



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-28

## รายงานการวิจัย

### การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล ภายใต้ความเค้นกดในแนวแกน

(Brazilian Tensile Strength Testing under Axial Compression)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-28

## รายงานการวิจัย

### การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล ภายใต้ความเค้นกดในแนวแกน

(Brazilian Tensile Strength Testing under Axial Compression)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

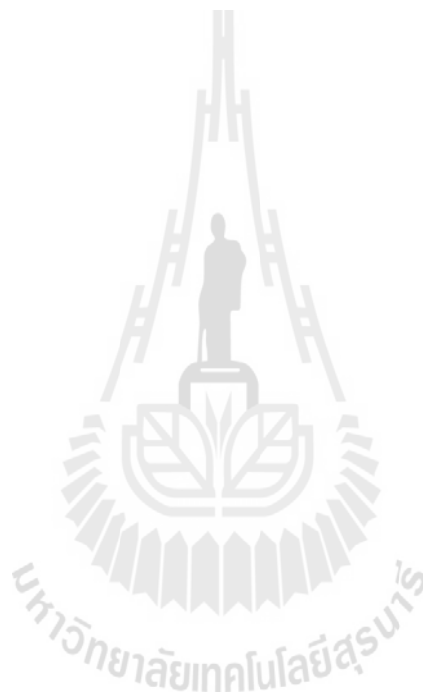
มิถุนายน 2555

## กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2555



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงของตัวอย่างหินที่จัดเตรียมจากหินทรายชุดภูพาน ชุดพระวิหาร ชุดภูกระดึง และหินอ่อนสระบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อค่ากำลังดึงของหิน การทดสอบแบ่งเป็นสองกลุ่มคือ การทดสอบในสามแกนแบบขยาย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) และการทดสอบกำลังกดในสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) การทดสอบในกลุ่มแรกประกอบด้วย การทดสอบในสองแกนและสามแกนแบบขยาย การทดสอบการดัดงอแบบกดสี่จุด และการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ความเค้นกดในแนวแกน การทดสอบในกลุ่มที่สองประกอบด้วย การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน และการทดสอบการดัดงอแบบแผ่นกลม ผลที่ได้ระบุว่าเกณฑ์การแตกของ Coulomb สามารถนำมาประยุกต์ใช้และมีความสัมพันธ์เป็นอย่างดีกับผลการทดสอบของทั้งสองกลุ่ม ค่ากำลังกดและกำลังดึง และค่าความเค้นยึดติดที่ได้จากการทดสอบในสามแกนแบบขยายจะสูงกว่าผลการทดสอบในสามแกนแบบกด ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับหินทั้งสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้จากสภาวะทั้งสองให้ค่ามุมเสียดทานภายในที่ใกล้เคียงกัน ข้อสรุปอีกประการหนึ่งคือค่าความเค้นหลักกลางจะทำให้หินแข็งขึ้นทั้งที่อยู่ในสภาวะกดและสภาวะดึง และที่สำคัญกว่านั้นคือผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลเลียนไม่สามารถนำมาสัมพันธ์กับผลการทดสอบที่ได้จากสภาวะความเค้นทั้งสองรูปแบบ การนำกฎการแตกของ Coulomb มาประยุกต์ใช้เมื่อหินอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นดึงควรใช้ผลที่ได้จากการทดสอบการดัดงอแบบแผ่นกลมแทนที่จะใช้ผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลเลียนดังที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

## Abstract

Compressive and tensile strength test are performed on intact rocks prepared from Phu Phan, Phra Wihan and Phu Kradung sandstones and Saraburi marble to determine the effect of the intermediate principal stress on the tensile strength results. The tests are separated into two groups based on the stress state at failure; triaxial extension ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) and triaxial compression ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ). The first group includes biaxial and triaxial extension tests, four point bending test and Brazilian tension test with axial compression. The second group includes uniaxial and triaxial compression tests and circular plate bending test. The results indicate that the Coulomb criterion can well correlate with the compressive and tensile strengths obtained from each stress condition. For all rock types the compressive and tensile strengths and cohesion obtained from the triaxial extension tests are greater than those obtained from the triaxial compression tests. Both stress conditions give similar internal friction angle. This suggests that  $\sigma_2$  can strengthen the rock for both compressive and tensile regions. More important the results indicate that the Brazilian tensile strength can not be correlated with the two stress conditions. It is recommended that an extension of the Coulomb criterion into the tensile region should be correlated with the tensile strength obtained from the circular plate bending test rather than the Brazilian tension test.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	4
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	11
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>13</b>
2.1 การแตกของหิน.....	13
2.2 กฎที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหิน.....	14
2.2.1 กฎของคูลอมป์.....	14
2.2.2 กฎของ Griffith.....	18
2.2.3 กฎที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	19
2.2.4 กฎของ Bieniawski.....	19
2.2.5 กฎของ Hoek and Brown.....	20
2.2.6 กฎของ Yudhbir.....	20
2.2.7 กฎของ Kim and Lade.....	20
2.2.8 กฎของ Johnston.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การแตกของหินภายใต้แรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	21
2.4 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัยในอดีต.....	24
<b>บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>25</b>
3.1 วัตถุประสงค์.....	25
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	25
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>29</b>
4.1 วัตถุประสงค์.....	29
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....	29
4.3 การทดสอบการกดแกนเดียวและในสามแกน.....	31
4.4 การคำนวณผลการทดสอบ.....	32
4.4.1 การคำนวณค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย.....	32
4.4.2 การคำนวณค่าความเค้นยึดติด.....	32
4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์.....	33
4.6 การทดสอบการตัดงอแบบสี่จุด.....	34
4.7 การทดสอบการกดในสองแกน.....	39
4.8 การทดสอบการตัดงอในแผ่นกลม.....	40
<b>บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>43</b>
5.1 วัตถุประสงค์.....	43
5.2 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดของตัวอย่างหิน.....	43
5.3 ผลการทดสอบกำลังดึงสูงสุดของตัวอย่างหิน.....	47
<b>บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....</b>	<b>55</b>
6.1 วัตถุประสงค์.....	55
6.2 ผลกระทบของความเค้นหลักกลาง.....	55
6.3 วิจัยณ์ผลการศึกษา.....	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการศึกษา.....	65
บรรณานุกรม.....	67
ประวัตินักวิจัย.....	69





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน.....	44
5.2 ผลการทดสอบกำลังกดในสองแกน.....	46
5.3 ผลการทดสอบแรงกดค้ำตั้งอแบบสี่จุด.....	48
5.4 ผลการทดสอบการค้ำตั้งอในแผ่นกลมของตัวอย่างหินแต่ละชนิด.....	52
6.1 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดภูพาน.....	57
6.2 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดภูกระดึง.....	58
6.3 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดพระวิหาร.....	59
6.4 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินอ่อนสระบุรี.....	60
6.5 ผลการคำนวณค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของหินแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับ สภาวะความเค้นที่ $\sigma_1 = \sigma_2$ และ $\sigma_2 = \sigma_3$ .....	60

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดจาก ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อธิบายโดยกฎของคูลอมป์.....	2
1.2 วงกลมเมอร์แสดงความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดจาก ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	2
1.3 แนวคิดการทดสอบเพื่อให้เกิดความเค้นบนตัวอย่างที่มีทั้งความเค้นดึงและความเค้น กด การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์.....	6
2.1 ลักษณะการแตกของหินรูปแบบทั่วไป การแตกแบบแยกออกจากกันตามแนวยาว ที่ขนานกับแรงกด การแตกในแนวเฉือน การแตกในแนวเฉือนแบบเป็นชุด การแตก แบบดึงหรือการแยกออกจากกันด้วยแรงดึง การแตกแบบดึงที่เกิดจากการกดในทิศ ที่ตั้งฉากกัน.....	14
2.2 แผนภูมิแสดงกฎของคูลอมป์รูปแบบต่างๆ.....	17
2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความเค้นบนระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างหิน...	23
2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความเค้นบนระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างหิน...	23
3.1 ตัวอย่างหินขนาด 5.5×5.5×5.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร บางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับ ทดสอบกำลังกดในแกนเดียว กำลังกดในสองแกน และกำลังกดในสามแกน.....	26
3.2 ตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร รูปแผ่นกลมที่จัดเตรียมสำหรับ ทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์.....	26
3.3 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร และหินทรายชุดภูพาน ที่ใช้ ในการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	27
3.4 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร และหินทรายชุดภูพาน ที่ใช้ ในการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม.....	28
4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง.....	30
4.2 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกนจริง.....	30
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง.....	31
4.4 เครื่องทดสอบในสามแกนจริงสำหรับทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์.....	34
4.5 แผนภาพ Shear diagram ในอุดมคติของหินที่เกิดจากการทดสอบการกดดัดงอ แบบสี่จุด.....	35

## สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินแต่ละระดับความหนา ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	36
4.7 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	37
4.8 ฐานกดหินด้านบนที่พื้นเหล็กมีระยะห่างระหว่างพื้นเท่ากับ 8 เซนติเมตร และฐาน รองรับหินด้านล่างที่พื้นเหล็กมีระยะห่างระหว่างพื้นเท่ากับ 24 เซนติเมตร.....	38
4.9 เครื่องมือทดสอบกำลังกดในสองแกน (Biaxial load frame)38	
4.10 เครื่องมือทดสอบกำลังกดในสองแกนในขณะที่ติดตั้งตัวอย่างหินทรายเข้าในช่องใส่ ตัวอย่าง.....	40
4.11 แผนผังของการอุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบการดัดงอในแผ่นตัวอย่างหิน กลม.....	41
4.12 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบการดัดงอในแผ่นตัวอย่างหินแผ่นกลม.....	41
4.13 หัวกดวงแหวนบน เส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และหัวกดวงแหวนล่าง เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร.....	42
5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และในสามแกน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด.....	45
5.2 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และในสามแกนของ ตัวอย่างหินแต่ละชนิดจากบนลงล่างได้แก่ หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูพาน และหินอ่อนสระบุรี.....	45
5.3 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบกำลังกดในสองแกนที่ความเค้นหลักรองเท่ากับ 0 และที่ความเค้นหลักรองผันแปรตั้งแต่ 2, 4 และ 6 MPa ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด จากบนลงล่างได้แก่ หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูพาน และหินอ่อนสระบุรี.....	47
5.4 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบแรงกดดัดงอแบบสี่จุด.....	48
5.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกด ( $\sigma_y$ ) และความเค้นดึง ( $\sigma_x$ ) ที่จุดแตกในฟังก์ชันของ $\sigma_z$ ที่กระทำกับ ตัวอย่างหิน.....	49
5.6 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์.....	50
5.7 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบแรงกดดัดงอในแผ่นกลม.....	53

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลัก สูงสุด ( $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด.....	56
6.2 ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน และหินทรายชุดภูกระดึง...	61
6.3 ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร และหินอ่อนสระบุรี.....	62



# บทที่ 1

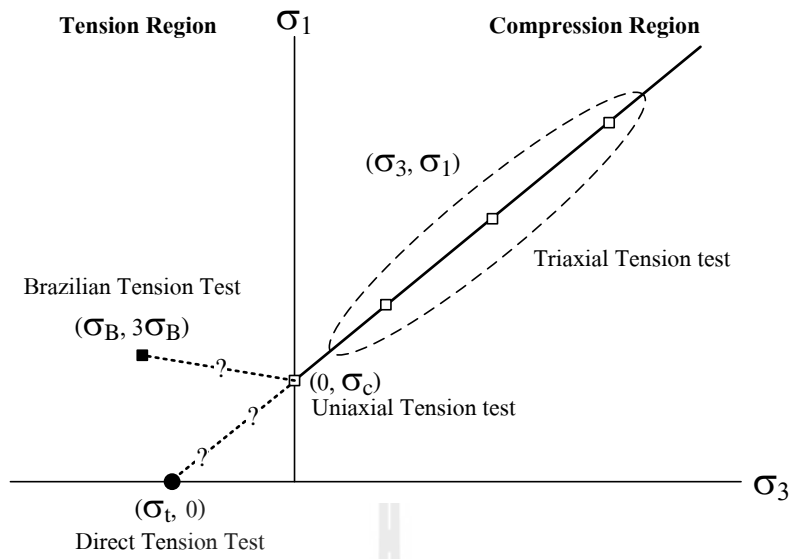
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

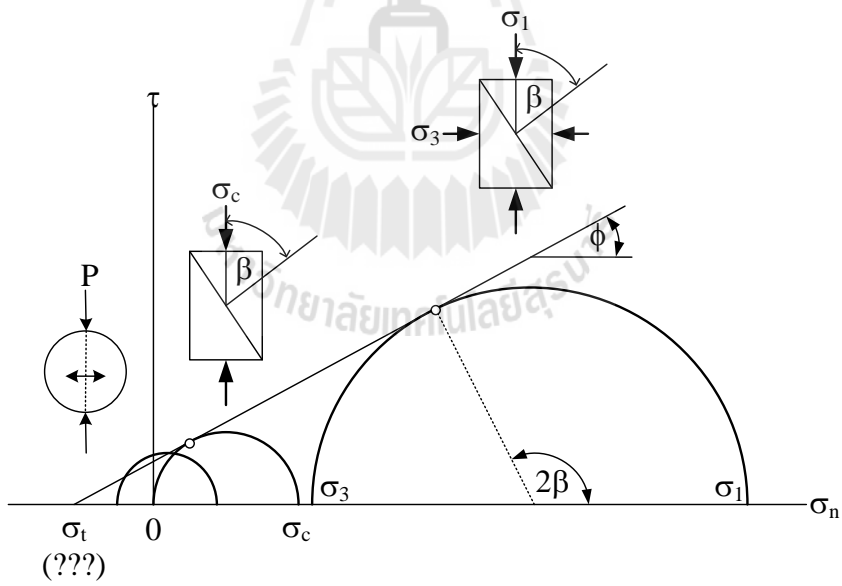
การอธิบายพฤติกรรมกรรมการแตกของหินโดยทั่วไปนั้นมีกฎเกณฑ์มากมาย อาทิ กฎของคูลอมบ์ กฎของ Griffith, Bieniawski, Hoek and Brown และกฎที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เป็นต้น กฎเกณฑ์ต่างๆ เหล่านี้อธิบายพฤติกรรมกรรมการแตกของหินในรูปของความเค้นหลัก ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างทำให้หินแตก กฎที่นิยมใช้และสร้างจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายไม่ซับซ้อนคือกฎของคูลอมบ์

นักวิจัยและวิศวกรทราบและเข้าใจดีว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ตามกฎของคูลอมบ์เป็นเส้นตรงจึงได้นำผลไปวิเคราะห์และออกแบบงานด้านกลศาสตร์หิน ความสัมพันธ์ดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ โซนที่เป็นความเค้นกด (Compression region) และโซนที่เป็นความเค้นดึง (Tension region) โซนที่เป็นความเค้นกดนั้นสร้างจากผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน ส่วนในโซนที่เป็นความเค้นดึงจะได้รับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิช (เป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม) หรืออาจได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (เป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ง่ายนัก)

ผลการศึกษาจากโครงการอื่นที่ผู้วิจัยรับผิดชอบ (Fuenkajorn and Klanphumeesri, 2010) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ในโซนที่เป็นความเค้นกดที่เป็นเส้นตรงและสามารถเชื่อมโยงไปหาค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง แต่ไม่สามารถลากเชื่อมต่อกับจุดผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิชให้เป็นเส้นตรงเดียวกันกับที่ได้จากโซนความเค้นกด (รูปที่ 1.1) และจากการสร้างวงกลมมอร์ (Mohr's circle) พบว่าค่าความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และต่ำสุด ( $\sigma_3$ ) จากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกนโดยมีการวัดมุมระหว่างเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบรอยแตกและทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (มุม  $\beta$ ) เมื่อลากเส้นสัมผัสต่อจุดที่อยู่บนวงกลมในตำแหน่งที่วัดออกไป 2 เท่าของมุม  $\beta$  จะเป็นเส้นตรงที่สามารถต่อกันได้พอดีโดยไม่มีการตัดผ่านเข้าไปในส่วนในของวงกลม แต่จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิชไม่สามารถลากผ่านได้เช่นเดียวกับการทดสอบในกลุ่มแรก และเส้นตรงแสดงเกณฑ์การแตกยังลากผ่านเข้าไปในส่วนในของวงกลมอีกด้วย (รูปที่ 1.2) จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ตระหนักว่าไม่ควรที่จะนำค่าการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิชไปใช้สร้างเกณฑ์การแตกของหินรวมกับการทดสอบอื่นเพราะไม่ได้มีความสัมพันธ์ที่ต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรง



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุด จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อธิบายโดยกฎของคูลอมบ์



รูปที่ 1.2 วงกลมมอร์แสดงความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุด จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ดังนั้นเพื่อจะทำความเข้าใจเกี่ยวกับสถานะความเค้นที่จุดวิบัติในโซนความเค้นดึงให้มากยิ่งขึ้น จึงต้องมีการทดสอบตัวอย่างหินที่มีความเค้นอยู่ในโซนความเค้นดึงที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากจุดภายใต้ความเค้นกดที่  $\sigma_3 = 0$  ไปจนถึงค่ากำลังดึงสูงสุด และต้องทดสอบกับตัวอย่างหินที่มีความหลากหลายในเชิงศิลาวิทยา ลักษณะของผลึก และเม็ดแร่ เพื่อสร้างฐานข้อมูลเชื่อมโยงความรู้สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินในโซนความเค้นดึงให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และเป็นหลักฐานพิสูจน์ว่าไม่ควรนำผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลไปสร้างเกณฑ์การแตกกับผลการทดสอบอื่น ความจริงนี้ยังไม่เคยค้นพบมาก่อนในวงการวิชาการกลศาสตร์หิน เพราะการทดสอบลักษณะเช่นนี้ยากต่อการดำเนินการและต้องใช้โครงกดทดสอบชนิดพิเศษ ซึ่งเป็นช่องว่างขององค์ความรู้ในกลศาสตร์หิน (Knowledge Gap) การทดสอบที่ยังขาดอยู่คือ ต้องมีการให้ความเค้นกดและความเค้นดึงต่อตัวอย่างหินพร้อมกันจนทำให้เกิดการแตก และมีการผันแปรความเค้นทั้งสองนี้เพื่อให้ได้จุดต่อระหว่างการแตกภายใต้ความเค้นกดที่  $\sigma_3 = 0$  (Uniaxial State) ไปจนถึงการแตกที่  $\sigma_1 = 0$  (Direct tension) และ  $\sigma_3$  เป็นความเค้นดึง การวิจัยนี้ถือเป็นการเปิดประตูองค์ความรู้ใหม่ทางด้านกลศาสตร์หินทั้งในเมืองไทยและสากล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกของหินด้วยการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลที่มีแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างหิน (ที่เป็นแรงกด)
- 2) สร้างเกณฑ์การแตกจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_1 - \sigma_3$  (เป็นสมการเส้นตรงตามกฎของคูลอมบ์) เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นจากการทดสอบแรงกดในสามแกน การทดสอบแรงกดในแกนเดียว และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล ซึ่งจะนำไปพิสูจน์ความไม่สอดคล้องและความไม่เป็นเหตุเป็นผลที่จะนำผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล (ค่าความเค้นหลักใน 1 หรือ 2 ทิศทางเป็นแรงดึงซึ่งมีค่าเป็นค่าลบ) ไปสร้างเกณฑ์การแตกของหินร่วมกับผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน (ค่าความเค้นหลักทุกทิศทางมีค่าเป็นบวก)
- 3) สร้างความสัมพันธ์ที่อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินในโซนที่เป็นความเค้นกด (Compression region) คือ มีความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และต่ำสุด ( $\sigma_3$ ) เป็นบวก และหาแนวทางในการคาดคะเนย้อนกลับไปอธิบายพฤติกรรมการแตกของหินในโซนที่เป็นความเค้นดึง (Tension region) คือ มีความเค้นหลักอย่างน้อย 1 ทิศทางมีค่าเป็นลบ และ

4) พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่อสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินทั้งในโซนของความเค้นดึงและความเค้นกดได้พร้อมกัน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1) ศึกษาและประมวลข้อมูลด้านพฤติกรรมการแตกของหินและกฎที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหิน การทดสอบกลศาสตร์ของหินในประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และลักษณะของความเค้นบนตัวอย่างหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิช

2) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หินเพื่อการทดสอบจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ หินทราย 3 ชนิด คือ หินทรายชุดภูพาน (Phu Phan sandstone) หินทรายชุดพระวิหาร (Phra Wihan sandstone) และ หินทรายชุดภูกระดึง (Phu Kradung sandstone) หินอ่อนสระบุรี (Saraburi marble) โดยหินเหล่านี้มีความหลากหลายทางศิลาวิทยาและลักษณะของผลึก ซึ่งคาดว่าจะมีผลกระทบจากการทดสอบที่ต่างกันไป อีกทั้งหินเหล่านี้ยังเกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมหินและปรากฏพบได้ทั่วไปในพื้นที่ของในประเทศไทย

