4

การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis)

4.1 กลวิธีวิเคราะห์
4.2 แรงภายใต้ผิวโลก
4.3 ชนิดแรง
4.4 แรงเค้น
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด
4.6 สมบัติของหิน
4.7 สมบัติแรงเค้นและความเครียดของแผ่นเปลือกโลก

บทที่ 4
การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis)

4.1 กลวิธีวิเคราะห์

ความสำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างก็คือ การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ ซึ่งในที่นี้เราให้ความหมายว่าเป็นการวิเคราะห์ปริมาณแรงเค้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุ เพื่อบอกถึงที่มาของแรงเค้นและผลของแรงกระทำต่อความแกร่งหรือความแข็งแรงของหิน ดังนั้น การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์จึงเน้นถึง "***แรงที่มากระทำจนทำให้วัตถุเปลี่ยนลักษณะและความแข็งแรงของหินที่จะต่อต้านการเปลี่ยนลักษณะ***" ในที่นี้แรง(force) มีหลายรูปแบบ เช่น แรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง แรงที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนมุมไป หรือเปลี่ยนรูปร่างไป ในความเป็นจริงแล้วเรารู้จักคุ้นเคยกับแรงมาตั้งแต่เด็กๆ ด้วยกันทุกคน การที่เราต้องการทำให้วัตถุเคลื่อนที่เราต้องออกแรงยกหรือถ้าเราปล่อยวัตถุจากที่สูงให้ตกลงสู่พื้นก็เป็นผลจากแรงดึงดูดของโลก(gravitational force) ความเคยชินอย่างหนึ่งที่เราเคยพบเห็นมา ก็คือถ้าเราใช้แรงเท่าๆ กันกระทำต่อวัตถุในสถานะเดียวกัน (เช่น เป็นของแข็งเหมือนกัน) และมีขนาดเท่ากัน แต่ผลที่ได้อาจไม่เหมือนกันเสมอไป เช่น เราใช้หนังสติ๊กอันเดียวกัน แต่ใช้ลูกยิงแตกต่างกัน ลูกหนึ่งเป็นก้อนดิน อีกลูกเป็นก้อนหินที่ขนาดเท่ากัน เราจะพบว่าก้อนดินเหนียว ซึ่งเบากว่าก้อนหิน ยิงไปได้ไกลกว่าที่เป็นเช่นนี้เพราะก้อนดินเบากว่า จึงเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่า ซึ่งในเรื่องของแรงมีกฎสำคัญเกี่ยวกับแรงอยู่ 3 กฎด้วยกัน และเป็นที่รู้จักกันดีกว่า "กฎ 3 ข้อ ของนิวตัน" (Newton's laws of motion) กฎดังกล่าวเป็นผลมาจากความช่างสังเกตของเซอร์ไอแซค นิวตัน(Isac Newton) เพื่อหาทางตอบคำถามที่ว่าทำไมผลแอปเปิลจึงหล่นสู่พื้นดินได้ โดยไม่ลอยไปในอากาศ ในทางธรณีวิทยาโครงสร้างจึงอาจกล่าวได้ว่ากฎการเคลื่อนที่ของนิวตันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ ปี พ.ศ. 2228 เซอร์ไอแซค นิวตัน ได้ตั้งกฎการเคลื่อนที่ไว้ 3 กฎ ในหนังสือของเขาคือ Principia ซึ่งได้แก่

กฎข้อที่ 1 กล่าวว่า "วัตถุจะอยู่ในสภาพหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตลอดไปโดยไม่มีความเร่ง (acceleration, a) ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำกับวัตถุนั้น" ซึ่งบอกให้เราทราบว่ามีเพียงแรงเพียงอย่างเดียวที่จะเปลี่ยนลักษณะของวัตถุทุกชนิดได้

กฎข้อที่ 2 กล่าวว่า "ความเร่ง (a) ของวัตถุหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงภายนอก (F) ที่มากระทำต่อวัตถุ โดยมีทิศทางเดียวกัน แต่จะเป็นปฏิภาคผกผันกับมวล (mass, m) ของวัตถุ" โดยมีที่มาของสมการ 4.1 ดังนี้

$$a \propto F,\ a \propto 1/m \text{ หรือ } a \propto F/m \text{ หรือ } F \propto am$$

$$\text{นั่นคือ } F = kam \qquad (4.1)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่และในหน่วยของ SI ค่า k=1 เราจึงทราบกันในรูปของสมการ 4.2

$$F=ma \qquad (4.2)$$

กฎข้อที่ 3 กล่าวว่า "แรงกระทำย่อมมีขนาดเท่ากับแรงต้านการกระทำ (หรือแรงปฏิกิริยา) แต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ"

สรุปกล่าวอย่างง่ายก็คือ กฎข้อ 1 ของนิวตัน กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อไม่มีแรงกระทำ กฎข้อ 2 กล่าวถึงการเคลื่อนที่เมื่อมีแรงกระทำ และกฎข้อ 3 กล่าวถึงแรงกระทำระหว่างมวลวัตถุ (mass) และน้ำหนักวัตถุ (weight, W)

มวล (mass) ของวัตถุ คือปริมาณเนื้อสารที่อยู่ในวัตถุ ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม สำหรับหน่วย SI โดยที่มวลคือผลคูณระหว่างความหนาแน่น (density,ρ) กับปริมาตรวัตถุ (Volume, V) ดังสมการ 4.3

$$m=\rho V \qquad (4.3)$$

กำหนดให้น้ำหนักวัตถุ (weight หรือ W) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างมวลวัตถุกับค่าแรงดึงดูดของโลก (ค่า g) ดังสมการ 4.4

$$W=mg \qquad (4.4)$$

$$\text{เมื่อ } g=9.8\ m/s^2$$

โดยปกติแรงมีหน่วยเป็น นิวตัน(Newton, N) โดยที่ 1 นิวตัน (ดูรายละเอียดในตาราง4.1) ใช้อธิบายว่า ถ้าเราออกแรงดัน 1 กิโลกรัม ทำให้วัตถุเกิดความเร่งหรือความหน่วง 1 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง(m/s^2) การคิดหน่วยของแรงก็เพื่อให้จดจำง่ายนั่นเอง ดังสมการ 4.5

$$F = ma = \text{massxaccerelation} = kg/(m/s^2) = \text{Newton(N)} \qquad (4.5)$$

ตาราง 4.1 หน่วยที่ใช้วัดและการเปลี่ยนค่าหน่วยวัด (Davis & Reynolds, 1996)

เปลี่ยนหน่วย (Convert)	สัญญลักษณ์ (Symbol)	ไปเป็น (to)	คูณด้วย (Multiply by)
		Length	
centimeter	(cm)	inch	0.39370
centimeter	(cm)	meter	10^{-2}
meter	(m)	feet	3.2808
meter	(m)	centimeter	10^{2}
kilometer	(km)	mile	0.621371
kilometer	(km)	meter	10^{3}
mile	(mi)	kilometer	1.6093
feet	(ft)	meter	0.3048
inch	(in.)	centimeter	2.54
micrometer	(μ)	meter	10^{-6}
		Area	
square meter	(m^2)	cm^2	10^{4}
square meter	(m^2)	ft^2	10.7636
		Volume	
cubic meter	(m^3)	cm^3	10^{6}
cubic meter	(m^3)	ft^3	35.3134
		Weight	
gram	(g)	pound	0.0022046
pound	(lb)	kilogram	0.453592
kilogram	(kg)	pound	2.20462
		Mass	
kilogram	(kg)	gram	10^{3}
kilogram	(kg)	slug	68.521×10^{-3}
		Acceleration	
meter/second (sec)	(m/s^2)	ft/s^2	3.2808
		Force	
newton	(N)	$kg\text{-}m\text{-}s^{-2}$	1
dyne	(d)	$g\text{-}cm\text{-}s^{-2}$	1
newton	(N)	dyne	10^{5}
dyne	(d)	newton	10^{-5}
newton	(N)	poundal	7.2330
		Pressure, Stress	
pound/sq inch	(psi)	bar	0.0689
bar	(b)	psi	14.5038
bar	(b)	atmosphere	0.98692
bar	(b)	$dyne/cm^2$	10^{6}
$newton/m^2$	(N/m^2)	pascal	1
pascal	(Pa)	$newton/m^2$	1
kilopascal	(KPa)	Pa	10^{3}
megapascal	(MPa)	Pa	10^{6}
gigapascal	(GPa)	Pa	10^{9}
bar	(b)	Pa	10^{5}
bar	(b)	megapascal	10^{-1}

แรงที่มากระทำมักคิดเป็นปริมาณเวคเตอร์ (รูป 4.1) ซึ่งหมายถึงต้องกำหนดขนาด (magnitude) และทิศทาง (orientation) ของแรง ดังนั้นเมื่อแรงใดอยู่ในทิศทางเดียวกันแรงจะเสริมกัน แต่ถ้าอยู่ในทิศตรงข้ามกับแรงจะหักล้างกัน

4.2 แรงภายใต้ผิวโลก

โดยทั่วไปแรงที่กระทำให้เปลือกโลกเปลี่ยนลักษณะมี 2 ลักษณะ (1) แรงกระทำที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่อย่างช้าๆแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่น การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกที่มีความเร็วเพิ่มจาก 5 เซนติเมตร ต่อปีไปเป็น 6 เซนติเมตรต่อปี ในทุกๆ หลายพันปี แสดงว่าความเร่งของเปลือกโลกเกิดขึ้นได้น้อยมาก และ (2) แรงมหาศาลที่ทำให้เปลือกโลกเคลื่อนที่อย่างรุนแรงและรวดเร็ว เช่น แรงที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว หรือภูเขาไฟระเบิด ซึ่งทำให้หินเปลี่ยนลักษณะโดยฉับพลันในเวลาอันสั้น

ดังนั้นในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างเราจึงนิยมศึกษาผลของแรงแบบค่อยเป็นค่อยไปอย่างช้าๆ จนทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการเลื่อนที่ การหมุน การยืดหด หรือการบิดเบี้ยว โดยที่วัตถุนั้นไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อถูกแรงกระทำ และทำให้ปรากฏเป็น **“ผลลัพธ์ของแรงที่บันทึกไว้ในหิน”** นั่นเอง

4.3 ชนิดของแรง

แรงที่มีผลต่อวัตถุทางธรณีวิทยา(หิน) มีหลักๆ อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ (1) แรงจากมวลวัตถุ (body force) และ (2) แรงจากผิวสัมผัส (contact force)

4.3.1 แรงจากมวลวัตถุ เป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากมวลวัตถุนั้นโดยตรง และไม่เกี่ยวข้องกับแรงที่เกิดจากวัตถุข้างเคียง เช่น แรงดึงดูดของโลกหรือแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างก็กระทำกับวัตถุได้ แต่ผลของแรงจากมวลวัตถุทำให้วัตถุเปลี่ยนลักษณะในแบบที่เรามองเห็นได้ ส่วนผลของแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่อวัตถุเฉพาะในส่วนของอะตอมซึ่งเป็นการยากที่เราจะมองเห็นได้ ตัวอย่างผลจากการกระทำของแรงจากมวลวัตถุ เช่น การเลื่อนไถลของหินหรือธารน้ำแข็งลงมาตามความลาดชัน การตกผลึกของแร่จากหินหนืด การผลักดันแผ่นเปลือกโลกในบริเวณสันสมุทร(ridge push) และแรงดึงของแผ่นเปลือกโลกบริเวณมุดตัว(slab pull)

4.3.2 แรงจากผิวสัมผัส เป็นแรงผลักหรือแรงดันบริเวณสัมผัสของวัตถุ เช่น ระนาบรอยเลื่อนระหว่างผนังด้านบน (hanging wall)และผนังด้านล่าง (foot wall) โดยทั่วไปถือว่าน้ำหนักมวลสาร (load) เป็นตัวทำให้เกิดแรงจากผิวสัมผัส ซึ่ง J. Suppe (1985) ได้จัดแบ่งการกดทับตามกลไกการเกิดออกเป็น 3 แบบ คือ

(1) แรงกดทับจากน้ำหนัก (gravitational loading) เป็นแรงที่เกิดจากน้ำหนักที่กดทับเหนือบริเวณผิวสัมผัส

(2) แรงกดทับจากความร้อน (thermal loading) เป็นแรงที่เกิดจากหินร้อนชื้นหรือเย็นลงภายในสภาวะที่จำกัดจนทำให้หินมีการขยายหรือหดตัวขึ้น และ

(3) แรงกดทับจากการเลื่อนที่ (displacement loading) เป็นแรงที่เกิดจากผลการเปลี่ยนลักษณะในหินขนาดใหญ่เนื่องจากการเลื่อนที่ เช่น การชนกัน (collision) ของแผ่นเปลือกโลกทำให้หินหรือชั้นหินเกยซ้อนกัน จนเกิดรอยเลื่อนย้อน การมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกที่ทำให้เกิดการคดโค้ง การแทรกดันของหินหนืด หรือการตกกระแทกของอุกาบาต เป็นต้น

อาจกล่าวได้ว่าผลของแรงจากมวลวัตถุและจากผิวสัมผัสนั่นเองที่เป็นตัวการหรือปัจจัยหลักทำให้หินเปลือกโลก (crustal rocks) เปลี่ยนลักษณะไป

4.4 แรงเค้น

ถ้ามีแรงมากระทำขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามต่อวัตถุรูปลูกบาศก์ 2 ลูก ที่มีขนาดไม่เท่ากัน ลูกบาศก์เล็กจะรับรู้แรงได้มากกว่าลูกบาศก์ขนาดใหญ่ (รูป 4.2) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าแรงเค้น (stress,σ) เป็นสัดส่วนกับแรง (force, F) และเป็นสัดส่วนผกผันกันกับพื้นที่ (area, A)

$\sigma \alpha$ F และ $\sigma \alpha$ 1/A ซึ่งทำให้เราเขียนเป็นสมการ 4.6 ได้

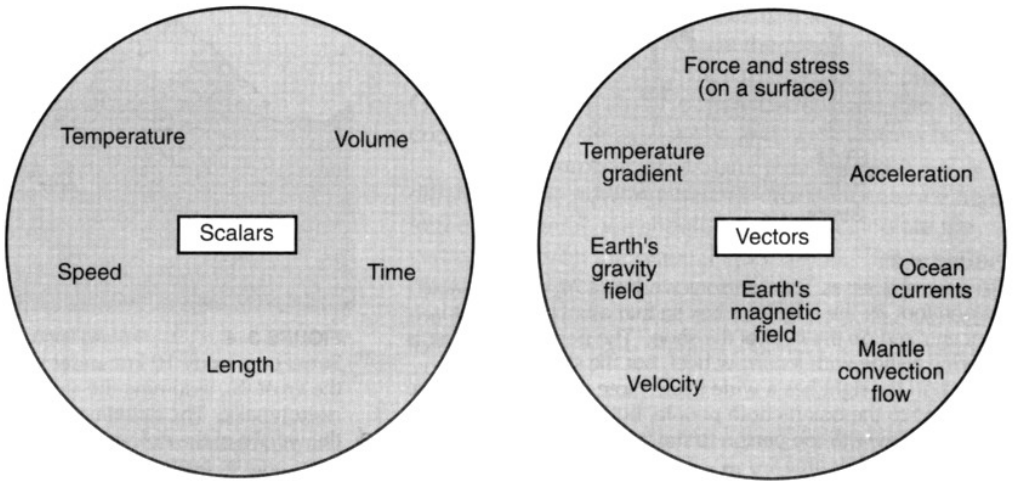
$$\sigma = F/A \tag{4.6}$$

โดยทั่วไปเรากำหนดหน่วยความเค้นให้เป็น *ปาสคาล (pascal, Pa)* โดยที่ 1 ปาสคาล หมายถึง แรง 1 นิวตันกระทำบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร แต่บางครั้งแรงเค้นที่มากระทำต่อวัตถุมีผลต่อการเปลี่ยนลักษณะมากๆ เรามักเรียกว่ากิโลปาสคาล (kilopascal หรือ kPa = 10^3 Pa) เมกกะปาสคาล (megapascal หรือ MPa = 10^6 Pa) หรือกิกะปาสคาล (gigapascal หรือ GPa = 10^9 Pa) โดยเราคิดเทียบหาหน่วยจากสมการ 4.7

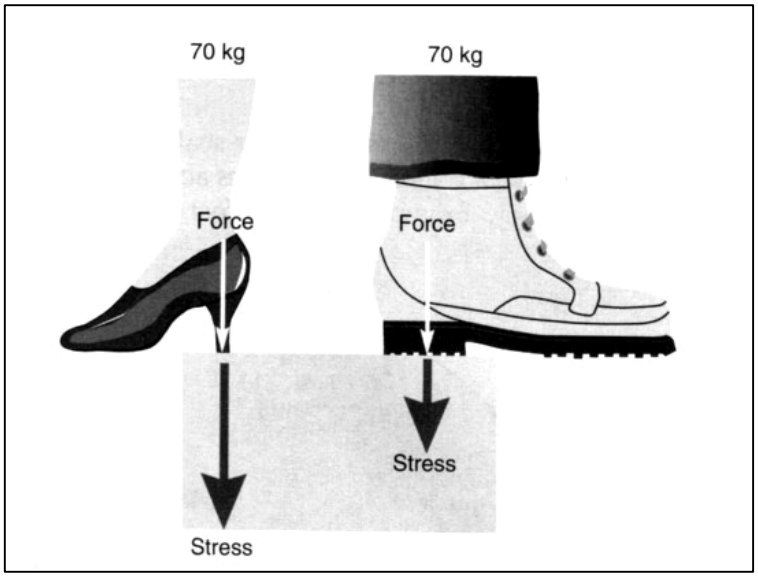
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{kg(m/s^2)}{m^2} = \frac{N}{m^2} = Pascal \tag{4.7}$$

พึงระลึกว่า 1 เมกกะปาสคาล =10^6 ปาสคาล = 10 บาร์ (bar) = 9.869 atm(บรรยากาศ) และแรงมีสภาพเป็นเวคเตอร์ด้วย ซึ่งเราเรียกว่า “ทิศแรงเค้น (stress vector)” หรือ “ทิศครูดถู (traction vector)” นั่นเอง

ดังนั้นถ้าเราพิจารณาจากรูป 4.3 อีกครั้งเราจะทราบว่าแรงเค้นที่กระทำต่อแท่งลูกบาศก์เล็กย่อมมีค่าสูงกว่าที่กระทำต่อลูกบาศก์ใหญ่เพราะพื้นที่ในการรับแรงกระทำน้อยกว่านั่นเอง ลองมาคำนวณดูเล่นๆว่า แท่งแกรนิตรูปลูกบาศก์วางตัวอยู่บนแท่งหินอ่อนรูปทรงกระบอกได้อย่างไร



รูป 4.1 วงกลม(ซ้าย) แสดงสกาลาร์ (Scalars) ข้อมูลเชิงตัวเลขที่บอกขนาด (เป็นหน่วยวัด) และไม่จำเป็นต้องอาศัยทิศทาง และวงกลม (ขวา) แสดงเวคเตอร์ (vectors) –ข้อมูลเชิงตัวเลขที่บอกขนาด (เป็นหน่วยวัด) และอาศัยทิศทางกำหนดบางครั้งเรียกว่า "ขนาดทิศ" (Hatcher, 1995)



รูป 4.2 แรง (forces) และแรงเค้น (stresses) ชาย-หญิงสองคนน้ำหนักประมาณ 70 กิโลกรัม ยืนใส่รองเท้าข้างกล่องสี่เหลี่ยม โดยทิ้งน้ำหนักของเขาไปบนส้นเท้า ผู้หญิงใส่รองเท้าส้นสูง ส่วนผู้ชายใส่รองเท้าพื้นแบนส้นเตี้ยให้สังเกตแรงที่กระทำบนกล่องโดยเขาทั้งสอง แรงเค้นที่กระทำบนกล่องจากผู้หญิงมีมากกว่าแรงเค้นจากผู้ชายเนื่องจากการกดอยู่บนพื้นที่น้อยกว่า(Davis & Reynolds, 1996)

สมมติแกรนิตมีขนาดกว้าง (W) ยาว (L) และสูง (H) 2 เมตร และหินอ่อนมีรัศมี 1 เมตร ขั้นแรกเราคำนวณหาปริมาตรแกรนิต = W x L x H = 2x2x2 เมตร^3 = 8 ลูกบาศก์เมตร (หรือ เมตร^3)

และเราทราบว่าแกรนิตมีความหนาแน่น (ρ) = 2.7 กรัม/ลบซม = 2,700 g/ลบม

ดังนั้นมวลแกรนิต = V_ρ = 8 ม^3 x 2,700 กก/ม^3

= 21,600 กก

ถ้าให้อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง หรือความเร่ง(g) = 9.8 ม/ว^2

และเราทราบว่า แรง(F) = มวล(m) x ความเร่ง(g) = mg

= 21,600 กก x 9.8 ม/ว^2 = 211,680 กก ม/ว^2

= 211,680 N

และเมื่อเราทราบว่าแรงเค้น(σ) = $\frac{\text{แรง(F)}}{\text{พื้นที่(A)}}$

ดังนั้นแรงเค้นที่เกิดจากน้ำหนักกดทับของก้อนหินแกรนิตลงบนแท่งหินอ่อน

พื้นที่(A) = πr^2 = 3.14 x (0.5 m^2) = 0.79 m^2

ดังนั้น $$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{211{,}680N}{0.79m^2} = \frac{267{,}949N}{m^2}$$

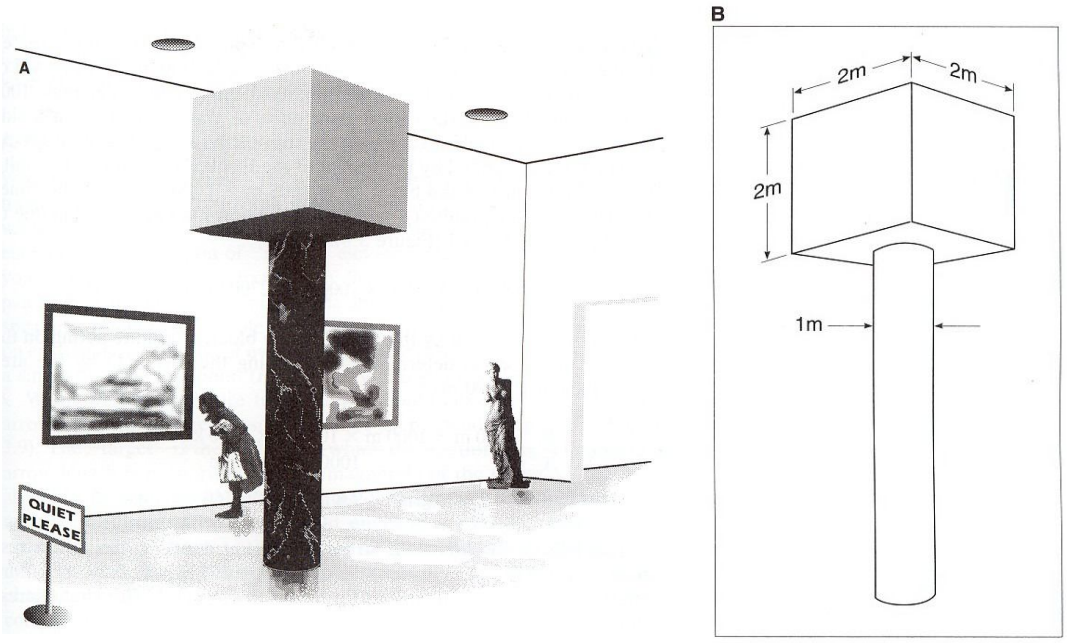
= 267,949 Pa = 268 kPa

ดังนั้นแรงเค้นที่เกิดจากก้อนแกรนิตพยายามทำให้แท่งหินอ่อนเปลี่ยนลักษณะ ซึ่งแท่งหินอ่อนอาจเปลี่ยนลักษณะได้ก็ต่อเมื่อความจุต่อการยืดหยุ่นคล้ายสปริงมีค่าน้อยกว่าแรงเค้นนั่นเอง แต่จริงๆ แรงเค้นจากแกรนิตมีน้อยเกินไป จึงทำให้แท่งหินอ่อนรับน้ำหนักก้อนโตของหินแกรนิตได้ (รูป 4.3) โดยทั่วไปถ้าวัตถุอยู่ในภาวะที่สมดุล แรงที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่าเท่ากันในทุกทิศทุกทาง ณ จุดใดจุดหนึ่ง หรือความลึกใดความลึกหนึ่ง โดยที่ถ้าเป็นหินแข็งมักหมายถึง ความดันหินแข็ง (lithostatic pressure) ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักของหินที่กดทับลงบนขนาดพื้นที่ 2 ตารางหน่วย ณ ความลึกหนึ่งๆ และถ้าเป็นน้ำมักหมายถึงความดันน้ำ (hydrostatic pressure) ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่กดทับลงบนพื้นที่ 1 ตารางหน่วย ณ ความลึกหนึ่งๆ (ดูรูป 4.4) ซึ่งความแตกต่างของความดันทั้งสองในตัวกลางก็คือความแตกต่างเนื่องจากน้ำหนักเป็นสำคัญ

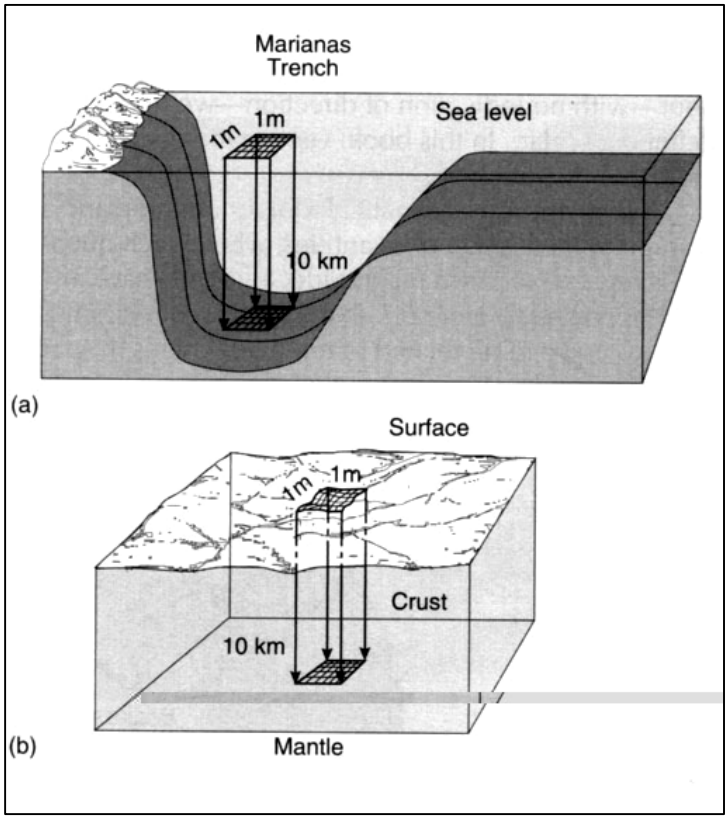
4.4.1 *ความเค้นบนระนาบ*

ในรูป 4.5 ถ้าเราให้ระนาบ P อยู่ที่ระดับใดระดับหนึ่งใต้ผิวดิน ปริมาณแรงเค้นที่ระนาบขึ้นอยู่กับแรง (force) ที่กระทำลงบนระนาบต่อพื้นที่ระนาบ ขนาดและปริมาณแรงเค้นที่กระทำในแนวดิ่ง (σ_v) บนระนาบนั้นๆ จากรูป 4.6 กรณีระนาบมีขนาดเล็กมากๆ (เหมือนเป็นจุด) เราอาจคำนวณแรงเค้นที่เกิดขึ้นได้จากสมการ 4.8

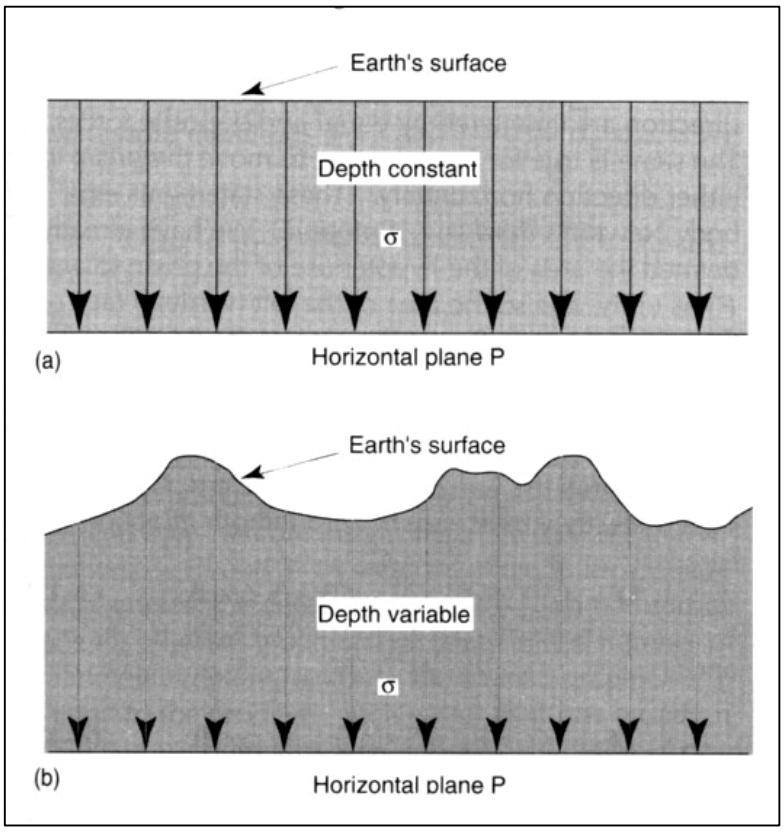
$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \qquad (4.8)$$



