



รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-36

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์เครื่องกดทดสอบหินในสามแกนจริง

**Invention of True Triaxial Compression Apparatus
for Rock Testing**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-36

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์เครื่องกดทดสอบหินในสามแกนจริง

**Invention of True Triaxial Compression Apparatus
for Rock Testing**

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 และ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2552

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2551 และ 2552 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากนางสาวกัลญา พิบโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2552

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างโครงกคทดสอบในหลายแกนเพื่อใช้ทดสอบตัวอย่างหินภายใต้ความเค้นในสามแกนจริง การออกแบบอยู่บนพื้นฐานข้อกำหนด 3 ประการ คือ 1) สามารถให้แรงกดด้านข้างคงที่ในระหว่างทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีปริมาตรเท่ากับหรือใหญ่กว่าตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินในแนวแกนหลักทั้งสามทิศทาง โดยได้นำคานทอดแรงทั้ง 2 คู่ มาใช้ในการให้ความเค้นด้านข้างที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงสูงสุดด้านข้างนี้ถูกออกแบบให้เท่ากับ 100 กิโลนิวตัน แรงกดในแนวด้านบนจะใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 1,000 กิโลนิวตัน โครงการทดสอบนี้สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ ซม. ไปจนถึงขนาด $10 \times 10 \times 20$ ซม.

งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ขีดความสามารถของโครงกคทดสอบ ด้วยการทดสอบการกคในสามแกนจริงและการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลภายใต้แรงกดในแนวแกนจากตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด คือ ชุกฎพาน ชุกพระวิหาร และชุกฎกระดิ่ง ผลการทดสอบระบุว่าโครงกคทดสอบนี้ทำงานได้ดี และสามารถแสดงผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อค่ากำลังกคและกำลังดึงของหินทราย การตรวจวัดการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินด้วยการวัดการเคลื่อนตัวของคานทอดแรงมีความแม่นยำและอ่อนไหวเพียงพอที่จะแสดงคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางของตัวอย่างหินทรายทั้ง 3 ชนิด ผลจากการวิจัยยังสามารถพิสูจน์ได้ว่าเกณฑ์การแตกของ Weibols and cook สามารถอธิบายความเค้นที่จุดแตกได้ดีกว่าเกณฑ์ของ Coulomb เมื่อความเค้นทั้งหมดเป็นความเค้นกคและเมื่อความเค้นหลักน้อยที่สุดเป็นความเค้นดึง เกณฑ์ของ Coulomb จะให้ค่าความเค้นที่จุดแตกสูงกว่าความเป็นจริงประมาณร้อยละ 20 ในขณะที่เกณฑ์ของ Weibols and cook ไม่สามารถอธิบายการแตกของหินภายใต้แรงดึงได้

ข้อได้เปรียบของการทดสอบที่เสนอมาในงานวิจัยนี้คือ มีความสามารถในการทดสอบหินได้หลายขนาดและหลายรูปร่างเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแรงดันในสามแกนที่พัฒนาขึ้นในต่างประเทศ ข้อได้เปรียบนี้ทำให้สามารถทดสอบหินภายใต้คุณลักษณะของแรงและรูปร่างของตัวอย่างหินได้อย่างหลากหลาย อาทิ การทดสอบความคืบในสามแกน การทดสอบความโค้งงอแบบสี่จุด การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลและแบบวงแหวนโดยมีการกคในแนวแกนด้วย และการทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะภายใต้ความเค้นในสองแกนและในสามแกนที่มีค่าต่างกัน เป็นต้น

Abstract

A polyaxial load frame is designed and constructed for use to test rock specimens under true triaxial stresses. The design is based on three key requirements: (1) capable of maintaining constant lateral stresses during the test, (2) capable of testing specimen with volume equal to or larger than those used in the conventional triaxial testing, and (3) allowing monitoring of specimen deformation along the three principal axes. Two pairs of cantilever beams are used to apply the lateral stresses in mutually perpendicular directions. The maximum lateral load is designed for 100 kN. The axial load is applied by a 1000-kN hydraulic load cell. The load frame can accommodate specimen sizes from $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ cm to $10 \times 10 \times 20$ cm.

Performance assessment of the load frame is made by performing true triaxial compression tests and Brazilian tensile strength tests under axial confinements. Phu Phan, Phra Wihan and Phu Kradung sandstones are used as rock specimens. Results indicate that the polyaxial load frame performs well for the assessment of the effects of intermediate principal stress on the compressive and tensile strengths of the sandstones. Measuring the specimen deformations by monitoring the movement of the cantilever beams is sufficiently accurate and sensitive to detect the transversely isotropic behavior of the three sandstones. The research results also reveal that the modified Wiebols and Cook criterion describes the failure stresses better than does the Coulomb criterion when all principal stresses are in compressions. When the minimum principal stresses are in tension, the Coulomb criterion over-estimate the second order of the stress invariant at failure by about 20% while the modified Wiebols and Cook criterion fails to describe the rock tensile strengths.

An advantage of the proposed polyaxial frame is that it can test rock specimens with a wider range of sizes and shapes compared to most true triaxial cells previously developed. Such flexibility allows performing a variety of test configurations, for example polyaxial creep testing, four-point beam bending tests with lateral confinement, Brazilian and ring tension tests with axial compression, and borehole stability testing under biaxial and true triaxial stresses.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	4
1.5 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	15
3.1 ตัวอย่างหิน.....	15
3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	15
3.3 การกำหนดหมายเลขกำกับตัวอย่างหิน.....	15
บทที่ 4 เครื่องกวดทดสอบในสามแกนจริง.....	19
4.1 วัตถุประสงค์.....	19
4.2 ปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบ.....	19
4.3 ข้อกำหนดเครื่องกวดทดสอบในสามแกนจริง.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบในสามแกนจริง	29
5.1 วัตถุประสงค์.....	29
5.2 การทดสอบแรงกดในสามแกน.....	29
5.3 ผลการทดสอบแรงกดในสามแกนจริง.....	29
5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	39
5.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นกด.....	47
5.6 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	47
5.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	55
บทที่ 6 บทสรุป	63
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการออกแบบเครื่องทดสอบในสามแกนจริง.....	ก-1
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้เครื่องทดสอบในสามแกนจริง.....	ข-1
ประวัตินักวิจัย	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	ผลการทดสอบและค่าปัจจัยการทดสอบ.....	31
5.2	คุณสมบัติความยืดหยุ่นในทิศทางที่ตั้งฉากและขนานกับชั้นหิน.....	34
5.3	ค่าปัจจัย A, B และ C ของตัวอย่างหิน.....	44

สารบัญรูปร่าง

รูปที่	หน้า	
1.1	เปรียบเทียบระหว่างแรงกดกคในสามแกนภายใต้ความดันล้อมรอบ และแรงกด ในสามแกนจริง.....	1
2.1	การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบรูปร่างของตัวอย่างและการติดตั้งอุปกรณ์ ตรวจวัดรอยแตกขนาดเล็ก ลักษณะและทิศทางของแรงที่กระทำบนตัวอย่าง.....	10
2.2	การจำลองชุดรอยแตกในมวลหินด้วยลูกปูน (Sand-lime brick) ขนาดเล็ก โดยแปรผันมุม เอียงของชุดรอยแตกตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา.....	14
3.1	ตัวอย่างหินที่ถูกจัดเตรียมเพื่อทดสอบศักยภาพของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง....	16
3.2	ตัวอย่างหินที่ถูกจัดเตรียมเพื่อทดสอบศักยภาพของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงแบบ บราซิลเลียน.....	17
3.3	หมายเลขกำกับตัวอย่างหินและความหมายที่เกี่ยวข้อง.....	18
4.1	เครื่องกดทดสอบแบบสามแกนจริง.....	20
4.2	คานรับน้ำหนักสำหรับให้ความเค้นด้านข้างต่อตัวอย่างหิน.....	21
4.3	ภาพตัดขวางในทิศทางเหนือ-ใต้ของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง.....	23
4.4	ภาพตัดขวางในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง.....	24
4.5	ภาพตัดขวางด้านบนของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง.....	26
4.6	ส่วนประกอบของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง.....	27
5.1	ทิศทางการให้ความเค้นกับตัวอย่างหินต่อแนวชั้นหิน ตัวแปรค่าความยืดหยุ่นของ ตัวอย่างหินที่มีคุณสมบัติในทิศทางตั้งฉากและขนานกับชั้นหินที่ไม่เท่ากัน.....	30
5.2	ตัวอย่างผลการทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียดในสามทิศทางของ หินทรายสามชนิดภายใต้เครื่อง polyaxial load flame.....	32
5.3	ค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทราย พระวิหาร.....	35
5.4	ค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทรายภูพาน	
5.5	แสดงค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทราย36 ภูกระดึง.....	37
5.6	ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารหลังการทดสอบ.....	38

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb..... 40
5.8	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb..... 41
5.9	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb..... 42
5.10	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook..... 44
5.11	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook..... 45
5.12	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook..... 46
5.13	ตัวอย่างการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ความเค้นกด..... 48
5.14	ผลการทดสอบระหว่างค่าแรงกด (P) และค่าความเค้นหลักกลาง (σ_2) จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน..... 49
5.15	ผลของค่าความเค้นกด (σ_y) และค่าความเค้นดึง (σ_x) ภายใต้ความเค้นกลาง (σ_z) ของหินทราย..... 50
5.16	ผลการทดสอบในรูปวงกลม Mohr ของหินทราย 3 ชนิด..... 51
5.17	ตัวอย่างหินหลังการทดสอบของหินทรายชุดภูกระดึง (บน) หินทรายชุดภูพาน (กลาง) และหินทรายชุดพระวิหาร (ล่าง)..... 52
5.18	Strain gages ที่ติดตั้งบนผิวของตัวอย่างหินเพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัวอย่างหินรับแรงกด ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน..... 53
5.19	ผลของการวัดค่าความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของหิน..... 54
5.20	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^* และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของหินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb..... 56

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

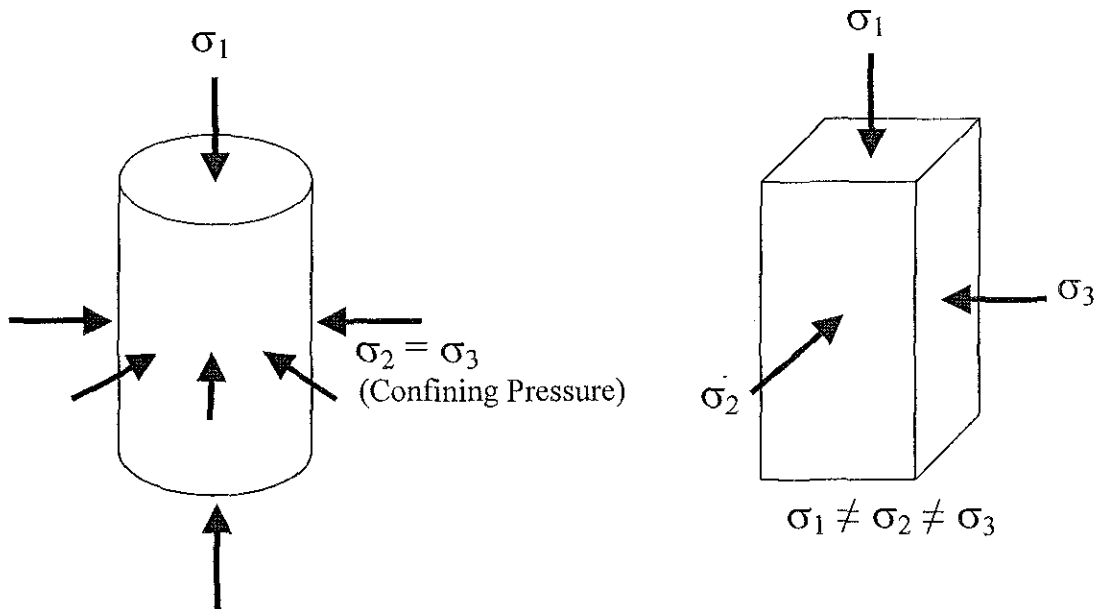
รูปที่	หน้า
5.21 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^{*k} และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของ หินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb.....	57
5.22 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^{*k} และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของ หินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb.....	58
5.23 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^{*k} และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของ หินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook.....	60
5.24 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^{*k} และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของ หินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook.....	61
5.25 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ J_2^{*k} และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของ หินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols & Cook.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมที่สำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจวิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น การทดสอบแรงกดในสามแกน (Triaxial Compression Test – Elliott, 1983; Brook, 1983) สามารถให้ค่ากำลังกดสูงสุดภายใต้ความเค้นล้อมรอบ ค่าความยืดหยุ่น และอัตราส่วนของ Poisson ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบ ลักษณะการทดสอบเช่นนี้ใช้หินรูปทรงกระบอกที่อยู่ภายใต้ความดันล้อมรอบ ($\sigma_2 = \sigma_3$) และมีความเค้นหลักอยู่ในแนวแกน (σ_1) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยที่ความดันล้อมรอบที่กำหนดขึ้นส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวแทนของความเค้นในแนวระนาบในภาคสนาม การทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ได้มีการวิวัฒนาการมาช้านานและเป็นที่ยอมรับใช้ในหลายภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์หินและกลศาสตร์ดิน จนในที่สุดได้มีการตั้งเป็นมาตรฐานสากลโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ส่วนใหญ่จะไม่สอดคล้องกับสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ความเค้นในแกนหลักในสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ (เรียกว่า ความเค้นกดในสามแกนจริง) ดังนั้นผลที่ตรวจวัดได้ เช่น ค่าความเค้นกดสูงสุด ค่ามุมเสียดทานภายในค่าความเค้นยึดเหนี่ยว และค่าความยืดหยุ่นจะแตกต่างจากคุณสมบัติที่แท้จริงของมวลหินในภาคสนามอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหินที่มีความแข็งน้อยและหินที่มีคุณสมบัติขึ้นกับเวลา เช่น เกลือหิน หินโคลน หินดินดาน เป็นต้น ถึงแม้ข้อบกพร่องนี้จะถูกตระหนักถึงโดยนักวิจัยหลายท่านในต่างประเทศ (e.g. Jaeger and Cook, 1979; Goodman, 1980; Farmer, 1980; Comet, 1993; Worotnicki, 1993; Wawersik et al., 1997) แต่การทดสอบโดยการจำลองความเค้นกดในสามแกนจริงจะทำได้ยากและใช้เครื่องมือพิเศษที่ราคาสูงมาก (อยู่ในระดับหลายล้านดอลลาร์) ดังนั้นการทดสอบแบบการกดในสามแกนจริง จึงไม่เป็นที่นิยมและแพร่หลาย อย่างไรก็ตามก็ได้มีนักวิจัยไม่น้อยที่ได้ออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์การกดในสามแกนขึ้น และได้ทำการทดสอบหินในรูปแบบต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับความเค้นจริงในภาคสนาม (e.g. Haimson, 2006; Anhdan et al., 2005; Wang and Lade; 2001; Ismail et al., 2005; Tiwari and Rao, 2006; Haimson and Chang, 2000) เครื่องมือที่นักวิจัยเหล่านี้พัฒนาขึ้นนอกจากจะมีราคาสูงมากแล้วยังมีความซับซ้อนในการใช้และยากต่อการแปลข้อมูลที่ได้ออกมาแล้วข้อเสียของเครื่องกดในสามแกนจริงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 1) มีราคาสูง 2) มีความซับซ้อนในการใช้ 3) ไม่สามารถทดสอบการเคลื่อนไหลของหินได้อย่างต่อเนื่อง 4) ใช้พลังงานไฟฟ้ามากเพื่อที่จะควบคุมแรงกดให้คงที่ (Servo-Control) และ (5) ยากที่จะรักษาระดับของแรงให้คงที่อย่างแท้จริงในช่วงเวลาการทดสอบที่ต้องการความเค้นคงที่ในด้านข้าง



รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบระหว่างแรงกดกดในสามแกนภายใต้ความดันล้อมรอบ (ซ้าย) และแรงกดในสามแกนจริง (ขวา)

ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทยที่จะประดิษฐ์เครื่องทดสอบในสามแกนจริงที่มีราคาถูก และสามารถใช้งานได้แพร่หลายในทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนั้นเครื่องที่จะประดิษฐ์ขึ้นจะต้องมีขีดความสามารถทัดเทียมหรือดีกว่าเครื่องทดสอบในสามแกนจริงที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ ข้อได้เปรียบที่คิดว่าจะรวมไปถึง ความง่ายในการใช้เครื่องมือและแปลผลการทดสอบ เครื่องมือต้องให้แรงกดที่คงที่อย่างแท้จริงเป็นระยะเวลานาน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบ การเคลื่อนไหลของหินได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อประดิษฐ์เครื่องทดสอบหิน เพื่อใช้จำลองความเค้นกดในสามแกนจริง (True Triaxial Loading หรือบางที่เรียกว่า Poly-axial Loading) โดยใช้แนวคิดใหม่สำหรับกลไกการกด เพื่อให้มีราคาถูก แม่นยำ และมีความสอดคล้องกับสถานะความเค้นจริงในภาคสนามซึ่งจะทำให้ดีกว่าเครื่องปัจจุบันที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ

2) สามารถนำมาประยุกต์ใช้และถูกยอมรับในวงกว้างในหน่วยงานภาครัฐและเอกชน ที่มีกิจกรรมเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน อุโมงค์ ตัดถนน ฐานราก และเหมืองบนดินและใต้ดิน เป็นต้น ผลที่ได้จากการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นนวัตกรรมใหม่แล้วยังเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบหินในเชิงสร้างสรรค์โดยมีความสามารถในการกดด้วยแรงและทิศทางที่สมบูรณ์ในสามแกนจริง

3) สามารถจำลองสถานะจริงของหินที่อยู่ในภาคสนามได้อย่างหลากหลาย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์เครื่องทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินในความเค้นสามแกนจริง เพื่อใช้ในห้วงปฏิบัติการ
- 2) ขนาดของตัวอย่างหินต้นแปรจาก $5 \times 5 \times 10$ ซม. ถึง $10 \times 10 \times 20$ ซม.
- 3) เครื่องทดสอบดังกล่าวจะใช้กลไกเชิงกลศาสตร์เพื่อให้ความเค้นที่คงที่ในระดับต่าง ๆ โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าและระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
- 4) เครื่องทดสอบในสามแกนจริงจะให้แรงกดสูงสุดในด้านข้างไม่ต่ำกว่า 13 MPa และในด้านบนถึง 70 MPa
- 5) เครื่องทดสอบในสามแกนจริงจะสามารถทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินได้ครบถ้วน เช่น ความยืดหยุ่น มุมเสียดทานภายใน ความเค้นยึดเหนี่ยว ค่าแรงกดสูงสุด มุมเสียดทานของรอยแตก ค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตก ค่าอัตราส่วนของ Poisson's ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น และค่าความหนืดเชิงพลาสติก เป็นต้น

6) เครื่องทดสอบในสามแกนจริง สามารถให้รูปแบบการทดสอบได้หลากหลาย เช่น การกดในแกนเดียว การกดในสองแกน การกดในสามแกน การหาค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกน การทดสอบการเคลื่อนไหล (Creep) ในแกนเดียวและในสามแกน การทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะรูปวงกลม การทดสอบการเปลี่ยนรูปร่างของหลุมเจาะ การทดสอบหาคุณสมบัติแบบ Anisotropy และการทดสอบหาผลกระทบของความเค้นกลาง (σ_2) เป็นต้น

7) ในการออกแบบเครื่องทดสอบในสามแกนจริงจะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย (Computer Aided Design - ACAD) ในทุกองค์ประกอบของเครื่องมือ

8) จะมีการสาธิตความสามารถและประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง โดยมีการทดสอบตัวอย่างหินและมีรูปแบบของการทดสอบอย่างน้อย 2 รูปแบบ ที่มีขนาด ทิศทาง และเป้าหมายที่ต่างกัน

9) หินที่เลือกมาเป็นตัวอย่างทดสอบจะมีอย่างน้อย 3 ชนิด ที่มีความหลากหลายในเชิงคุณสมบัติกลศาสตร์

10) จะมีการจดสิทธิบัตรเครื่องมือ วิธีการใช้ และวิธีการประมวลผล

11) จะมีการเผยแพร่เทคโนโลยีโดยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะแบ่งการค้นคว้าและศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ซึ่งจะประกอบไปด้วย เครื่องมือ วิธีการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน และในสามแกนจริง โดยทุกประเด็นจะนำมาศึกษาและค้นคว้าหาข้อสรุปเพื่อที่จะได้รู้ว่าการวิจัยที่คล้ายคลึงกันจะมีประโยชน์อย่างไรต่องานวิจัยที่นำมาเสนอ โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้จะนำมาแสดงอย่างละเอียดในรายงานขั้นสุดท้าย ส่วนรายงานของเอกสารอ้างอิงที่สมบูรณ์จะเขียนในรูปแบบของบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบและประดิษฐ์ระบบกลไกการทำงานเครื่องกดในสามแกนจริง

เครื่องทดสอบในสามแกนมีส่วนประกอบหลักต่าง ๆ คือ โครงรับแรงกด (Frame) แผ่นกดตัวอย่างหินในแต่ละทิศทาง ชุดคานกด แผ่นน้ำหนัก มาตรวัดการเคลื่อนตัว (dial gages) โดยการออกแบบจะใช้โปรแกรมสร้างแบบทางคอมพิวเตอร์ (CAD – Computer Aided Design) สร้างเป็นแบบขึ้นมา ทุกชิ้นส่วนจะต้องคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

ข้อกำหนด (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ

- สามารถรับแรงกดสูงสุดด้านบน (σ_1) ไม่ต่ำกว่า 70 MPa (สำหรับหินหน้าตัด 10×10 ซม.)
- สามารถรับแรงกดสูงสุดด้านข้าง (σ_2, σ_3) ไม่ต่ำกว่า 13 MPa (สำหรับหินหน้าตัด 5×10 ซม.)
- สามารถตรวจการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินได้ทั้ง 3 ทิศทาง
- สามารถให้แรงกดในรูปแบบ 1, 2, และ 3 แกนได้ (Uniaxial, Biaxial, and Triaxial)
- วัสดุทำจากเหล็กแข็งที่ไม่มีการชุบตัวที่แรงกดสูง
- สามารถให้แรงกดคงที่ในระดับต่าง ๆ ได้โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าและระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
- สามารถทดสอบหินตัวอย่างขนาดตั้งแต่ $5 \times 5 \times 10$ ซม. ถึง $10 \times 10 \times 20$ ซม.

ขั้นตอนที่ 3 สร้างเครื่องกดในสามแกนจริงตามที่ออกแบบ

เมื่อดำเนินการออกแบบแล้วเสร็จ จะนำมาสร้างเป็นเครื่องกดทดสอบต้นแบบ ตามข้อกำหนดทั้งหมดในขั้นตอนที่ 3 ที่ห้องปฏิบัติการ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิศวกรเป็นผู้ดูแลและควบคุมการสร้างอย่างถูกต้อง แม่นยำ และปลอดภัย

ขั้นตอนที่ 4 การสอบเทียบเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง

เครื่องกดทดสอบในสามแกนที่ประดิษฐ์ขึ้นจะนำมาดำเนินการสอบเทียบ (Calibration) โดยใช้เครื่องตรวจวัดแรงกด (Load cell) ที่มีความละเอียดสูงตรวจวัดแรงกดทั้ง 3 แกนเพื่อให้ได้ค่าแรงกดที่ถูกต้องและแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 5 การเก็บตัวอย่างหินในภาคสนาม และจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ผู้วิจัยจะดำเนินการเก็บหินตัวอย่างจากภาคสนามเพื่อนำมาทดสอบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของเครื่องและเพื่อสาธิตว่าเครื่องสามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม หินตัวอย่างจะถูกเลือกมาใช้ในการทดสอบแบบต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด (Homogeneous) หินที่จะเก็บมาเป็นตัวอย่างคือ หินทรายชุดโคราช หินตัวอย่างจะถูกนำมาเจาะและตัดให้ผิวเรียบในห้องทดลองที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดลองแต่ละชนิด โดยมีขนาดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาดระหว่าง $5 \times 5 \times 10$ ซม. ถึง $10 \times 10 \times 20$ ซม. การจัดเตรียมหินตัวอย่างจะอาศัยมาตรฐานที่มีอยู่ของ ASTM Standards หินตัวอย่างที่เตรียมได้เหล่านี้จะนำมาทดสอบในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาขีดความสามารถเครื่องทดสอบหิน ในสามแกนจริง

การทดลองขั้นสูงในห้องปฏิบัติการจะประกอบด้วย การทดสอบหลายชุด และจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM Standards

การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบของค่าความเค้นกลาง (σ_2) ที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_1) ความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ค่าอัตราส่วนของ Poisson's ค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) และค่าความเค้นยึดเหนี่ยว (Cohesion) หินตัวอย่างจะถูกทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง โดยจะกดทดสอบด้วยแรงกดอัตราความเร็วคงที่ (Constant loading rate) ตามแนวแกน

กำหนดให้ค่าความเค้นต่ำสุด (σ_3) มีค่าคงที่ และมีการผันแปรค่าความเค้นกลาง (σ_2) ตั้งแต่เท่ากับค่าความเค้นต่ำสุดจนไปถึง 0.5 เท่าของค่าความเค้นสูงสุด มีการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gages) เพื่อวัดการเคลื่อนตัวแต่ละทิศทาง โดยใช้ความละเอียดถึง 0.0254 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 จะนำมาตรวจสอบทางด้านความเชื่อถือได้ (Reliability) ของข้อมูลและจะตรวจสอบทางด้านความสัมพันธ์ทางสถิติ เมื่อตรวจสอบได้แล้วจะนำมาคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในแต่ละชนิดการทดสอบ และนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่เคยได้ทดสอบไว้แล้ว โดยผู้วิจัยเอง การวิเคราะห์จะเน้นไปที่ประสิทธิภาพ ขีดความสามารถ และความแม่นยำของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง

ขั้นตอนที่ 8 การเขียนคู่มือการใช้งาน

จะมีการเขียนคู่มือการใช้งานเครื่องทดสอบในสามแกนจริงอย่างละเอียด ซึ่งรวมไปถึง ส่วน ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องทดสอบ ความสามารถ ข้อจำกัด ขั้นตอนวิธีการทดสอบ วิธีการประมวลผล การคำนวณ รวมไปถึงฐานข้อมูลของผลการทดสอบที่ได้ทดสอบไปแล้วทั้งในและต่างประเทศ

ขั้นตอนที่ 9 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.5 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1) แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

เครื่องกวดทดสอบใน 3 แกนจริงที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเมื่อเทียบกับเครื่องกวดที่ขายตามท้องตลาดด้วยราคาที่เท่ากัน เครื่องที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่นี้จะมีความแม่นยำกว่า ทำให้หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหรือสนใจสามารถมีเป็นเจ้าของเพื่อใช้ในการทดสอบได้โดยง่ายและสิ้นเปลืองงบประมาณน้อยกว่า

2) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เครื่องกวดทดสอบใน 3 แกนจริงที่ประดิษฐ์ขึ้นมาในงานวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือหลักในการทดสอบหินในหลายรูปแบบ โดยมีปัจจัยของ σ_2 เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับความเค้นจริงในภาคสนาม และจะเป็นเครื่องแรกในประเทศไทย

3) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของเครื่องกวดทดสอบใน 3 แกนจริง จะมีการจัดอบรมหลักสูตรระยะสั้น เพื่อเผยแพร่หลักการ วิธีการใช้งาน และการนำไปประยุกต์กับการทดสอบแบบต่างๆ รวมถึงหน่วยงานราชการ เช่น กรมชลประทาน กรมทางหลวง กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมถึงบริษัทน้ำมันทั้งในและต่างประเทศ และสถาบันการศึกษาที่มีความสนใจในด้านกลศาสตร์หิน เช่น สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่จะสามารถนำเครื่องมือนี้ไปใช้ในหน่วยงานเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไปอย่างเป็นรูปธรรม

4) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เผยแพร่หลักการ วิธีการทดสอบหินด้วยเครื่องกวดทดสอบใน 3 แกนจริงที่ประดิษฐ์ขึ้นมา รวมถึงการนำไปใช้ประยุกต์ร่วมกับการทดสอบอื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบของ σ_2 ซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับความเค้นในภาคสนาม รวมถึงการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น หน่วยงานที่สามารถผลการทดสอบไปใช้ประโยชน์ได้จริง ได้แก่ บริษัทน้ำมัน และบริษัทที่ปรึกษาด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมต่างๆ

5) นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

เครื่องกวดทดสอบ 3 ในแกนจริงที่จะถูกประดิษฐ์ขึ้นจะนำไปสู่การจดสิทธิบัตรและจำหน่ายให้หน่วยงานต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นเพื่อนำไปใช้เป็นประโยชน์และสามารถจำหน่ายแก่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศได้

1.6 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมปิโตรเลียม และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) หน่วยงานภาคเอกชน อาทิ ผู้ประกอบการด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมปิโตรเลียม

