

## รอยแยกและรอยแตกเนื่อง

- 5.1 ธรรมชาติของรอยแยกและรอยแตกเนื่อง
- 5.2 การทดสอบแรงเค้นดึง
- 5.3 การทดสอบแรงอัด
- 5.4 กฎวิบัติคูลอมบ์(Coulomb Law of Failure)
- 5.5 รอยแตกขนาดเล็กน้อย
- 5.6 แบบจำลองรอยแตกหรือรอยแยกธรรมชาติ
- 5.7 การแปลความหมายรอยแยก

## บทที่ 5

### รอยแยกและรอยแตกเฉือน (Joints and Shear Fractures)

#### 5.1 ธรรมชาติของรอยแยกและรอยแตกเฉือน

##### 5.1.1 ลักษณะทั่วไป

เชื่อไหมว่าน้อยครั้งนักที่พอเราเห็นหินโผล่ แต่ไม่พบรอยแตกในหินเลย นอกจากบางครั้งที่หินผุพังและเปลี่ยนแปลงอย่างมากจนเกือบกลายเป็นดินหมด แต่ส่วนใหญ่แล้วเรามักพบรอยแตกปรากฏให้เห็นเสมอในหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหินนั้นคงถูกแรงมากระทำจนเกิดรอยแตก ซึ่งหมายความว่าหินเกิดการเปลี่ยนลักษณะ(deformation)ไปนั่นเอง ในที่นี้เราขอทำความเข้าใจคำสามคำ คือ รอยแยก(joint) รอยเลื่อน(fault) และรอยแตก(fracture) เสียก่อน โดยที่รอยแตกเป็นลักษณะปรากฏในเนื้อหินซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ รอยแตกที่มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบรอยแตกที่มีการเคลื่อนที่ไปตามระนาบ ที่เราเรียกว่า “รอยแยก(joint)” กับรอยแตกที่มีการเคลื่อนที่ไปตามระนาบรอยแตก ที่เราเรียกว่า “รอยเลื่อน(fault)” หรือ “รอยแตกเฉือน(shear fracture)” โดยทั่วไปถ้าเรามองเห็นลักษณะการเลื่อนหรือระยะเลื่อน(offset) ด้วยตาเปล่า เรามักเรียกว่า “รอยเลื่อน(fault)” แต่ถ้ามองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เราเรียกว่า “รอยแตกเฉือน(shear fracture หรือ shear joint)”

ดังนั้นคำว่า“รอยแตก”จึงเป็นคำกว้างๆ และรวมๆ ด้วยเหตุนี้ถ้าเราไม่สามารถบ่งบอกเจาะจงลงไปได้ว่าเป็นรอยเลื่อน รอยแยก หรือรอยแตกเฉือน เรามักเรียกรวมๆ ว่า รอยแตก(fracture) ซึ่งคำว่า fracture มาจากภาษาละตินว่า fracture ซึ่งหมายถึง “broken” แตกหักนั่นเอง ถ้ารอยแยกมีแร่เข้ามาแทรกไปในช่องว่างเรามักเรียกว่า สายแร่(vein) เช่น สายแร่ควอตซ์(quartz vein) สายแร่แคลไซต์(calcite vein) แต่ถ้ามีขนาดเล็กเราเรียกสายแร่เล็ก (Veinlet) เป็นต้น แต่ถ้ามีขนาดเล็กเราเรียก สายแร่เล็ก (veinlet) รูป 5.1 แสดงรอยแยกและรอยแตกเฉือนที่พบในโครงสร้างหินคดโค้ง และรอยแตกเฉือนที่พบร่วมกับรอยเลื่อน ส่วนรูป 5.2 แสดงรอยแยกที่เกิดร่วมกับรอยโค้งจากการกำหนดจุดลงในโครงตาข่าย(stereonet) ทำให้เราทราบลักษณะทิศทางการวางตัวของรอยแยกและรอยแตกเฉือนได้ อย่างไรก็ตามนิยามของรอยแตกเฉือนและรอยเลื่อนมักไม่ตายตัว Twiss และ Moores(1992) ได้ให้นิยามของรอยเลื่อนไว้อย่างน่าสนใจว่า ถ้ารอยแตกที่มีการเลื่อนมากกว่าหนึ่งเมตรขึ้นไปให้เรียกว่า “รอยเลื่อน” แต่ถ้าสั้นกว่าหนึ่งเมตรให้เรียกว่า “รอยแตกเฉือน”