3) การทดสอบทุกรูปแบบจะดำเนินการในสภาวะอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างหินแห่งการเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบจะดำเนินการอย่างเคร่งครัดตามมาตรฐานของ ASTM และ ISRM ทุกประการ โดยทำการเจาะแท่งตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 54 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่แนะนำไว้โดย ASTM และ ISRM แท่งตัวอย่างที่ได้จะนำไปตัดด้วยเครื่องตัดให้ได้ความยาวเป็นไปตามมาตรฐานสากล ( $L/D = 0.5$  สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิชประยุกต์  $L/D = 2.5$  สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และ  $L/D = 2.0$  สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกน) จากนั้นขัดตัวอย่างหินให้ผิวรอยตัดทั้งสองด้านเรียบและขนานกัน (ASTM D2938)

4) ตัวอย่างหินแต่ละชนิดจะถูกทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์พื้นฐานได้แก่ (1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test – ASTM D2938) อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง และ (2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกน (Triaxial compressive strength test – ASTM D2664) อย่างน้อย 9 ตัวอย่าง (แผนแปรระดับความดันล้อมรอบ 3 ระดับ ระดับละ 3 ตัวอย่าง) เพื่อใช้ข้อมูลในการสร้างเกณฑ์การแตกและหาค่าคงที่ (ค่ามุมเสียดทาน –  $\phi$  และค่าความเค้นยึดติด –  $c$ ) สำหรับอธิบายเกณฑ์การแตกตามกฎของคูลอมบ์ และยังต่อจุดเพื่อใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของหินด้วย



5) การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ เป็นการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลแต่มีการให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างด้วย ทั้งนี้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่าเมื่อให้แรงกดในแนวแกนเพิ่มขึ้น แรงกดในแนวรัศมีที่ทำให้ตัวอย่างหินแตกจะลดลง (ลดลงจนมีค่าเป็น 0 เมื่อตัวอย่างแตกด้วยแรงกดในแนวแกน หรือเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลนั่นเอง)

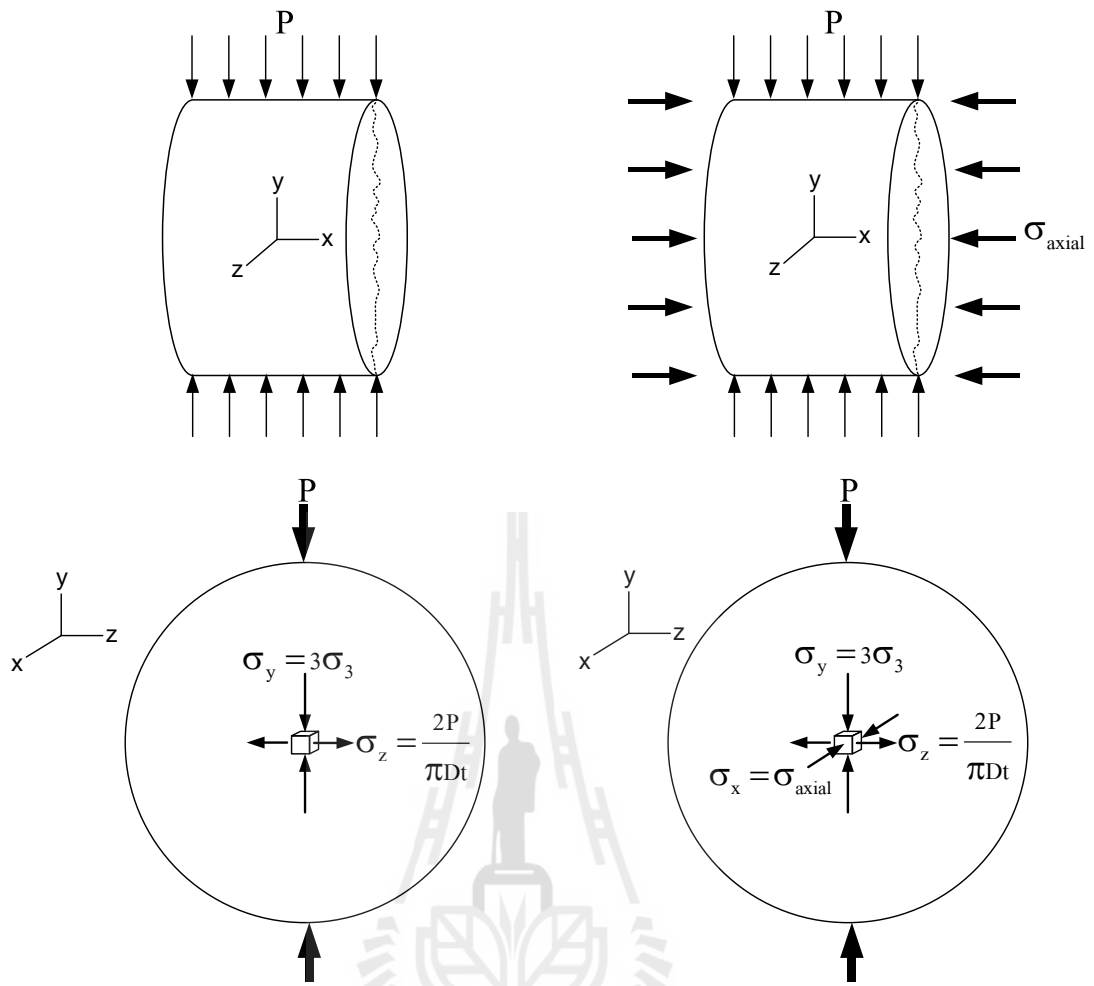
6) ตัวอย่างหินแต่ละชนิดจะถูกทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดเพื่อทราบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างอย่างหินที่แท้จริง ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทำนายด้วยการต่อจุดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดจากการทดสอบกำลังแรงดึงแบบบราซิล

7) ทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลที่ตัวอย่างมีขนาดความยาวเท่ากับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบและปรับแก้ค่าความเค้นให้มีความสอดคล้องกัน

8) สอบเทียบหาค่าคงที่ตามกฎของคูลอมป์จากผลการทดสอบ ในชุดแรกได้รวมผลการทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม คือ การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกน และในชุดที่สองจะไม่พิจารณาผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล ค่าคงที่ที่ได้จากทั้งสองชุดนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาความเหมือนและความแตกต่างต่อไป

#### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แนวคิดในงานวิจัยนี้คือ การศึกษาการแตกของหินภายใต้ความเค้นกดและความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างพร้อมกัน โดยที่ความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress -  $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักกลาง (Intermediate principal stress -  $\sigma_2$ ) เป็นความเค้นกดซึ่งมีค่าเป็นบวก และความเค้นหลักต่ำสุด (Minor principal stress -  $\sigma_3$ ) เป็นความเค้นดึงซึ่งมีค่าเป็นลบ เพื่อให้ได้มาซึ่งสภาวะความเค้นในลักษณะที่เกิดขึ้นพร้อมกันในตัวอย่างหินผู้วิจัยจึงได้เสนอการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ (รูปที่ 1.3) ด้วยการทำให้ตัวอย่างหินแบบแผ่นกลมอยู่ภายใต้แรงกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลแบบดั้งเดิม) ที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างหินจะเกิดความเค้นดึง ( $\sigma_2$ ) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงกดและเกิดความเค้นกด ( $\sigma_y$ ) ในทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงกด (P) ที่ให้กับตัวอย่างหิน เพื่อให้ได้มาซึ่งความเค้นในแกนที่ 3 (แกน x) ตัวอย่างหินต้องอยู่ภายใต้ความเค้นกดในแนวแกน ( $\sigma_{axial}$ ) ค่าความเค้นกดที่จะปรากฏที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินคือ  $\sigma_x$  นั่นเอง



รูปที่ 1.3 แนวคิดการทดสอบเพื่อให้เกิดความเค้นบนตัวอย่างที่มีทั้งความเค้นดึงและความเค้นกด การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล (ซ้าย) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ (ขวา)

ในการทดสอบได้ปรับให้มีความเค้นในแนวแกนของแต่ละตัวอย่าง (แกน x) คงที่ และเพิ่มค่าแรงกด (P) ตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (แกน y) จนกระทั่งหินเกิดการแตก ค่าความเค้นทั้ง 3 แกน ที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างหินที่จุดแตกจะถูกคำนวณออกมาเพื่อใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตก ในชุดการทดสอบนี้ได้มีการผันแปรค่าความเค้นในแนวแกนของตัวอย่างในระดับที่ต่างกัน เพื่อให้ความเค้นที่จุดแตกนี้มีการผันแปรในระดับที่ต่างกัน จากจุดที่  $\sigma_x$  มีค่าเป็นศูนย์ และ  $\sigma_y$  มีค่าสูงสุด (การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล) ไปจนถึงจุดที่  $\sigma_x$  มีค่าสูงสุดและ  $\sigma_y$  มีค่าเป็นศูนย์ (กำลังรับแรงกดในแกนเดียว) ผลที่ได้จึงสามารถนำมาลงจุดในแผนภูมิ  $\sigma_1 - \sigma_3$  เพื่อแสดงการผันแปรของค่า  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ที่จุดแตกในโซนที่เป็นความเค้นดึงว่ามีความต่อเนื่อง สอดคล้อง หรือเบี่ยงเบนไปจากกฎของคุณสมบัติหรือไม่และอย่างไร

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินและกฎที่ใช้อธิบายการแตกของหิน ลักษณะของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างจากการทดสอบด้วยวิธีต่างๆ โดยจะเน้นไปที่การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูกระดึง และหินอ่อนสระบุรี ในขั้นตอนนี้ได้นำแท่งตัวอย่างมาเจาะและตัดให้ได้ความยาวที่ต้องการดังนี้

- 1) ตัวอย่างหินขนาด  $5.5 \times 5.5 \times 5.5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง
- 2) ตัวอย่างหินขนาด  $5.5 \times 5.5 \times 5.5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกน ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง
- 3) อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.5 และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 54 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D3967-95 สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ชนิดหินละ 5 ตัวอย่าง ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูกระดึง และหินอ่อนสระบุรี

- 4) ตัวอย่างหินขนาด  $5.5 \times 5.5 \times 5.5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในสองแกน ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง
- 5) การทดสอบการตัดงอแบบสี่จุด โดยตัวอย่างหินมีความยาวแท่งละ 30 เซนติเมตร กว้าง 15 เซนติเมตร และมีความหนา 2.0 เซนติเมตร ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง
- 6) การทดสอบการตัดงอในแผ่นกลม โดยตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์ของการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการ คือ เพื่อหาขนาดของความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินเกี่ยวกับการแตกหรือการวิบัติแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ในแง่มุมที่ได้ตั้งประเด็นไว้ในขอบเขตของการวิจัย การทดสอบถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) **การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์พื้นฐาน** ได้แก่ (1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test – ASTM D2938) อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง และ (2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกน (Triaxial compressive strength test – ASTM D2664) อย่างน้อย 9 ตัวอย่าง (ผันแปรระดับความดันล้อมรอบ 3 ระดับ ระดับละ 3 ตัวอย่าง) เพื่อใช้ข้อมูลในการสร้างเกณฑ์การแตกและหาค่าคงที่ (ค่ามุมเสียดทาน –  $\phi$  และค่าความเค้นยึดติด –  $c$ ) สำหรับอธิบายเกณฑ์การแตกตามกฎหมายของคูลอมบ์ และยังต่อจุดเพื่อใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของหินด้วย

2) **การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์** เป็นการทดสอบที่คล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล แตกต่างกันตรงที่การทดสอบกลุ่มนี้มีการให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างด้วย จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่าเมื่อให้แรงกดในแนวแกนเพิ่มขึ้น แรงกดในแนวรัศมีที่ทำให้ตัวอย่างหินแตกจะลดลง (ลดลงจนมีค่าเป็น 0 เมื่อตัวอย่างแตกด้วยแรงกดในแนวแกน หรือเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลนั่นเอง) ดังนั้นการทดสอบในกลุ่มนี้จะมีการผันแปรค่าความเค้นกดในแนวแกนจาก 0 (เป็นการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลที่มีค่า  $\sigma_1 = 3\sigma_B$  และ  $\sigma_3 = \sigma_B$  ตัวอย่างจะแตกด้วยแรง (P) ที่กระทำในแนวรัศมีเพียงอย่างเดียว) ถึงจุดที่ค่าความเค้นกดในแนวแกนเท่ากับ  $\sigma_c$  ซึ่งมีความเค้นในแนวรัศมีเท่ากับศูนย์ ( $\sigma_1 = \sigma_c$  และ  $\sigma_3 = 0$ ) ในการทดสอบได้กำหนดค่าความเค้นในแนวแกน 5 ค่า และอยู่ในช่วงที่ระบุดังกล่าวไปแล้ว แต่ละค่าของความเค้นในแนวแกนจะมีการทดสอบตัวอย่างหินอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง

3) การทดสอบแรงกดในสองแกน (Biaxial test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในสองแกนซึ่งมีค่า  $\sigma_1 = \sigma_2$  และ  $\sigma_3 = 0$  โดยใช้เครื่องกดทดสอบในสองแกนจริง

4) การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (Four-point bending test) เพื่อทราบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างหินที่แท้จริงที่สภาวะ  $\sigma_1 = \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  เป็นลบหรืออีกนัยหนึ่งคือ กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง

5) การทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่แท้จริงที่สภาวะ  $\sigma_1 = 0$  และ  $\sigma_2 = \sigma_3$  เป็นลบหรืออีกนัยหนึ่งคือ กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง

#### ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์การทดสอบและสอบเทียบค่าคงที่ตามกฎของคูลอมบ์

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในขั้นตอนที่ 3 จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ทั้งในโซนที่เป็นความเค้นกด (ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน) และในโซนที่เป็นความเค้นดึง (ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลแบบดั้งเดิมและแบบประยุกต์) โดยใช้กฎของคูลอมบ์ นอกจากนี้ได้หาค่าคงที่ ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในและความเค้นยึดติดของหินใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบแรกได้รวมผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเข้าไปด้วย (เป็นการคำนวณค่าคงที่แบบเดิม) และรูปแบบที่สองไม่รวมผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล โดยค่าคงที่ตามกฎของคูลอมบ์จากการวิเคราะห์ทั้งสองรูปแบบนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างด้วย

#### ขั้นตอนที่ 5 การสร้างเกณฑ์การแตกในโซนที่เป็นความเค้นดึง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลลักษณะเดิมและแบบประยุกต์จะถูกนำมาวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อเป็นการพัฒนาและสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใหม่สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินในส่วนที่เป็นความเค้นดึงซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของคูลอมบ์ สมการที่ได้นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของงานด้านวิศวกรรมมวลหินที่มีความเค้นหลักอย่างน้อย 1 ทิศทางเป็นบวก เช่น ความเค้นบริเวณหลังคาโพรงและอุโมงค์ เป็นต้น

### ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ เช่น Engineering Geology (JIF = 1.212) หรือ International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (JIF = 1.244) หรือ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JIF = 0.673)

### ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรมโยธาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์หิน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

### 1) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์เกี่ยวกับการวิบัติของหินภายใต้แรงกระทำ สามารถพัฒนาต่อยอดให้เป็นกฎที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินได้

### 2) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การเผยแพร่ความรู้ในการประชุมวิชาการและการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงาน อาทิ กรมทรัพยากรธรณีและสิ่งแวดล้อม กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (กพร.) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมธรณี วิศวกรรมปิโตรเลียม วิศวกรรมเหมืองแร่

### 3) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้แก่หน่วยงานภาคธุรกิจที่ประกอบกิจการด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมธรณี วิศวกรรมปิโตรเลียม และวิศวกรรมเหมืองแร่ ในการทำเหมืองแร่ทั้งบนดินและใต้ผิวดิน การสร้างเขื่อนและฝาย การวิเคราะห์เสถียรภาพของหลุมเจาะ โพรงเกลือใต้ดินและอุโมงค์ เป็นต้น โดยที่หน่วยงานภาคธุรกิจสามารถนำผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการไปใช้ในการออกแบบงานวิศวกรรมหินในภาคสนามได้อย่างถูกต้องตามหลักกลศาสตร์

#### 4) เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

องค์ความรู้นี้มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิศวกรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และออกแบบงานด้านวิศวกรรมหิน เมื่อวิศวกรเข้าใจหลักที่ถูกต้องในการสร้างเกณฑ์การแตกของหินจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทำให้การวิเคราะห์และออกแบบงานด้านวิศวกรรมหินเป็นไปอย่างถูกต้องและมีความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของลูกค้า สถานประกอบการ และประชาชนทั่วไปที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

#### 5) ผลิตนักวิจัยรุ่นใหม่

การศึกษาในวิจัยนี้ได้มีนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเข้ามามีส่วนร่วมในการวิจัยด้วย จึงทำให้เกิดการเรียนรู้การทำวิจัยที่ถูกต้อง สร้างวิสัยทัศน์ในการวางแผนแนวทางการทำวิจัยต่อไปในอนาคต ซึ่งผลสัมฤทธิ์ในการวิจัยนี้ได้ผลิตนักวิจัยระดับปริญญาโทจำนวน 2 คน

### 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชนที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบงานวิศวกรรมมวลหิน เช่น ความลาดเอียงมวลหิน เขื่อน อ่างเก็บน้ำ เขื่อนกั้นดินและเขื่อนบนดิน เป็นต้น หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 4) กรมทางหลวงชนบท กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
- 5) กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 6) บริษัทเอกชนที่ดำเนินงานด้านวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมธรณี

## บทที่ 2

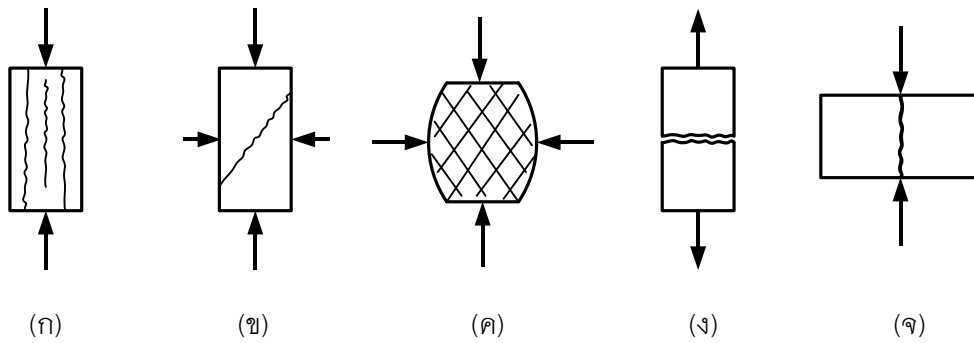
### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินและกฎที่ใช้อธิบายการแตกของหิน และลักษณะของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างจากการทดสอบวิธีต่างๆ โดยจะเน้นไปที่การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

#### 2.1 การแตกของหิน

การแตกของหินมีหลายรูปแบบ ขึ้นกับลักษณะของแรงที่มากระทำและขึ้นกับคุณสมบัติของหิน ลักษณะของแรงที่มากระทำจะรวมไปถึง ขนาด ทิศทาง และอัตราส่วนของแรงในทิศทางที่ต่างกัน ส่วนคุณสมบัติของหินที่เกี่ยวข้องกับการแตกจะรวมไปถึงความหนาแน่น ปริมาณความชื้นในเนื้อหิน ปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนและรอยร้าวขนาดเล็ก (micro-crack) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกของแร่ในเนื้อหิน เป็นต้น เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาคุณลักษณะของรอยแตก หินรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการได้ถูกใช้เป็นแบบจำลองเพื่อเทียบกับทิศทางของแรงที่มากระทำ (รูปที่ 2.1) การแตกชนิดแรกคือ การแตกแบบแยกออกจากกันตามแนวยาวที่ขนานกับแรงกด (รูปที่ 2.1 (ก)) การแตกชนิดนี้เกิดจากแรงดึงที่มีผลมาจากแรงกดที่ตั้งฉากอยู่กับแรงดึงนั้น การแตกชนิดที่สองคือการแตกในแนวเฉียง (รูปที่ 2.1 (ข)) ลักษณะเช่นนี้จะเห็นได้บ่อยครั้งในการทดสอบความต้านแรงกดในแกนเดียว ผิวของรอยแตกแบบเฉียงนี้จะมีการขูดและบดของหินที่อยู่ระหว่างรอยแตก และจะพบเศษหินเล็กๆ หรือผงของหินในรอยแตกนั้น รอยแตกในแนวเฉียงแบบเป็นชุดสามารถพบได้จากการทดสอบหินภายใต้แรงกดในสามแกน (Triaxial compression testing) ขบวนการที่ทำให้เกิดรอยแตกเช่นนี้จะเหมือนกับการแตกในแนวเฉียง แต่เนื่องจากการทดสอบแรงกดในสามแกนจะมีแรงกดเข้ามากระทำด้านข้างของตัวอย่างหินตลอดเวลา ทำให้หินตัวอย่างนั้นมีการแตกร้าวเป็นชุดที่มีแนวขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค) ถ้าตัวอย่างหินอยู่ภายใต้แรงดึง (รูปที่ 2.1 (ง)) หินจะขาดออกจากกันทำให้เกิดรอยแตกในตำแหน่งที่มีแรงยึดติดน้อยที่สุด ผิวของรอยแตกเช่นนี้จะสะอาดและไม่มีผงหรือเศษหินที่เกิดจากการขูดหรือไถของหิน การแตกแบบดึงนี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้จากการกดเช่นเดียวกัน (รูปที่ 2.1 (จ)) ลักษณะเช่นนี้ทิศทางของแรงกดจะขนานกับทิศทางของรอยแตก ซึ่งถ้าพิจารณาอย่างลึกซึ้งแล้วกลไกที่ทำให้เกิดการแตกเช่นนี้ก็คล้ายกับกลไกที่ทำให้เกิดการแตกแบบแยกออกจากกันตามแนวยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก)