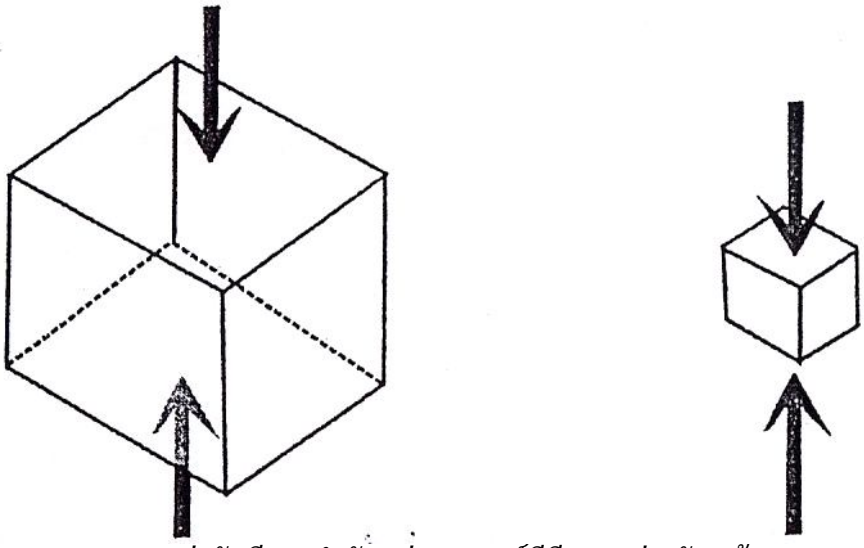
รูป 4.3 (A) รูปหล่อหินแกรนิตที่ตั้งอยู่บนแท่งหินอ่อน สามารถคำนวนหาแรงที่กระทำโดยแกรนิตและแรงเค้นจากหินแกรนิตที่กระทำบนยอดของหินอ่อน (B) เราสามารถหาแรงได้จากปริมาตรคูณความหนาแน่นและคูณแรงโน้มถ่วงของหินแกรนิต ส่วนแรงเค้นสามารถคำนวนหาได้โดย แรงหารด้วยขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงกลม (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.4 สภาพแรงเค้นบนวัตถุลึก 10 กมใต้น้ำ (a) และ 10 กมใต้เปลือกโลก (b) โดยสมมติให้แรงเค้นกระจายตัวอยู่เท่าๆกัน ความแตกต่างของแรงเค้นจึงเกิดจากน้ำหนักของคอลัมน์น้ำ (a) และหิน (b) เหนือพื้นที่ 1 ตารางเมตร (Hatcher, 1995)



รูป 4.5 ขนาดทิศแรงเค้นที่กระทำบนแนวราบ P (a) กรณีที่พื้นผิวโลกราบเรียบ (b) กรณีผิวโลกไม่สม่ำเสมอเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ลูกศรแสดงถึงน้ำหนักแรงเค้นกดทับ (loading stress) (Hatcher, 1995)



รูป 4.6 แรง (force) ขนาดเท่ากันทีกระทำกับแท่งลูกบาศก์ทีมีขนาดต่างกัน ถ้าหากลูกบาศก์มีการเปลี่ยนลักษณะ ผลของแรงที่กระทำกับลูกบาศก์ขนาดเล็กจะมากกว่าลูกบาศก์ขนาดใหญ่ (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)

เมื่อ A = พื้นที่ และถ้าสมมติพื้นที่ให้มีขนาดเล็กมากๆ (infinitesimal size) แต่ถึงขนาดเล็กอย่างไรก็ยังปรากฏให้เห็นค่าความมี “อัตตา” หรือ “มีตัวตน” คือ “มีพื้นที่” อยู่ดี ดังนั้นแรงเค้นที่ตั้งฉากกับพื้นที่ (รูป4.4) จึงคำนวณได้จาก

$$\sigma = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

หรือ $$\sigma = \frac{dF}{dA}$$

กรณีที่ระนาบลาดชันเราอาจแตกแรงเค้น (stress) ที่กระทำบนระนาบได้ในรูปแรงเค้นฉาก (normal stress,σ_n) และแรงเค้นเฉือน (shear stress,σ_s) (รูป 4.7, 4.8, 4.9 และ4.12)

จากรูป 4.12 และ 4.13 เราให้แรง ในแนวดิ่ง($F = 5x10^5$ Newton) กระทำต่อระนาบบนพื้นที่ 2,184 ตารางเมตร ดังนั้น $\sigma = 5.0x10^5/2,184 = 229$ Pa เราสามารถคำนวณหาปริมาณ σ_n และ σ_s ได้จาก

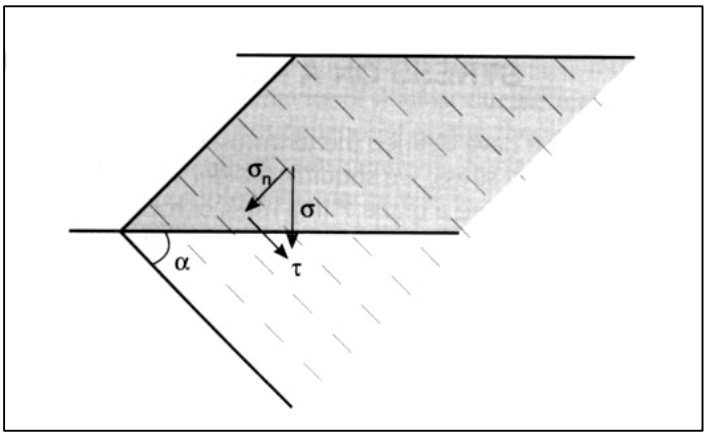
$\sigma_n = \sigma \cos 30^\circ$		$\sigma_s = \sigma \sin 30^\circ$
$\sigma_n = 229 \cos 30^\circ$	และ	$\sigma_s = 229 \sin 30^\circ$
$\sigma_n = 198$ Pa		$\sigma_s = 115$ Pa

4.4.2 *แรงเค้นบนจุด*

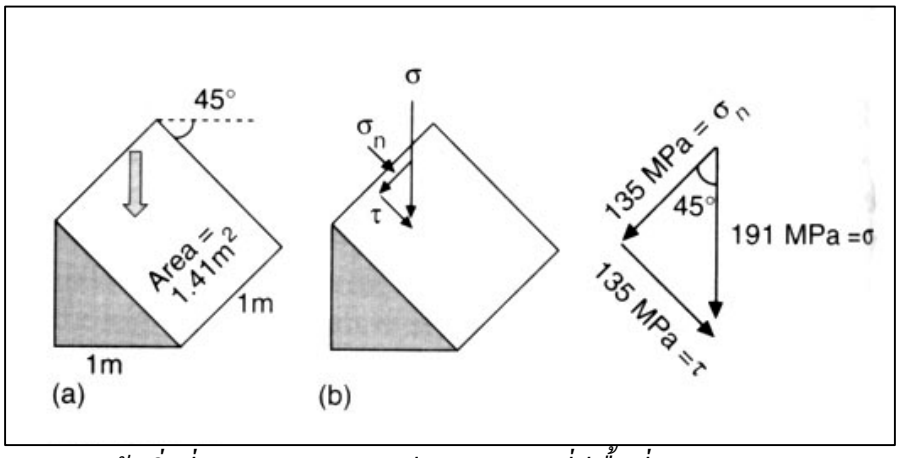
ในกรณีที่เราพิจารณาแรงเค้นในระบบสามมิติ ซึ่งจำเป็นต้องมี***แกนหลัก (principal stresses)*** สามแกนโดยที่ $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ บนพิกัดของแกน x, y , และ z (รูป 4.10) ดังนั้น เมื่อมีแรงเค้นภายนอกมากระทำที่จุด O โดยมีพื้นที่เล็กๆ เป็นรูปลูกบาศก์ แรงเค้นที่กระทำในลูกบาศก์จึงประกอบด้วยแรงเค้นตั้งฉากและแรงเค้นเฉือนตามแกน x, y และ z โดยประกอบด้วย 9 เวคเตอร์ ซึ่งเราสามารถเขียนในลักษณะเวคเตอร์ได้ในรูปแบบของเมทริกซ์คือ

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

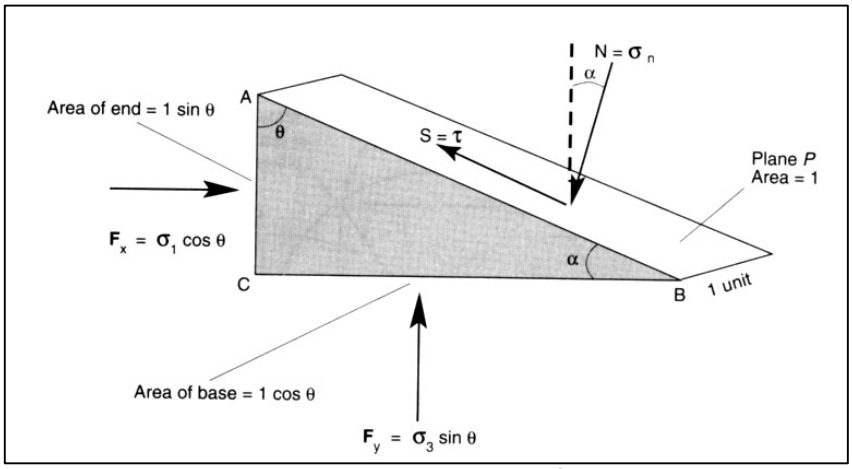
โดยเราเรียก σ_{ij} ว่า **แรงความเค้น** (stress tensors) ซึ่งประกอบด้วยแนวแรง 9 แนว ซึ่งถ้าหากลูกบาศก์อยู่ในสภาวะสมดุล ลูกบาศก์ก็จะไม่หมุน ทำให้เราได้



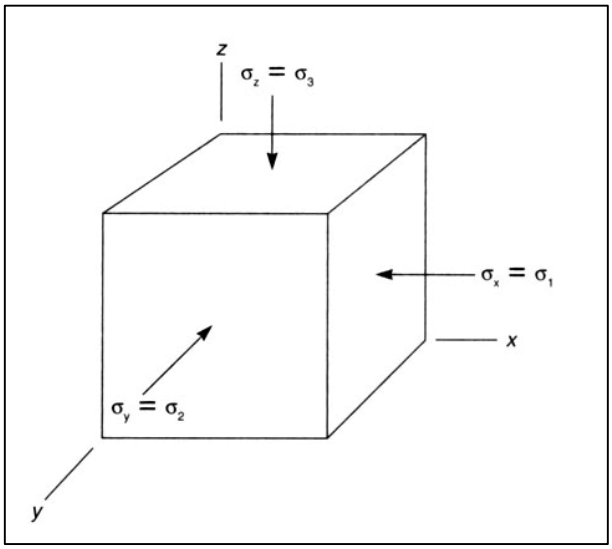
รูป 4.7 ขนาดทิศแรงเค้นที่กระทำบนระนาบเอียง เช่นผังระนาบรอยเลื่อน ณ ความลึกหลายกิโลเมตรจากผิวดิน ในกรณีนี้แรงเค้นจึงเป็นเส้นดิ่ง และสามารถแตกแรงออกเป็นแรงแค้นฉากซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว และแรงเฉือนซึ่งขนานไปกับพื้นผิว (Hatcher, 1995)



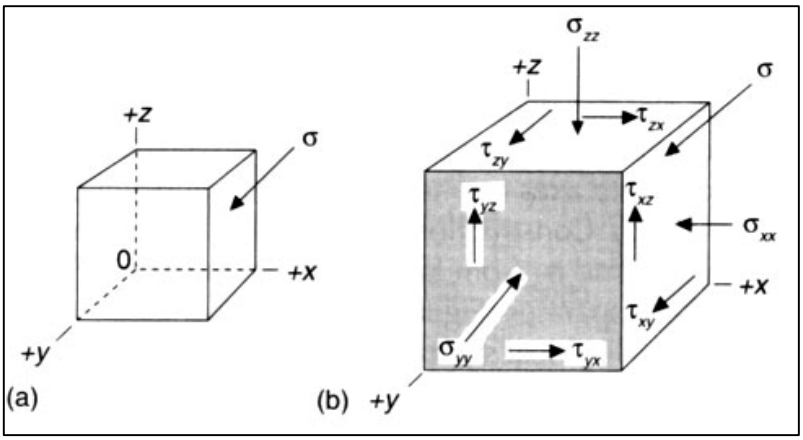
รูป 4.8 (a) แรงเค้นดิ่งที่กระทำบนระนาบเอียง 45 องศา ที่มีพื้นที่ 1.41 ตารางเมตร
(b) แตกแรงเค้นดิ่ง 191 MPa ออกมาเป็นแรงฉากพื้น 135 MPa และแรงเฉือน 135 MPa (รูปขวาสุด) (Hatcher, 1995)



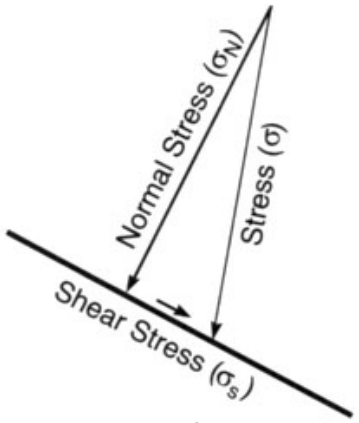
รูป 4.9 แผนภาพสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่มากระทำบนระนาบเอียง P ที่มีพื้นที่ dA โดยการแตกแรงออกเป็นแรงเค้นฉาก (σ_n) และแรงเค้นเฉือน (σ_nหรือτ) และมีมุมαระหว่าง σ_n และ σ_3 และมุม θระหว่าง σ_s และ σ_1 (Hatcher, 1995)



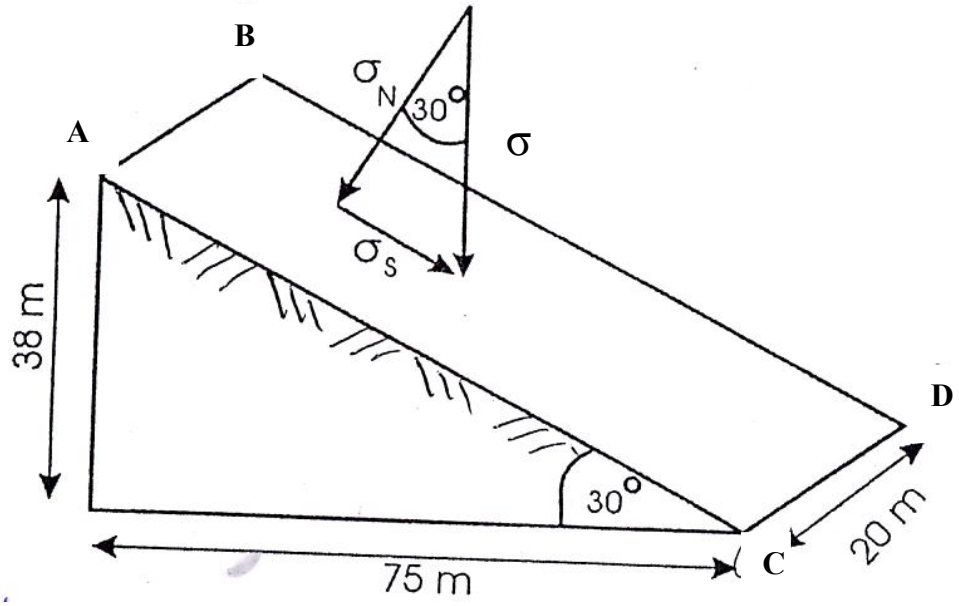
รูป 4.10 ขนาดทิศแรงเค้นตั้งฉากหลักที่วางตัวขนานกับขอบลูกบาศก์ ในระนาบ x-y-z ให้สังเกตว่าตำแหน่งของลูกเต๋าเมื่อเทียบกับแกน x,y และz สอดคล้องกันพอดี(Hatcher, 1995)



รูป 4.11 เมื่อมีแรงเค้นแบบไร้ทิศทาง ที่มากระทำบนวัตถุลูกเต๋าขนาดเล็กมาก (แทบเป็นจุด) ให้สังเกตทิศทางแรงทั้งหมด 9 ทิศ (Hatcher, 1995)



รูป 4.12 แรงจัดแนวดิ่ง (stress หรือ traction, σ) ซึ่งสามารถแตกแรงออกเป็นแรงฉากพื้ (σn) และแรงเค้นเฉือน (σs) (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.13 แรงเค้นในแนวดิ่ง (vertical stress) ที่กระทำกับระนาบ ABCD ที่มีความลาดชัน 30□ จากแนวนอนบนพื้นที่ 2,184 ตารางเมตร (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)

$$\sigma_{yx}=\sigma_{xy};\sigma_{zy}=\sigma_{yz};\sigma_{xz}=\sigma_{zx}$$

ดังนั้นจึงมีแรงเค้นอยู่ 6 แรง ที่เป็นตัวแปรอิสระ และมีอยู่สามคู่ที่มีแรงเค้นที่มีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุนี้ถ้ากรณีมีแรง σ กระทำตั้งฉากกันและกันจะทำให้ค่าความเค้นเฉือน=0 ซึ่งเราอาจเขียนเมทริกซ์ของเวคเตอร์ความเค้นได้ดังนี้

$$\sigma_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \sigma & \sigma \\ \sigma & \sigma_{yy} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma_{zz}\end{bmatrix}$$

สำหรับค่าเฉลี่ยผลรวมความเค้นหลัก 3 แกน เรียกว่า “ค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress,σ_m) ซึ่งคำนวณจากสมการ 4.9

$$\sigma_m=\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}=\frac{\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z}{3} \qquad (4.9)$$

โดยที่แรงเค้นเป็นผลรวมของค่าแรงเค้นเฉลี่ย และค่าแรงเค้นเบี่ยงเบน (deviatoric stress) ดังสมการ

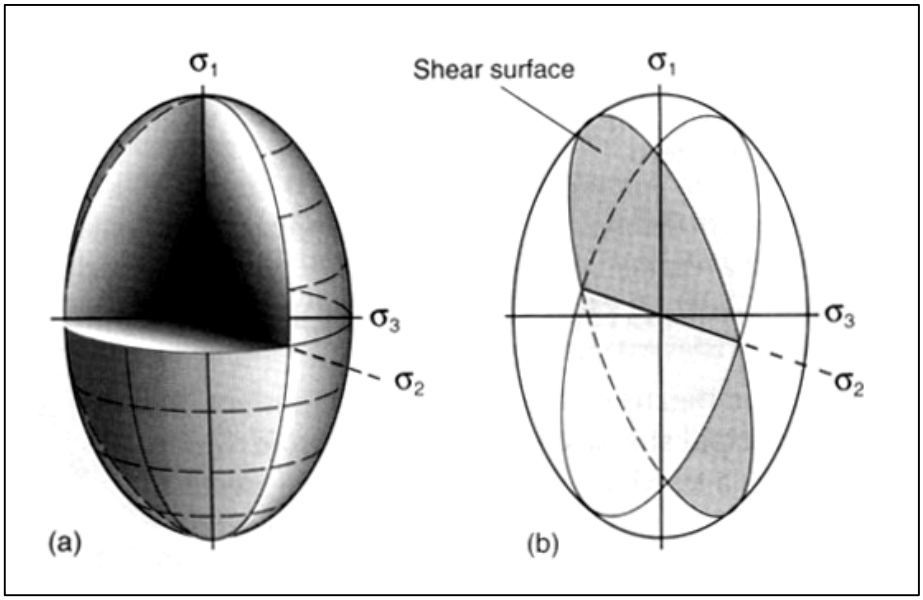
$$\sigma_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\sigma_{xx}-\sigma_m & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy}-\sigma_m & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz}-\sigma_m\end{bmatrix}$$

แรงเค้นσ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}หรือบางครั้งเขียนว่า σ_x, σ_y, σ_zหนังสือหลายเล่มใช้ว่า $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ จัดเป็นแกนความเค้นหลัก (principle stresses) ดังรูป 4.14

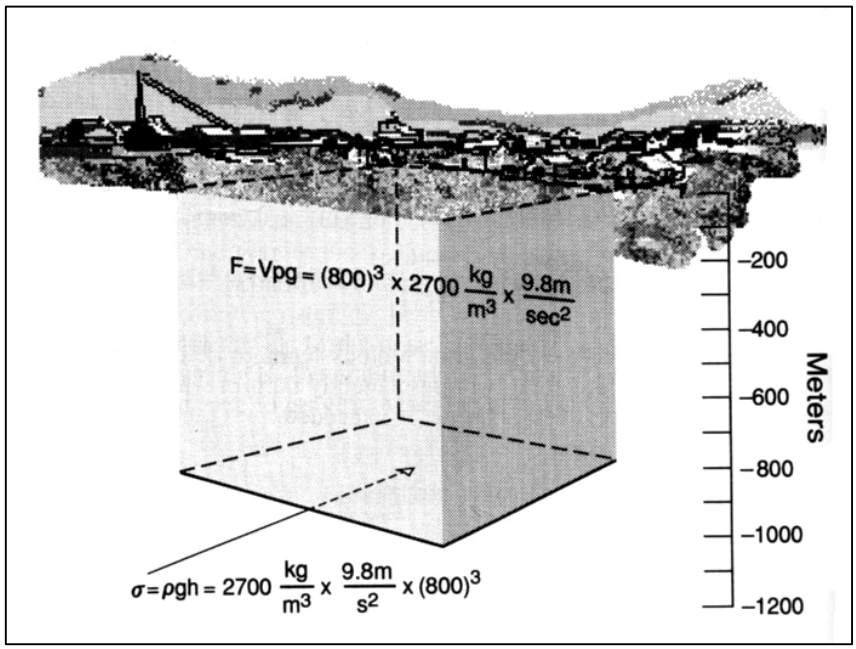
จากรูป 4.14 แกนความเค้นหลักค่ามากสุด (maximum principle stress) คือ σ_1 และ แกนความเค้นหลักค่ากลาง (intermediate principle stress) คือ σ_2 และแกนความเค้นหลักค่าน้อยสุด (minimum principle stress) ได้แก่ σ_3 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีคล้ายคลึงกับแกนวงรีความเครียด(strain ellipse) ดังนั้นสำหรับความเค้นเราจะได้วงรีแรงเค้น(stress ellipse) โดยที่มี σ_1, σ_2 และ σ_3 ตั้งฉากซึ่งกันและกันพร้อมทั้งมีความเค้นเฉือนเป็นศูนย์

4.4.3 *ตัวอย่างการคำนวณแรงเค้นบนระนาบใต้ผิวดิน*

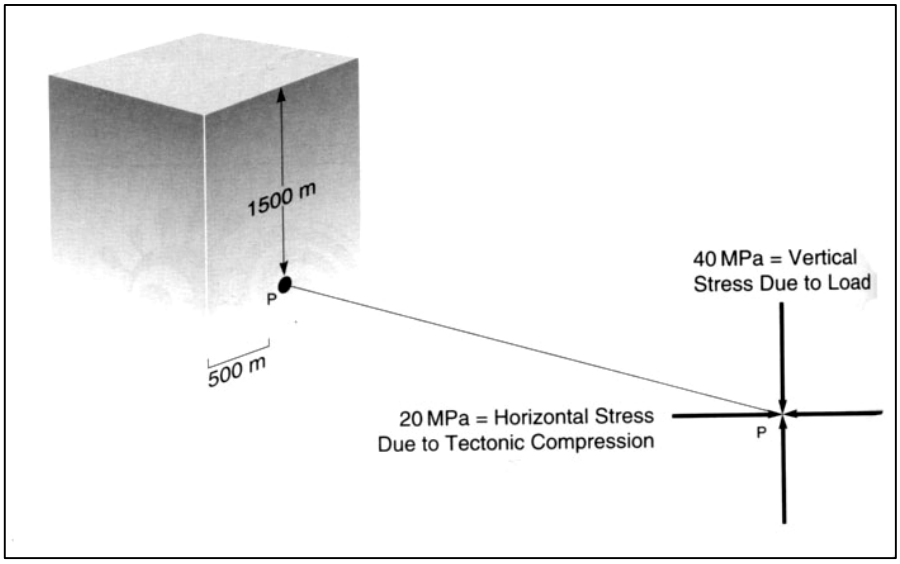
ทีนี้ลองดูรูป 4.15 กรณีก้อนหินแกรนิตใหญ่มาก มีขนาดเท่าภูเขา (ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเปลือกโลกส่วนทวีป)ดูบ้าง แล้วลองคำนวณแรงเค้นที่เกิดจากหินแกรนิตก้อนยักษ์นี้บ้าง สมมติให้ หินแกรนิตมีขนาดกว้าง (W) ยาว (L) และสูง (H)



รูป 4.14 (a) วงรีแรงเค้น (stress ellipsoid) รูปรักบี้ซึ่งมี 3 แกนหลักคือ σ_1, σ_2 และ σ_3
(b) ระนาบแรงเค้นเฉือนหลักซึ่งมักขนานกับ σ_2 และทำมุม45□ กับ σ_1 และ σ_3 (Hatcher, 1995)



รูป 4.15 การคำนวณหาปริมาตรหินแกรนิตภายใต้โลกที่มีชุมชนใหญ่! จากสูตร F=vpg (ลองคิดดูมวลมหึมาขนาดนี้ เมื่อถูกแผ่นดินไหวกระทำตามแนวรอยเลื่อนเพียงนิดเดียว ก็อาจทำให้เมืองทั้งเมืองพังพินาศได้ ถ้ามีรอยเลื่อนปรากฏอยู่ข้างใต้ใกล้ๆ เช่นรอยเลื่อนซานแอนเดรียส ใกล้เมืองซานฟรานซิสโกของอเมริกาไง) (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.16 บล็อกแกรนิตที่มีจุด P อยู่ลึกลงไปจากผิวดิน 1,500 เมตร (ซ้าย) โดยให้หินแสดงสมบัติแบบยืดหยุ่น ดังนั้นแรงเค้นที่จุด P (ขวา) จึงเกิดจากการรวมน้ำหนักกดทับจากแรงโน้มถ่วงและแรงอัดจากการแปรสัณฐานเปลือกโลก (Davis & Reynolds, 1996)

เราคำนวณหาแรงที่เกิดจากมวลแกรนิตยักษ์ = W x L x H x ρ x g

= 1,000 ม x 1,000 ม x 1,000 ม x2,700 กก/ม^3 x 9.8 ม/ว^2

และเราทราบว่า $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1{,}000m \times 1{,}000m \times 1{,}000m \times 2{,}700kg/m^3 \times 9.8m/w^2}{1{,}000m \times 1{,}000m}$

σ = 1,000 ม x 2,700 กก/ม^3 x 9.8 ม/ว^2

= 26,460,000 Pa = 26.5 MPa

โดยทั่วไปเราเรียกแรงเค้นลักษณะนี้ว่า***"แรงเค้นใต้โลก"(lithostatic stress)*** ซึ่งแปรผันไปตามความลึกที่เรียก ***"ความลาดแรงเค้นใต้โลก" (lithostatic stress gradient)*** ซึ่งมีค่าประมาณ 26.5 MPa/กิโลเมตร หรือเท่ากับ 265 บาร์ หรือ 0.265 kbar/km ซึ่งอาจพูดง่ายๆ ว่า ทุกๆ 3.8 กิโลเมตรจากผิวโลก แรงเค้นใต้โลกจะเพิ่มขึ้น 1 kbar หรือ 100 MPa ซึ่งเราอาจคำนวณแบบลัดคือ แรงเค้น (σ) เท่ากับ ความหนาแน่น (ρ) x แรงโน้มถ่วง (g) x ความลึก (h)

หรือ $\sigma = \rho gh$ = 2,700 กก/ม^3 x 9.8 ม/ว^2 x 1,000 กม.