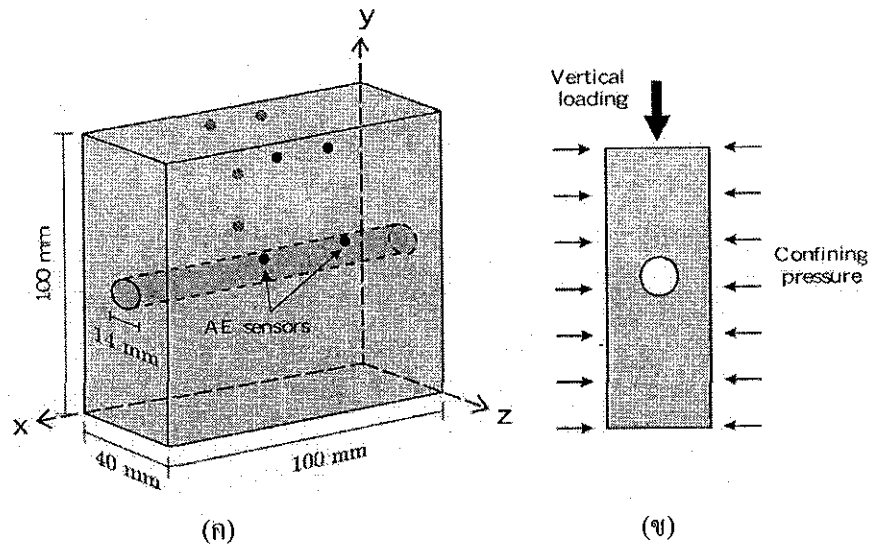
บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

ข้อได้เปรียบของเครื่องทดสอบหินในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) เมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบในสามแกน ($\sigma_1, \sigma_2 \neq \sigma_3$) ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5 พร้อมทั้งเอกสารอ้างอิงยืนยันในหัวข้อนี้จะสรุปผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของรูปแบบการทดสอบที่เป็นจุดเด่นของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง งานวิจัยต่อไปนี้เป็นงานวิจัยบางชิ้นที่ดำเนินการโดยนักวิจัยในต่างประเทศในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา สำหรับในเมืองไทยยังไม่มีหน่วยงานใดที่มีหรือเสนอผลงานจากเครื่องทดสอบหินในสามแกนจริง

Fakhimi et al. (2002) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างหินทราย (ขนาด $40 \times 100 \times 100$ มม.) ที่เจาะรูจนทะลุโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร โดยให้ความเค้นใน 2 ทิศทาง (รูปที่ 2.1) แรงดันด้านข้างมีขนาดเท่ากับ 7.5 MPa เพื่อจำลองพฤติกรรมของการวิบัติของหินรอบอุโมงค์ที่หินมีคุณสมบัติเป็นหินเปราะ (Brittle rock) ในการทดสอบได้มีการบันทึกขนาดของแรงกดในแนวแกนและการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินทั้งในแนวแกนและด้านข้างจนเกิดการวิบัติ และได้มีการตรวจหารอยแตกขนาดเล็ก (microcrack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหินด้วยเทคนิคคลื่นเสียง (acoustic emission technique) ด้วย ผลที่ได้ระบุว่ารอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างของอุโมงค์และแพร่กระจายทำมุมเฉียงออกไปทั้งสองข้าง ซึ่งรอยแตกขนาดเล็กนี้จะรวมตัวกันเป็นรอยแตกแบบเฉือน (Shear fracture) ในที่สุด และมีการเคลื่อนตัวของหินบริเวณผนังด้านข้างของอุโมงค์เข้ามาในอุโมงค์ด้วย ทั้งนี้ผู้คณะวิจัยได้มีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม Particle Flow Code (PFC^{2D}) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของหินและการวิบัติรอบอุโมงค์แบบจำลองดังกล่าวสร้างจาก Element รูปวงกลมขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งคุณสมบัติของหินด้านของความแข็ง ความยืดหยุ่นของหินอาศัยแรงเสียดทานและแรงดึงดูดระหว่าง Element ค่าคงที่สำหรับใส่ให้กับโปรแกรมได้แก่ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น อัตราส่วนของ Poisson และ ความเค้นสูงสุดในการกดแกนเดียว ได้จากการสอบเทียบจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้ผลที่สอดคล้องกันกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Alsayed (2002) ได้สร้างตัวอย่างหินในรูปของทรงกระบอกกลางซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบในการจำลองสถานะความเค้นที่อยู่รอบ ๆ อุโมงค์ใต้ดินเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของวัสดุทางธรณีที่อยู่ภายใต้การผันแปรแนวความเค้น ตัวอย่างหินในรูปของทรงกระบอกกลางได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทดสอบ Conventional Triaxial Cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Hoek และ Franklin ในปี 1968 และส่วนประกอบของ



รูปที่ 2.1 การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ (ก) รูปร่างของตัวอย่างและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรอยแตกขนาดเล็ก (ข) ลักษณะและทิศทางของแรงที่กระทำบนตัวอย่าง (ดัดแปลงมาจาก Fakhimi et al., 2002)

Internal pressure loading ที่ถูกออกแบบเป็นพิเศษ ตัวอย่างหินทรายที่ Springwell ภายใต้การทดสอบ Uniaxial, biaxial, triaxial, และ polyaxial compression ซึ่งดีพอ ๆ กันกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม ผลลัพธ์ยืนยันถึงผลกระทบของ σ_2 ของหินที่แตกและแสดงให้เห็นสภาวะความเค้นที่กำหนดอันส่งผลกระทบกับความแข็งของหิน เครื่องมือนี้มีเป้าหมายเพื่อที่จะช่วยสร้างระบบทั่วไปในการทดสอบหลายแกนซึ่งมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงในการทำนายพฤติกรรมที่แท้จริงของหินและเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

Tiwari and Rao (2006) ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพในการทดสอบการกด 3 แกน และการกดทดสอบใน 3 แกนจริงของมวลหินที่จะถูกนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้น ตัวอย่างหินประกอบด้วยรอยแตกที่ต่อเนื่องจำนวน 3 ชุดและได้เตรียมมาจาก block ของแบบจำลองวัสดุ sand lime การทดสอบได้ทำโดยใช้ระบบกดทดสอบใน 3 แกนจริง (TTS) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (strain hardening) ความเครียดที่ลดลง (strain softening) และพฤติกรรมเชิงพลาสติกของมวลหินที่ถูกจำลองที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างเชิงเรขาคณิตของรอยแตกและสภาวะความเค้น

Sibai et. al. (1997) กล่าวว่าในการทดสอบทั่วไปการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่ได้ออกจากการทดสอบไฮดรอลิกแฟรคเจอร์ริง (hydraulic fracturing test) เพื่อนำไปหาความดันที่จุดแตก (breakdown pressure, P_c) ความดันเพื่อขยายรอยแตก (Fracture reopening pressure, P_r) และความดันที่จุดปิด (Shut-in pressure, P_s) ซึ่งค่าความดันทั้ง 3 ค่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเค้นในที่ (In situ stress) อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องกดทดสอบแบบสามแกนจริงกับตัวอย่างหินแกรนิต ($E = 60 \text{ GPa}$, $\nu = 0.17$, $0.1\% \text{ porosity}$, $\sigma_1 = 4 \text{ MPa}$) ขนาด $50 \times 50 \times 50$ เซนติเมตรและติดตั้งเครื่องวัดความดัน (Straddle packer) ในรูที่เจาะไว้ในแท่งตัวอย่างหินซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ LVDT เข้ากับPacker เพื่อวัดการหดตัวของรูเจาะและความกว้างของรอยแตกในขณะที่กำลังทดสอบอัดความดัน (Pressurized test) และ Closure test ในการทดสอบได้แปรผันค่าความดันด้านข้าง และมีการบันทึกค่าความดันจาก Packer ระยะห่างระหว่าง Packer ช่วงของความดันที่ใช้ในการทดสอบ และอัตราการไหลตลอดการทดสอบ ผลสรุปของการศึกษานี้คือ ความดันเพื่อขยายรอยแตกที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการ ค่าความดันทั้ง 3 ค่าที่กล่าวในข้างต้นมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหิน และผลจากการทดสอบพบว่าความเค้นรอบรูเจาะมีความสอดคล้องกับที่คำนวณได้จากสมการของ Kirsch (Kirsch solution)

Alexeev et al. (2004) ศึกษาเครื่องมือกดในสามแกนจริงและการนำไปใช้ทำนายการระเบิดออกของถ่านหิน ซึ่งเครื่องมือกดในสามแกนจริง (True triaxial loading, TTAL) มี 2 รุ่นคือ เครื่องมือรุ่นแรกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบความเค้นในสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหิน เครื่องมือใน

รุ่นที่สองได้มีการพัฒนาให้สามารถตรวจวัดความเค้น ได้แม่นยำขึ้นและสามารถจำลองการระเบิดออกของหินอย่างทันทีทันใดได้ เครื่องมือทั้งสองรุ่นนี้สามารถเพิ่มความดันได้ 250 MPa ในสามแกน อย่างเป็นอิสระ สอดคล้องกับความลึกใต้พื้น โลกประมาณ 10,000 เมตร ผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงความสามารถการดูดซึมน้ำและอิทธิพลของมีเทนในด้านหินมีผลกระทบต่อ การจำลองการระเบิดออกของด้านหิน

Chang และ Haimson (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกของหินภายใต้ ความดันในสามแกนจริง โดยทำการทดสอบค่าความแข็งของหินฮอร์นเฟล และหินเมตาพีไรต์ ที่ ความลึก 2,025 ถึง 2,996 เมตร ของแนวเทือกเขาแคลเคอร์ลาในรัฐแคลิฟอร์เนียประเทศ สหรัฐอเมริกา หินทั้งสองชนิดมีลักษณะแบบชั้น (banded) และมีค่าความซึมผ่านต่ำมาก การทดสอบ ความต้านทานแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression tests) โดยให้แนวการวางตัวของลักษณะ แบบชั้นของหินแตกต่างกันผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหินฮอร์นเฟลมีค่าความแข็งเท่ากันในทุกทิศทาง (isotropic) และหินเมตาพีไรต์มีความไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (anisotropic) การทดสอบความต้านทาน แรงกดในสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial compression tests) แสดงให้เห็นว่าความแข็ง ของหินทั้งสองชนิดในแต่ละแนวการวางตัวของลักษณะแบบชั้นเพิ่มขึ้นอย่างค่อนข้างเป็นเส้นตรงต่อ ความดันโดยรอบ การทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริง (True triaxial compression tests) ตัวอย่างที่นำทดสอบมีมุมแนวการวางตัวของลักษณะแบบชั้นคงที่ และค่าความเค้นหลัก (σ_1) ความเค้นกลาง (σ_2) และ ความเค้นรอง (σ_3) มีค่าแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มค่า σ_1 อย่างต่อเนื่องจนหิน ตัวอย่างแตก ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่แตกต่างกันของหินสองชนิดภายใต้สภาวะการ ทดสอบเดียวกัน และค่า σ_3 จะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของหินเมื่อไม่ค่านิ่งถึงค่า σ_2 การวัดค่า ความเครียด (strain) ในแนวแรงกดทั้งสามแกนนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ต่อค่า σ_1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่ในเชิงเส้นตรง

Song และ Haimson (1997) ได้จำลองหลุมเจาะขึ้นมาในตัวอย่างหินทรายและ หินแกรนิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการแตกของหินในหลุมเจาะ (Borehole breakout) และความเค้น โดยใช้เครื่องกดทดสอบแรงกดในสามแกนจริง โดยใช้การสันนิษฐานที่ว่า สภาวะความเค้นที่ขอบเขตรอยแตกของผนังหลุมเจาะมีค่าความแข็งที่เท่ากัน กฎเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ไม่สามารถนำมาใช้ได้ในการพิจารณาการแตกของหลุมเจาะ ซึ่งกฎเกณฑ์ของแรงกดใน สามแกนจริงใช้ได้ดีกว่าเนื่องจากผลของ σ_2 มีความเหมาะสมต่อขอบเขตของการแตก เช่น กฎเกณฑ์ ของ Nadai (1) ใช้สำหรับหินทราย และ Mogi (2) ใช้สำหรับหินแกรนิต

$$\tau_{oct} = f_1(\sigma_{oct}) \quad (1)$$

เมื่อ $\tau_{\infty} = \frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}}$ และ

$$\sigma_{\infty} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

โดยที่ f_1 คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ

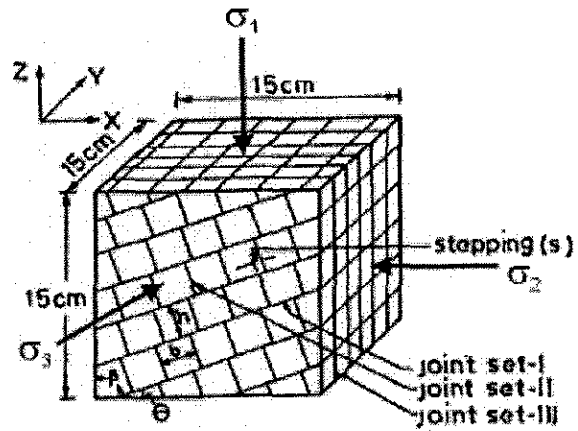
$$\tau_{\text{oct}} = f_2(\sigma_2^m) \quad (2)$$

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

โดยที่ f_2 คือ ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นทางคณิตศาสตร์ขึ้นกับชนิดหิน และ m คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของหิน การวิเคราะห์แผ่นหินบาง (thin section) มีบทบาทสำคัญต่อกลไกทางกลศาสตร์ของการแตก และค่าความแข็งขึ้นกับชนิดหิน

Wawersik et al (1997) ได้ทำการทดสอบเชิงกลศาสตร์ภายใต้สภาวะความเค้นปกติและ arbitrary stress path ซึ่งมีความสำคัญในการเข้าใจพฤติกรรมของหิน และระบบทางธรณีวิทยาที่ซับซ้อน การทดสอบเชิงกลศาสตร์ภายใต้สภาวะความเค้นจริงในสามมิติ มีความจำเป็นเพื่อที่จะประเมินสมมติฐาน และพัฒนาทฤษฎีสำหรับปรากฏการณ์อย่างเช่น ความเครียดเฉือน (shear-strain) ของรอยเลื่อนทางธรณี ผลที่ได้นำไปสู่ความสัมพันธ์ของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริงที่ไปใช้เปรียบเทียบกับทดสอบความต้านทานแรงกดแบบดั้งเดิม และข้อดีที่พบในเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในสามแกนจริงที่สามารถรับความเค้นรอบข้างที่แตกต่างกันทั้งสามทิศทางได้ และที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous)

Tiwari and Rao (2004) ได้ศึกษาพฤติกรรมของมวลหินภายใต้ความเค้นสามแกนจริง โดยการนำเอาก้อนอิฐบล็อกหรือลูกปูน (Sand-lime brick) ขนาดเล็ก ($\sigma_c = 13.5$ MPa) มาเรียงกันให้เป็นแท่งตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากับ 15 เซนติเมตรเพื่อจำลองเสมือนว่าเป็นมวลหินจริง ตัวอย่างถูกสร้างขึ้นมาให้มีมุมเอียงของระนาบรอยแตก (รอยแตกชุดที่ 1) ซึ่งวัดเทียบกับแนวระนาบผันแปรตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา (รูปที่ 2.2) โดยเครื่องทดสอบสามแกนจริงที่ใช้ถูกสร้างโดย Rao and Tiwari (2002) ผลการทดสอบระบุว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุด (309.2%) เมื่อระนาบของรอยแตกเอียง 60 องศา ($\theta = 60^\circ$) และต่ำสุด (24.2%) เมื่อระนาบเอียงทำมุม 90 องศา ($\theta = 90^\circ$) จากการเพิ่มขนาดของความเค้นกลาง (σ_2) ในทิศทางของการเอียงตัวของระนาบรอยแตกชุดที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (E_p) และกำลังต้านทานแรงกดในแกนหลักเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างส่วนมากจะมีการวิบัติในรูปแบบของการเคลื่อนตัวผ่านระนาบรอยแตกที่จำลองขึ้น ส่วนผลกระทบจากการจัดเรียงลูกปูนในรูปแบบอื่น (เพื่อจำลองการเกิดการยึดเหนี่ยวในรูปแบบที่ต่างกัน) และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของความเค้นกลางและความเค้นรองต่อความแข็งนั้นยังมีการศึกษาน้อยและยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด



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

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

รูปที่ 2.2 การจำลองชุดรอยแตกในมวลหินด้วยลูกปูน (Sand-lime brick) ขนาดเล็ก โดยแปรผันมุมเอียงของชุดรอยแตกตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา (ดัดแปลงมาจาก Tiwari and Rao, 2004)

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 ตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินจากภาคสนามถูกจัดเก็บและจัดเตรียมเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงและเพื่อสาธิตว่าเครื่องดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างเป็นรูปธรรมตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด ซึ่งจะมีการคัดเลือกตัวอย่างหินให้เหมาะสมกับการทดสอบแบบต่างๆ โดยอาศัยหลักการคือ หินจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด (Homogeneous) ตัวอย่างหินที่เก็บมาใช้ในการทดสอบคือหินทรายชุดโคราช แบ่งเป็นสามชนิด คือ 1) ชุดพระวิหาร 2) ชุดภูพาน และ 3) ชุดภูกระดึง

3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

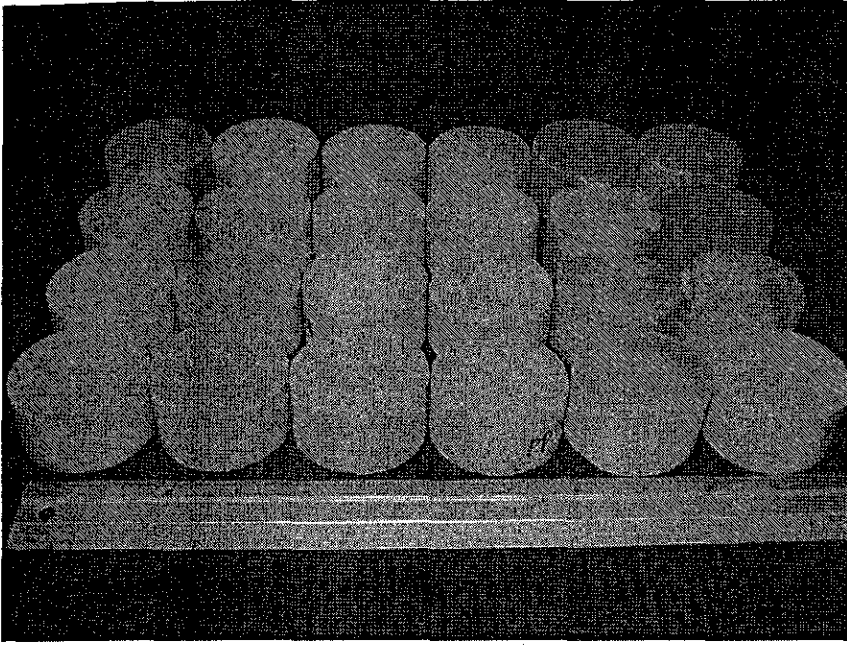
ในการทดสอบจะเลือกใช้หินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน ชุดพระวิหาร และชุดภูกระดึง (รูปที่ 3.1) โดยจะเลือกหินทรายที่มีแร่ควอตซ์เป็นส่วนประกอบหลักเพราะมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง มีความหนาแน่นและมีความแข็งสูง มีขนาดของเม็ดผลึกประมาณ 0.1–1.0 มิลลิเมตร สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สำหรับการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงจะนำตัวอย่างหินทรายมาตัดให้มีผิวเรียบและมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $5 \times 5 \times 10$ เซนติเมตร โดยความขนานกันและความตั้งฉากกันจะเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM (D4543) ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ทดสอบจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีแนวการวางตัวของชั้นหินขนานกับแนวแกนยาวของแท่งตัวอย่างและขนานกับทิศทางของค่าความเค้นหลัก (σ_1) อัตราส่วนของค่าความยาวต่อความกว้างจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและแรงกดสูงสุดในสามแกน ส่วนการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนจะใช้ตัวอย่างหินทรายที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2) มีอัตราส่วนของค่าความยาวต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 ตามมาตรฐาน ASTM (3967-95) และจะเลือกใช้ตัวอย่างหินที่มีแนวการวางตัวของชั้นหินที่มีทิศทางตั้งฉากกับแกนของแท่งตัวอย่างหิน

3.3 การกำหนดหมายเลขกำกับตัวอย่างหิน

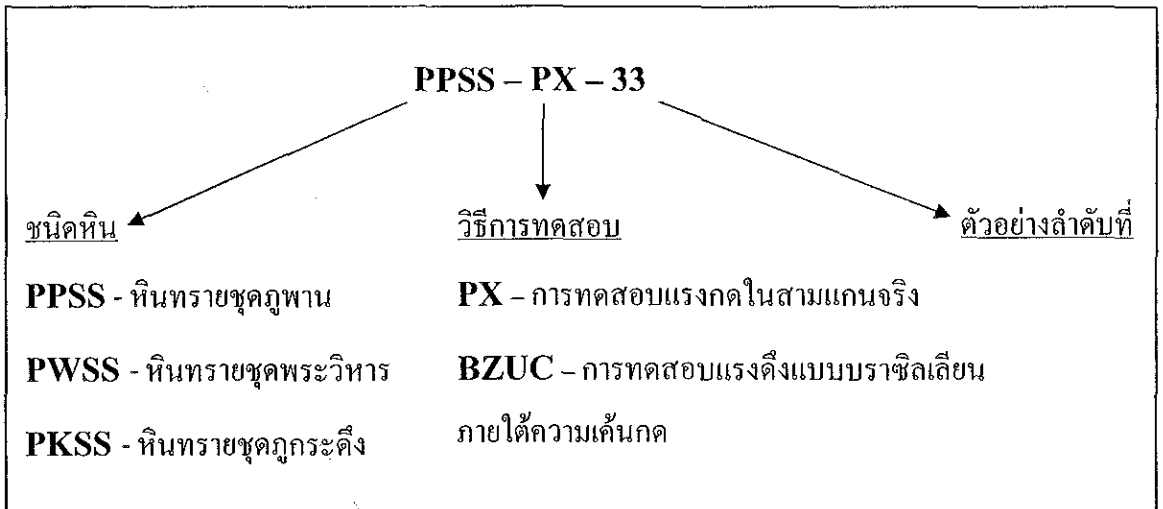
ในการทดสอบต้องใช้ตัวอย่างหิน 3 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีตัวอย่างหินจำนวนหลายก้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดหมายเลขกำกับตัวอย่างหินเพื่อความถูกต้องในการทดสอบในแต่ละสถานะความเค้นที่แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่างหิน หมายเลขของตัวอย่างหินจะบอกถึงชนิดของหินที่ทำการทดสอบ (รูปที่ 3.3) วิธีการทดสอบและจำนวนของตัวอย่างหินที่ทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินที่ถูกจัดเตรียมเพื่อทดสอบศักยภาพของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง ซึ่งประกอบด้วย หินทรายชุดภูกระดึง (ซ้าย) หินทรายชุดภูพาน (กลาง) และหินทรายชุดพระวิหาร (ขวา)



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินที่ถูกจัดเตรียมเพื่อทดสอบศักยภาพของเครื่องทดสอบในสามแกนจริงแบบบราซิลเลียน



รูปที่ 3.3 หมายเลขกำกับตัวอย่างหินและความหมายที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 4

เครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง

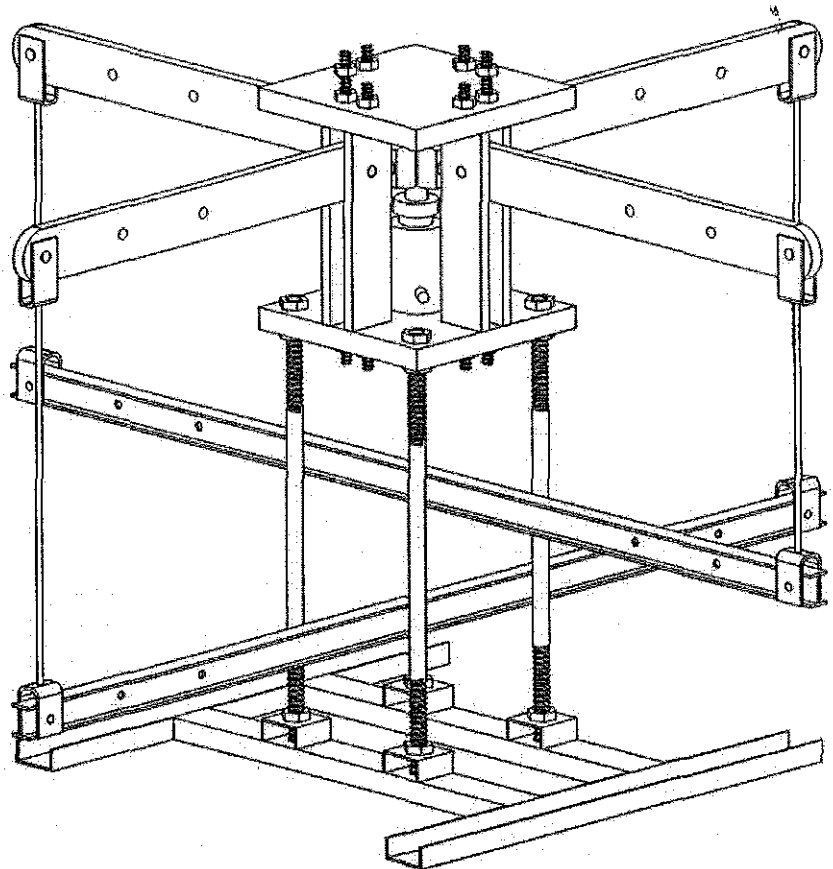
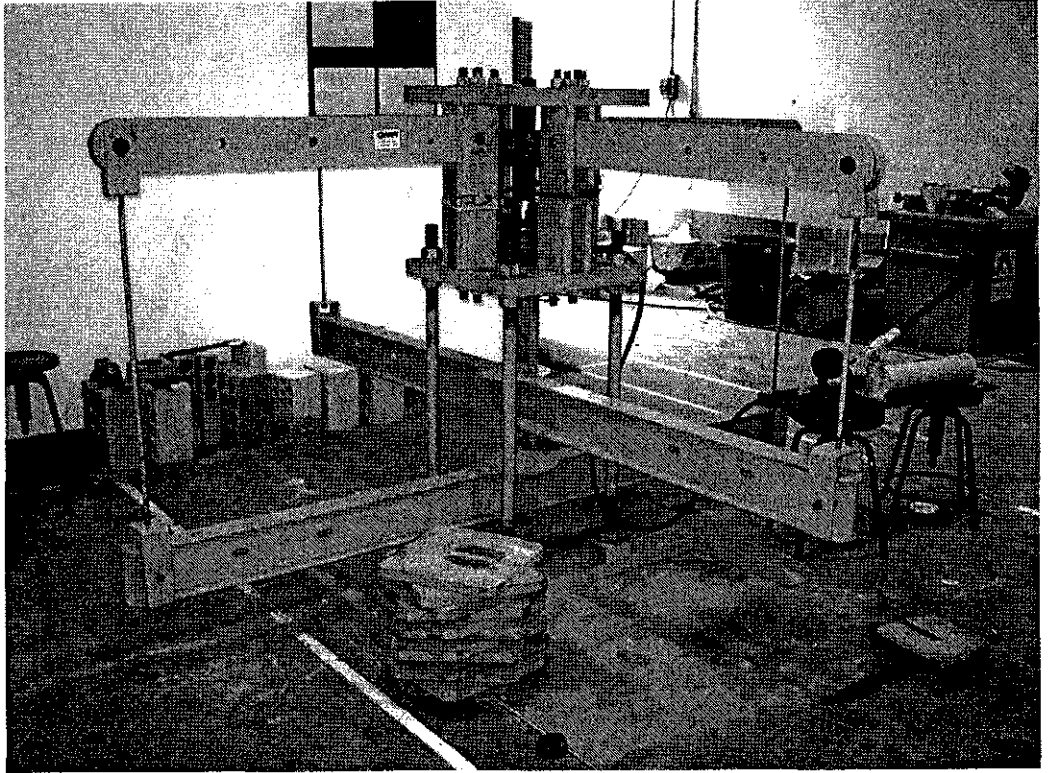
4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ การประดิษฐ์เครื่องกดทดสอบหิน เพื่อใช้ทดสอบหิน ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง (True Triaxial Loading หรือเรียกว่า Poly-axial Loading) โดยใช้แนวคิดใหม่สำหรับกลไกการกด เพื่อลดต้นทุนการผลิตเครื่องกดทดสอบให้มีราคาถูกลง มีความแม่นยำสูง มีความสอดคล้องกับสภาวะความเค้นจริงในภาคสนาม และมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องปัจจุบันที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่มีกิจกรรมเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน อุโมงค์ ตัดถนน ฐานราก เหมืองบนดิน และได้ดิน เป็นต้น ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ นอกจากจะเป็นนวัตกรรมใหม่และเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบหินในเชิงสร้างสรรค์โดยมีความสามารถในการกดด้วยแรงและทิศทางที่สมบูรณ์ในสามแกนจริงแล้วยังส่งผลให้สามารถจำลองสภาวะจริงของหินที่อยู่ในภาคสนามได้อย่างหลากหลาย

