านบนและด้านล่างแยกออกจากปลายด้านบนและปลายด้านล่างของแท่งตัวอย่างหิน



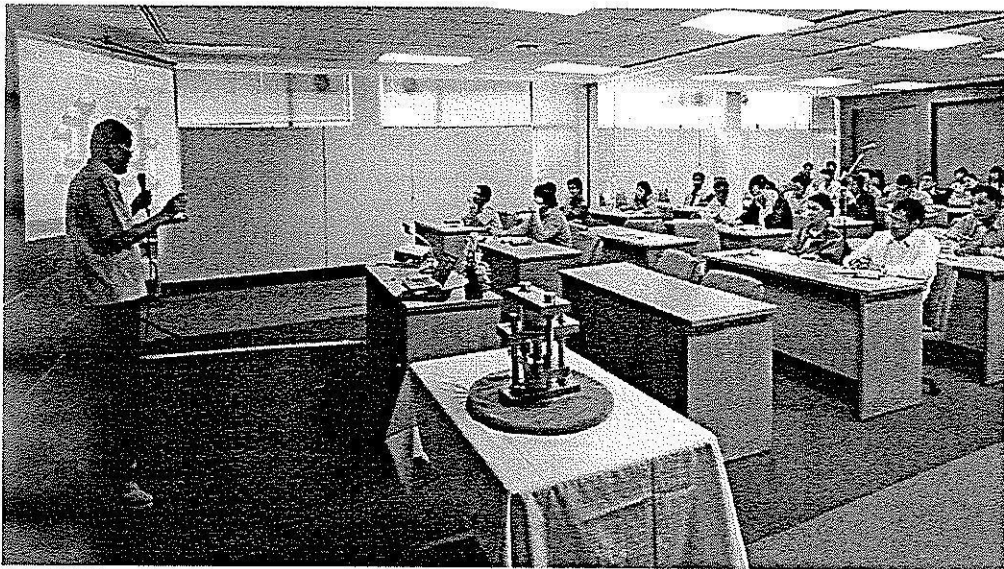
รูปที่ ก-2 องค์ประกอบของการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้แรงกด

ภาคผนวก ข

การประชาสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี

การประชาสัมพันธ์ถ่ายทอดเทคโนโลยี

หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้จัดให้มีการอบรมและเผยแพร่อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ เมื่อวันที่ 21 มกราคม 2553 ณ ห้องประชุม 1 อาคารวิชาการ โดยเวลา 09.00-12.00 น. บรรยายสรุปและสาธิตวิธีการใช้อุปกรณ์ดังกล่าว โดยมี รศ.ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร เป็นวิทยากร (รูปที่ ข-1) และช่วงเวลา 13.00-16.00 น. ได้มีการนำเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการกลศาสตร์หินที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (รูปที่ ข-2) ซึ่งการอบรมครั้งนี้ได้รับความสนใจจากนักวิชาการทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และสถานศึกษาเป็นอย่างดี ดังรายชื่อหน่วยงานและผู้เข้าอบรมตามตารางที่ ข-1



รูปที่ ข-1 การอบรมและเผยแพร่วิธีการใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติของหินภายใต้แรงกด



รูปที่ ข-2 การเข้าเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 4

ตารางที่ ข-1 หน่วยงานและรายนามผู้เข้าอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของ
หินภายใต้แรงกด

ลำดับที่	หน่วยงาน	ชื่อ - สกุล
หน่วยงานภาครัฐ		
1	แขวงการทางอุตรดิตถ์ที่ 2	นายทศพร ยาสมร
2	กรมอุตสาหกรรมและการเหมืองแร่	นายปิยะ กิ่งแก้ว นายศักดิ์ชัย บุปผานนท์ นายชาลี ประจักษ์วงศ์
3	ศูนย์สร้างและบูรณะสะพานที่ 2	นายวิบูรณ์ ศรีก้อม นายเมธี อุ่นช่วง นายสุรวุฒิ แหวนวนวงศ์
4	สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและ การเหมืองแร่ เขต 2 อุตรธานี	นายปกร พูลผล
5	กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี	นายอดุลย์ วรรณเพ็ระ
6	สำนักชลประทานที่ 8	นายอนุรักษ ภัคดี
7	โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา	นายวรเทพ คุณเศรษฐ์
8	กฟผ. โรงไฟฟ้าพระนครใต้	นายคริส สุจิตกุล
9	กฟผ. แม่เมาะ	นายประดิษฐ์ พิมพ์กลาง นายบัญชา ชายศักดิ์
หน่วยงานภาคเอกชน		
10	Intro Enterprise co., Ltd.	คุณสุเทพ พันธ์
11	บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)	รท.วิจิตต ไกยอุส่าห์
12	บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)	นายอนุพงษ์ ภีร์กันทา นางสาวรุปนีย์ ไชยรัตน์ นายยุทธภูมิ ชมภูทวีป
13	บริษัท จีเอ็มที คอร์ปอเรชั่น จำกัด	นายรักตระกูล ศรีคำ นายเอกรินทร์ แบะกัน นายพิชญุตน์ จินาล่อง
14	บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)	นายอดิศักดิ์ บุญบาตร

