บทที่ 4
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

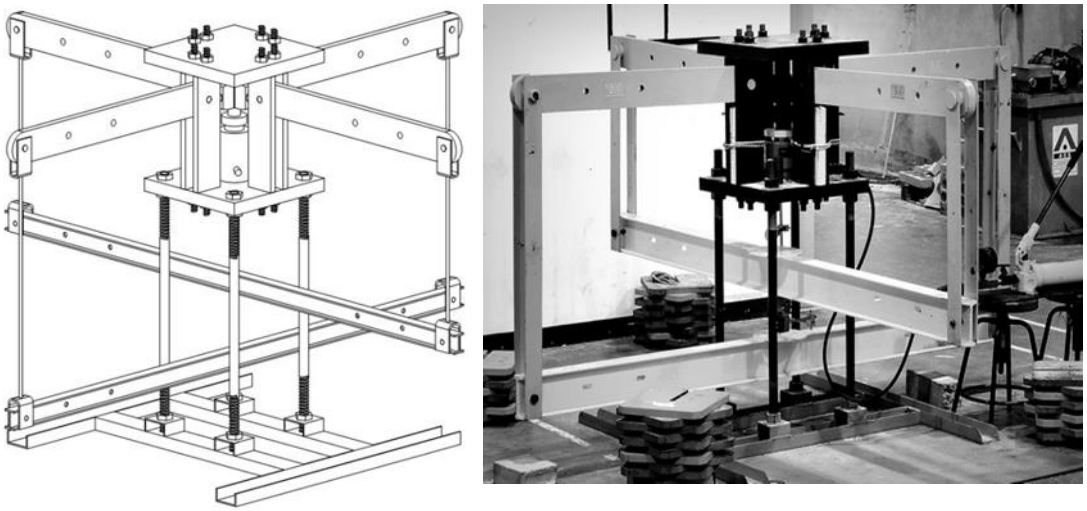
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดภายใต้อุณหภูมิ 0, 30, 100, 300 และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa โดยสมการในการคำนวณได้จากการจำลองความเค้นในสามทิศทางภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ

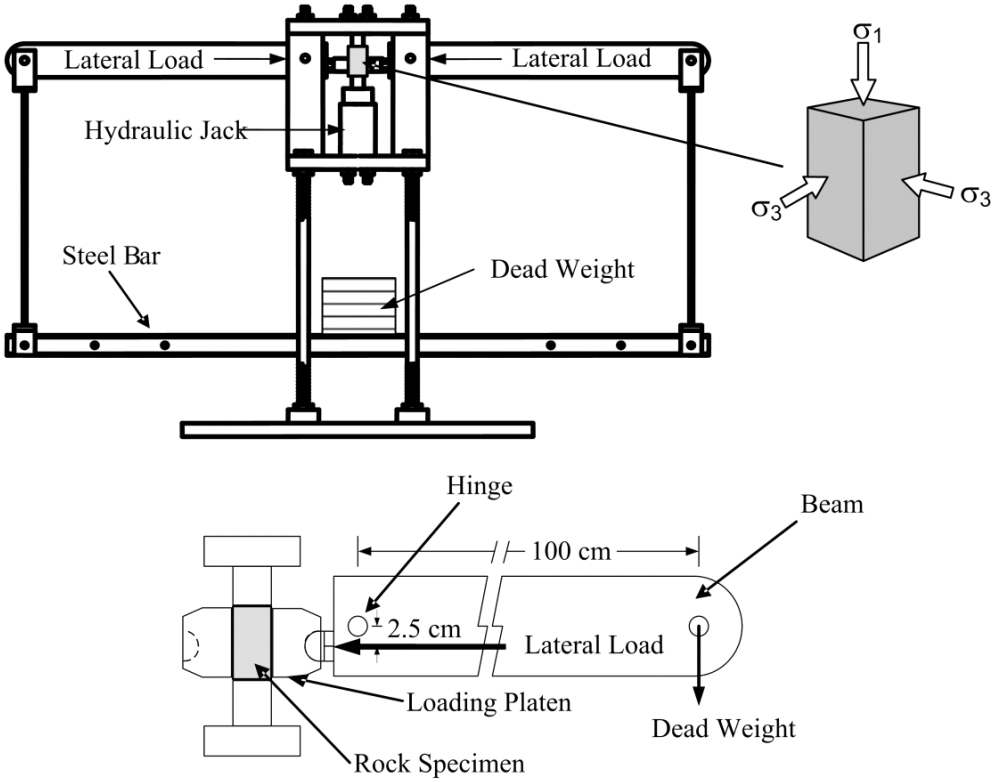
4.2 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกดทดสอบในสามแกนจริงได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิมและ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