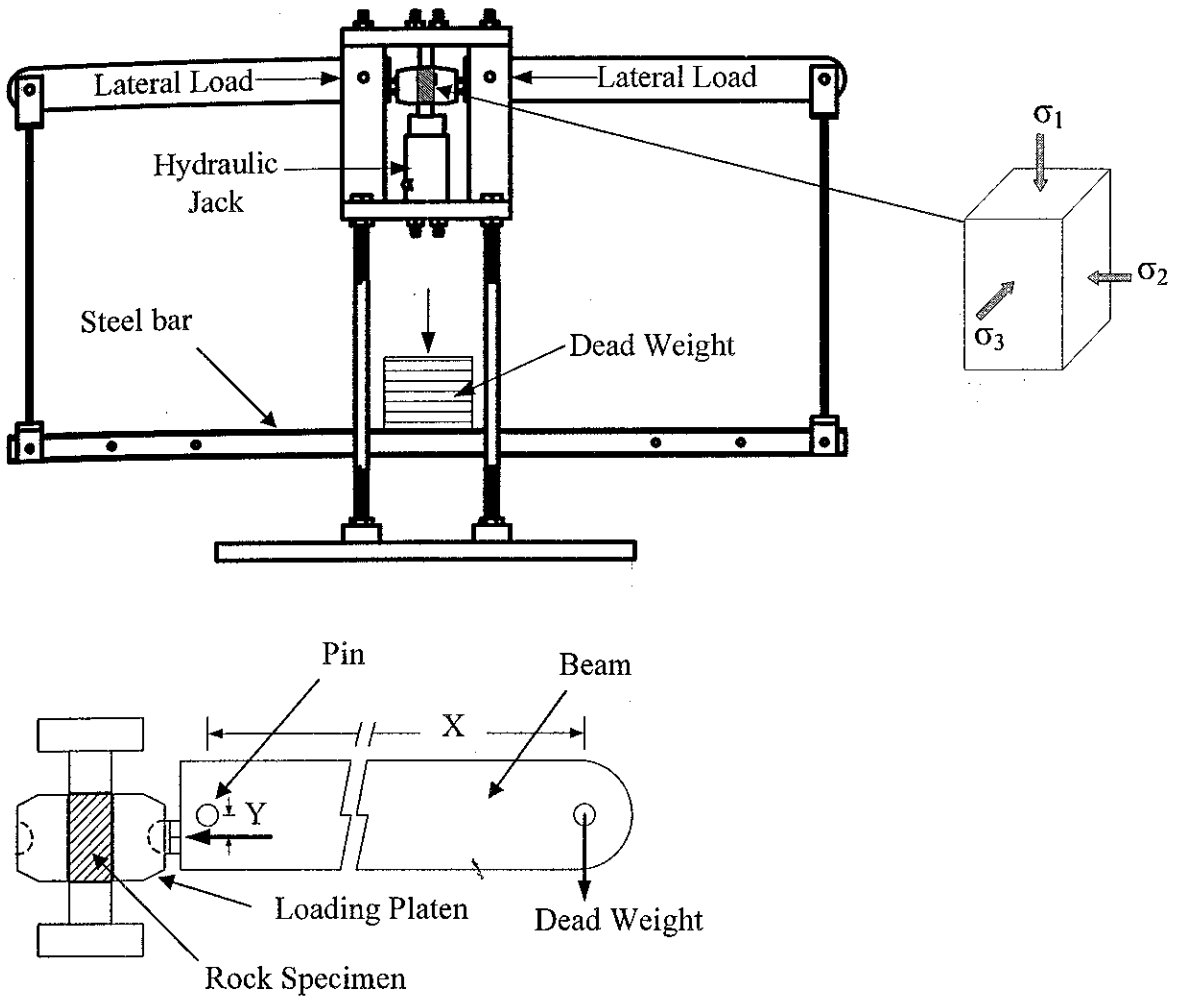
4.2 ปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบ

การสร้างเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงที่สร้างขึ้นจากงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแขนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทอดแรงทั้งสองข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงเครื่องกดฯ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบอย่างแท้จริงซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของเครื่อง และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงจุดปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 17 เท่า ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง แรงกระทำด้านข้าง



รูปที่ 4.1 เครื่องกดทดสอบแบบสามแกนจริง

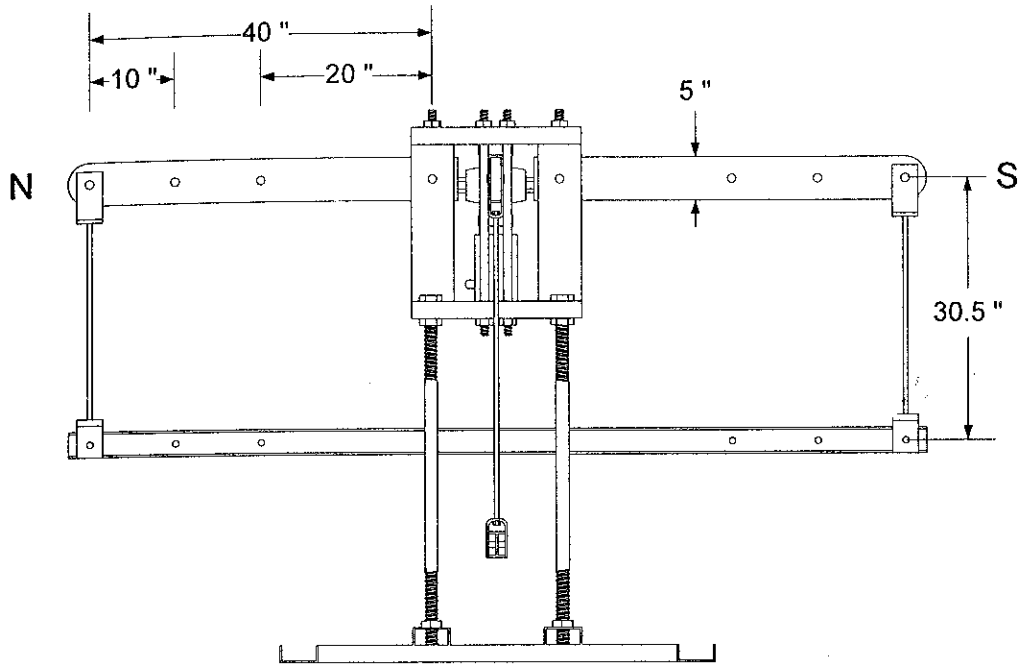


รูปที่ 4.2 คานรับน้ำหนักสำหรับให้ความเค้นด้านข้างต่อตัวอย่างหิน

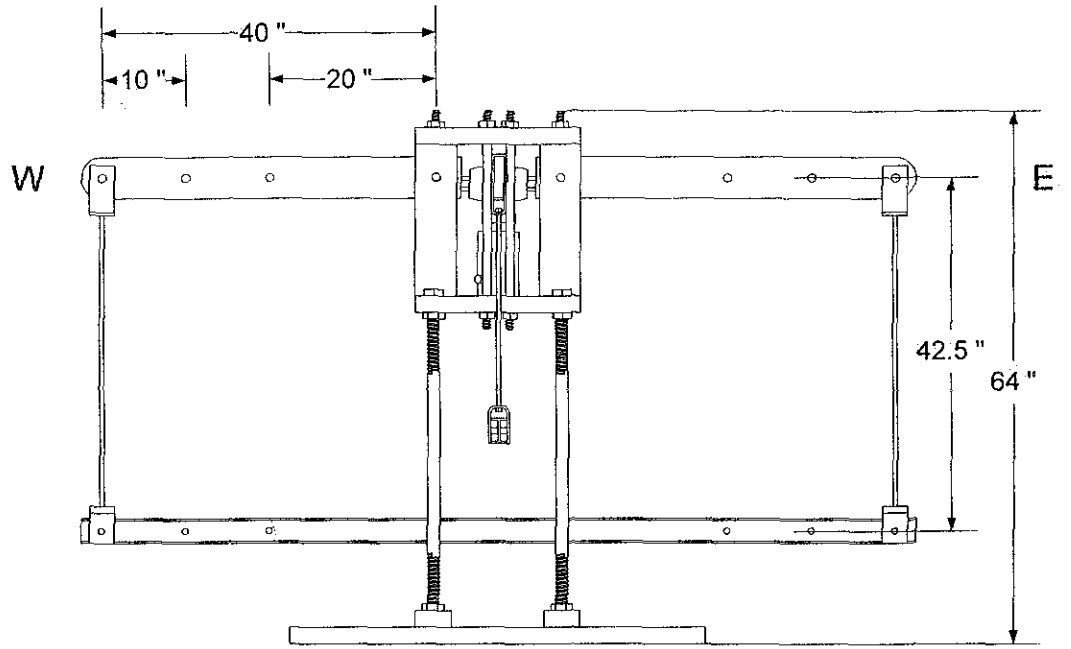
ได้ออกแบบไว้ให้สามารถรับแรงได้ถึง 100 kN และใช้ปั๊มไฮดรอลิกขนาด 1000-kN เป็นอุปกรณ์ให้แรงกระทำในแนวดิ่ง เครื่องทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหิน ได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร ถึง $10 \times 10 \times 20$ เซนติเมตร การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน จะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4.3 ข้อกำหนดเครื่องทดสอบในสามแกนจริง

รูปที่ 4.1 แสดงภาพเพอร์สเปกทีฟของเครื่องกดตัวอย่างหินในสามแกนด้วยระบบคานทอดแรงประกอบด้วย 1) ฐานรับน้ำหนักด้านบนและด้านล่างทำด้วยแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสหนา 2 นิ้ว มีพื้นที่ 20×20 ตารางนิ้ว 2) คานทอดแรงทำด้วยเหล็กหนา 1.25 นิ้ว ยาว 46 นิ้ว กว้าง 5 นิ้ว มีทั้งหมด 4 คาน วางตัวในทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3) ขาเหล็กสี่เหลี่ยมมุมของฐานรับน้ำหนักด้านล่าง ฐานเหล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สูง 42 นิ้ว และ 4) ชุดเสาค้ำยันประกอบด้วยแผ่นเหล็กยาว 17.5 นิ้ว กว้าง 5 นิ้ว หนา 1 นิ้ว ทั้งหมด 8 แผ่น ยึดระหว่างฐานรับน้ำหนักด้านบนและด้านล่างที่จุดกึ่งกลางของแต่ละด้าน โดยจะใช้เสาค้ำยัน 2 แผ่นต่อหนึ่งด้าน นอกจากนั้นเสาค้ำยันทั้งสองของแต่ละด้านจะใช้เป็นจุดหมุนของคานทอดแรงด้วย รูปที่ 4.3 แสดงภาพตัดขวางในทิศทางเหนือ-ใต้ของเครื่องกดตัวอย่างหินในสามแกนด้วยระบบคานทอดแรง ซึ่งแสดงให้เห็นแม่แรงไฮดรอลิกที่วางตัวอยู่กึ่งกลางของฐานรับน้ำหนักด้านล่าง เพื่อใช้เป็นตัวกดแท่งตัวอย่างหินที่มีขนาดระหว่าง $2 \times 2 \times 4$ นิ้ว ถึง $3 \times 3 \times 6$ นิ้ว วางตัวอยู่บนแท่งกด ที่ปลายด้านในของคานทอดแรงทั้งสี่อันจะต่อกับหัวกดรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งจะใช้กดตัวอย่างแท่งหินด้านข้าง ปลายนอกของคานทอดแรงจะถูกเจาะรูในระยะต่างกันตามรูป โดยรูที่เจาะจะใช้แขวนคานรับน้ำหนักด้านล่างด้วยเหล็กเส้นที่มีความยาวเท่ากับ 50 นิ้ว คานรับน้ำหนักด้านล่างทำด้วยเหล็กรูปตัวไอมีความยาวเท่ากับ 100 นิ้ว ที่จุดกึ่งกลางของคานรับน้ำหนักจะใช้เป็นแท่งรองค้ำน้ำหนักที่อยู่ใต้ฐานรับน้ำหนักด้านล่าง เครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นมานี้จะสามารถทอดแรงกดด้านข้างของตัวอย่างหินได้สูงสุดถึง 40 เท่า ของค้ำน้ำหนักที่กดอยู่ด้านล่างเนื่องจากระยะห่างของหัวกดจากจุดศูนย์กลางของจุดหมุนมีค่าเท่ากับ 1 นิ้ว และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดหมุนถึงจุดปลายสุดของรูแขวนคานรับน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 40 นิ้ว แรงกดด้านข้างของตัวอย่างหินในทิศทางที่ตรงข้ามกันจะเท่ากันตลอดเวลา เนื่องจากคานทอดแรงในทิศทางที่ตรงข้ามกันนั้นจะแขวนอยู่กับคานรับน้ำหนักเดียวกันและจากรูแขวนบนคานที่สมมาตรกัน ในการปรับระดับของแรงสามารถทำได้โดยละเอียดจากการเลือกใช้ขนาดของค้ำน้ำหนักและการเลือกใช้จุดแขวนบนคานทอดแรง กล่าวคือ ถ้าจุดแขวนแคบลงแรงกดด้านข้างของตัวอย่างหินจะน้อยลงตามสัดส่วน รูปที่ 4.4 แสดงภาพตัดขวางในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกของเครื่องกดหินในสามแกนด้วยระบบคานทอดแรง องค์ประกอบของสิ่งประดิษฐ์ในทิศตะวันออก-ตะวันตกจะเหมือนกับองค์ประกอบในทิศทางเหนือ-ใต้ทุกประการ ยกเว้นความยาวของเหล็กเส้นที่ต่อระหว่างคานรับน้ำหนักและคานทอดแรงทั้งสองปลายจะมีความยาว

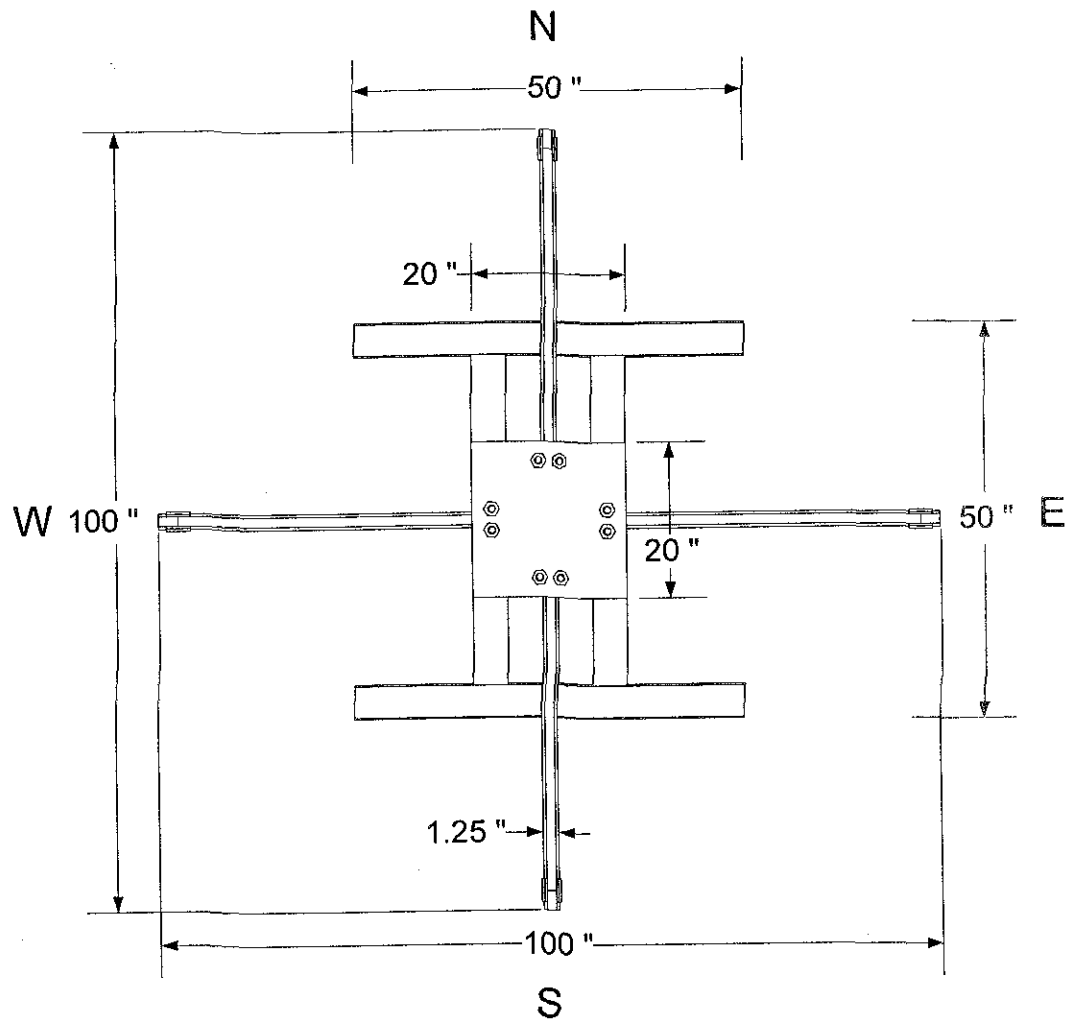


รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางในทิศทางเหนือ-ใต้ของเครื่องกคทดสอบในสามแกนจริง

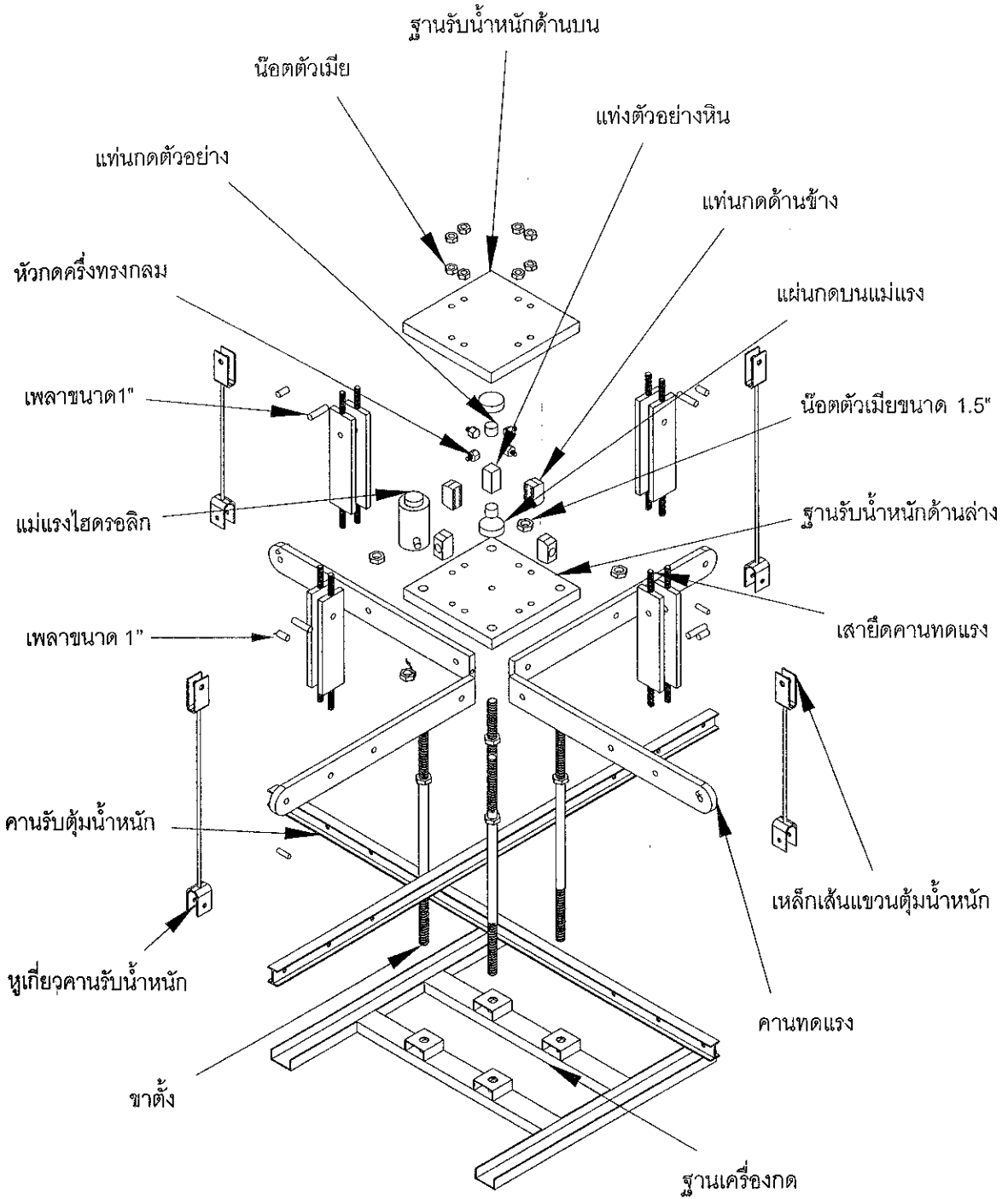


รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกของเครื่องกคตสอบในสามแกนจริง

เพียง 38 นิ้ว ทั้งนี้เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักทั้งสองทิศทางมีระยะห่างกันในแนวดิ่งและมีช่องว่างเพียงพอสำหรับใส่ตุ้มน้ำหนัก ดังนั้นแรงกดที่ให้กับตัวอย่างหินในทิศทางเหนือ-ใต้ และในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกจะทำให้เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ รูปที่ 4.5 แสดงภาพตัดขวางด้านบนของเครื่องกดหินในสามแกนด้วยระบบทดแรง โดยแสดงให้เห็นถึงความสมมาตรในสี่ทิศทางของสิ่งประดิษฐ์ นอกจากนั้นยังแสดงจุดยึดของเสาค้ำยันทั้งแปดเสาและตำแหน่งของแกนหมุนของแกนทดแรงบนเสาค้ำยันด้วย รูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบโดยละเอียดของเครื่องกดตัวอย่างหินในสามแกนด้วยระบบทดแรงที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางด้านบนของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง

บทที่ 5

การทดสอบด้วยเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง

5.1 วัตถุประสงค์

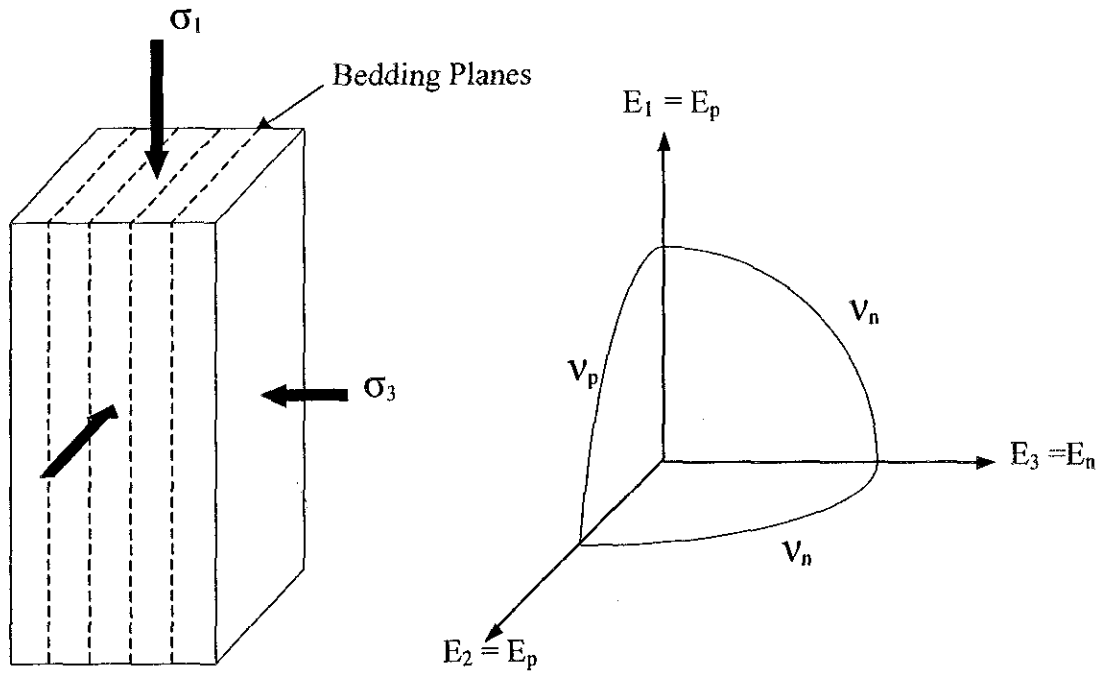
การทดสอบแรงกดในสามแกนจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของสิ่งประดิษฐ์ใหม่นี้โดยจะทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ 1) การทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริงและ 2) การทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิลเลียน โดยมีการกดในแนวแกนด้วย การทดสอบแบบแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าแรงกดสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดพระวิหาร และหินทรายชุดภูกระดึง ภายใต้ค่าความเค้นในสามแกนจริง ส่วนแบบที่สองคือ การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นซึ่งได้ทำการทดสอบกับหินทรายทั้ง 3 ชนิดเช่นกัน

5.2 การทดสอบแรงกดในสามแกน

การทดสอบแรงกดในสามแกนมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าแรงกดสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทราย 3 ชนิด โดยหินแต่ละชนิดจะทำการทดสอบ 15 ตัวอย่าง กำหนดให้ค่าความเค้นรอง (σ_3) และค่าความเค้นกลาง (σ_2) มีค่าคงที่ในขณะที่ค่าความเค้นหลัก (σ_1) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแตก σ_2 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 17 MPa และ σ_3 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 6 MPa รูปที่ 5.1 แสดงทิศทางของความเค้นและแนวการวางตัวของชั้นหินบนแท่งตัวอย่าง การคำนวณค่าความเครียดจะคำนวณจากค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกนพร้อมกับการใส่แรงกระทำบนตัวอย่างหิน จากนั้นจะทำการบันทึกค่าความเค้นที่จุดแตกของตัวอย่างหินไว้แล้วนำมาพิจารณารูปแบบการแตกในภายหลัง

5.3 ผลการทดสอบแรงกดในสามแกนจริง

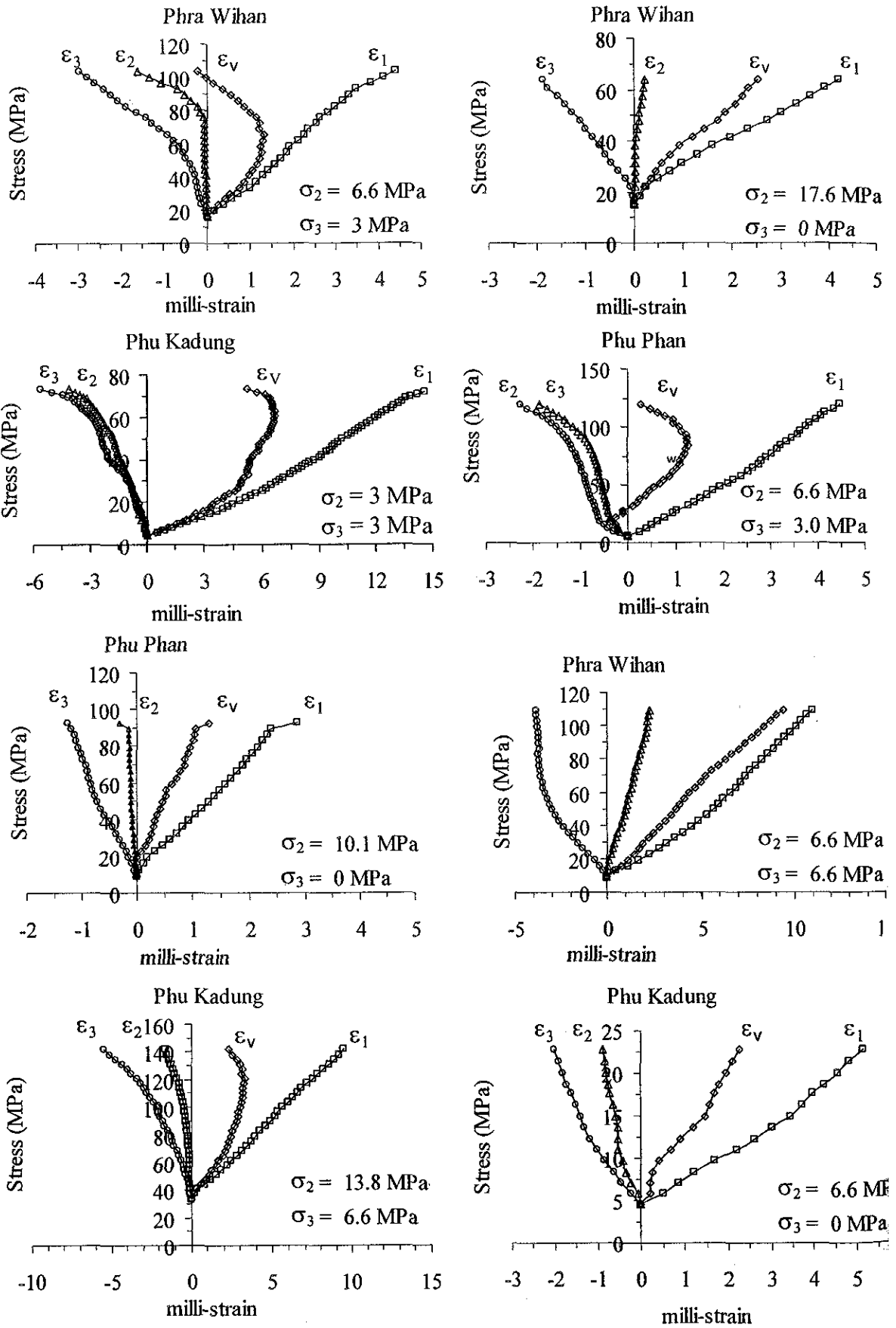
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการกดทดสอบและค่าปัจจัยการทดสอบ รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างของผลการทดสอบในรูปของกราฟระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดตั้งแต่จุดที่เริ่มใส่แรงกระทำบนตัวอย่างหินจนกระทั่งถึงจุดแตก การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของ Poisson จะคำนวณทั้งทิศทางที่แรงตั้งฉากและขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ในที่นี่จะกำหนดให้ค่าความเค้นหลัก (σ_1) และค่าความเค้นกลาง (σ_2) มีทิศทางขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดในสามมิติได้ถูกเสนอไว้โดย Jaeger and Cook (1979) ซึ่งในสมการนี้จะสมมติให้ตัวอย่างหินอยู่ในรูปแบบของ transversely isotropic