**รูปที่ 2.1** ลักษณะการแตกของหินรูปแบบทั่วไป (ก) การแตกแบบแยกออกจากกันตามแนวยาวที่ขนานกับแรงกด (ข) การแตกในแนวเฉียง (ค) การแตกในแนวเฉียงแบบเป็นชุด (ง) การแตกแบบดึงหรือการแยกออกจากกันด้วยแรงดึง (จ) การแตกแบบดึงที่เกิดจากการกดในทิศที่ตั้งฉากกัน (Jaeger and Cook, 1979)

## 2.2 กฎที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหิน

กฎที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินโดยทั่วไปมีอยู่หลายกฎเกณฑ์ อาทิ กฎของคูลอมบ์ (Coulomb criterion) กฎของ Griffith กฎที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) กฎของ Bieniawski กฎของ Hoek and Brown กฎของ Yudhbir กฎของ Kim and Lade และกฎของ Johnston เป็นต้น (Jaeger and Cook, 1979; Murrell, 1966; Bieniawski, 1974; Hoek and Brown, 1980; Yudhbir et al., 1983; Kim and Lade, 1984; Johnson, 1985) กฎเกณฑ์เหล่านี้อธิบายพฤติกรรมการแตกในรูปแบบของแรงที่เข้ามากระทำ

### 2.2.1 กฎของคูลอมบ์

คูลอมบ์ได้เสนอสมการเชิงเส้นตรงเพื่ออธิบายการแตกของหินภายใต้แรงกด สมการนี้ได้เสนอในรูปของความเค้นในแนวเฉียงสูงสุด ( $\tau$ ) บนผิวของรอยแตกที่ทำมุมกับทิศทางของแรงกด (Jaeger and Cook, 1979 และ กิตติเทพ เพ็องขจร, 2546) ดังนี้

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (2.1)$$

หรือ 
$$|\tau| - \mu\sigma = S_0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $\sigma$  และ  $\tau$  คือค่าความเค้นที่ตั้งฉากและความเค้นในแนวเฉือนที่อยู่บนรอยแตก  $S_0$  คือค่าคงที่หรือเรียกว่าความเค้นยึดติด และ  $\mu$  คือค่าคงที่ซึ่งบางครั้งเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานภายใน (Coefficient of internal friction) ของหิน เนื่องจากเครื่องหมายของค่าความเค้นในแนวเฉือนจะมีได้ทั้งบวกและลบ ดังนั้นในสมการข้างต้นค่าความเค้นเฉือนจะเป็นบวกเสมอ กฎของคูลอมบ์นอกจากจะใช้ในกลศาสตร์หินแล้วยังใช้อย่างแพร่หลายในกลศาสตร์ดินด้วย

การวิเคราะห์ความเค้นในสองมิติจะพิจารณาถึงค่าความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และต่ำสุด ( $\sigma_3$ ) เท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากค่าความเค้นในแนวตั้งฉากและในแนวเฉือนบนพื้นราบที่มีเส้นตั้งฉากทำมุมกับ  $\beta$  กับแกน  $\sigma_1$  ได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2.3)$$

$$\tau = -\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (2.4)$$

ดังนั้นสมการ (2.4) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) [\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta] - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) = S_0 \quad (2.5)$$

ค่าสูงสุดของสมการ (2.5) จะเกิดเมื่อ

$$\tan 2\beta = -1/\mu \quad (2.6)$$

โดยมุม  $2\beta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 90 ถึง 180 องศา และ

$$\sin 2\beta = (\mu^2 + 1)^{-1/2} \text{ และ } \cos 2\beta = -\mu (\mu^2 + 1)^{-1/2} \quad (2.7)$$

ค่าสูงสุดของ  $|\tau| - \mu\sigma$  จะเป็น

$$\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) (\mu^2 + 1)^{-1/2} - \mu (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.5) หินจะไม่แตกถ้าสมการ (2.8) น้อยกว่า  $S_0$  และหินจะแตกถ้าสมการ (2.8) มีค่าเท่ากับ  $S_0$  นั่นคือ

$$\sigma_1[(\mu^2 + 1)^{-1/2} - \mu] - \sigma_3[(\mu^2 + 1)^{-1/2} + \mu] = 2S_0 \quad (2.9)$$

ถ้าพิจารณามุม  $\beta$  ในขณะที่ยื่นเกิดการแตกจะได้

$$\beta = \frac{1}{2} \pi + \frac{1}{2} \tan^{-1} (1/\mu) \quad (2.10)$$

ถ้า  $\mu \rightarrow 0$  จะได้  $\beta \rightarrow \pi/4$  ถ้า  $\mu \rightarrow 1$  จะได้  $\beta \rightarrow 3\pi/8$ , ถ้า  $\mu \rightarrow \infty$  จะได้  $\beta \rightarrow \pi/2$  ดังนั้นทิศทางของรอยแตกในแนวเฉือนจะทำมุมแหลมกับทิศทางของค่าความเค้นสูงสุด ( $\sigma_1$ ) เสมอ ความสัมพันธ์ของสมการ (2.9) สามารถนำเสนอในหลายรูปแบบ ถ้าให้  $\phi$  เป็นมุมของความเสียดทานภายใน (Internal friction angle) สามารถอธิบายได้ว่า

$$\mu = \tan \phi \quad (2.11)$$

$$(\mu^2 + 1)^{-1/2} + \mu = \sec \phi + \tan \phi = \tan \alpha \quad (2.12)$$

โดย  $\alpha = (\pi/4) + \frac{1}{2} \phi \quad (2.13)$

จากสมการ (2.10) มุม  $\alpha$  ที่ถูกกำหนดในสมการ (2.11) จะเท่ากับมุม  $\beta$  ซึ่งมุม  $\beta$  นี้จะเป็นมุมระหว่างเส้นที่ตั้งฉากกับรอยแตกกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) จากสมการ (2.9) สามารถเขียนเป็น

$$\sigma_1 = 2S_0 \tan \alpha + \sigma_3 \tan^2 \alpha \quad (2.14)$$

เมื่อสร้างเป็นสมการเส้นตรงโดยให้  $\sigma_1$  เป็นค่าในแกน y และ  $\sigma_3$  เป็นค่าในแกน x จะได้ว่าจุดตัดแกน y คือค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $2S_0 \tan \alpha$  ความชันของเส้นตรงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $\tan^2 \alpha$

ค่ามุมเสียดทานพื้นฐานสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วจากมุมระหว่างทิศทางความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) กับทิศทางของความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ดังสมการ

$$\phi = 2\beta - (\pi/4) \text{ หรือ } \phi = 2\alpha - (\pi/4) \quad (2.15)$$

กฎของคูลอมบ์สามารถแสดงในรูปของความเค้นเฉื่อย ( $\sigma_m$ ) และความเค้นในแนวเฉือนสูงสุด ( $\tau_m$ ) ดังนี้

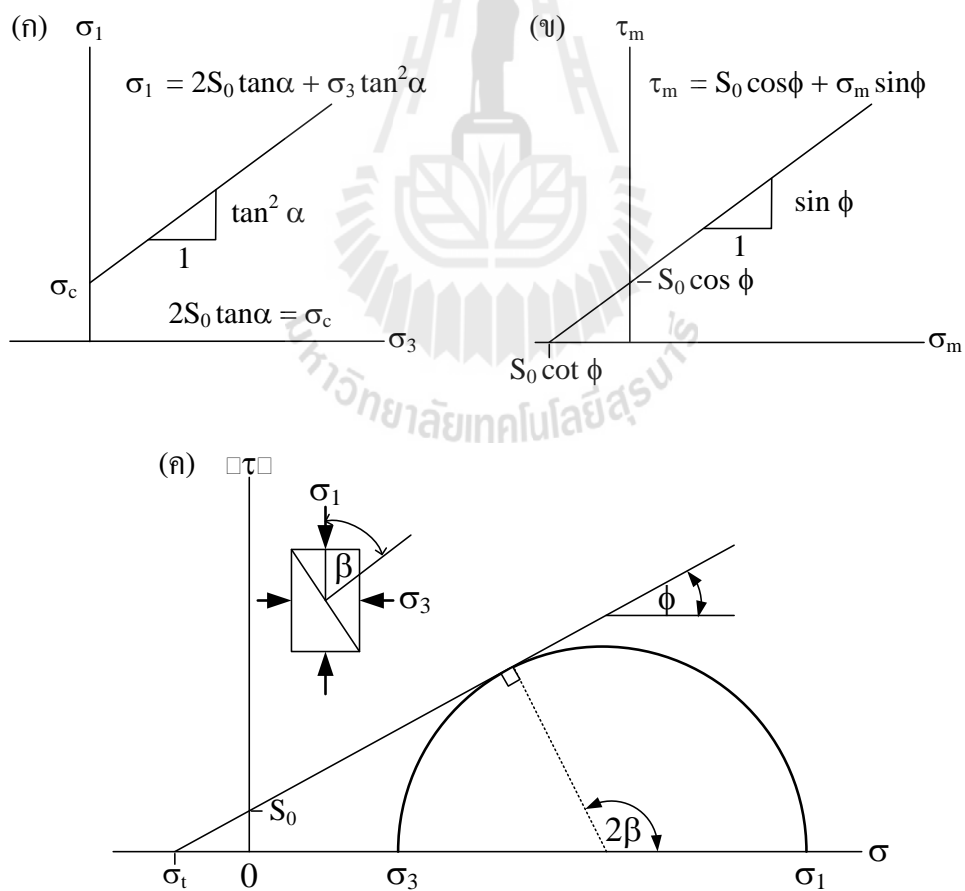
$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), \quad \tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.16)$$

$$(\mu^2 + 1)^{1/2} \tau_m - \mu \sigma_m = S_0 \quad (2.17)$$

$$\tau_m = \sigma_m \sin \phi + S_0 \cos \phi \quad (2.18)$$

จากสามสมการข้างบนนี้กฎของคูลอมบ์สามารถแสดงในระบบแกนของ  $\sigma_m$  และ  $\tau_m$  ได้ โดยที่ความเอียงของเส้นจะมีค่าเป็น  $\tan^{-1}(\sin \phi)$  และเส้นนั้นจะตัดแกนตั้งที่  $S_0 \cos \phi$  (รูปที่ 2.2)

กฎของคูลอมบ์บางครั้งจะเรียกว่า กฎของ Mohr-Coulomb (หรือ Mohr-Coulomb Criterion) เนื่องจากความเค้นในแนวตั้งและแนวเฉียงสามารถนำมาเขียนให้สัมพันธ์กับวงกลมของ Mohr ได้ กฎของ Coulomb ยังสามารถแสดงเกณฑ์การแตกของหินในรูปของความเค้นในแกนหลักได้ด้วยดังสมการ



รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงกฎของคูลอมบ์รูปแบบต่างๆ (Jaeger and Cook, 1979)

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left( S_0 \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \sin \phi \quad (2.19)$$

สมการนี้สามารถดัดแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง คือ

$$\sigma_1 = A + B\sigma_3 \quad (2.20)$$

A และ B เป็นฟังก์ชันของ  $S_0$  และ  $\phi$  ถ้านำค่าความเค้นกดสูงสุดในหนึ่งแกน ( $\sigma_c$ ) มาหารสมการข้างบนจะได้

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 1 + C \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \quad (2.21)$$

$$C = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.22)$$

โดยส่วนใหญ่เกณฑ์ของ Coulomb จะบอกถึงค่าความเค้นสูงสุดสำหรับการแตกในแนวตั้งของหินที่สูงเกินกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในทางปฏิบัติบางครั้งจึงสมมติว่าแรงต้านความเค้นสูงสุดในแนวตั้งจะมีค่าเป็นศูนย์

### 2.2.2 กฎของ Griffith

กฎของ Griffith มีพื้นฐานมาจากการแพร่กระจายของรอยแตกเล็ก ๆ (Micro-cracks) ในเนื้อหินที่มีความเปราะสูง ซึ่งในบางครั้งอาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาอธิบายการแตกของหินขนาดใหญ่ กฎของ Griffith สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเค้นหลักได้ดังนี้

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8T(\sigma_1 + \sigma_3) \quad \text{ถ้า } \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \quad (2.23)$$

$$T = \sigma_3 \quad \text{ถ้า } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \quad (2.24)$$

เมื่อ T เป็นค่าแรงต้านความเค้นสูงสุดในแนวตั้ง กฎนี้ต่อมาได้ถูกพัฒนาโดย Murrell (1966) โดยสมมติให้ค่าแรงต้านความเค้นสูงสุดในแนวกดมีค่าเป็น 8 เท่าของค่าแรงต้านความเค้นสูงสุดในแนวตั้ง ดังนั้น

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8T(\sigma_1 + \sigma_3) = 16T^2 \quad (2.25)$$

### 2.2.3 กฎที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

มีกฎหลายชุดที่ถูกพัฒนาขึ้นจากผลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กฎเหล่านี้ไม่มีทฤษฎีทางฟิสิกส์มายืนยัน แต่ได้ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบต่างๆ กัน โดยมุ่งไปที่การทำให้สูตรทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) ยกตัวอย่างเช่น

$$\sigma_1 = A + B\sigma_3 \quad (2.26)$$

$$\sigma_1 = A + B\sigma_3^C \quad (2.27)$$

$$\sigma_1 = A \log(B + \sigma_3) \quad (2.28)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A + BC\sigma_3 \quad (2.29)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{A(\sigma_1 + \sigma_3) + B}{\sigma_1 + \sigma_3 + C} \quad (2.30)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A + B(\sigma_1 + \sigma_3)^C \quad (2.31)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A(\sigma_1 + \sigma_3)^B \quad (2.32)$$

A, B และ C เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหิน

### 2.2.4 กฎของ Bieniawski

Bieniawski (1974) ได้พัฒนากฎจากผลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_c} = 0.1 + B \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_c} \right)^d \quad (2.33)$$

โดยที่ d มีค่าระหว่าง 0.85–0.93 และค่า B มีค่าระหว่าง 0.7–0.8

### 2.2.5 กฎของ Hoek and Brown

Hoek and Brown (1980) ได้พยายามขยายผลการแตกของหินที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เพื่อคาดคะเนไปถึงการแตกของหินขนาดใหญ่ถึงระดับของมวลหิน กฎหนึ่งที่นำเสนอคือ

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \quad (2.34)$$

โดยที่  $m$  และ  $s$  คือค่าคงที่และไม่มีหน่วย และขึ้นกับคุณสมบัติของมวลหิน  $m$  คือตัวกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุด โดย  $s$  จะขึ้นกับคุณสมบัติของหินนั้น ๆ สำหรับหินที่ไม่มีรอยแตกและเป็นเนื้อเดียวกัน (Intact rock)  $s$  จะเท่ากับหนึ่งและ  $s$  จะมีค่าลดลง ถ้าหินที่นำมาพิจารณา มีรอยแตกมากขึ้น เช่น มวลหินในภาคสนามเป็นต้น  $m$  จะมีค่าระหว่าง 5.4-27.9 สำหรับหินทั่วไป

### 2.2.6 กฎของ Yudhbir

Yudhbir et al. (1983) ได้ทำการทดสอบหินปูน หินทราย และหินอัคนีหลายชนิด โดยทดสอบการกดในสามแกน ได้ข้อสรุปว่า กฎของ Hoek and Brown จะใช้ได้ดีก็ต่อเมื่อหินมีความเปราะสูง และจะใช้ไม่ได้ดีถ้าหินมีความเหนียว (Ductile) Yudhbir และคณะจึงเสนอกฎใหม่คือ

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = A + B \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (2.35)$$

$\alpha$  มีค่าระหว่าง 0.65-0.75 ส่วน  $A$  และ  $B$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของหิน

### 2.2.7 กฎของ Kim and Lade

Kim and Lade (1984) ได้เสนอกฎการแตกของหินในเชิงสามมิติ คือ

$$\left( \frac{l_1^3}{l_3} - 27 \right) \left( \frac{l_1}{P_\alpha} \right)^m = n_1 \quad (2.36)$$

โดย  $n_1$  และ  $m$  คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับคุณสมบัติของหิน ค่า  $l_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$  ค่า  $l_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z$  ค่า  $P_\alpha$  คือความกดอากาศในขณะทดสอบ

### 2.2.8 กฎของ Johnston

Johnston (1985) เสนอกฎการแตกของหินที่มีความอ่อนเหมือนดินไปจนถึงหินที่มีความแข็งสูง

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \left[ \left( \frac{m}{B} \right) \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right) + s \right]^B \quad (2.37)$$

สำหรับหินที่ไม่มีรอยแตก  $s$  จะมีค่าเท่ากับ 1 ค่า  $B$  จะผันแปรจาก 1 (สำหรับดิน) ไปจนถึง 0.5 (สำหรับหินแข็ง) ค่า  $m$  จะผันแปรจาก 2 (สำหรับดิน) ไปจนถึง 7-21 (สำหรับหินแข็ง)

### 2.3 การแตกของหินภายใต้แรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (Brazilian tension test – ASTM D3967) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Brazilian tensile strength –  $\sigma_B$ ) ของหินที่จุดวิบัติ การทดสอบเช่นนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นการทดสอบความเค้นดึงสูงสุดโดยวิธีทางอ้อม แต่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากวิธีการหาความเค้นดึงสูงสุดของหินโดยตรง (Direct tension test) เป็นการยากต่อการทดสอบ เพราะหินจะมีค่าความเค้นดึงสูงสุดค่อนข้างสูงและรูปร่างของหินก็ไม่อำนวยต่อการนำมาตั้งในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะมีรูปร่างเป็นแผ่นกลม ค่าแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) กำหนดให้ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 54 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.50 ส่วนมาตรฐาน ASTM จะกำหนดให้ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 49 มิลลิเมตร และมีค่า  $L/D$  อยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.75 โดยจะใช้ตัวอย่างหินแต่ละชนิดมากกว่า 10 ก้อน

หลักการทดสอบคือตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางหรือแนวรัศมี ด้วยอัตราความเร็วประมาณ 0.5 ถึง 1.0 MPa/s ตัวอย่างหินจะสัมผัสกับแท่นกดของเครื่องกดเป็นแนวเส้น ซึ่งเป็นลักษณะของการให้แรงแบบเส้น (Line load) แรงกดจะทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงกด ความเค้นดึงนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของวงกลมและที่จุดนี้จะมีค่าความเค้นกดอยู่ในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของการกด ซึ่งตั้งฉากกับความเค้นดึงและมีขนาดเป็น 3 เท่า ของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ความเค้นสำหรับตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลจะอยู่ในสมมติฐานของความเค้นระนาบ (Plane stress) ดังนั้นความเค้นที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นวงกลมหรือความเค้นในแนวแกนของแท่งตัวอย่างจึงมีค่าเป็นศูนย์ (Jaeger and Hoskins, 1966)



Hondros (1959) สรุปว่าความเค้นบนตัวอย่างหินในแนวแกนจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อวิเคราะห์โดยใช้สมมติฐานระนาบความเค้นและหินมีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ส่วนความเค้นบนระนาบ (2 มิติ) ที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่าง (รูปที่ 2.3) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \left( \frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin 2n\alpha \cdot \cos 2n\theta \right\} \quad (2.38)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \left( \frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin 2n\alpha \cdot \cos 2n\theta \right\} \quad (2.39)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 - \left( \frac{r}{n} \right)^2 \right] \left( \frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin 2n\alpha \cdot \cos 2n\theta \right\} \quad (2.40)$$