ตารางที่ ข-1 หน่วยงานและรายนามผู้เข้าอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของ
หินภายใต้แรงกด (ต่อ)

ลำดับที่	หน่วยงาน	ชื่อ - สกุล
หน่วยงานภาคเอกชน (ต่อ)		
15	บริษัท อัคราไมนิ่ง จำกัด	นายพงษ์ศักดิ์ แปงเพชร คุณวรรณิตา จันทะมุต นายชาติชาย อินทรประสิทธิ์ นายศุภกิจ เพ็ญบุเหลาว (นักศึกษาฝึกงาน) นายสมประสงค์ คำรันต์ (นักศึกษาฝึกงาน)
16	บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด	นายสรายุทธ อาชีพโลหะ
สถานศึกษา		
17	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	นางสาววิมล สุขพล่า
18	นักศึกษาระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	นายพิชิต เสมศรี นายชนพล ศรีอภัย นายธนวัฒน์ พบวันดี นายสิปปกร กลั่นภูมิศรี นางสาวมัทรี กลีบเมฆ นางสาวภาวินี มาสิงบุญ นางสาวสุกานดา รินทราวีไล นางสาวจิราภัท ออบเซย นายยรรยง วงศ์รำพันธ์ นายเกียรติศักดิ์ อาจคงหาญ นายรัตนชาติ รัตนพงศ์
19	นักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	นายคมกริช ผาดไทสง นายชนากร กมลเพชร นายนริศ มณีวรรณ นางสาวชนิษฐา ทองประภา นางสาวนริศรา กิจสง่า นางสาวธิดารัตน์ ขำทิพย์พาทิ นายรณชัย ดาศรี นายสิทธิพล งามไสว

สรุป หน่วยงานภายนอก 30 คน นักศึกษา มทส. 19 คน

ภาคผนวก ค

บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการระหว่างประเทศ

บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการระหว่างประเทศ

ผลงานวิจัยอุปกรณ์สำหรับทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด ได้มีการ
นำเสนอบทความในการประชุม EUROCK 2010 ณ เมืองโลซานน์ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ใน
วันที่ 15-17 มิถุนายน 2553

Determination of direct tensile strength and stiffness of intact rocks

Fuenkajorn & S. Klanphumeesri

Rock Mechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand

ABSTRACT: Direct tensile strength and stiffness are determined from dog-bone shaped specimens of intact granite, limestone and marble. A compression-to-tension load converter is developed to allow a measurement of the elastic modulus and Poisson's ratio under tensile and compressive loadings on the same specimen. A series of finite difference analyses are performed to obtain the most suitable specimen configurations. For all rock types the direct tensile strengths are clearly lower than the Brazilian and ring tensile strengths. The elastic moduli and Poisson's ratios under uniaxial tensile stress are lower than those under uniaxial compressive stress, probably because the effort required to dilate the pore spaces and fissures in the rocks under tensile loading is lower than that to contract them under compressive loading. As a result these rocks tend to be stiffer under compression than under tension.