รูปที่ 5.1 ทิศทางการให้ความเค้นกับตัวอย่างหินต่อแนวชั้นหิน (ซ้าย) ตัวแปรค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินที่มีคุณสมบัติในทิศทางตั้งฉากและขนานกับชั้นหินที่ไม่เท่ากัน (ขวา)

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบและค่าปัจจัยการทดสอบ

Series		Types of Rock		
σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	Phu Phan, σ_1 (MPa)	Pra Wihan, σ_1 (MPa)	Phu Kadung, σ_1 (MPa)
0	0	49.4	48.5	46.4
	3.0	77.2	50.5	56.9
	6.6	83.8	51.8	60.8
	10.1	93.4	60.8	71.5
	17.6	103.3	63.7	75.0
	24.0	76.3	60.7	78.9
3.0	3.0	113.1	95.9	76.9
	6.6	123.8	104.5	93.0
	10.1	127.3	103.4	94.9
	17.6	135.8	127.5	106.6
6.6	6.6	144.0	134.2	123.8
	10.1	152.5	135.1	128.2
	13.8	165.9	149.8	137.7
	17.6	163.9	159.1	147.6



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างผลการทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียดในสามทิศทางของหินทรายสามชนิดภายใต้เครื่อง polyaxial load frame

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_p} - \frac{\sigma_2 \nu_p}{E_p} - \frac{\sigma_3 \nu_n}{E_n} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\sigma_1 \nu_p}{E_p} + \frac{\sigma_2}{E_p} - \frac{\sigma_3 \nu_n}{E_n} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\sigma_1 \nu_n}{E_p} - \frac{\sigma_2 \nu_n}{E_p} + \frac{\sigma_3}{E_n} \quad (5.3)$$

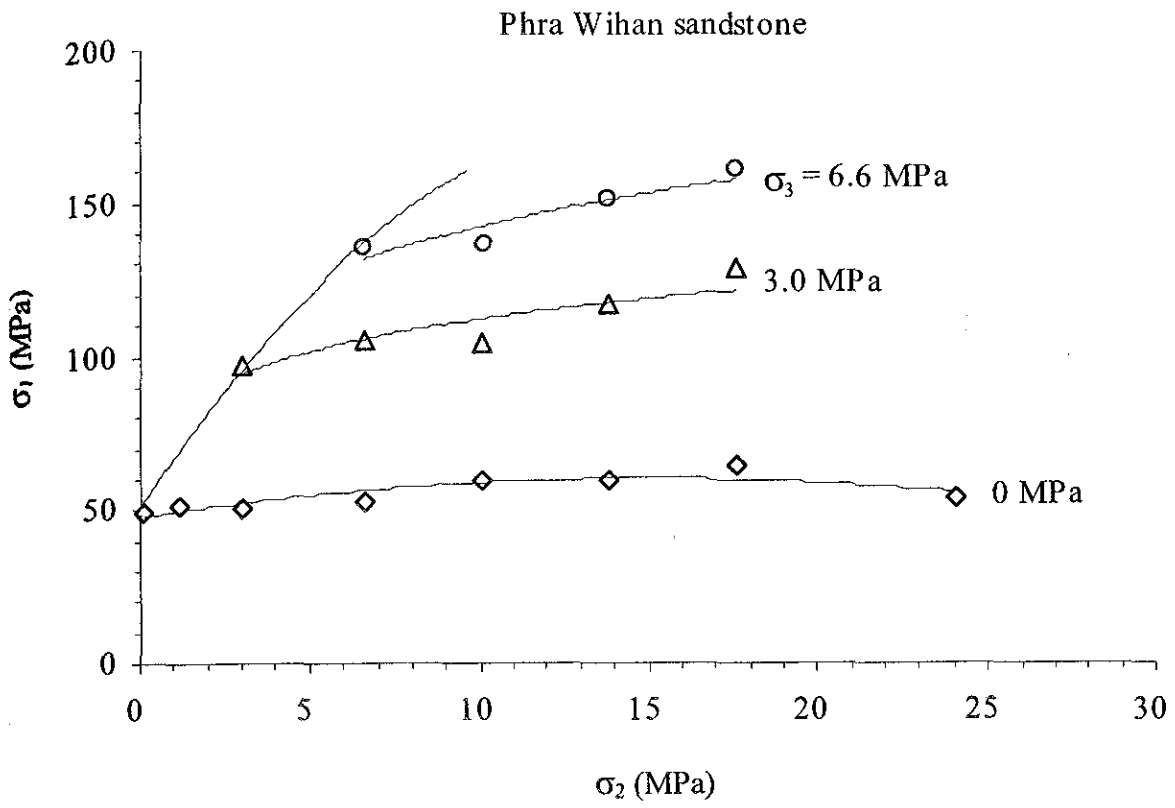
เมื่อ σ_1 , σ_2 และ σ_3 คือ ค่าความเค้นในแนวแกน ε_1 , ε_2 และ ε_3 คือ ค่าความเครียดในแนวแกน E_n และ E_p คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ตั้งฉากและขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ν_n และ ν_p คืออัตราส่วนของ Poisson ในทิศทางที่ตั้งฉากและขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหิน

การคำนวณอัตราส่วนของ Poisson และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบสัมผัสของตัวอย่างหินจะใช้ค่าที่อยู่ในช่วง 50% ของค่าความเค้นสูงสุด หินทรายทั้ง 3 ชนิดแสดงพฤติกรรมแบบ transversely isotropic กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหินจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหินเล็กน้อย ส่วนอัตราส่วนของ Poisson ในทิศทางที่ขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหินจะมีค่าน้อยกว่าในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ตารางที่ 5.2 แสดงผลสรุปของค่าอัตราส่วนของ Poisson และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินแต่ละชนิดในแต่ละทิศทางระหว่างการวางตัวของชั้นหินกับทิศทางของแรงที่กระทำบนตัวอย่างหิน

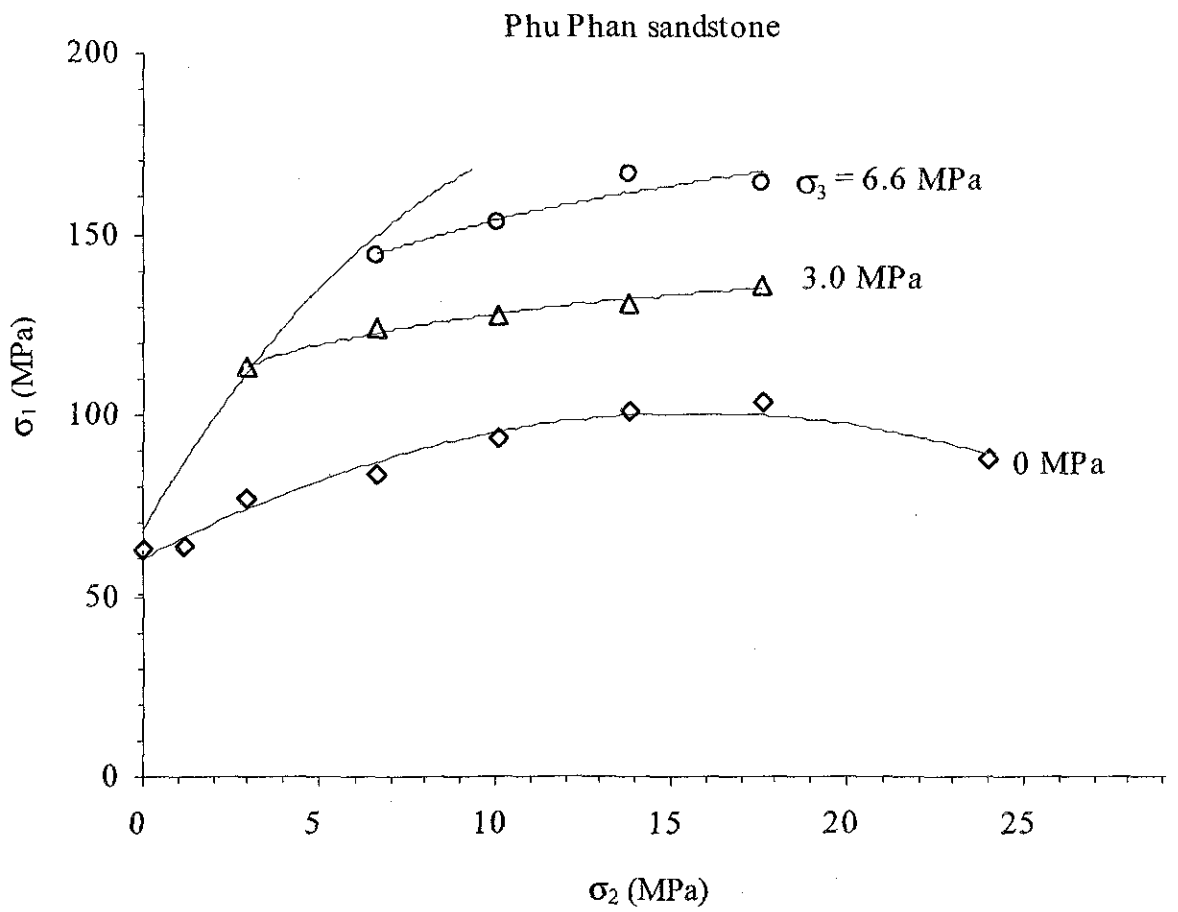
รูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.5 แสดงค่า σ_1 กับค่า σ_2 ภายใต้การทดสอบที่ใช้ค่า σ_3 ในช่วงที่แตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของค่าความเค้นกลาง (σ_2) ต่อค่าความเค้นหลักที่จุดแตก (σ_1) โดยที่แนวของจุดแตกจะเริ่มเลื่อนออกจากจุดที่อยู่ในสภาวะ $\sigma_2 = \sigma_3$ ที่ระดับของค่า σ_3 ในหลายระดับ ค่า σ_1 ที่จุดแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ σ_2 มีค่าเพิ่มขึ้นและผลกระทบของค่าความเค้นกลาง (σ_2) จะแสดงให้เห็นชัดเจนเมื่อค่า σ_3 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลการทดสอบอื่นๆ เช่น Haimson and Chang, 2000; Colmenares and Zoback, 2002; Haimson, 2006 ตัวอย่างหินหลังจากทำการทดสอบจะสามารถสังเกตเห็นการแตกในแนวเฉียงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหินที่ทดสอบภายใต้สภาวะที่มีค่า σ_2 ต่ำ ในขณะที่การแตกแบบแรงดึง (splitting tension) จะมีทิศทางขนานกับทิศทางของ σ_1 และ σ_2 ซึ่งจะสามารถเห็นได้ชัดภายใต้สภาวะที่มีค่า σ_2 สูง ดังแสดงในรูปที่ 5.6 การอธิบายรอยแตกแบบ splitting tension ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ σ_2 มีค่าสูงสามารถกล่าวได้ว่า ผลของรอยแตกที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากผลของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสในทิศทางของ σ_2 และไม่ส่งผลกระทบกับ

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติความยืดหยุ่นในทิศทางที่ตั้งฉากและขนานกับชั้นหิน

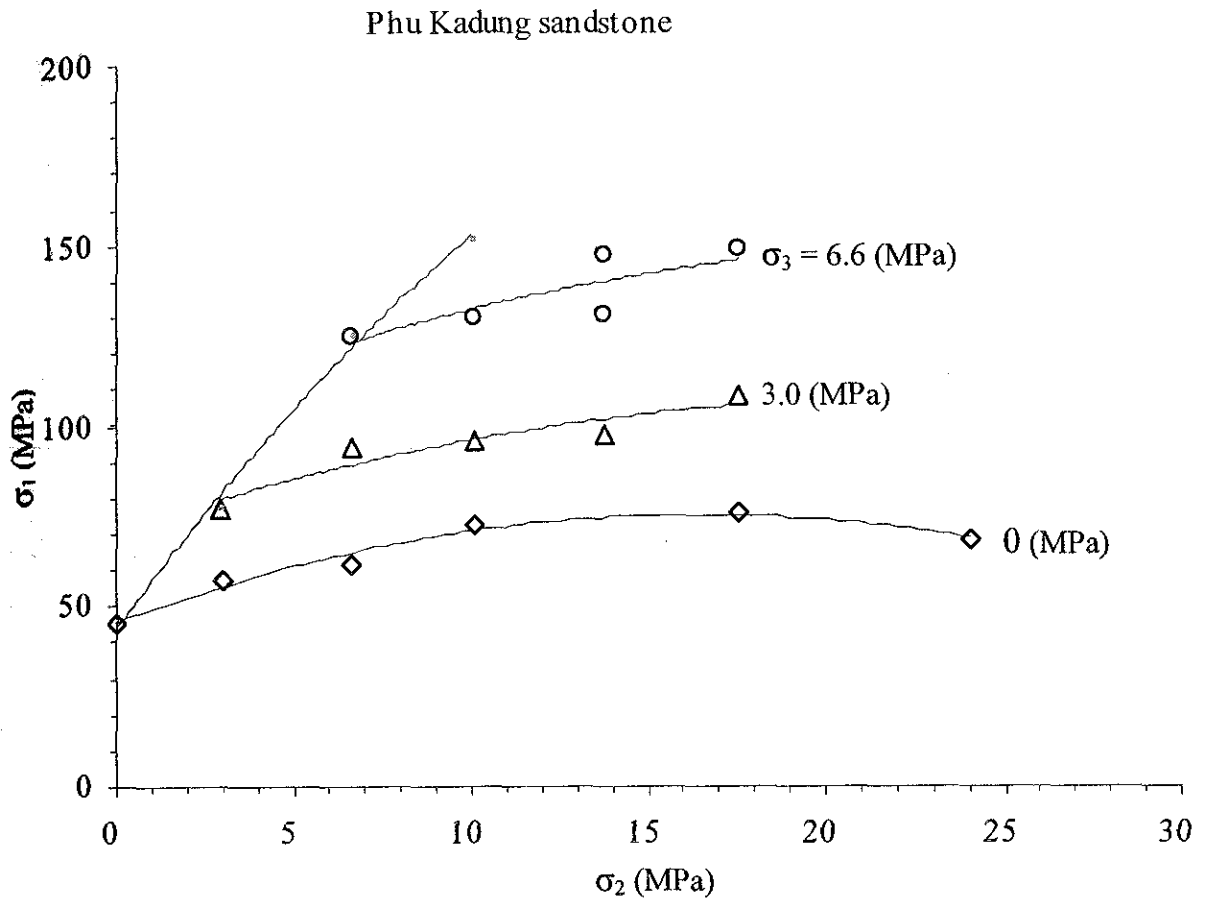
	Rock Types	E_p (GPa)	E_n (GPa)	ν_p	ν_n
Polyaxial Compression Test	PW	10.0	8.6	0.38	0.28
	PP	11.1	10.3	0.36	0.33
Brazilian Tension Test	PW	9.2	N/A	0.21	N/A
	PP	14.8	N/A	0.19	N/A
	PK	5.9	N/A	0.11	N/A



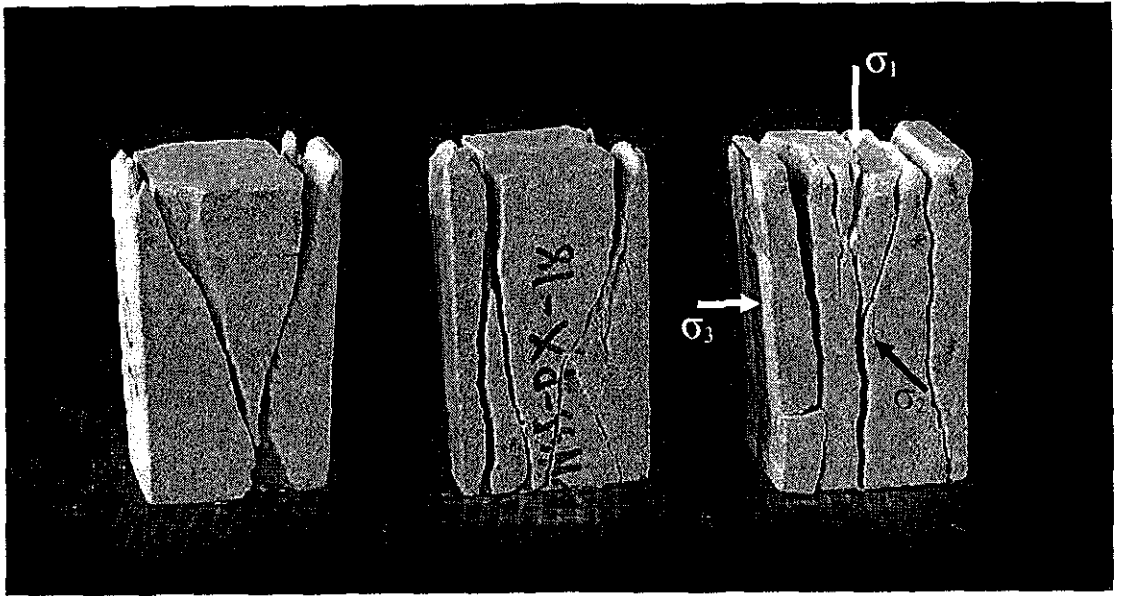
รูปที่ 5.3 ค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทรายพระวิหาร



รูปที่ 5.4 ค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทรายภูพาน



รูปที่ 5.5 แสดงค่าความเค้นสูงสุดต่อค่าความเค้นกลางในหลายระดับความเค้นรองของหินทรายภูกระดึง



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารหลังการทดสอบ ซ้าย: $\sigma_1 = 51, \sigma_2 = 1.2, \sigma_3 = 0$ MPa. กลาง: $\sigma_1 = 50, \sigma_2 = 3.0, \sigma_3 = 0$ MPa. ขวา: $\sigma_1 = 58.8, \sigma_2 = 10.0, \sigma_3 = 0$ MPa.

ค่า σ_1 และ σ_2 ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ผลสรุปจึงไม่สอดคล้องกับผลสรุปของ Cai (2008) ที่กล่าวไว้ว่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสในทิศทางของ σ_2 จะส่งผลให้ค่า σ_1 ที่จุดแตกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันผลของการทดสอบภายใต้สภาวะ $\sigma_2 = \sigma_3$ จะมีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Kenkhunthod and Fuenkajorn (2009)

5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การอธิบายค่าความแข็งแรงของหินในสามแกนจะเลือกใช้เกณฑ์ของ Coulomb และเกณฑ์ของ Wiebols and Cook สาเหตุที่เลือกใช้เกณฑ์ของ Coulomb เนื่องจากเป็นเกณฑ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคสนาม ในขณะที่เกณฑ์ของ Wiebols and Cook นั้นได้อ้างอิงไว้ในงานวิจัยหลายฉบับซึ่งเป็นเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือได้ในการอธิบายค่าความแข็งแรงของหินภายใต้แรงกดในสามแกน การนำเสนอค่าความแข็งแรงของหินภายใต้แรงกดในสามแกนจะนำเสนอในรูปแบบของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ (Jaeger and Cook, 1979)

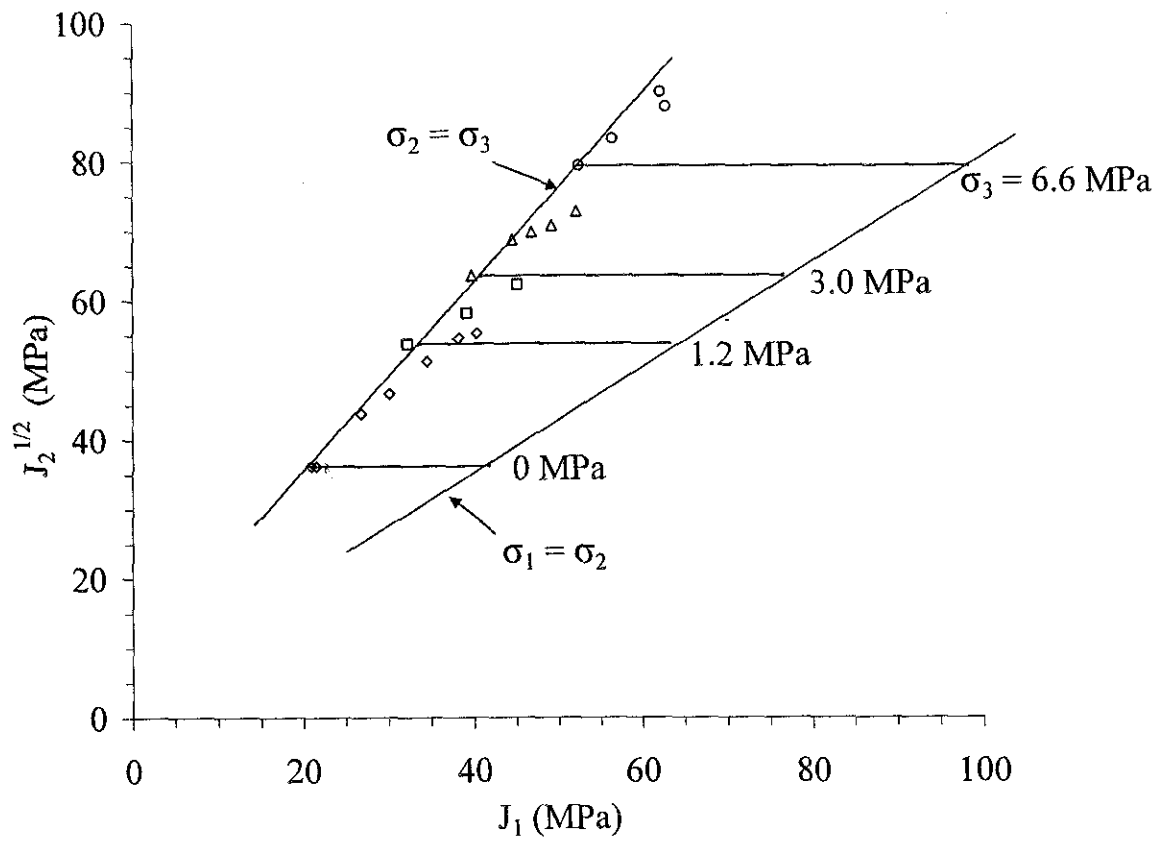
$$J_2^{1/2} = \sqrt{(1/6)\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2\}} \quad (5.4)$$

$$J_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (5.5)$$

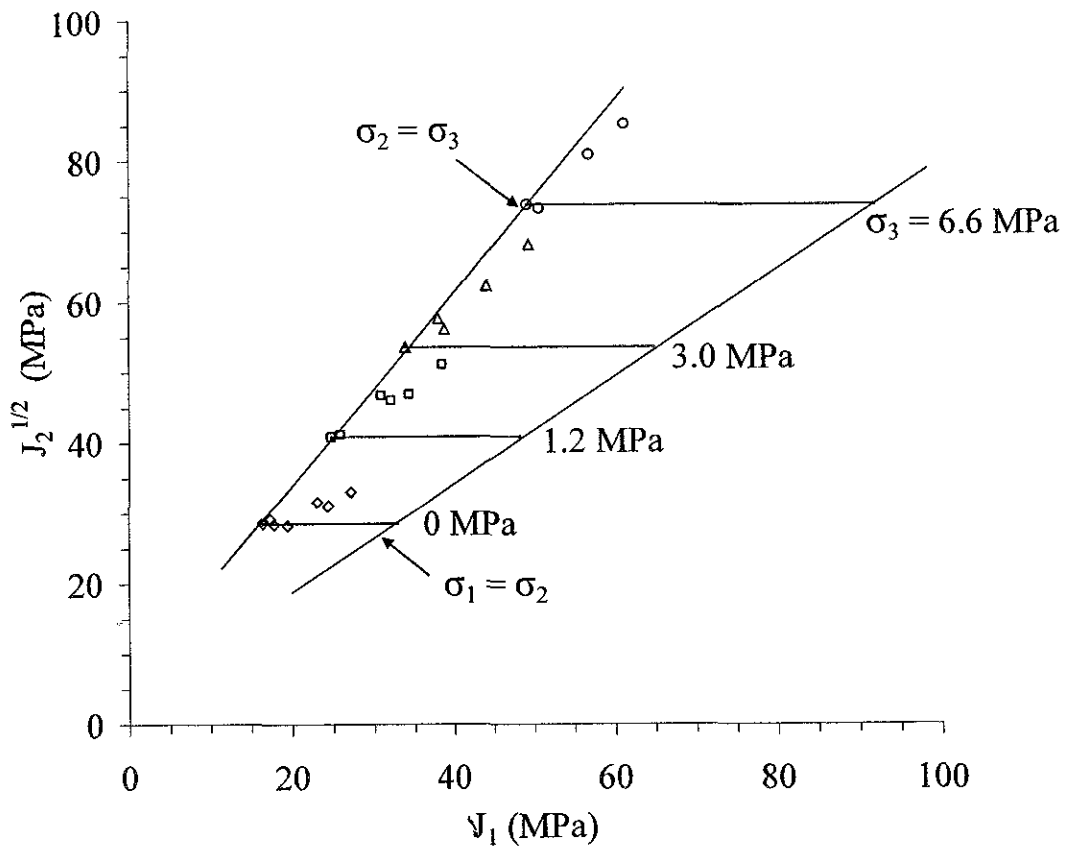
เกณฑ์ของ Coulomb จะคำนวณจากค่าความแข็งแรงของหินสูงสุดในแกนเดียวและค่าความแข็งแรงของหินสูงสุดในสามแกนที่ σ_2 และ σ_3 มีค่าเท่ากัน โดยกำหนดให้ σ_3 มีค่าเท่ากับ 0, 1.2, 3.0 และ 6.6 MPa และอยู่ในช่วงของสภาวะที่ $\sigma_2 = \sigma_3$ ถึงสภาวะที่ $\sigma_1 = \sigma_2$ จากกราฟของ $J_2^{1/2} - J_1$ ในรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.9 ค่าของ $J_2^{1/2}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า σ_3 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะไม่ขึ้นกับค่าของ J_1 เพราะเกณฑ์ของ Coulomb จะไม่นำค่า σ_2 มาคำนวณร่วมด้วย เมื่อ σ_2 และ σ_3 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของ Coulomb จะแสดงผลไปในทางเดียวกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงของหินทรายที่ทดสอบ นอกจากกรณีนี้แล้วจะไม่นำค่า $J_2^{1/2}$ และ J_1 มาสร้างความสัมพันธ์กันเนื่องจากเกณฑ์ของ Coulomb ไม่เพียงพอต่อการอธิบายค่าความเค้นในสามแกนในสภาวะอื่นๆ ซึ่งได้มีการสรุปไว้แล้วโดย Colmenares and Zoback (2002) ค่า $J_2^{1/2}$ ในเทอมของ J_1 ถูกอธิบายโดย Jaeger and Cook (1979) ได้ดังนี้

$$J_2^{1/2} = \frac{2}{\sqrt{3}} [J_1 \sin \phi + S_0 \cos \phi] \quad (5.6)$$

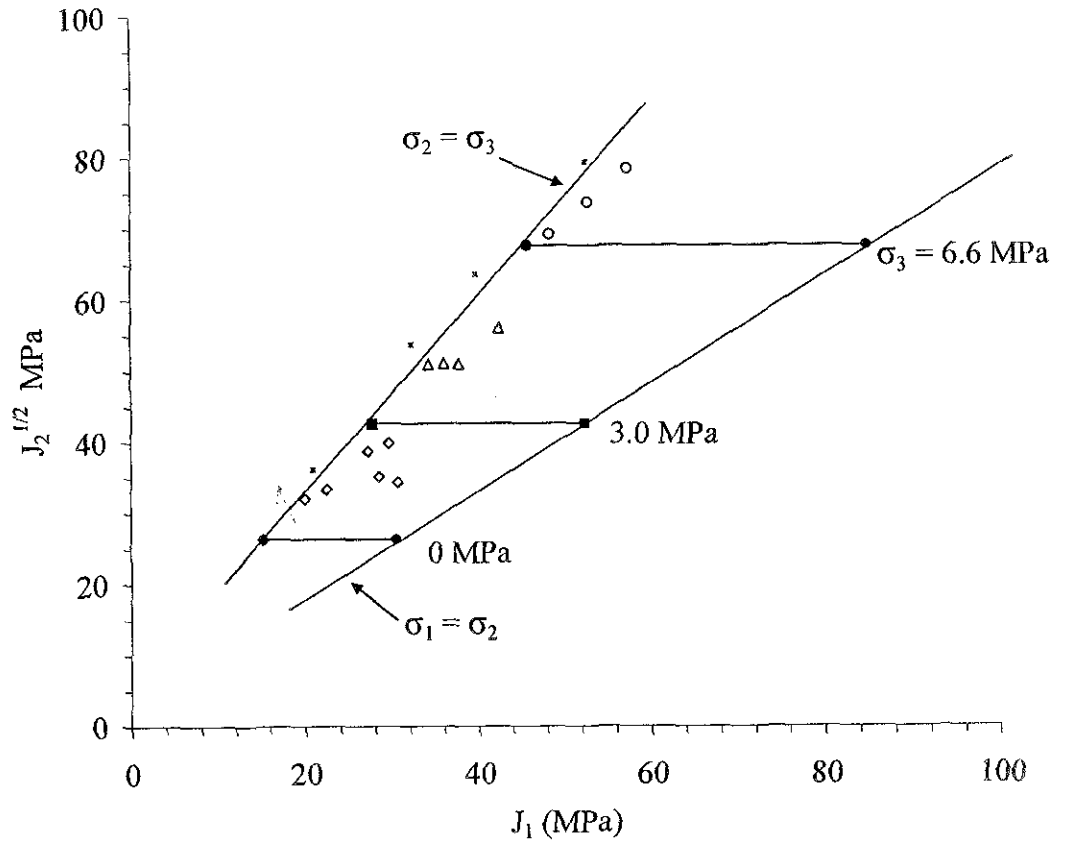
โดยที่ ϕ คือ ค่าของมุมความเสียดทาน และ S_0 คือ ค่าความเค้นยึดติดของรอยแตกในหิน



รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb



รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb



รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแรงกดในสามแกนจริงของหินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb

Colmenares and Zoback (2002) ได้อธิบายค่าของ $J_2^{1/2}$ ในรูปของ J_1 โดยใช้เกณฑ์ของ Wiebols and Cook ดังนี้

$$J_2^{1/2} = A + BJ_1 + CJ_1^2 \quad (5.7)$$

ค่าคงที่ A, B และ C ได้มาจากค่าปัจจัยต่างๆ ของหินแต่ละชนิดและค่าความเค้นรอน (σ_3) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ก็ต่อเมื่อหินอยู่ในสภาวะที่ $\sigma_2 = \sigma_3$ อธิบายไว้โดย Colmenares and Zoback (2002)

$$C = \frac{\sqrt{27}}{2C_1 + (q-1)\sigma_3 - C_0} \times \left(\frac{C_1 + (q-1)\sigma_3 - C_0}{2C_1 + (2q+1)\sigma_3 - C_0} - \frac{q-1}{q+2} \right) \quad (5.8)$$

เมื่อ $C_1 = (1 + 0.6\mu_i)C_0 \quad (5.9)$

$C_0 =$ ค่าความแข็งสูงสุดของหิน

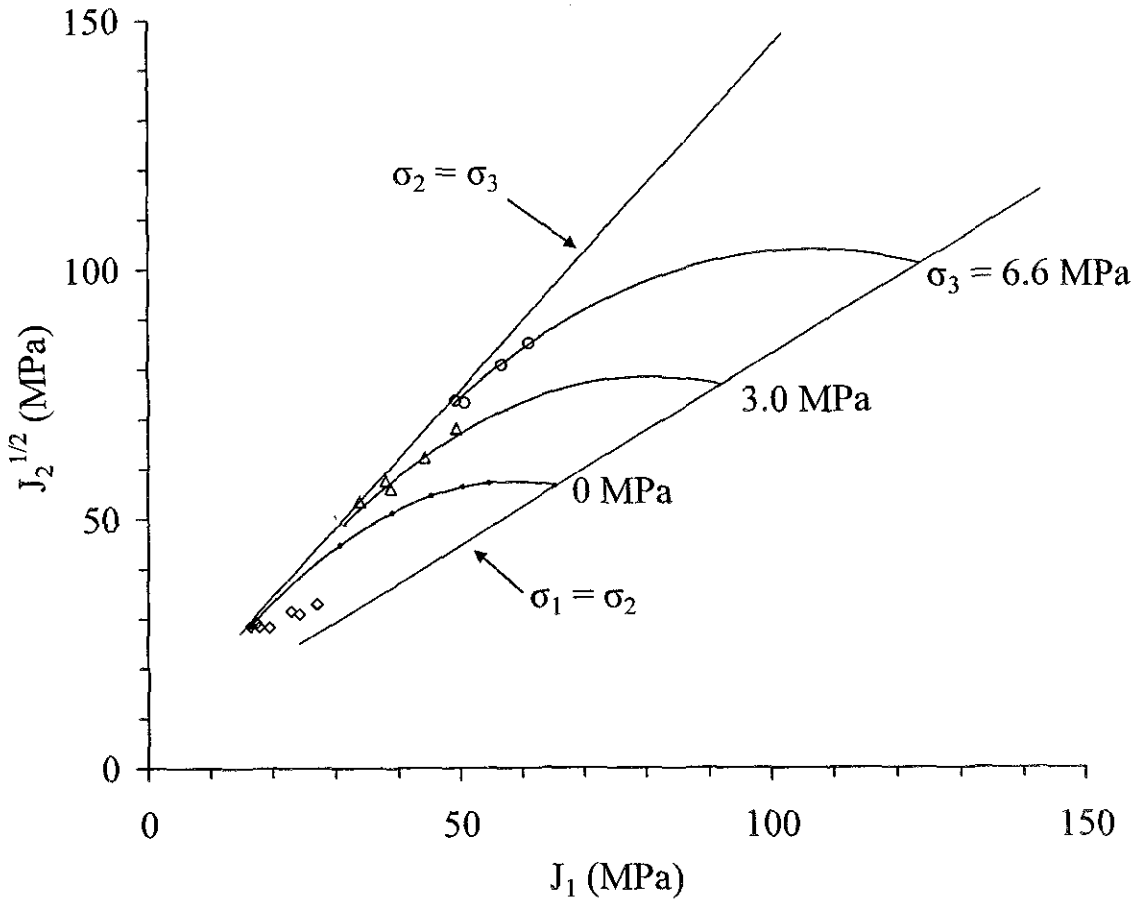
$$\mu_i = \tan\phi \quad (5.10)$$

$$q = \{(\mu_i^2 + 1)^{1/2} + \mu_i\}^2 = \tan^2(\pi/4 + \phi/2) \quad (5.11)$$

$$B = \frac{\sqrt{3}(q-1)}{q+2} - \frac{C}{3}(2C_0 + (q+2)\sigma_3) \quad (5.12)$$

$$A = \frac{C_0}{\sqrt{3}} - \frac{C_0}{3}B - \frac{C_0^2}{9}C \quad (5.13)$$

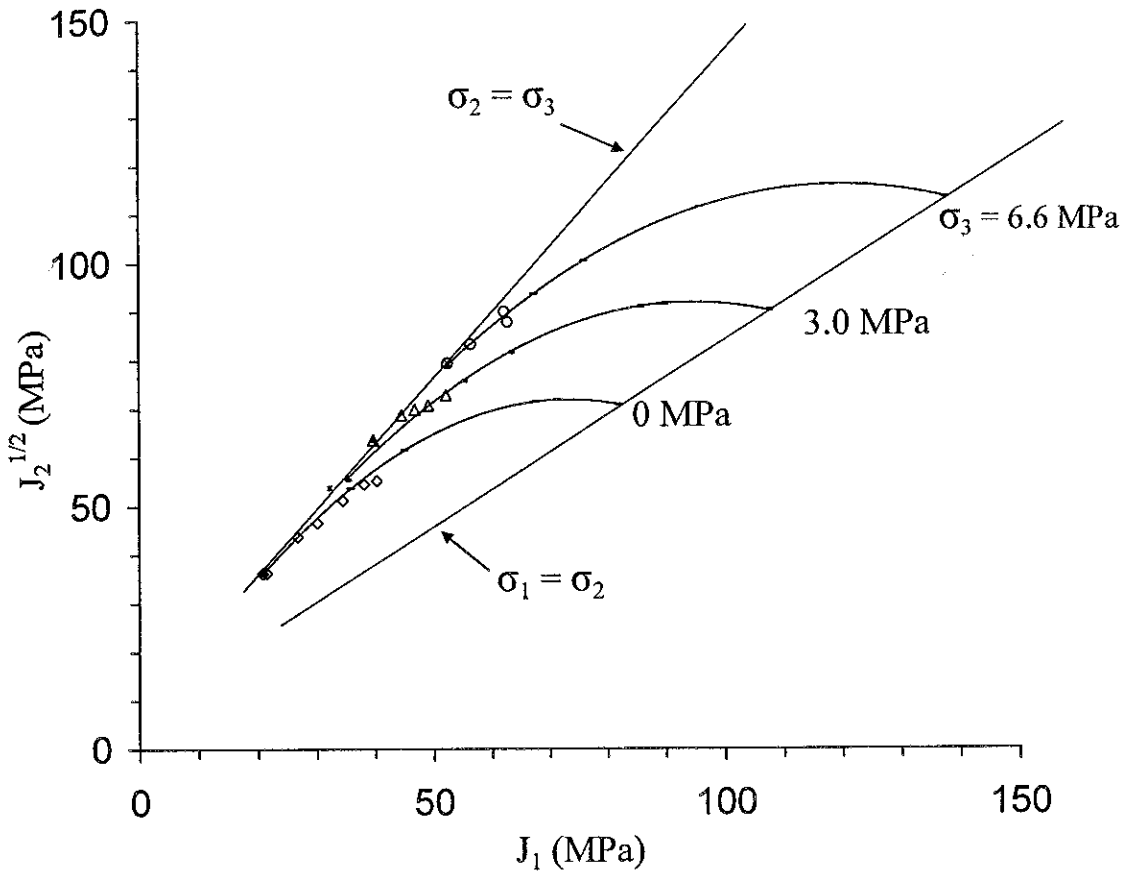
ค่าที่ได้จากการคำนวณของ A, B และ C จากตัวอย่างหินทรายชุดภูพานและหินทรายชุดพระวิหารในสภาวะที่ค่า σ_3 ในระดับต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ที่ได้จะถูกนำมาแทนในสมการที่ (5.6) ค่าสูงสุดและต่ำสุดของ $J_2^{1/2}$ จะถูกกำหนดที่สภาวะ $\sigma_2 = \sigma_3$ ถึงสภาวะที่ $\sigma_1 = \sigma_2$ ค่า σ_3 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0, 1.2, 3.0 และ 6.6 MPa รูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.12 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบจริงและผลที่ได้จากการคาดคะเนตามเกณฑ์ของ Wiebols and Cook ภายใต้สภาวะที่ค่าของ σ_3 มีค่าต่ำ ผลที่ได้จากการคาดคะเนจากเกณฑ์ของ Wiebols and Cook จะมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริง แต่จะสามารถอธิบายค่าความแข็งของหินสูงสุดในสามแกนได้ดีภายใต้สภาวะที่ σ_3 มีค่าสูง ผลที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถยืนยันได้จากผลของ Colmenares and Zoback (2002)



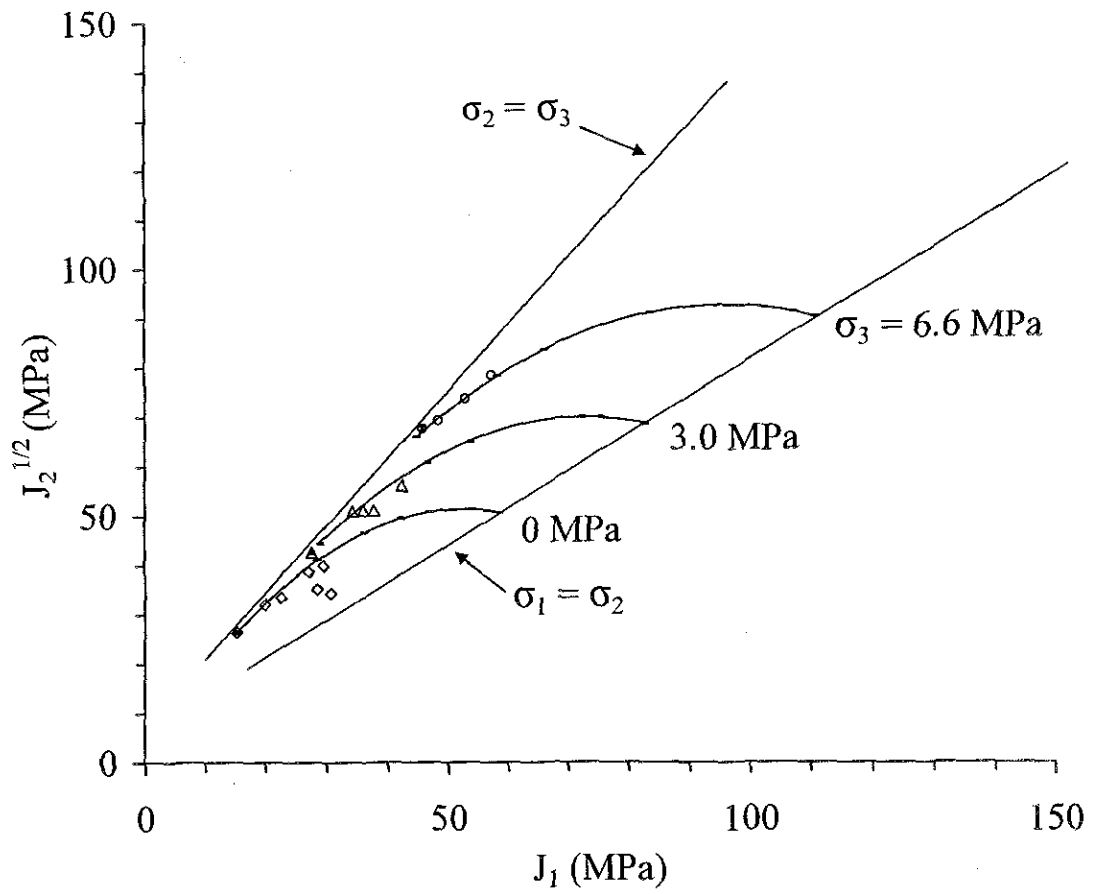
รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทราย
 ชุกภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook

ตารางที่ 5.3 ค่าปัจจัย A,B และ C สำหรับตัวอย่างหินทดสอบ

Rock types	PW Sandstone				PP Sandstone			
σ_3 (MPa)	0	1.2	3.0	6.6	0	1.2	3.0	6.6
A (MPa)	1.37	0.54	-0.41	-1.7	1.97	1.16	0.17	-1.2
B	1.92	1.94	1.96	1.99	1.91	1.92	1.94	1.96
C (MPa-1)	-0.016	-0.014	-0.012	-0.009	-0.013	-0.013	-0.01	-0.008



รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทรายชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook



รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบในสามแกนจริงของหินทราย หดถูกระดิ่ง โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook

5.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นกด

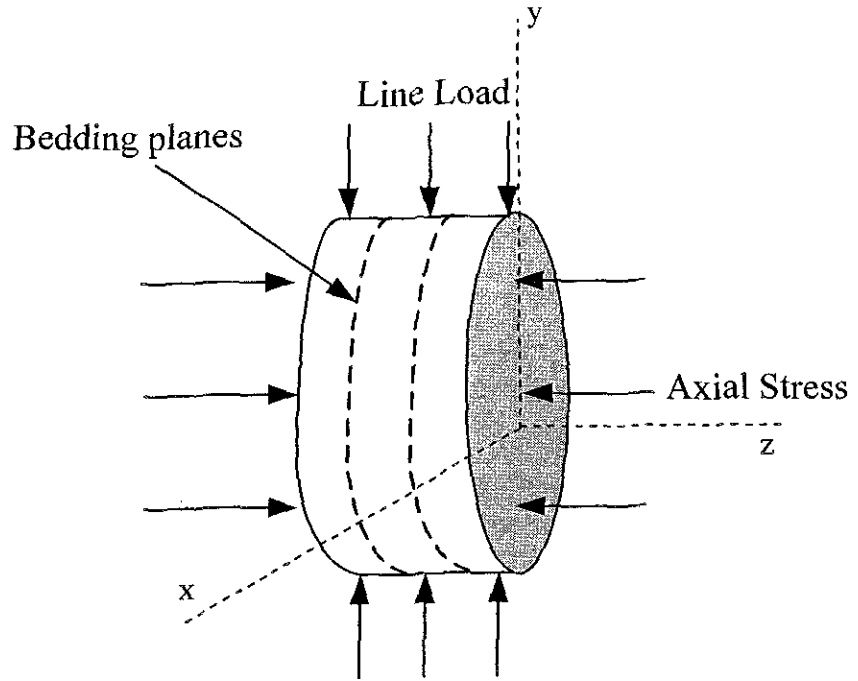
การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นจะทำการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของค่าความเค้นกลางต่อค่าความเค้นดึงของหินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุดภูพาน หินทรายชุดพระวิหาร และหินทรายชุดภูกระดึง โดยได้ทำการทดสอบชนิดละ 20 ตัวอย่าง รูปที่ 5.13 แสดงทิศทางของแรงบนตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ ค่าความเค้นที่กระทำบนตัวอย่างหินจะมีค่าผันแปรตั้งแต่ 0 จนถึงค่าความเค้นกดสูงสุดของหินแต่ละชนิด ในการทดสอบจะใช้แผ่นพลาสติกแข็ง (Neoprene sheets) เพื่อลดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวของหัวกดทดสอบกับผิวของตัวอย่างหิน

5.6 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

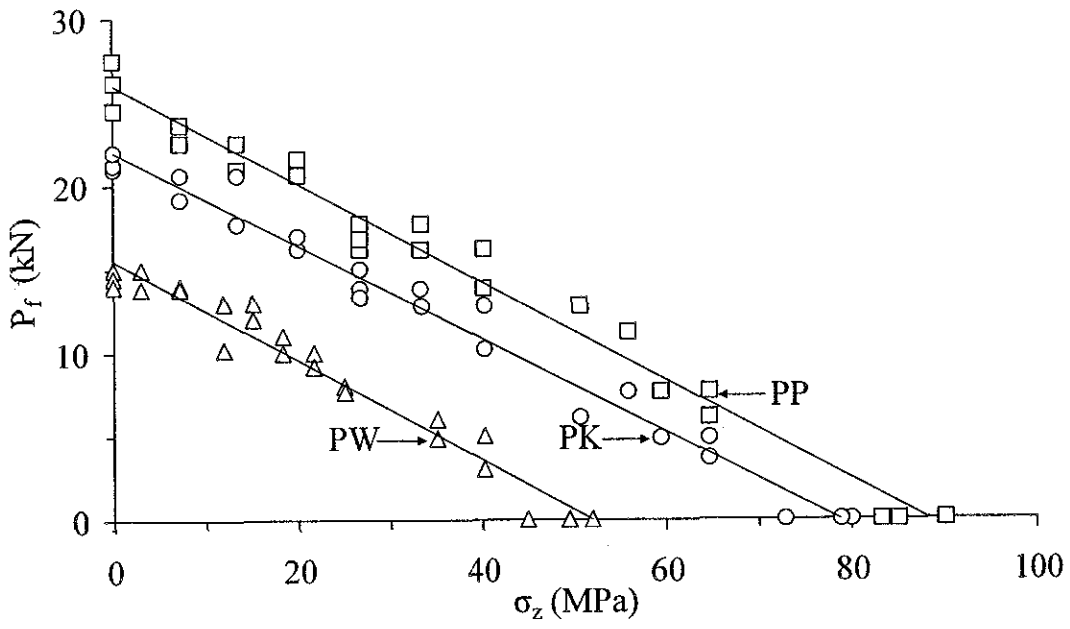
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแนวเส้นที่จุดแตก (p) กับค่าความเค้นในแนวแกน (σ_x) ที่กระทำบนตัวอย่างหินสำหรับหินทรายทั้ง 3 ชนิด จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ค่าของแรงกดในแนวเส้น (p) จะลดลงเมื่อความเค้น σ_x มีค่าเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 5.15 แสดงค่าความเค้นดึง (σ_y) และค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_z) ที่มีค่าลดลงเมื่อความเค้นในแนวแกน (σ_x) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความเค้นดึง (σ_y) และค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_z) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Jaeger and Cook (1979) ผลที่ได้จากการคำนวณจะผันแปรไปในเชิงเส้นตรงระหว่างจุดของการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนถึงจุดของการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และสามารถนำมาแสดงในรูปวงกลมของ Mohr ได้ดังรูปที่ 5.16

รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการแตกของตัวอย่างหินที่ค่าความเค้นในแนวแกนต่างกัน ในกรณีที่ค่าความเค้นในแนวแกนเป็นศูนย์ (การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน) การแตกของตัวอย่างหินจะมีลักษณะเป็นแนวเดียวกันตามเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหิน แนวการแตกของตัวอย่างหินจะเกิดมากขึ้นเมื่อค่าความเค้นในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าความเค้น σ_x มีค่าเท่ากับค่าความเค้นสูงสุดของหิน (σ_c) ลักษณะการแตกของหินจะแตกเป็นแบบบดละเอียด ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหิน ทั้งนี้ค่าความเค้นในแนวแกนจะทำให้เกิดความเครียดที่เกิดจากแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเค้น σ_x ซึ่งจะขึ้นกับอัตราส่วนของ Poisson และค่าความเค้นดึง (σ_y) ของหิน เนื่องจากการทดสอบนี้ตัวอย่างหินจะอยู่ภายใต้สภาวะแรงกดและแรงดึง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของ Poisson ของหินอาจจะมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณทั่วไป

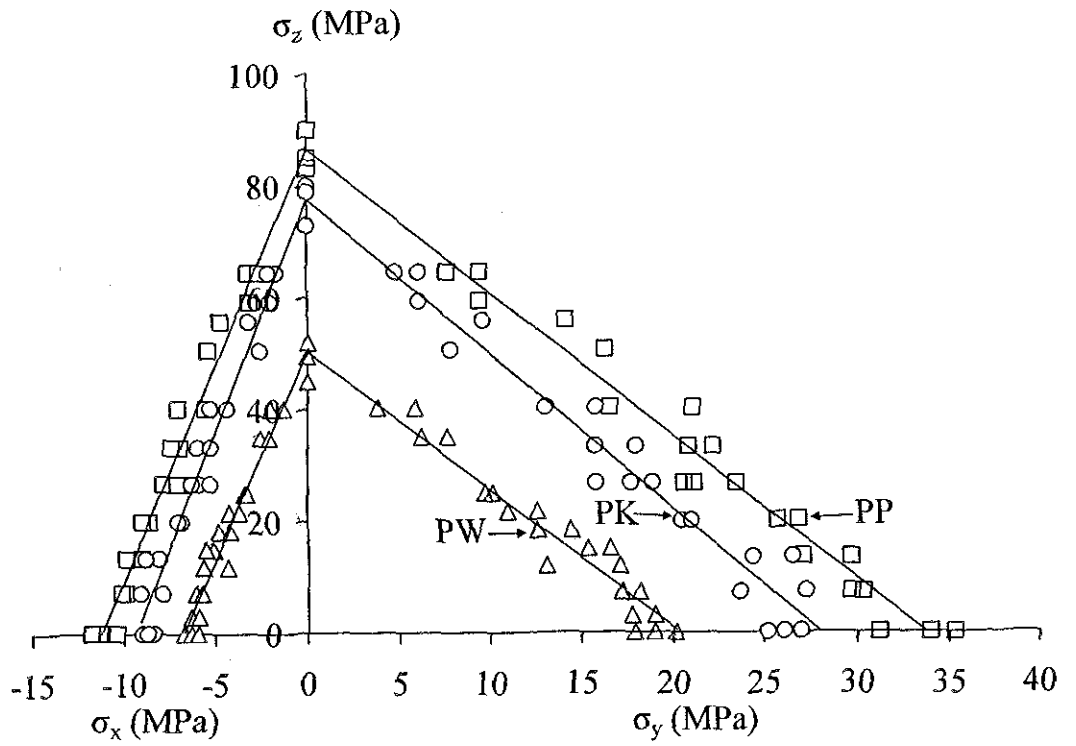
การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วน Poisson ของหินทราย 3 ชนิด ได้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไร้ความเค้น ($\sigma_z = 0$) โดยใช้อุปกรณ์วัดค่าความเครียด (strain gage) ติดตั้งลงบนจุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินทั้งแนวแกนตั้ง (ตามแกน σ_y) และแนวแกนนอน (ตามแกน σ_x) รูปที่ 5.18 แสดงทิศทางของ strain gages บนตัวอย่างหินบางชิ้น รูปที่ 5.19 แสดง



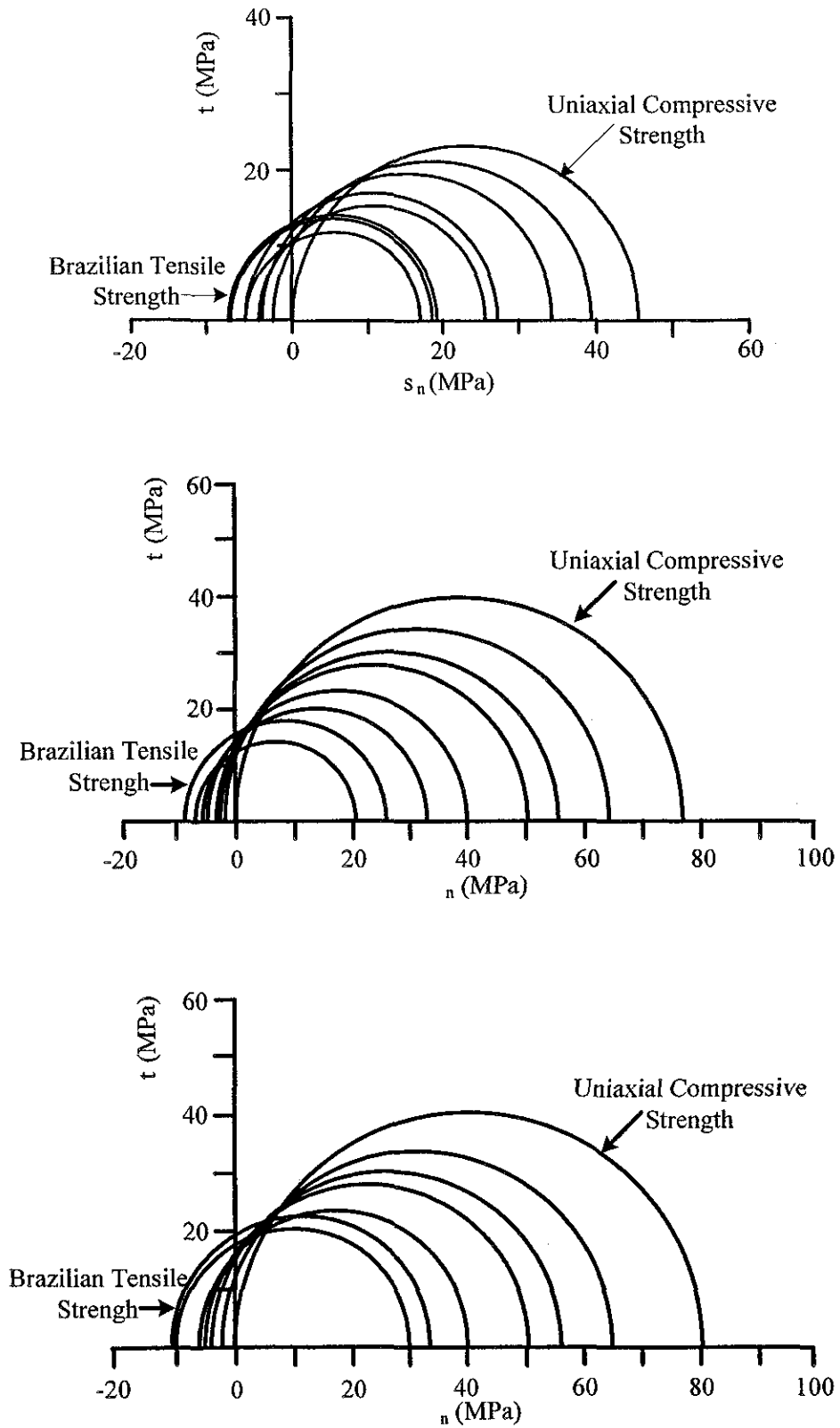
รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ความเค้นกด