หินทุกชนิดที่โผล่ให้เราเห็นบนผิวโลกมักปรากฏรอยแตกเสมอ ด้วยเหตุนี้เราจึงมักพูดเสมอว่าไม่มีหินในบริเวณใดเลยที่เมื่อโผล่สู่ผิวดินแล้วไม่ปรากฏรอยแยก หินโผล่ทุกประเภทจึงมักมีรอยแยกให้เห็นเสมอแต่จะมากขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของหินนั้น รอยแยกมีความสำคัญ

มากต่อการสำรวจหาทรัพยากรธรณีไม่ว่าจะเป็นแหล่งแร่ แหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำมัน และงานสำรวจด้านวิศวกรรมฐานราก(foundation engineering) ตลอดจนการสำรวจการไหลของน้ำบาดาล (ground water circulation) งานสร้างอุโมงค์ การทำเหมือง หรือธรณีวิทยาแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามเรามักพบอุปสรรคในการศึกษารอยแยกในสนามอยู่เสมอ อาทิเช่น รอยแยกส่วนใหญ่มักพบว่ามี การเกิดซ้ำใหม่(reactivate) ทำให้เราบ่งบอกอายุรอยแตกได้ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า รอยแยกอาจเกิดได้หลายกระบวนการและส่วนใหญ่มักไม่แสดงหลักฐานการเกิดที่ชัดเจน ทำให้หลายครั้งนักธรณีวิทยาวัดความเครียดของหินได้ยาก-----ผลทำให้ตัวเองเครียดตามมาด้วย

### 5.1.2 รูปแบบการเกิดรอยแตก(Mode of fractures)

จากคำบรรยายข้างต้นเราอาจจัดแบ่งรอยแตกตามลักษณะการเกิด(mode of occurrence) ได้ 3 แบบ คือ

- (1) รอยแตกปริ (หรือรอยแตกเปิด) (opening joints) จัดเป็นรอยแตกที่แยกจากกันด้วยแรงดึง และจัดว่าเป็นรอยแตก “แบบ 1” (mode I)
- (2) รอยแตกเฉือน (sliding shear fractures) ถือว่าเป็นรอยแตกที่แสดงว่ามีแรงมากกระทำขนานหรือเกือบขนานกับระนาบรอยแตก เทียบได้กับการเคลื่อนตัวตรงขอบ(edge dislocation) และจัดเป็นรอยแตก “แบบ 2” (mode II)
- (3) รอยแตกฉีก (tearing shear fractures) เป็นรอยแตกที่แสดงว่ามีแรงมากกระทำจนทำให้หินเกิดการฉีกขาดออกจนบิดเหมือนเราฉีกกระดาษจนเกือบขาด เทียบได้กับการเคลื่อนตัวแบบหมุน(screw dislocation) และจัดเป็นรอยแตก “แบบ 3” (mode III)

รูป 5.3 แสดงรอยแตกทั้งสามชนิด และบางครั้งเราอาจพบเห็นแบบใดแบบหนึ่งเกิดร่วมกับอีกแบบได้ (รูป 5.3 b) ดังได้กล่าวแล้ว หินโผล่ส่วนใหญ่มักให้รอยแตก ซึ่งถ้าเป็นรอยแตกที่เกิดขนานกันไปในทิศใดทิศหนึ่ง เราเรียกชุดรอยแตก หรือชุดรอยแยก(joint set) ซึ่งในหินโผล่หนึ่งๆ อาจมีรอยแตกหลายชุด หรือหลายชุดนั่นเอง ซึ่งเราเรียกว่าระบบรอยแตก(joint system)

### 5.1.3 ความเป็นระบบของรอยแยกและรอยแตกเฉือน

**รอยแยก(joint)** หมายถึง รอยแตกที่เกิดเป็นระนาบ(planar fractures) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กตั้งแต่ระดับเซนติเมตรไปจนถึงขนาดใหญ่ยาวเป็นหลายกิโลเมตร หรือรอยแยก หมายถึง รอยแตกที่มีการเคลื่อนแบบแยกออกจากกัน โดยการดึงออก(pull-apart)ที่มีทิศทางตั้งฉาก(หรือเกือบตั้งฉาก)กับระนาบรอยแตก ดังนั้นจึงจัดเป็นการแตกแบบ 1 คือ แบบเปิด และหมายถึงรอยแตกที่เป็นผลจากการแยกหรือแตกเมื่อหินอยู่ในสภาพแข็งแบบเปราะซึ่งเป็นผลจากแรงเค้นดึงที่มากกว่าความแข็งแรงของหินนั่นเอง