1 INTRODUCTION

Tensile strength of rock is an important parameter used in the design and stability analysis of underground structures. Rock tensile strength dictates the maximum roof span of underground workings, the maximum internal pressure of underground storage caverns, the stability of boreholes under highly anisotropic stress states, and the fracture pressures for hydraulic fracturing. The direct tension test (ASTM D 2936) may not be applicable to high strength rocks due to the limited performance of the cementing adhesive between the loading platens and sample end surfaces. The Brazilian tension test (ASTM D 3967) has been widely used to obtain rock tensile strengths due to the simplicity of sample preparation and testing. It however can not provide the elastic parameters under pure tension. To overcome the strength limitation of the direct tension method Plinninger et al. (2004) propose the modified tension test to determine the rock strength under unidirectional loading. Even though their test method is simple, the results do not truly represent the direct tensile strength, and a measurement of the tensile elastic properties from the proposed specimen configurations is not possible.

It has been recognized that the rock elastic modulus under tension may differ from that under compression. The mechanisms governing such discrepancy have not been adequately described. Hong et al. (2009) determine the tensile elastic

moduli of four rock types from the Brazilian tests by measuring the total deformation of the loaded diameter and combining with complex analytical solutions. They conclude that the tensile elastic modulus is lower than the compressive elastic modulus. Liao et al. (1997) however conclude from their experimental results that the tensile elastic modulus of argillite is comparable to that under compression. Without the closure of the rock pore spaces the elastic modulus under tension would exceed that under compression.

The objective of this paper is to determine the direct tensile strength and stiffness of intact rock specimens. The effort involves development of a compression-to-tension load converter, finite difference analysis, and measurements of the rock tensile strengths and stiffness. The tensile strengths and elastic parameters obtained from different test methods are compared to improve our understanding of the rock failure and deformation under tension.

2 COMPRESSION-TO-TENSION LOAD CONVERTER

A compression-to-tension load converter (CTC) was developed to determine the strengths and elastic parameters of dog-bone shaped specimen under uniaxial tension and compression. Its mechanism allows alternating between the applications of tensile load and compressive load on the same specimen while placing in a conventional compression machine. The deformation characteristics of the

me specimen under both tension and compression can be measured, hence eliminating any intrinsic variability among the tested specimens. Figure 1 shows the CTC device arranged for the tensile and compressive loading. Under direct tension testing the end plates, which are separated from the specimen, transfer the compressive load through the steel columns to the bearing plate at the opposite ends. This induces a tensile force in the specimen mid-section. For compression testing the four loading blocks are rotated 90 degrees, slipping through the pre-cut slots, and hence the bearing plates are free of load. This allows the end plates to press on the specimen ends, and subsequently the mid-section will subject to the applied compressive load.

ROCK SAMPLES

Phan (PP) sandstone, Saraburi (SB) marble and limestone were selected for this study. These fine-grained rocks have highly uniform texture. They were cut and machined to obtain dog-bone shaped cylinders with a total length of 24 cm. The diameter at both ends is 10 cm with 5 cm long. The mid-section diameter increases from 3 cm at the center to 6 cm at both ends (Fig. 2).

The specimen size and shape above are the end results of several trials of finite difference simulations using FLAC (Itasca 1992). The axis symmetry analyses were made under a variety of specimen configurations, assuming that the rock was linearly elastic and isotropic. The primary objective is to ensure that the uniaxial tensile stress is uniformly distributed across the mid-length diameter, and that a tensile failure occurs before compressive shear failure is induced near the specimen ends. The stress distributions across the specimen diameters obtained from FLAC simulations for the proposed specimen configurations are plotted for the compressive and tensile loading conditions in Figure 3. Under tensile loading, the axial stress normalized by the applied