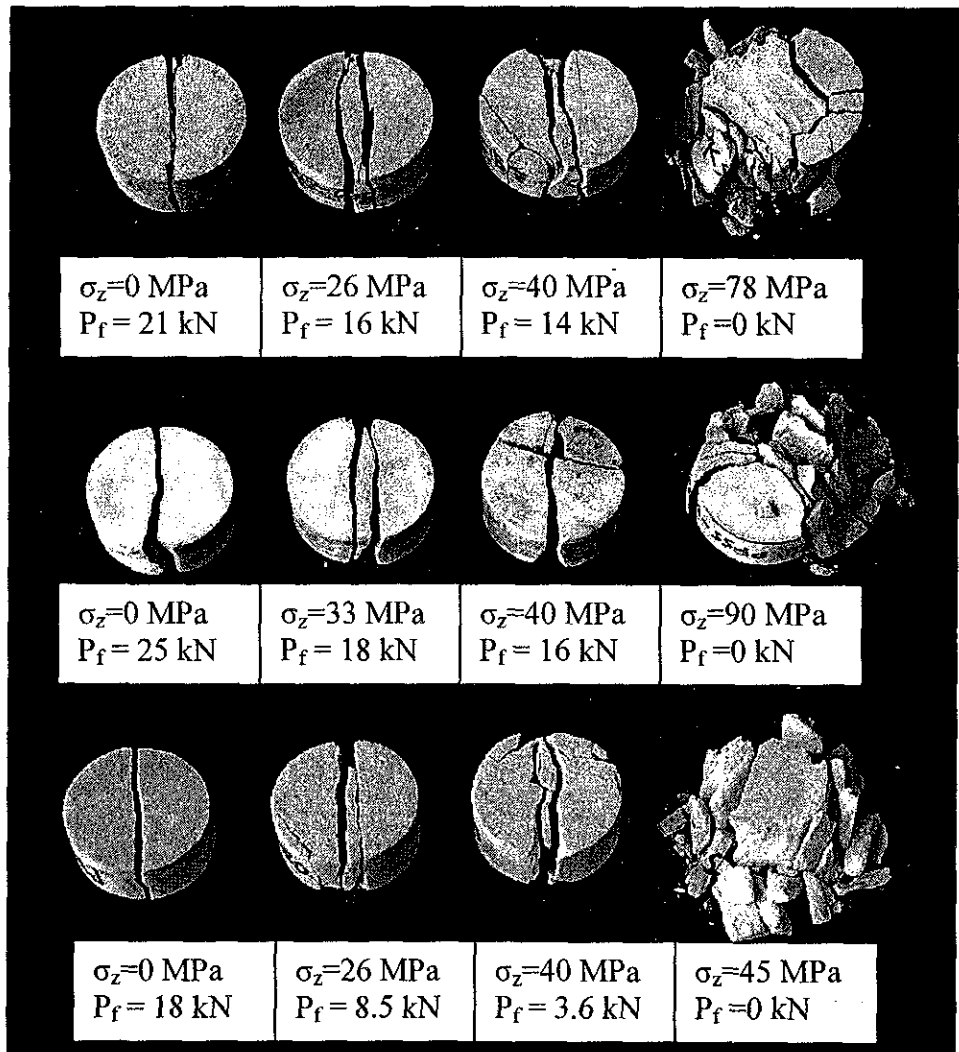
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบระหว่างค่าแรงกด (P_f) และค่าความเค้นหลักกลาง (σ_z) จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน



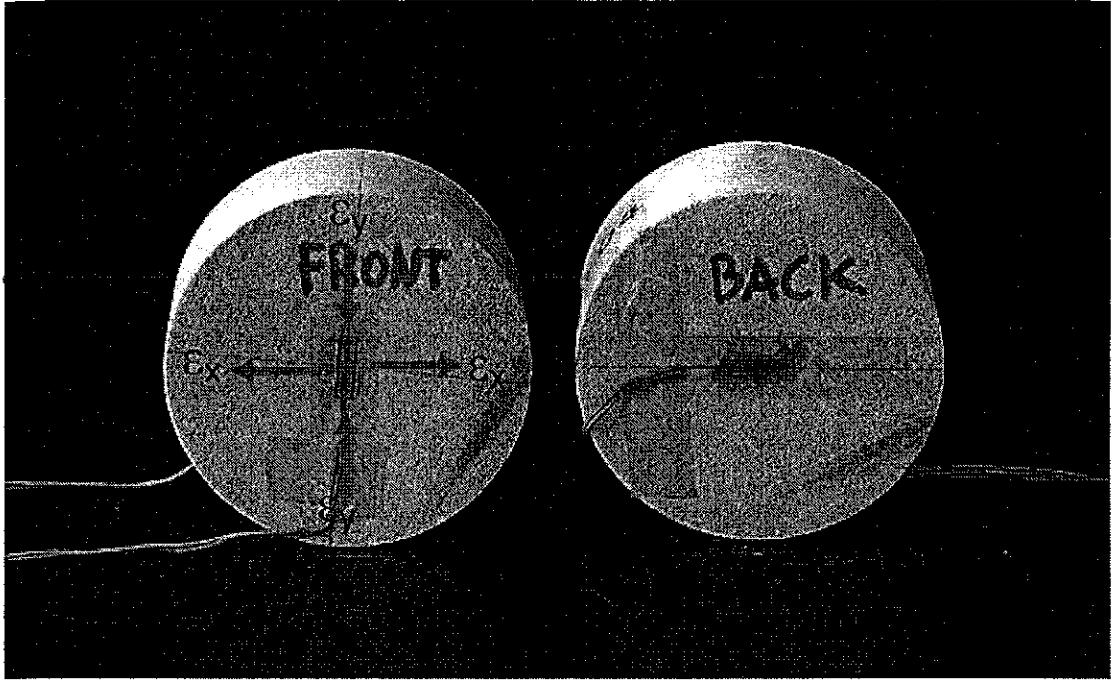
รูปที่ 5.15 ผลของค่าความเค้นกด (σ_y) และค่าความเค้นดึง (σ_x) ภายใต้ความเค้นกลาง (σ_z) ของหินทราย



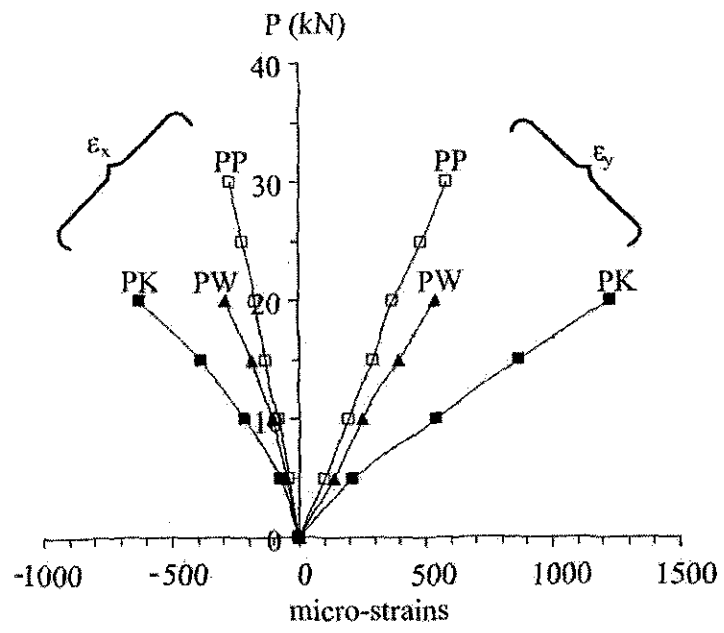
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบในรูปวงกลม Mohr ของหินทราย 3 ชนิด



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบของหินทรายชุดภูกระดึง (บน) หินทรายชุดภูพาน (กลาง) และหินทรายชุดพระวิหาร (ล่าง)



รูปที่ 5.18 Strain gages ที่ติดตั้งบนผิวของตัวอย่างหินเพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัวอย่างหินรับแรงกด ตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน



รูปที่ 5.19 ผลของการวัดค่าความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซึลเลียนของหิน

ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดทั้งสองแกน (σ_y และ σ_x) กับแรงกดในแนวเส้นที่กระทำบนตัวอย่างหิน (P) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของ Poisson สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hondros (1959)

$$v = -\frac{3\varepsilon_x + \varepsilon_y}{3\varepsilon_y + \varepsilon_x} \quad (5.14)$$

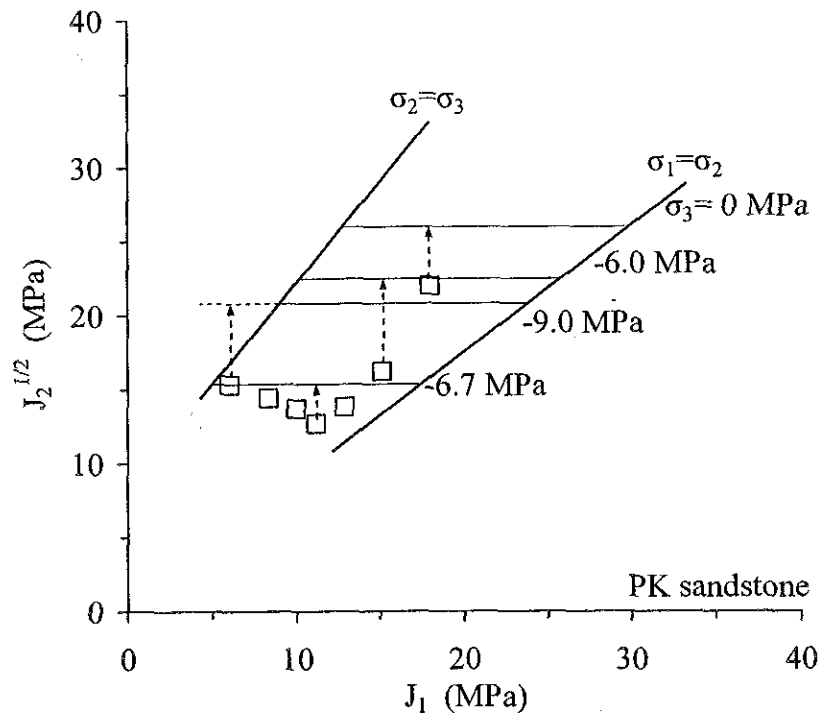
$$E = \frac{2P(1-v)^2}{\pi Dt(\varepsilon_x + v\varepsilon_y)} \quad (5.15)$$

สมการนี้จะสมมติให้หินมีความยืดหยุ่นอยู่ในเชิงเส้นตรงและเท่ากันทุกทิศทาง และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงกด ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนของ Poisson (v) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซซิลเลียนกับค่าที่ได้จากการทดสอบในเครื่องกดแบบสามแกนจริง (Polyaxial load frame) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบจะมีความขัดแย้งกันเนื่องจากภายใต้สภาวะแรงดึงนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าต่ำกว่าภายใต้สภาวะแรงกด

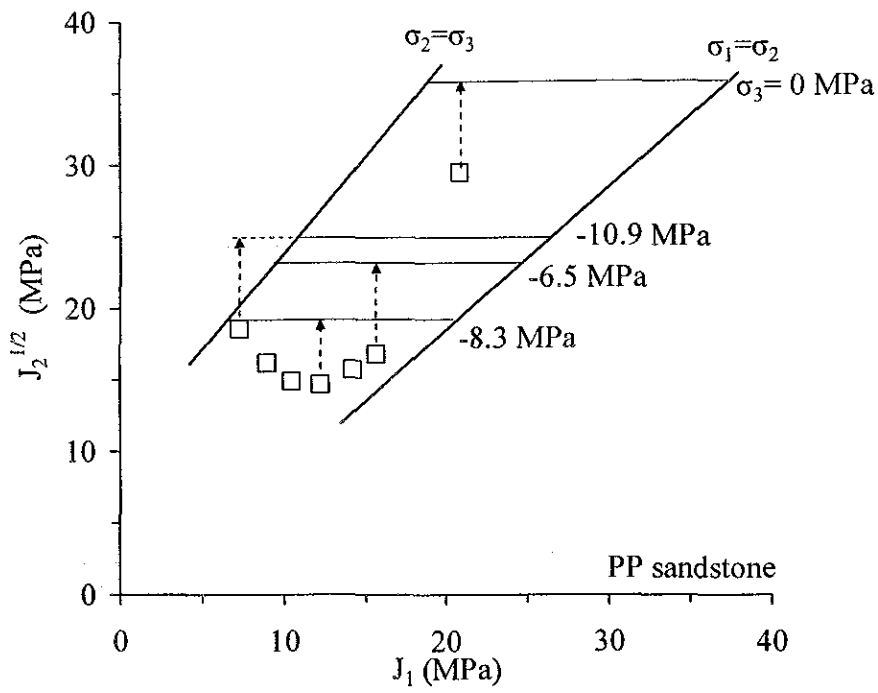
5.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์เกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงดึงได้นำเกณฑ์ของ Coulomb และเกณฑ์ของ Wiebols and Cook มาพิจารณาโดยการคำนวณค่า $\sigma_2^{1/2}$ และ σ_1 ในการทดสอบจะกำหนดให้ค่าความเค้นดึง (σ_x) เป็นค่าความเค้นรอง (σ_3) และค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) เป็นค่าความเค้นหลัก (σ_1) และค่าความเค้นในแนวแกนจะกำหนดเป็นค่าความเค้นกลาง (σ_2) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าความเค้นในแนวแกนมีค่ามากขึ้นจนถึงจุดที่มีค่ามากกว่าค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) จะทำให้ค่าความเค้นในแนวแกนกลายเป็นค่าความเค้นหลัก (σ_1) และค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) จะกลายเป็นค่าความเค้นกลาง (σ_2)

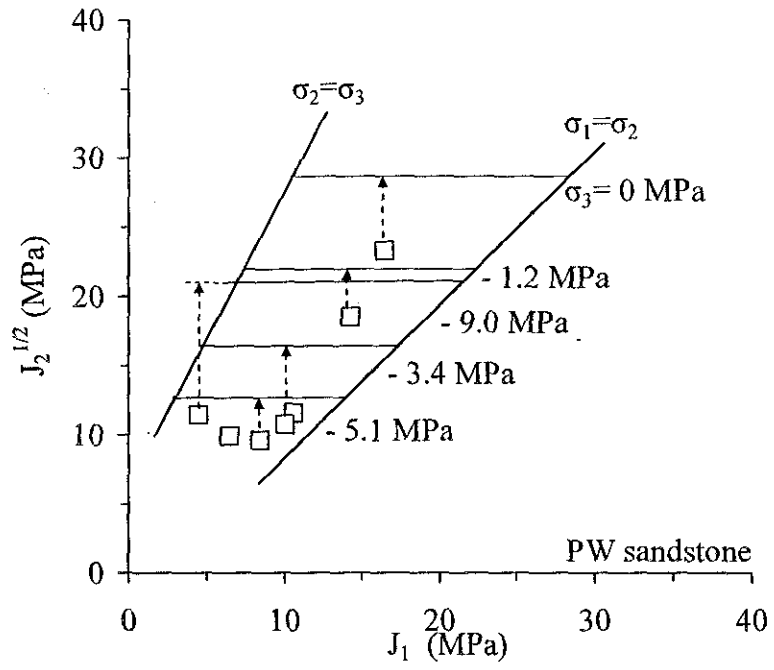
เกณฑ์ของ Coulomb จะนำมาใช้พิจารณาเฉพาะค่าความเค้นหลัก (σ_1) และค่าความเค้นรอง (σ_3) เท่านั้น ส่วนค่าความเค้นกลาง (σ_2) จะไม่นำมาพิจารณาร่วมด้วย รูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.22 แสดงผลการคำนวณค่า $\sigma_2^{1/2}$ ของหินทรายทั้ง 3 ชนิด จากกราฟค่า $\sigma_2^{1/2}$ และค่าความเค้นรอง (σ_3) มีค่าลดลงเมื่อค่าความเค้นในแนวแกนเป็นค่าความเค้นหลัก (σ_1) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) เปลี่ยนเป็นค่าความเค้นหลัก (σ_1) ผลที่ได้จากการคำนวณนี้จะมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบประมาณ 15-20%



รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของหินทรายชุดภูกระดึง โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb

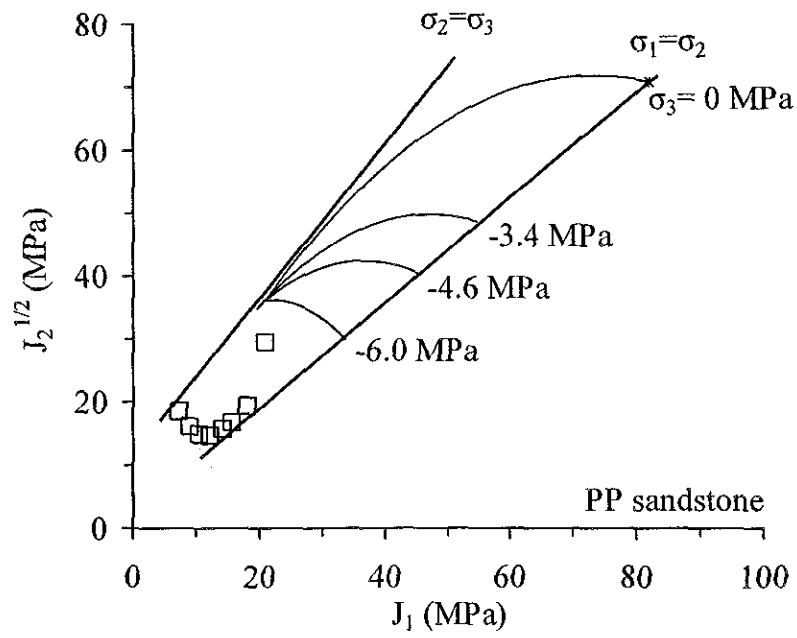


รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของหินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb

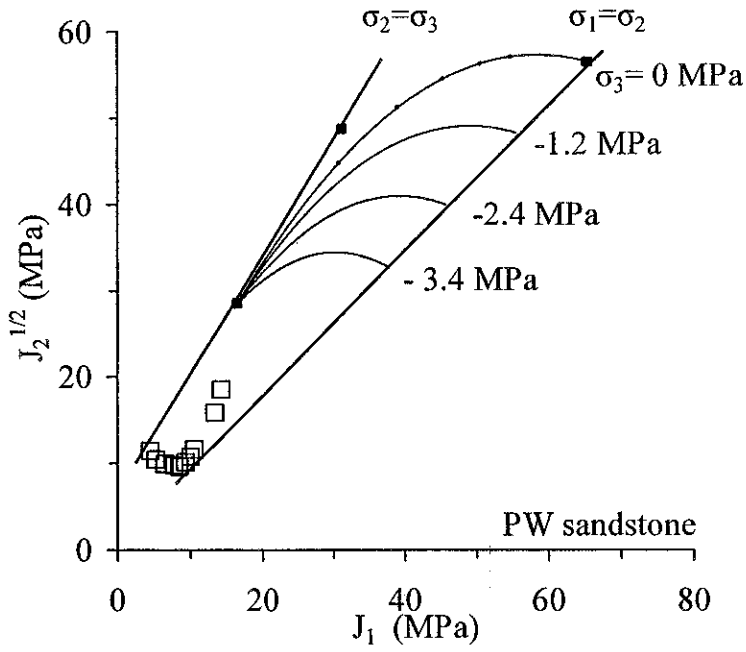


รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซึลเลียนของหินทราย
ชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Coulomb

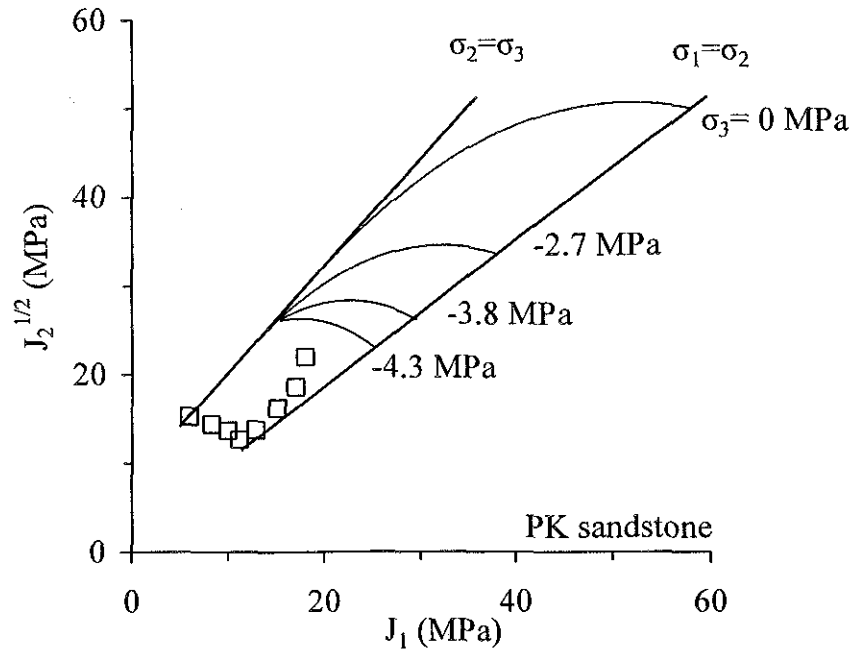
รูปที่ 5.23 ถึงรูปที่ 5.25 แสดงผลการคำนวณค่า $J_2^{1/2}$ ของหินทรายทั้ง 3 ชนิด ตามเกณฑ์การพิจารณาของ Wiebols and Cook จากกราฟค่า $J_2^{1/2}$ จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเค้นรอง (σ_y) มีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้นั้นไม่เป็นไปตามผลที่ได้จากการทดสอบจริงที่พบว่า ค่า $J_2^{1/2}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเป็นค่าของความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) เป็นค่าความเค้นหลัก (σ_1) จึงสามารถกล่าวได้ว่าเกณฑ์การพิจารณาของ Wiebols and Cook นั้นไม่สามารถนำมาพิจารณาเกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงดึงได้



รูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของหินทรายชุดภูพาน โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook



รูปที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเดียนของหินทราย
ชุดพระวิหาร โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook



รูปที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 จากการทดสอบแบบบราซิลเลียนของหินทราย หุดถูกกระตั้ง โดยใช้เกณฑ์ของ Weibols and Cook

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของการประดิษฐ์เครื่องทดสอบหินในงานวิจัยนี้คือ เพื่อให้ทดสอบหินภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง (True Triaxial Loading หรือเรียกว่า Poly-axial Loading) โดยใช้แนวคิดใหม่สำหรับกลไกการกด เพื่อลดต้นทุนการผลิตเครื่องทดสอบให้มีราคาถูก มีความแม่นยำสูง โดยใช้ปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบ 3 ประการคือ 1) เพื่อสามารถให้ค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ที่คงที่ในขณะที่ทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบมาตรฐาน (ASTM) และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

การทดสอบแรงกดในสามแกนจริงในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงขีดความสามารถของสิ่งประดิษฐ์ โดยจะทำการทดสอบใน 2 รูปแบบ คือ 1) การทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริง และ 2) การทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นในแนวแกน การทดสอบทั้งสองมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าแรงกดสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทราย 3 ชนิด ได้แก่ หินทรายชุกฎพูน หินทรายชุกฎพระวิหาร และหินทรายชุกฎกระดิ่ง

ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนของแรงบนเครื่องทดสอบที่ได้จากการสอบเทียบโดย Electronic load cell มีค่าเท่ากับ 17 เท่า ซึ่งจะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง แรงกระทำด้านข้างได้ออกแบบไว้ให้สามารถรับแรงได้ถึง 100 kN เครื่องทดสอบรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร ถึง $10 \times 10 \times 20$ เซนติเมตร และสามารถทำการทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน อีกทั้งยังสามารถทำการทดสอบในรูปแบบอื่นๆ ได้ เช่น การทดสอบความคืบในสามแกนจริง การทดสอบแรงดึงแบบสี่จุดภายใต้ค่าความเค้นและการทดสอบแรงดึงแบบวงแหวนภายใต้ค่าความเค้นในแนวแกน

ผลที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนจริงสามารถสรุปได้ว่า หินทรายทั้ง 3 ชนิดแสดงพฤติกรรมแบบ transversely isotropic กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหินจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหินเล็กน้อย ส่วนอัตราส่วนของ Poisson ในทิศทางที่ขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหินจะมีค่าน้อยกว่าในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ส่วนผลกระทบของค่าความเค้นกลาง (σ_2) ต่อค่าความเค้นหลักที่จุดแตก (σ_1) แสดงให้เห็นว่าค่า σ_1 ที่จุดแตกจะมีค่า

เพิ่มขึ้นเมื่อ σ_2 มีค่าเพิ่มขึ้น และผลกระทบของค่าความเค้นกลาง (σ_2) จะแสดงให้เห็นชัดขึ้นเมื่อค่า σ_3 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลการทดสอบอื่นๆ (เช่น Haimson and Chang, 2000; Colmenares and Zoback, 2002; Haimson, 2006) ในขณะเดียวกันผลของการทดสอบภายใต้สภาวะ $\sigma_2 = \sigma_3$ จะมีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Kenkhunthod and Fuenkajorn (2009) ส่วนผลที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิลเลียนภายใต้ค่าความเค้นในแนวแกนพบว่า ค่าของแรงกดในแนวแกน (P) จะลดลงเมื่อความเค้นในแนวแกน σ_2 มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความเค้นดึง (σ_x) และค่าความเค้นกดในแนวตั้ง (σ_y) ที่มีค่าลดลงเมื่อความเค้นในแนวแกน (σ_2) มีค่าเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของหินในสามแกนโดยการสอบเทียบจากเกณฑ์ของ Coulomb และเกณฑ์ของ Modified Wiebols and Cook ในรูปแบบของ $J_2^{1/2}$ และ J_1 พบว่า เกณฑ์ของ Coulomb ไม่เพียงพอต่อการอธิบายค่าความเค้นกดในสามแกนจริง แต่จะสามารถนำมาอธิบายได้เมื่อค่าความเค้นอยู่ภายใต้แรงดึงโดยมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากการทดสอบประมาณ 15-20% ในขณะเดียวกันผลการวิเคราะห์จากเกณฑ์ของ Modified Wiebols and Cook พบว่าภายใต้สภาวะที่ค่าของ σ_3 มีค่าต่ำ ผลที่ได้จากการคาดคะเนจากเกณฑ์ของ Modified Wiebols and Cook จะมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริงแต่จะสามารถอธิบายค่าความแข็งแรงของหินสูงสุดในสามแกนได้ดีภายใต้สภาวะที่ σ_3 มีค่าสูง แต่ไม่สามารถนำมาพิจารณาเกณฑ์การแตกของหินภายใต้แรงดึงในสามแกนได้

ผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวข้างต้นเป็นหลักฐานยืนยันว่า เครื่องกดทดสอบที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ทดสอบหินภายใต้ค่าความเค้นในสามแกนจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพและบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

6.2 ข้อเสนอแนะ

การที่เครื่องกดทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถให้แรงในสามแกนที่ต่างกัน ได้ จึงสามารถทดสอบหินในสภาวะความเค้นที่นอกเหนือไปจากการทดสอบแบบมาตรฐานสากล (ASTM) ได้ ซึ่งจะให้ผลที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงของหินในภาคสนาม การทดสอบขั้นสูงที่สามารถนำเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงมาประยุกต์ใช้และจะเป็นประโยชน์ต่อวิทยาการกลศาสตร์หินมีหลายรูปแบบ อาทิ

- 1) การทดสอบความคืบในสามแกนจริง (Poly-axial creep Testing)
- 2) การผันแปรอัตราการกดในสามแกนจริง
- 3) การทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวนโดยมีค่าความเค้นในแนวแกนด้วย
- 4) การทดสอบการพัฒนาของการแตกในหินภายใต้ค่าความเค้นในสามแกน และ
- 5) การทดสอบค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินภายใต้สภาวะความเค้นในสามแกนจริงที่ไม่เท่ากัน เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Al-Ajmi, A.M., and Zimmerman, R.W. (2005). Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 42:431-439.
- Alexeev, A. D., and Revva, V. N., Alyshev, N. A., and Zhitlyonok, D. M. (2004). True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction. **International Journal of Coal Geology**. 58: 245-250.
- Alexeev, A. D., Revva, V. N., Alyshev, N. A. and Zhitlyonok, D. M. (2004). True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction. **International Journal of Coal Geology**. 58 (4): 245-250.
- Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J. D., Al-Shap, T. B., and Al-Siyabi, H. (2002). **Geotechnical Testing Journal**. Vol. 25, Issue 2.
- Alsayed, M. I. (2002). Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 39: 355-366.
- Amadei, B. and Robinson, J. (1986). Strength of rock in multi-axial loading conditions. **In Proceedings of the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics**. Tuscaloosa, Alabama, pp. 47-55.
- Anhdan, L. Q., and Koseki, J., and Hayano, K., and Sato, T. (2005). True triaxial apparatuses with two rigid boundaries. **Geo-Frontiers 2005**.
- ASTM D2664-86. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. **In 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. **In Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4543-85. Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. **In Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

- Benz, T., and Schwab, R. (2008). A quantitative comparison of six rock failure criteria. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 45: 1176-1186.
- Brace, W.F. (1964). Brittle fracture of rocks. In *State of stress in the earth's crust*. Elsevier, N.Y., pp. 111-174.
- Brook, N. (1993). The measurement and estimation of basic rock strength. In J. A. Hudson (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practices, and Projects**. Oxford: Pergamon Press.
- Cai, M. (2008). Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries—Insight from numerical modeling. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 45: 763-772.
- Chang, C., and Haimson, B. (2005). Non-dilatant deformation and failure mechanism in two Long Valley Caldera rocks under true triaxial compression. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 42: 402-414.
- Chen, C. H., and Pan, E. and Amadei B. (1998). Determination of the deformability and tensile strength of anisotropic rocks using Brazilian tests. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 35: 43-61.
- Cheon, D. S., Park, S. J. C. and Ryu, C. (2006). An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 21 (3-4): 448-449. 0
- Claesson, J., and Bohlooli, B. (2002). Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 35(1): 43-61.
- Colmenares, L. B., and Zoback, M. D. (2002). A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 39: 695-729.
- Cornet, F. H. (1993). Stresses in rock and rock masses. In J. A. Hudson (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practices, and Projects**. Oxford: Pergamon Press.
- D.S. Cheon, S. Jeon, C. Park, C. Ryu. (2006). An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 21: 448-449.