Yu et al. (2006) ได้สรุปสมการเพื่อคำนวณค่าความเค้นในแนวแกน x และ y ที่จุดใดๆ บนระนาบหน้าตัดของตัวอย่างหิน (รูปที่ 2.4) ที่มีความหนาของตัวอย่างเท่ากับ t และมีแรงกระทำในทิศทาง y เท่ากับ P ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2.41)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2.42)$$

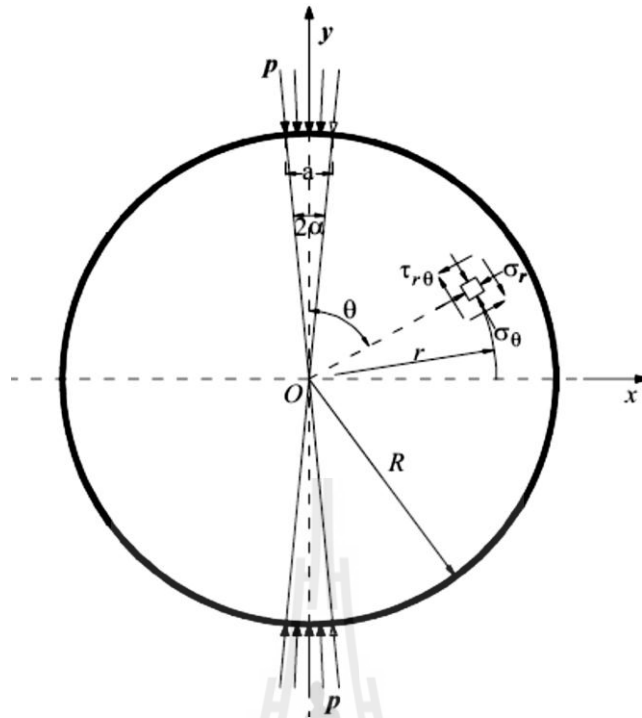
$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{r_2} \right) \quad (2.43)$$

ถ้าตัวอย่างหินอยู่ภายใต้แรงกดเท่ากับ P ที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างหินจะเกิดความเค้นดิ่งที่ตั้งฉากอยู่กับความเค้นกด สามารถคำนวณได้จาก

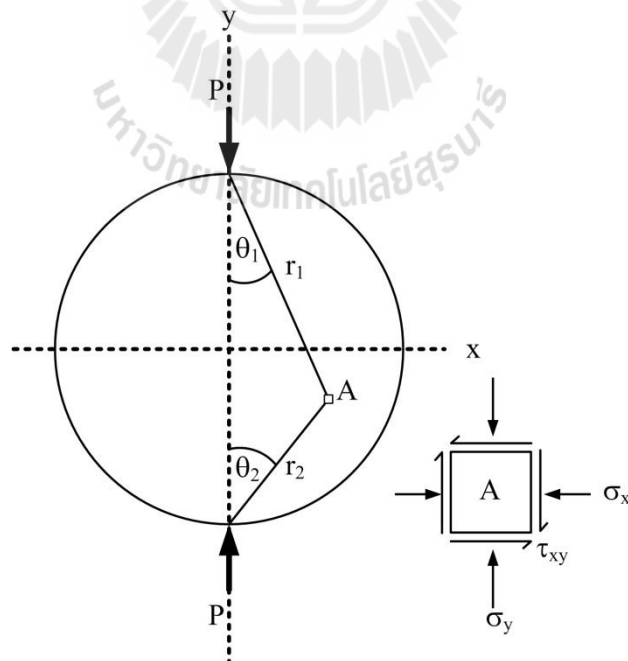
$$\sigma_x = -2P/\pi Dt \quad (2.44)$$

$$\sigma_y = 6P/\pi Dt \quad (2.45)$$

$$\sigma_z = 6P/\pi Dt \quad (2.46)$$



รูปที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความเค้นบนระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างหิน  
(Jianhong et al., 2009)



รูปที่ 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความเค้นบนระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างหิน  
(Yu et al., 2006)

$\sigma_x$  มีค่าเป็นลบเพราะเป็นแรงดึง ส่วน  $\sigma_y$  มีค่าเป็นบวกเพราะเป็นแรงกดและจะมีค่าเป็นสามเท่าของ  $\sigma_x$  ส่วน  $\sigma_z$  มีค่าเป็นศูนย์ เพราะการวิเคราะห์สมมติให้ตัวอย่างหินอยู่ในข้อกำหนดของความเค้นระนาบ ถ้า  $P$  เป็นแรงกดที่จุดวิบัติ ค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิชที่หินจะรับได้ ( $\sigma_B$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma_x = 2P/\pi Dt \quad (2.47)$$

## 2.4 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

ผลการศึกษาวิจัยการแตกของหินและเกณฑ์การแตกที่เกี่ยวข้องระบุว่า ยังมีช่องว่างและความไม่แน่นอนขององค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงดึง เป็นที่ทราบกันดีว่าผลกระทบของความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) จะสามารถเห็นได้เมื่อหินอยู่ภายใต้แรงกด กล่าวคือ  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  โดยที่ความเค้นทั้งสามเป็นความเค้นกด (มีค่าเป็นบวก) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อกำลังดึงของหิน หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือเมื่อค่าใดค่าหนึ่งของความเค้นหลักเป็นความเค้นดึง (มีค่าเป็นลบ) จะส่งผลให้การประเมินหรือคาดคะเนกำลังดึงของหินเกิดความไม่แน่นอน และอีกประเด็นหนึ่งคือการนำผลจากการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิชเข้ามาสัมพันธ์กับเกณฑ์การแตกของ Coulomb อาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากเกณฑ์การแตกของ Coulomb ตามคำจำกัดความถูกพัฒนามาจากสภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  แต่การแตกของหินภายใต้การทดสอบแบบบราซิชเลียนนั้นจะมีสภาวะความเค้นแบบ  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  โดยที่  $\sigma_1$  เป็นความเค้นกด (มีค่าเป็นบวก)  $\sigma_2$  มีค่าเป็นศูนย์ (สภาวะ Plane stress) และ  $\sigma_3$  เป็นความเค้นดึง (มีค่าเป็นลบ)

## บทที่ 3

### การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

#### 3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างหินเพื่อใช้ทดสอบรูปแบบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างหิน

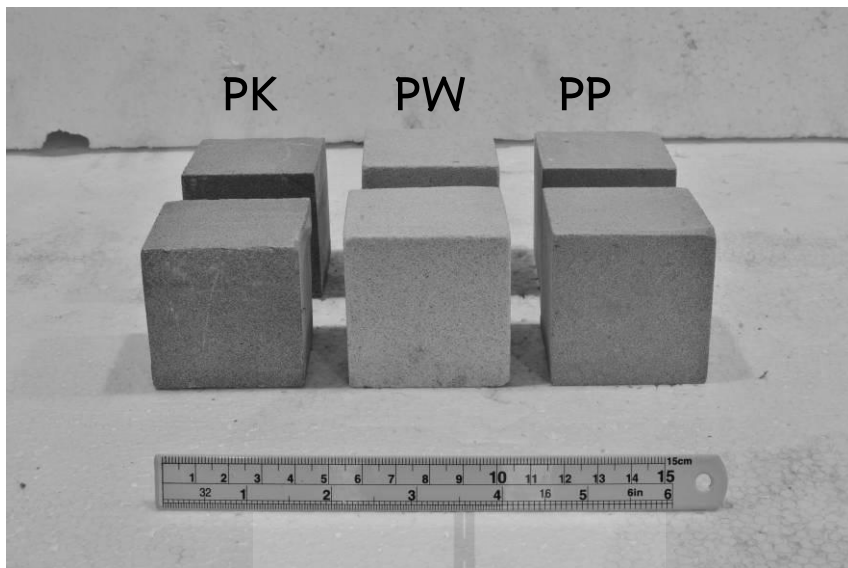
ตัวอย่างหินที่ใช้ในการศึกษานี้มี 4 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูกระดึง และหินอ่อนสระบุรี ในขั้นตอนนี้ได้แบ่งกลุ่มของตัวอย่างหินตามวิธีการทดสอบไว้เป็น 4 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1) ตัวอย่างหินขนาด  $5.5 \times 5.5 \times 5.5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว การทดสอบกำลังกดในสองแกน และการทดสอบกำลังกดในสามแกน ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินบางส่วนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

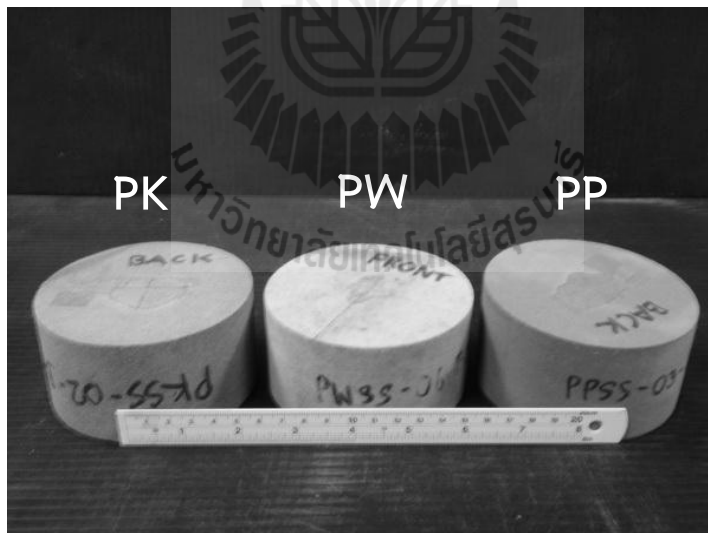
2) ตัวอย่างหินรูปแผ่นกลมมีอัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.5 มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.4 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D3967-95 สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ชนิดหินละ 40 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินบางส่วนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2

3) การทดสอบแรงกดแบบสี่จุด ใช้ตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 30 เซนติเมตร กว้าง 15 เซนติเมตร หนา 2.0 เซนติเมตร ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินบางส่วนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3

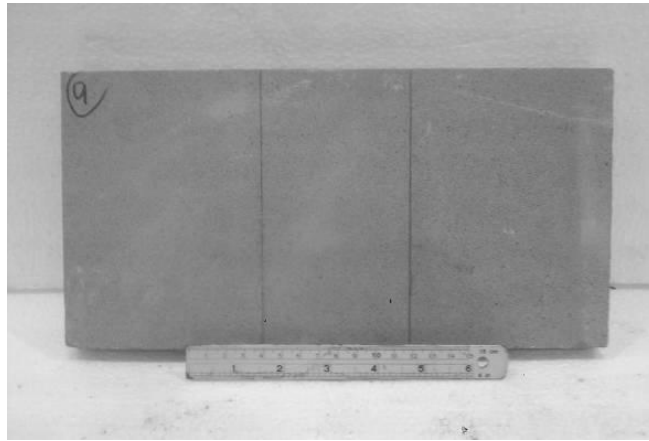
4) การทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม ใช้ตัวอย่างหินรูปแผ่นกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 1.0 เซนติเมตร ชนิดหินละ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินบางส่วนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินขนาด 5.5×5.5×5.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร บางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบกำลังกดในแกนเดียว กำลังกดในสองแกน และกำลังกดในสามแกน



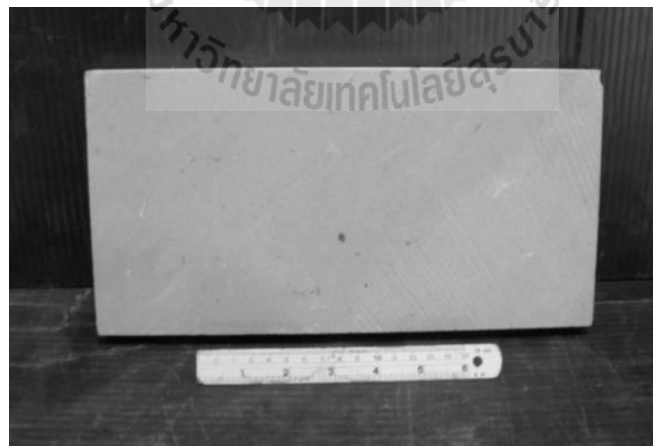
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร รูปแผ่นกลมที่จัดเตรียมสำหรับทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์



(a)

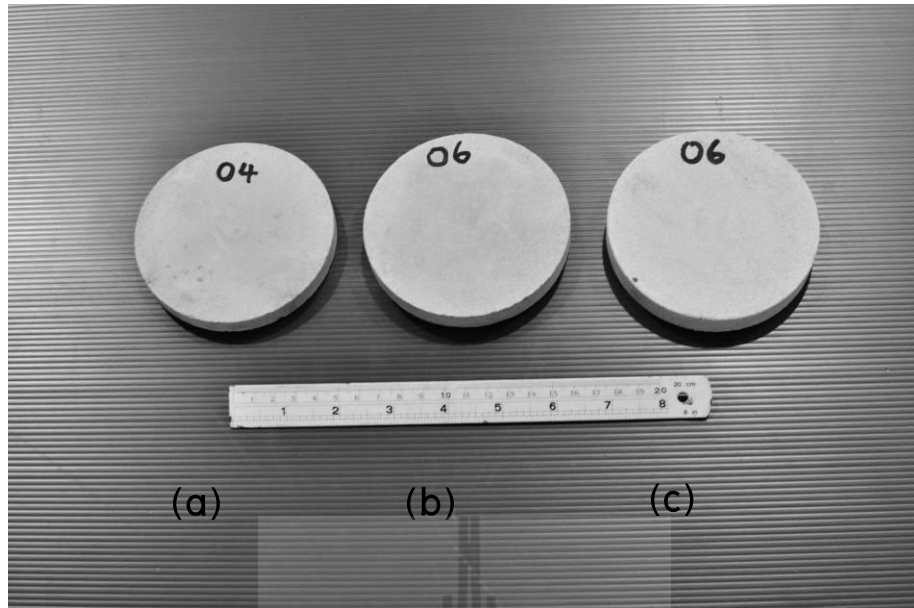


(b)



(c)

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง (a) หินทรายชุดพระวิหาร (b) และหินทรายชุดภูพาน (c) ที่ใช้ในการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึง (a) หินทรายชุดพระวิหาร (b) และหินทรายชุดภูพาน (c) ที่ใช้ในการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

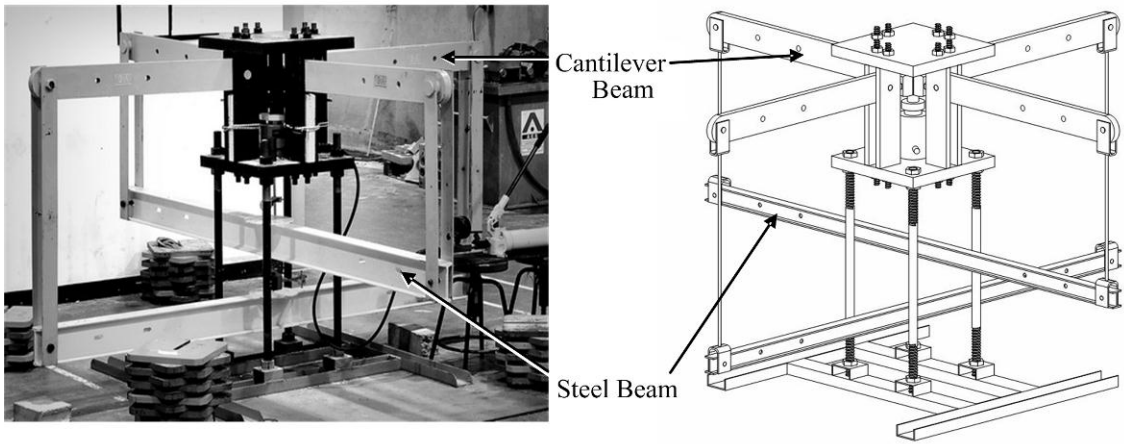
เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงสูงสุด และสมการในการคำนวณผลการทดสอบ ซึ่งการทดสอบที่สภาวะความเค้นที่หลากหลายนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองลักษณะความเค้นของหินในรูปแบบต่างๆ โดยกำหนดลักษณะความเค้นของการทดสอบที่แตกต่างกันในการหาค่ากำลังกดและกำลังดึงสูงสุดของหิน

#### 4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

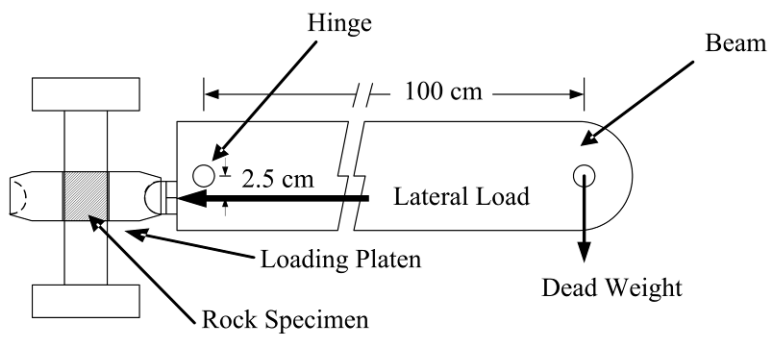
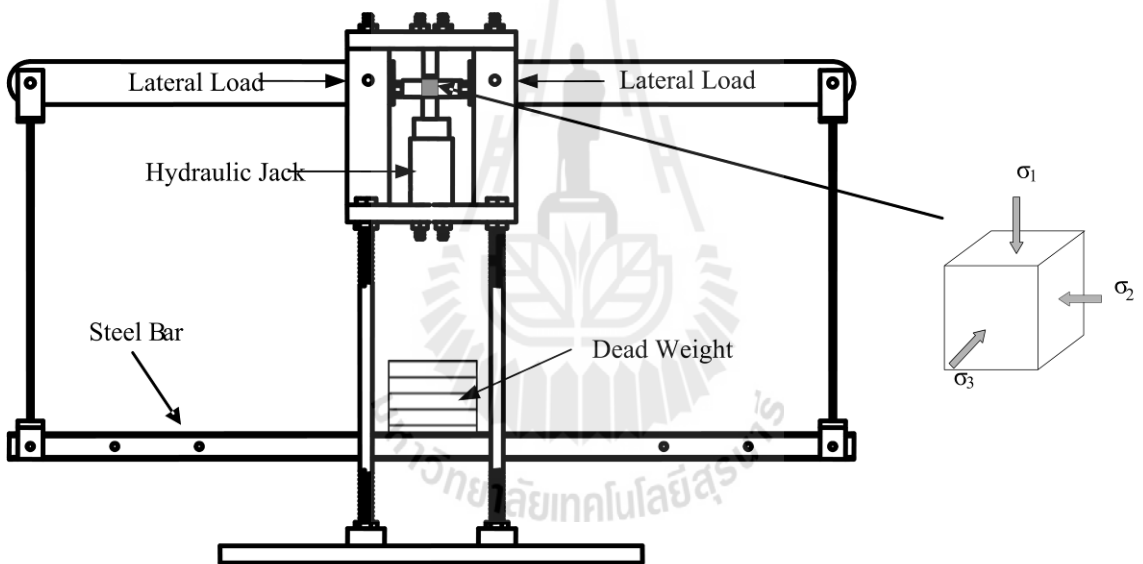
โครงกทดสอบในสามแกนจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริงที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Walsri et al. (2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ่มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ่มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ่มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาที่ยึดติดกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ่มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง ( $\sigma_1$ ) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่  $2.5 \times 2.5 \times 2.5$  cm<sup>3</sup> ถึง  $10 \times 10 \times 20$  cm<sup>3</sup> การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

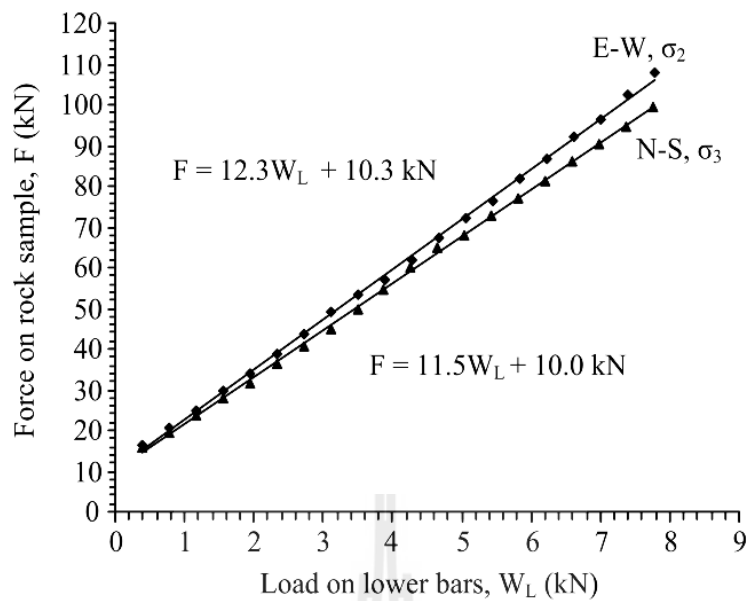




รูปที่ 4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกนจริง



**รูปที่ 4.3** การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้ นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