โดยทั่วไปรูปทรงเรขาคณิตหรือขนาดความกว้างยาวของรอยแยกมักขึ้นกับความหนาและความแข็งแรงของหินเอง ถ้าหินนั้นมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ ทำให้ไม่คงทนต่อความแข็งแรง เราจึงมักพบรอยแยกขนาดเล็กๆ ปรากฏมีผลึกงอนหิน แต่ถ้าหินมีชั้นหนาและมีผลึกแร่ที่ยึดเกาะกันแน่น หรือหินมีความแข็งแรงดี เราจึงมักพบรอยแยกปรากฏเป็นแนวยาว โดยปกติเราเรียกรอยแยกมีทิศทางการวางตัวอย่างมีระบบและมีระยะห่างเท่าๆ กันหรือใกล้เคียงกันว่า “รอยแยกเป็นระบบ” (*systematic joint*) แต่ถ้าหากรอยแยกไม่เป็นระบบ เรามักเรียกว่า “รอยแยกไม่เป็นระบบ” (*non-systematic joint*) ดูรายละเอียดในรูป 5.4 ส่วนรูป 5.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรอยแยกกับความหนาชั้นหิน จากการศึกษาพบว่าในหินชั้นบางๆ เรามักพบรอยแตกที่สั้นจะมี แต่ในชั้นหินที่หนา เราจะได้รอยแตกทั้งยาวและสั้น สรุปคือรอยแตกไม่ขึ้นตรงกับความหนาของชั้นหินนั่นเอง

รอยแตกที่มีการเคลื่อนที่มักเกิดเป็นรอยเลื่อนเล็กๆ วางตัวถี่ๆ ขนานกันหรือเกือบขนานกัน และมีแนวรอยเลื่อนขนานไปกับระนาบรอยแตก จึงมีได้ทั้งที่เป็นรอยแตกเลื่อน(แบบ 2) และรอยแตกฉีก(แบบ 3) แต่เหตุที่เราไม่เรียกว่ารอยเลื่อนเพราะเราไม่พบระยะเลื่อน(offset)ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่านั่นเอง

หลายครั้งเราพบว่าบางส่วนของรอยแตกแสดงลักษณะการถูกครูดด้วยแรงเฉือน แต่ก็ยังมีบางส่วนไม่ปรากฏการครูด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแตกใหม่อีกครั้ง(reactivation)ซ้ำรอยแตกเดิมและมีแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงมักพบว่ามีรอยเลื่อนไปตามแนวระนาบหลังจากเกิดรอยแตกมาก่อนหน้านั้นแล้ว

โดยทั่วไปเรามักพบรอยแยกและรอยแตกเลื่อนปรากฏเป็นหมวดหมู่(รูป 5.4) ดังนั้นในการพรรณนาลักษณะรอยแยกและรอยแตกเลื่อนจึงนิยมใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเข้าช่วย โดยแบ่งออกเป็นมณฑลโครงสร้าง(structural domain) และในแต่ละมณฑลจึงควรมีความเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง อย่างไรก็ตามมณฑลโครงสร้างอาจแบ่งย่อยลงอีก ที่เรียกรูปแบบทางโครงสร้างย่อย(structural subdomain)โดยอาศัยความแตกต่างของ (1)ชนิดหิน (2)ลักษณะภูมิประเทศ (3)ลำดับหน่วยหิน และ (4)ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยา ซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับขอบเขต การสำรวจ และการนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น ลักษณะรอยแตกที่เกิดจากการคดโค้งอาจแบ่งเป็นมณฑลตามแขนรอยโค้ง(fold limb domain) หรือตามลักษณะแนวพับ(hinge lines)ของชั้นหินโค้ง