= 26.5 Mpa

สมมติเรามีหินแกรนิตซึ่งมีความหนาแน่น 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยาว

2,000 เมตร กว้าง 800 เมตร และลึก 1,500 เมตร เราสามารถคำนวณหาแรงเค้นที่ระดับลึก 1,500 เมตร ได้จากสมการ 4.6 ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{v\rho g}{A} = \frac{2000x1500x800x2700x9.8}{2000x800} = 39.7MPa$$

เมื่อพิจารณาสมการข้างต้น เราสามารถเขียนเป็นสมการ 4.10 ได้สั้นๆ ดังนี้

$$\sigma = \rho gh \qquad (4.10)$$

โดยที่ $\sigma=\rho gh=2700\ (kg/m^3)$ x 9.8 (m/s^2) x1500 (m) = 39.7 MPa

ด้วยเหตุนี้ถ้าเราต้องการหาแรงเค้นใต้ผิวดินที่ระดับความลึกต่างๆ เราจำเป็นต้องทราบค่าความหนาแน่นของหินและค่าแรงดึงดูดของโลก ณ จุดหนึ่งเสียก่อน อนึ่งสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับแรงเค้น เราจำเป็นต้องทำความเข้าใจและสามารถคำนวณแรงเค้นที่กระทำบนระนาบใดระนาบหนึ่งของจุดที่กำหนดในวัตถุที่เราสนใจและถูกแรงกระทำ การศึกษาของเราจึงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเปลือกโลก ตัวอย่างของเราจึงขอพิจารณาที่เปลือกโลกและเกี่ยวข้องกับหินเป็นหลัก

ถ้าเราสมมติให้ P เป็นจุดเล็กๆ อยู่ในหินแกรนิตที่ปรากฏ ณ ความลึก 1,500 เมตรจากผิวดิน (รูป 4.15) โดยมีแรงอัดเข้าหาทางตะวันออก-ตะวันตก และมีแรงจากน้ำหนักหินที่อยู่ด้านบนของจุด P ซึ่งคำนวณได้ดังรูป 4.16 ที่จุด P เราสามารถสร้างระนาบในแนวต่างๆ ได้มากมาย (ตั้งแต่ 0-360) หากพิจารณาแรงกระทำที่จุด P ที่ระนาบใดๆ เราจะพบว่าขนาดแรงที่กระทำลงไปที่จุดต่างๆ มักไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับทิศทางระนาบและขนาดแรง ดังนั้นถ้าหากเราพิจารณา ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อจุด P บนพื้นที่ที่เล็กมากๆ เราก็จะสามารถหาอัตราส่วนของแรงต่อพื้นที่นั่นก็คือ ความเค้นที่กระทำกับจุด P

ที่นี้ถ้าพิจารณาในรูป 4.17A แรงเค้นอัดแนวดิ่ง(σ_2 ประมาณ 40 MPa) และแรงเค้นแนวนอน(σ_x ประมาณ 20 MPa) โดยที่ σ_z กระทำในแกน z และ σ_x กระทำในแกน x สมมติให้มีระนาบตัดผ่านจุด O ทำมุม 65° กับแกน z ในการคำนวณหาแรงเค้นบนระนาบนี้เรามักพิจารณาจากรูปร่างชิ้นส่วนที่เล็กที่สุด(differential elements) โดยกำหนดให้เป็นรูปลิ่มดังแสดงในรูป 4.17B โดยที่รูปลิ่มมีขนาดประมาณ 10^{-12} ตารางเมตร และแนว XZ เป็นแนวระนาบที่ทำมุม 65° กับแกน z(OZ) และมีความยาว nx10^{-6} ส่วน OX เป็นความยาวที่ฐานลิ่มในแนวนอน และ OZ เป็นความยาวในแนวดิ่ง โดยที่ OX ขนานกับ σ_x และ OZ ขนานกับ σ_z หากเราพิจารณาในรูปสามมิติและกำหนดให้ XP มีความยาว 10^{-6} เมตร พื้นที่หน้าตัด XZQP มีค่าเท่ากับ nx 10^{-12} ตารางเมตร ดังนั้นเราจะได้พื้นที่ของด้าน ORQZ เท่ากับ nx cos 65 x 10^{-12} ตารางเมตรและพื้นที่ของด้าน OXPR

เท่ากับ nx sin 65 x 10^{-12} ตารางเมตร เพื่อให้ง่ายจะตัด 10^{-12} ออกได้รูป 4.17 C เรากำหนดให้รูปลิ่มอยู่ในสภาวะสมดุล ขนาดของ σ_x ที่กระทำต่อ OZ มีค่าเท่ากับแรงกระทำตรงกันข้ามกับ σ_x นั่นคือแรง F_{ox} ด้วยเหตุนี้ F_{xo} จึงเท่ากับ σ_x คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของสี่เหลี่ยม ORQZ หรือเขียนเป็นสมการ 4.11 ข้างล่างนี้ได้ว่า

$$F_{OX} = \sigma_X A_{ORQZ} \qquad (4.11)$$

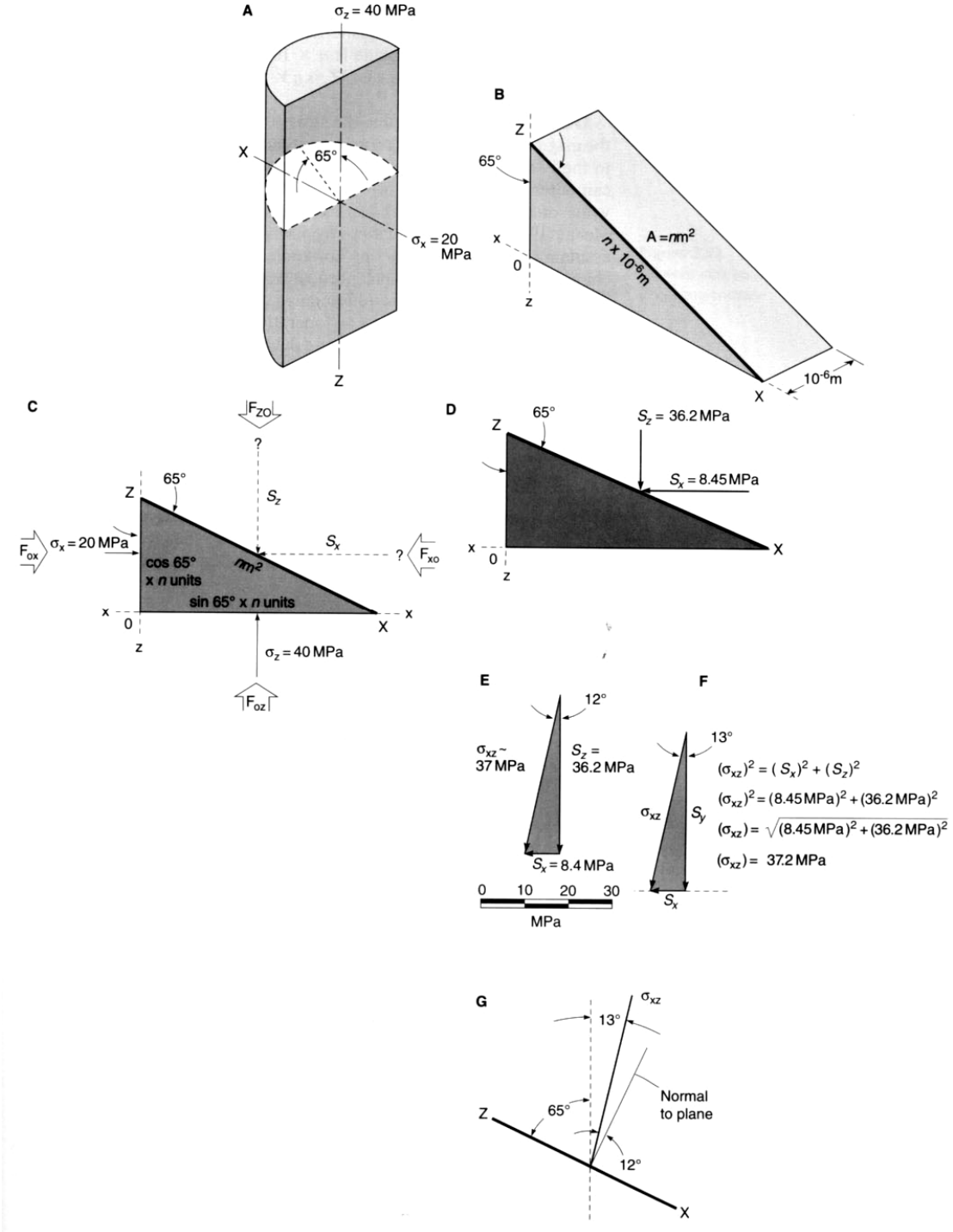
F_{OX} = 20 MPa xcos 65º x nm^2 หรือ = 20nxcos 65 º N

และ $F_{XO} = S_X x\ n$

เนื่องจาก $F_{OX} = F_{XO}$, $S_x (nm^2)$ = 20 MPa (cos 65º) (nm^2)

และ S_x = 20 MPa(0.42)

นั่นคือ S_x = 8.4 MPa



รูป 4.17 การคำนวนหาแรงเค้นบนระนาบ ณ จุด P ที่อยู่ลึกลงไปในหินแกรนิต (A) เมื่อมองเข้าไปในหินแกรนิต ตามระนาบที่เอียง 65^o จากσ_z (B) แผนภาพสามมิติของระนาบและตัวหินที่อยู่ข้างใต้ (C) ภาวะสมดุลของแรงที่กระทำตรงจุดต่างในหิน (D) ค่าของแรงเค้นซึ่งขนานกับ x และ z ซึ่งคำนวณได้ (E) การคำนวณ ค่าทิศแรง(stress vector) ด้วยกราฟ (F) การคำนวณหาค่าทิศแรง โดยใช้กฎพีธากอรัส (Pythagorcan theorem) และ (G) ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของทิศแรงต่อระนาบ (Davis & Reynolds, 1996)

ส่วนการคำนวณหาแรงเค้นแนวดิ่ง(σ_z) ก็ทำได้เช่นเดียวกัน โดยเรากำหนดให้ S_z เป็นแรงเค้นที่กระทำในแนวตรงกันข้ามกับ σ_z โดยที่ S_z กระทำบนพื้นที่หน้าตัด XZQP จะได้

$$F_{OZ} = \sigma_z A_{OXPR} \text{ หรือ } = 40 \text{ MPa (sinv65 º) } (nm^2)$$

แรงที่กระทำตรงกันข้ามกับ F_{OZ} คือ F_{ZO} ซึ่งกำหนดให้ดังนี้

เพราะว่า $F_{ZO} = S_z xn$

ดังนั้น $F_{OZ} = F_{ZO}$

$S_z(nm^2) = 40 \text{ MPa (sinv 65 º) } (nm^2)$

นั่นคือ $S_z = 40 \text{ MPa x } (0.9) = 36.2 \text{ MPa}$

สำหรับค่าของ S_z(ซึ่งคือ 36 MPa) และ S_x(ซึ่งคือ 8.4 MPa) ดังแสดงในรูป 4.17 D ถ้าเราต้องการคำนวณค่าที่กระทำกับระนาบ PQZX เราอาจคำนวณได้ 2 วิธี คือ แบบวาดรูป ตามหลักของเวคเตอร์ (รูป 4.17 E) โดยกำหนดระยะให้อยู่ในสเกลเดียวกัน หรือจากทฤษฎีของปีทากอรัส (รูป 4.17 F) ส่วนใหญ่วิธีนี้นิยมทำมากกว่าเพราะรวดเร็วกว่า

เนื่องจาก $S_{xz}^2 = S_x^2 + S_z^2$

$S_{xz}^2 = (8.4)^2 + (36.2)^2 = 1381$

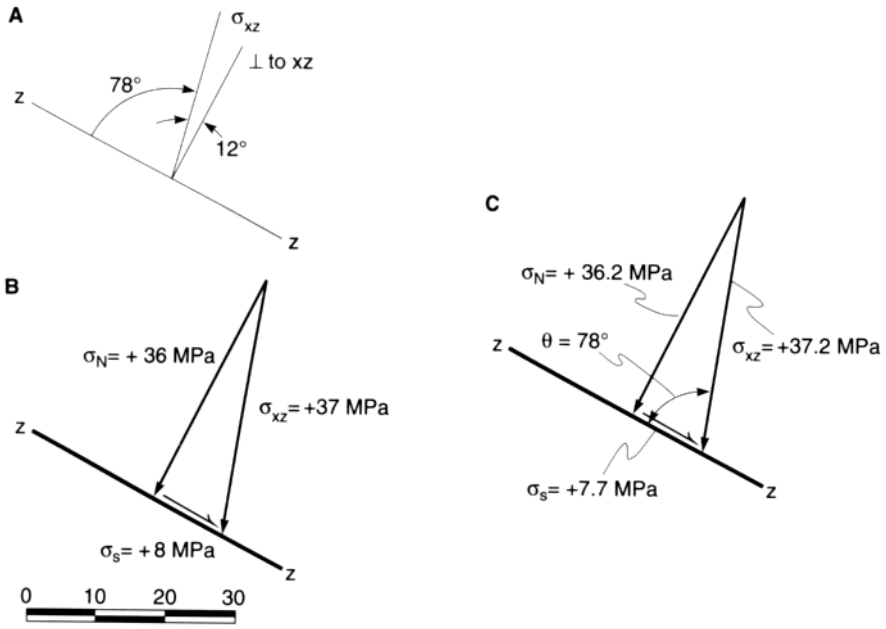
นั่นคือ $\sigma_{xz} = 37 \text{ MPa}$

และมุม β ที่ทำกับแกน z คำนวณได้จากสมการ

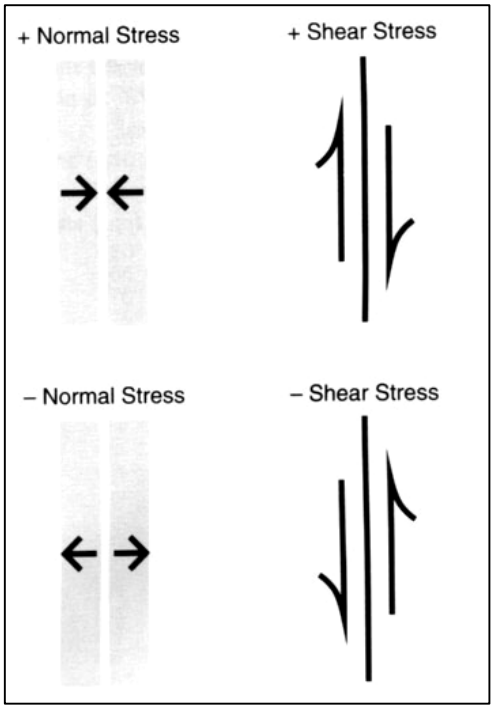
$$\text{Sin}\,\beta = S_x/\sigma_{xz} = 8.4/37 = 0.23$$

$$\beta = \arcsin 0.23 = 13^\circ$$

ในกรณีที่ σ_{xz} ไม่ได้ทำมุมตั้งฉากกับระนาบ XZ โดยเบี่ยงเบนไป 12 º คือ [90º-(65º+13º)] ดังรูป 4.17G เราสามารถแยกองค์ประกอบของ σ_{xz} ได้ โดยมีทิศทางตั้งฉากและขนานกับ σ_n และขนาน σ_s ไปกับระนาบ XZ เราเรียกว่า***ระนาบแรงเค้นตั้งฉาก(normal stresss)*** และ σ_s เรียกว่า ***ระนาบแรงเค้นเฉือน (shear stress)*** ดังแสดงในรูป 4.17C สมมติให้มีมุมเบี่ยงเบนไป 12º ค่าของ $\sigma_n = 37 \text{xcos } 12^\circ = 36 \text{ MPa}$ และค่าของ $\sigma_s = 37 \text{xsin } 12^\circ = 7.7 \text{ MPa}$ (รูป4.18) โดยที่ความเค้นตั้งฉากถ้าเป็นความเค้นอัดเราจะถือเป็นค่าบวก และถ้าความเค้นตั้งฉากเป็นความเค้นดึงเราจะถือเป็นค่าลบ ส่วนความเค้นเฉือนจะเป็นบวกเมื่อมีทิศทางการเฉือนไปทางขวามือ และจะเกิดลบได้ถ้ามีทิศทางการเฉือนไปทางซ้าย (รูป4.19)



รูป 4.18 การแตกแรงออกเป็นแรงเค้นฉากและแรงเค้นเฉือน (A) เมื่อให้แรงเค้นทำมุมกับระนาบ ZZ ประมาณ +78^{o} ด้วยขนาดทิศแรงเฉือน XZ (B) การหาแรงเค้นฉากและแรงเค้นเฉือนโดยกราฟ และ (C) การคำนวณโดยใช้ตรีโกณมิติ สังเกต (B) และ(C) ได้ค่าเกือบเท่ากัน (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.19 สัญลักษณ์ที่จำเป็นในการอธิบายชนิดแรงเค้นต่างๆ โดยที่เราให้แรงเค้นฉากผิวเป็น+ (บวก) ถ้าเป็นแรงอัด และแรงเค้นฉากผิวเป็น- (ลบ) ถ้าเป็นแรงดึง ส่วนแรงเค้นเฉือนเป็น + (บวก) เมื่อเป็นแรงเฉือนทางขวา และเป็น- (ลบ) เมื่อเป็นแรงเฉือนทางซ้าย (Davis & Reynolds, 1996)

ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาแรงเค้นรวม แรงเค้นตั้งฉาก และแรงเค้นเฉือนในระนาบหนึ่ง ระนาบใดได้โดยผ่านจุดใดจุดหนึ่งได้ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 4.20 A และ B แต่เมื่อแรงเค้นที่ทำมุม 0° และ 90° กับแกน x หรือแกน z จะมีเพียงแรงเค้นตั้งฉากดังที่เกิดขึ้นในรูป 4.21 A และ B ส่วนในรูป 4.22 เป็นการคำนวณแรงเค้นรวม แรงเค้นตั้งฉาก และแรงเค้นเฉือน โดยที่ระนาบเปลี่ยนไปทุกๆ 5° ในรูปเราจะเห็นการเปลี่ยนขนาดของแรงเค้นเป็นรูปวงรี โดยมี σ_z ยาวที่สุด และσ_x สั้นที่สุด ซึ่งเป็นแกนของรูปวงรีนั่นเอง (ดูรูป 4.23, 4.24, 4.25 และ4.14)

ในกรณีที่แรงเค้นอัดเท่ากันในทุกทิศทาง เราจะให้ความสำคัญเป็นพิเศษ ทั้งนี้เพราะมีลักษณะเฉพาะคล้ายแรงเค้นในน้ำ(hydrostatic stress) ทุกจุดในของเหลวย่อมมีแรงดันที่เท่ากันในทุกทิศทุกทางและด้วยปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นแรงดันจากของเหลวที่กระทำต่อผนังหรือระนาบในแนวตั้งฉากเท่านั้นจึงไม่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้น และความดันของของเหลวยังขึ้นอยู่กับความลึกและความหนาแน่นของของเหลว(หรือน้ำ) โดยไม่ขึ้นกับปริมาตร ตัวอย่างเช่น สมมติหินแกรนิตมีแรงดันในแนวดิ่งและแนวนอนเท่ากัน คือ 12 MPa ดังรูป 4.26A โดยแรงนี้ทำมุมกับระนาบผิวแกรนิต = 48°(θ) จากการคำนวณแรงจะได้ S_x=8.91 MPa และ S_x=8.02 MPa (รูป 3.13 ข) คำนวณหาแรงเค้นจะได้ σ_x= 12 MPa นั่นคือσ_N=12 MPa(รูป 4.26C) ลักษณะแรงเค้นของเหลว (hydrostatic stress) เมื่อกำหนดจุดไปตามระนาบทุกๆ 5 ° (ดูรูป 4.27) กล่าวคือในสภาวะแรงดันของเหลว ณ จุด P' จะมีค่า $\sigma_1 = \sigma_3$ = 12 MPa ถ้าเราใช้สมการแรงเค้นพื้นฐานเพื่อคำนวณหา σ_N และ σ_S ที่กระทำต่อระนาบด้วยมุม θ = +30 ° กับ σ_1 เราจะได้

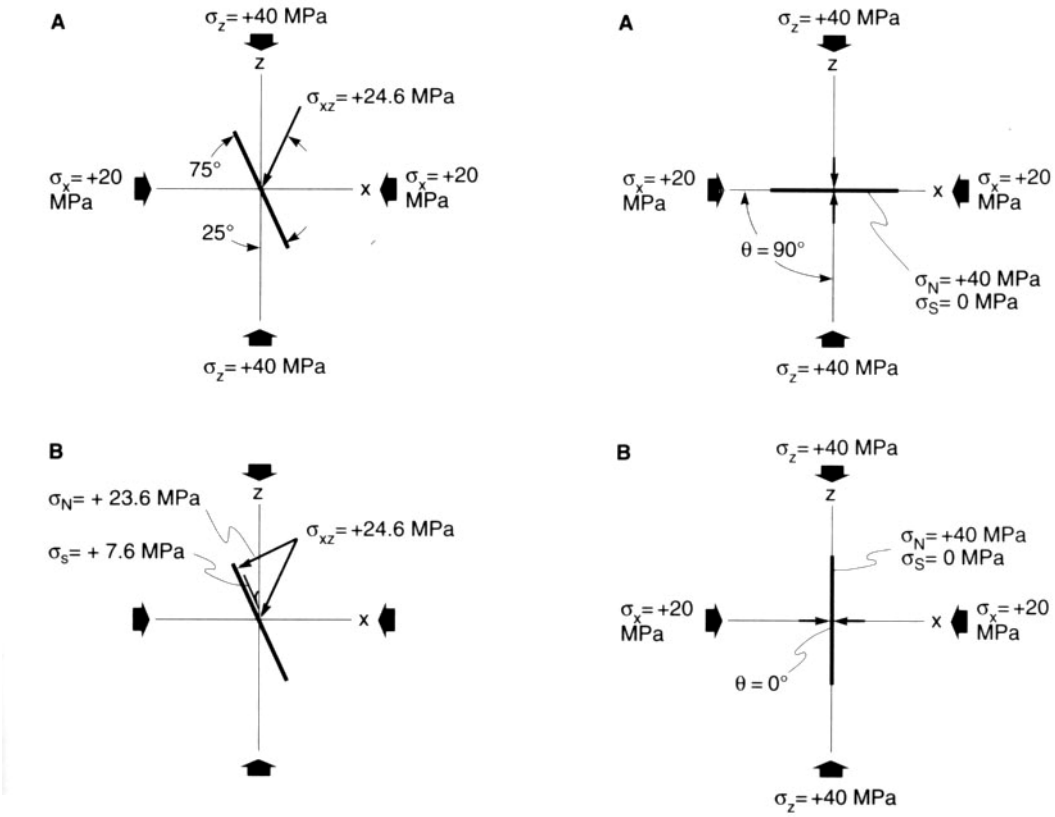
$$\sigma_N = \frac{12MPa + 12MPa}{2} - \frac{12MPa - 12MPa\cos 60^O}{2} = 12MPa$$

และ $$\sigma_S = \frac{12MPa - 12MPa\sin 60^O}{2} = 0MPa$$

ซึ่งจะเห็นว่าแรงเค้นเฉือน(σ_S) มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ เราพบว่าแรงเค้นของเหลวจะไม่ทำให้หินบิดเบี้ยวหรือเปลี่ยนลักษณะไปเอง และไม่ปรากฏรูปวงรีของความดัน(จะมีลักษณะเป็นวงกลมแทน) ได้แสดงในรูป 4.27

4.4.4 *สมการแรงเค้น*

เมื่อเราทราบขนาดและทิศทางของแรงเค้นหลักสามค่าคือ σ_1,σ_2 และ σ_3 ณ จุดใดๆ เราก็สามารถคำนวณหาค่าแรงเค้นฉาก σ_n และแรงเค้นเฉือน σ_s ได้จากสมการ 3.12 และ 3.13 ซึ่งเรา

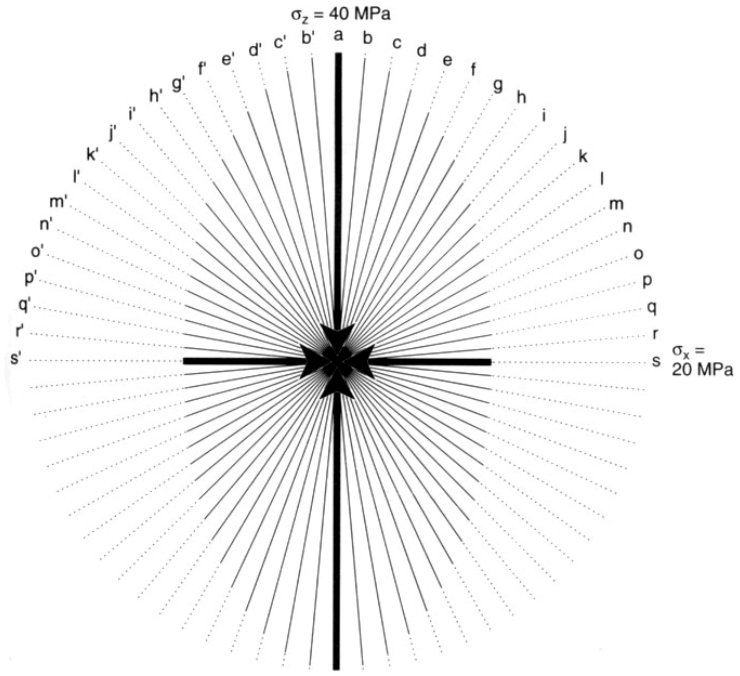


รูป 4.20 (ซ้าย) (A) เมื่อแรงเค้น xz (ขนาด +24.6 MPa) ทำมุมกับระนาบ 75^{o} และให้แรงเค้น

σ_x*=+20 MPa และ* σ_z*=+40 MPa*

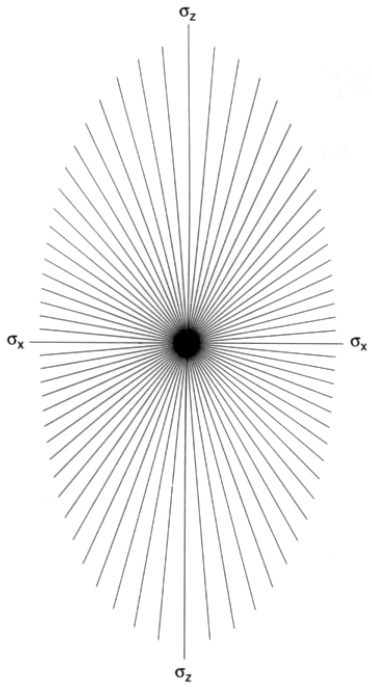
(B) การแตกแยกแรงเค้น xz ออกเป็นแรงเค้นฉาก 23.6 MPa และแรงเค้นเฉือน +7.6 MPa

รูป 4.21(ขวา) กรณีพิเศษที่แรงเค้นหลักใหญ่(σ_z*) ขนาน (A) และตั้งฉาก (B) กับระนาบที่ถูกแรงกระทำโดย มี* σ_z*=+40 MPa และ* σ_x*=+20 MPa (Davis & Reynolds, 1996)*

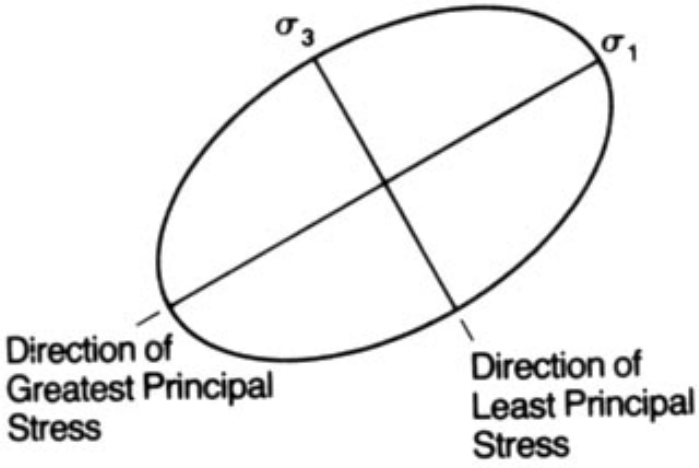


Plane	∠ to Z	σ (MPa) 20	σ_N (MPa) 20	σ_S (MPa) 20
a	0°	20.00	20.00	0.00
b	−5°	20.23	20.15	−1.47
c	−10°	20.89	20.60	−3.42
d	−15°	21.92	21.34	−5.00
e	−20°	23.25	22.34	−6.43
f	−25°	24.79	23.57	−7.66
g	−30°	26.46	25.00	−8.66
h	−35°	28.19	26.58	−9.40
i	−40°	29.93	28.26	−9.85
j	−45°	31.62	30.00	−10.00
k	−50°	33.23	31.74	−9.85
l	−55°	34.72	33.42	−9.40
m	−60°	36.06	35.00	−8.66
n	−65°	37.22	36.43	−7.66
o	−70°	38.21	37.66	−6.43
p	−75°	38.98	38.66	−5.00
q	−80°	39.55	39.40	−3.42
r	−85°	39.89	39.85	−1.74
s	−90°	40.00	40.00	0.00
a'	0°	20.00	20.00	0.00
b'	5°	20.23	20.15	1.47
c'	10°	20.89	20.60	3.42
d'	15°	21.92	21.34	5.00
e'	20°	23.25	22.34	6.43
f'	25°	24.79	23.57	7.66
g'	30°	26.46	25.00	8.66
h'	35°	28.19	26.58	9.40
i'	40°	29.93	28.26	9.85
j'	45°	31.62	30.00	10.00
k'	50°	33.23	31.74	9.85
l'	55°	34.72	33.42	9.40
m'	60°	36.06	35.00	8.66
n'	65°	37.22	36.43	7.66
o'	70°	38.21	37.66	6.43
p'	75°	38.98	38.66	5.00
q'	80°	39.55	39.40	3.42
r'	85°	39.89	39.85	1.74
s'	90°	40.00	40.00	0.00

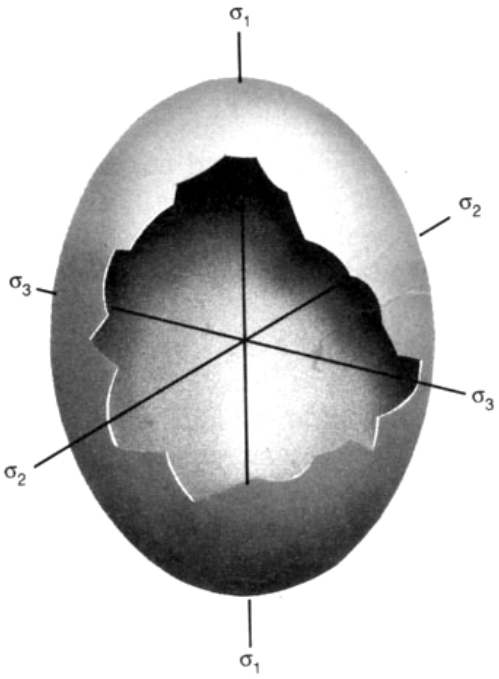
รูป 4.22 (ซ้าย) แรงเค้นค่ามากสุด σ_z มีค่า+40 MPa และมีแรงเค้นค่าน้อย σ_x มีค่า+20 MPa ส่วนเส้นที่กำหนดให้เป็น a-s และ b′-r′ เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางโดยให้แต่ละเส้นห่างกัน 5^o ต่อมาจึงคำนวนจาจากแรงเค้นประเภทต่างๆ เช่นแรงเค้นฉาก หรือแรงเค้นเฉือนที่กระทำบนระนาบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของแรงเค้น (Davis & Reynolds, 1996)



