

บทที่ 4

สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของหิน (Physical and Engineering Properties of Rocks)

4.1 ธรรมชาติของหิน

ในทางธรณีวิทยาได้แบ่งหินออกเป็นสามกลุ่ม ตามการเกิด ได้แก่ หินอัคนี หินตะกอน และหินแปร ซึ่งต้นกำเนิดหินทำให้หินมีลักษณะเนื้อหินที่แตกต่างกัน หินอัคนีเกิดจากการตกผลึกของสารหลอมละลายลาวา หรือแมกมา ดังนั้นเนื้อหินจะเป็นการจับผลึกของแร่หลากหลายชนิดที่เกาะเกี่ยวกันแน่น ขนาดของผลึกขึ้นกับความเร็วของการเย็นตัวของสารหลอมละลาย หินตะกอนเกิดจากการเกาะตัวกันของเม็ดตะกอนที่เป็นเศษหินขนาดต่างๆ อาจอัดตัวแน่น หรือประสานกันด้วยตัวเชื่อมประสาน เช่น เหล็กออกไซด์ แคลไซต์ ซิลิกา หรือเกาะกันด้วยพันธะดินเหนียว เนื้อหินจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอน ส่วนหินตะกอนที่ได้จากการตกผลึกของสารละลายเข้มข้นจะมีเนื้อหินเป็นผลึกของแร่เดี่ยวเกาะเกี่ยวกันแน่นคล้ายหินอัคนี ส่วนหินแปรเกิดจากการจับผลึกใหม่ในกระบวนการแปรเนื่องจากความดันและอุณหภูมิที่สูง บางครั้งอาจมีการจัดเรียงตัวของผลึกแร่เป็นริ้ว ซึ่งลักษณะเนื้อของหินเหล่านี้มีผลต่อสมบัติของหิน ดังนั้นในทางวิศวกรรมอาจจัดกลุ่มหินได้ใหม่ตามลักษณะเนื้อหินเพื่อให้สอดคล้องกับสมบัติของหิน แบ่งเป็น 4 กลุ่มดังนี้คือ ลักษณะเนื้อแบบผลึก เนื้อเม็ดตะกอน เนื้อละเอียด และ หินที่เป็นอินทรีย์ ชื่อหินยังคงใช้ตามการเรียกทางธรณีวิทยา สมบัติของหินตามกลุ่มลักษณะเนื้อหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของกลุ่มหินตามลักษณะเนื้อ

กลุ่มหิน	ชนิดหิน	สมบัติของหิน
1. เนื้อผลึก		
1.1 เนื้อแร่ละเอียด	หินตะกอนจากสารละลายเข้มข้น เช่น หินปูน เปลือกหิน ยิปซัม	ค่อนข้างแข็งและเปราะ จะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติกที่ภาวะความดันล้อมขนาดปานกลาง เนื่องจากเกิด Intracrystalline gliding
1.2 เนื้อแร่กลุ่มซิลิเกต	หินอัคนีแทรกซอนเนื้อหยาบ เช่น แกรนิต ไดโอไรต์ หรือพวกหินภูเขาไฟเนื้อละเอียด เช่น บะซอลต์	มีความแข็งแรงสูงและเปราะ และแสดงพฤติกรรม แบบอีลาสติก เว้นแต่พวกหินภูเขาไฟที่มีโพรงอากาศจะแข็งแรงน้อยกว่า
1.3 เนื้อแร่เป็นแผ่น เช่น ไมกา ทอลค์ คลอไรต์	หินแปร เช่น หินชีสต์ หินฟิลไลต์ หินเซอร์เพนทีน หินทอลค์	มีกำลังน้อยเนื่องจากเลื่อนไถลตามเนื้อหินที่เป็นแผ่นได้ง่าย

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กลุ่มหิน	ชนิดหิน	สมบัติของหิน
2. เนื้อเม็ดตะกอน		
2.1 แร่ประสานเป็นซิลิกา หรือเหล็กออกไซด์	หินทราย หินกรวดมน	แร่เชื่อมประสานค่อนข้างแข็ง ทำให้หินมีความแข็ง เปราะ
2.2 แร่ประสานละลายได้	หินกรวด หินทราย ที่มีแคลไซต์ โคโลไมต์ หรือ อีปซัม เป็นแร่ประสาน	หินค่อนข้างแข็ง แต่จะสูญเสียกำลัง เมื่อแร่ประสานละลายไป
2.3 เชื่อมประสานโดย พันธะ ดินเหนียว	หินทรายร่วน หินตuff	หินค่อนข้างร่วนเนื่องจากพันธะ ดินเหนียวไม่ได้เกาะเกี่ยวกัน แน่น
3. เนื้อเม็ดละเอียด	หินดินดาน หินโคลน หินชอล์ก	มีค่าความแข็งแรงแปรตาม ชนิด แร่เชื่อมประสาน แต่มักจะมี ความคงทนต่ำเมื่ออยู่ในสภาพ อิ่มน้ำ
4. หินเนื้ออินทรีย์	ถ่านหิน หินน้ำมัน ทรายถ่าน	มีความแข็งแรงแปรตามสภาพ ของหิน แต่มักมีรอยแตกในหิน เป็นจำนวนมาก ส่วนทรายถ่าน จะมีการไหลที่อุณหภูมิหรือ ความดันสูง

4.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติดัชนีของหิน

สมบัติทางกายภาพเป็นสมบัติพื้นฐานของหินที่สามารถตรวจวัดได้ง่าย เช่น ความพรุน หน่วยน้ำหนัก และตัวที่สำคัญก็สามารถจัดกลุ่มเป็นดัชนีชี้วัด เช่น ดัชนีความคงทนการกร่อน (slake durability index) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการแตกสลายง่ายขององค์ประกอบแร่ในหิน หรือของ โครงสร้างขนาดเล็กภายในเนื้อหินในหัวข้อนี้ได้รวบรวมสมบัติพื้นฐานของหินจากภายในประเทศ ไทย และจากแหล่งอื่นๆ พอสังเขป เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์

4.2.1 ความพรุน (Porosity)

เป็นสมบัติที่แสดงสัดส่วนของ ปริมาตรของช่องว่างภายในมวลหิน(V_v) กับปริมาตรของ มวลหิน(V_t) นั่นคือ

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (4-1)$$

จากการศึกษาพบว่า ในหินเนื้อเม็ดตะกอนจะมีค่าความพรุนสูงเช่น หินทรายอาจมีความพรุนสูงถึง 90% ($n=0.90$) หรือในหินชอล์ก อาจมีความพรุนถึง 50% แต่สำหรับในหินที่มีเนื้อผลึก มักจะมีค่า ความพรุนต่ำเนื่องจากการเกาะเกี่ยวกันแน่นของผลึกแร่ทำให้มีช่องว่างน้อย จะเห็นได้ว่าความพรุนนี้

ขึ้นกับลักษณะเนื้อ และการเกิดของหิน นอกจากนี้ยังพบว่าความลึกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความพรุนลดลง เนื่องจากความดันทำให้ช่องว่างปิดตัว ในการหาความพรุนมีขั้นตอนต่อไปนี้คือ