- Dihoru, L., Wood, D. M., Sadek, T., and Lings, M. (2005). A neural network for error prediction in a true triaxial apparatus with flexible boundaries. **Computers and Geotechnics**. 32: 59-71.
- Elliott, G. M. (1993). Triaxial testing for rock strength. In J. A. Hudson (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practices, and Projects**. Oxford: Pergamon Press.
- Esaki, T., and Kimura, T. (1989). Mechanical behaviour of rocks under generalized high stress conditions. In **Rock at Great Depth**, Maury, V. and Fourmaintraux, D. (eds), Vol. 1, Balkema, Rotterdam. pp. 123-130.
- Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T., and Labuz, J. F. (2002). Simulation of failure around a circular opening in rock. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 39: 507-515.
- Franklin, J.A., and Dusseault, M.B. (1989). **Rock Engineering**. McGraw-Hill Inc., U.S.A., pp. 246-247.
- Franklin, J.A., and Hoek, E. (1970). **Developments in triaxial testing equipment**. *Rock Mechanics*. 2: 223-228.
- Gau, Q.Q., Cheng, H.T., and Zhuo, D.P. (1983). The strength, deformation and rupture characteristics of red sandstone under polyaxial compression. In **Proceedings of the 5th. Int. Cong. Rock Mech.** Melbourne, Australia, Vol. A, pp. 157-160.
- Haimson, B. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of westerly granite. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 37: 285-296.
- Haimson, B. (2006). True triaxial stresses and the brittle fracture of rock. **Pure and Applied Geophysics**. Volume 163, Issue 5-6, Basel, pp. 1101-1130.
- Haimson, B. and Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 37 (1-2): 285-296.
- Haimson, B. C., Chang, C., and Chang, C. (2001). True triaxial testing of crystalline rocks reveals new mechanical properties and micromechanics of brittle fracture that go unnoticed in conventional triaxial tests. **American Geophysical Union**. T12G-06.

- Handin, J., Heard, H.C., and Maguirk, J.N. (1967). Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite and glass at different temperatures and strain rates. **J. Geophys. Res.** 72: 611-640.
- Hoek, E., and Brown, E.T. (1980). **Underground excavations in rock.** IMM. London, pp. 133-136.
- Hoek, E., and Franklin, J.A. (1968). A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock. **Trans. Inst. Min. Metall.** London, Section A, 77, pp. 22-26.
- Hojem, J.M.P., and Cook, N.G.W. (1968). The design and construction of a triaxial and polyaxial cell for testing rock specimens. **South African Mech. Engr.**, 18, pp. 57-61.
- 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.
- Huang, W., Sun, D. and Sloan, S. W. (2006). Analysis of the failure mode and softening behaviour of sands in true triaxial tests. **International Journal of Solids and Structures.** In Press, Corrected Proof, Available online 22 June 2006
- Ismail, M. A., Sharma, S. S., and Fahey, M. (2005). A small true Triaxial apparatus with wave velocity measurement. **ASTM International.** West Conshohocken.
- Jaeger, J.C., and Cook, N.G.W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics** (3rd. Edn.). Chapman & Hall, London, pp. 105-106.
- Jianhong, Y., and Wu, F. Q. and Sun J.Z. (2008). Estimation of Tensile Elastic Modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.** 46(3): 568-576.
- Joussineau, G. D., and Petit, J. P., and Gauthier, B. D. M. (2003). **Photoelastic and numerical investigation of stress distributions around fault models under biaxial compressive loading conditions.** Tectonophysics 363. pp. 19-43.
- Kenkhunthod, N. and Fuenkajorn, K. (2009). Effects of loading rate on compressive strength of sandstones under confinement. **Proceedings of the Second Thailand Rock Mechanics Symposium.** Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. pp. 271-282.

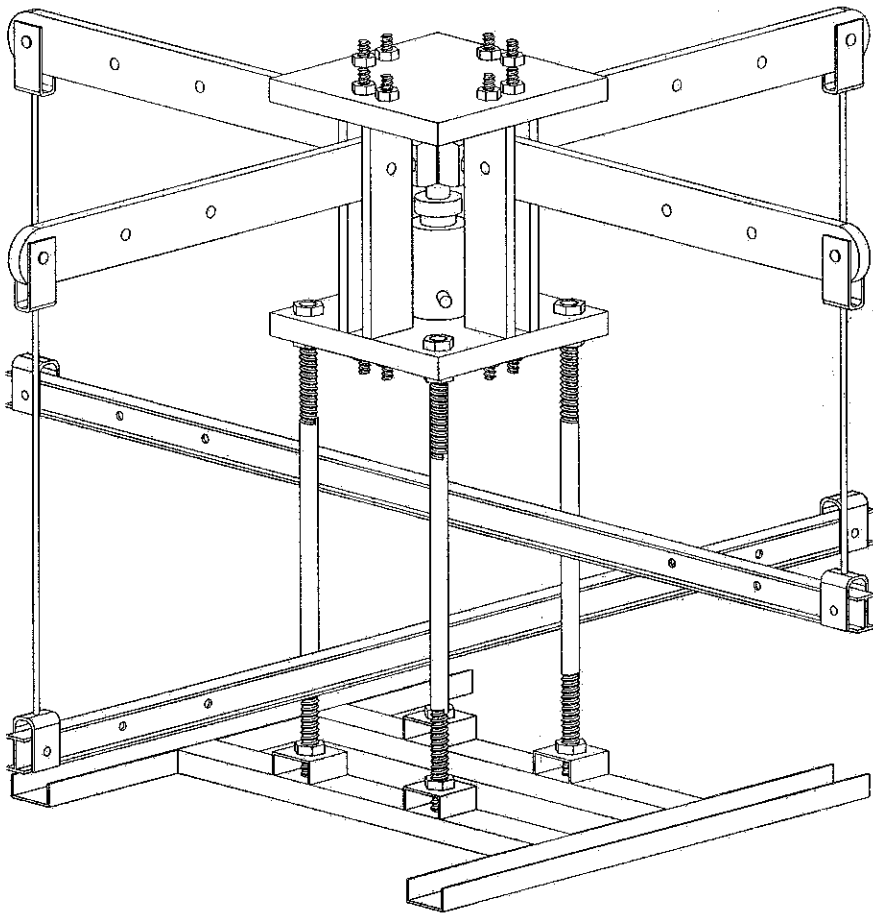
- KwaŚniewski, M., Takahashi, M. and Li, X. (2003). Volume changes in sandstone under true triaxial compression conditions. **ISRM 2003–Technology Roadmap for Rock Mechanics**. South African Institute of Mining and Metallurgy. pp. 683-688.
- Liao, J. J., Yang, M. T. and Hsieh, H. Y. (1997). Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 34(5): 831-849.
- Marsal, R. J. (1973). **A true triaxial apparatus to test rockfills**. Defense Technical Information Center.
- Mogi, K. (1970). Effect of triaxial stress system on rock failure. **Rock Mech. In Japan**, 1. pp. 53-55.
- Mogi, K. (1971). Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. **J. Geophys. Res.**, 76(5). pp. 1255-1269.
- Mogi, K. (1977). Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquake precursors. **J. Phys. Earth.**, 25(suppl.). pp. S203-S217.
- Ohokal, M., Funatol, A. and Takahashi, Y. (1997). Tensile test using hollow cylindrical specimen. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. Vol. 34, No. 3-4, 1997 ISSN 0148-9062.
- Oku, H., Haimson, B. and Song, S.R. (2007). **True triaxial strength and deformability of the siltstone overlying the Chelungpu fault (Chi-Chi earthquake), Taiwan**. **Geophysical Research Letters**. 34(9).
- Rao, K. S. and Tiwari, R. P. (2002). **Physical simulation of jointed model materials under biaxial and true triaxial stress states**. Research Report, IIT Delhi, India. pp. 30.
- Reddy, K.R., Saxena, S.K. and Budiman, J.S. (1992). Development of a True Triaxial Testing Apparatus. **Geotechnical Testing Journal**. 15(2): 89-105.
- Scholz, C.H. (1990). **The mechanics of earthquakes and faulting**. Cambridge University Press, U.K., pp. 22-23.
- Schwab, R. and Benz, T. (2008). A quantitative comparison of six rock failure criteria. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 45: 1176-1186.
- Sibai, M., Henry, J. P. and Gros, J. C. (1997). Hydraulic fracturing stress measurement using a true triaxial apparatus. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34 (3-4): 289.e1-289.e10.

- Singh, B., Goel, R.K., Mehrotra, V.K., Garg, S.K. and Allu, M.R. (1998). Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass. **Tunneling and Underground Space Technology**. 13: 71-79.
- Smart, B. D. G., Somerville J.M., and MacGregor, K.J. (1991). The prediction of yield zone development around a borehole and its effect on drilling and production. **In Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science. Proceedings of the 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics**. Norman, Oklahoma, pp. 961-970.
- Smart, B. D. G., Somerville, J. M., and Crawford, B. R. (1999). A rock test cell with true triaxial capability. **Geotechnical and Geological Engineering, Earth and Environmental Science and Engineering**. Vol. 17 No. 3-4, Springer Netherlands, pp. 157-176.
- Smart, B. G. D. (1995). A true triaxial cell for testing cylindrical rock specimens. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 32(3): 269-275.
- Song, I. and Haimson, B. C. (1997). Polyaxial strength criteria and their use in estimating in situ stress magnitudes from borehole breakout dimensions. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34 (3-4): 116.e1-116.e16.
- Sture, S., and Desai, C.S. (1979). Fluid cushion truly triaxial or multiaxial testing device. **Geotech. Testing J.**, 2. pp. 20-33.
- 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.
- Tiwari, R. P., and Rao, K. S. (2004). Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 41(30): 2A 141-6.
- Tiwari, R. P., and Rao, K. S. (2006). Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement. **Engineering Geology**. 84: 112-129.
- Wang, Q., and Lade, P. V. (2001). Shear banding in true triaxial tests and its effect on failure in sand. **J. Engrg. Mech.** Volume 127, Issue 8, pp. 754-761.
- Wawersik, W. R., Carlson, L. W., Holcomb D. J., and Williams, R. J. (1997). New method for true-triaxial rock testing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**. Volume 34, Number 3, pp. 365-365.
- Wiebols, G.A., and Cook, N.G.W. (1968). An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 5: 529-549.

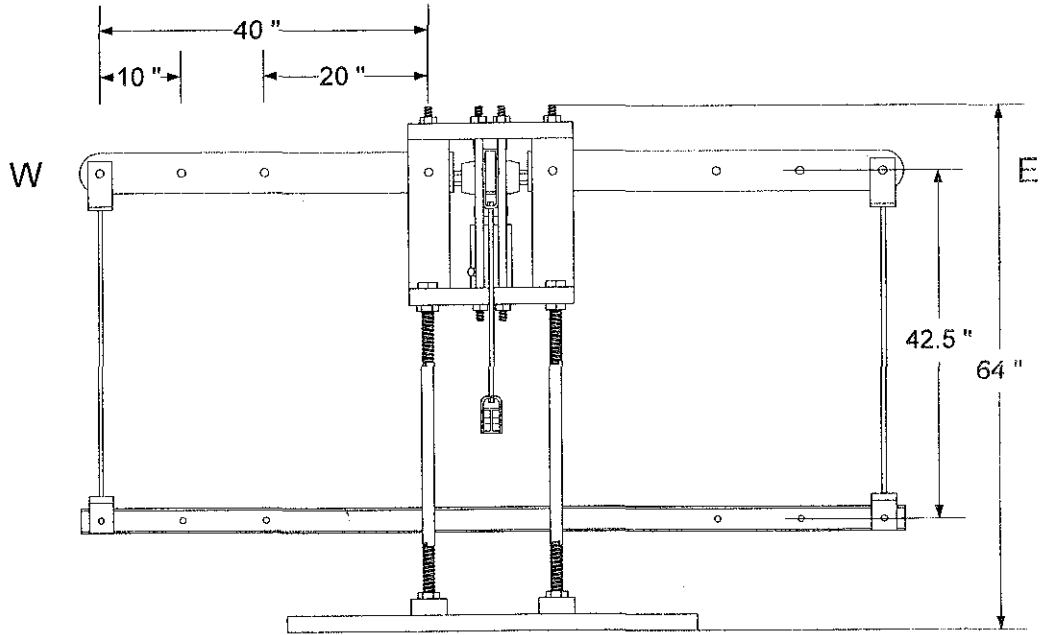
- Wijk, G. (1978). Some new theoretical aspects of indirect measurements of tensile strength of rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 15: 149-160
- Worotnicki, G. (1993). CSIRO Triaxial stress measurement cell. In J. A. Hudson (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practices, and Projects**. Oxford: Pergamon Press.
- Yang, X. L., Zou, J. F. and SUI, Z. R. (2007). Effect of intermediate principal stress on rock cavity stability. **Journal Central South University Technology**. s1-0165-05
- You, M. (2008). True-triaxial strength criteria for rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 46: 115-127.

ภาคผนวก ก

ผลการออกแบบเครื่องทดสอบในสามแกนจริง

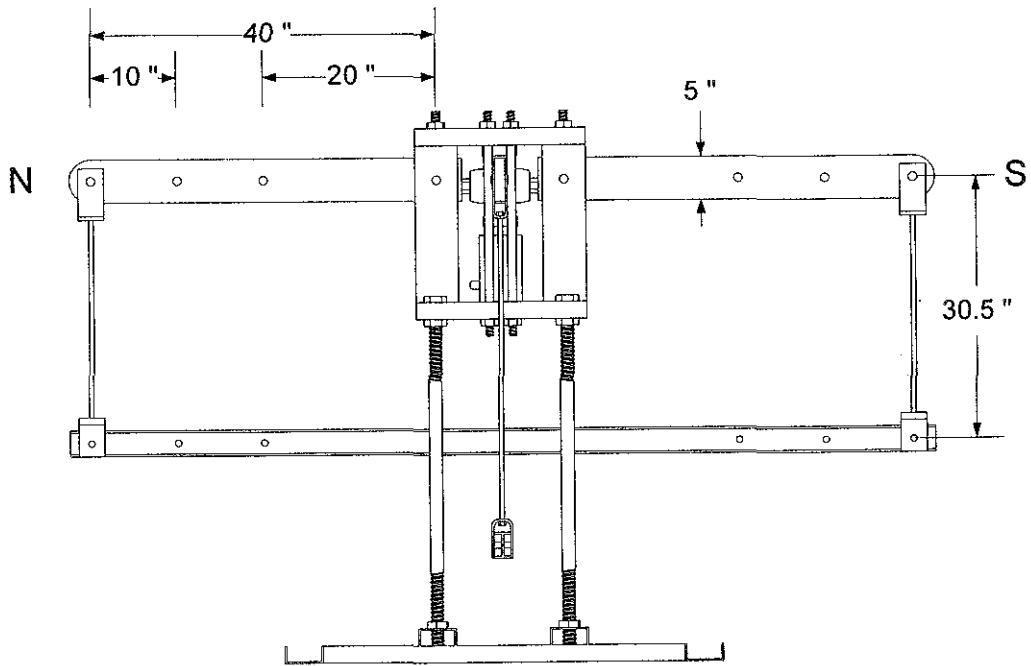


รูปที่ ก-1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง

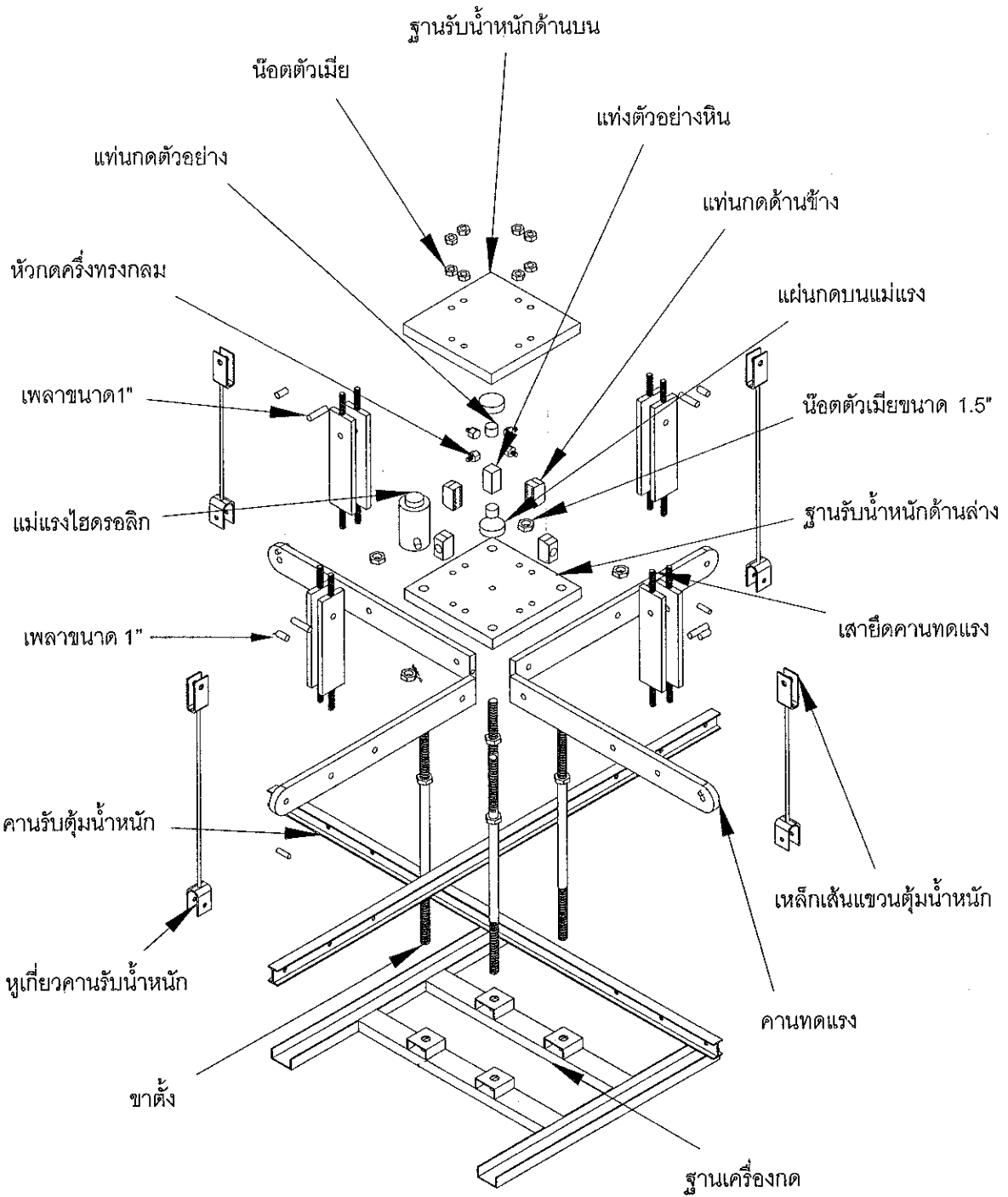


รูปที่ ก-2 ภาพตัดขวางของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงมองจากทางทิศใต้

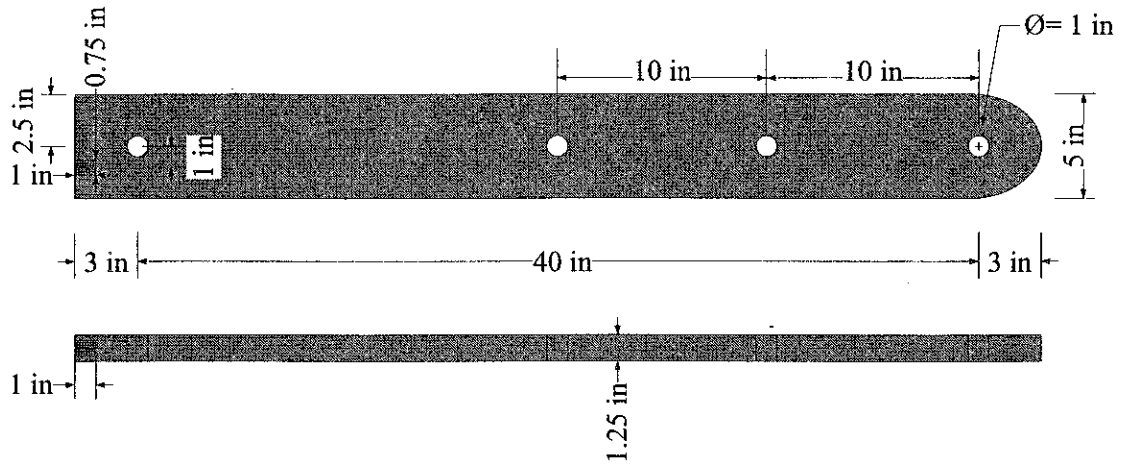
ก-3



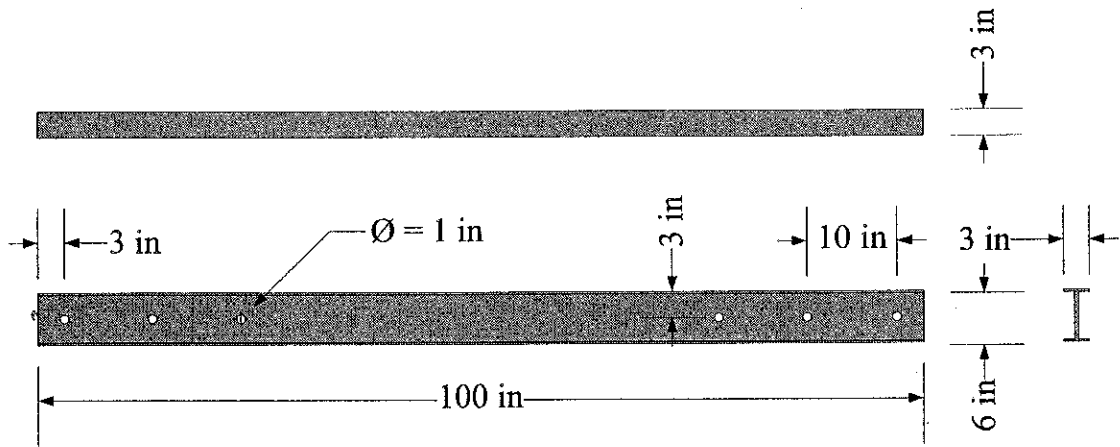
รูปที่ ก-3 ภาพตัดขวางของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริงมองจากทางตะวันออก



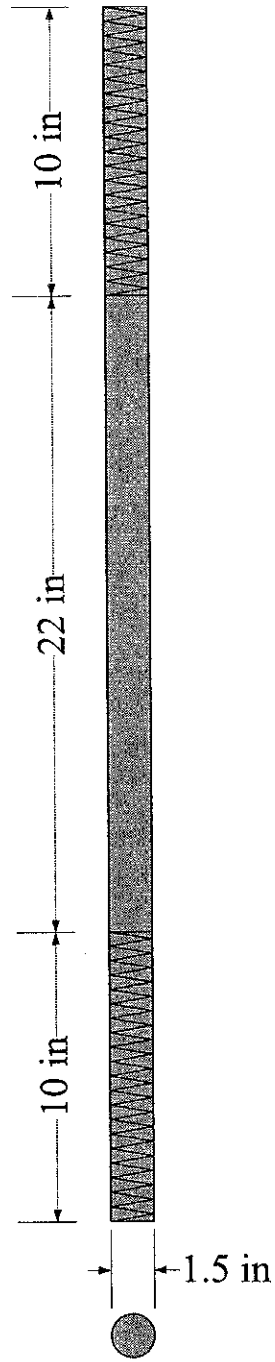
รูปที่ ก-5 ภาพชิ้นส่วนของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



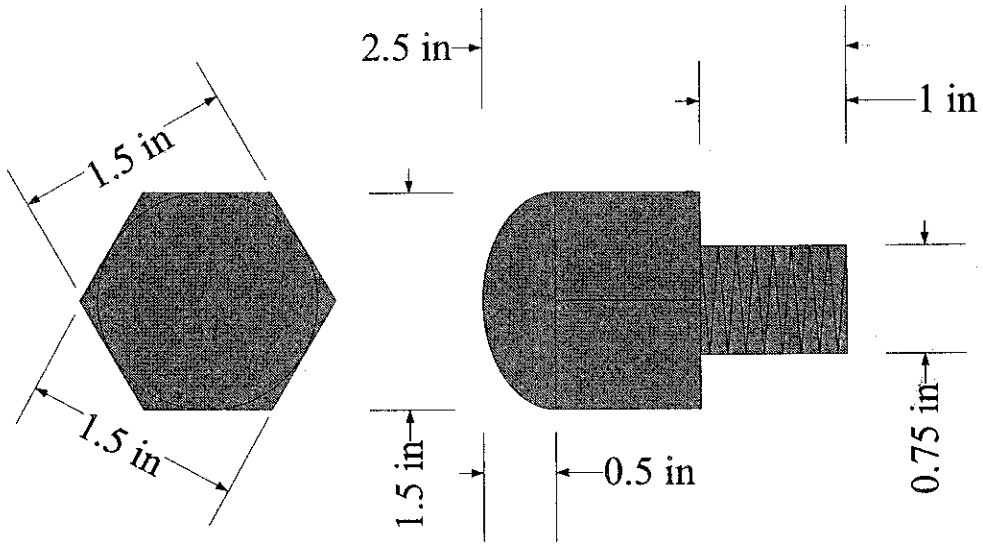
รูปที่ ก-6 ภาพตัดขวางของกานทดแรงของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



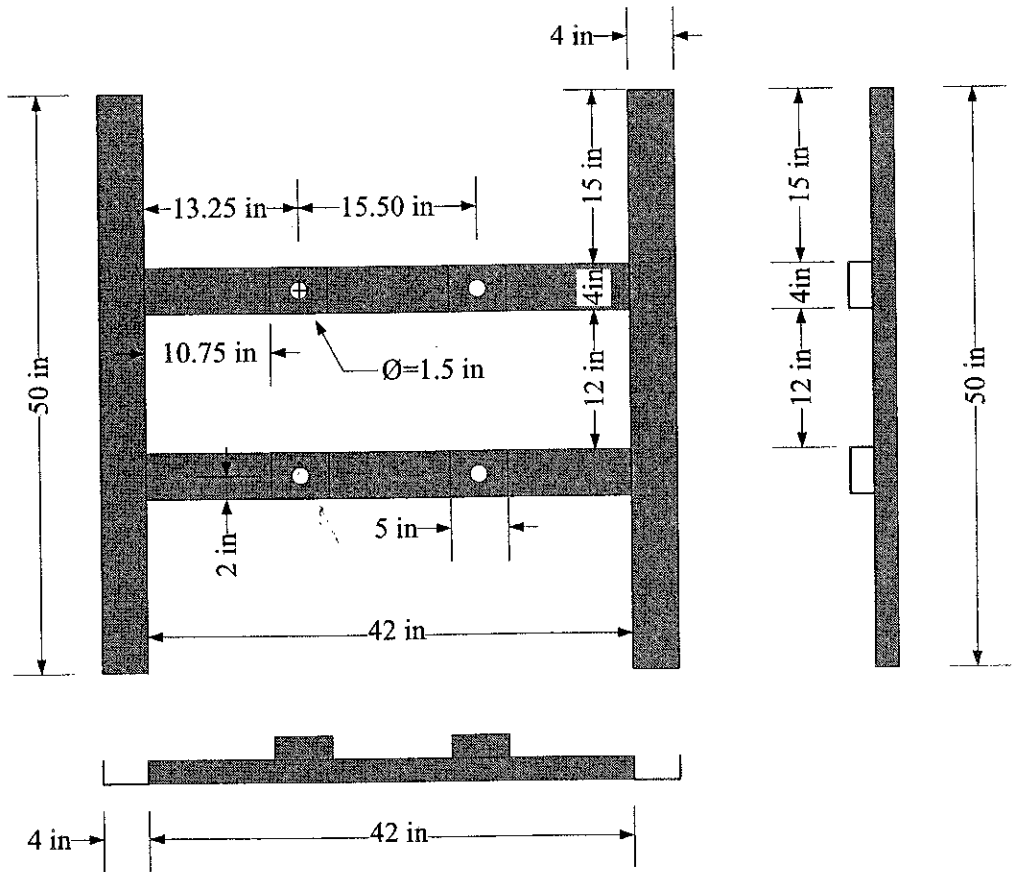
รูปที่ ก-7 ภาพตัดขวางของถานรับต้วน้ำหนักของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