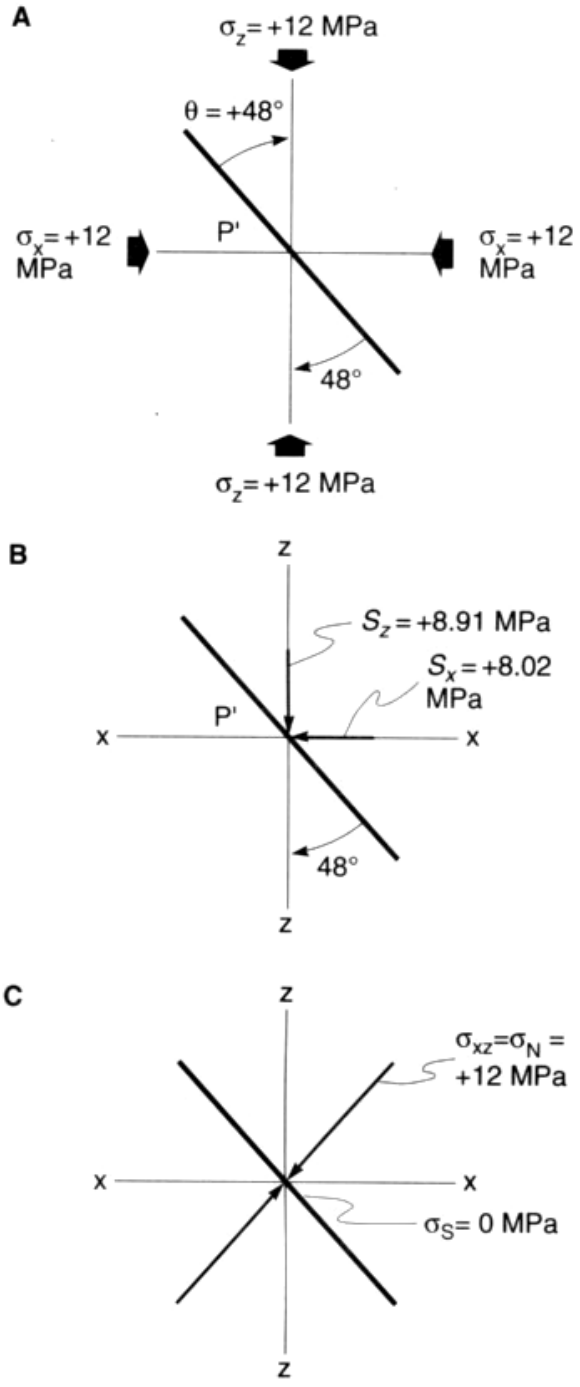
รูป 4.23 วงรีแรงเค้น (stress ellipse) ที่เกิดจากการจัดวาง แรงเค้น (σ) เข้าด้วยกัน และคำนวณหาจากรูปที่ทำไว้ก่อนหน้านี้ และจัดวางโดยให้ส่วนปลายมาพบกัน (Davis & Reynolds, 1996)



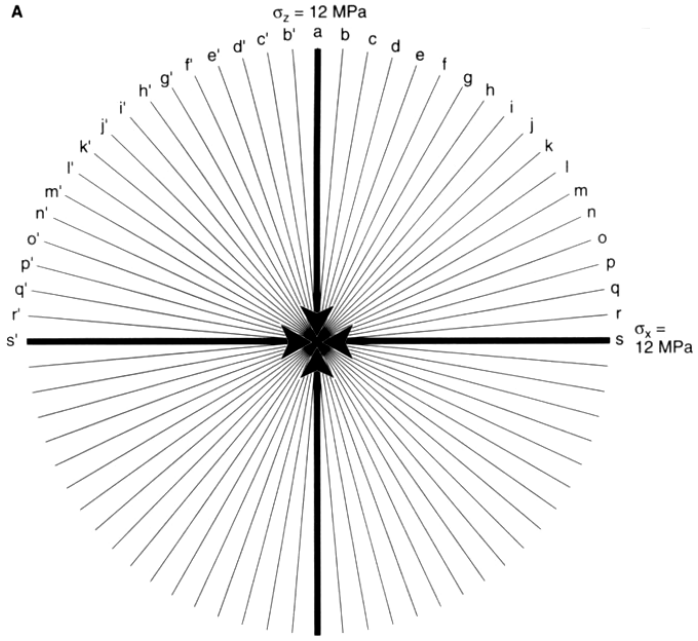
รูป 4.24 วงรีแรงเค้นแบบสองมิติที่แสดงถึงทิศและสัดส่วนของแรงเค้นหลักค่ามากสุด (σ_1) และค่าน้อยสุด (σ_3) ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.25 วงรีแรงเค้นแบบสามมิติที่แสดงถึงทิศทางและสัดส่วนของแรงเค้นหลักค่ามากสุด (σ_1) ค่ากลาง (σ_2) และค่าน้อยสุด (σ_3) (Davis & Reynolds, 1996)

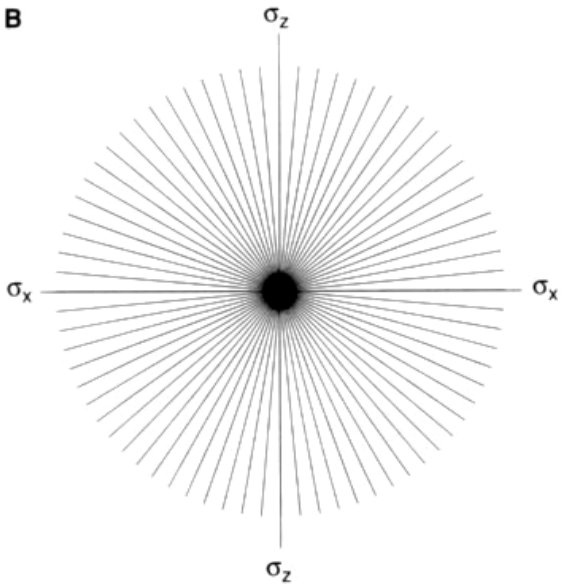


รูป 4.26 แรงเค้นเฉือนที่ปรากฏในสภาวะที่เป็นแรงเค้นในน้ำ (A) ภาวะแรกเริ่มของแรงเค้นในน้ำ ในที่นี้ แรงเค้นที่ขนานกับ x และ z มีค่า 12 MPa (B) ความสมดุลของแรงที่จุด P ทำให้ได้ค่า S_z = +8.91 MPa และ S_x = +8.02 MPa และ (C) แรงเค้นเดี่ยว (σ) ซึ่งมี S_x และ S_z เป็นอวค์ประกอบก็จะมีขนาด = +12 MPa เหมือนกัน (Davis & Reynolds, 1996)



Plane	∠ to Z	σ (MPa)	σ_N (MPa)	σ_S (MF
a	–0°	12	12	0
b	–5°	12	12	0
c	–10°	12	12	0
d	–15°	12	12	0
e	–20°	12	12	0
f	–25°	12	12	0
g	–30°	12	12	0
h	–35°	12	12	0
i	–40°	12	12	0
j	–45°	12	12	0
k	–50°	12	12	0
l	–55°	12	12	0
m	–60°	12	12	0
n	–65°	12	12	0
o	–70°	12	12	0
p	–75°	12	12	0
q	–80°	12	12	0
r	–85°	12	12	0
s	–90°	12	12	0
a'	0°	12	12	0
b'	5°	12	12	0
c'	10°	12	12	0
d'	15°	12	12	0
e'	20°	12	12	0
f'	25°	12	12	0
g'	30°	12	12	0
h'	35°	12	12	0
i'	40°	12	12	0
j'	45°	12	12	0
k'	50°	12	12	0
l'	55°	12	12	0
m'	60°	12	12	0
n'	65°	12	12	0
o'	70°	12	12	0
p'	75°	12	12	0
q'	80°	12	12	0
r'	85°	12	12	0
s'	90°	12	12	0

รูป 4.27 (A) วงกลมแรงเค้น (ซ้าย) ที่แสดงว่าค่าแรงเค้นดิ่ง และแรงเค้นนอน ต่างก็มีค่าเท่ากับ 12 MPa เส้นที่เป็น a-s และ b΄ - r΄ เป็นระนาบที่ทิ้งช่วงกันทุกๆ 5^{o} และเราคำนวนค่าแรงเค้นหลัก แรงเค้นฉากและแรงเค้นเฉือนในทุกๆระนาบ (ขวาค่าแรงเค้นหลักและแรงเค้นเฉือน) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.27 (B) วงรีแรงเค้นที่เกิดจากการจัดวางแรงเค้นจากทุกทิศทุกทาง เพื่อให้ได้ทิศแรงเค้นที่จุดตรงกลาง (จุดศูนย์กลาง) (Hatcher, 1995)

ตาราง 4.2 สรุปการทดลองแรงอัดของหินปูนภายใต้ความดัน 28 103 และ 207 MPa (Davis & Reynolds, 1996)

ลักษณะข้อมูล	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3
Confining pressure	28 MPa	103 MPa	207 MPa
Differential stress at failure	124 MPa	318 MPa	552 MPa
σ_1 at failure	152 MPa	421 MPa	759 MPa
σ_3 at failure	28 MPa	103 MPa	207 MPa
Angle (θ) between fault and σ_1	25°	30°	33°

เรียก***สมการแรงเค้น (stress equation)*** ที่นักธรณีวิทยาโครงสร้างและวิศวกรโครงสร้างจัดว่าเป็นสมการพื้นฐานในการหาแรงเค้น

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\theta \qquad (4.12)$$

$$\sigma_S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\theta \qquad (4.13)$$

เมื่อ θ คือมุมระนาบที่วัดในแนวดิ่ง

เพื่อให้เกิดความชัดเจน เราขอยกตัวอย่างโดยพิจารณาจากรูป 4.15 และ 4.17 อีกครั้ง ณ จุด P ที่ลึกจากพื้นดิน 1.5 กม ในหินแกรนิตเปลือกโลก ค่าของ σ_1=40 MPa และ σ_3=20 MPa เราต้องการหา σ_n และ σ_s ของมุมระนาบ 30 º (นั่นถือ θ= 65) กับ σ_1 ในที่สุดเราจะได้ตามสมการ

$$\sigma_N = \frac{40+20}{2} - \frac{40-20}{2}\cos 2x30°$$

$$\sigma_N = 30 - 10(-0.5000) \qquad = 36.427$$

$$\sigma_n = 25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = \frac{40-20}{2}\sin 2x30° \qquad = 10 \text{ MPa } (0.8660)$$

$$\sigma_s = 8.6 \text{ MPa}$$

4.4.5 *แผนภาพมอร์ (Mohr stress diagram)*

แผนภาพวงกลมแรงเค้นของมอร์ช่วยให้เราเห็นภาพการเปลี่ยนแปลงแรงเค้นภายในวัตถุ และช่วยให้คำนวณหาแรงเค้นฉากและแรงเค้นเฉือน ที่ระนาบใดๆรอบวงกลม(360º)ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นถ้าเราทราบค่าแรง σ_1 และ σ_3 เราก็สามารถหาค่าแรงเค้นฉากและเฉือน (σ_N และ σ_S) ได้จากแผนภาพ สำหรับการสร้างวงกลมมอร์มีวิธีการดังนี้ (ดูรูป 4.28)

(1) สร้างแกน σ_N และ σ_S โดยให้แกน x เป็น σ_N และแกน y เป็น σ_S

(2) กำหนดจุดแรงเค้นหลัก σ_1 และ σ_3 ลงในแกนตั้งฉากซึ่ง σ_1 และ σ_3 ไม่มีค่า σ_S จึงกำหนดจุดลงที่ σ_S=0 นั่นคือบนแกน x

(3) ลากวงกลมผ่านจุด σ_1 และσ_3 โดยมีจุดศูนย์กลางบนแกน x

(4) หา σ_N และ σ_S ของระนาบที่ต้องการทราบในมุม θ ต่างๆ ตามที่ต้องการ โดยที่มุมระหว่างเส้นรัศมีในวงกลมมีค่าเป็นสองเท่าของมุมระหว่างแกนตั้งฉากกับระนาบที่ตัดผ่าน

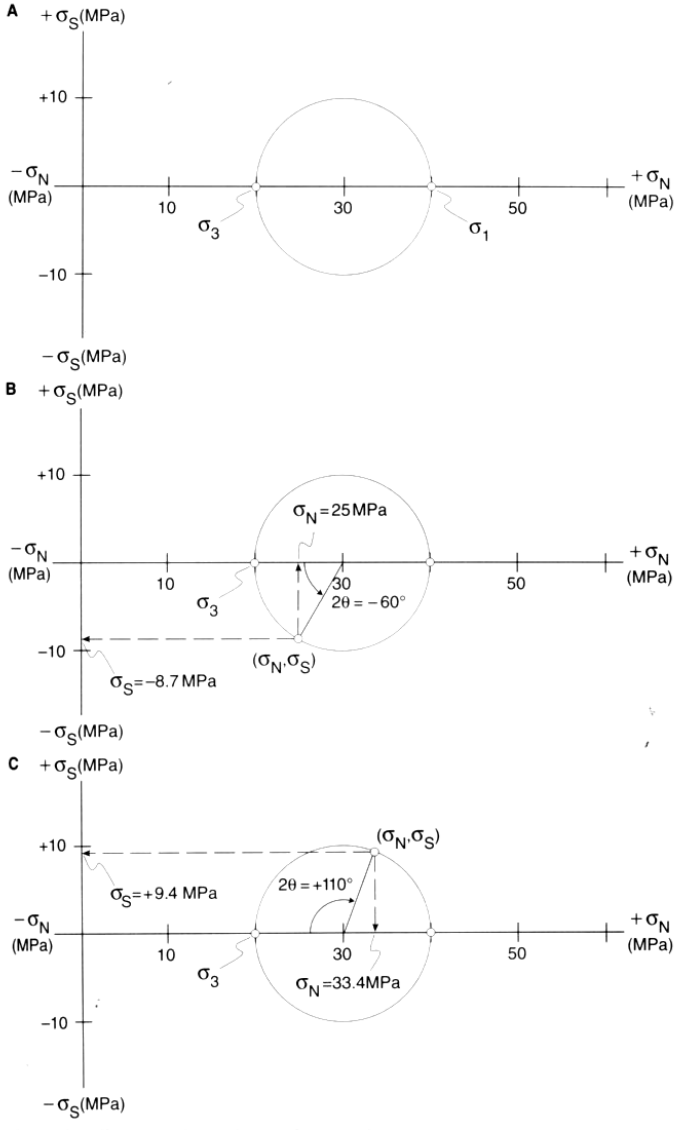
(5) ในรูป 4.28 แสดงมุม =-30^o กับ σ_1 อ่านค่า σ_N= 25 MPa และ σ_S=-8.7 MPa ส่วนในรูป 4.28C แสดงมุม +70^o σ_N และ σ_S อ่านค่า σ_N= 33.4 MPa และ σ_1= 9.4 MPa

ดังนั้นจากตัวอย่างในรูป 4.28 เราทราบว่า σ_1 = 40 MPa และ σ_3 = 20 MPa เราต้องการหา σ_N และ σ_S ของระนาบมุม 65 ^{o} (นั่นคือ θ = 65 ^{o}) ที่ทำกับ σ_1 เมื่อสร้างวงกลมมอร์ ตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้นจะได้ดังแสดงในรูป 4.29ก ส่วนรูป 4.29ข เป็นอีกตัวอย่าง ซึ่งเป็นการออกแรงกดแท่งหินให้หินแตกเพื่อหาแรงเค้นตั้งฉากและแรงเค้นเฉือนที่ระนาบการแตก ให้ลักษณะการวัด θ ของรูปที่แสดง

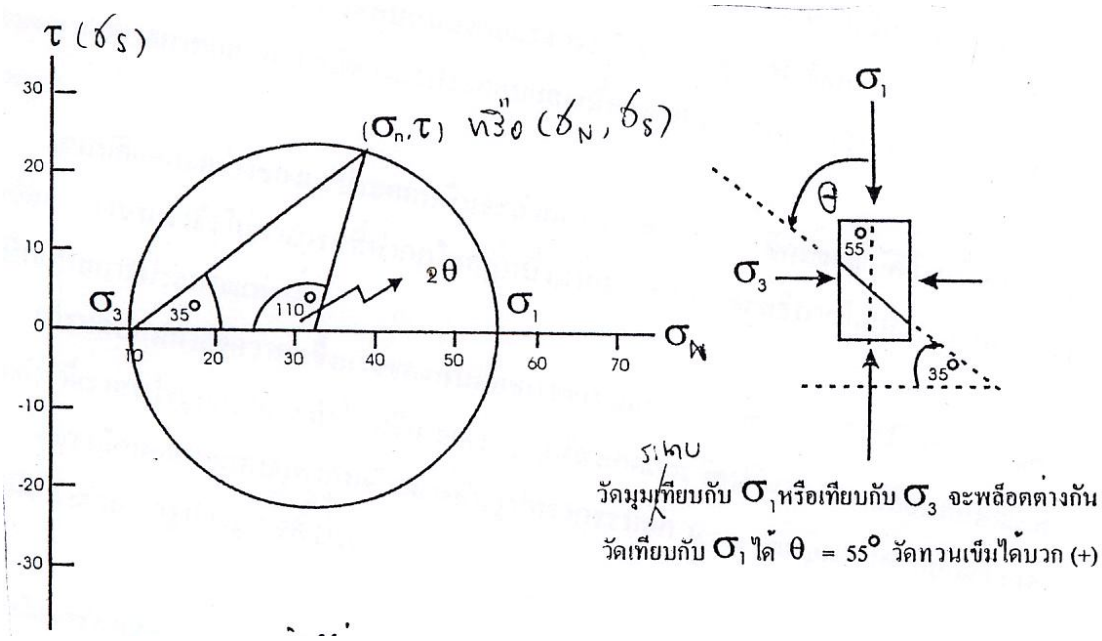
อนึ่ง สำหรับการหาค่าแรงเค้นตั้งฉาก เราต้องพิจารณามุม θ เทียบกับ σ_1 ในแนวดิ่งเสมอ ได้เครื่องหมายเป็นลบในระหว่างถาดแรกและถาดสอง ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์แรงเค้นทางวิศวกรรมทั่วไปซึ่งพิจารณามุม θ เทียบแกนนอน (รูป 4.30) และได้เครื่องหมายเป็นบวกในระหว่างถาดแรกและถาดสองของสมการหา σ_n ดังนั้นเราควรพิจารณาให้ดีว่ายึดแกนใดเป็นหลัก หากเราคิดแนวแรงและมุมที่วัดเทียบจากแกนที่คำนวณถูก จะได้ผลการคำนวณที่ได้ค่าเท่ากัน และการกำหนดมุมเพื่อกำหนดจุดในวงกลมมอร์ ถ้ามุมที่วัดได้เทียบกับ σ_1 หรือ σ_3 เป็นแบบทวนเข็มเป็นบวก ซึ่งแตกต่างจากการหาความเครียดเฉือน

คำนิยามที่สำคัญๆ ในเรื่องวงกลมมอร์ได้ แสดงในรูป 4.31 โดยที่รัศมีวงกลมเป็นค่าเบี่ยงเบนแรงเค้น (deviatoric stress) เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมเป็นค่าความแตกต่างทางแรงเค้น (differential stress) และจุดกึ่งกลางวงกลมเป็นค่าเฉลี่ยของแรงเค้น (mean stress)

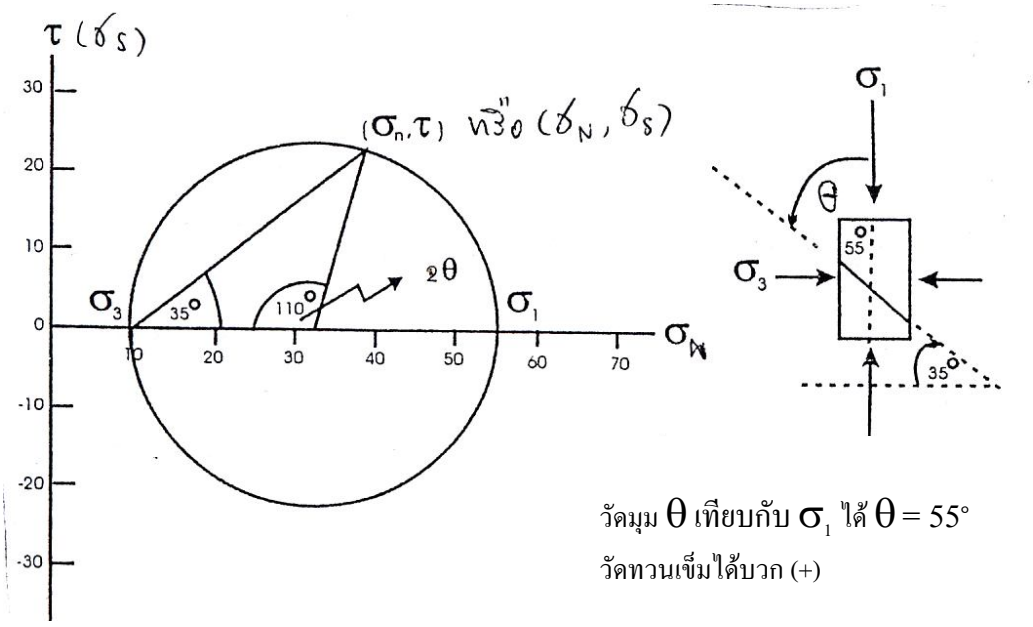
เมื่อเรานำแรงเค้นความดันน้ำมากำหนดจุดลงบนวงกลมมอร์โดยที่ σ_1=σ_2=σ_3 เราจะได้เป็นจุดอยู่บนแกน x ดังรูปที่ 4.22A ซึ่งเราไม่สามารถสร้างวงกลมได้ ส่วนกรณีของแรงเค้นแกนเดียว(uniaxial stress) จะมีค่าความเค้นหลักสองค่าเป็นศูนย์ส่วนอีกค่าหนึ่งไม่เท่ากับศูนย์ เราจะได้วงกลมมอร์ผ่านจุดตัดของแกน x และแกน y ดังรูป 4.22B กรณีของแรงเค้นตามแกน(axial stress) นั้นต้องมีแรงเค้นหลักไม่เป็นศูนย์และแรงเค้นหลักอีกสองค่าต้องเท่ากัน ดังรูป 4.22C และกรณีสุดท้าย แรงเค้นสามแกน(triaxial stress) ซึ่งมีค่าแรงเค้นหลักไม่เท่ากันเลย และไม่เท่ากับศูนย์ดังแสดงในรูป 4.22D ในรูป 4.23 เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่แสดงถึงการใช้ประโยชน์ของวงกลมมอร์



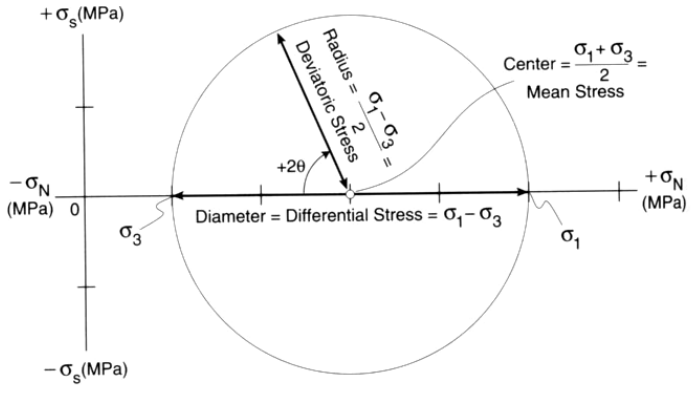
รูป 4.28 การสร้างวงกลมแรงเค้นมอร์ (A) กำหนดจุดของแรงเค้นหลักค่ามากสุด (σ_1) และค่าน้อยสุด (σ_2) ภายในและแกน x โดยกำหนดให้แรงเค้นฉาก (σ_N) อยู่บนแกน x และแรงเค้นขนาน (σ_S) อยู่บนแกน y ต่อมาจึงสร้างวงกลมให้ผ่านแรงเค้นหลัก โดยมีจุดกึ่งกลางบนแกน x (B) คำนวนหาแรงเค้นฉากหลัก (σ_N) และแรงเค้นขนานหลัก (σ_S) สำหรับระนาบทำมุม -30º กับทิศแรงเค้นหลัก วิธีการคือสร้างมุม -60º จากแกน x จุดตัดระหว่างเส้นรัศมีกับวงกลมจะให้จุดพิกัด (x,y) ที่เป็นค่า σ_N และ σ_S และ (C) เมื่อระนาบทำมุมกับทิศแรงเค้นหลักมากสุด (σ_1) = +55º (Davis & Reynolds, 1996)



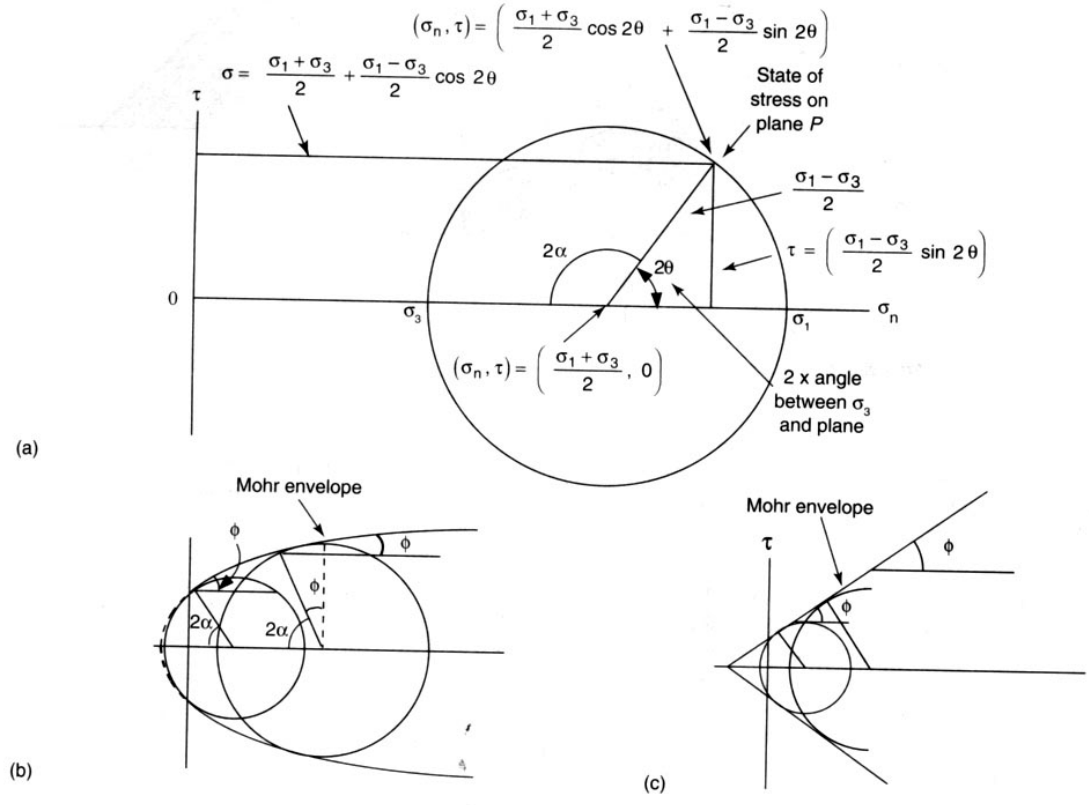
รูป 4.29 ตัวอย่างวงกลมมอร์แสดงการหาแรงเค้นเฉือน(σ_S หรือ τ) และแรงเค้นตั้งฉาก(σ_N) ของตัวอย่างในรูป 4.6 ในรูปได้แรงเค้นเฉือน = 8 MPa และแรงเค้นตั้งฉาก = 35 MPa
(เพียงตา ศาตรักษ์, 2546)



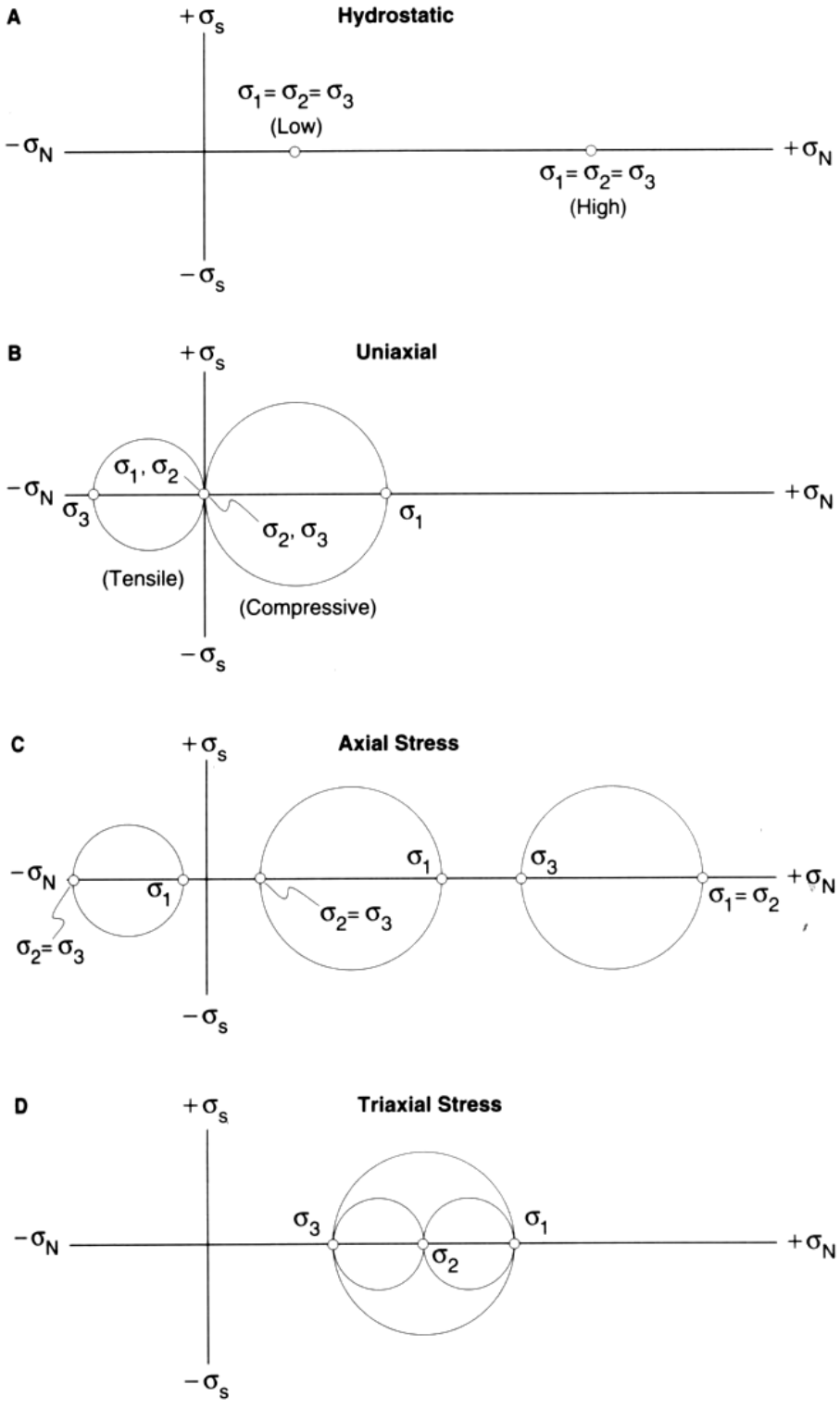
รูป 4.30 ตัวอย่างวงกลมมอร์แสดงการหาแรงเค้นเฉือน และแรงเค้นตั้งฉาก ของแท่งตัวอย่างหิน เมื่อออกแรงกดให้แตก โดยวัดมุม θ เทียบกับ σ_1 ซึ่งกำหนดให้มุมที่วัดทวนเข็มจึงเป็นบวก หรือตามเข็มเป็นลบ เมื่อเป็นบวกจะวัดแกนบวก แต่ถ้าเป็นลบจะวัดแกนลบ (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)