1. หาน้ำหนักของหินที่อบแห้งสนิท อาจเป็นตัวอย่างทรงกระบอก หรือตัวอย่างแบบก้อน (W_{dry})
2. แช่ตัวอย่างให้อิ่มน้ำอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ทำการหาน้ำหนักของหินที่อิ่มน้ำ (W_{sat})
3. ชั่งน้ำหนักของหินอิ่มน้ำโดยแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาตรของหิน (W_{sub}) จากกฎที่ว่า น้ำหนักที่หายไปในน้ำเท่ากับน้ำหนักของน้ำปริมาตรเท่าวัตถุ
4. คำนวณค่าความพรุน
$$n = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{(W_{sat} - W_{sub})}$$

นอกจากนี้อาจจะหาความพรุนโดยวิธีการใช้ปรอทเข้าไปแทนช่องว่างของหิน มักจะใช้ในวงการสำรวจน้ำมัน เพื่อตรวจสอบหินทรายที่จะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำมัน แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับหินที่มีความพรุนต่ำ

4.2.2 หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

หน่วยน้ำหนักของหิน หรือที่มักจะเรียกกันทั่วไปว่าความหนาแน่นของหิน จะต่างกันตรงที่หน่วยน้ำหนักจะเป็นค่าแรงต่อหน่วยปริมาตรของหิน ส่วนความหนาแน่นมักจะเป็นมวลต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักของหินอาจจะคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะของ(G) และ ความพรุนของหิน โดยความถ่วงจำเพาะของหินคือสัดส่วนของมวลหินต่อมวลน้ำที่ปริมาตรเท่ากัน นั่นคือหน่วยน้ำหนักของหินสามารถเขียนได้เป็น $\gamma_{rock} = G \cdot \gamma_w$ การหาค่าหน่วยน้ำหนักของหินสามารถทำได้โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการหาความพรุนโดยคำนวณค่าหน่วยน้ำหนักได้ดังนี้

$$\gamma_{dry} = \frac{W_{dry}}{(W_{sat} - W_{sub})}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{(W_{sat} - W_{sub})}$$

หรืออาจจะคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น หรือความพรุนได้ดังนี้

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_m}{(1 - \omega)} \quad \text{เมื่อ } \gamma_m = \text{หน่วยน้ำหนักชื้น} \quad (4-2)$$

$$\gamma_{dry} = G \gamma_w (1 - n) \quad (4-3)$$

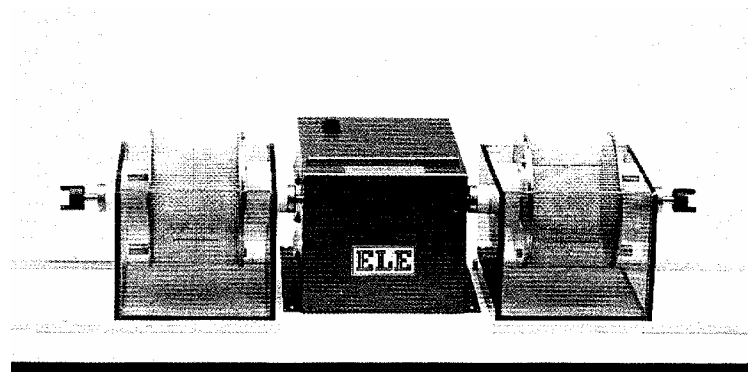
4.2.3 ดัชนีความคงทนการกร่อน (Slake Durability Index, I_d)

ดัชนีความคงทนการกร่อนจะมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับเนื้อหิน และองค์ประกอบทางแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินโคลน หินดินดาน และหินผุ ซึ่งดัชนีความคงทนการกร่อนจะเป็นตัวชี้วัดความคงทนต่อการกร่อนภายใต้วงจรการเปียก และแห้งของหิน ซึ่งดัชนีนี้สามารถหาได้จากการทดสอบตัวอย่างหินอบแห้งขนาด 50 ± 5 กรัมจำนวน 10 ก้อน มีน้ำหนักรวมประมาณ 500 กรัม ทำการหมุนตัวอย่างในตะแกรงบรรจุตัวอย่าง(รูปที่ 4.1) ได้ภาวะเปียก ด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที

เป็นเวลา 10 นาที นำตัวอย่างที่เหลืออยู่ในตะแกรงอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณหาดัชนีความคงทนของวงจรที่ 1 ได้ดังนี้

$$I_{d1} = \frac{W_r}{W_i} \times 100 \quad (4-4)$$

เมื่อ I_{d1} = ดัชนีความคงทนการกร่อนที่วงจรที่ 1
 W_r = น้ำหนักคงเหลือของหินตัวอย่าง
 W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง



รูปที่ 4.1 ตะแกรงทดสอบดัชนีความคงทนการกร่อนของบริษัท ELE International

ในการทดสอบสามารถหาดัชนีความคงทนการกร่อนอาจทำได้ถึง 5 วงจรโดยใช้การคำนวณน้ำหนักที่เหลือของแต่ละวงจรเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของหินโดยปกติจะทำการทดสอบอย่างน้อย 2 วงจร เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบได้ Gamble 1971 ได้จำแนกความคงทนของหินออกเป็น 6 ชั้นตามค่า ดัชนีความคงทนการกร่อน วงจรที่ 1 และ 2 (I_{d1} , I_{d2}) ดังตารางที่ 4.2 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีความคงทนของหินบางชนิดที่ได้มีการทดสอบที่ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตารางที่ 4.2 การจำแนกความคงทนการกร่อนของแอมเบิล

(Gamble's Slake Durability Classification)

ความคงทนของหิน	I_{d1} %	I_{d2} %
มีความคงทนสูงมาก	> 90	> 98
มีความคงทนสูง	98-99	95-98
มีความคงทนค่อนข้างสูง	95-98	85-95
มีความคงทนปานกลาง	85-95	60-85
มีความคงทนต่ำ	60-85	30-60
มีความคงทนต่ำมาก	> 60	< 30

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีความคงทนการกร่อนของหินจากแหล่งในประเทศไทย

ชนิดหิน และแหล่ง	I_{d1} %	I_{d2} %
หินทรายปนกรวด น้ำสาน จ.เลย	93.7	82.6
หินโคลนสีม่วง น้ำสาน จ.เลย	98.6	97.95
หินทรายแป้ง น้ำหมาน จ.เลย	86.2	65.8
หินโคลนเนื้อปูน ลำตะคอง จ. นครราชสีมา	75.5	44.6
หินโคลน ลำตะคอง จ.นครราชสีมา	91.9	84.17
หินโคลนเนื้อเหล็กออกไซด์ ลำตะคอง จ.นครราชสีมา	65.1	51.4
หินแกรนิตผุระดับII ภูสะนาว จ. เลย	98.6	97.2
หินทรายแป้งเนื้อปูน เขื่อนจุฬาภรณ์ จ.ชัยภูมิ	98.5	97.4

4.2.4 ค่าการยอมให้ซึมผ่าน (Permeability)