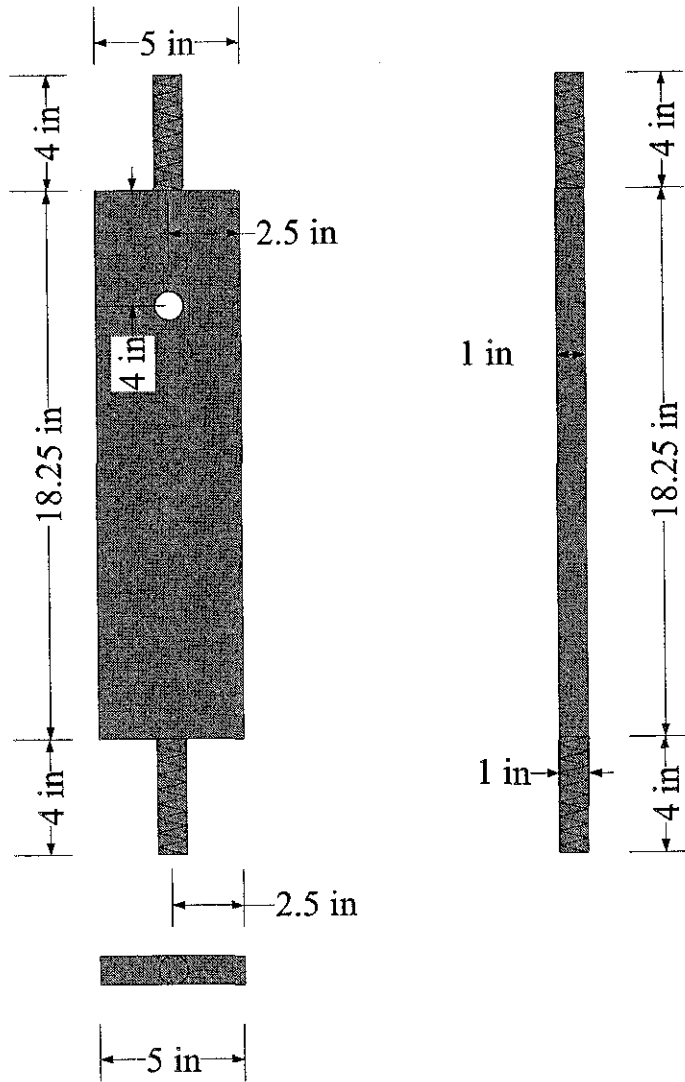
รูปที่ ก-8 ภาพตัดขวางของขาตั้งของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง



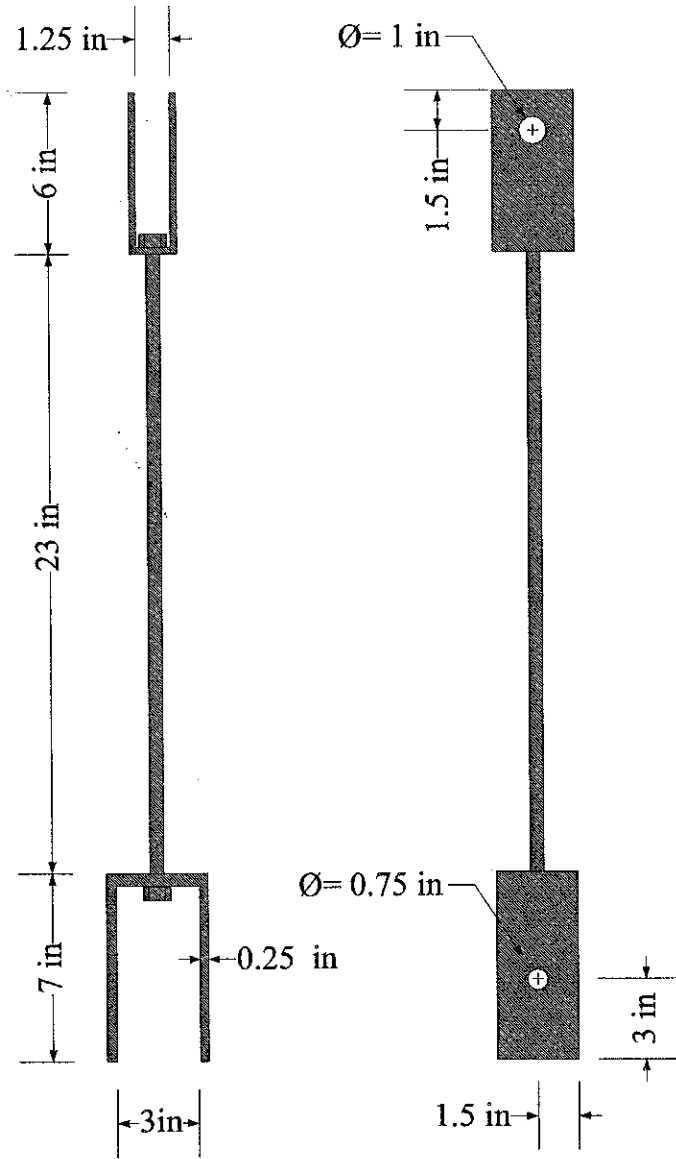
รูปที่ ก-9 ภาพตัดขวางของหัวคคครึ่งทรงกลมของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



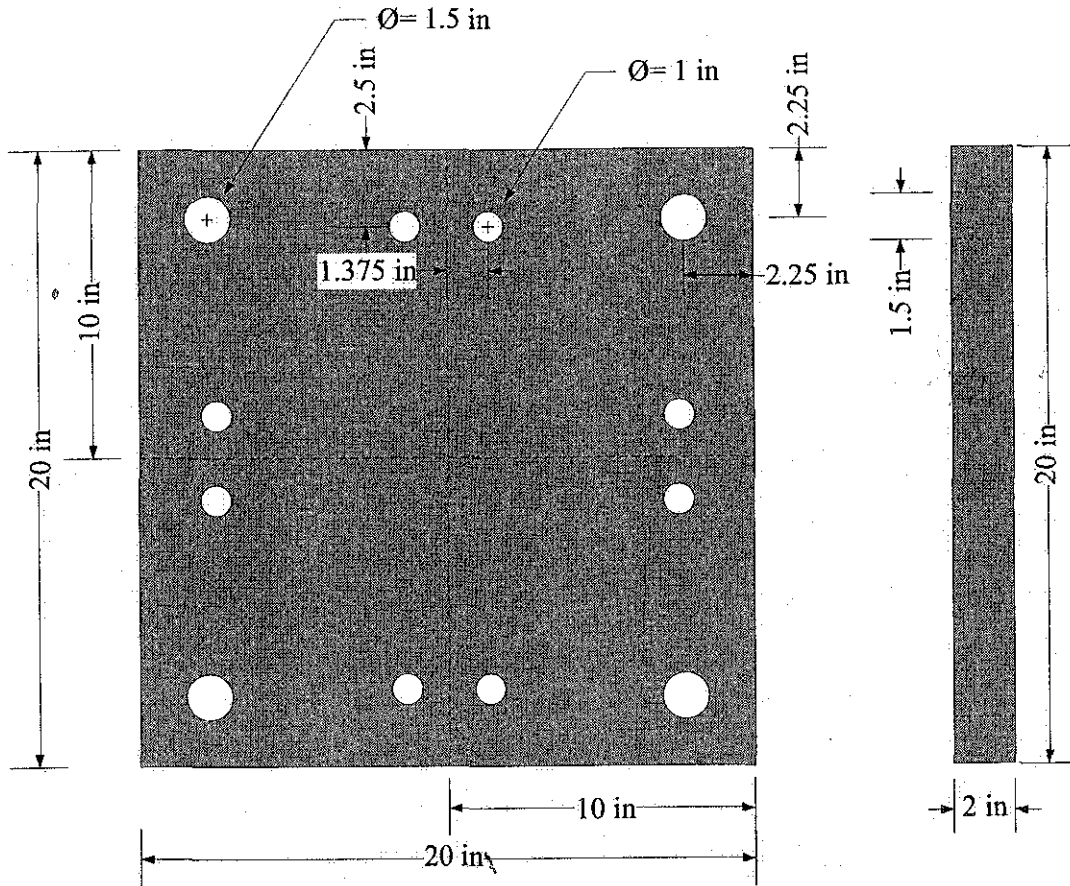
รูปที่ ก-10 ภาพตัดขวางของฐานเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



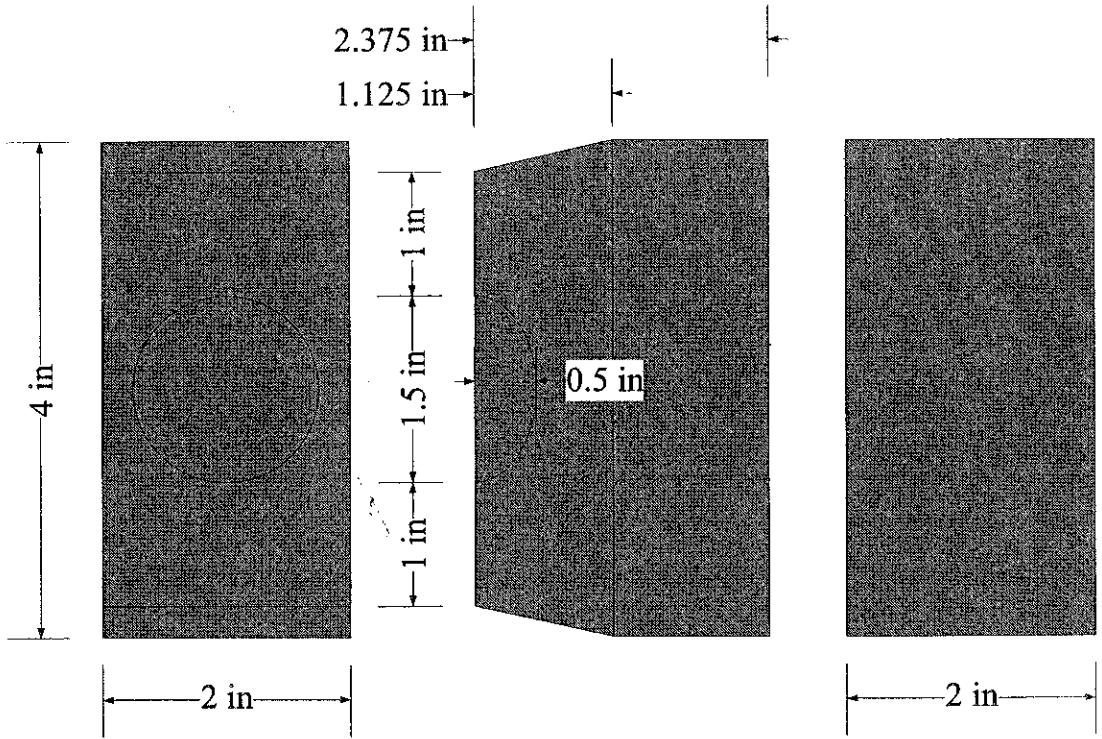
รูปที่ ก-11 ภาพตัดขวางของเสายึดคานทคแรงของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง



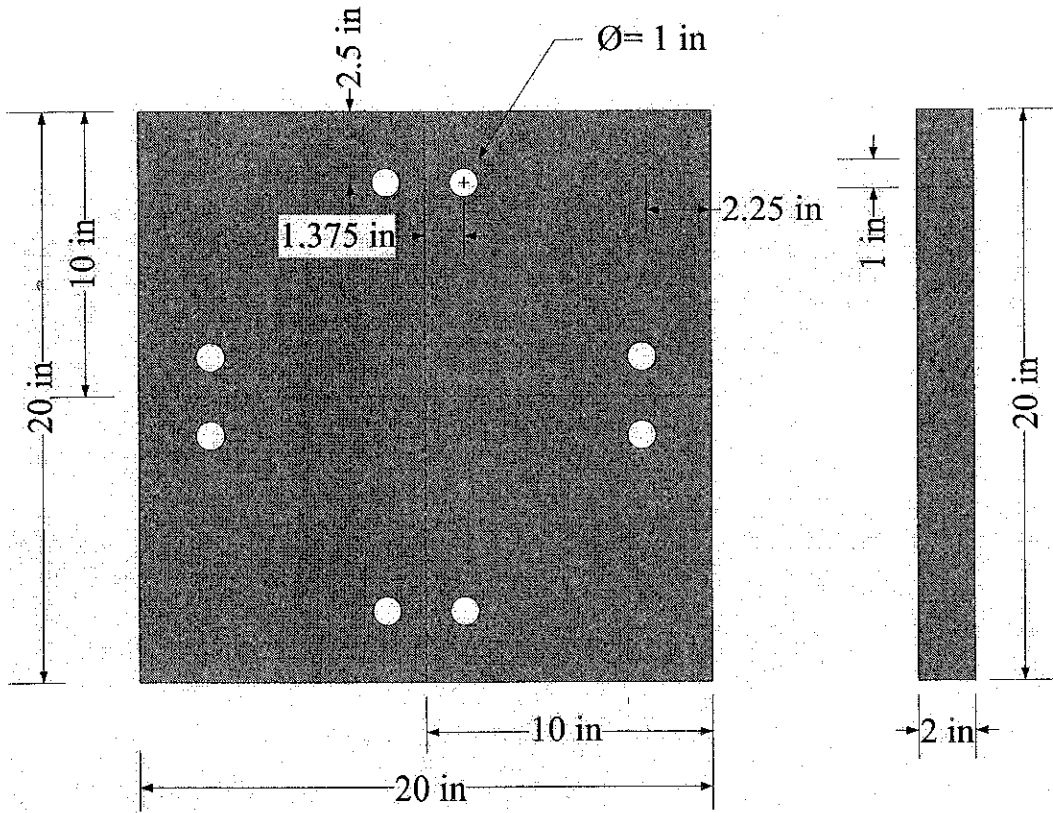
รูปที่ ก-12 เหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนักและหูเกี่ยวบน-ล่างของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ ก-13 ฐานรับน้ำหนักด้านล่างของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ ก-14 แทนกวด้านข้างของเครื่องกดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ ก-15 ฐานรับน้ำหนักด้านบนของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง

ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้เครื่องทดสอบในสามแกนจริง

คู่มือการใช้เครื่องทดสอบในสามแกนจริง

คู่มือการใช้เครื่องทดสอบในสามแกนจริงแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ 1) การสอบเทียบแรงในแนวตั้ง 2) การสอบเทียบแรงด้านข้าง 3) การติดตั้งตัวอย่างหิน 4) การใส่แผ่นน้ำหนักทดสอบแรงด้านข้าง และ 5) การติดตั้งมาตรวัด

1. การสอบเทียบแรงในแนวตั้ง

1) นำอุปกรณ์สอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์มาตั้งหน่วยของแรงที่ต้องการสอบเทียบเช่น ปอนด์ (lbs) กิโลนิวตัน (kN) เป็นต้น

2) การสอบเทียบแรงในแนวแกนทำได้โดยนำอุปกรณ์สอบเทียบมาติดตั้งบนแท่นทดสอบในแนวแกน เนื่องจากเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์มีความสูงไม่มากจึงอาจต้องมีการเสริมความสูงจนกระทั่งส่วนบนของเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์แนบกับผิวของแท่นทดสอบ โดยการใช้แท่งเหล็กทรงกลมที่ด้านล่างของเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดความผิดพลาดจากการสอบเทียบซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักของแท่งเหล็กทรงกลม

3) นำสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์สอบเทียบต่อเข้ากับเครื่องอ่านค่า จากนั้นทำการตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องอ่านค่าให้อยู่ที่ 0 โดยการกดปุ่มหมายเลข 5(I) จากนั้นกดปุ่ม ENT เพื่อยืนยันการตั้งค่าเริ่มต้น

4) เริ่มต้นการสอบเทียบโดยการเพิ่มแรงดันครั้งละเท่าๆ กันจากปุ่มไฮดรอลิกเข้าแม่แรงไฮดรอลิก ซึ่งระดับของการเพิ่มแรงดันแต่ละครั้งขึ้นกับความละเอียดของมาตรวัดแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก เมื่อเพิ่มแรงดันหนึ่งครั้งให้ทำการจดบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่าหนึ่งครั้งเช่นกัน จากนั้นให้ทำเพิ่มแรงดันและบันทึกค่าต่อไปจนกระทั่งได้ระดับแรงดันที่ต้องการหรือค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่ามีค่าใกล้เคียงแต่ต้องไม่เกิน 200 กิโลนิวตัน เพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายของเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์

5) นำค่าที่ได้จากการสอบเทียบไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฮดรอลิกกับแรงที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่า ซึ่งแรงที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่าคือแรงที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างหินเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนจริง

2. การสอบเทียบแรงด้านข้าง

1) นำเครื่องอ่านค่าของอุปกรณ์สอบเทียบมาตั้งหน่วยของแรงที่ต้องการ เช่น ปอนด์ (lbs) กิโลนิวตัน (kN) เป็นต้น

2) นำอุปกรณ์สอบเทียบมาติดตั้งในแวนอนระหว่างคานทดสอบที่อยู่ในทิศทาง N-S ในขั้นตอนการใส่เครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์นั้นต้องใช้แผ่นเหล็กทรงกลม โดยที่ด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กจะมีเข้าครึ่งทรงกลมจำนวน 2 แผ่นเพื่อนำมาใช้รับแรงที่ส่งผ่านมาจากคานทดสอบผ่านหัวกดครึ่งทรงกลมไปสู่เครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์

3) นำสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์สอบเทียบต่อเข้ากับเครื่องอ่านค่า จากนั้นทำการตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องอ่านค่าให้อยู่ที่ 0 โดยการกดปุ่มหมายเลข 5(I) จากนั้นกดปุ่ม ENT เพื่อยืนยันการตั้งค่าเริ่มต้น

4) ทำการยกคานทดสอบที่อยู่ในทิศทาง N-S ขึ้นและค้างไว้ นำแผ่นเหล็กที่มีเข้าครึ่งทรงกลมมาใส่ไว้ที่คานทดสอบ N จำนวน 1 แผ่น และใส่ไว้ที่คานทดสอบ S จำนวน 1 แผ่น ในการใส่แผ่นเหล็กที่มีเข้าครึ่งทรงกลมนั้นจะต้องให้หัวกดครึ่งทรงกลมที่ติดอยู่กับคานทดสอบประกบเข้ากับเข้าครึ่งทรงกลมต่อไปให้นำอุปกรณ์สอบเทียบมาวางไว้ระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่น โดยที่หัวกดครึ่งทรงกลมและอุปกรณ์สอบเทียบต้องอยู่ในระนาบเดียวกันจากนั้นปล่อยคานทดสอบในทิศทาง N-S ลงช้าๆ และพร้อมกันจนกระทั่งแผ่นเหล็กและอุปกรณ์สอบเทียบแนบสนิทกัน ปรับระดับของคานทดสอบให้อยู่ในระดับเดียวกัน จากนั้นทำการบันทึกค่าที่ได้จากเครื่องอ่านค่าหากไม่เป็นไปตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นให้กลับไปเริ่มทำขั้นตอนที่ 4 ใหม่

5) เมื่อหัวกดครึ่งทรงกลมและเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในระดับเดียวกันและระดับของคานทดสอบ N-S อยู่ในระดับเดียวกันแล้ว ให้ตรวจสอบเนื้อตัวเมียทุกตัวที่ติดอยู่กับเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักว่าอยู่ในระดับเดียวกันหรือไม่พร้อมทั้งเตรียมเพลลาเหล็กขนาด 1 นิ้ว 2 อัน จากนั้นยกคานรับตุ้มน้ำหนัก N-S ขึ้นแล้วใส่เข้ากับเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักโดยการใส่เพลลาเหล็กในการวางคานรับตุ้มน้ำหนัก เมื่อใส่เพลลาเหล็กทั้งสองข้างเรียบร้อยแล้วให้วางคานรับตุ้มน้ำหนักลงช้าๆ และพร้อมกัน เพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างคานทดสอบทั้งสองข้าง จากนั้นทำการบันทึกค่าที่ได้จากเครื่องอ่านค่า

6) ใส่แผ่นน้ำหนักตรงกลางคานรับตุ้มน้ำหนักครั้งละ 1 แผ่น แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้จากเครื่องอ่านค่า จากนั้นทำการเพิ่มแผ่นเหล็กและบันทึกค่าต่อไปจนกระทั่งได้ระดับแรงดันด้านข้างที่ต้องการ

7) ในขั้นตอนการถอนเครื่องมือออกให้นำแผ่นน้ำหนักออกก่อน จากนั้นจึงนำคานรับตุ้มน้ำหนักออก ซึ่งต้องยกขึ้นลดเพลลาและวางลงพร้อมกัน จากนั้นให้ยกคานทดสอบขึ้นพร้อมกัน โดยมีคนรองรับเครื่องสอบเทียบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันการตกกระแทกซึ่งอาจจะทำให้เกิดการชำรุดได้

8) ในการสอบเทียบคานทดสอบในทิศทาง W-E ให้ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 7

9) นำค่าที่ได้จากการสอบเทียบไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใส่เข้าไปในระบบกับแรงที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่า ซึ่งแรงที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่าคือแรงที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างตัวอย่างหินเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนจริง น้ำหนักของคานทดสอบรวมกับเหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนัก 1 ชุด มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม น้ำหนักของคานรับค้ำน้ำหนัก N-S หนัก 45 กิโลกรัม น้ำหนักของคานรับค้ำน้ำหนัก W-E หนัก 45 กิโลกรัม แผ่นน้ำหนักเล็กหนัก 10 กิโลกรัม และแผ่นน้ำหนักใหญ่หนัก 20 กิโลกรัม

3. การติดตั้งตัวอย่างหิน

- 1) จัดเตรียมตัวอย่างหินให้ได้ขนาด ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการทดสอบ
- 2) ตัดแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทาน (Neoprene sheets) ให้มีขนาดเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแท่นกดหินด้านบนและแท่นกดหินด้านล่างกับตัวอย่างหิน ในการติดแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทานให้ใช้เทปใสในการยึดติดระหว่างตัวอย่างหินและแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทานทุกด้านที่ใช้ในการทดสอบ ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นการทดสอบการหากลึงรับแรงกดในสองแกน (Biaxial compression test) ก็ให้ติดแผ่นพลาสติกเพียงด้านบนและด้านล่างที่มีการให้แรงในแนวแกนและด้านข้างที่อยู่ในทิศทางตรงกันข้ามที่มีการให้แรงค้ำด้านข้าง
- 3) ติดตั้งปั๊มไฮดรอลิกเข้ากับแม่แรงไฮดรอลิกพร้อมทั้งตรวจสอบระดับของน้ำมันไฮดรอลิกในปั๊มว่ามีปริมาณของน้ำมันอยู่ในระดับที่กำหนดหรือไม่
- 4) นำตัวอย่างหินที่ติดแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทานเรียบร้อยแล้วมาติดตั้งเข้ากับแท่นกดด้านข้าง 1 คู่ โดยติดตั้งเข้ากับด้านที่ติดแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทานซึ่งเป็นด้านที่ใช้ในการทดสอบ
- 5) ทำการยกคานทดสอบที่อยู่ในทิศทาง N-S ขึ้นค้างไว้ จากนั้นใส่ตัวอย่างหินที่ติดแผ่นพลาสติกลดแรงเสียดทานพร้อมกับแท่นกดด้านข้างเข้าไปติดตั้งในเครื่องทดสอบ โดยการติดตั้งชุดของตัวอย่างหินพร้อมแท่นกดด้านข้างให้อยู่ในระดับเดียวกันกับหัวกดครึ่งทรงกลมจากนั้นปล่อยคานทดสอบในทิศทาง N-S ลงช้าๆ และพร้อมกันจนกระทั่งหัวกดครึ่งทรงกลมแนบติดกับแท่นกดด้านข้างและชุดของตัวอย่างหิน ปรับระดับของคานทดสอบให้อยู่ในระดับเดียวกัน
- 6) ทำการยกคานทดสอบที่อยู่ในทิศทาง W-E แล้วนำแท่นกดด้านข้างที่เหลืออีกสองด้านมาประกบที่ด้านข้างของตัวอย่างหิน จากนั้นปล่อยคานทดสอบในทิศทาง W-E ลงช้าๆ และพร้อมกันจนกระทั่งหัวกดครึ่งทรงกลมแนบติดกับแท่นกดด้านข้าง ปรับระดับของคานทดสอบให้อยู่ในระดับเดียวกัน

7) ใส่แท่นกดตัวอย่างที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหิน จากนั้นเพิ่มแรงดันน้ำมันเล็กน้อยที่ปั๊มไฮดรอลิกเพื่อให้แม่แรงไฮดรอลิกคั้นตัวอย่างหินขึ้นแนบติดกับฐานรับน้ำหนักด้านบน หากต้องการแรงดันด้านข้างเกินกว่า 6.4 กิโลนิวตัน ให้ติดตั้งคานรับค้ำน้ำหนักเพื่อวางแผ่นน้ำหนักสามารถทำได้โดยตรวจสอบน็อตตัวเมียทุกตัวที่ติดอยู่กับเหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนักว่าอยู่ในระดับเดียวกันหรือไม่แล้วเตรียมเพลลาเหล็กขนาด 1 นิ้ว 2 อัน จากนั้นยกคานรับค้ำน้ำหนัก N-S ขึ้นแล้วใส่เข้ากับเหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนักโดยการใส่เพลลาเหล็กในการวางคานรับค้ำน้ำหนัก เมื่อใส่เพลลาเหล็กทั้งสองข้างเรียบร้อยแล้วให้วางคานรับค้ำน้ำหนักลงช้าๆ และพร้อมกันเพื่อป้องกันการเสียสมดุลระหว่างคานหดแรงทั้งสองข้าง จากนั้นใส่คานรับค้ำน้ำหนัก W-E โดยทำเช่นเดียวกับการใส่คาน N-S

8) ใส่แผ่นน้ำหนักตรงกึ่งกลางของแต่ละคานรับค้ำน้ำหนักครั้งละ 1 แผ่น พร้อมกันจนกระทั่งได้ระดับของแรงดันด้านข้างที่ต้องการ ในระหว่างที่ใส่แผ่นน้ำหนักต้องมีการเพิ่มแรงในแนวแกนควบคู่ไปพร้อมกันด้วย เพื่อให้ตัวอย่างหินอยู่ในสภาวะที่แรงกดเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic pressure)

9) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในทิศทางที่ต้องการตรวจวัดและเริ่มทำการทดสอบต่อไป

4. การใส่แผ่นน้ำหนักหดแรงด้านข้าง

การใส่แผ่นน้ำหนักหดแรงด้านข้างจะติดตั้งหลังจากปรับคานหดแรงทั้งสี่ด้านให้อยู่ในแนวระดับเรียบร้อยแล้ว โดยเริ่มจาก

1) การติดตั้งคานวางค้ำน้ำหนักในทิศทาง N-S ยึดเข้ากับเหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนักด้วยเพลลาขนาด 1 นิ้ว ที่ปลายทั้งสองข้างของคานรับค้ำน้ำหนัก การติดตั้งต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะคานหดแรงทั้งสี่ด้านอาจเกิดการเอียงได้ จากนั้นติดตั้งคานรับค้ำน้ำหนักในทิศทาง E-W เข้ากับเหล็กเส้นแขวนค้ำน้ำหนักด้วยวิธีการเดียวกัน

2) หลังจากติดตั้งคานวางค้ำน้ำหนักในทิศทาง N-S และ E-W แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการใส่แผ่นน้ำหนักที่ได้มีการสอบเทียบแรงเรียบร้อยแล้ว โดยเริ่มจากการใส่แผ่นน้ำหนักบนคานวางค้ำน้ำหนักในทิศทาง N-S ตามขนาดของแรงที่ต้องการก่อน ในการวางแผ่นน้ำหนักจะต้องใช้ความระมัดระวังอย่างสูง แผ่นน้ำหนักจะต้องวางให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของคานวางค้ำน้ำหนักและจะต้องมีผู้ช่วยจับปลายทั้งสองข้างของคานวางค้ำน้ำหนักไว้ให้แน่นเพราะคานวางค้ำน้ำหนักอาจเกิดการพลิกคว่ำและอาจจะได้รับอันตรายได้ การวางแผ่นน้ำหนักไม่ควรวางให้สูงเกิน 8 แผ่น ถ้าจำเป็นต้องวางแผ่นน้ำหนักเกิน 8 แผ่น ให้แบ่งแผ่นน้ำหนักวางบนแขนของคานวางค้ำน้ำหนักทั้งสองข้างเท่าๆกัน การวางแผ่นน้ำหนักบนแขนของคานวางค้ำน้ำหนักทั้งสองข้างนั้นจะต้องวางแผ่นน้ำหนัก

พร้อมๆ กันครั้งละ 1 แผ่น เพื่อป้องกันไม่ให้คานทอดแรงข้างใดข้างหนึ่งเกิดการเอียง จากนั้นใส่แผ่น
น้ำหนักบนคานวางค้ำน้ำหนักในทิศทาง E-W ตามขนาดของแรงที่ต้องการ ด้วยวิธีการเดียวกัน

5. การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน

การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินจะติดตั้งหลังจากใส่แผ่นน้ำหนักบน
คานวางค้ำน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว มาตรวัดที่ใช้ประกอบด้วย มาตรวัดในแนวแกน 2 ตัว มาตรวัดใน
ทิศทาง N-S 2 ตัว และมาตรวัดในทิศทาง E-W 2 ตัว

1) การติดตั้งมาตรวัดในแนวแกนจะติดตั้งโดยให้ฐานของมาตรวัดอยู่บนแผ่นกคของ
ปี่มไฮดรอลิกและปรับให้ปลายเข็มของมาตรวัดสัมผัสกับฐานรับน้ำหนักด้านบน มาตรวัดทั้ง 2 ตัว
จะต้องอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้าม

2) การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินด้านข้าง (ทิศทาง N-S และ E-W)
จะติดตั้งมาตรวัดตรงจุดปลายทั้งสองข้างของคานวางค้ำน้ำหนักและต้องปรับให้ปลายเข็มของมาตร
วัดสัมผัสกับคานวางค้ำน้ำหนัก

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เพ็องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร 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