รูป 4.31 จุดศูนย์ของวงกลม(แรงเค้น)มอร์แสดงถึงค่าแรงเค้นเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าแรงเค้นในน้ำ (hydrostatic stress) โดยที่ค่าแรงเค้นเฉลี่ยก่อให้เกิดการยืดหด (dilation) ส่วนรัศมีของวงกลมมอร์แสดงถึงค่าแรงเค้นที่ไม่ใช่จากในน้ำ (nonhydrostatic stress) ซึ่งเป็นค่าแรงเค้นที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) และจัดเป็นแรงเค้นเบี่ยงเบน (deviatoric stress) และเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมมอร์ แสดงถึงค่าแตกต่างของแรงเค้น (differential stress) (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.33 (a) วงกลม (แรงเค้น) มอร์ที่มีแกน x เป็นค่าแรงเค้นฉาก (σ_n) และแกน y เป็นค่าแรงเค้นเฉือน (σ_s หรือในรูปนี้ τ) และความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2α กับ 2θ ในรูป (b) และ (c) ขอให้สังเกตความแตกต่าง กล่าวคือถ้าเป็นกรอบเส้นโค้ง ในรูป (b) มุมที่เปลี่ยนแปลงได้คือ φ แต่ถ้าเป็นกรอบเส้นตรงในรูป(c) มุม φ ไม่เปลี่ยนแปลง และเราจัดว่าเป็นมุมการเสียดสีภายใน (internal friction) และ tan φ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การเสียดสีภายใน (Hatcher, 1995)



รูป 4.32 ความหลากหลายของแรงเค้นในรูปแบบต่างๆที่อธิบายได้จากวงกลมมอร์

(ก) ภายใต้แรงดันน้ำ (hydrostatic stress)

(ข) ภายใต้แรงเค้นแกนเดี่ยว (uniaxial stress)

(ค) ภายใต้แรงเค้นตามระนาบแกน (axial stress) และ

(ง) ภายใต้แรงเค้นสามแกน (triaxial stress) (Davis & Reynolds, 1996)

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด

วิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดของหินเรียกว่า ***วิทยาแรง (rheology)*** ซึ่งเสนอโดย T. Engelder และ S. Marshak (1988) โดยอาศัยผลการตอบสนองแรงเค้นของหินในสภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดันรอบข้าง ความดันของเหลว(fluid pressure) และอัตราเร็วของการเกิดความเครียด(strain rate) ดังนั้น ถ้าหากเราสามารถบ่งบอกขนาดแรงเครียดของหินที่ถูกแรงกระทำ เราก็สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างธรณีวิทยาได้ โดยใช้วิธีย้อนกลับ (reconstruction) และแปลความหมายโครงสร้างต่างๆได้

เพื่อให้เราเข้าใจถึงสมบัติของหินต่อแรงกระทำ เราจำเป็นต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยนำหินตัวอย่างมาให้อยู่ภายใต้แรงกระทำในเงื่อนไขต่างๆ และสังเกตดูการเปลี่ยนลักษณะของหิน เพื่อบ่งบอกลักษณะเฉพาะตัวของการเปลี่ยนลักษณะนั้น ผลที่ได้จากการทดสอบช่วยให้เราคำนวณและวิเคราะห์แรงเค้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของหินต่อการเปลี่ยนลักษณะได้

เนื่องจากโลกไม่ได้ประกอบด้วยหินเนื้อเดียวกันเพียงชนิดเดียว ดังนั้นเราจึงไม่สามารถใช้กฎเพียงกฎเดียวมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดของหินในโลกได้ อีกทั้งหินภายในโลกมีลักษณะเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวหรือวิวิธภัณฑ์(inhomogeneous) และมีแร่ประกอบภายในหินแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย รวมทั้งเนื้อหิน(texture) แต่ละชนิดก็ต่างกันด้วย รวมทั้งการวางตัวของหินและการเกิดโครงสร้างต่างๆ ไม่ว่าขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ สิ่งเหล่านี้ล้วนทำให้หินมีสภาพแบบวิวิธภัณฑ์ ดังนั้นเมื่อหินถูกแรงกระทำ การตอบสนองต่อแรงกระทำจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ (1) ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแร่ประกอบและเนื้อของหิน และ (2) เงื่อนไขของการเปลี่ยนลักษณะ

สมบัติแต่ละอย่างของแร่ประกอบหินมักส่งผลในภาพรวมที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นเราจึงไม่สามารถที่จะหากฎใดกฎหนึ่งมาอธิบายได้ จึงอธิบายได้เพียงปรากฏรวมๆ และเป็นแบบการประมาณการเท่านั้น

ในการทดสอบกำลังความแข็งแรงของหินต่อขนาดแรงเค้น เราสามารถทำได้โดยการนำเอาหินตัวอย่างที่เราสนใจให้ถูกแรงกระทำในปริมาณต่างๆ โดยสังเกตและวัดปริมาณการเปลี่ยนลักษณะที่ปรากฏ ซึ่งเรามักนิยมทดสอบแท่งกับตัวอย่างหินรูปทรงกระบอก (core sample) โดยออกแรงกดหรือแรงดึง ดังตัวอย่างรูป 4.34

4.5.1 *ชนิดการทดสอบ*

ในการทดสอบความแข็งแกร่งของหินต้องใช้เครื่องมือพิเศษที่เรียก “vessel press” (รูป 4.35) และเราแบ่งการทดสอบออกได้อย่างง่ายเป็น 3 แบบ ได้แก่

ก. การทดสอบแรงกดอัดตามแกนเดี่ยว(Axial compression) เป็นการทดสอบความแข็งแรงของหิน โดยกำหนดให้ $\sigma_2=\sigma_3$ เป็น ความดันใต้โลก (confining pressure) ที่กระทำทั่วทั้งแท่งหินตัวอย่าง จากนั้นจึงให้แรงกดเพิ่มที่ปลายของแท่งหินตัวอย่าง ทั้งสองด้าน (รูป 4.36A) ให้สังเกตรอยแตกที่เกิดขึ้นและวัดการเปลี่ยนแปลงของแท่งหินตัวอย่างนั้น

ข. การทดสอบการยืดตามแกนเดี่ยว (Axial extenstion) เป็นการทดสอบความแข็งแรงของหิน โดยการกำหนดให้ $\sigma_1=\sigma_2$ และออกแรงดึง (σ_3) ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งหินตัวอย่าง (รูป 4.36B) การเปลี่ยนลักษณะจึงได้การยืดออกจากกัน

ค. การทดสอบการดึง(Tensile test) เป็นการทดสอบความแข็งแรงของหินโดยการดึง จากผลของการดึง หินจะมีความแข็งแรงน้อยเมื่อถูกดึง ดังนั้นการทดสอบแบบดึง จึงเป็นที่สนใจมากกว่าการทดสอบวิธีอื่น เพราะเป็นความแข็งแรงที่น้อยที่สุด ดังนั้นหากมีแรงเค้นเกินกำลังความแข็งแรงหินเกิดการวิบัติ (รูป 4.36C)

4.5.2 *การหาค่าการยืดหด*

ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบแรงกดอัดตามแนวแกนเดี่ยวและการทดสอบการยืดตามแกนเดี่ยว เราถือว่าเป็นการทดสอบแบบสามแกน(triaxial test) และนิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า “ไตรเอกเซียว” โดยใช้เครื่องมือที่เรียก “Donath” (เครื่องโดนัท) (ดูรูป 4.37 และ4.38) การทดลองทำได้โดยใส่น้ำหนักลงไปตามแกนยาว และคำนวณหาแรงเค้นจากสูตร σ = น้ำหนัก/พื้นที่ ดังนั้นถ้าแท่งหินมีรัศมี 0.617 ซม พื้นที่รับแรงจึงเท่ากับ 1.19 ซม^2 แรงเค้นจะมีค่าเท่ากับ 1.524 กก/ซม^2 ซึ่งคือ 152 MPa เพราะมีแรงมากระทำทั้งสามทิศทาง แต่เมื่อพิจารณาถึงหลักการทดสอบแล้ว ไม่ได้ทำให้ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ทั้งสามแกน

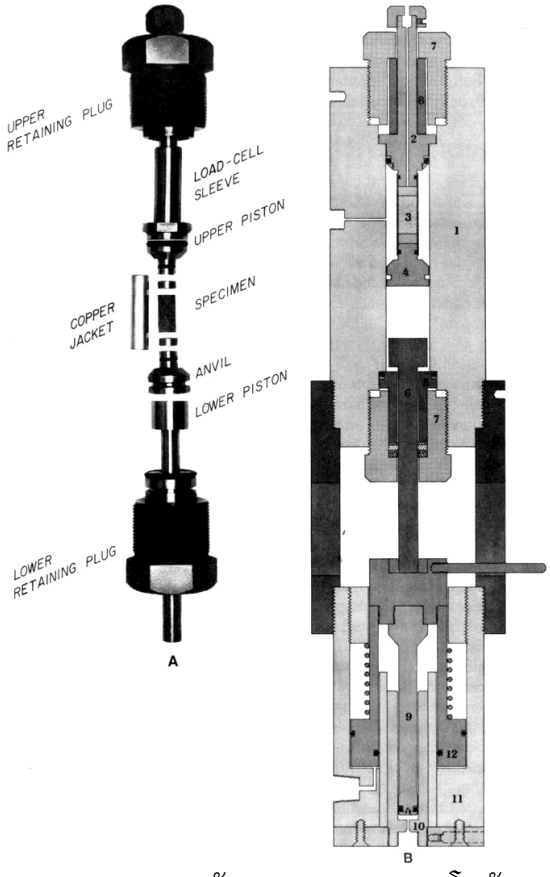
ในการทดสอบเราจะวัดค่าการยืด(e)ของแท่งหินตัวอย่าง และวัดอัตราความเครียด(strain rate, ε) โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\varepsilon^{\cdot} = \frac{e}{t}$$

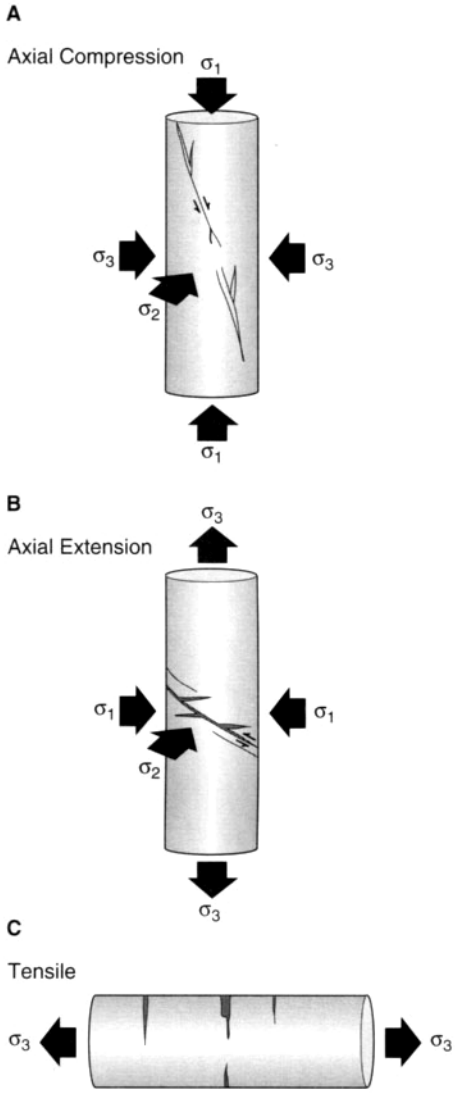
ตัวอย่างเช่น แท่งหินดินเหนียวมีความยาวเริ่มต้น I_0 = 2.297 เซนติเมตร นำมาทดสอบแรงกดอัดตามแนวแกนเดี่ยว ในเวลา 1 ชั่วโมง พบแท่งหินดินเหนียวยาว I_f = 2.280 เซนติเมตร ดังนั้นเราจึงหาอัตราความเครียดได้โดยใช้สมการข้างล่างนี้

$$\varepsilon^{\cdot} = \frac{e}{t} = \frac{(2.280-2.297)/2.297}{60\,\text{min}\times 60s/\text{min}} = \frac{-0.017}{2.297}\times\frac{1}{3600s} = -2.1\times10^{-6}\,s^{-1}$$

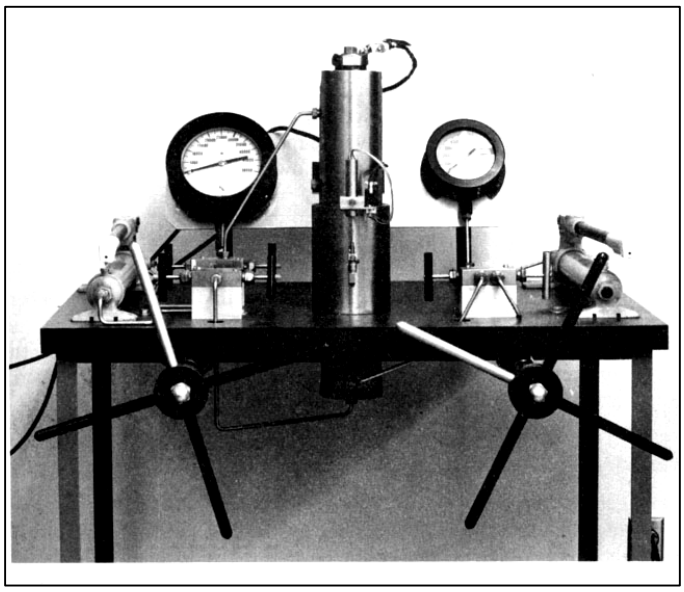
รูป 4.34 การวิบัติของแท่งหินจากการทดสอบความแข็งแกร่งในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างหินสังเกตจากปลอกทองแดงผนังบางที่ห่อหุ้มตัวหิน ภาพซ้ายเป็นการวิบัติหรือรอยเลื่อนในหินชนวน ภาพกลางเป็นรอยเลื่อนไขว้กัน (conjugate fault) ของหินทราย และภาพขวาเป็นการบิดย้วย (ductile flow) ก่อนเกิดการวิบัติในหินปูน (Davis & Reynolds, 1996)



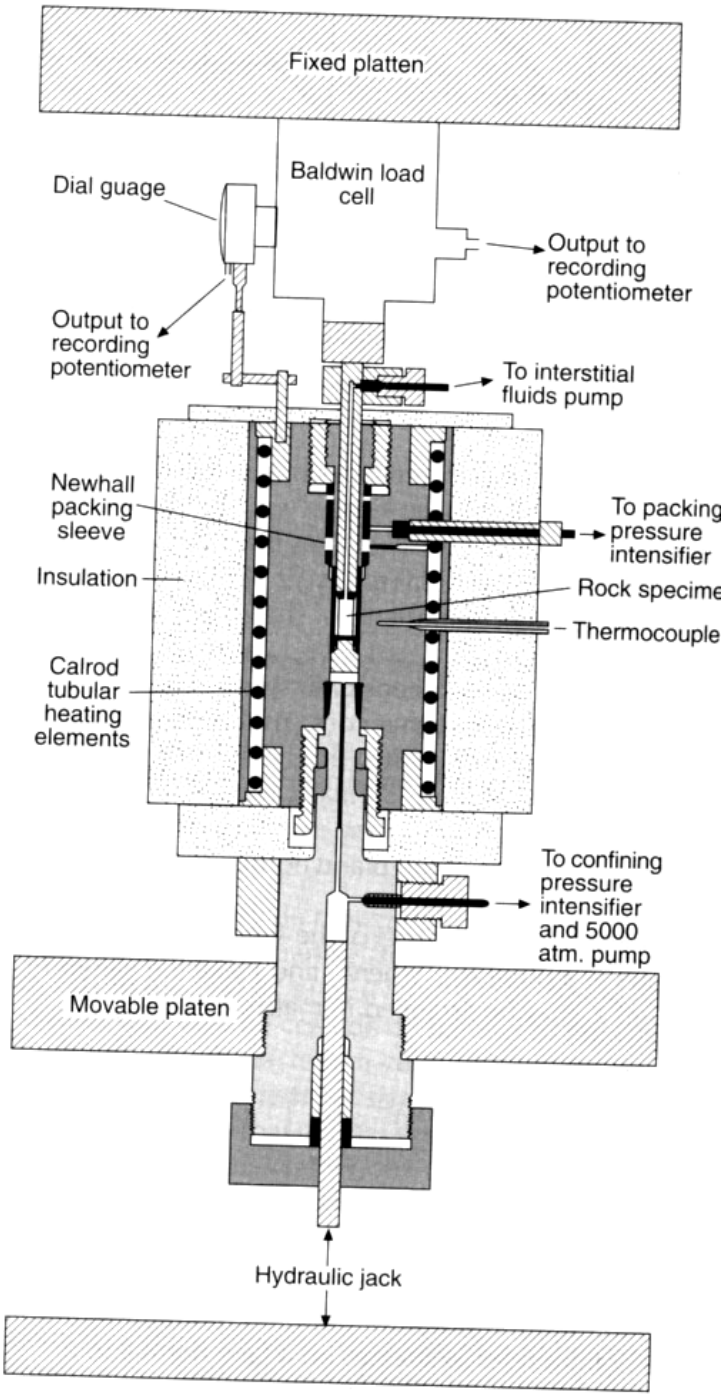
รูป 4.35 (A) ส่วนภายในของกระบอกแรงดัน (pressure vessel) โดนัทแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง แท่งหิน (และปลอกทองแดง) กับตัวอัดแรงดัน (B) ในกระบอกโดนัทแสดงส่วนประกอบต่างๆ 1.pressure vessel 2. ตัวปิดล็อคบน 3. แท่งหินตัวอย่าง 4. ทั่ง (anvil) 5.ตัวปิดล็อคล่าง 6. ลูกสูบ (piston) 7. ตัวกัน 8. ส่วนบรรจุตัวอย่าง (load cell) 9. ลูกสูบข้างล่าง 10. หรือ 11.ขอบด้านใน 12. ลูกสูบด้านข้าง 13. ปลอก (Donath,1970)



รูป 4.36 การทดสอบการเปลี่ยนลักษณะแบบต่างๆ (A) แรงอัดตามแกน (axial compression) (B) แรงดึงตามแกน (axial extension) และ (C) แรงดึง (tensile stress)



รูป 4.37 เครื่องมือทดสอบแรงอัด-แรงดึงอย่างง่ายของคุณโดนัท (Donath, 1970) (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.38 เครื่องมือวัดแรงอัด-ดึงชนิดสามแกน โดยใช้แจ็คกดอัดเพื่อหาแรงเค้นหลักค่ามากสุด (σ_1) และเราสามารถวัดความเครียดได้ทันที โดยคิดจากร้อยละการหดตัวของแท่งหิน (Giggs และคณะ, 1960)

หรืออีกตัวอย่างหนึ่ง แท่งหินปูนมีความยาวเริ่มต้น I_0 = 3 เซนติเมตร ถ้าเราทำให้แท่งหินหดสั้นลง ด้วยค่าอัตราความเครียด -10^{-5} s^{-1} เราจะได้ความยาวเป็นเท่าไรเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที

เนื่องจาก $$e = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta I}{3.0cm}$$

และ $$\varepsilon^{\cdot} = \frac{e}{t} = \frac{-\Delta I / 3cm}{300s}$$

ดังนั้น $$\varepsilon^{\cdot} = \frac{\Delta I}{3 \times 5 \times 60} = -10^{-5}$$

หรือ $$\Delta I = -900 \times 10^{-5} cm$$

คิดเป็น $$\Delta I = -0.09mm$$

ดังนั้นเราจึงสรุปจากการทดลองได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที หินปูนหดสั้นไป 0.09 มิลิเมตร โดยมีอัตราความเครียด -10^{-5} ซึ่งดูเหมือนจะช้ามาก แต่เมื่อเทียบกับการเกิดภูเขาทั่วๆ ไปแล้ว อัตราความเครียดของการเกิดภูเขาจะมีค่าประมาณ 10^{-14} S^{-1} หรือต่อวินาที ทีนี้เพื่อให้เกิดความสนุกลองคิดเล่นๆ ว่า ถ้าแท่งหินปูนเดิมยาว 3 ซม ใน 5 นาทีแรกมีอัตราการหดสั้น 10^{-14} ต่อวินาที (เท่ากับกระบวนการเกิดภูเขาหรือบรรพตรังสรรค์) ลองคำนวณดูซิว่าหินปูนหดสั้นไปเท่าใด

การทดสอบแรงกดอัดตามแนวแกนเดี่ยวมักเป็นการให้อัตราความเครียดคงที่โดยที่เราต้องกำหนดอุณหภูมิ ความดันน้ำ และความดันรอบข้างเสียก่อน โดยให้ถูกกระทำที่ตรงปลายทั้งสองข้าง ซึ่งโดยทั่วไปมีวิธีการดังนี้ เตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้อง สมมติให้เป็นหินปูนยาว 2.5 เซนติเมตร และมีรัศมี 0.635 เซนติเมตร โดยกำหนดความดันรอบข้าง 28 MPa และทำให้มีอัตราความเครียดสูงๆ และกำหนดเวลาการทดลองประมาณ 10-20 นาที ในที่สุดหินปูนจะหดสั้น (dilation) โดยที่เราสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของแท่งหินปูนคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของหินตัวอย่าง

เมื่อ $$A = \pi r^2 = 3.1416\ (0.635)^2$$

เราจะได้ $$A = 1.267\ cm^2$$

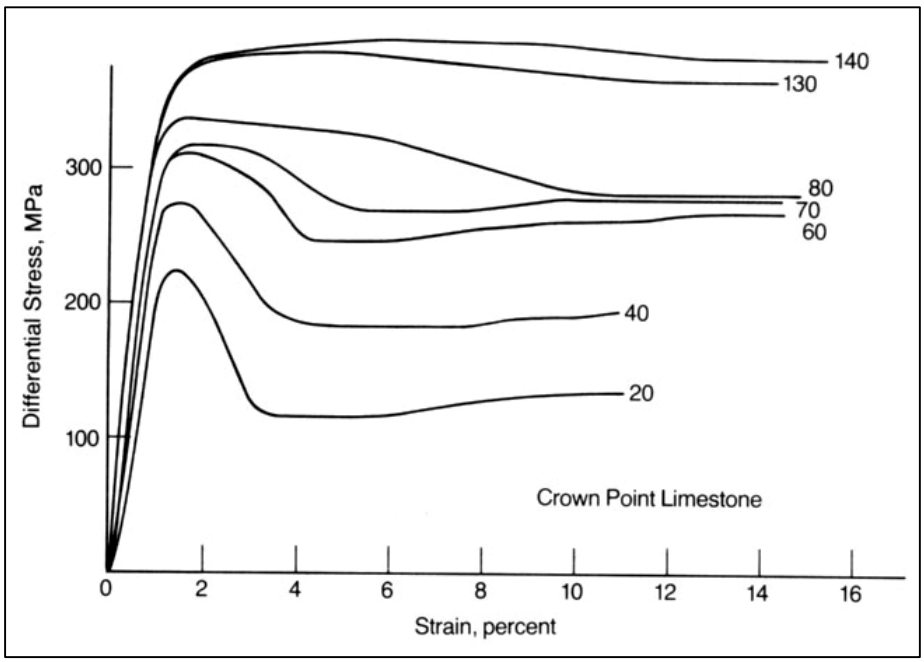
สมมติเราวัดน้ำหนักกดที่ใส่เข้าไปในแท่งหินปูน เราสามารถเขียนแผนภาพแรงเค้นและความเครียดได้ (ดูรูป 4.39 ถึง 4.43) ทีนี้ลองพิจารณา แผนภาพแรงเค้นต่อความเครียด ซึ่งแสดงถึง

แกนY คือความต่างความเค้น (differential stress) นั่นก็คือ $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ และแกน x เป็นค่าการหดสั้น (คิดเป็น %) (=ΔI/I) ถ้าหินมีสมบัติยืดหยุ่นจะพบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง ซึ่งเมื่อเราเอาน้ำหนักกดทับออกหมดความยาวของหินที่ลดลงจะกลับมาเท่าเดิมทันที (หรืออาจจะต้องใช้เวลาบ้างในการกลับคืนสู่สภาพเดิม) เมื่อมีน้ำหนักกดทับเพิ่มขึ้น หินจะหดสั้นลง เส้นทางคืนสู่สภาพเดิมของหินเมื่อเอาน้ำหนักกดทับออก เรียกว่า วงจรฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ดังรูป 4.44 แต่อาจต้องใช้เวลาในการกลับสู่สภาพเดิมยาวนานกว่า (time lag)

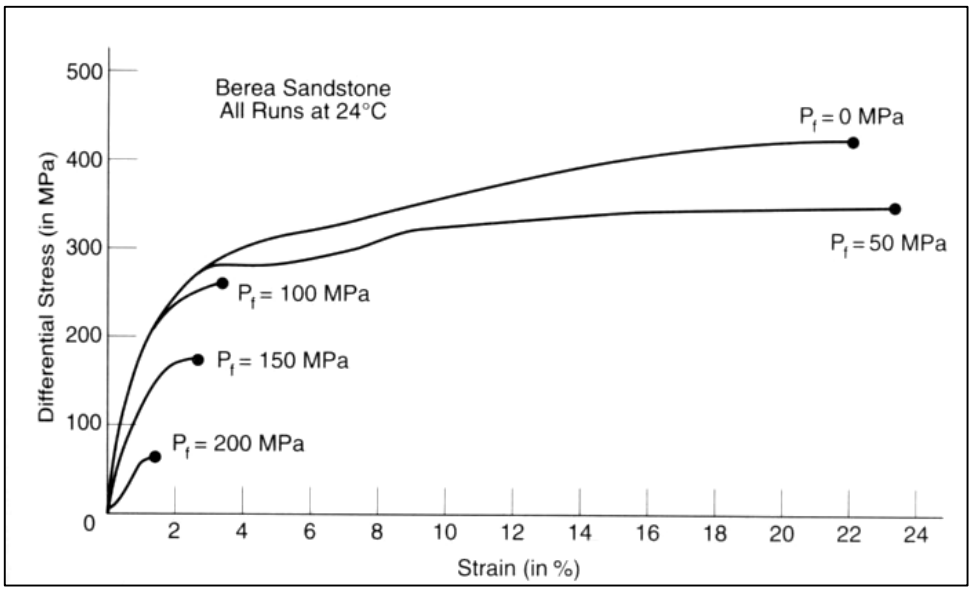
แต่ถ้าเราเอาน้ำหนักเพิ่มต่อไปอีกเรื่อยๆ จนหินเปลี่ยนลักษณะไปเป็นแบบพลาสติกก่อนเกิดการวิบัติ (ดังรูป 4.43ข และ4.45) การเปลี่ยนลักษณะแบบพลาสติกนี้ไม่ทำให้หินคืนสู่สภาพเดิมแต่ก็ยังไม่ถึงกับวิบัติ ซึ่งเราทราบว่ามีสภาวะพลาสติกเกิดขึ้น เมื่อเส้นแรงเค้นยืด และเส้นความเครียดไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป (รูป 4.43ค) โดยเราเรียกจุดที่เริ่มเปลี่ยนความชันของเส้นตรงว่า “ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit)” ซึ่งจุดนี้บ่งบอกถึงความแข็งแกร่งของหินที่ยอมให้เกิดการยืดหยุ่น (yield strength) (รูป 4.43ง) ถ้าแรงเค้นมากกว่าความแข็งแกร่งของหินที่ยอมให้ยืดหยุ่น หินจะมีลักษณะเป็นพลาสติกและอาจเกิดการวิบัติได้เมื่อใส่แรงให้มากขึ้นหรือให้กาลเวลาผ่านไปยาวนานขึ้น อนึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้น-ความเครียดได้แสดงในรูป 4.46

ทีนี้ลองพิจารณาในรูป 4.47 ถ้าหินปูนอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น หินอาจจะทนรับแรงได้ (รูป ก) เพราะค่าความดันรอบข้างนั้นน้อย (เช่นน้อยกว่า 28 MPa) แต่เมื่อความดันรอบข้างสูงขึ้น หินปูนจะแสดงลักษณะพลาสติก แต่ถ้าหากยังมีน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ รอยแตกจะพัฒนาจนใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดรอยแตกที่กว้างขึ้น ดังรูป ข และการทดลองจะหยุดเมื่อหินวิบัติ และเกิดรอยแตกเฉือนมากมาย (รูป ค) ปกติการยืดหยุ่นมีค่า e (การยืด) น้อยกว่า 5% หากเพิ่มความดันรอบข้างจาก 28 MPa เป็น 103 MPa หรือ 2.7 MPa เมื่อแสดงในแผนภาพแรงเค้นและความเครียด ดูเหมือนหินปูนจะมีความแข็งแกร่งมากขึ้น ซึ่งค่าความแข็งแกร่งของหินยอมให้หินเกิดการยืดหยุ่น (yield strength) หรือเกิดความแข็งแกร่ง(ultimate strength) และความแข็งแกร่งต่อการวิบัติ(rupture strength)จะมากขึ้น ดังนั้นเมื่อหินอยู่ในสภาวะกึ่งยืดหยุ่นและพลาสติก ค่าการยืด(e) จะประมาณ 5-10 % แต่เมื่อเป็นพลาสติกค่าการยืดจะมากกว่า 10%