ค่าการยอมให้ซึมผ่านของหินมีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานเหมืองแร่ งานกำจัดกากของเสีย และงานด้านปิโตรเลียม ค่าการยอมให้ซึมผ่านจะบอกถึงการเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล หรือแหล่งกักเก็บน้ำมัน เมื่อหินมีค่าการยอมให้ซึมผ่านสูง แต่ถ้ามีค่าการยอมให้ซึมผ่านต่ำจะแสดงความทึบน้ำซึ่งจะเป็นตัวกั้นการปนเปื้อนของกากของเสียที่เก็บไว้ในโพรงใต้ดิน หรือจะเป็นตัวปิดกั้นการเคลื่อนไปของน้ำมัน การหาค่าการยอมให้ซึมผ่านจะใช้กฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's law)

$$q_x = k \frac{dh}{dx} A \quad (4-5)$$

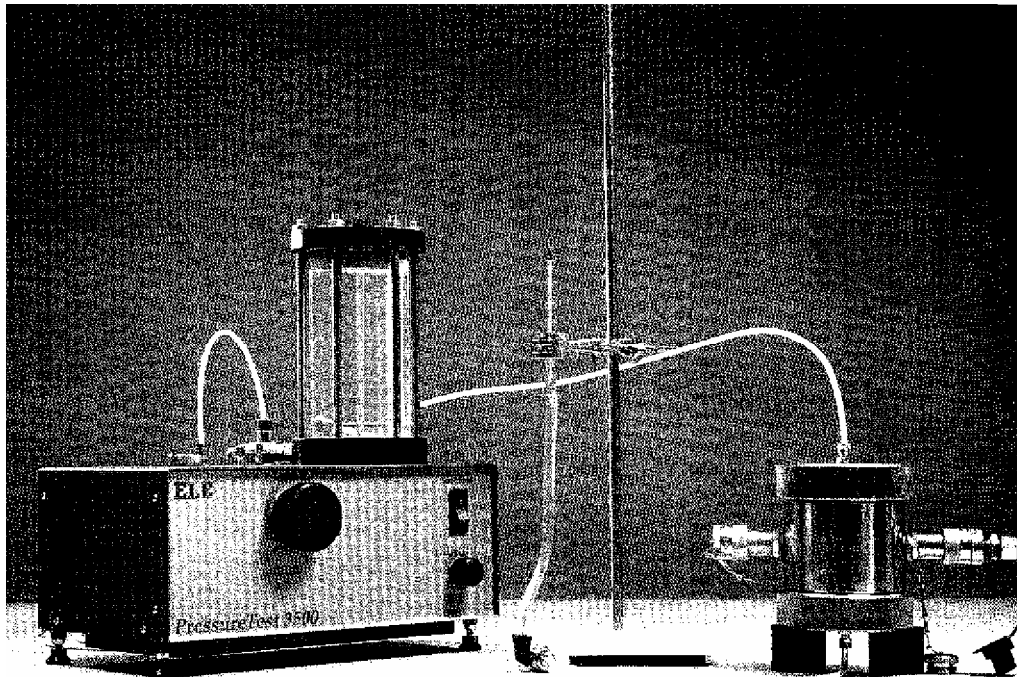
เมื่อ	q_x	=	อัตราการไหลของน้ำในทิศทาง x
	k	=	สัมประสิทธิ์การยอมให้ซึมผ่าน
	h	=	ศักย์ไฮดรอลิก
	A	=	พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน
	$\frac{dh}{dx}$	=	ลาดไฮดรอลิก (i)

จากสมการข้างต้นจะได้ว่าหน่วยของค่า k เป็นหน่วยของความเร็วเช่น ซม./วินาที ฟุต/นาที่ การหาค่า k ของหินในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้โดยใช้เซลล์ทดสอบของฮุก ให้น้ำไหลผ่านด้วยระบบความดันคงที่ (รูปที่ 4.2) เมื่อของเหลวอื่นที่ไม่ใช่น้ำนำมาใช้ในการทดสอบ ที่ความดัน p ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ซึมผ่านจะคำนวณจาก

$$q_x = \frac{K \cdot dh}{\mu \cdot dx} A \quad (4-6)$$

เมื่อ	K	=	สัมประสิทธิ์การยอมให้ซึมผ่านไม่ขึ้นกับชนิดของของไหล
	p	=	ความดันของของไหล

μ = ความหนืดของของไหล



รูปที่ 4.2 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้ซึมผ่านของหินของบริษัท ELE International

หน่วยของค่า K ที่ได้จากสมการ(4-6) จะมีหน่วยเป็นพื้นที่ เช่น ตารางเซนติเมตร (ซม²)ปกติจะใช้เป็นหน่วยดาร์ซี คือ 1 ดาร์ซี จะเท่ากับ 9.87×10^{-9} ซม² หากเทียบกับค่า k ที่ใช้น้ำเป็นของไหล ที่อุณหภูมิ 20° C 1 ดาร์ซีจะเท่ากับ 10^{-3} ซม/วินาที นอกจากนี้แล้วอาจทดสอบผ่านตัวอย่างทรงกระบอกกลวงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยให้ของไหลผ่านจากช่องกลวงภายในสู่ภายนอกด้วยความดัน Δp ซึ่งค่า k สามารถคำนวณจากการไหลเป็นวงรอบดังนี้

$$k = \frac{q \ln(R_2/R_1)}{2\pi L \Delta h} \quad (4-7)$$

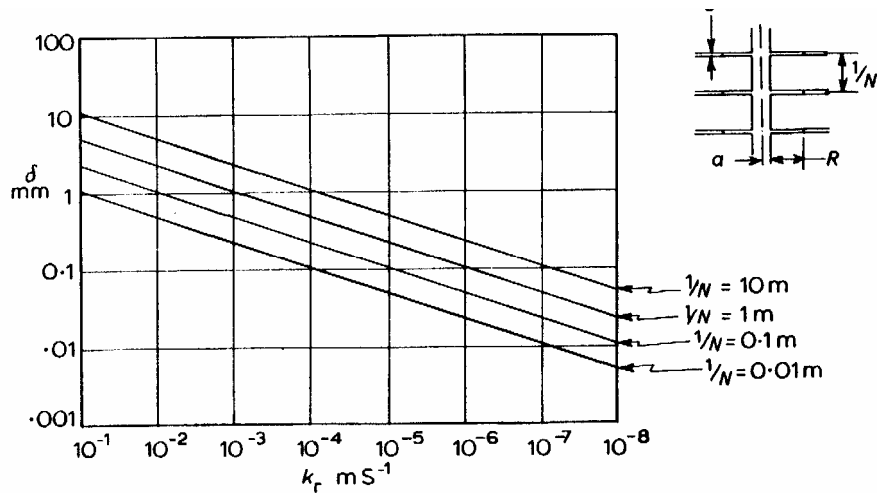
เมื่อ R_1, R_2 = รัศมีภายนอกและภายในของตัวอย่าง

L = ความยาวของตัวอย่าง

Δh = ค่าต่างศักย์ไฮดรอลิคสัมพันธ์กับความต่างของความดัน

สำหรับหินที่มีรอยแตกหรือรอยแยก Snow (1965) และ (1968) ได้สร้างสมการการไหลขนานกับแผ่นรอยแตก โดยหาความสัมพันธ์กับความถี่ของรอยแตก(N)และ ความกว้างของรอยแยก (δ) ค่า $N\delta$ เรียกว่า ความพรุนของรอยไม่ต่อเนื่อง (discontinuities porosity)(รูปที่ 4.3) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างรอยแตก(S)เท่ากับ $\frac{1}{N}$ ค่า k หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{N \gamma_w \delta^3}{12\mu} \quad (4-8)$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของช่องเปิด δ ระยะห่างรอยแตก และสัมประสิทธิ์ยอมให้ซึมผ่านของหิน (Goodman, 1980)