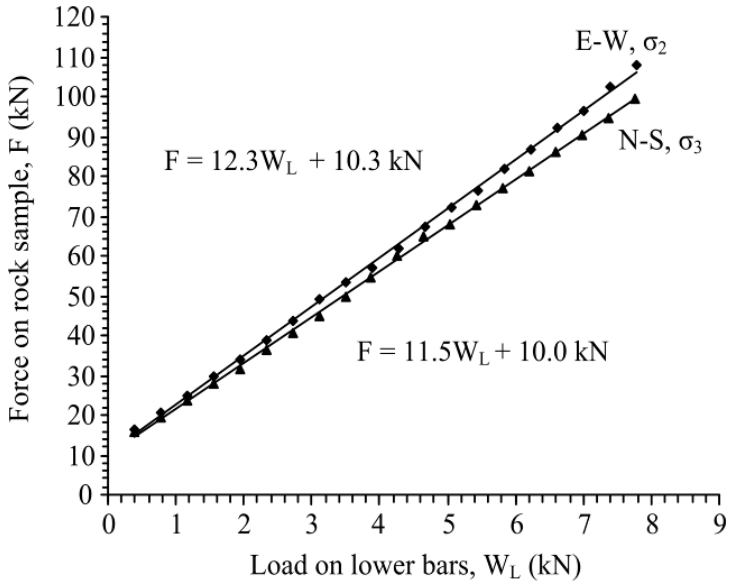
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกดทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009) ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับจากแขนของคานทดแรง (Loading plater) ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนัก (Steel bar) จะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนัก (Dead weight) เชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทดแรงจะใช้เพลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก–ตะวันตก (E–W) และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ–ใต้ (N–S) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell (รูปที่ 4.3) อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวดิ่ง (σ_1)



รูปที่ 4.1 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างของตัวอย่างหิน

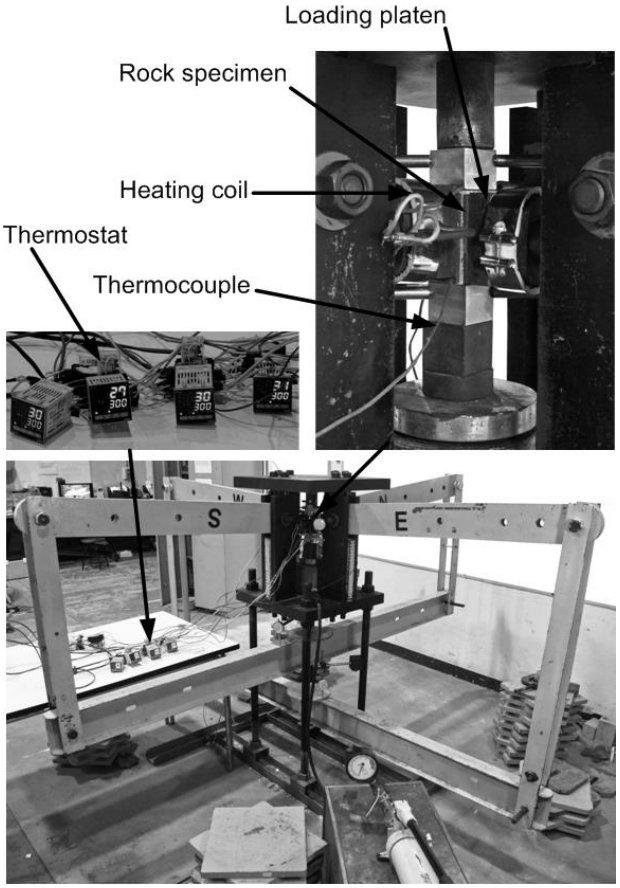
สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ 2.5×2.5×2.5 cm^3 ถึง 5×5×100 cm^3 การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเบ้ากดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4.3 อุปกรณ์ให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างหินประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เบ้ากดให้ความร้อน (Loading platen) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างหินจะใช้เวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ สามารถอธิบายหน้าที่การใช้งานได้ดังนี้

4.3.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิตามที่กำหนด และจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อนกับขดลวดให้ความร้อนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

4.3.2 เบ้ากดให้ความร้อน

ประกอบด้วย เบ้ากด ขดลวดให้ความร้อน (Heater coil) ฉนวนกันความร้อน (Insulation) สามารถทำได้โดยนำขดลวดให้ความร้อนพันรอบเบ้ากด แล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เบ้ากดให้ความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและน้ำหนักไปยังตัวอย่างหิน

4.3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เป็นสายทองแดงเชื่อมต่อระหว่างเทอร์โมสตัดกับตัวอย่างหินเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน

4.4 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

4.4.1 การปรับเพิ่มและลดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน

การทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง ได้ทำการติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อนขนาด 4.8x4.8 cm^2 กับตัวอย่างหิน ซึ่งเบ้ากดจะรับความร้อนจากขดลวดให้ความร้อนที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ส่วนการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่ำ ในการปรับลดอุณหภูมิได้นำตัวอย่างหินและเบ้ากดเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ดำเนินการเป็นเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.4.2 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว

การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดได้มีการผันแปรความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 0, 3, 7 และ 12 MPa ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0, 30, 100, 300 และ 500°C มีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) นำตัวอย่างหินติดตั้งกับโครงกดทดสอบ โดยยกคานในแนวตะวันออก–ตะวันตก เพื่อสอดตัวอย่างหินพร้อมกับเบ้ากดเข้าไปในแท่นกด จากนั้นปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดชนกับตัวอย่างหิน
2) ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิบนตัวอย่างหินแนวตะวันออก–ตะวันตก
3) ยกคานในแนวเหนือ–ใต้ เพื่อสอดตัวอย่างหินพร้อมกับเบ้ากดเข้าไปในแท่นกด แล้วปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดชนกับตัวอย่างหิน
4) ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิบนตัวอย่างหินแนวเหนือ–ใต้
5) นำเบ้ากดติดตั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน
6) เปิดเครื่องอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิปรับอุณหภูมิสูงตามต้องการ
7) ให้ความเค้นล้อมรอบกับตัวอย่างโดยประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนและใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) ตามที่ได้ออกแบบไว้
8) กดทดสอบตัวอย่างหินด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ (ในระหว่างการทดสอบทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและแรงกด)

ในการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน ได้ดำเนินการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ทั้งหมด 3 ทิศทาง คือ แนวความเค้นหลักและความเค้นล้อมรอบ

4.5 การคำนวณผลการทดสอบ

4.5.1 การคำนวณค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย

การคำนวณค่าความเค้นเฉือน (τ_{oct}) และความเค้นเฉลี่ย (σ_m) ของหินแกรนิตที่ผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

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

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

4.5.2 การคำนวณค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทาน

การคำนวณค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ของหินแกรนิตที่ผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = 2c \tan [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.4)$$

4.5.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น

การคำนวณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นสำหรับความเค้นในสามมิติได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้จากสมการ (Jaeger and Cook, 1979)

$$G = (1/2)\ (\tau_{oct,e}/\gamma_{oct,e}) \quad (4.5)$$

$$3\sigma_{m,e} = (3\lambda + 2G)\ \Delta \quad (4.6)$$

$$E = 2G\ (1+\nu) \quad (4.7)$$

$$\nu = \lambda\ /\ 2(\lambda + G) \quad (4.8)$$

โดยที่ G คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง

E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

λ คือ ค่าคงที่ Lame

ν คือ อัตราส่วนปัวซ์ซอง

$\tau_{oct,e}$ คือ ความเครียดเฉือน

$\gamma_{oct,e}$ คือ ความเค้นเฉือน

$\sigma_{m,e}$ คือ ความเค้นเฉลี่ย

Δ คือ ความเครียดเชิงปริมาตรที่ระดับ 40% ของความเค้นสูงสุด

4.5.4 การคำนวณค่าพลังงานความเครียด

การคำนวณค่าพลังงานความเครียดของการทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น–ความเครียดในสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการ

$$W_m = (3/2)\,\sigma_m\,\varepsilon_m = \sigma_m^{\,2} / 2K \qquad (4.9)$$

$$W_d = (3/2)\,\tau_{oct}\,\gamma_{oct} = (3/4G)\,\tau_{oct}^{\,2} \qquad (4.10)$$

โดยที่ W_m คือ พลังงานความเครียดเฉลี่ย

W_d คือ พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน

τ_{oct} คือ ความเค้นเฉือน

γ_{oct} คือ ความเครียดเฉือน

σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย

ε_m คือ ความเครียดเฉลี่ยที่จุดแตกของหิน

4.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

4.6.1 การปรับอุณหภูมิของตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ

ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลภายใต้อุณหภูมิสูง ดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินและเบ้ากดเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 100, 300 หรือ 500°C ตามการทดสอบ ส่วนตัวอย่างหินในการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินและเบ้ากดเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ดำเนินการเป็นเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

4.6.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3967 คือ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราความเร็วประมาณ 0.5–1.0 MPa/s จนกระทั่งหินแตก และทำการจดบันทึกค่าแรงกดสูงสุด เพื่อนำไปคำนวนค่ากำลังรับแรงดึงต่อไป

4.6.3 การคำนวณผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล (σ_B) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_B = 2P/\pi DL \qquad (4.11)$$

โดยที่ P คือ กำลังรับแรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติของความเค้นดึงแบบบราซิล

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหิน

L คือ ความยาวของตัวอย่างหิน