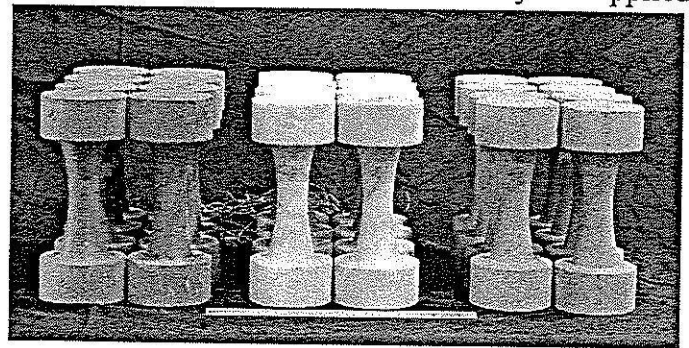
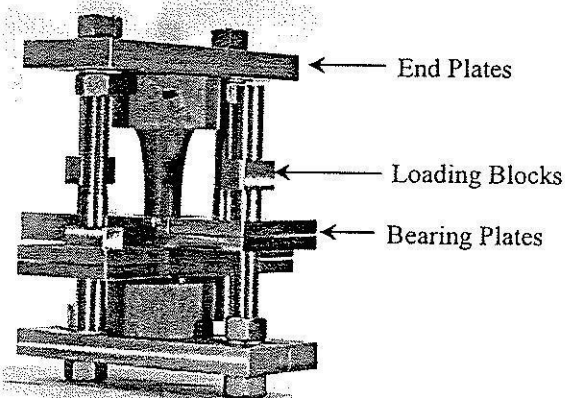
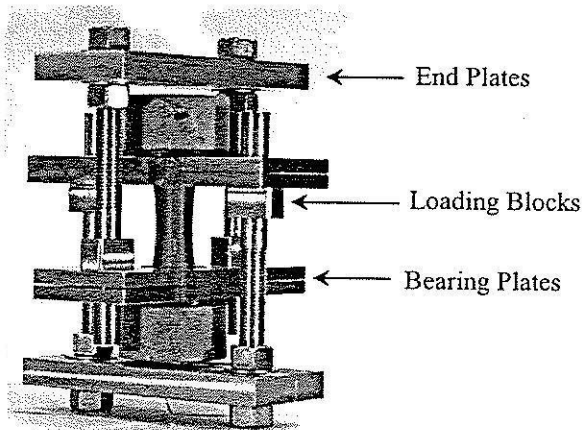


Figure 2. SB limestone (left), SB marble (middle) and PP sandstone (right) prepared for direct tensile testing.



1. Compression-to-tension load converter arranged for tensile loading (top) and compressive loading (bottom).

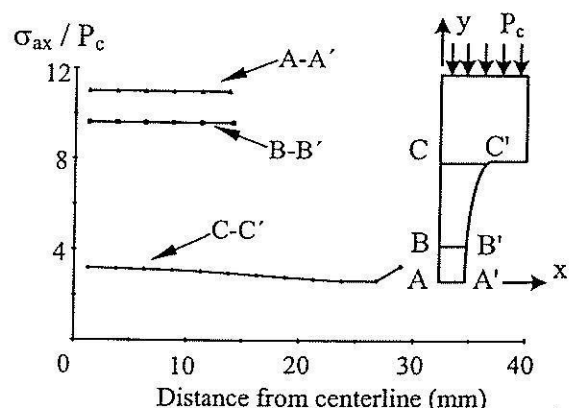
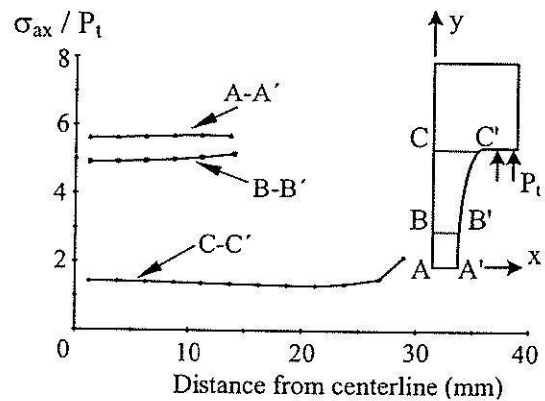


Figure 3. Axial stresses across specimen diameters for tensile loading (top) and compressive loading (bottom).

stress (σ_{ax}/P_t) at the mid-length diameter (A-A') is actually uniform – the variation is less than 1.4%. The normalized axial compressive stress (σ_{ax}/P_c) at the mid-length is perfectly uniform. Away from the mid-length the induced stresses become lower and non-uniform because the specimen diameter is larger toward the ends and closer to the load bearing areas where high shear stresses are concentrated (sections B-B' and C-C' in Fig. 3).

TENSILE STRENGTH TESTS

The CTC device was placed in a compression load frame to apply uniaxial tensile stress at the mid-section of the specimen. Five specimens from each rock type were loaded at a constant rate of 1 MPa/s until tensile failure occurred. A splitting tensile failure was induced in the mid-section of all specimens (Fig. 4). The tensile strengths are determined by dividing the applied load by the cross-sectional area where the actual tensile crack was induced. The strength results are summarized in Table 1.