ส่วนการหาค่า k ในสนามจะอาศัยวิธีการสุบทดสอบ ซึ่งจะให้ผลดีกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากรอยแตกต่างๆในธรรมชาติไม่ได้ถูกกละเลยไป เหมือนเช่นตัวอย่างขนาดเล็ก อาจใช้แพ็คเกจ (packer) ในหลุมเจาะ ขนาด 150 มม อัดน้ำด้วยแรงดัน 1 บรรยากาศเข้าสู่ระยะระหว่างลูกยางที่เบ่งหัวท้าย(L)ภายในบ่อมีระยะระหว่าง 1-5 ม ขึ้นกับความถี่ของรอยแตกที่มีอยู่ในพื้นที่ ระยะเวลาทดสอบอย่างน้อยควรจะ 15 นาที ปริมาณของน้ำ(Q)ที่ไหลเข้าสู่บ่อจะนำมาคำนวณหาโดยกฎของดาร์ซี นั่นคือ $k = \frac{Q}{HL}$ หน่วยของ ค่า k อาจเรียกว่า ลูยอง (leugeon) ซึ่ง 1 ลูยองจะมีค่าเท่ากับการไหลของน้ำที่อัตรา 1 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 10 บรรยากาศ 1 ลูยองจะเท่ากับ 10^{-7} ม/วินาที เมื่อเราได้ค่า k จากการทดสอบในสนามเราสามารถใส่สมการ (4-8) ประเมินหาขนาดช่องเปิดของรอยแตกได้

4.2.5 ความเร็วคลื่นและดัชนีรอยแตก (Sonic Velocity and Degree of Fissuring Index)

ความเร็วคลื่นที่วิ่งผ่านตัวอย่างสามารถหาได้โดยการปล่อยคลื่นความเร็วเหนือเสียงชนิดคลื่นกด หรือคลื่นเฉือนผ่านตัวอย่างรูปทรงกระบอกยาว L ในเวลา t ความเร็วคลื่นกดและเฉือน V_p, V_s หาได้จาก $v = L/t$ ซึ่งจากการหาความเร็วผ่านตัวอย่างของคลื่นทั้งสองชนิดจะสามารถหาค่าคงที่อีลาสติคพลวัต (dynamic elastic constants) ได้ดังนี้

$$E = \frac{V_s^2 \rho}{g} \left[\frac{3(V_p/V_s)^2 - 4}{(V_p/V_s)^2 - 1} \right] \quad (4-9)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2}(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4-10)$$

หรือ
$$E = \frac{V_s^2 \rho}{V_p^2 - V_s^2} \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$$

เมื่อ $G = \rho V_s^2$

$E =$ โมดูลัสอีลาสติคพลวัต (ปาสคาล Pa)

$G =$ โมดูลัสการคงตัว (ปาสคาล Pa)

$v =$ สัดส่วนพัชของซ

$\rho =$ ความหนาแน่นมวล (กก/ม³)

$V_p, V_s =$ ความเร็วคลื่น (ม/วินาที)

ในการหาดัชนีรอยแตก(IQ) Fourmaintraux (1976) ได้ใช้ค่าความเร็วคลื่นกดที่วัดได้เทียบกับคลื่นกดที่ประเมินได้จากการคำนวณความเร็วของแรงงค์ประกอบ V_p^* ดังสมการต่อไปนี้

$$IQ\% = \left(\frac{V_p}{V_p^*} \right) \times 100 \quad (4-11)$$

เมื่อ
$$\frac{1}{V_p^*} = \sum_i \frac{C_i}{V_{p,i}} \quad (4-12)$$

เมื่อ $C_i =$ ปริมาณของแร่ i ที่มีอยู่ในมวลหิน

$V_{p,i} =$ ความเร็วคลื่นของแร่ i

ความเร็วคลื่นของแร่หลายชนิดและความเร็วคลื่นของหินได้แสดงไว้ในตารางที่

4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ความเร็วคลื่นอัดในแร่ (จาก Fourmaintraux, 1996)

แร่	Vp เมตร/วินาที
ควอร์ตซ์	6,050
โอลิวีน	8,400
แอมฟิโบว	7,200
มัสโคไวต์	5,800
ออร์โทเคลส	5,800
แพลจิโอเคลส	6,250
แคลไซต์	6,600
โดโลไมต์	7,500
ยิปซัม	5,200
ไพไรต์	8,000

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัดของหิน

(จาก Fourmaintraux, 1976)

ชื่อหิน	Vp* เมตร/วินาที
บะซอลต์	6,500-7,000
หินปูน	6,000-6,500
หินโคลไลต์	6,500-7,000
หินทรายและควอร์ตไซต์	6,000
กลุ่มหินแกรนิต	5,500-6,000

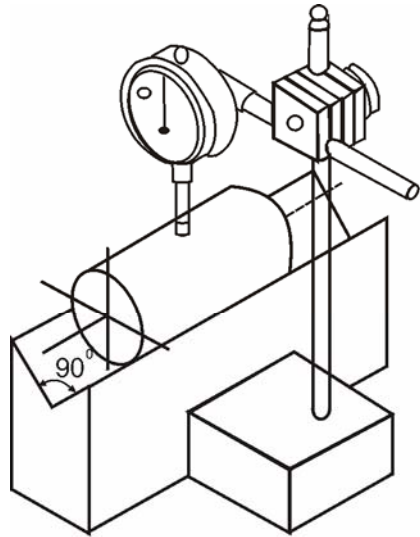
4.3 สมบัติทางวิศวกรรมของหินและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สมบัติทางวิศวกรรมจะเป็นสมบัติที่สำคัญที่นำไปใช้ในการออกแบบงานด้านวิศวกรรม มักจะเกี่ยวข้องกับกำลังในการรับน้ำหนักของหิน ซึ่งได้ แก่กำลังอัดแกนเดียว กำลังอัดสามแกน กำลังเฉือน กำลังดึง และดัชนีกำลังกดจุด ซึ่งสมบัติด้านกำลังและวิธีการทดสอบจะได้กล่าวในรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