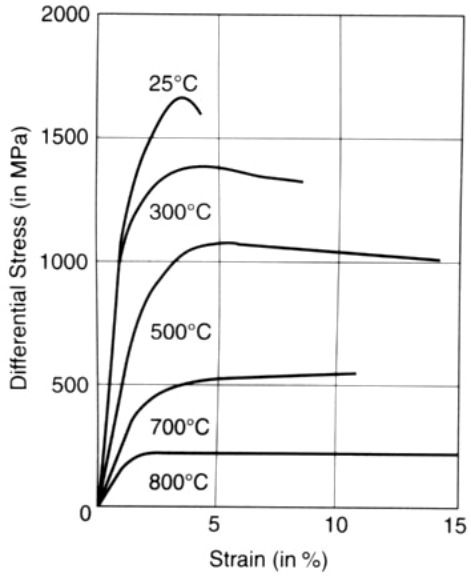
อนึ่งการทดสอบความแข็งแกร่งของหินอาจทำได้โดยวัดค่าแรงเค้นมากสุดและน้อยสุด (ตาราง 4.3) และกำหนดค่าลงในวงกลมมอร์ (รูป 4.48) จนทำให้เราทราบว่าวัตถุที่เราสนใจเป็นวัตถุชนิดแตกเปราะหรืออ่อนตัว (รูป 4.49) และแสดงสมบัติอะไร (รูป 4.50)



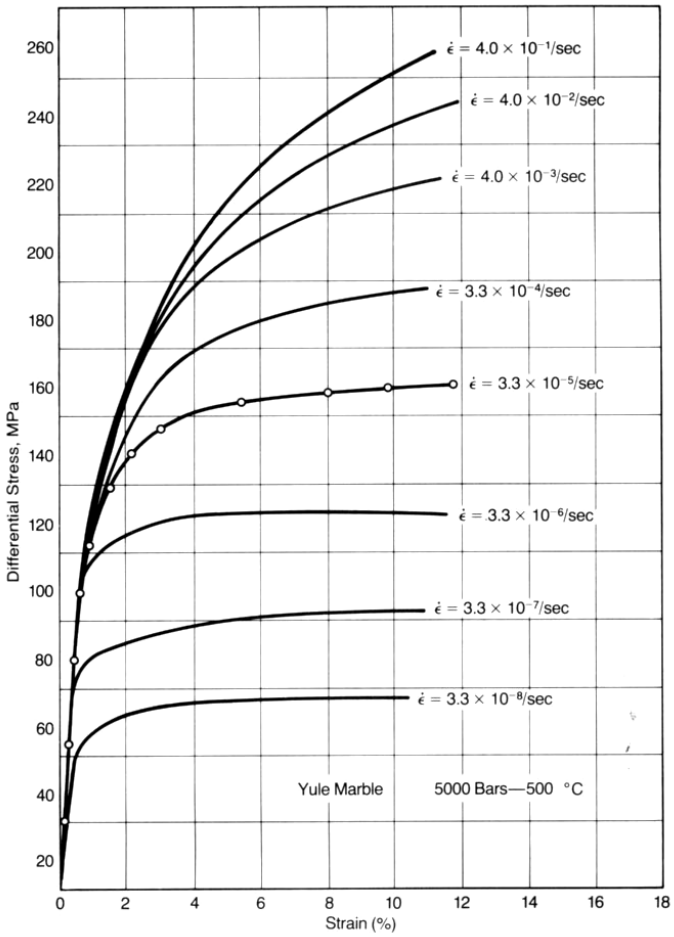
รูป 4.39 แผนภาพแรงเค้น-ความเครียดของหินปูนที่เปลี่ยนลักษณะ ณ ความดันรอบข้างที่แตกต่างกัน (หน่วย MPa) และ ณ อุณหภูมิห้อง ค่าความแกร่งและความเป็นพลาสติก เพิ่มขึ้นตามความดัน (รอบข้าง) ที่เพิ่มขึ้น (Donath, 1970)



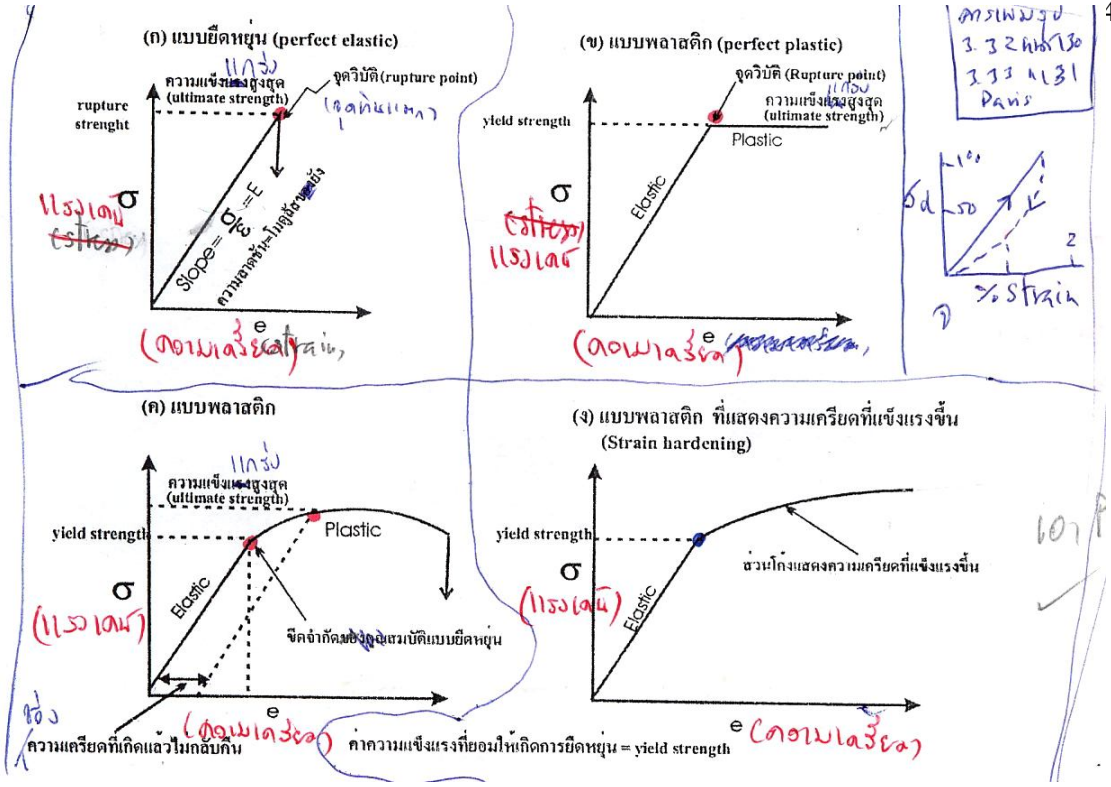
รูป 4.40 แผนภาพแรงเค้น-ความเครียดของหินทรายบีเรีย (Berea sandstone) แสดงถึงอิทธิพลความดันของไหลในช่องว่างกับความแกร่งและการอ่อนตัวของหิน ณ ความดันรอบด้าน 200 MPa และอุณหภูมิ 24^{o}ซ ค่าความดันของไหล (P_f) สำหรับทุกการทดลองแต่ละครั้งแสดงด้วยเส้นโค้งถัดไป (Marshak & Mitra, 1988)



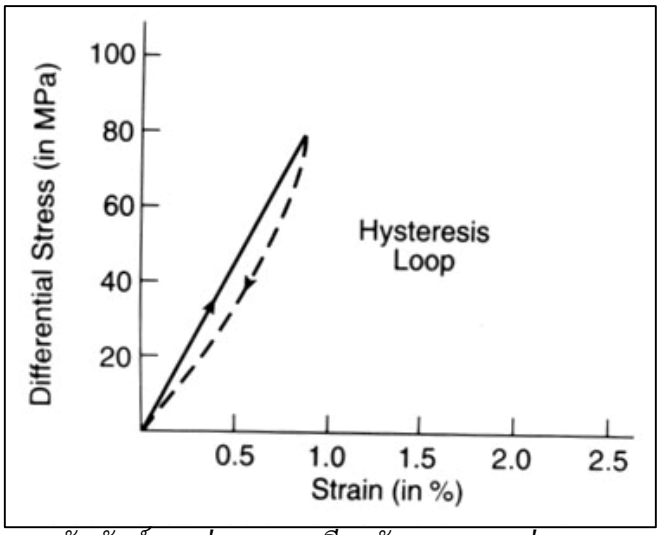
รูป 4.41 แผนภาพแรงเค้น-ความเครียดของหินบะซอลต์ที่เปลี่ยนลักษณะไป ณ ความดันรอบตัว 5 Kbar และอุณหภูมิที่ต่างกัน (25^{o}-800^{o} ซ) (Griggs และคณะ, 1960) (Davis & Reynolds, 1996)



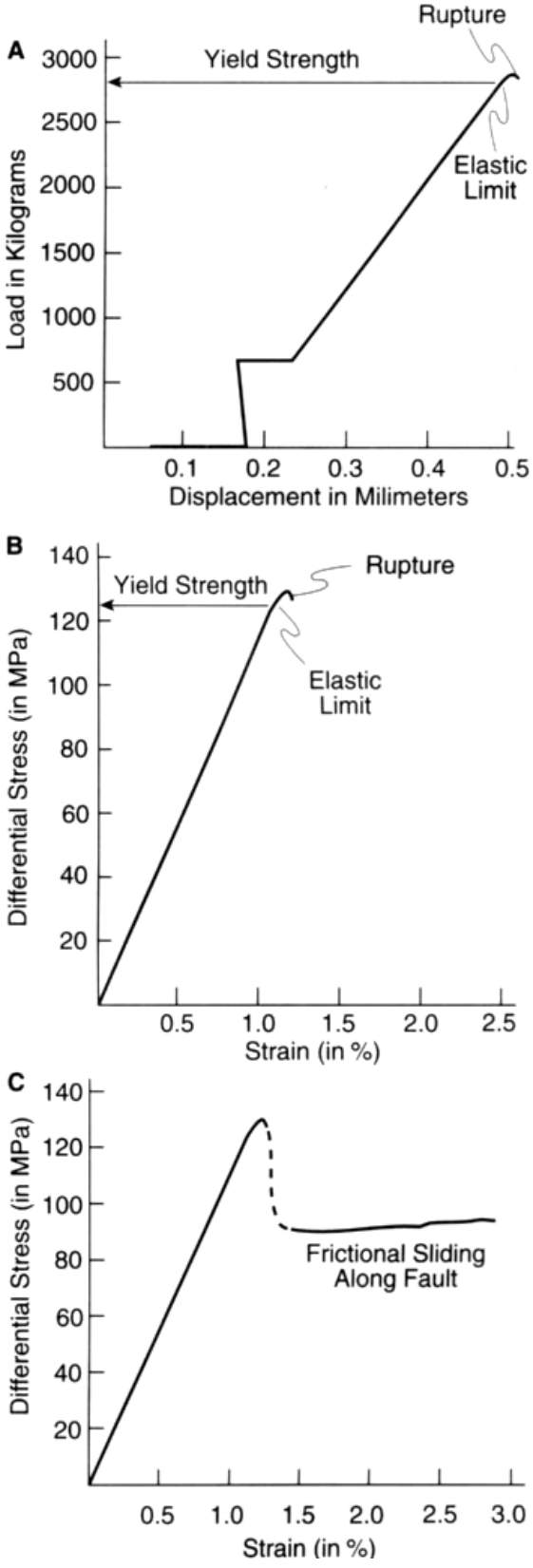
รูป 4.42 แผนภาพแรงเค้น-ความเครียดของหินอ่อนยูล (Yule marble) ที่เปลี่ยนลักษณะไป ณ อัตราความเครียดที่แตกต่างกัน ให้สังเกตว่าอัตราความเครียดยิ่งสูง หินยิ่งมีความแข็งแกร่งเพิ่มมากขึ้น (Heard, 1963)



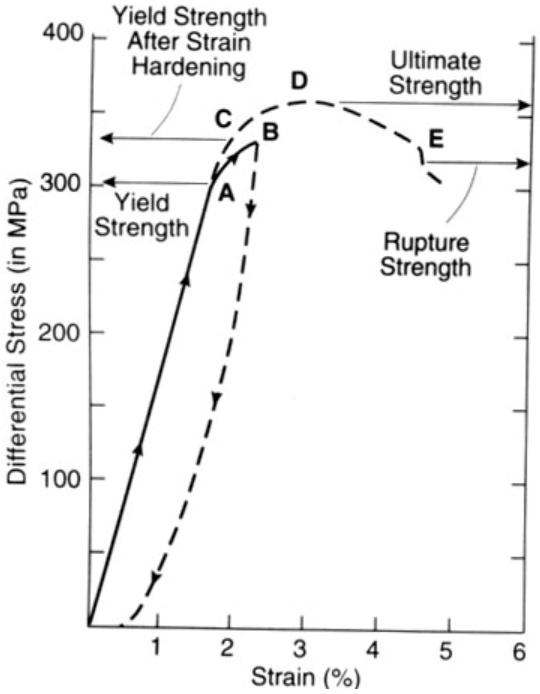
รูป 4.43 (ก) ความสัมพันธ์ของแรงเค้นและความเครียดตามกฎของฮุค ค่าความลาดชันของกราฟเป็นค่าโมดูลัสของยัง (ข) ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัตถุที่ถูกความเค้นกระทำเกินขีดจำกัดของคุณสมบัติยืดหยุ่นและเกิดความเครียดแบบพลาสติกแบบสมบูรณ์(perfect plastic) (ค) และ (ง) ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัตถุที่ถูกความเค้นกระทำเกินขีดจำกัดของคุณสมบัติยืดหยุ่นและเกิดความเครียดแบบพลาสติกไม่สมบูรณ์ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)



รูป 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความแตกต่างของแรงเค้น เมื่อเอาแรงออกจากตัวอย่างที่เปลี่ยนลักษณะแบบยืดหยุ่น ตัวอย่างจะเข้าสู่สภาพเดิม แต่พอเวลากลับคืนรูปจะไปตามเส้นทางอีกเส้นหนึ่งที่ใช้เวลายาวนานกว่า ซึ่งเราเรียกการย้อนกลับแบบนี้ว่า "วงจรฮิสเตอรีซิส (hysteresis loop)" (Davis & Reynolds, 1996)

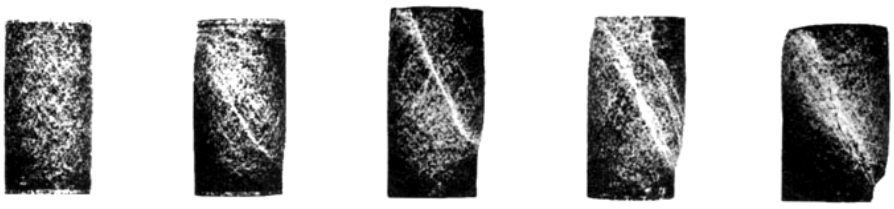


รูป 4.45 จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนลักษณะแบบพลาสติก จนเกิดการวิบัติโดย (A) กราฟแสดงน้ำหนักกดทับต่อระยะการเคลื่อนที่ (B) กราฟแสดงความเครียดต่อแรงเค้น และ (C) ความเครียดต่อความแตกต่างแรงเค้น ให้สังเกตการหดสั้น เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงอีกนิดเดียวหลังจากการวิบัติ ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนตัวไปตามแนวรอยเลื่อนนั่นเอง (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียดในหินปูนที่เกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบพลาสติก ส่วนจุด B แสดงถึงภาวะหลังเอาน้ำหนักตามแกนออก ให้สังเกตการเปลี่ยนลักษณะเป็นแบบพลาสติกไม่คืนรูป จุด C แสดงถึงจุดภายใต้แรงดันจากน้ำหนักกดทับใหม่ครั้งที่ 2 และจุด D เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบพลาสติก ก่อนเกิดการวิบัติที่ E (Davis & Reynolds, 1996)

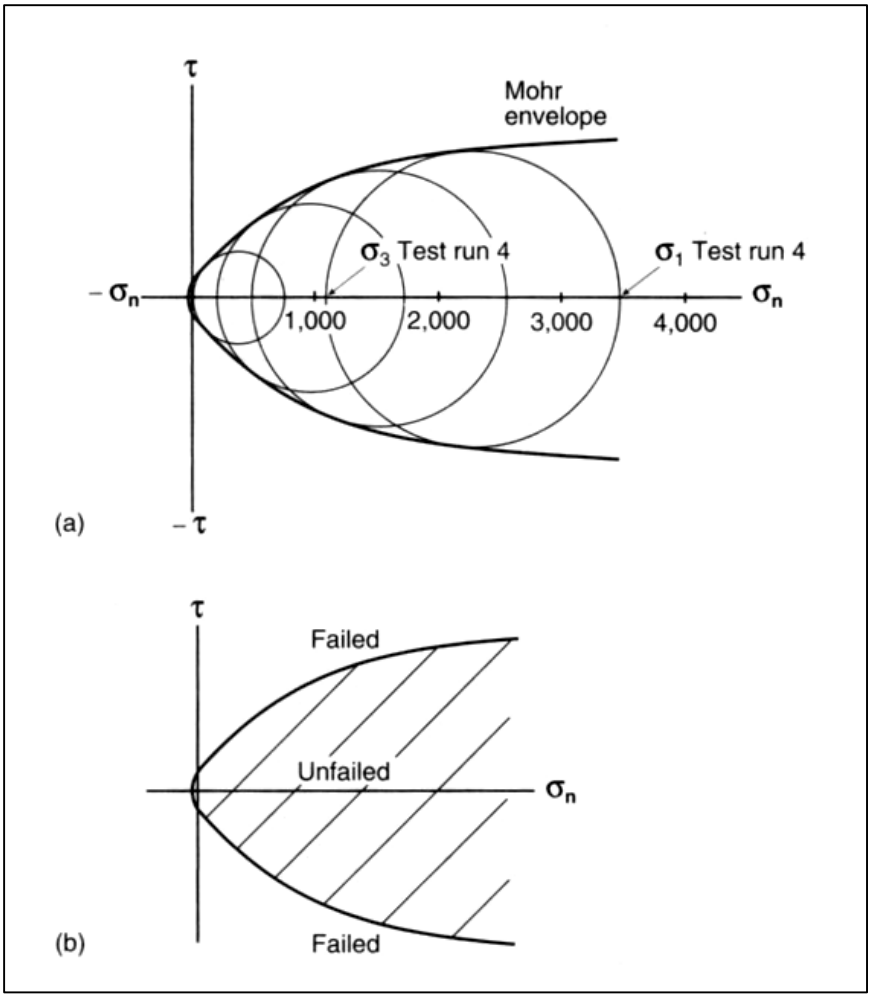
รูป 4.47 ลักษณะแท่งตัวอย่างที่เกิดรอยเลื่อนในหินปูน รูปซ้าย-สภาพก่อนเปลี่ยนลักษณะ รูปกลาง-สภาพเกิดรอยเลื่อนหนึ่งรอย รูปขวา-สภาพเกิดรอยเลื่อนถี่ๆ (Davis & Reynolds, 1996)



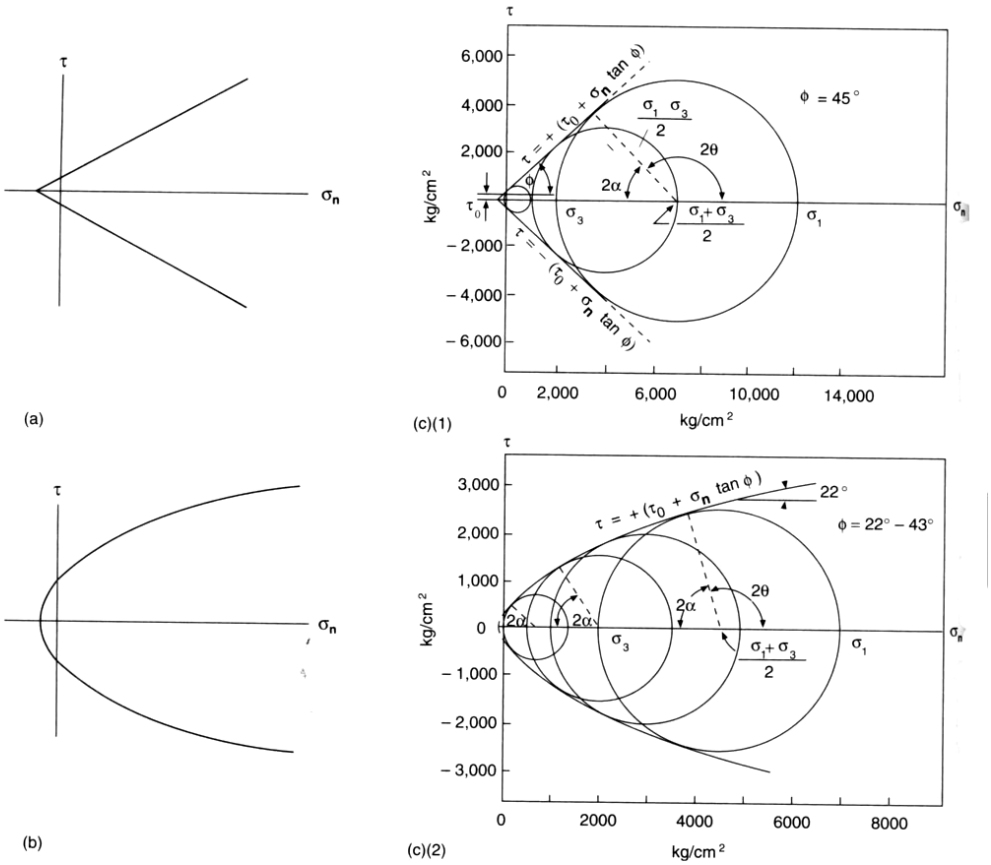
รูป 4.48 ตัวอย่างแท่งหินปูนที่เปลี่ยนลักษณะจนเกิดความเครียดเท่ากับ (~15%) ภายใต้ความดันรอบข้างแตกต่างกัน จนทำให้เกิดการเลื่อนตัวได้หลายรูปแบบ ตั้งแต่แบบเปราะจนถึงอ่อนนิ่ม (Donath, 1970)

ตาราง 4.3 การทดลองแต่ละครั้งที่แสดงถึงค่าแรงเค้นแกนหลักมากสุดและแรงเค้นแกนหลักน้อยสุด (Hatcher)

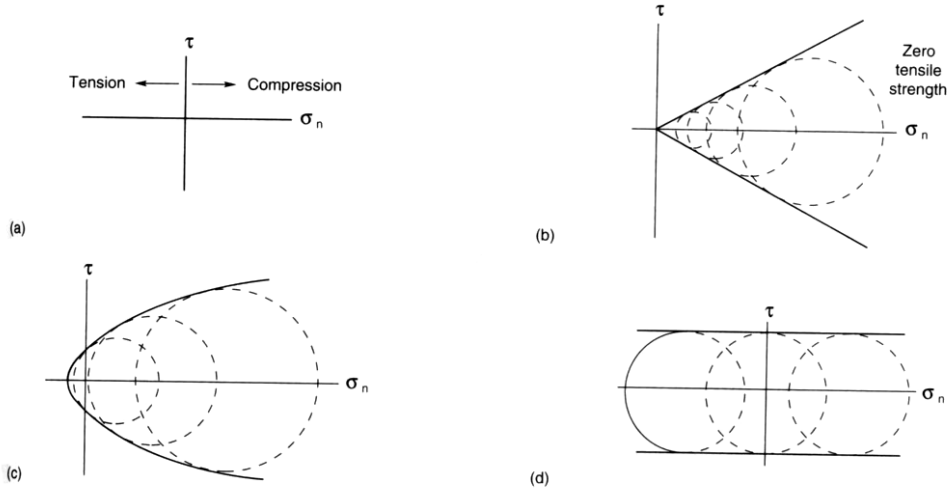
Test Run	σ_3 (kg cm^{-2})	σ_1 (kg cm^{-2})
1	0	750
2	250	1,750
3	500	2,400
4	1,050	3,550



รูป 4.49 แผนภาพวงกลมมอร์ (a) ที่กำหนดค่าที่ได้จากการเปลี่ยนลักษณะของหินปูน ณ ความดันรอบข้างต่างๆ จากตาราง 4.2 (b) ที่แสดงถึงอาณาเขตวิบัติ (failed) หรือไม่เสถียร (unstable) กับอาณาเขตไม่วิบัติ (unfailed) หรือเสถียร (stable) (Hatcher)



รูป 4.50 แผนภาพวงกลมมอร์ สำหรับวัสดุที่แตกเปราะ (a) และอ่อนตัว (b) และ (c) (บน) หินทรายออยล์ครีก (Oil Creek Sandstone) และ (ล่าง) หินเกลือจืดเบรนด์ (Braine Anhydrite) ที่เปลี่ยนลักษณะ ณ อุณหภูมิห้อง (24^{o}ซ) และความดันบรรยากาศตั้งแต่ 0 ถึง 2,000 atm (Hubbert&Willis, 1957) (Hatcher)



รูป 4.51 แผนภาพวงกลมมอร์ แสดง(a) แกนแรงเค้นดึง (Extensional axis มีค่า –σn ซึ่งมีค่าเป็นลบ) และแกนแรงเค้นอัด (compressional axis ซึ่งมีค่าเป็นบวก) (b) ในตะกอนทรายควอร์ตซึ่งไม่แสดงความแข็งแกร่งหรือความแกร่งจากการดึง (c) ในหินโดยเฉลี่ยที่แสดงลักษณะการดึงเมื่อมรแรงเค้นต่ำๆและแรงอัดเมื่อแรงเค้นสูงขึ้น จนกระทั่งหินแสดงการอ่อนตัว ณ ที่แรงเค้นสูงมากๆ (d) ในเหล็กกล้า มีค่าของแรงเค้นอัดและแรงเค้นดึงที่มีขนาดเท่าๆกัน และในที่สุดแสดงลักษณะแรงดึง(Hatcher)

4.5.3 ความแข็งแกร่งของหิน(Rock strength)

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแกร่งของหิน (rock strength) ชนิดเดียวกันเมื่ออยู่ในสภาวะที่แตกต่างกันย่อมทำให้หินมีความแข็งแกร่งแตกต่างกันไป ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

(ก) ความดันรอบข้าง (confining pressure) ถ้าหินได้รับความดันรอบข้างเพิ่มขึ้นหินจะมีความแข็งแกร่งมากขึ้น ดังรูป 4.52ก นั่นคือทำให้ค่าการยืดหยุ่น (yield strength) และค่าการอ่อนนิ่ม (ductility) เพิ่มมากขึ้นด้วย

(ข) อุณหภูมิ (temperature) ถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นหินจะมีความแข็งแรงน้อย และมีค่าความเป็นพลาสติกมากขึ้น ดังรูป 4.52ข

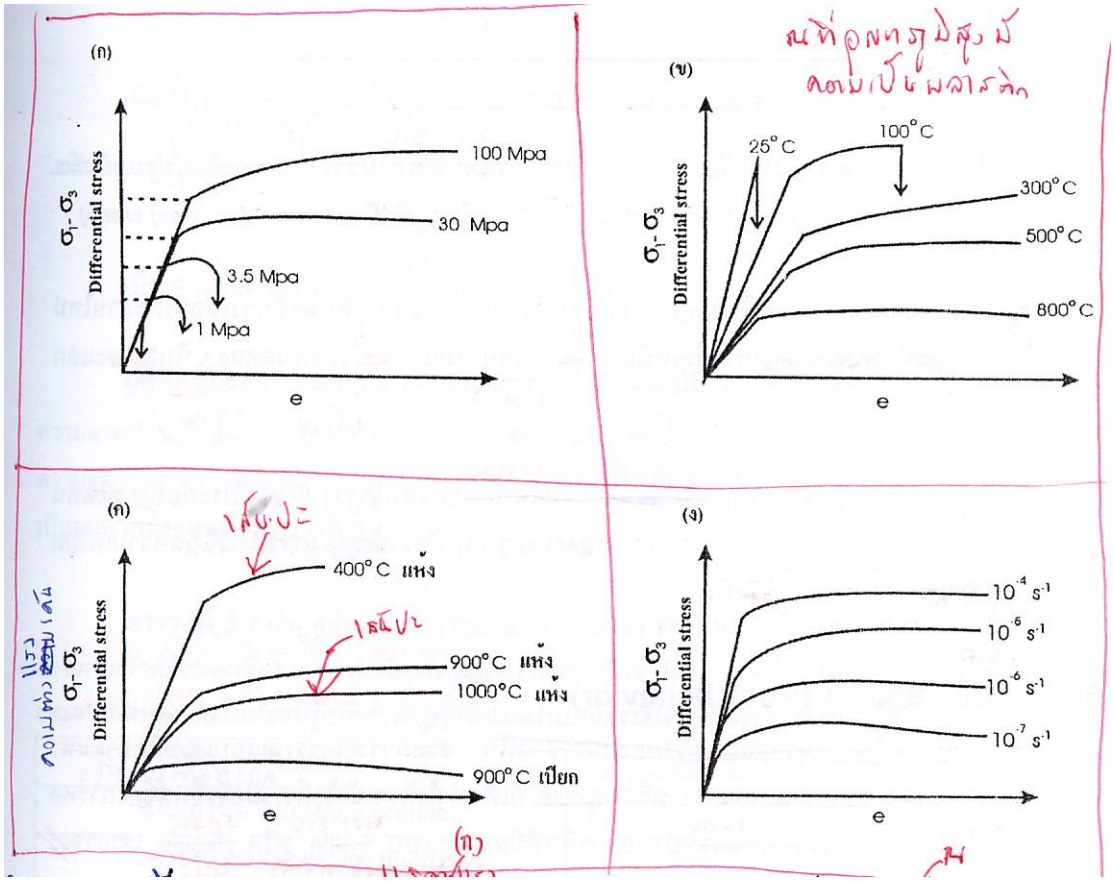
(ค) ความดันของเหลว (pore fluid pressure) ถ้ามีค่าของความดันของของเหลว หินจะมีค่าความแข็งแรงลดลง ดังรูป 4.52ค

(ง) อัตราเร็วของความเครียดที่เกิดขึ้น (strain rate) ถ้าการทดลองกำหนดให้มีอัตราเร็วของการเกิดความเครียดต่ำ หินจะมีคุณสมบัติยืดหยุ่นน้อยแต่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกมาก ดังแสดงในรูป 4.52ง