Brazilian and ring tensile strength tests were performed on the three rock types. For the Brazilian testing the sample preparation, test procedure and strength calculation follow the ASTM D 3967 standard practice. The specimen diameter is 10 cm and the length 5 cm. The ring test specimens are 5 cm long with nominal outer and inner diameters of 4 cm and 3 cm. The strength calculation follows the solutions given by Jaeger & Cook (1979). Table 2 compares the results from the two methods.

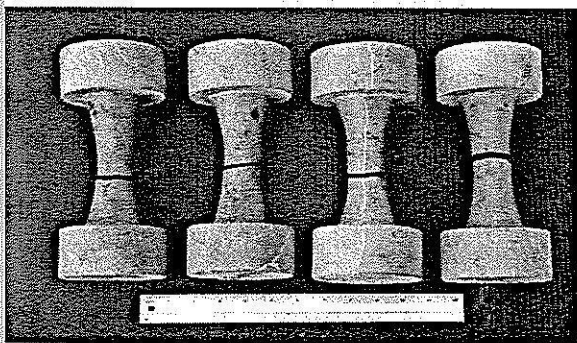


Figure 4. Some post-test specimens of SB limestone. Specimen length is 24 cm.

Table 1. Summary of direct and indirect tensile strengths.

Rock types	Density (g/cc)	Direct tensile strength (MPa)	Brazilian tensile strength (MPa)	Ring tensile strength (MPa)
limestone	2.36±0.12	6.49±0.22	10.68±0.70	16.10±3.00
marble	2.65±0.08	6.33± 0.62	8.02±0.25	20.59±1.24
limestone	2.81±0.05	9.31±0.65	10.90±0.19	23.18±1.70

The ring tension test yields the highest strength values due to the high stress gradient along the incipient crack plane (e.g., Jaeger & Cook 1979). The direct tensile strength is clearly lower than the Brazilian tensile strength, which agrees with the experimental results obtained by Plinninger et al. (2004), but disagrees with those of Liao et al. (1997). It is interesting to note that the porous PP sandstone shows the largest difference between the Brazilian and direct tensile strengths (about 40%) compared to that of the denser SB marble and limestone (about 15%-21%). The difference of the tensile strengths from the two methods may therefore be partly governed by the amount and distribution of pore spaces and fissures in the rocks.

5 ELASTIC PARAMETERS UNDER TENSION

To determine the elastic parameters under uniaxial tensile stresses three additional dog-bone shaped specimens for each rock type were mounted with strain gages at the mid-section and loaded up to 4 MPa. The specimen was subjected to one cycle of loading and unloading under uniaxial tension and compression. Figure 5 shows the axial stresses (σ_{ax}) as a function of axial and lateral strains (ϵ_{ax} , ϵ_{lat}) for some specimens. The elastic parameters are calculated from the tangent of the curves at the maximum applied stress. For all rock types the tensile elastic modulus (E_t) is lower than the compressive elastic modulus (E_c) measured from the same specimen (Table 2). This agrees with the experimental results by Jianhong et al. (2009). The Poisson's ratios under uniaxial tension (ν_t) are slightly lower than those calculated from the uniaxial compression (ν_c), which agrees with the postulation by Gercek (2007).

6 DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

The CTC device is designed specifically to obtain a direct comparison of the elastic parameters under uniaxial tensile and compressive loads from the same specimen, and to induce extension failure under a true uniaxial tensile stress. The proposed testing technique is not intended to replace the conventional method of elastic parameter measurements under uniaxial compression. The test diameter at the mid-section is smaller than that recommended by the ASTM standard practices, which may raise an issue of size effect on the measured strengths. This nevertheless does not change the conclusions drawn from the test results above. If the size effect is present, the direct tension tests with a larger specimen diameter would