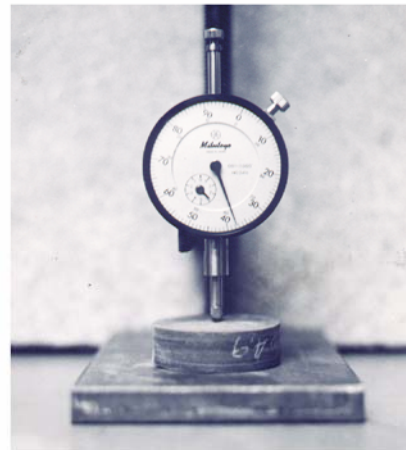
การทดสอบในห้องปฏิบัติการของแท่งหินตัวอย่าง เพื่อหาลำดับความแข็งแรงของหิน เป็นวิธีการที่แพร่หลาย ซึ่งมาตรฐานการทดสอบมักจะปฏิบัติตามข้อเสนอแนะของมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM (American Society for Testing and Material) หรือ ตามคณะกรรมการกลศาสตร์หินแห่งนานาชาติ (International Society for Rock Mechanic, ISRM) ซึ่งลักษณะของแท่งตัวอย่างมักจะอยู่ในรูปของทรงกระบอก เราจะเตรียมตัวอย่างโดยใช้เครื่องเจาะแท่งตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยทั่วไปมักใช้ขนาด 54 มม. (NX) เมื่อได้แท่งตัวอย่างแล้ว จะตัดให้มีขนาดความยาว (L) ตามมาตรฐานทดสอบซึ่งกำหนดสัดส่วน L/D ไว้ที่ 2 - 2.5 สำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและสามแกน ส่วนการทดสอบกำลังกดจุด (point load strength test) และการทดสอบหาลำดับดึงด้วยวิธีบราซิลเลียน (Brazilian Test) จะใช้ค่า L/D = 1 และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อตัดตัวอย่างแล้วจะทำการฝนหน้าทั้งสองข้างให้เรียบเพื่อลบรอยใบเลื่อย ทำการตรวจวัดการเอียงและความขรุขระของผิวโดยใช้ปลั๊กรูปตัว V (รูปที่ 4.4 ก) และตรวจวัดว่าผิวหน้าทั้งสองเรียบจะกระทำโดยใช้มาตรวัดแสดงหน้าเรียบขนาน (รูปที่ 4.4 ข)

4.3.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวหรือกำลังอัดปราศความดันล้อม (Co, Uniaxial or Unconfined Compressive Strength)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2938-86 หรือ ISRM (1972) ตัวอย่างจะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาด NX และมีสัดส่วน L/D ประมาณ 2-2.5



(ก)

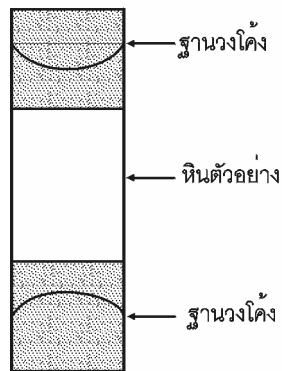


(ข)

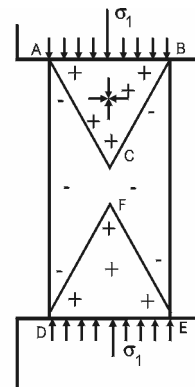
รูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 (ก) บล็อกรูปตัว V และ (ข) มาตรฐานวัดหน้าเรียบขนาน

ตัวอย่างมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งความยาวและต่างกันไม่เกิน 0.127 มม. แกนดิ่งเอียงไม่เกิน 0.25° ปลายทั้งสองเรียบขนานมีความต่างไม่เกิน 0.025 มม. ตัวอย่างจะทดสอบภายใต้แรงอัดในแกนดิ่ง (แนวแกนทรงกระบอก) โดยวางบนฐานวงโค้ง (spherical seat) ที่ปลายทั้งสองของแท่งตัวอย่าง เพื่อให้แรงที่ตกลงกระจายทั่วตัวอย่างในแนวดิ่งตลอดการทดสอบ (รูปที่ 4.5 ก-ข) ทำการกดตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติภายใน 5-15 นาที ตัวอย่างมักจะแตกเป็นระนาบเหมือนรูปโคน หรือมีรอยแตกในแนวดิ่งร่วม (รูปที่ 4.6 ก-ข-ค)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) การวางตัวอย่างทดสอบ และ (ข) การกระจายความเค้นภายในตัวอย่าง

$$\text{ค่ากำลังอัดคำนวณได้จาก } C_o = F_{\max}/A$$

$$F_{\max} = \text{แรงสูงสุดที่จุดวิบัติ}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}$$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการแตกของหินจากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ถ้าแท่งตัวอย่างมีขนาด $L/D < 2$ ค่ากำลังอัดควรจะได้ปรับแก้ค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned} C_o &= C_a / (0.88 + (0.24 D/L)) \\ C_o &= \text{กำลังอัดที่ } L/D = 2 \\ C_a &= \text{กำลังอัดของตัวอย่างที่ } L/D \neq 2 \\ D &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ} \\ L &= \text{ความยาวแท่งตัวอย่างทดสอบ} \end{aligned}$$

ในการทดสอบควรได้จดบันทึกลักษณะเนื้อตลอดจน โครงสร้างต่างๆ ของหินตัวอย่าง และหาปริมาณความชื้น และลักษณะการแตกหักแตกเป็นระนาบเนียนควรวัดมุมของระนาบแตกด้วยนำค่ามุมประเมินเส้นเกณฑ์การวิบัติของหินดังได้กล่าวในหัวข้อ 3.6 เพื่อให้ได้ค่าที่จะนำไปประเมินหรือออกแบบควรจะมีจำนวนตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง ตารางที่ 4.6 แสดงถึงกำลังอัดแกนเดียวของหินหลากชนิด เดียร์และมิลเลอร์ (Deere and Miller) ได้ทำการจัดจำแนกหินโดยใช้เกณฑ์ค่ากำลังกดอัดแกนเดียว และโดยใช้เกณฑ์สัดส่วนโมดูลัส ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนระหว่างค่าโมดูลัสอีลาสติก(E) กับค่ากำลังอัดแกนเดียว C_o ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8ตามลำดับซึ่งในการจัดจำแนกอาจใช้เกณฑ์ทั้งสองร่วมกันได้โดยระดับการจำแนกก็จะใช้สัญลักษณ์ทั้งสองร่วมกันดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดแกนเดียว(C_o) ของหินชนิดต่างๆ

ชนิดหิน และแหล่ง	กำลังอัดแกนเดียว (MPa)
บะซอลต์ อ.น้ำเย็น จ. อุบลราชธานี	130-189
บะซอลต์ผุ อ.น้ำเย็น จ. อุบลราชธานี	35-96
หินแกรนิต ภูระนาว จ. เลย	54-145
หินแกรนิต ภูเหล็ก จ. เลย	37-152
หินทรายมนกรวด น้ำสาน จ. เลย	6.1-8.1
หินโคลนสีม่วง น้ำสาน จ.เลย	8.3-26.7
หินทรายแป้ง น้ำหมาน จ.เลย	11.6-24.8
เกลือหินชั้นล่าง จ. อุครธานี	11-19
เกลือหินชั้นกลาง จ. อุครธานี	28
หินอ่อน (Brecciated) ปากช่อง จ. นครราชสีมา	20-56
หินโคลนปูน ลำตะคอง จ. นครราชสีมา	25.8
หินแกรนิต ลำตะคอง จ. นครราชสีมา	92.0
หินอาร์โคส (หินทราย) ลำตะคอง จ. นครราชสีมา	92-94