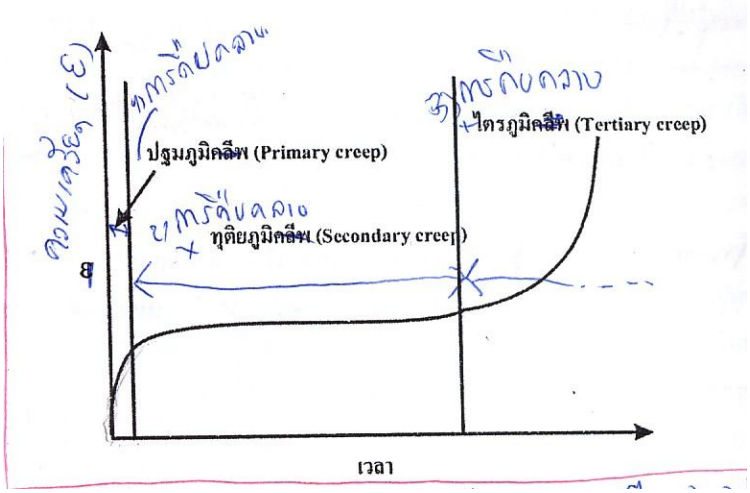
โดยปกติหินมักมีความแข็งแกร่งลดลงเมื่อรับน้ำหนักไว้นานๆ (เหมือนเราแบกของบ่านานๆ แล้วเรารู้สึกเจ็บ) เพราะเกิดความล้าซึ่งเราเรียกสภาวะความล้านี้ว่าการคืบคลาน(creep) ความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้ความแตกต่างแรงเค้นที่ต่ำกว่าความแข็งแกร่งของหินต่อการวิบัติ จากรูป 4.53 ทำให้หินภายใต้แรงเค้นเปลี่ยนลักษณะได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกการคืบคลานปฐมภูมิ (primary creep) ช่วงที่สอง การคืบคลานทุติยภูมิ (secondary (plastic) creep) และช่วงที่สามการคืบคลานไตรภูมิ (tertiary (viscous) creep) ซึ่งในความเป็นจริงการคืบคลานทั้งแบบพลาสติก และที่หนืดแปรผันตามเวลา

(จ) แนวรอยแตกเดิม (preexisting weakness) แนวรอยแตกเดิมที่มีการเชื่อมประสานใหม่หรือแนวแตกที่แสดงการยืดเหนี่ยวที่ไม่สมบูรณ์ มักทำให้ความแข็งแกร่งของหินลดลง จนหินจะแตกออกตามแนวแตกเดิม

ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญๆ ที่ควบคุมความแข็งแกร่งของหินได้แก่ (1) แร่ประกอบหิน (2) เนื้อหิน (3) ความดันรอบข้าง (4) ความดันของเหลว (5) อัตราความเครียด (6) อุณหภูมิ และ (7)รอยแตกเดิมในหิน



รูป 4.52 (ก) กราฟจำลองความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบที่ความดันรอบข้างปริมาณไม่เท่ากัน (ข) กราฟจำลองความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในขณะทดสอบไม่เท่ากัน (ค) กราฟความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบด้วยการยอมให้มีความดันน้ำเกิดขึ้นที่แท่งตัวอย่างในปริมาณที่ไม่เท่ากัน (ง) กราฟความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบที่กำหนดปริมาณอัตราการเกิดความเครียดปริมาณไม่เท่ากัน (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)



รูป 4.53 กราฟแรงเครียดและเวลาของการคืบคลานสามช่วง ได้แก่ (1) ช่วงปฐมภูมิ(primary creep) (2) ช่วงทุติยภูมิ(secondary (plastic) creep) และ (3) ช่วงไตรภูมิ(tertiary(viscous)creep) (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)

4.6 สมบัติของหิน (Rock behavior)

ในการทดสอบการยืดหดตามแกนเดี่ยว ก็เพื่อทำให้เราเข้าใจถึงความมากน้อยในการหดสั้นก่อนที่หินวิบัติ ในการบ่งบอกว่าหินที่มีสภาวะแบบ แตกง่าย หรือ งอง่าย เราอาจบอกได้ทันทีเมื่อเห็นหินเสียการยึดเหนี่ยว (cohesion) ของเม็ดแร่ซึ่งแสดงว่าหินเกิดในสภาวะแบบแตกง่าย แต่ถ้าหินไม่เห็นอาจแสดงว่าอยู่ในสภาวะแบบงอ ในรูป 4.54 เราอาจสังเกตเห็นได้ชัดว่าในสภาพที่หินเสียการยึดเหนี่ยว การเปลี่ยนลักษณะเกิดในพื้นที่แคบๆ แต่ถ้าหินมีสภาพแบบงอได้ การเปลี่ยนลักษณะเกิดในพื้นที่กว้างๆ จากสมบัติเชิงกลของหินเราอาจจัดแบ่งหินตามความแข็งแกร่งเป็น 3 ประเภทได้แก่

(1) สมบัติการยืดหยุ่น (elastic behavior)
(2) สมบัติพลาสติก (plastic (ductile) behavior) และ
(3) สมบัติความหนืด (viscous behavior)

นอกจากนี้ยังมีลูกผสมกันระหว่างยืดหยุ่นกับพลาสติก (elastic-plastic) (viscoplastic) และ (elastico-viscous) แบบจำลองคุณสมบัติของหินได้แสดงในรูป4.55

4.6.1 *สมบัติการยืดหยุ่น (elastic behavior)*

มนุษย์เราพยายามเอาชนะความเครียดมานานแล้วด้วยวิธีต่างๆ แต่ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่นำมาใช้ด้วย ดังรูป 4.56 และ 4.57 ความยืดหยุ่นเป็นสมบัติแบบหนึ่งของวัตถุในการกลับคืนสู่สภาพเดิม เมื่อแรงที่มากระทำต่อวัตถุนั้นหมดไป วัตถุแต่ละชนิดจะมีความยืดหยุ่นมากน้อยต่างกัน เช่น พลาสติก ยาง สปริง เหล็ก หิน แร่ ไม้ ฯลฯ หากเราเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นต่อความเครียด (รูป 4.43 และ 4.52) สำหรับวัตถุที่มีความยืดหยุ่น เราจะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามกฎฮุค (Hooke's Law)

$$\sigma \alpha \varepsilon$$

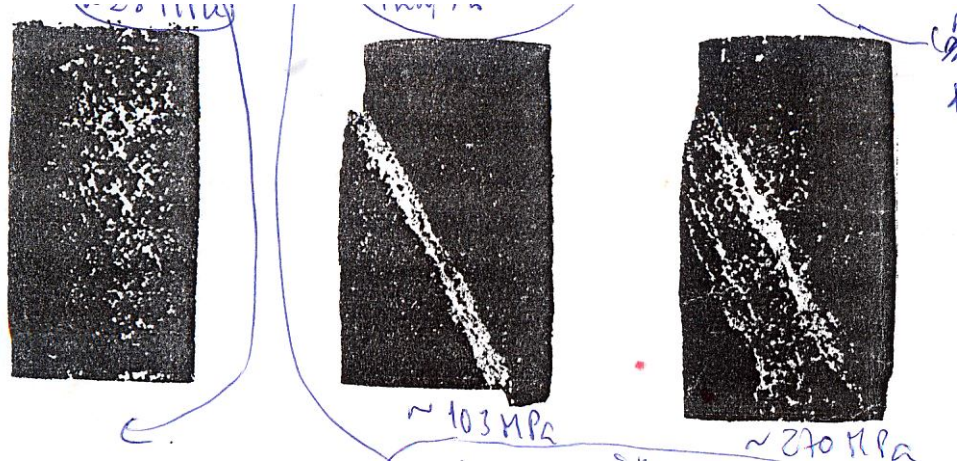
หรือ $$\sigma = C\varepsilon$$

เมื่อ C = ค่าคงที่ ถ้าวัตถุมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

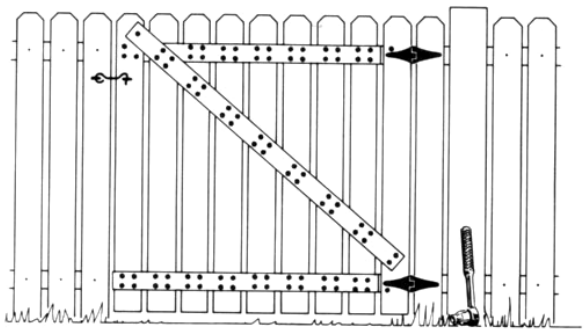
$$\sigma = E\varepsilon$$

เมื่อ E แทนค่ามูดูลัสยัง (Young's modulus)

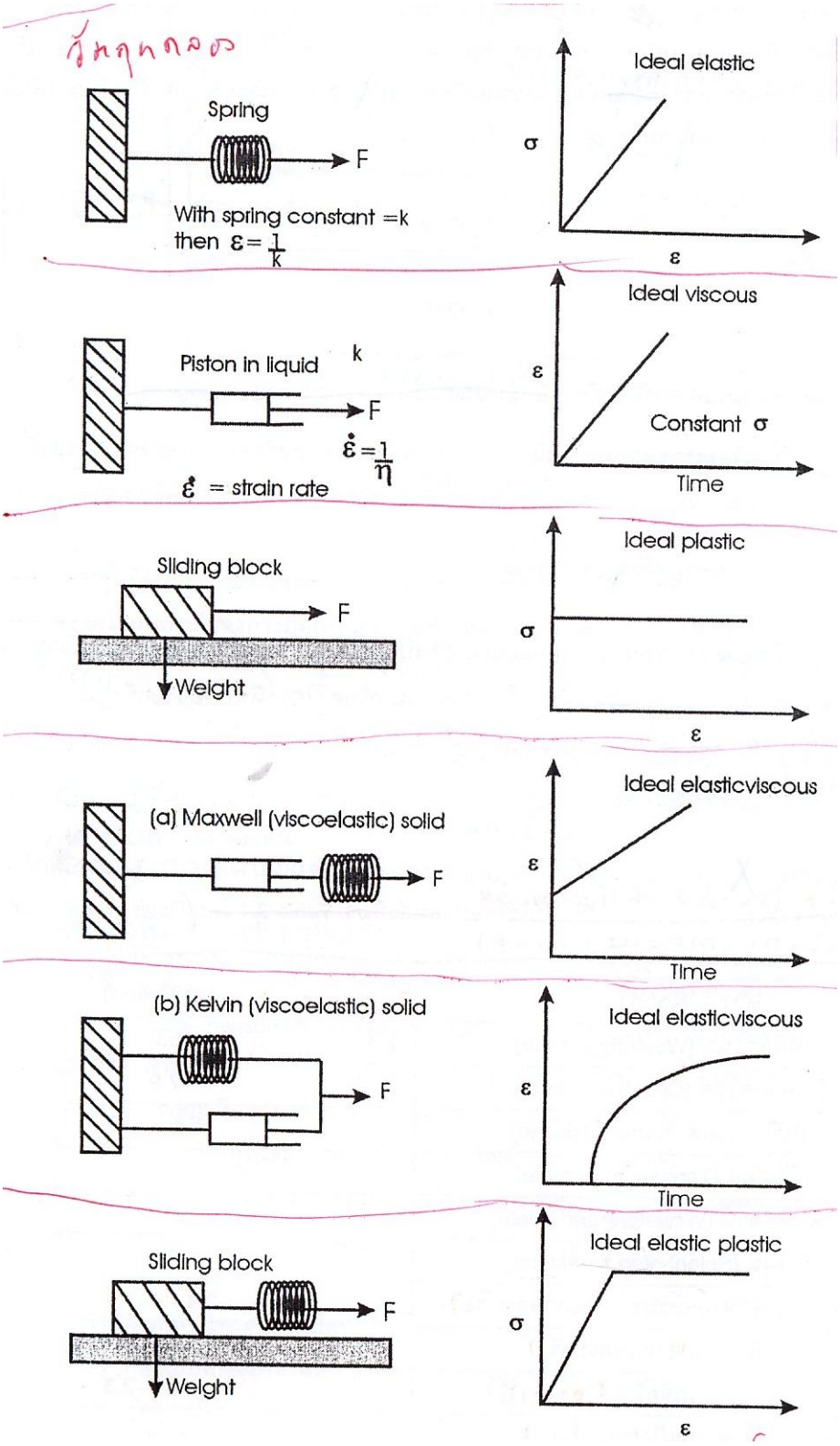
มูดูลัสยัง (Young's modulus, E) เป็นสมบัติของวัตถุยืดหยุ่น โดยค่าความลาดชันของเส้นตรงของแรงเค้น (σ) ต่อความเครียด (ε) ด้วยเหตุนี้หินที่แข็งแกร่งมาก กราฟจะแสดงความลาดชันมาก โดยปกติเรามักให้แรงเค้นอัดเป็นบวก (+) และการยืดเป็นลบ (-) ดังนั้นค่ามูดูลัสยัง จึงมีค่าเป็นลบด้วยดังแสดงในตาราง 4.4



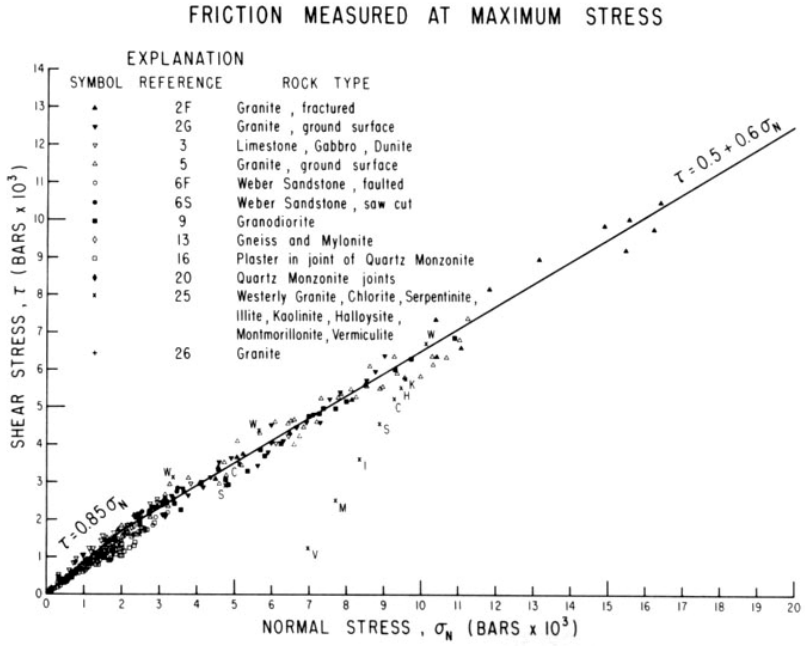
รูป 4.54 ตัวอย่างของหินปูนที่ถูกกดแบบการทดสอบแบบกดอัดตามแนวแกนเดี่ยว(เพียงตา สาตรักษ์, 2546)



รูป 4.56 การเอาชนะความอ่อนตัวหรืออ่อนไหว (ของพื้นดิน) จำเป็นต้องอาศัยทั้งเวลาและลักษณะการใช้ประโยชน์ (ของประตู) แนวทางการแก้ไขที่ดีที่สุด (ที่มนุษย์คิดออก...คือไม่แน่ใจว่า... ได้เพียวชั่วคราวหรือไม่) ก็คือยึด (มัน) ให้แน่น (Davis & Reynolds, 1996)



รูป 4.55 แบบจำลองสมบัติของหิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด หรือระหว่างความเครียดกับเวลาเมื่อมีหินเปลี่ยนลักษณะ(ปรับปรุงจากเพียงตา ศาตรักษ์, 2546 และ Richardson, 1996)



รูป 4.57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นเฉือนกับแรงเค้นหลัก แสดงถึงสมบัติการเสียดทานของหินที่เกือบเท่าๆกัน ยกเว้นแรงเค้นหลักต่ำสุดบนระนาบรอยแตก จึงเกิดความสัมพันธ์ที่แสดงถึงแรงเค้นฉาก (σn) บนระนาบรอยแตก กับแรงเค้นเฉือน (σs) ที่รวมกันแล้วมากกว่า 1 (Byerlee, 1978) (Davis & Reynolds, 1996)

ตาราง 4.4 ค่ามูดูลัสของยัง (Young's modulus) ของหินบางตัวอย่าง ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของแต่ละหินซึ่งมีค่าแตกต่างกัน จึงเห็นว่าต้องบอกชื่อของแหล่งที่มาให้ชัดเจน (แหล่งที่มา Davis and Reynolds, 1996) (เพียงตา สาตรักษ์, 2546)

หิน (Rock)	**มูดูลัสยัง = E(x10^4 MPa)**
หินแกรนิต(Westerly granite)	-5.6
หินควอตไซต์(Cheshire quartzite)	-7.9
หินไดอะเบส(Karroo diabase)	-8.4
หินอ่อน(Tennessee marble)	-4.8
หินดินดาน(Witwatersrand shale)	-6.3
หินปูน(Solenhofen limestone)	-5.3
หินทราย (อำเภอเสริมงาม จังหวัดลำปาง)	-2.4 ถึง -2.8
หินอ่อน (จังหวัดสระบุรี)	-5.5 ถึง -8.9
เกลือหิน (อุดรธานี)	-2.1 ถึง -2.3
หินทรายแป้ง (ชุดภูทอก)	-0.52
หินทรายเนื้อปูนเชื่อมประสาน	-4.5
หินโคลน (ชุดมหาสารคาม) (เปียก)	-0.4 ถึง -0.8
หินโคลน(ชุดมหาสารคาม) (แห้ง)	-1.6

อัตราส่วนปัวซองส์ (Poission's ratio, υ) เป็นสมบัติของวัตถุยืดหยุ่น โดยที่อัตรส่วนนี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเครียดแกนขวางต่อความเครียดแกนยาวเมื่อมีแรงเค้นเกิดตามแกนยาวของวัตถุ (รูป 4.58) ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ไม่มีหน่วย ตัวอย่างของค่าอัตราส่วนปัวซองส์ ของหินต่างๆ ได้แสดงในตาราง 4.5 และสมการอัตราส่วนปัวซองส์ได้แสดงในรูป 4.58

ตาราง 4.5 ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Possion's ratio) ในหินบางชนิด ค่าเหล่านี้ได้จากหินที่มีเนื้อแน่นขณะทำการทดสอบ ค่าที่แสดงเป็นค่าโดยประมาณจากความเร็วคลื่นอัดและคลื่นเฉือน (ข้อมูลจาก Davis & Reynolds, 1996 และ เพียงตา สาตรักษ์, 2546)

ชนิดหิน (Rock)	อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio)
หินปูนเนื้อละเอียด(limestone, fine grain)	0.25-0.32
หินปูนมีรูพรุนมาก (limestone, porous)	0.22-0.32
หินแกรนิต(granite)	0.22-0.27
หินไดโอไรต์(diorite)	0.22-0.25
หินทราย (sandstone)	0.20-0.32
หินควอตไซต์(quartzite)	0.18-0.22
หินอ่อน(marble)	0.24-0.30

บัคล์โมดูลัส(Bulk Modulus, K) นิยมใช้สัญลักษณ์ "K" บัคล์โมดูลัส เป็นสมบัติของวัตถุยืดหยุ่น มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดัน (pressure gradient, ΔP) รอบๆ ข้างของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (dilation, $\Delta\upsilon$) ของวัตถุ ดังนั้นค่าบัคล์โมดูลัสคือความสามารถของวัตถุในการต่อต้านแรงอัด ตัวอย่างเช่น สมมติว่าเรามีแท่งหินทรายและแท่งฟองน้ำขนาดเท่ากัน ถ้าเราออกแรงบีบแท่งหินทรายและแท่งฟองน้ำ เราจะพบว่าแท่งฟองน้ำออกแรงบีบเพียงเบาๆ ก็สามารถเปลี่ยนลักษณะและสังเกตได้ง่ายกว่าแท่งหินทราย ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่าบัคล์โมดูลัสของแท่งฟองน้ำมีค่าน้อยกว่าบัคล์โมดูลัสของแท่งหินทราย ด้วยเหตุนี้เราจึงอนุมานว่าค่าบัคล์โมดูลัสของหินแข็งมีค่ามากกว่าดิน หรือค่าบัคล์โมดูลัสของหินแกรนิตมีค่ามากกว่าหินทราย ตาราง 4.5 แสดงค่าบัคล์โมดูลัสของวัตถุต่างๆได้ และสมการข้างล่างแสดงสมการบัคล์โมดูลัส

$$K = \Delta P/\Delta V$$

โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G) บางที่นิยมใช้สัญญาลักษณ์ "μ" โมดูลัสเฉือนเป็นสมบัติของวัตถุยืดหยุ่น และมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน (σ_s) ต่อค่าความเครียดเฉือน (γ) ของวัตถุเมื่อถูกแรงกระทำ ค่าโมดูลัสเฉือนใช้บอกถึงความสามารถของหินในการต่อต้าน

การเปลี่ยนลักษณะต่อแรงเฉือน ดังนั้นเราอาจจะพอมองออกแล้วว่าอากาศกับของเหลวไม่สามารถจะต่อต้านความเค้นเฉือนได้ โมดูลัสเฉือนจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าโมดูลัสเฉือนของวัตถุบางชนิดได้แสดงในตาราง 4.6 และสมการข้างล่างแสดงสมการโมดูลัสเฉือน

$$\mu = \sigma_s/\gamma$$

ตาราง 4.6 ค่าคงที่เฉพาะของความยืดหยุ่น K, E, μ, υ บางชนิด (Lay และ Wallace, 1995) ยกเว้นค่า E ได้มาจากการคำนวณจากค่าความสัมพันธ์ร่วมกับค่าอื่นๆ ไม่ได้วัดโดยตรง

วัตถุ	K(Gpa)	μ(Gpa)	E(Gpa)	υ	ρ(kg/m^3)
น้ำ	2.1	0	0	0.5	1,000
หินทราย	17.	6	19	0.34	1,900
แร่โอริวีน(Olivine)	129	82	202	0.24	3,200
แร่เพอร์รอพสไกต์ (Perovskite)	266	153	385	0.26	4,100

หมายเหตุ: GPa คือ Giga Pascal

ในที่นี้ขอยกตัวอย่างเรื่องโมดูลัสยังดังนี้ สมมติเหล็กรางรถไฟมีค่าของการขยายตัวด้วยความร้อน (thermal expansion) (α) ประมาณ $11\text{x}10^{-6}$ ซึ่งหมายความว่าถ้าอุณหภูมิ 0° ซ เหล็กยาว 30 เมตร เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น 40° ซ เหล็กยาว 30.013 เมตร โดยคำนวณจากสมการ

$$e_{ij} = \alpha_{ij}\Delta T$$

เมื่อพิจารณาทิศทางเดียว เราจะได้

$$\text{Thermal expansion} \quad \alpha = \frac{I}{I_0} \times \frac{\Delta I}{\Delta T} = 11 \times 10^{-6}$$

$$= \frac{1}{30m} \times \frac{\Delta I}{40} = 11 \times 10^{-6}$$

นั่นคือ $$\Delta I = 0.013m$$

การเปลี่ยนแปลงความยาวเป็น 0.013 เมตรหรือ 1.3 เซนติเมตร โดยมีค่าโมดูลัสของยังของเหล็กประมาณ $20\text{x}10^{10}$ N/m^2 หากเราต้องการคำนวณหาแรงเค้นและแรงที่ทำให้เหล็กยืดออกไป 1.3 เซนติเมตรเมื่อเหล็กมีพื้นที่หน้าตัด 30 ตารางเซนติเมตร เราอาจคำนวณได้ดังนี้

$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \mathrm{E} \times \frac{\Delta \mathrm{I}}{\Delta \mathrm{I}_0} = 20 \times 10^{10} \times \frac{0.013}{30} = 8.67 \times 10^7$$

$$F = \sigma \mathrm{A} = 8.67 \times 10^7 \times 0.003 = 2.6 \times 10^5 \, N$$

$$F = 2.6 \times 10^5 \, N = 2.6 \times 10^5 \, kg - m/s^2 = 2.6 \times 10^4 \, kg$$

$$F = 26 tons$$

นั่นคือเราต้องออกแรง 26 ตันเพื่อยืดเหล็กรางรถไฟ ดังนั้นถ้าเราทราบค่า E, υ, และแรงเค้นตั้งฉากในแนว x, y, z เราก็สามารถคำนวณหาค่า extension, e หรือ ε) ได้จากสมการ

$$e_z = \frac{1}{\mathrm{E}}\left[\sigma_z - \nu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right]$$

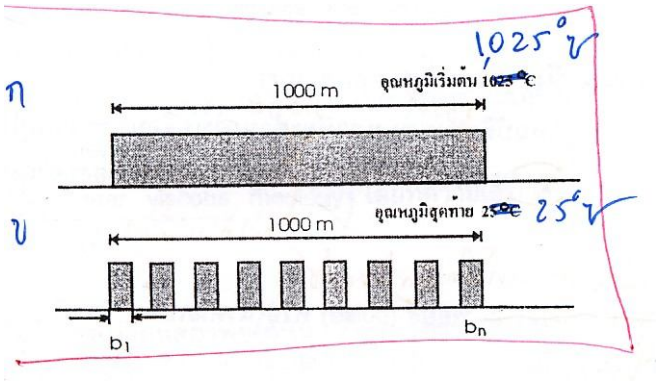
$$e_y = \frac{1}{\mathrm{E}}\left[\sigma_y - \nu\left(\sigma_z + \sigma_x\right)\right]$$

$$e_x = \frac{1}{\mathrm{E}}\left[\sigma_x - \nu\left(\sigma_z + \sigma_y\right)\right]$$

จากสมการ เมื่อเราแทนค่าของ E และ υ ของหินแกรนิตที่เหมาะสมเราสามารถคำนวณหาค่า e ในแกน x,y และ z ได้ ถ้าเราทราบค่า σ_x, σ_y, σ_z, E และ υ ในสมการที่กล่าวมาข้างต้น

จากรูป 4.11การขยายตัวของวัตถุเมื่อถูกความร้อน ทำให้แขนการยึดเกาะของโมเลกุลยาวขึ้น และแรงการยึดเกาะลดลง ดังนั้นวัตถุจึงมีกำลังรับน้ำหนักหรือความแข็งแรงลดลง ตัวอย่างอีกตัวอย่างของการขยายตัวจากความร้อน เช่น กรณีของการเย็นตัวของลาวาบะซอลต์ (basaltic lava) ที่เรามักพบเห็นเป็นรูปแท่ง (columnar joint) ดังแสดงในรูป 4.59

จากรูป 4.59 กำหนดให้อุณหภูมิลาวาเริ่มต้น 1,025° ซ และเมื่อเย็นตัวมีอุณหภูมิ 25° ซ



รูป 4.59 ลักษณะการไหลของหินหลอมละลายก่อนการเย็นตัว (ก) หลังการเย็นตัว (ข) ซึ่งจะเห็นว่าเราพบช่องว่างจากการเย็นตัว

ดังนั้น

$$\Delta T = T_f - T_0$$

$$\Delta T = 25 - 1025 = -1000^\circ C$$

ถ้า $\alpha = 2.5x10^{-6}\ ^\circ C^{-1}$ จะได้

$$e = \propto \Delta T$$

$$e = 2.5 \times 10^{-6} \times -1000$$

$$e = -2.5 \times 10^{-3}$$

ถ้าความยาวเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 เมตร ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนความยาว (ΔI) จะได้

$$e = \frac{I_f - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0}$$

$$\Delta I = eI_0$$

$$\Delta I = -2.5 \times 10^{-3} \times 1000 = -2.5m$$

ดังนั้น เมื่อเราวัดระยะห่างของรอยแยกระหว่างแท่งหิน เทียบกับระยะ 1,000 เมตร ระยะห่างจะรวมกันได้ 2.5 เมตร

4.6.2 *สมบัติพลาสติก(Plastic (ductile) behavior)*

พลาสติกเป็นคุณสมบัติที่เมื่อหินถูกทำให้เกิดความเครียดจนหินเกิดการเปลี่ยนลักษณะและเมื่อเปลี่ยนลักษณะไปแล้วจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ จากเส้นแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดช่วงพลาสติกพบหลังที่เกินขีดจำกัดกฎของฮุคไปแล้วแต่ยังไม่ถึงจุดที่เกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปกราฟของความเค้นและความเครียดรูป 4.43

4.6.3 สมบัติการหนืด (Viscous behavior)

ความหนืด เป็นสมบัติของของเหลวต่อการต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลว ซึ่งโดยมากแปรผันกับความหนาแน่นคือ ถ้าของเหลวมีความหนาแน่นมากจะมีความหนืดมาก ปกติเราเรียกแรงต้านภายในของของเหลวต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านว่า แรงหนืด

โดยทั่วไปหน่วยความหนืดมักนิยมใช้ พอยส์ (poise) หรือนิวตัน/เมตร^2 วินาที โดยที่ 1 พอยส์ (poise) คือแรงเค้นเฉือน 1 dyne/cm^3 กระทำกับของเหลวทำให้เกิด strain rate 1.0 วินาที$^{-1}$ (10 poise = 1 Pa sec) ค่าความหนืดแสดงในตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ค่าความหนืดของวัสดุ (Davis & Reynoids, 1996)

วัสดุ	พอยส์ (Poises)
เนื้อโลก	10^{21}-10^{23}
หินทราย	10^{18}
เกลือหิน	10^{17}
น้ำแข็ง	10^{12}
หินไรโอไลต์	10^{9}
ทาร์	10^{7}
หินบะซอลต์	10^{3}
น้ำเชื่อม*	10^{2}
น้ำผึ้ง*	4
น้ำมะกอก*	0.8
น้ำที่อุณหภูมิ 30° ซ	0.08
อากาศ*	10^{-5}

*ไม่ใช่วัสดุทางธรณีวิทยา

4.7 สมบัติแรงเค้นและความเครียดของแผ่นเปลือกโลก (Rheology of the plates)