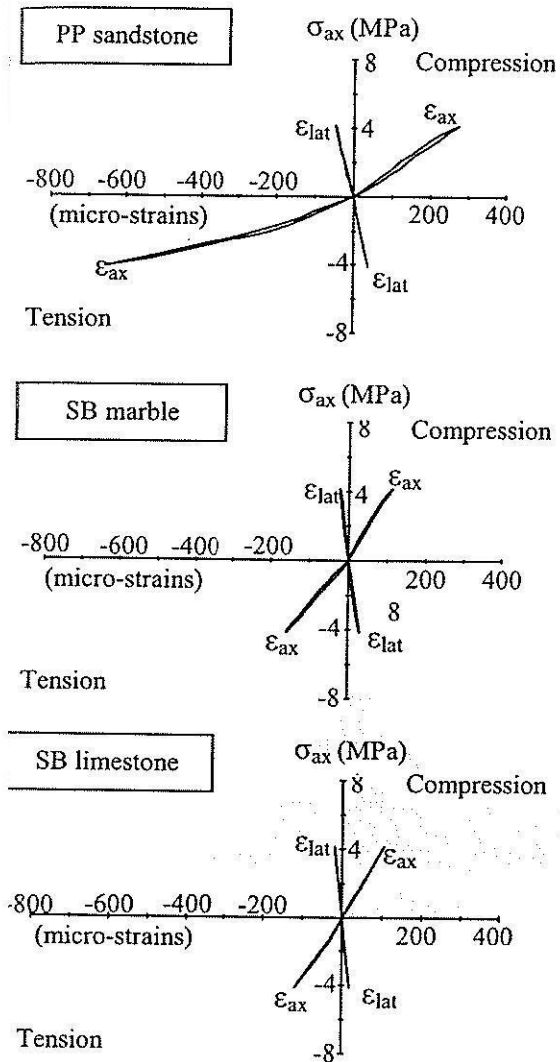


Figure 5. Axial stress (σ_{ax}) as a function of axial and lateral strains (ϵ_{ax} , ϵ_{lat}) for one cycle of compression and tensioning of some rock specimens.

Table 2. Elastic parameters obtained from tensile and compressive loadings.

Rock	Elastic modulus (GPa)		Poisson's Ratio	
	E_c	E_t	ν_c	ν_t
Sandstone	16.23±1.95	6.73±0.35	0.17±0.011	0.05±0.005
Marble	41.66±2.08	34.43±0.95	0.19±0.010	0.15±0.003
Limestone	37.15±0.99	26.13±1.06	0.21±0.012	0.18±0.005

and even lower strength than the values reported. To obtain the mid-section diameter of 54 mm or larger, the total specimen length will become impractical for preparation and testing.

The test results indicate that the direct tensile strengths of PP sandstone, SB limestone and SB marble are lower than the Brazilian tensile strengths. This probably holds true for other rocks with comparable physical properties. The rock elastic modulus and Poisson's ratio under tension are also significantly lower than those under compression.

We agree with the postulations given by Gercek (2007) that the discrepancies probably relate to the amount and distribution of the pore spaces and micro-fissures (inter-crystalline boundaries and cleavages), and the bond strength of cementing materials. As suggested by the test results here, the porous and relatively poor-bonding PP sandstone shows the largest difference between the tensile and compressive elastic moduli - E_t is about 40% of E_c . The tensile and compressive elastic moduli for the dense and well-bonding SB limestone and marble are less different ($E_t = 70\% - 80\% E_c$). Under uniaxial tension the Poisson's ratio (ν_t) is lower not only because the axial tensile strain becomes larger, but also the lateral (transverse) compressive strain is smaller compared to those under uniaxial compression. The pore spaces in rock matrix probably dilate easier under tensile load than they do under compressive load. The findings suggest that for a conservative approach the rock uniaxial (direct) tensile strength and tensile elastic modulus should be recognized in the stability analysis of underground structures that are subject to tensile loads.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was supported by the Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn's Innovation Fund. Permission to publish this paper is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- ASTM D 2936-08. Standard test method for direct tensile strength of intact rock core specimens. *Annual Book of ASTM Standards* Vol. 04. 08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967-95. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Gercek, H. 2007. Poisson's ratio values for rocks. *Intl. J. Rock Mech. and Min. Sci.* 44(1): 1-13.
- Itasca. 1992. *User Manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0*. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis: Minnesota.
- Jaeger, J.C. & Cook, N.G.W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Chapman and Hall. 593 pp.
- Jianhong, Y., Wu, F.Q. & Sun, J.Z. 2009. Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *Intl. J. Rock Mech. and Min. Sci.* 46(3): 568-576.
- Liao, J.J., Yang, T.-M. & Hsieh, Y.-H. 1997. Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. *Intl. J. Rock Mech. and Min. Sci.* 34(5): 837-849.
- Plinninger, J.R., Thomee, B. & Wolski, K. 2004. The modified tension test (MTT) - evaluation and testing experiences with a new and simple direct tension test, *Proc. of the EUROCK 2004*: 545-548.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก 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 การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา "Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock" ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา 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