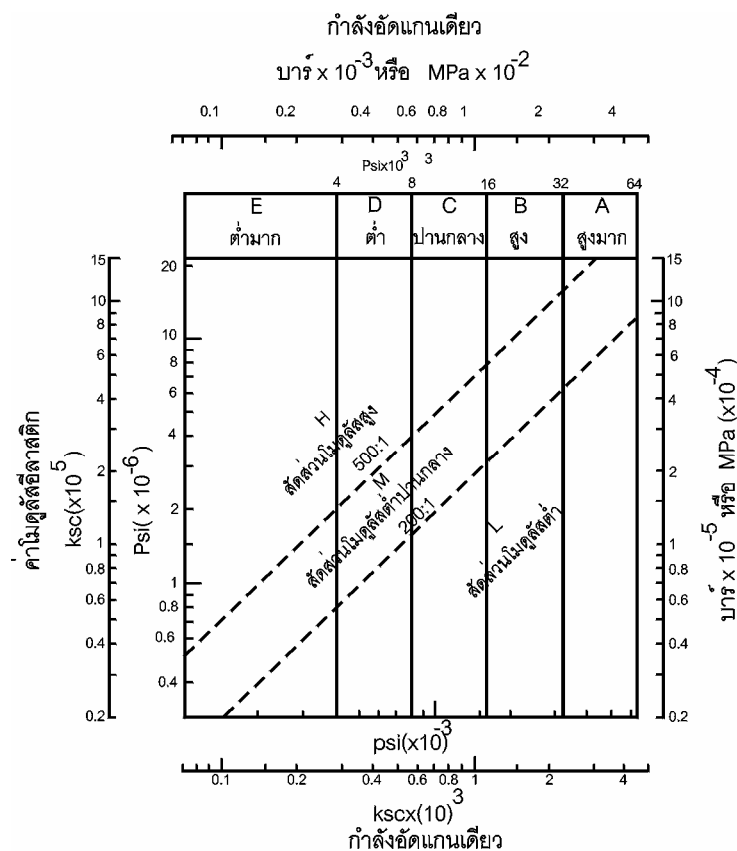
รวบรวมจากหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีธรณี ภาควิชาเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตาราง ที่ 4.7 การจัดจำแนกของเดียร์และมิลเลอร์โดยใช้เกณฑ์กำลังอัดแกนเดียว
(Deere and Miller, 1966)

ระดับการจำแนก	ชั้นกำลัง	กำลังอัดแกนเดียว	
		psi	(MPa)
A	สูงมาก	> 32,000	(> 220)
B	สูง	16,000-32,000	(110-220)
C	ปานกลาง	8,000-16,000	(55-110)
D	ต่ำ	4,000-8,000	(25-55)
E	ต่ำมาก	< 4,000	(< 25)

ตาราง ที่ 4.8 การจัดจำแนกของเดียร์และมิลเลอร์โดยใช้เกณฑ์สัดส่วนโมดูลัส
(Deere and Miller, 1966)

ระดับ	ชั้นสัดส่วนโมดูลัส	สัดส่วนโมดูลัส (E/C ₀)
H	สูง	> 500
M	ปานกลาง	200-500
L	ต่ำ	<200

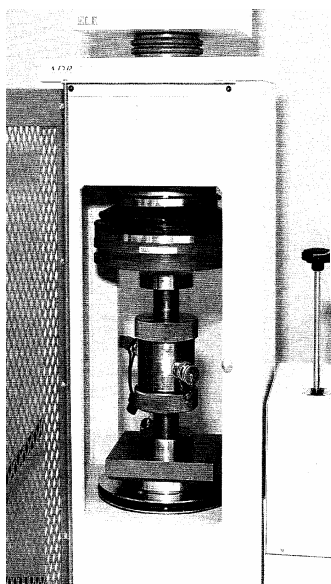


รูปที่ 4. 7 การจัดจำแนกโดยกำลังอัดแกนเดียวและสัดส่วนโมดูลัสของเดียร์และมิลเลอร์

4.3.2 การทดสอบกำลังอัดสามแกนหรือกำลังอัดภาวะความดันล้อม

(Triaxial or Confined Compressive Tests)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบตัวอย่างในภาวะความดันล้อมใกล้เคียงธรรมชาติที่หินตัวอย่างนี้อยู่ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D 2664-86 และ ISRM (1981) เครื่องทดสอบประกอบด้วย เครื่องกด ปัมป์ไฮดรอลิกสำหรับให้ความดันล้อม ซึ่งอาจใช้ระบบเซอร์โวหรืออาจใช้ระบบอื่น ๆ เพื่อให้ความดันคงที่ตลอดการทดสอบ และเซลล์สำหรับทดสอบที่เป็นที่นิยมคือ แบบ Hoek - Franklin (รูปที่ 4.8) ซึ่งมีเซลล์ทดสอบตัวอย่างได้หลายขนาด ภายในเซลล์จะมีปลอกยางสำหรับหุ้มกันตัวอย่างออกจากน้ำมันไฮดรอลิก ตัวอย่างมีขนาด $L/D = 2$ จะได้รับความดันล้อม (σ_3) จากการอัดความดันโดยปัมป์ไฮดรอลิก แล้วทำการกดตัวอย่างตามแนวแกนจนกระทั่งถึงจุดวิบัติจะ



ให้ค่า

(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ชุดทดสอบกำลังอัดภายใต้ภาวะความดันล้อมของบริษัท ELE International (ก)

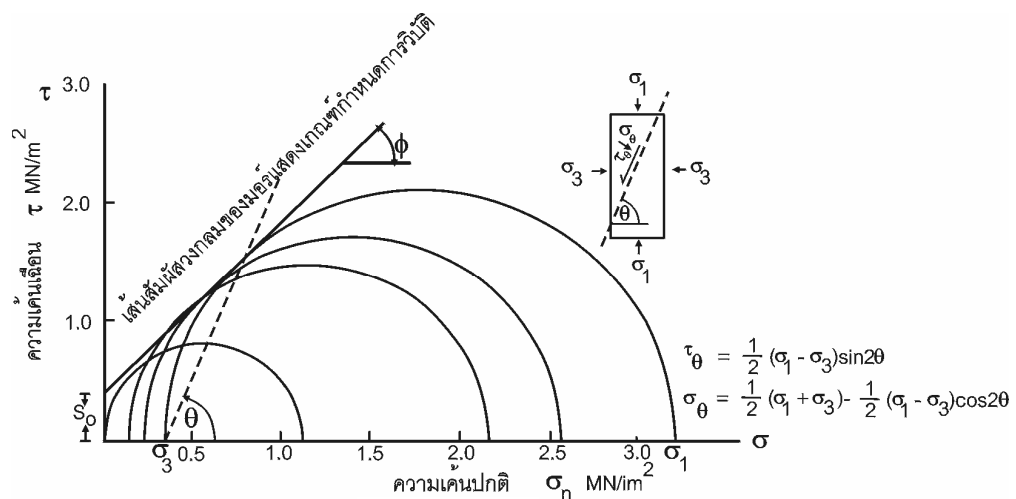
แสดงการทดสอบและ (ข) ส่วนประกอบของเซลล์ทดสอบ และ ตัวอย่างหิน