#### 4.3 การทดสอบการกดในแกนเดียวและในสามแกน

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) **การเตรียมตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ** ตัวอย่างหินที่ใช้สำหรับการทดสอบ กำลังรับแรงกดจะต้องนำไปประกบกับแผ่น Neoprene เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความเสียหายโดยแผ่น Neoprene ดังกล่าวจะถูกติดรอบตัวอย่างทั้งหกด้านสำหรับการทดสอบการกดในสามแกน

2) **การติดตั้งตัวอย่างหินในโครงกดทดสอบ** การติดตั้งตัวอย่างหินเพื่อทดสอบ กำลังรับแรงกดสูงสุดมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) จัดเตรียมผู้ช่วยเพื่อยกคานทั้ง 4 ด้าน และเตรียมตัวอย่างหิน
- (2) จากนั้นยกคานในแนว E-W ขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างหินเข้าไปในแท่นกดทดสอบ แล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) จากนั้นยกคานด้าน N-S ขึ้น ใส่แท่นกดทดสอบ แล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ )

- (3) นำหัวกดให้แรงด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน ( $\sigma_1$ )
- (4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กต้นรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านแรงทั้งความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) จากนั้นให้เพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้
- (5) กดตัวอย่างหินด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก
- (6) ถ้าเป็นการทดสอบการกดในแกนเดียวไม่ต้องใช้คานทั้งสองด้านแค่ นำตัวอย่างเข้าไปในแท่นกดจากนั้นจึงกดตัวอย่างหินด้วยปั๊มน้ำมันไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

3) การทดสอบและการตรวจวัด ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกนโดยจะติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน และได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบในขณะที่ตัวอย่างเกลือหินถูกกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มน้ำมันไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

#### 4.4 การคำนวณผลการทดสอบ

##### 4.4.1 การคำนวณค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย

การคำนวณผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การหาค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ความเค้นเฉือนในสามมิติ ( $\tau_{oct}$ ) และความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) ของตัวอย่างหิน ซึ่งสามารถหาได้จาก (Jaeger et al., 2007) สมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

$$\tau_{oct} = (1/3)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (4.2)$$

$$\sigma_c = F/A \quad (4.3)$$

โดยที่  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  คือ ความเค้นในสามทิศทางที่จุดแตกของหิน

##### 4.4.2 การคำนวณค่าความเค้นยึดติด

การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) ของหินโดยใช้สมการ (Jaeger et al., 2007) ต่อไปนี้

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 \left[ \left( \frac{\pi}{4} \right) + \left( \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (4.4)$$

$$\sigma_1 = 2c \tan \left[ \left( \frac{\pi}{4} \right) + \left( \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (4.5)$$

โดยที่  $c$  คือความเค้นยึดติด  $\phi$  คือมุมเสียดทาน  $\sigma_c$  คือความเค้นสูงสุดในแกนเดียว และ  $\sigma_3$  คือความเค้นหลักต่ำสุด ซึ่งในการคำนวณหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานได้ทำการคำนวณในช่วงที่  $\sigma_3 = 0-5 \text{ MPa}$  โดยสมมติให้พฤติกรรมการแตกของหินมีลักษณะเป็นเส้นตรง

#### 4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์

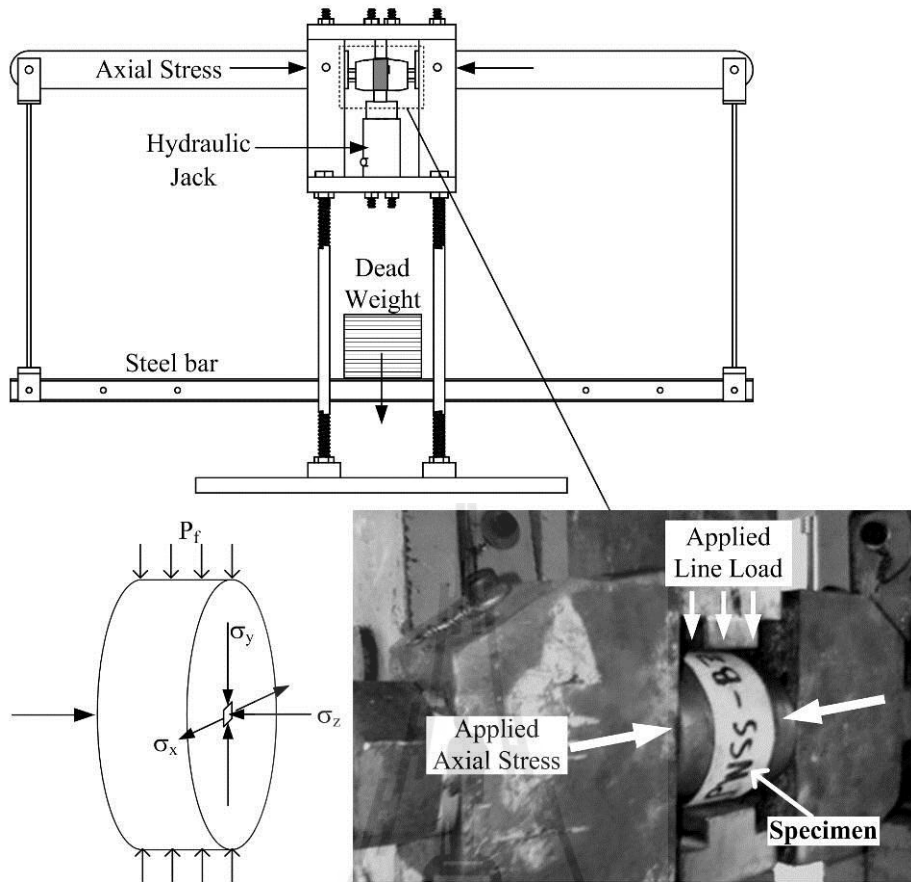
การทดสอบนี้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล แต่ต่างกันตรงที่การทดสอบกลุ่มนี้มีการให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างด้วย เมื่อให้แรงกดในแนวแกนเพิ่มขึ้น แรงกดในแนวรัศมีที่ทำให้ตัวอย่างหินแตกจะมีค่าลดลง (ลดลงจนมีค่าเป็น 0 เมื่อตัวอย่างแตกด้วยแรงกดในแนวแกน หรืออีกนัยหนึ่งเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล) ดังนั้นการทดสอบในกลุ่มนี้จะมีการผันแปรค่าความเค้นกดในแนวแกนจาก 0 (เป็นการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลซึ่งมีค่า  $\sigma_1 = 3\sigma_B$  และ  $\sigma_3 = \sigma_B$  ตัวอย่างจะแตกด้วยแรง (P) ที่กระทำในแนวรัศมีเพียงอย่างเดียว) ถึงจุดที่ค่าความเค้นกดในแนวแกนเท่ากับ  $\sigma_c$  ซึ่งมีความเค้นในแนวรัศมีเท่ากับศูนย์ ( $\sigma_1 = \sigma_c$  และ  $\sigma_3 = 0$ ) ในการทดสอบได้กำหนดค่าความเค้นในแนวแกน 5 ค่า และอยู่ในช่วงที่ระบุตามที่กล่าวไป

ในการทดสอบได้ใช้เครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงโดยทำการติดตั้งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกในช่องใส่ตัวอย่าง โดยให้ผิวด้านหน้าและผิวด้านล่างของทรงกระบอกสัมผัสกับแผ่นกดซึ่งอยู่ในแนวระนาบ และถูกให้แรงด้วยระบบคานที่มีแผ่นน้ำหนักกดทับซึ่งเทียบได้กับความเค้นกดในแนวแกน (ในที่นี้คือความเค้นหลักกลาง,  $\sigma_2$ ) โดยจะผันแปร  $\sigma_2$  จาก 0 ถึงค่าความเค้นสูงสุดของหิน ( $\sigma_c$ ) ในขณะเดียวกันก็ให้แรงแบบเส้นตรงตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างจนกระทั่งหินแตก ในรูปที่ 4.4 ได้แสดงตัวอย่างหินในขณะทดสอบ สำหรับสมการที่ (4.6) ถึง (4.8) สามารถใช้ในการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหินได้

$$\sigma_x = - 2P_f/\pi DL, \quad (4.6)$$

$$\sigma_y = - 3\sigma_x \quad (4.7)$$

$$\sigma_z = \text{ความเค้นในแนวแกนที่ผันแปรจาก 0 ถึง } \sigma_c \quad (4.8)$$

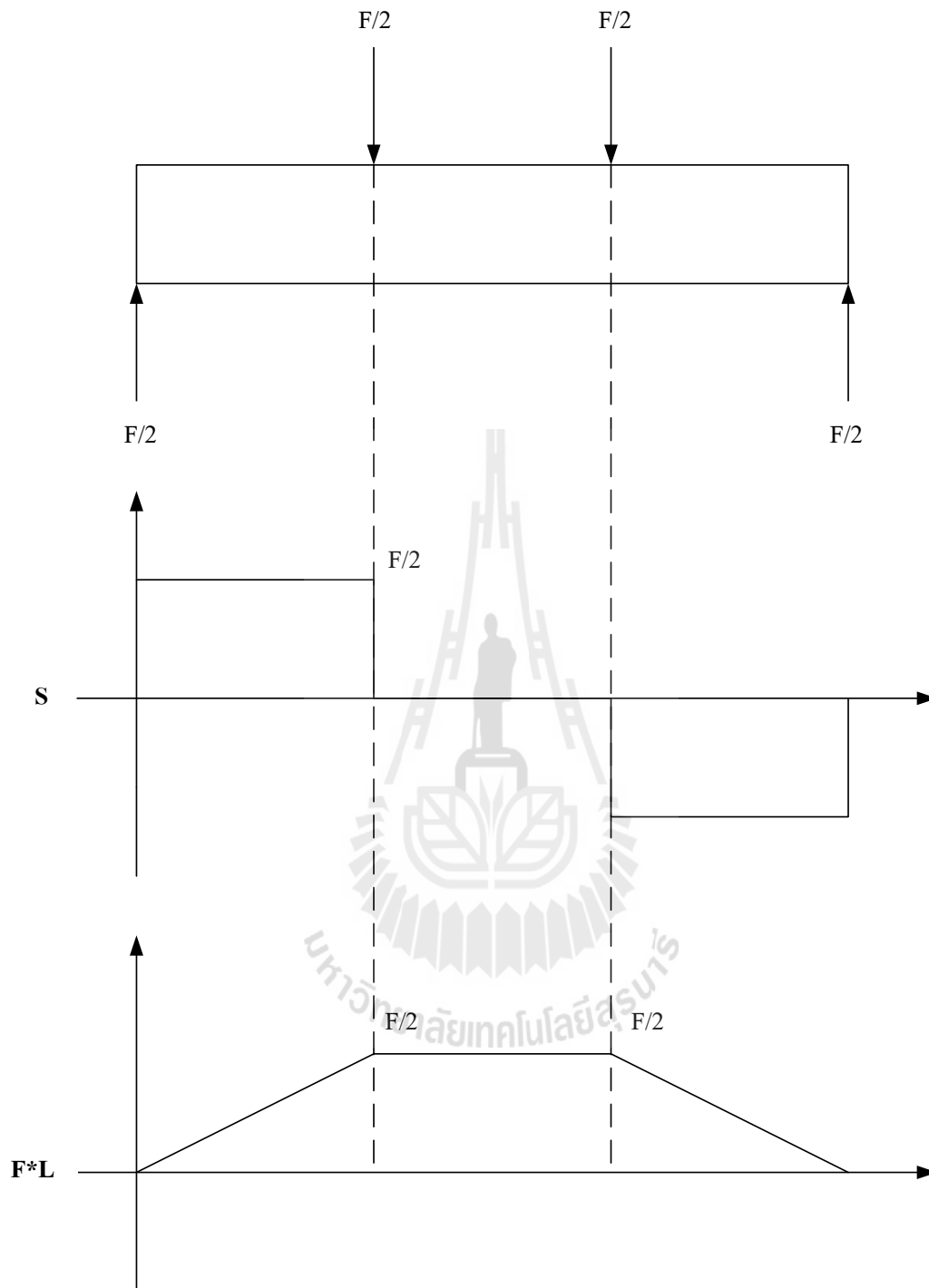


รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบในสามแกนจริงสำหรับทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์

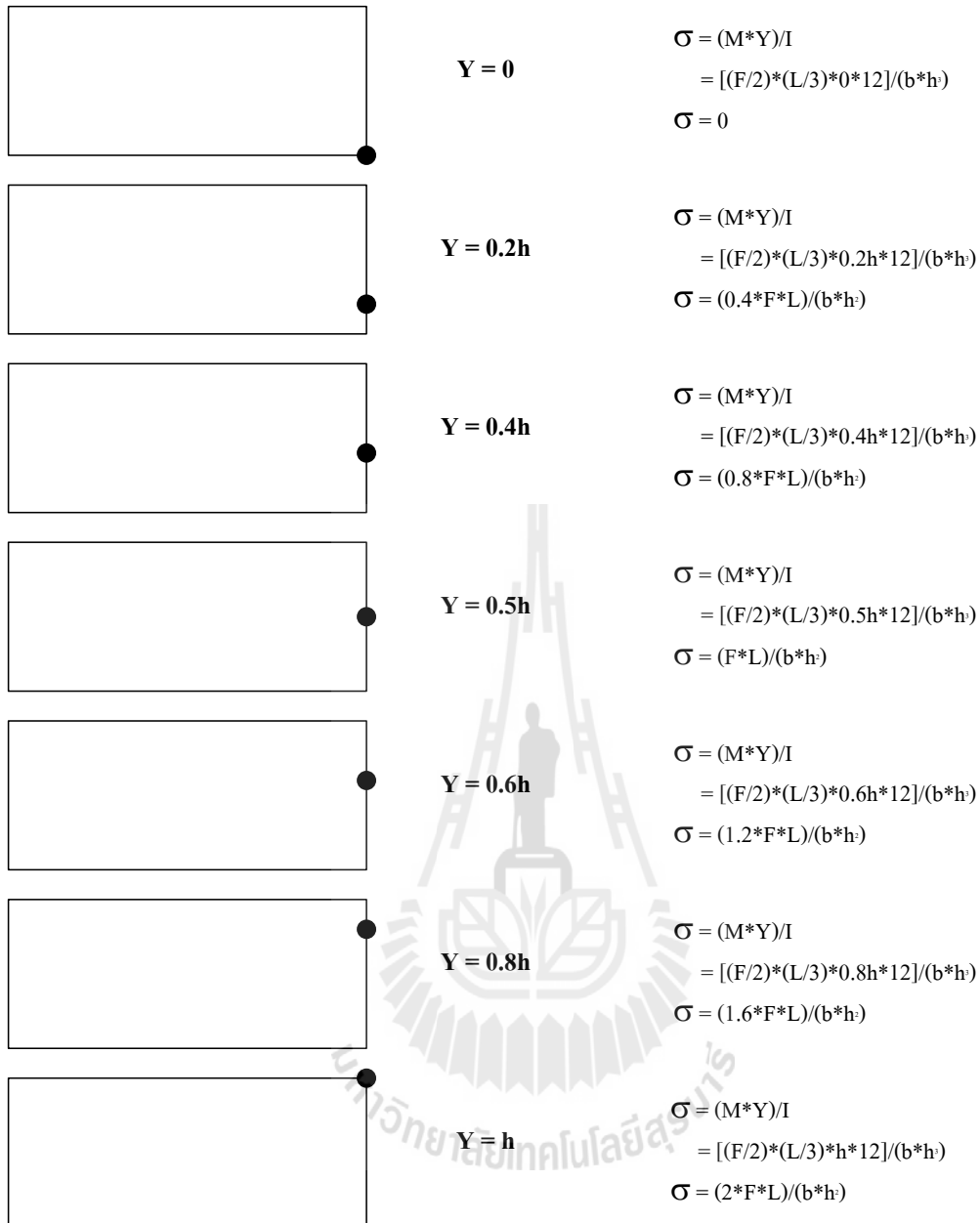
โดยที่  $P_f$  คือ แรงกดที่ทำให้หินแตก  
 $D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่าง  
 $L$  คือ ความหนาของตัวอย่าง  
 $\sigma_x$  คือ ความเค้นในแนวนอนที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน  
 $\sigma_y$  คือ ความเค้นในแนวตั้งฉากที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหิน

#### 4.6 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (Four-point bending test)

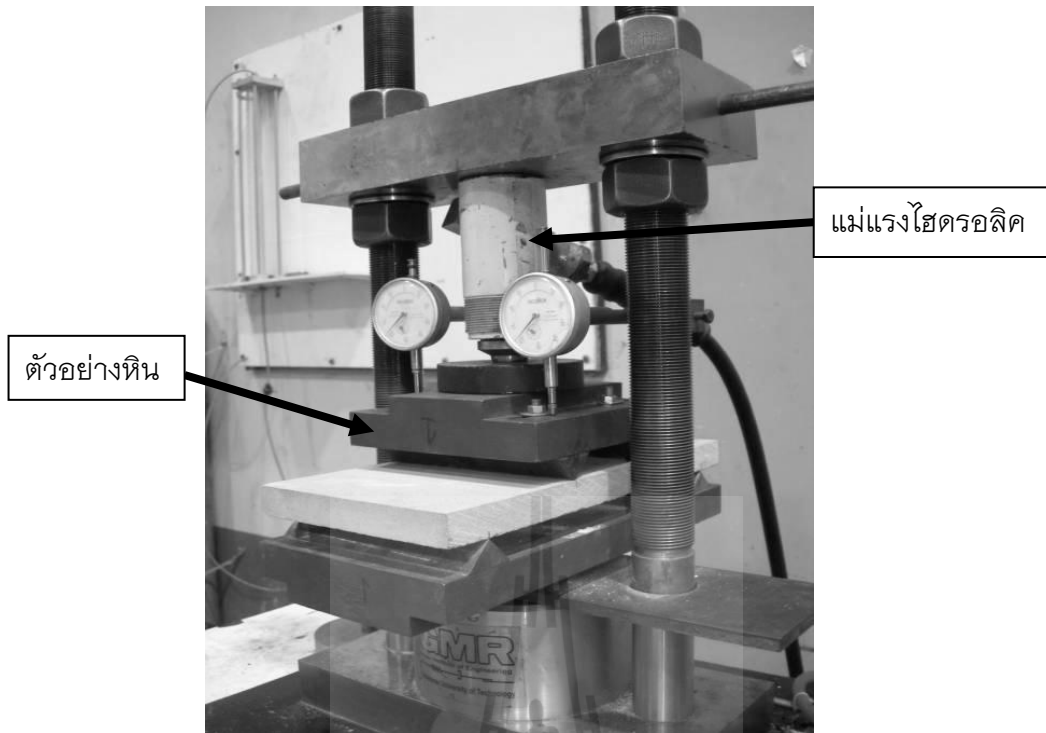
กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างหินที่แท้จริงที่สภาวะ  $\sigma_1 = \sigma_2$  เป็นบวก และ  $\sigma_3$  เป็นลบหรืออีกนัยหนึ่งคือกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างหินสามารถหาได้จากการทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด โดยตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $15.0 \times 30.0 \times 2.0$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการคำนวณหาการกระจายตัวของแรงจากความเค้นที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างหินได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินที่แต่ละระดับของความหนาของตัวอย่างหิน อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (รูปที่ 4.7) ประกอบด้วย



รูปที่ 4.5 แผนภาพ Shear diagram ในอุดมคติของหินที่เกิดจากการทดสอบการกดตั้งอแบบสี่จุด



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินแต่ละระดับความหนาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

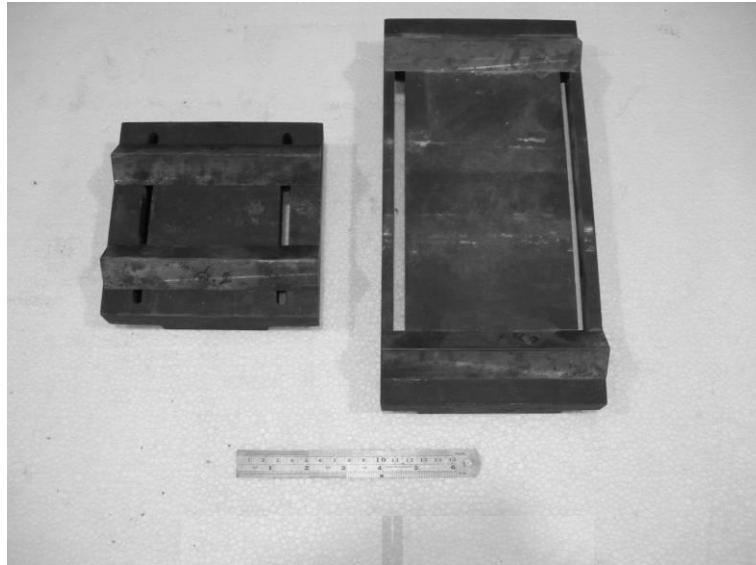


รูปที่ 4.7 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

- 1) ฐานรองรับหินด้านล่างซึ่งประกอบด้วยพื้นเหล็กที่มีการกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างพื้นเท่ากับ 24 เซนติเมตร (รูปที่ 4.8)
- 2) ฐานกดหินด้านบนประกอบด้วยพื้นเหล็กที่มีการกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างพื้นเหล็กเท่ากับ 8 เซนติเมตร (รูปที่ 4.9)
- 3) ปัมไฮดรอลิก
- 4) เกจวัดระยะการทรุดตัวในแนวตั้ง มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
- 5) เกจวัดความดันสำหรับคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดึง ซึ่งรับแรงดันได้สูงสุดถึง 700 psi

ลักษณะตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดจะอยู่ในลักษณะของคาน โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งชิ้นงานมีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ พื้นผิวจะต้องขนานและไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ บริเวณขอบของชิ้นงานมีการทำให้มนโค้งหรือปาดทำมุมเพื่อลดความเข้มของความเค้นในบริเวณดังกล่าว ชิ้นงานในการทดสอบแรงดัดงอจะไม่ถูกจับยึดแต่อย่างใด แต่ถูกวางอยู่ตรงกลางบนแท่นรองรับระหว่างจุดรับแรงสอง





รูปที่ 4.8 ฐานกดหินด้านบนที่พื้นเหล็กมีระยะห่างระหว่างพื้นเท่ากับ 8 เซนติเมตร (ด้านซ้าย) และฐานรองรับหินด้านล่างที่พื้นเหล็กมีระยะห่างระหว่างพื้นเท่ากับ 24 เซนติเมตร (ด้านขวา)



รูปที่ 4.9 เครื่องมือทดสอบกำลังกดในสองแกน (Biaxial load frame)

จุด จากนั้นชิ้นงานจะถูกกดด้วยแท่นกดจากด้านบนซึ่งมีจำนวนจุดรองรับแรงกดที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการทดสอบ โดยจุดรองรับในการส่งผ่านแรงกดชิ้นงานทุกจุดจะต้องมีความโค้งมนเพื่อลดความเข้มของความเค้นในบริเวณนั้น ซึ่งอาจส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักในบริเวณจุดกดนั้นได้ นอกจากนี้จุดรับแรงกดทั้งหมดสามารถปรับเปลี่ยนเป็นแบบยึดติดโดยไม่สามารถหมุนได้ หรืออาจมีลักษณะที่หมุนตัวได้บ้างเพื่อช่วยในการลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบได้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด คือ

$$\sigma = (F \times L) / (B \times h^2) \quad (4.9)$$

โดยที่ F คือ แรงกระทำ  
L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (span length)  
H คือ ความหนาของชิ้นงาน  
B คือ ความกว้างของชิ้นงาน

#### 4.7 การทดสอบการกดในสองแกน

การทดสอบแรงกดในสองแกน (Biaxial test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในสองแกนซึ่งมีค่า  $\sigma_1 = \sigma_2$  และ  $\sigma_3 = 0$  โดยใช้เครื่องกดทดสอบในสองแกน (รูปที่ 4.9) ตัวอย่างหินที่ใช้มีขนาด 5.5×5.5×5.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถูกติดตั้งในช่องสำหรับใส่ตัวอย่าง (รูปที่ 4.10) จากนั้นทำการให้แรงจากบีมไฮดรอลิกพร้อมกันทั้งสองแกนจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบสามารถให้แรงกดสูงสุด 100 ตัน ในแต่ละทิศทาง

การคำนวณผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือการหาค่าความเค้นกดสูงสุดในสองแกน ( $\sigma_{Bi}$ ) ของตัวอย่างหิน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.10) ถึง (4.12)

$$\sigma_{Bi} = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (4.10)$$

$$\sigma_1 = F_1/A_1 \quad (4.11)$$

$$\sigma_2 = F_2/A_2 \quad (4.12)$$

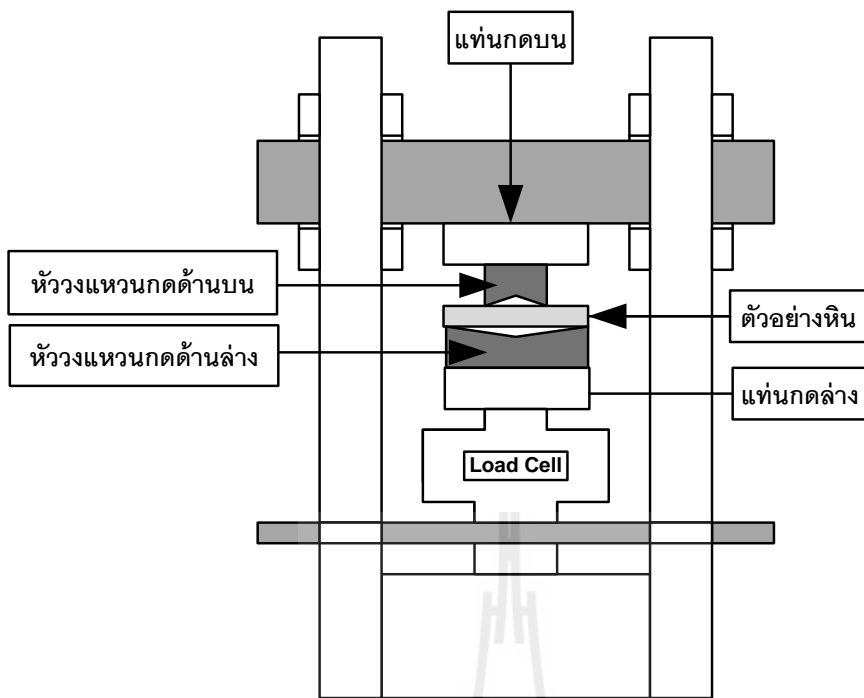


รูปที่ 4.10 เครื่องมือทดสอบกำลังกดในสองแกนในขณะที่ติดตั้งตัวอย่างหินทรายเข้าในช่องใส่ตัวอย่าง

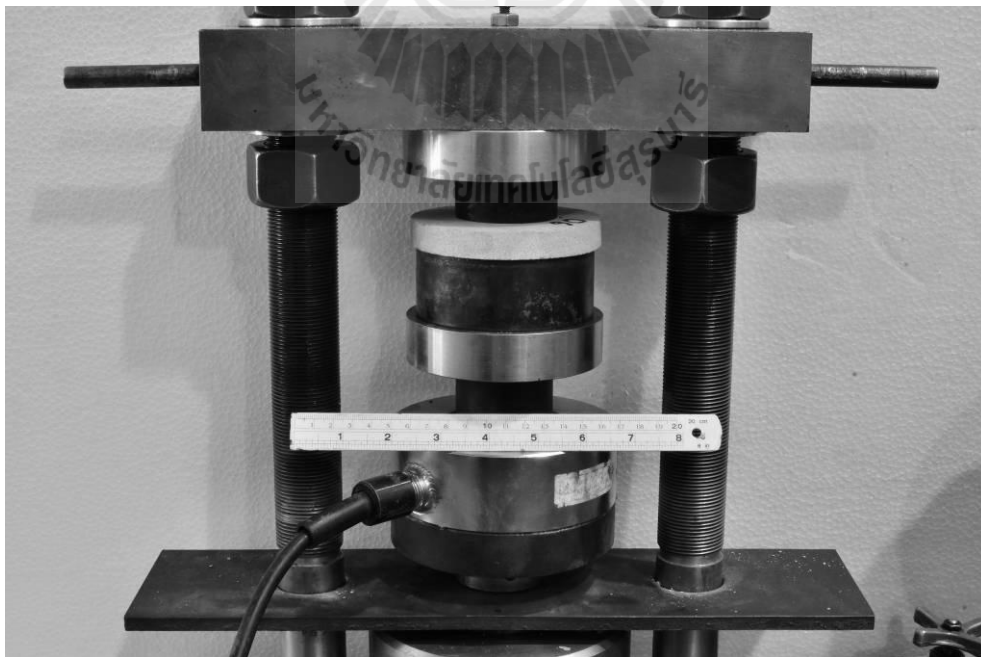
โดยที่  $F_1, F_2$  คือ แรงกระทำในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับหน้าตัดของตัวอย่างหิน  
 $A_1, A_2$  คือ หน้าตัดของตัวอย่างหินในทิศทางของความเค้นหลักและความเค้นหลัก  
 กลาง

#### 4.8 การทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม

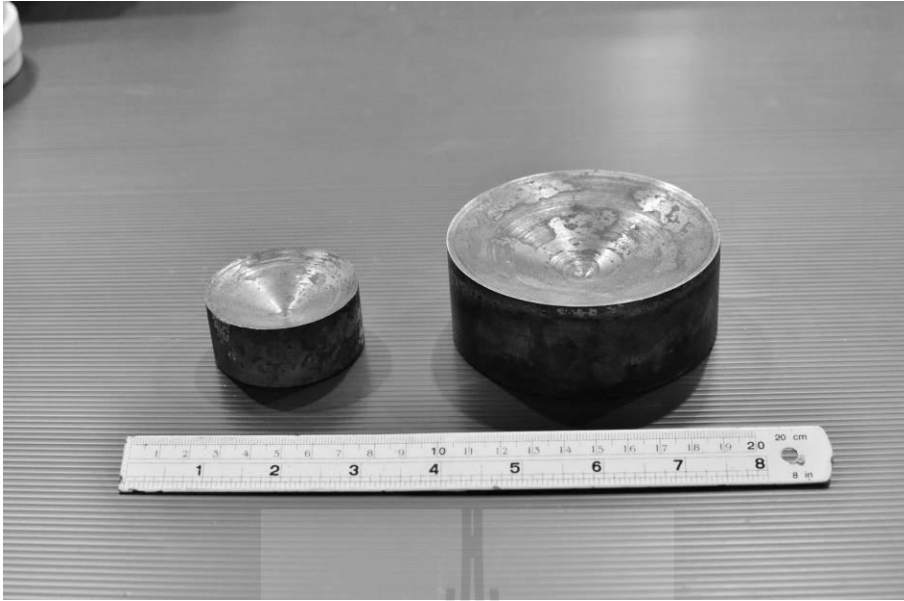
การทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่แท้จริงที่สภาวะ  $\sigma_1 = 0$  และ  $\sigma_2 = \sigma_3$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรืออีกนัยหนึ่งคือกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างหิน โดยตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร และหนา 1.0 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องทดสอบในแกนเดียวซึ่งทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับให้แรงแบบวงแหวนทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนบนเท่ากับ 55 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนล่างเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ดังแสดงเป็นแผนผังอย่างง่ายในรูปที่ 4.11 และในรูปที่ 4.12 ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมและหัวกดวงแหวน เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเสร็จสิ้นจึงทำการให้แรงกดด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งหินเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.11 แผนผังของการอุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบการดัดงอในแผ่นตัวอย่างหินกลม



รูปที่ 4.12 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบการดัดงอในแผ่นตัวอย่างหินแผ่นกลม



**รูปที่ 4.13** หัวกดวงแหวนบน (ซ้ายมือ) เส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และหัวกดวงแหวนล่าง (ขวามือ) เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร

การคำนวณผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ การหาค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างหินโดยใช้สมการ (Ugural, 1981) ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{3P}{4\pi t^2} \left[ (1-\nu) \left( 1 - \frac{c^2}{a^2} \right) + 2(1+\nu) \ln \left( \frac{a}{c} \right) \right] \quad (4.13)$$

โดยที่

P คือ แรงกระทำ

$\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง

t คือ ความหนาของชิ้นงาน

c คือ รัศมีของวงแหวนกดด้านบน

a คือ รัศมีของวงแหวนกดด้านล่าง

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ที่ออกแบบมาเพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะความเค้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค้นหลักกลางต่อกำลังกดและกำลังดึงของตัวอย่างหิน ซึ่งผลกระทบดังกล่าวคาดว่าจะปรากฏอยู่ในสภาวะการกดและการดึงของตัวอย่างหิน

#### 5.2 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดของตัวอย่างหิน

##### การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน

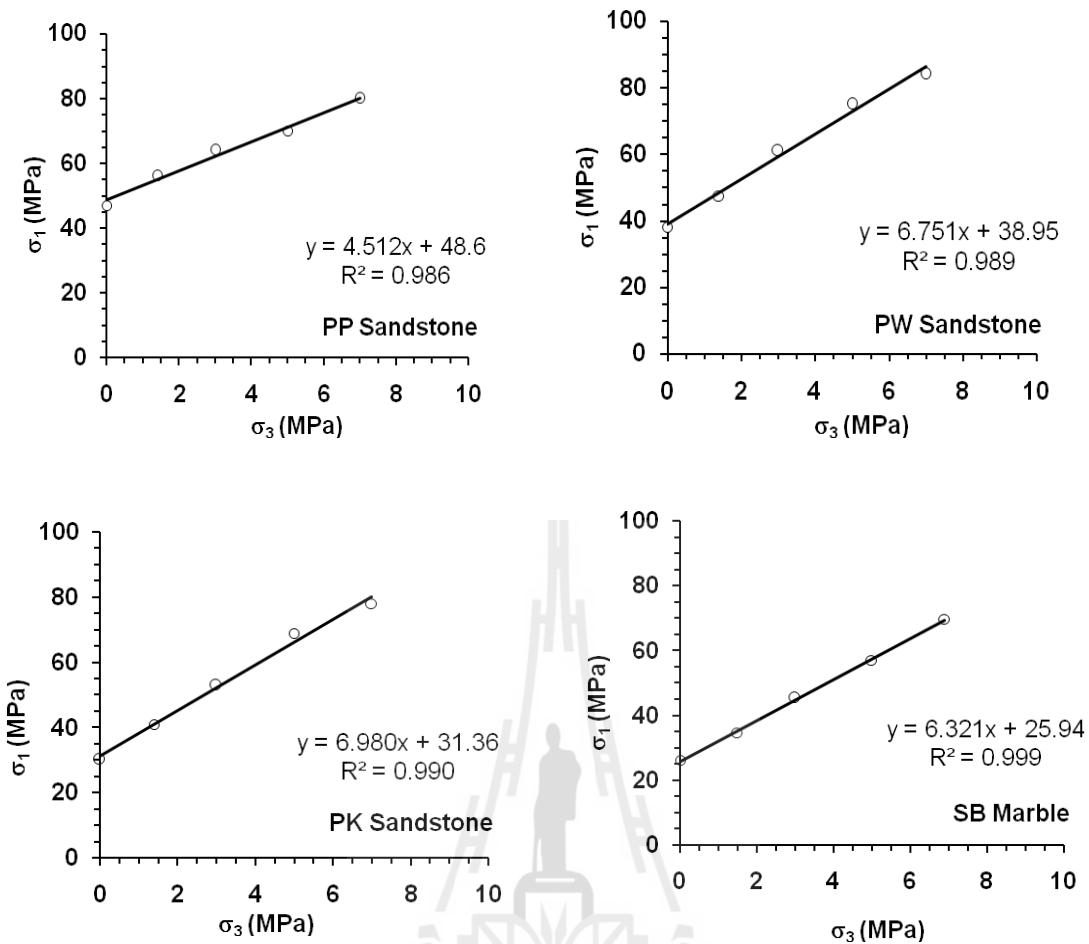
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลศาสตร์ได้แก่ (1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) และ (2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกน (Triaxial compressive strength test) การทดสอบในสภาวะนี้คือ  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  ผลการทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด โดยตัวอย่างหินทั้งสองการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.2

##### การทดสอบกำลังกดในสองแกน

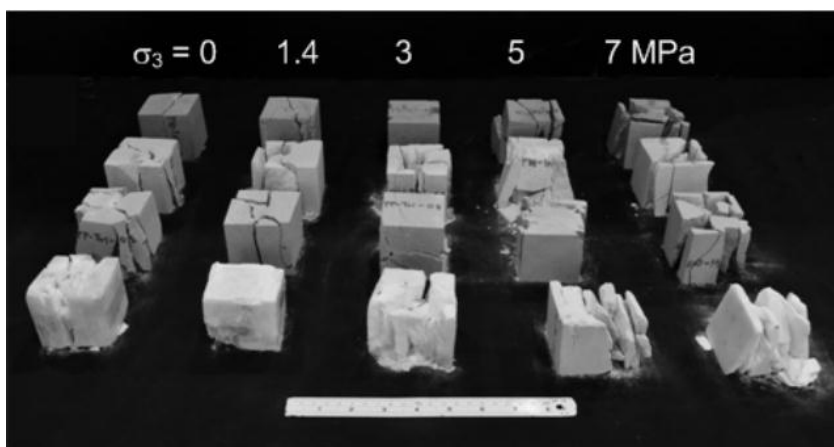
ผลการทดสอบที่ได้ระบุว่าหินทรายชุดภูพานมีค่ากำลังกดในสองแกนสูงที่สุด 71 MPa และหินอ่อนสระบุรีมีค่ากำลังกดในสองแกนต่ำสุดที่ 34 MPa ซึ่งสภาวะความเค้นของการทดสอบนี้คือ  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$  นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบกำลังกดในสองแกนที่มีความเค้นหลักรองไม่เท่ากับ 0 ด้วย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ ) โดยผันแปรความเค้นหลักรองไปที่ 2, 4 และ 6 MPa ผลการทดสอบกำลังกดในสองแกนที่สภาวะความเค้นทั้งสองสภาวะของหินทรายแต่ละชนิด และหินอ่อนสระบุรีได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ทำการทดสอบแล้วได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน

ชนิดหิน	การทดสอบ	ความเค้นหลัก สูงสุด, $\sigma_1$ (MPa)	ความเค้นหลัก กลาง, $\sigma_2$ (MPa)	ความเค้นหลัก รอง, $\sigma_3$ (MPa)
หินทราย ชุดภูพาน	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	80.0	7.0	7.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	70.0	5.0	5.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	64.0	3.0	3.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	56.0	1.4	1.4
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	47.0	0.0	0.0
หินทราย ชุดพระวิหาร	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	84.0	7.0	7.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	75.0	5.0	5.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	61.0	3.0	3.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	47.5	1.4	1.4
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	38.0	0.0	0.0
หินทราย ชุดภูกระดึง	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	78.0	7.0	7.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	69.0	5.0	5.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	53.0	3.0	3.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	41.0	1.4	1.4
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	30.3	0.0	0.0
หินอ่อนสระบุรี	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	69.8	7.0	7.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	57.1	5.0	5.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	45.5	3.0	3.0
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	34.7	1.4	1.4
	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	26.3	0.0	0.0



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และในสามแกน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด

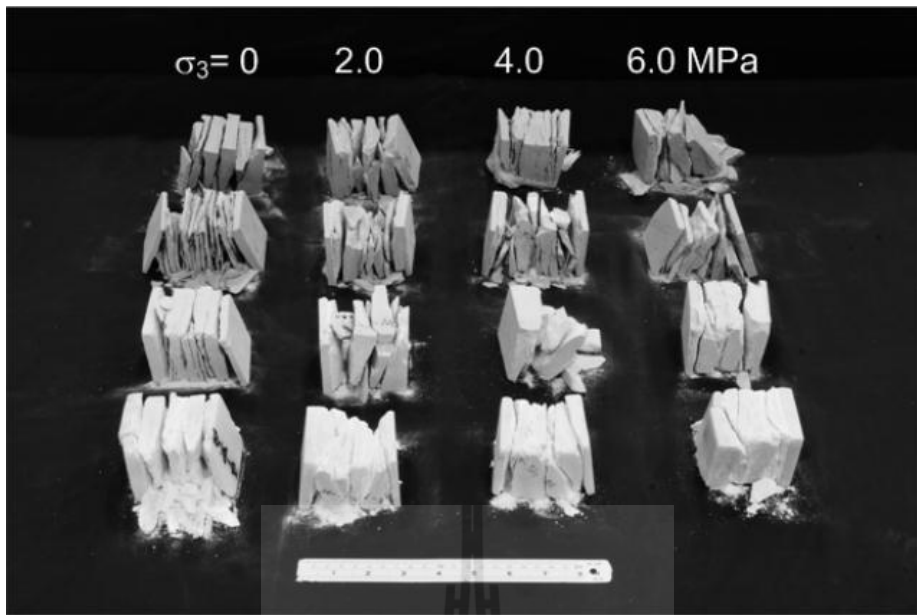


รูปที่ 5.2 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และในสามแกนของตัวอย่างหินแต่ละชนิดจากบนลงล่างได้แก่ หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูพาน และหินอ่อนสระบุรี



ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบกำลังกดในสองแกน

ชนิดหิน	สถานะ ความเค้น	ความเค้นหลัก สูงสุด, $\sigma_1$ (MPa)	ความเค้นหลัก กลาง, $\sigma_2$ (MPa)	ความเค้นหลัก รอง, $\sigma_3$ (MPa)
หินทราย ชุดภูพาน	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	102.7	102.7	6.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	94.4	94.4	4.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	77.8	77.8	2.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$	71.0	71.0	0.0
หินทราย ชุดพระวิหาร	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	90.5	90.5	6.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	77.8	77.8	4.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	68.5	68.5	2.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$	56.0	56.0	0.0
หินทราย ชุดภูกระดึง	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	94.4	94.4	6.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	79.8	79.8	4.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	69.4	69.4	2.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$	51.0	51.0	0.0
หินอ่อนสระบุรี	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	83.5	83.5	6.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	66.9	66.9	4.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$	55.8	55.8	2.0
	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$	34.0	34.0	0.0



**รูปที่ 5.3** ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบกำลังกดในสองแกนที่ความเค้นหลักทรงเท่ากับ 0 และที่ความเค้นหลักทรงผันแปรตั้งแต่ 2, 4 และ 6 MPa ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด จากบนลงล่างได้แก่ หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูพาน และหินอ่อนสระบุรี

### 5.3 ผลการทดสอบกำลังดึงสูงสุดของตัวอย่างหิน

#### การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (Four-point bending test)

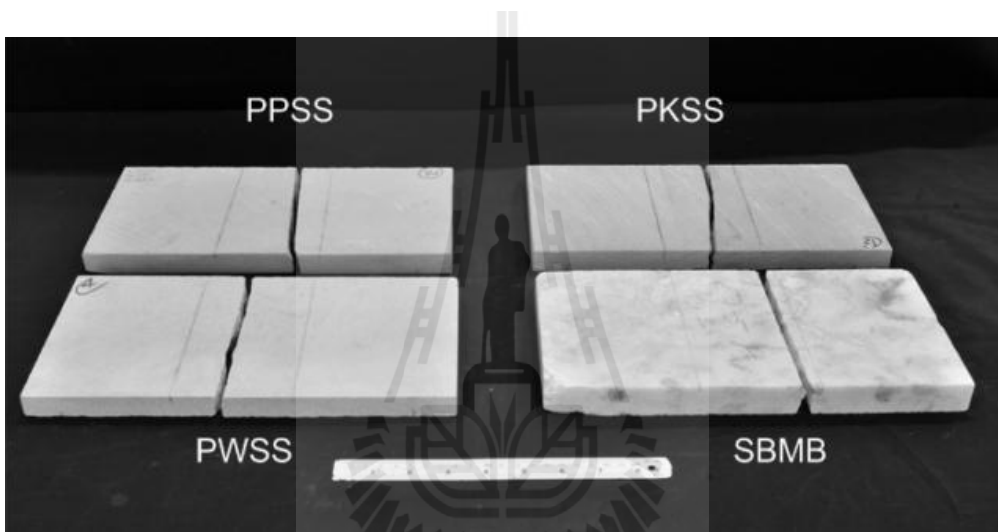
ผลการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดของหินทรายแต่ละชนิดและหินอ่อนสระบุรีได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งระบุว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในหินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร และหินอ่อนสระบุรีมีค่าความเค้นดึงสูงสุดลดลงตามลำดับได้แก่ 13.6, 9.4, 8.6 และ 8.2 MPa โดยการทดสอบนี้ได้กำหนดอัตราการกดเท่ากับ 0.1 MPa/s ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4

#### การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์

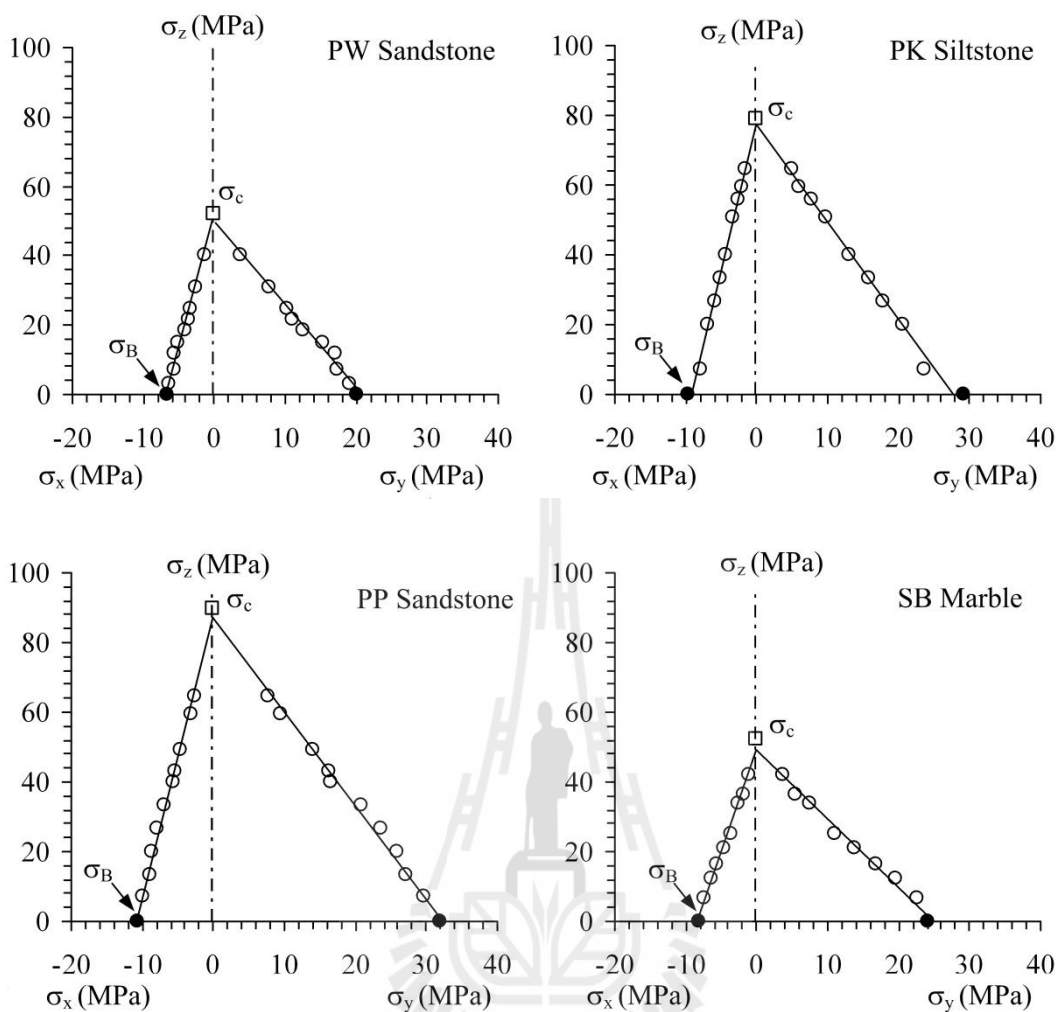
ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกด ( $\sigma_y$ ) และความเค้นดึง ( $\sigma_x$ ) ที่จุดแตกในฟังก์ชันของ  $\sigma_z$  ที่กระทำกับตัวอย่างหิน การทดสอบนี้ทำให้ได้การแตกในแรงดึงของหินที่สภาวะความเค้น  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  โดยหินทรายชุดภูพานมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 8.6 MPa ในรูปที่ 5.6 เป็นตัวอย่างหินบางส่วนที่ได้รับการทดสอบแล้ว

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงกดตั้งอแบบสี่จุด

ชนิดหิน	การทดสอบแรงกดตั้งอแบบสี่จุด (MPa)
หินทรายชุดภูพาน	13.6±0.35
หินทรายชุดภูกระดึง	9.4±0.33
หินทรายชุดพระวิหาร	8.6±0.53
หินอ่อนสระบุรี	8.2±0.11

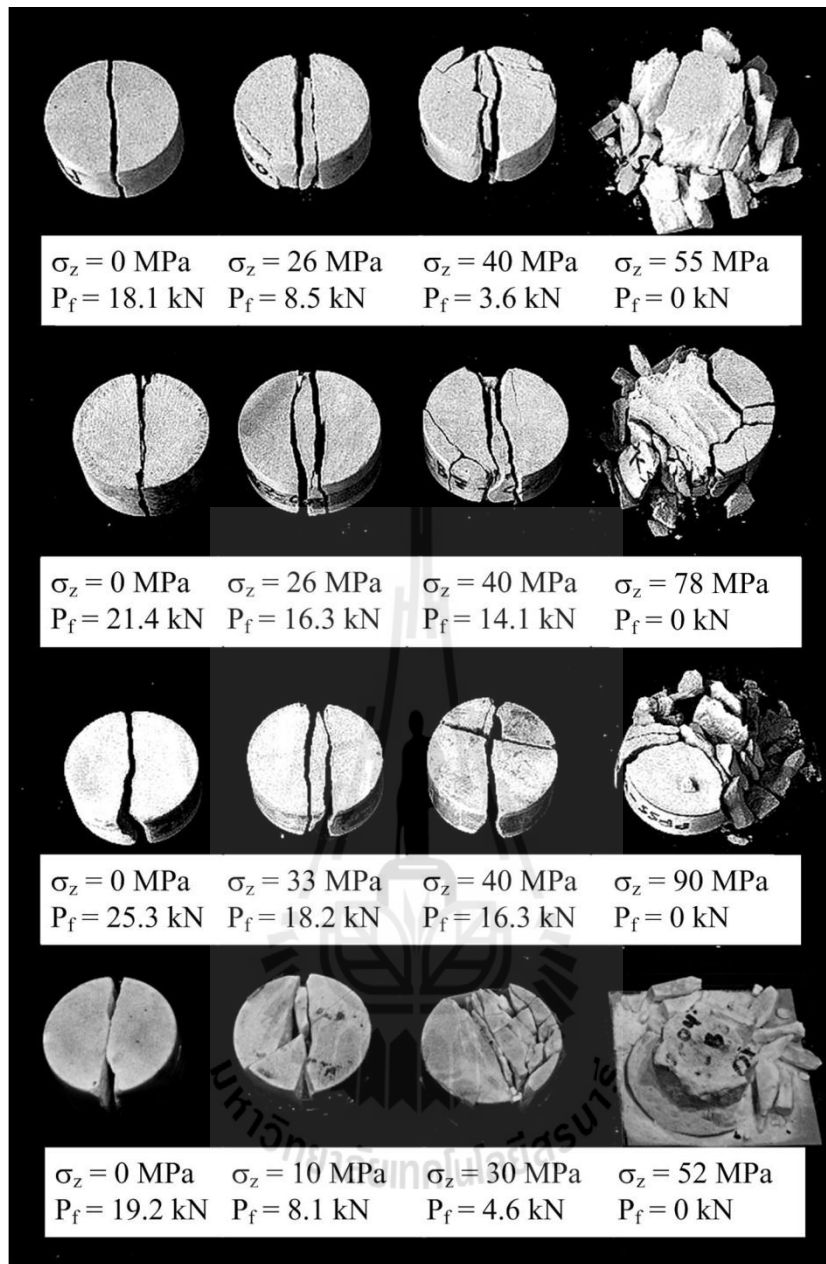


รูปที่ 5.4 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบแรงกดตั้งอแบบสี่จุด



PW Sandstone			PK Siltstone			PP Sandstone			SB Marble		
$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)
0.00	0.00	52.00	0.00	0.00	78.00	0.00	0.00	90.00	0.00	0.00	52.00
-1.27	3.80	40.25	-1.61	4.83	64.60	-2.56	7.67	64.60	-1.20	3.60	42.20
-2.54	7.62	31.00	-2.02	6.05	59.40	-3.14	9.41	59.40	-1.80	5.40	36.30
-3.38	10.14	25.00	-2.55	7.66	55.90	-4.71	14.14	49.00	-2.51	7.50	33.80
-3.67	11.00	21.70	-3.25	9.74	50.70	-5.42	16.27	43.00	-3.70	11.10	25.20
-4.20	12.60	18.30	-4.34	13.03	40.25	-5.53	16.58	40.25	-4.59	13.80	21.10
-5.12	15.35	15.07	-5.25	15.75	33.30	-6.95	20.84	33.30	-5.60	16.80	16.30
-5.69	17.06	11.92	-5.90	17.71	26.73	-7.84	23.51	26.73	-6.50	19.50	12.50
-5.73	17.19	7.23	-6.83	20.49	20.01	-8.60	25.79	20.01	-7.50	22.50	6.60
-6.33	18.98	3.02	-7.89	23.67	7.23	-9.03	27.09	13.41	-8.03	24.09	0.00
-6.71	20.14	0.00	-9.70	29.10	0.00	-9.90	29.71	7.23			
						-10.68	32.04	0.00			

รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกด ( $\sigma_y$ ) และความเค้นดึง ( $\sigma_x$ ) ที่จุดแตกในฟังก์ชันของ  $\sigma_z$  ที่กระทำกับตัวอย่างหิน



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ (จากบนลงล่าง) หินทราย  
ชุดพระวิหาร หินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดภูพาน และหินอ่อนสระบุรี

### การทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม

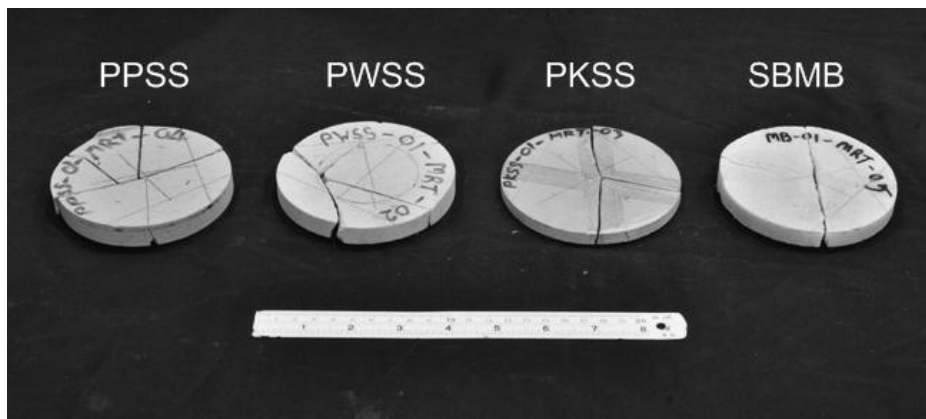
ผลการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมสามารถคำนวณโดยใช้สมการ (4.13) ซึ่งผลการคำนวณของตัวอย่างหินแต่ละชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ผลที่ได้ระบุว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในหินทรายชุดภูกระดึง หินทรายชุดพระวิหาร หินอ่อนสระบุรี และหินทรายชุดภูพาน มีค่าความเค้นดึงสูงสุดลดลงตามลำดับได้แก่ 7.4, 6.6, 6.2 และ 4.9 MPa ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.7

จากผลการทดสอบทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถเลือกจุดที่มีสภาวะความเค้นเดียวกับการทดสอบแรงกดในสองแกนและการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด กล่าวคือ  $\sigma_1 = \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  เท่ากับ 0 หรือมีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว การทดสอบกำลังกดในสามแกน และการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมกล่าวคือ สภาวะที่  $\sigma_2 = \sigma_3 > \sigma_1$  (ในกรณีของการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวคือ  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  และ  $\sigma_1$  เป็นมากกว่าศูนย์ ในกรณีของการทดสอบกำลังกดในสามแกนคือ  $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$  และ  $\sigma_1$  เป็นบวก และกรณีของการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมคือ  $\sigma_2 = \sigma_3$  เป็นลบและ  $\sigma_1 = 0$ ) ยังสามารถวิเคราะห์และสอบเทียบค่าคงที่ตามกฎของคูลอมบ์ต่อไปได้

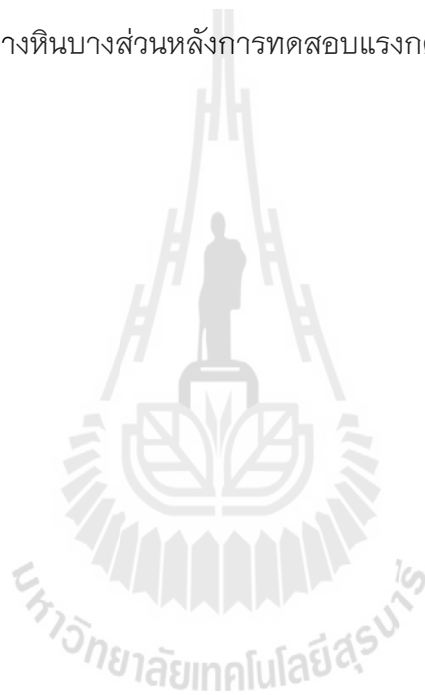


ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลมของตัวอย่างหินแต่ละชนิด

ชนิดหิน	ตัวอย่างหิน	ความหนา (mm)	แรง (N)	ความเค้นดึง, $\sigma_t$ (MPa)
หินทราย ชุดภูกระดึง	PK_SS-01	7.8	600	4.49
	PK_SS-02	6.0	700	8.94
	PK_SS-03	6.7	790	7.93
	PK_SS-04	6.3	650	7.39
	PK_SS-05	5.5	550	8.27
ค่าเฉลี่ย				7.4±1.72
หินทราย ชุดภูพาน	PP_SS-01	11.85	1840	5.92
	PP_SS-02	12.27	1750	5.25
	PP_SS-03	13.25	1845	4.75
	PP_SS-04	12.6	1445	4.11
	PP_SS-05	12.73	1595	4.45
ค่าเฉลี่ย				4.89±0.71
หินทราย ชุดพระวิหาร	PW_SS-01	12	1700	5.33
	PW_SS-02	12	1840	5.77
	PW_SS-03	12	1860	5.83
	PW_SS-04	13	2640	7.06
	PW_SS-05	9.59	1790	8.79
ค่าเฉลี่ย				6.56±1.4
หินอ่อนสระบุรี	SB_MS-01	13	2240	6.03
	SB_MS-02	13	2190	5.89
	SB_MS-03	13	2640	7.11
	SB_MS-04	12.65	2100	5.97
	SB_MS-05	11.8	1840	6.01
ค่าเฉลี่ย				6.2±0.5



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างหินบางส่วนหลังการทดสอบแรงกดติดตั้งในแผ่นกลม





## บทที่ 6

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 6.1 วัตถุประสงค์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของหินในบทที่ 5 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ทั้งในสภาวะความเค้นกด (ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว ในสองแกน และในสามแกน) และในสภาวะความเค้นดึง (ผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลประยุกต์ การทดสอบแรงกดตัดงอแบบสี่จุด และแบบแผ่นกลม) โดยใช้กฎของคูลอมบ์ ซึ่งจะเผยให้เห็นถึงผลกระทบของความเค้นหลักรองต่อกำลังกดและกำลังดึงของหิน