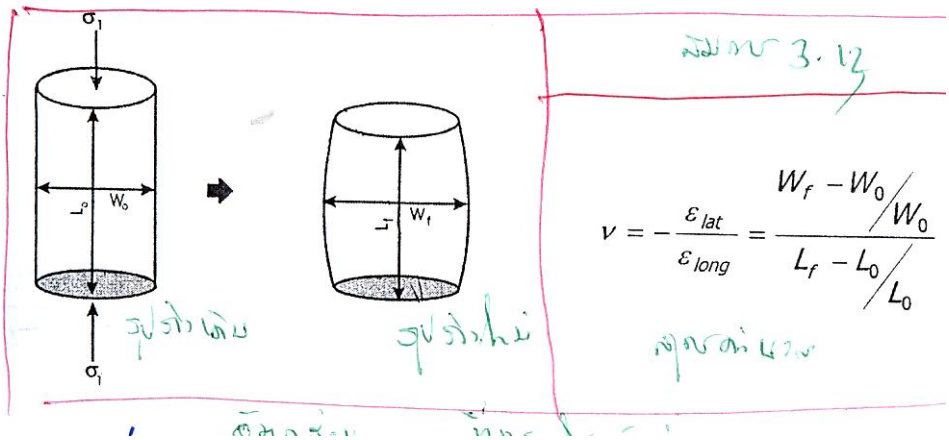
แผ่นเปลือกโลกหรืออีกชื่อเรียกว่า ธรณีภาค (lithosphere หรือ lithospheric plate) หมายรวมถึงชั้นเปลือกโลกและบางส่วนของชั้นเนื้อโลกตอนบน(upper mantle) โดยทั่วไปเปลือกโลกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เปลือกโลกชั้นบน ชั้นกลาง ชั้นล่าง ซึ่งความหนาของแผ่นเปลือกโลกไม่เท่ากัน ถ้าเป็นเปลือกทวีปหนาระหว่าง 80-120 กิโลเมตร แต่ถ้าเป็นเปลือกสมุทรมักมีความหนาอยู่ระหว่าง 40-60 กิโลเมตร สมบัติของแผ่นเปลือกโลกเกี่ยวกับแรงเค้นและความเครียด โดยที่เราพบลักษณะแบบยืดหยุ่นในส่วนบนของเปลือกโลกตอนบน กึ่งยืดหยุ่นและพลาสติกอยู่ระหว่างเปลือก

โลกชั้นกลางและชั้นล่าง และพบลักษณะอ่อนนิ่มในแถบบริเวณใต้เปลือกโลกชั้นล่าง (ดูรูป 4.60) สมบัติแรงเค้นและความเครียดของแผ่นเปลือกโลกแบบอุดมคติมีอยู่ 5 รูปแบบดังนี้

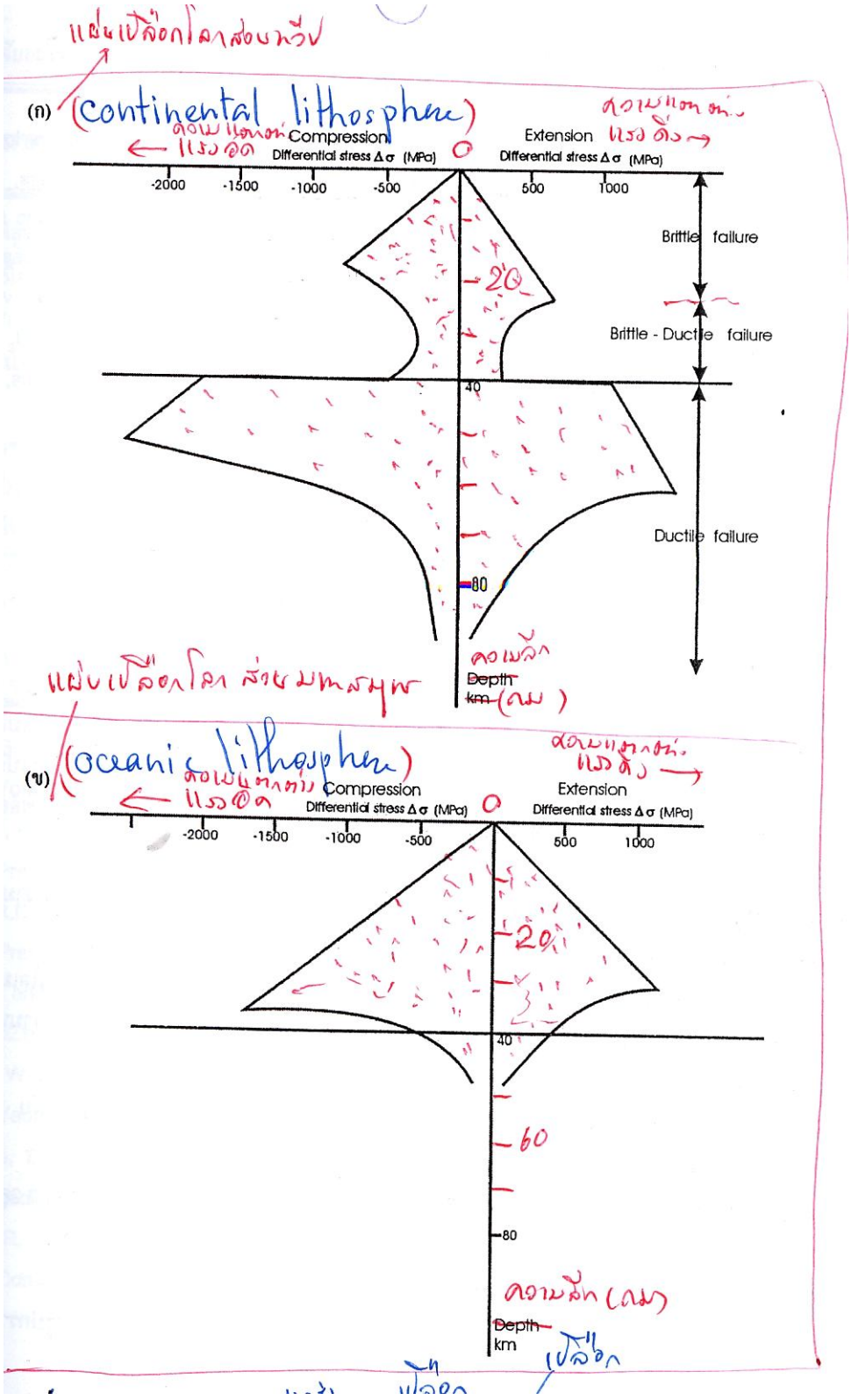
(1) แรงทำให้ยืดหยุ่น (elastic rheology)
(2) แรงทำให้หนืด (viscous (Newtonian) rheology) และ
(3) การผสมผสานระหว่างแรงทั้งสองแบบ (combination of elastic/viscous rheology) โดยที่ออกแรงดึง จนเกิดความเครียดแบบยืดหยุ่น จากนั้นจะเกิดแบบหนืด
(4) แรงเคลื่อน (Kelvin rheology) โดยที่ออกแรงดึงจนเกิดความเครียดที่เป็นแบบการเพิ่มขึ้นแบบโค้งรูป(exponential)
(5) แรงทำให้หนืดแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear viscous rheology) โดยที่ความเครียดที่เกิดเป็นสัดส่วนกับกำลังของแรงเค้น

การที่เราเข้าใจถึงการเปลี่ยนสภาพหิน ลักษณะการเปลี่ยนสภาพภายใต้อุณหภูมิ ความดันที่เพิ่มขึ้นของแผ่นเปลือกโลก ทำให้เราอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่พบเห็นเมื่อโผล่ขึ้นมาสู่ผิวโลก แผ่นเปลือกโลกจะมีการเปลี่ยนลักษณะจากยืดหยุ่นที่สามารถใช้กฎของไบเยอร์ลีมาอธิบาย และเมื่อที่ระดับลึกประมาณ 10-15 กิโลเมตร แผ่นเปลือกโลกจะมีการเปลี่ยนลักษณะในแบบกึ่งยืดหยุ่นและพลาสติก เมื่อลึกมากกว่า 15 กิโลเมตร แผ่นเปลือกโลกแสดงลักษณะแบบพลาสติกและหนืด แต่ลึกกว่านั้นจะเป็นแบบของหนืดเมื่ออยู่ในส่วนของเนื้อโลก

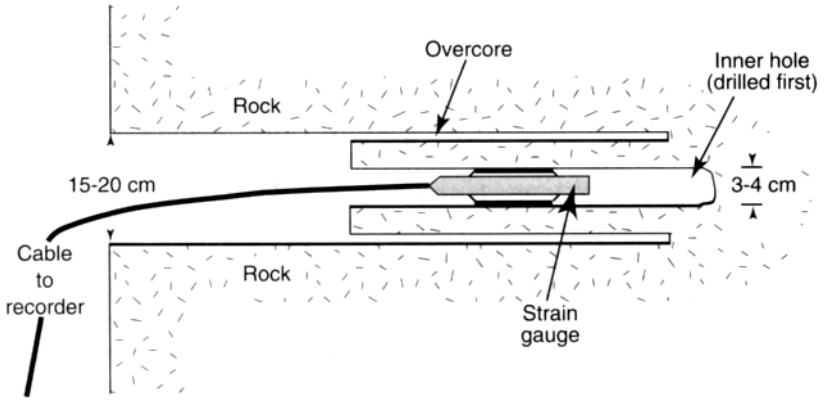
จากรูป 4.60 เราพบว่าแผ่นเปลือกโลกที่เป็นส่วนของทวีปมีค่าความแข็งแกร่งมากขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเปลือกโลกและชั้นเนื้อโลก (mantle) ซึ่งรอยต่อนี้เรียกว่า ***โมโฮโรวิสิก (Mohorovicic)*** หรือเรียกสั้นๆ ว่า ***"โมโฮ"*** ค่าความแข็งแกร่งจึงอยู่ระหว่างช่วงเปลือกตอนกลางและตอนล่างเพราะเปลือกโลกที่แร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบอยู่มาก ทำให้เป็นส่วนที่ไม่แข็งแรงของเปลือกโลก เมื่อถึงชั้นเนื้อโลกตอนบนพบเป็นแร่โอลีวีน โดยที่แร่ควอตซ์เปลี่ยนเฟส (phase) ไปเป็นซิลิเกตของแร่โอลิวีนจึงทำให้มีความแข็งแกร่งขึ้น เมื่อลึกลงไปอีกจนถึงตอนล่างของแผ่นเปลือกโลก ความแข็งแกร่งกลับลดลงเนื่องจากอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มตามความลึก ทำให้แร่โอลิเวียนเปลี่ยนลักษณะเป็นแบบอ่อนนิ่ม เมื่อลึกลงไปจนถึงชั้นธรณีภาคชั้นกลาง (asthenosphere) อนึ่งในการสร้างรูปจำลองแผ่นเปลือกโลก เราอาจพูดรวมๆถึง***การเปลี่ยนลักษณะของแผ่นเปลือกโลกว่าเป็นแบบยืดหยุ่นทั้งหมด ส่วนชั้นธรณีภาคชั้นกลางเป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม***



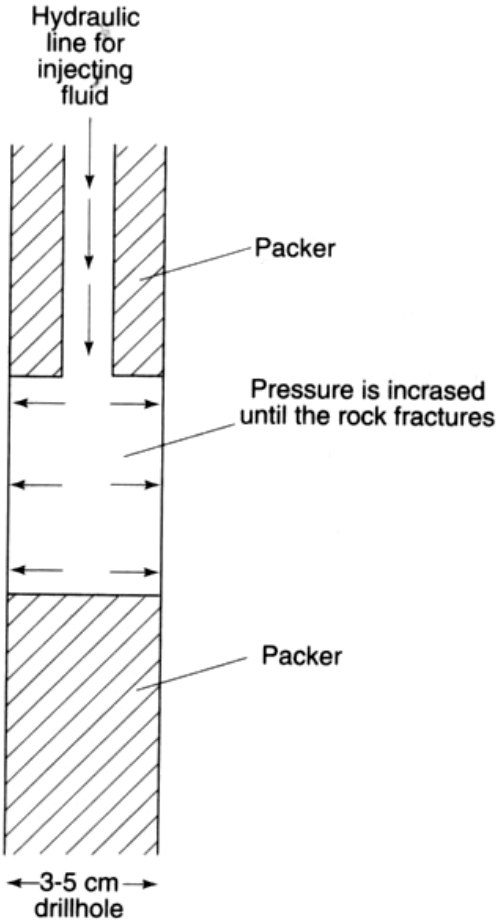
รูป 4.58 อัตราส่วนปัวซอง ที่แสดงให้เห็นว่าแท่งหินทรงกระบอกถูกกดด้วยแรง σ_1 ตามแนวยาว จนทำให้เกิดการขยายตัวหรือป่องออกด้านข้าง (ปรับปรุงจาก เพียงตา สาตรักษ์, 2546)



รูป 4.60 ลักษณะความแข็งแกร่งของแผ่นเปลือกโลกเมื่อได้รับแรงกระทำ (ก) แผ่นเปลือกทวีปที่มีสภาพถูกยืดหรือถูกดึง และ (ข) แผ่นเปลือกสมุทรที่มีสภาพถูกยืดหรือถูกดึง (เพียงตา สาตรักษ์, 2546 และ Richardson, 1996)



รูป 4.61 เทคนิคการวัดและเจาะ (overcoring) หรือโอเวอร์คอริ่งที่ใช้วัดค่าแรงเค้น ณ แหล่ง (in situ stress) โดยตัววัดแรงเค้น (strain gague) ที่หย่อนลงไปในหลุมเจาะ (borehole) และวัดแรงเค้น ณ แหล่งได้โดยตรง โดยเราวัดไปเจาะไปโดยบันทึกขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงจากเจาะหลุมกลมไปเป็นหลุมรี (Hatcher, 1995)

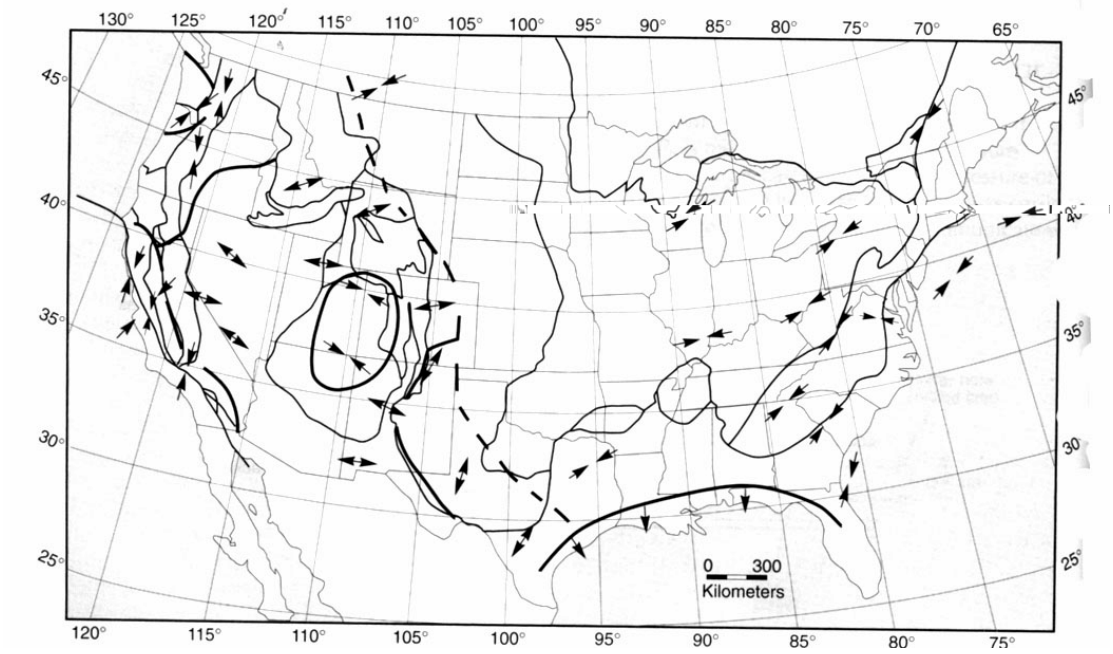


รูป 4.62 วิธีสร้างรอยแตกพลังน้ำโดยการวัดแรงเค้น ณ แหล่ง โดยการสร้างหลุมเจาะให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น โดยอาศัยหลักที่ว่าความดันที่ใช้ทำให้หินแตกเพิ่มมากขึ้นเมื่อหลุมเจาะขยายใหญ่ขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบยกกำลัง (power-law relation) (Kehle, 1964)

ตาราง 4.8 แสดงการแตกร้าวจากพลังน้ำของรอยเลื่อนซานแอนเดรียส

Well	Depth (m)	Distance San Andreas Fault (km)	Fracture Breakdown Pressure (bars)	Opening Pressure (bars)	Pore Pressure (bars)	σ_3	σ_1	σ_2	Tensile Strength (bars)	τ_{max} (bars)	Direction of Maximum Compression
1	167	4	200	69	17	73	133	45	131	30	N 4° W
1	196	4	209	74	20	77	138	53	135	31	N 1° E
2	338	4	109	63	34	74	125	91	46	26	N 43° W
2	561	4	163	130	56	150	264	152	33	57	N 20° W
2	787	4	192	124	78	183	346	213	68	82	N 19° W
3	80	2	144	24	8	23	38	18	120	8	N 20° W
3	185	2	250	73	19	56	73	43	177	6	N 23° W
4	167	4	139	47	17	51	89	45	92	19	N 83° E
4	230	4	164	85	23	83	140	62	79	29	N 14° W

(From Zoback, Tsukahara, and Hickman, *Journal of Geophysical Research*, v. 85, © 1980 by the American Geophysical Union. Used by permission.)



รูป 4.63 อาณาจักรแรงเค้นหลักในทิศทางต่างๆของประเทศสหรัฐอเมริกา ลูกศรเข้าหากันแสดงถึงแรงอัด ส่วนลูกศรออกจากกันแสดงถึงแรงดึง

รูป 3.1 แรง(force) ขนาดเท่ากันที่กระทำกับลูกบาศก์ที่มีขนาดต่างกัน หากลูกบาศก์มีการเปลี่ยนลักษณะ ผลของแรงของลูกบาศก์ขนาดเล็กจะเกิดมากกว่าลูกบาศก์ขนาดใหญ่

รูป 3.2 เวคเตอร์แรงเค้นที่กระทำบนระนาบแนวราบ (ก) กรณีความลึกคงที่ เวคเตอร์ 115 จะมีขนาดเท่ากัน (ข) กรณีความลึกเปลี่ยนไปเนื่องจากพื้นผิวไม่ราบเรียบ เวคเตอร์แรงจะไม่เท่ากัน (ดัดแปลงจาก Hatcher, 1995)

รูป 3.3 แรงเค้นแนวดิ่ง(vertical stress) ที่กระทำต่อระนาบ ABCD ลาดชัน 30° จากแนวนอน บนพื้นที่ 2,184 ตารางเมตร

รูป 3.4 แรงเค้นในสามมิติ โดยมีพิกัด x, y *และ z เมื่อมีแรงเค้นกระทำตรงจุด O และให้รูปลูกบาศก์เป็นแบบจิ๋ว(infinitesimal size)แต่ขยายให้เห็นชัดขึ้นเพื่อให้มีองค์ประกอบของเวคเตอร์ได้ชัดเจน เมื่อมีแรงเค้นเข้ามากระทำ* σ_{xx} *โดยที่ x ตัวแรกบอกถึงแกนที่ตั้งฉากกับทิศทางแรงเค้นส่วน x ตัวหลังบอกระนาบที่ขนานไปกับแนวแรงเค้น*

รูป 3.5 วงรีความเค้นที่ประกอบด้วย σ_1 *เป็นแกนความเค้นหลักค่ามากสุด,* σ_2 *เป็นแกนความเค้นหลักค่าปานกลาง และ* σ_3 *เป็นแกนความเค้นหลักค่าน้อยสุด (ก) วงรีความเค้นในสภาพสองมิติ (ข) วงรีในแบบสามมิติ*

รูป 3.6 การคำนวณหาแรงเค้น ณ จุด P ทรงฐานหินแกรนิตรูปลูกบาศก์ที่มีขนาด 2,000 x 800 x 1,500 เมตร

รูป 3.7 สภาวะที่แสดงถึงแรงเค้นแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักกดทับ(σ_z*=40 MPa) และแรงเค้นแนวนอนเนื่องจากแรงทางกระบวนการแปรสัณฐานทางตะวันออก-ตะวันตก(*σ_x*=20 MPa)*

รูป 3.8 แนวทางการคำนวณความเครียดของหินแกรนิตบนระนาบ ณ จุด P ที่ระดับ 1,500 เมตร (ก) มองทะลุเข้าไปในระนาบที่มีการแตกทำมุม 65 □ กับ σ_z *(ข) รูปลิ่มที่มีระนาบของการแตก (ค) แนวแรงที่กระทำในแกน z และ แกน x แสดงการสมดุลของแรง*

รูป 3.9 ทิศแรง σ_{xz} *ที่กระทำกับระนาบเอียง XZ ด้วยมุม* β *และมุม* α

รูป 3.10 แรงเค้นตั้งฉาก(normal stress, σ_n) และแรงเค้นเฉือน(shear stress,σ_s) ที่คำนวณจากองค์ประกอบของเวคเตอร์ σ ที่กระทำต่อระนาบ xy

รูป 3.11 ตัวอย่างการหาแรงเค้น (ก) บนระนาบเอียง (ข) บนระนาบแรงกดตั้งฉาก(normal stress) (σ_n)และ แรงเค้นเฉือน(shear stress) (σ_s) ที่คำนวณได้จากองค์ประกอบทิศแรง σ จากรูปถ้า σ= 30 MPa,σ_n=σxcos40 =22.98 MPa และ σ_s= σxsin40=19.25 MPa (ค) และ (ง) กรณีพิเศษที่ไม่มี σ_s หรือ σ_s = 0 MPa

รูป 3.12 ลักษณะแรงดันที่เข้าหาจุดกึ่งกลางในแบบรูปวงรีโดยมี σ_z =40 MPa และ σ_x= 20 MPa เส้นที่กำกับด้วยอักษร a ถึง s และอักษณ b' ถึง r' เป็นแนวระนาบในทุกๆ 5 □ เมื่อแรงเค้น=stress (σ), normal stress(σ_n) และ shear stress(σ_s) คำนวณได้ดังแสดงในรูปพบการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบ (แหล่งที่มา: Figure 3.17 โดย Davis and Reynolds, 1996)

รูป 3.13 การสาธิตที่แสดงว่าแรงเค้นเฉือน(shear stress) ไม่เกิดขึ้นในสภาวะของแรงดันน้ำ (ก) เมื่ออัดแรงเค้นความดันน้ำที่เข้ามาสู่แกน x และ z ด้วยขนาด 12 MPa (ข) แรงเค้นที่สมดุลย์ ณ จุด P' ซึ่งทำให้ S_z มีค่า 8.91 MPa และ S_x มีค่า 8.02 MPa (ค) แรงเค้นอันเดียวที่มีองค์ประกอบของ S_x และ S_z จะมีขนาด 12 MPa และตั้งฉากกับระนาบที่แรงกรกะทำ จึงไม่ปรากฏแรงเค้นเฉือน (ดัดแปลงจาก Davis และ Reynolds, 1996)

รูป 3.14 ลักษณะแรงดันที่เข้าหาจุดกึ่งกลางในแบบเป็นวงกลมเมื่อ σ_Z = 12 MPa และ σ_X= 12 MPa ของความดันน้ำ(hydrostatic stress) เส้นที่กำกับด้วย a จนถึง s และ b' ถึง r' เป็นแนวของระนาบทุกๆ 5□ stress (σ), normal stress(σ_n) และ shear stress(σ_s) คำนวณได้ดังแสดงในรูปเปรียบเทียบรูป 3.7 (แหล่งที่มา: Figure 3.22A โดย Davis and Reynolds, 1996)

รูป 3.15 วงรีแรงเค้นในแกนมิติและสามมิติของความดันน้ำ(hydrostatic stress)

รูป 3.16 การหาแรงเค้นด้วยวงกลมมอร์(ก) กำหนดวงกลมมอร์ด้วย σ_1 และ σ_3 บนแกน x สร้างวงกลม (ข) หา σ_N และσ_S ของระนาบที่ต้องการทราบในมุม θ=-30□ และ (ค) หา σ_N และ σ_s ของระนาบที่ต้องการทราบในมุม θ=70 □

รูป 3.17 (ก) ตัวอย่างวงกลมมอร์แสดงการหาแรงเค้นเฉือน(σ_S หรือ ∞) และแรงเค้นตั้งฉาก(σ_N) ของตัวอย่างในรูป 3.8 ในรูปได้แรงเค้นเฉือน = 8 MPa และแรงเค้นตั้งฉาก = 35 MPa

รูป 3.17 (ข) ตัวอย่างวงกลมมอร์แสดงการหาแรงเค้นเฉือน และแรงเค้นตั้งฉาก ของแท่งตัวอย่างหินเมื่อออกแรงกดให้แตก โดยวัดมุม θ วัดเทียบกับ σ_1 ซึ่งกำหนดให้มุมที่วัดทวนเข็มจึงเป็นบวก หรือตามเข็มเป็นลบ เมื่อเป็นบวกจะวัดแกนบวก แต่ถ้าเป็นลบจะวัดแกนลบ

รูป 3.18 การวัดมุมและการกำหนดค่ามุม(ก) เทียบกับ σ_1 (ข) เทียบกับ σ_3 สมการการหาค่าแรงเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน หากพิจารณามุม θ เทียบกับ σ_1 ในแนวดิ่งดังรูป ก ได้เครื่องหมายเป็นลบในระหว่างภาคแรกและภาคที่สอง หากพิจารณามุม θ เทียบกับแกนนอน(ข) และได้เครื่องหมายเป็นบวกในระหว่างภาคแรกและภาคที่สอง และพล็อตมุมจากต่างกัน

รูป 3.19 องค์ประกอบวงกลมมอร์ที่สำคัญๆ ได้แก่ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นความแตกต่างของแรงเค้น ดังนั้นถ้าค่าความแตกต่างมากจะเกิดการบิดเบี้ยวได้มาก จุดศูนย์ของวงกลมเป็นค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของแรงเค้นในน้ำ (hydrostatic stress) และค่าของรัศมีของวงกลมแทนแรงเค้นอื่นที่ไม่ใช่จากน้ำ(nonhydrostatic stress) ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนนั่นเอง

รูป 3.20 รูปแบบแรงเค้นที่อธิบายได้จากวงกลมมอร์(ก) ภายใต้แรงดันน้ำ Hydrostatic stress) และ (ข) ภายใต้แรงแกนเดี่ยว(Uniaxial stress)(ค) ภายใต้ระนาบแกน(Axial stress) และ (ง) ภายใต้แรง 3 แกน(Triaxial stress)

รูป 3.21 การวิบัติของหินจากการทดสอบความแข็งแกร่ง ภาพจากซ้ายไปขวาเป็นภาพของการวิบัติแบบเป็นระนาบของหินชนวน ภาพกลางเป็นภาพการวิบัติแบบรอยเลื่อนตัดกัน(conjugate faults) ในหินทราย และภาพการวิบัติแบบพลาสติกในหินปูน (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 3.22 ชนิดการทดสอบความแข็งแกร่งของหิน (ก) การทดสอบแบบกดอัดตามแนวแกนเดี่ยว (axial compression) (ข) การทดสอบแบบยืดตามแนวแกนเดี่ยว(axial extenstion) (ค) การทดสอบแบบดึง(tensile test)

รูป 3.23 (ก) ความสัมพันธ์ของแรงเค้นและความเครียดตามกฎของฮุค ค่าความลาดชันของกราฟเป็นค่าโมดูลัสของยัง (ข) ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัตถุที่ถูกความเค้นกระทำเกินขีดจำกัดของคุณสมบัติยืดหยุ่นและเกิดความเครียดแบบพลาสติกแบบสมบูรณ์(perfect plastic) (ค) และ (ง) ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัตถุที่ถูกความเค้นกระทำเกินขีดจำกัดของคุณสมบัติยืดหยุ่นและเกิดความเครียดแบบพลาสติกไม่สมบูรณ์ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ

รูป 3.24 ตัวอย่างของหินปูนที่ถูกกดแบบการทดสอบแบบกดอัดตามแนวแกนเดี่ยว(Davis and Reynolds, 1996)

รูป 3.25 (ก) กราฟจำลองความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบที่ความดันรอบข้างปริมาณไม่เท่ากัน (ข) กราฟจำลองความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในขณะทดสอบไม่เท่ากัน (ค) กราฟความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบด้วยการยอมให้มีความดันน้ำเกิดขึ้นที่แท่งตัวอย่างในปริมาณที่ไม่เท่ากัน (ง) กราฟความเค้นและความเครียดของหิน เมื่อทดสอบที่กำหนดปริมาณอัตราการเกิดความเครียดปริมาณไม่เท่ากัน

รูป 3.26 กราฟแรงเครียดและเวลาของการคืบคลานสามช่วง ได้แก่ (1) ช่วงปฐมภูมิ(primary creep) (2) ช่วงทุติยภูมิ(secondary (plastic) creep) และ (3) ช่วงไตรภูมิ(tertiary(viscous)creep)

รูป 3.27 รูปจำลองทางอุดมคติของคุณสมบัติของหิน และกราฟของความเค้นและความเครียดหรือความเครียดและเวลาเมื่อมีการเปลี่ยนลักษณะ(ภาพปรับปรุงต่อจาก Randy M. Rechardson, Lecture note in Geodynamics, University of Arizona)

รูป 3.28 แสดงนิยามของปัวซองเรโช แท่งหินทรงกระบอกถูกกดด้วย σ_1 ตามแนวยาวจนทำให้เกิดการขยายออกด้านข้าง

รูป 3.29 ลักษณะการไหลของลาวาก่อนการเย็นตัว และหลังการเย็นตัว พบลักษณะของช่องว่างจากผลของการเย็นตัว

รูป 3.30 ลักษณะความแข็งแรงของแผ่นโลก (ก) แผ่นโลกของทวีปที่มีสภาพแบบถูกยืดหรือถูกดึง (ข) แผ่นโลกของมหาสมุทรที่มีสภาพแบบถูกยืดหรือถูกดึง (ภาพปรับปรุงจาก Randy M. Richardson, 1996), Lecture note in Geodynamics, University of Arizona)