กำลังอัดภายใต้ภาวะความดันล้อมที่กระทำและมีค่าเท่ากับความเค้นหลักค่ามาก (σ_1) นำตัวอย่างออกมาสังเกตรูปแบบการแตก (รูปที่ 4.9) วัดมุมของระนาบวิบัติมาสร้างวงกลมความเค้นของมอร์ทำการทดสอบอีก 2 ตัวอย่างที่ความดันล้อมเพิ่มขึ้น และกดตามแนวแกนจนกระทั่งถึงจุดวิบัติเช่นเดิม เขียนวงกลมความเค้นในภาวะ σ_1 และ σ_3 ของแต่ละการทดสอบ ลากเส้นสัมผัสผ่านวงกลมทั้งสาม ซึ่งจะสัมผัสสวกลมที่จุดภาวะความเค้นบนระนาบวิบัติของแต่ละตัวอย่าง (รูปที่ 4.10) จากเส้นสัมผัสนี้คือเส้นเกณฑ์การวิบัติได้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังเฉือน S_o และ ϕ

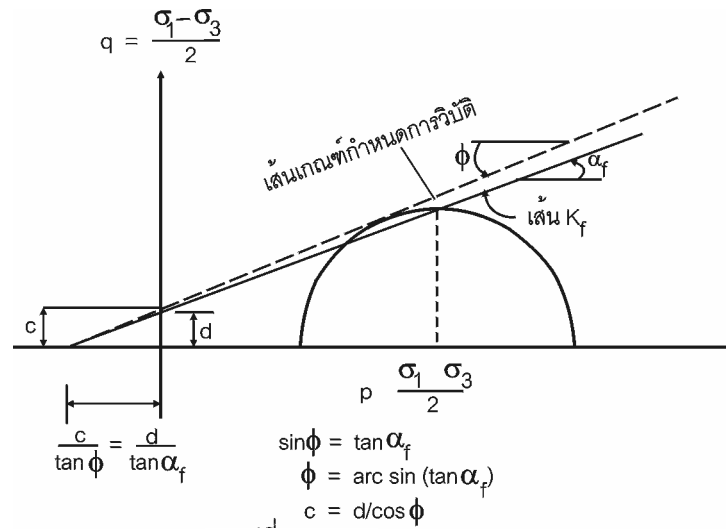
กราฟเส้นตรงที่แสดงค่า α , d (รูปที่ 4.11) หรือกราฟระหว่าง σ_1, σ_3 ค่าพารามิเตอร์กำลังเหนือนอาจคำนวณได้จาก $\phi = \sin^{-1}\left(\frac{m-1}{m+1}\right)$ และ $c = b \frac{1-\sin \phi}{2 \cos \phi}$ ดังรูปที่ 4.12



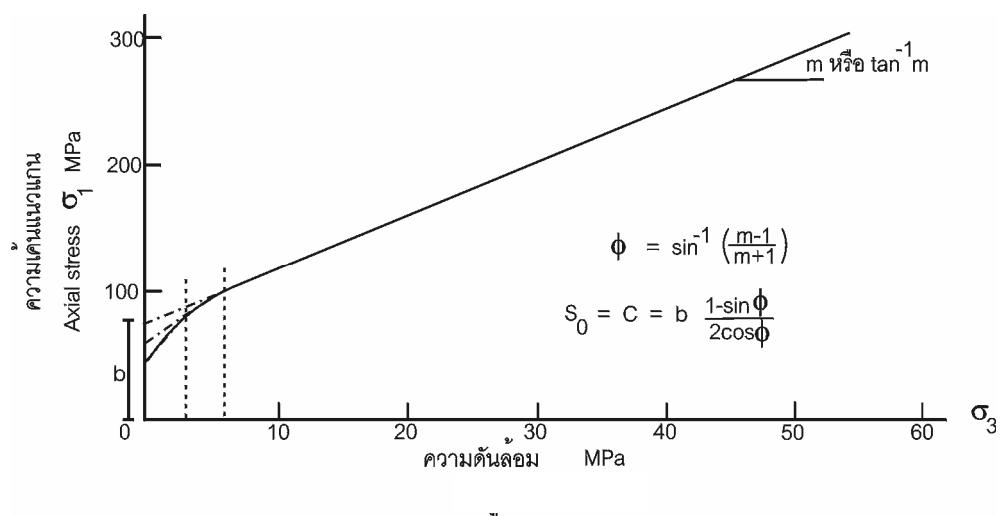
รูปที่ 4.9 หินที่ทดสอบกำลังอัดได้ภาวะความดันล้น (ก) แสดงการระนาบแตกเดี่ยวชัดเจน และมีริ้วรอยแตกของการวิรูปแบบพลาสติก (ข) ผิวรอยแตกเรียบลื่น แสดงการบดไถล



รูปที่ 4.10 การเขียนเส้นเกณฑ์การวิบัติของมอร์จากการทดสอบกำลังอัดภาวะความดันล้อม



รูปที่ 4.11 การเขียนเส้นเกณฑ์การวิบัติโดยใช้เส้นทางของความเค้น



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_1 กับ σ_3 ภายใต้การทดสอบกำลังอัดสามแกน

4.3.3 การทดสอบดัชนีกำลังกดจุด (Point Load Strength Index Test)

การทดสอบนี้เป็นการหาค่าดัชนีกำลังกดจุด ($I_{s(50)}$) และดัชนีแอนไอโซโทรปี (anisotropy index, $I_{a(50)}$) เราสามารถใช้ค่าดัชนีกำลังกดจุดไปประเมินค่ากำลังอัดและกำลังดึงโดยการเทียบสัมพันธ์ (correlation or empirical method) เครื่องมือทดสอบ (รูปที่ 4.13) ประกอบด้วยหัวกดรูปกรวย และเครื่องปั๊มไฮดรอลิกสำหรับอัดแรงพร้อมแท่นและมาตรวัดความดัน (ในปัจจุบันเครื่องมือ

รุ่นใหม่มักจะติดตั้งมาตรวัดที่ปรับค่าเป็นแรงกดแล้ว) ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบอาจมีรูปทรงกระบอกหรือรูปแท่งเหลี่ยมหรือรูปทรงก้นอื่นๆ ขนาดของตัวอย่างในรูปทรงกระบอกควรมีขนาด $L/D = 1$ ซึ่งขนาดและรูปร่างของตัวอย่างจะขึ้นกับรูปแบบการวางตัวอย่างระหว่างหัวกด (รูปที่ 4.14) บันทึกระยะทางระหว่างหัวกด (D) ทำการอัดตัวอย่างจนถึงจุดวิบัติ บันทึกค่าความดันแล้วปรับเทียบเป็นแรง (P) (ในกรณีใช้มาตรวัดแรงอ่านค่าจากมาตรโดยตรง) ที่ทำให้ตัวอย่างวิบัติแตกออกด้วยแรงดังรูปที่ 4.15 (ก-ข-ค) ถ้าตัวอย่างแตกดังรูปที่ 4.15 (ง-จ) นั่นถือว่าการทดสอบนั้นไม่ถูกต้องควรทำการทดสอบใหม่ ค่าดัชนีกำลังกดจุดของตัวอย่าง (I_s) คำนวณได้จาก $I_s = P/D^2$ และค่าดัชนีกำลังกดจุด $I_{s(50)}$ ที่มาตรฐานขนาด 50 มม. จะปรับได้จากกราฟมาตรฐาน (รูปที่ 4.16) หรือคำนวณจาก

$$\begin{aligned} I_{s(50)} &= F \cdot I_s \\ \text{เมื่อ } F &= \text{ปัจจัยการแก้ค่า} \\ F &= (De/50)^{0.45} \text{ หรือประมาณ } \sqrt{\left(\frac{De}{50}\right)} \quad (\text{รูปที่ 4.17}) \end{aligned}$$