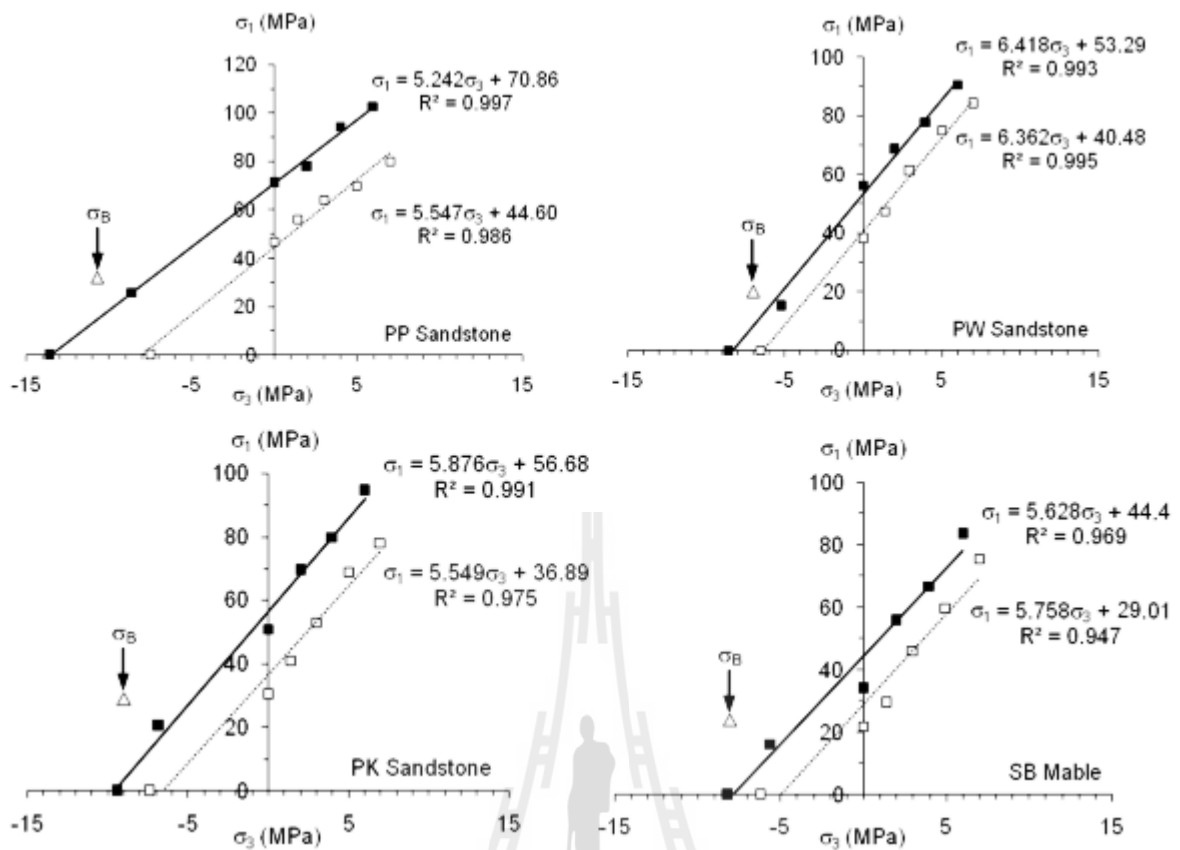
#### 6.2 ผลกระทบของความเค้นหลักกลาง

ผลการทดสอบทั้งหมดสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ทั้งในสภาวะความเค้นดึงและความเค้นกดได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งสภาวะของความเค้นของเส้นที่บที่อยู่ด้านบนคือ  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  และเส้นปะคือสภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  ค่าที่ได้จากผลการทดสอบทั้งหมดสำหรับตัวอย่างหินแต่ละชนิดได้สรุปไว้ในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4 นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่ามุมเสียดทานภายในและความเค้นยึดติดของตัวอย่างหินซึ่งรวมผลการทดสอบทั้งหมดเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความเค้นหลักกลางที่มีต่อค่าความเค้นทั้งในโซนความเค้นกดและความเค้นดึงโดยใช้กฎของคูลอมบ์ ค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (6.1) และ (6.2) (Jaeger et al., 2007)

$$\phi = \arcsin [(m-1)/(m+1)] \quad (6.1)$$

$$c = b \times [(1-\sin\phi)/(2\cos\phi)] \quad (6.2)$$

จากแผนภูมิในรูปที่ 6.1 สามารถคำนวณค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดได้โดยผลการคำนวณได้สรุปไว้ในตารางที่ 6.5 นอกจากนี้ผลที่ได้จากการคำนวณค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถนำไปสร้างเกณฑ์การแตกของคูลอมบ์หรืออยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) กับความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักสูงสุด ( $\sigma_1$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างหินแต่ละชนิด

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดภูพาน

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
การทดสอบแรงกดในสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ )	80.0	7.0	7.0
	70.0	5.0	5.0
	64.0	3.0	3.0
	56.0	1.4	1.4
การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )	47.0	0.0	0.0
การทดสอบการดึงข้อในแผ่นกลม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ )	0.0	-7.5	-7.5
การทดสอบการดึงข้อแบบสี่จุด ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ )	0.0	0.0	-13.6
การทดสอบแรงดึงแบบบราซึลประยุกต์ ( $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 < 0$ )	25.8	25.8	-8.6
การทดสอบแรงกดในสองแกน ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$ )	71.1	71.1	0.0
การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบขยาย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ )	77.8	77.8	2.0
	94.4	94.4	4.0
	102.7	102.7	6.0

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดภูกระดึง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
การทดสอบแรงกดในสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ )	78.0	7.0	7.0
	69.0	5.0	5.0
	53.0	3.0	3.0
	41	1.4	1.4
การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )	30.3	0.0	0.0
การทดสอบการดึงข้อในแผ่นกลม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ )	0.0	-7.4	-7.4
การทดสอบการดึงข้อแบบสี่จุด ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ )	0.0	0.0	-9.4
การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ( $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 < 0$ )	20.5	20.5	-6.8
การทดสอบแรงกดในสองแกน ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$ )	51.0	51.0	0.0
การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบขยาย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ )	69.4	69.4	2.0
	79.8	79.8	4.0
	94.4	94.4	6.0

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินทรายชุดพระวิหาร

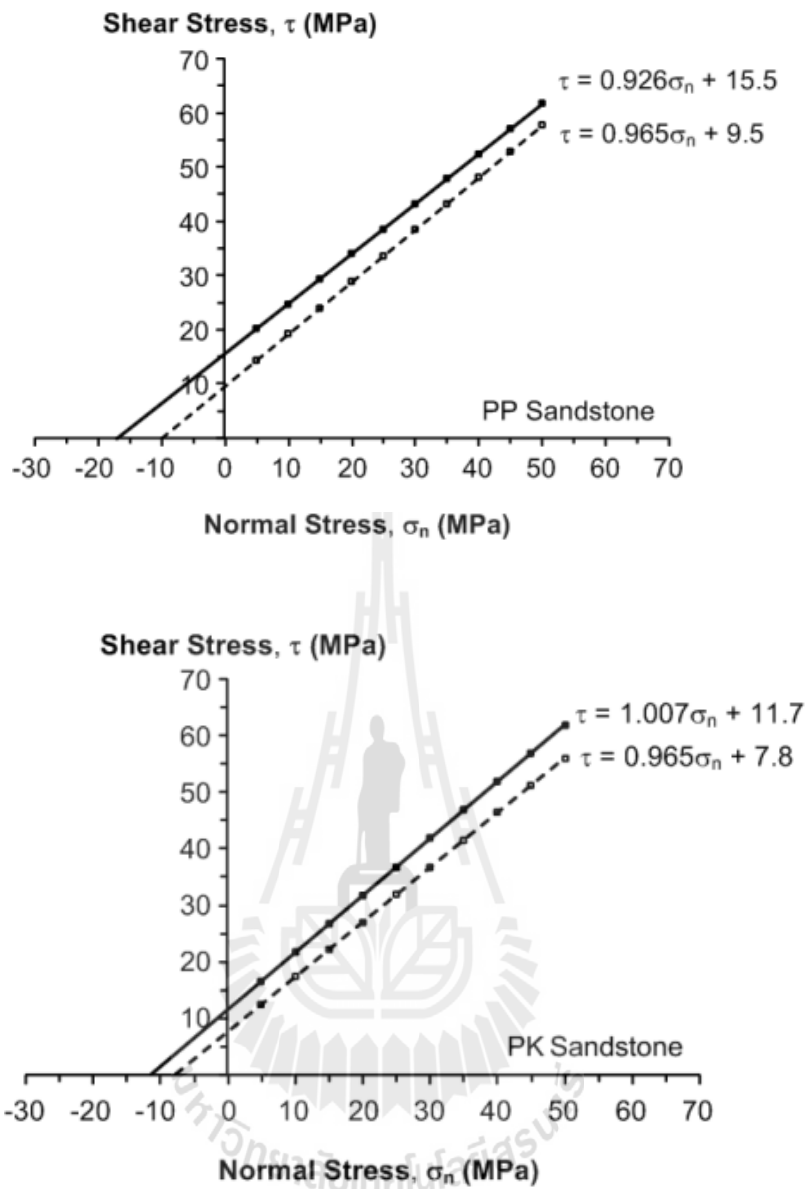
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
การทดสอบแรงกดในสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ )	84.0	7.0	7.0
	75.0	5.0	5.0
	61.0	3.0	3.0
	47.5	1.4	1.4
การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )	38.0	0.0	0.0
การทดสอบการดึงในแผ่นกลม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ )	0.0	-6.6	-6.6
การทดสอบการดึงแบบสี่จุด ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ )	0.0	0.0	-8.6
การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ ( $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 < 0$ )	15.0	15.0	-5.2
การทดสอบแรงกดในสองแกน ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$ )	56.3	56.3	0.0
การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบขยาย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ )	68.5	68.5	2.0
	77.8	77.8	4.0
	90.5	90.5	6.0

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการของหินอ่อนสระบุรี

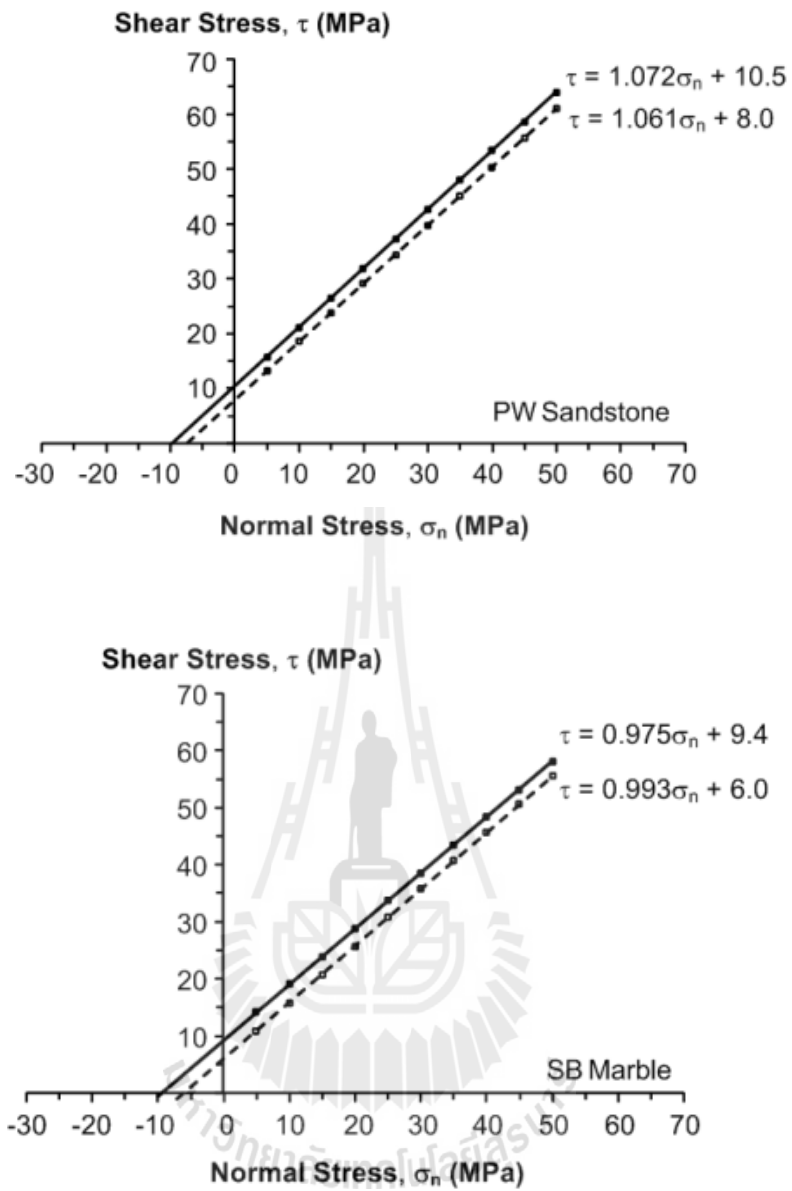
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
การทดสอบแรงกดในสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ )	75.5	7.0	7.0
	59.7	5.0	5.0
	46.1	3.0	3.0
	29.5	1.4	1.4
การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )	22.0	0.0	0.0
การทดสอบการดึงข้อในแผ่นกลม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ )	0.0	-6.2	-6.2
การทดสอบการดึงข้อแบบสี่จุด ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ )	0.0	0.0	-8.17
การทดสอบแรงดึงแบบบราซึลประยุกต์ ( $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 < 0$ )	16.3	16.3	-5.6
การทดสอบแรงกดในสองแกน ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$ )	34.0	34.0	0.0
การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบขยาย ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ )	55.8	55.8	2.0
	66.9	66.9	4.0
	83.5	83.5	6.0

ตารางที่ 6.5 ผลการคำนวณค่ามุมเสียดทานและความเค้นยึดติดของหินแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับสภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 = \sigma_2$  และ  $\sigma_2 = \sigma_3$

ชนิดหิน	สภาวะความเค้น ( $\sigma_1 = \sigma_2$ )		สภาวะความเค้น ( $\sigma_2 = \sigma_3$ )	
	c (MPa)	$\phi$ (Degrees)	c (MPa)	$\phi$ (Degrees)
หินทรายชุดภูพาน	15.5	43	9.4	44
หินทรายชุดภูกระดึง	11.7	45	7.7	44
หินทรายชุดพระวิหาร	10.5	47	8.0	47
หินอ่อนสระบุรี	9.3	45	5.8	46



**รูปที่ 6.2** ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ของตัวอย่างหินทรายชุดภูพาน (บน) และหินทรายชุดภูกระดึง (ล่าง)



**รูปที่ 6.3** ผลการทดสอบทั้งหมดที่แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ของตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหาร (บน) และหินอ่อนสระบุรี (ล่าง)



เมื่อนำกฎของคูลอมบ์มาประยุกต์ใช้สำหรับผลการทดสอบในสภาวะความเค้นทั้งสอง ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  และ  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบในแต่ละสภาวะความเค้นสอดคล้องกับกฎของคูลอมบ์เป็นอย่างดีโดยสภาวะความเค้น  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  จะให้ค่าความเค้นยึดติดสูงกว่าสภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  ดังแสดงในตารางที่ 6.5 และแสดงในรูปแบบแผนภูมิดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 ข้อสรุปอีกประการหนึ่งคือ ผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลจะไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบในสภาวะความเค้นทั้งสอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำกฎของคูลอมบ์มาประยุกต์ใช้

ดังนั้นภายใต้สภาวะความเค้นดึง การแตกของหินจะมีผลกระทบมาจากขนาดของความเค้นหลักกลาง กล่าวคือ เมื่อความเค้นหลักกลางมีค่าสูงเข้าใกล้ความเค้นหลักสูงสุดหินจะมีความแข็งแรงขึ้นภายใต้แรงดึง และในทางตรงกันข้ามเมื่อความเค้นหลักกลางมีค่าลดลงเข้าใกล้ความเค้นหลักรองหินจะมีกำลังรับแรงดึงต่ำกว่า ผลที่ได้จากการทดสอบแบบบราซิลไม่สอดคล้องกับสภาวะความเค้นทั้งสองเนื่องจากหินจะแตกภายใต้  $\sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3$  ทั้งนี้มีได้หมายความว่าผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลไม่ถูกหรือไม่เหมาะสม แต่การแตกของหินภายใต้สภาวะความเค้นที่  $\sigma_1$  เป็นความเค้นกด  $\sigma_2$  มีค่าเป็น 0 และ  $\sigma_3$  เป็นความเค้นดึงจะเป็นกรณีเฉพาะซึ่งจะไม่สอดคล้องกับสภาวะความเค้นอื่น ส่งผลให้ได้ข้อสรุปประการหนึ่งคือผลการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลไม่ควรนำมาพิจารณาในส่วนของการแตกเมื่อนำกฎของคูลอมบ์มาใช้

### 6.3 วิจารณ์ผลการศึกษา

ผลการทดสอบต่างๆ ที่อยู่ในสภาวะความเค้นเดียวกันจะให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้สมการเส้นตรง นอกจากนี้ผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่าผลกระทบของความเค้นหลักกลางนอกจากจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของหินในสภาวะความเค้นกดแล้วยังส่งผลถึงสภาวะของความเค้นดึงอีกด้วย ในขณะที่ผลการทดสอบความเค้นดึงแบบบราซิลไม่สามารถนำมาสัมพันธ์กับผลการทดสอบอื่นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำกฎของคูลอมบ์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งแท้จริงแล้วค่าความเค้นดึงที่ต่อเนื่องกันของการทดสอบที่สภาวะความเค้น  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  ควรจะเป็นการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม และค่าความเค้นดึงที่ต่อเนื่องกันของการทดสอบที่สภาวะความเค้น  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  ควรจะเป็นการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์และการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

## บทที่ 7

### สรุปผลการศึกษา

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการศึกษานี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชุด ตามสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นคือ ชุดที่ 1 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว การทดสอบกำลังกดในสามแกน และการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม โดยมีสภาวะความเค้นคือ  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  และ ชุดที่ 2 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์ และการทดสอบกำลังกดในสามแกนแบบขยาย โดยมีสภาวะความเค้นคือ  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  ซึ่งจากผลการทดสอบในแต่ละสภาวะความเค้นให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่าผลกระทบของความเค้นหลักกลางนอกจากจะส่งผลต่อค่าความแข็งของหินในโซนความเค้นกดแล้วยังส่งผลถึงโซนของความเค้นดึงอีกด้วย ในขณะที่ผลการทดสอบความเค้นดึงแบบบราซิลไม่สามารถนำมาสัมพันธ์กับสภาวะความเค้นทั้งสองภายใต้กฎของคูลอมบ์ เนื่องจากสภาวะความเค้นดึงจากการทดสอบความเค้นดึงแบบบราซิลไม่สอดคล้องกับการทดสอบรูปแบบอื่นๆ ที่ได้ดำเนินการในการศึกษานี้ ซึ่งแท้จริงแล้วค่าความเค้นดึงที่ต่อเนื่องกันของการทดสอบที่สภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  ควรจะเป็นการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม และค่าความเค้นดึงที่ต่อเนื่องกันของการทดสอบที่สภาวะความเค้นที่  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  ควรจะเป็นการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์และการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

ผลการทดสอบยังสามารถพิสูจน์ได้ว่าอุโมงค์หรือช่องเหมืองที่อยู่ในภาคสนามซึ่งมีสภาวะความเค้นที่เหมือนกับการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบขยาย (Triaxial Extension,  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3 > 0$ ) มีค่ากำลังดึงสูงกว่าที่สภาวะแรงกดในสามแกน (Triaxial Compression) ดังนั้นผลการออกแบบอุโมงค์โดยใช้กฎของคูลอมบ์จะเป็นไปในเชิงอนุรักษ์ ในขณะที่เดียวกันที่หลังคาอุโมงค์จะอยู่ในสภาวะความเค้นที่เหมือนกับการทดสอบการดัดงอในแผ่นกลม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ ) ซึ่งให้ค่าความเค้นดึงที่ต่ำกว่าการทดสอบแรงดึงรูปแบบอื่น (ในที่นี้คือการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลประยุกต์) ดังนั้นในการออกแบบอุโมงค์หรือช่องเหมืองควรพิจารณาถึงผลกระทบของความเค้นหลักกลางด้วยเพื่อให้ผลการออกแบบมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย

## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2546). กลศาสตร์หินพื้นฐาน, บริษัท อีซีเอ็นพีเอ็นท์ โปรดักส์, กรุงเทพฯ
- ASTM D2664-95 (1998). Standard test method for triaxial compressive strength of untrained rock core specimens without pore pressure measurements, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- ASTM D2938-95 (1998). Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- ASTM D3148-96 (1998). Standard test method for Elastic Moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- ASTM D3967-95 (1998). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- ASTM D4543-85 (1998). Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- Bieniawski, Z.T. (1974). Estimating the strength of rock material. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, Volume 74, pp. 312-320.
- Brown, E.T. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. The Commission on Rock Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, New York, 211 pp.
- Chen, R. and Stimpson, B. (1993). Interpretation of indirect tensile strength tests when moduli of deformation in compression and in tension are different. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Volume 26, No. 2, pp. 183-189.
- Fuenkajorn, K and Klanphumeesri, S. (2010). Direct Tension Tests of Intact Rocks Using Compression-to-Tension Load Converter.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotechnical Engineering Div.*, ASCE, Volume 106, No. GT9, pp. 1013-1035.
- Hondros, G. (1959). The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. *Aust. J. Appl. Sci.* Volume 10, pp. 243-68.

- Jaeger, J. and Hoskins, E. (1966). Rock Failure under the Confined Brazilian Test. *Journal of Geophysics Research*, Volume 7, No.10, pp. 2651–2659.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W., (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1979). *Fundamental of Rock Mechanics* (3<sup>rd</sup> Edition). Chapman and Hall, London, 593 pp.
- Jianhong, Y., Wu, F.Q., and Sun, J.Z. (2009). Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 46, Issue 3, pp 568–576.
- Johnson, I.W. (1985). The strength of intact geomechanics material. *J. Geotechnical Engineering Div.*, ASCE, Volume 3, No. 6, pp. 730–749.
- Kim, M.K. and Lade, P.V. (1984). Modeling rock strength in three dimensions. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Volume 21, Issue 1, pp. 21–33.
- Murrell, S.A.F. (1966). The effects of triaxial systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. *Geophys. J., R. Astron. Soc.*, Volume 10, No. 3, pp. 231–281.
- Sundaram, P.N. and Corrales, J.M. (1980). Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume17:pp. 131–3.
- Ugural, A. C., (1981). *Stresses in plates and shells*. Fourth Edition, McGraw–Hill, New York.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwan, R. & 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.
- Yu, Y., Yin, J. and Zhong, Z. (2006). Shape effect in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 43, Issue 4, pp. 623–627.
- Yudhbir et al., (1983). An empirical failure criterion for rock masses. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Cong. Rock. Mech.* Melbourne, Australia, Vol. B, pp. 1–8.

## 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” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา 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