$D_c^2 = D^2$ เมื่อทดสอบในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก (diametral)
และ $D_c^2 = 4A/\pi$ เมื่อทดสอบในแนวแกนหรือบนตัวอย่างที่เป็นก้อน
 $A = W \cdot D =$ พื้นที่ภาคตัดขวางที่น้อยที่สุดของตัวอย่างที่อยู่ระหว่างหัวกด ส่วน $I_{a(50)}$ หาได้ $\left(I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)} \perp}{I_{s(50)} \parallel} \right)$ จากสัดส่วน $I_{s(50)}$ ที่ได้จากการกดตั้งฉากและขนานกับระนาบไม่ต่อเนื่องของตัวอย่าง ถ้า $I_{a(50)}$ เข้าใกล้ 1 แสดงว่าหินตัวอย่างค่อนข้างไปทางไอโซโทรปิก แต่ถ้ามากกว่า 1 ก็จะเป็นแอนไอโซโทรปิก กำลังอัดแกนเดียวของหินจะมีค่าประมาณ 20-25 เท่าของ $I_{s(50)}$ ในหินบางชนิดอาจมีค่า $(15-50)I_{s(50)}$ ขึ้นกับชนิดของหินและระดับความผุ การทดสอบหินแกรนิตพื้นที่จังหวัดเลย เทียบระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและดัชนีกำลังกดจุดได้ว่า $C_0 \approx 19.4 I_{s(50)}$ (พันศักดิ์ วรรณขาว, 2536) และหินบะซอลต์จังหวัดบุรีรัมย์ $C_0 \approx 13 I_{s(50)}$ (สุมาลี ทิพย์โยภาส, 2540)

แฟรงกลิน (Franklin) ได้ใช้ดัชนีกำลังกดจุดเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวแบ่งกลุ่มหินออกเป็น 7 ระดับ คือ กำลังต่ำสุด(EL) ต่ำมาก(VL) ต่ำ(L) ปานกลาง(M) สูง(H) สูงมาก(VH) และสูงสุดยอด(EX) ดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้อิรามัตสึและโอกะ(Hiramutsu and Oka, 1966) และ Wijk (1979) ใช้ค่ากำลังกดจุดในการหาลำดับของหินดังนี้ กำลังดึง $\sigma_t = \beta \cdot I_s$ เมื่อหินที่ทดสอบมีรูปร่างเป็นทรงกลม $0.77 < \beta < 0.89$ และ $0.39 < \beta < 0.61$ ถ้าหินทดสอบมีรูปร่างเป็นเพลท ซึ่งการเลือกค่า β พิจารณาจาก $3 < m < 10$ โดย $\nu = \frac{mE}{2(m+1)}$ หรือ $m = \frac{2\nu}{(E - 2\nu)}$

4.3.4 การทดสอบกำลังดึงของหิน โดยวิธี บราซิลเลียน (Brazilian Test)

การทดสอบนี้จะเป็นการหาค่ากำลังดึงของหินทางอ้อม เนื่องจากแรงที่กระทำต่อตัวอย่างหินจะเป็นแรงกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง ตัวอย่างจะแตกออกตามแกนของการกด โดยความเค้นดึง Fairhurst (1969) Mellor และ Hawkes (1971) ได้ทำการศึกษาถึงความถูกต้องของ

วิธีการทดสอบ โดยตรวจสอบภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างตามแนวแตก พบว่าเป็นค่าความเค้นดึง (รูปที่ 19 ก-ข) ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การวิบัติของกริฟฟิธ นั่นคือ



รูปที่ 4.13 แสดงชุดทดสอบกำลังกดจุดของห้องปฏิบัติการกลศาสตร์หิน ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เมื่อ

$$\sigma_{\theta} = \sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt}$$

D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่าง

t = ความหนาของตัวอย่าง

$$P = \text{แรงที่กระทำจนถึงจุดวิบัติ}$$

สำหรับการทดสอบนี้ถูกต้องเมื่อตัวอย่างเริ่มแตกจากจุดศูนย์กลางของตัวอย่าง และขนาดของตัวอย่างควรมี $t/D = 0.5$ แนวแตกควรจะเป็นเส้นตรงตามแกนการกด (รูปที่ 4.20) หากตัวอย่างมีการบิดแตกบริเวณที่สัมผัสกับการกด ควรจะทำการทดสอบใหม่เพราะตัวอย่างอาจจะแตกเนื่องจากความเค้นเฉือนที่บริเวณสัมผัสนั้นแทนที่จะเกิดจากความเค้นดิ่งที่กึ่งกลางตัวอย่าง จากวิธีการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีการเรียงตัวของเนื้อหิน หรือเป็นแอนไอโซโทรปี ทิศทางการกดกับทิศทางของรอยความไม่ต่อเนื่องจะมีผลต่อกำลังดิ่งของหิน

4.3.5 การทดสอบกำลังเฉือนของหิน

เราสามารถหาลำดับเฉือนของหินได้ทั้งวิธีทดสอบเฉือนตรง หรือใช้วิธีทดสอบการกดสามแกนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.2 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบเฉือนตรงซึ่งอุปกรณ์การทดสอบ และหลักการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 ประกอบด้วย กล่องใส่ตัวอย่างสำหรับการเฉือนแยกชิ้นบนล่าง ให้ความเค้นปกติในแนวดิ่ง (σ_n) ในการทดสอบจะบันทึกค่าแรงเฉือน และระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวเฉือน (δ) จนกระทั่งตัวอย่างสูญเสียกำลัง ทำการเฉือนต่อไปจนกระทั่งกำลังเฉือนที่เหลือมีค่าคงที่สักระยะหนึ่ง (รูปที่ 4.22) ค่ากำลังเฉือนสูงสุดจะเรียกว่า กำลังเฉือนสุดยอด (peak shear, τ_p) ส่วนกำลังเฉือนที่คงที่หลังจากผ่านกำลังเฉือนสุดยอดแล้วเรียกว่า กำลังเฉือนคงเหลือ (residual shear, τ_r) ทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ตัวอย่างย่อย (subsample) โดยเพิ่มค่า σ_n ในแต่ละครั้ง σ_n จะประเมินจากภาวะความเค้นประสิทธิผล ณ ความลึกที่เก็บตัวอย่างมาทดสอบ หากด้วยจำนวนตัวอย่างย่อยที่จะทดสอบก็จะเป็นค่าความเค้นปกติที่จะเพิ่มให้แก่ตัวอย่างในแต่ละการทดสอบ นำค่า (σ_n, τ_p) และ (σ_n, τ_r) ของแต่ละตัวอย่างลงในกราฟของมอร์ จะได้เกณฑ์การวิบัติของกำลังเฉือนสุดยอด (peak shear strength) และ กำลังเฉือนคงเหลือ (residual shear strength) ซึ่งได้พารามิเตอร์ของกำลังเฉือน เป็น C_p, ϕ_p และ C_r, ϕ_r ตามลำดับ (รูปที่ 4.23)

Rock	V_l^* m/s
Gabbro	7000
Basalt	6500-7000
Limestone	6000-6500
Dolomite	6500-7000
Sandstone and quartzite	6000
Granitic rock	5500-6000