สำหรับการวิเคราะห์ลำดับอายุของรอยแยก เรามักใช้ความสัมพันธ์แบบชนปลาย(butting relationship) โดยให้ถือที่ปลายของรอยแยกที่มีอายุอ่อนกว่ามักชนหรือพุดง่าๆ หัวที่หรือแขนตัวย่อมเกิดมาก่อน หัวที่หรือหางที่(T) กับรอยแยกที่มีอายุแก่กว่า(หรือหยุดทำมุมเกือบตั้งฉาก) (รูป 5.7) โดยที่รอยแยกอายุแก่กว่ามักทำให้รอยแยกอายุอ่อนหยุดการแตกนั่นเอง เนื่องจากเนื้อหินตรงรอยแยกเดิมเกิดช่องว่างที่เป็นรอยแยกเดิม ทำให้รอยแตกใหม่แตกข้ามรอยแยกเดิมไม่ได้ เนื้อหินตรงบริเวณนั้นจึงมีลักษณะแบบมีผิวสัมผัสกับส่วนที่เป็นอากาศ(free surface) ทำให้แรงเค้นเฉือน

หายหมดตรงช่องรอยแยกนั้น ในกรณีที่เรามองไม่เห็นทิศทางรอยแยกหรือรอยแตกเฉือนได้ชัดเจน เรามักเรียกว่าเขตรอยแตก(shatter) หรือเขตการแตกหัก(broken zone) ดังนั้นการมีรอยแยกและรอยแตกเฉือนจึงนับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากมาย เช่น ก่อให้เกิดแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดินหรือน้ำมันและแก๊สธรรมชาติได้ โดยของเหลวสะสมตัวตามรอยแตกหรือโพรงในหิน โดยทั่วไปผิวรอยแตกอาจเป็นแผ่นเรียบหรือแผ่นโค้งก็ได้ การหาหลักฐานว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นหรือไม่ จึงควรพิจารณาว่า

- (1) มีแนวการครูดที่เกิดจากแรงเฉือนหรือไม่
- (2) มีแนวระนาบที่ตัดกับรอยแตกในหินโพล์หรือไม่ โดยดูว่ามีระยะเลื่อน(offset) หรือไม่
- (3) มีลักษณะโครงสร้างแบบขนนก(plumose structure)ในหินตะกอนหรือไม่(ดังรูป 5.8) หรือ
- (4) มีโครงสร้างรูปทรงเหลี่ยม(rectangular structure) หรือโครงสร้างวงรี(elliptical structure) ตามผิวของหินอัคนีหรือไม่

รอยแยกมักตั้งฉากกับแกนแรงเค้นค่าน้อยที่สุด(minimum stress axis) แต่ถ้าแรงเค้นเกิดการเปลี่ยนทิศทาง รอยแยกจะเปลี่ยนทิศไปด้วยเพื่อให้หินกลับคืนสู่สมดุล ซึ่งถ้าการเปลี่ยนทิศเกิดจากการเอนหรือการเอนเอียง(tilt)หรือการบิด(twist)ตัวของหิน นั้นแสดงว่าหินเกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบหมุน โดยทั่วไปมักใช้แกนการเอนเอียงแสดงการเปลี่ยนทิศ ซึ่งอยู่ในระนาบรอยแยกนั้นและตั้งฉากกับทิศที่รอยแยกเคลื่อนออกไป อย่างไรก็ตามการเอนของรอยแยกมักแสดงด้วยซี่โครง(rib) ส่วนแกนการบิดที่มักอยู่ในระนาบรอยแยกและขนานกับทิศที่รอยแยกเคลื่อนออกไป จึงแสดงการเปลี่ยนทิศของรอยแยกให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่ขาดตอนและมักแสดงด้วยเส้นขนนก(hackle) อันเป็นผลจากการบิดในระหว่างเกิดรอยแยก (รูป 5.8ก)

#### 5.1.4 รอยแตกรูปเสาและรอยแยกเปลือกหัวหอม

รอยแตกรูปเสา(Columnar joint)ถือเป็นโครงสร้างปฐมภูมิในหินภูเขาไฟซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวและหดตัวของหินหนืดเมื่อแทรกดันหรือประทุขึ้นมาสู่ผิวโลก รอยแตกรูปเสาจึงเกิดในลักษณะคล้ายโครงสร้างขนนก จากรูป 8.21 จะเห็นว่ารอยแตกรูปเสาประกอบด้วยระนาบรอยแยกหลายระนาบไม่ต่อเนื่องกัน(discrete joint faces) และจากผิวล่างสุดเคลื่อนขึ้นสู่ผิวบนสุดแต่ไม่พบจุดแบ่งตรงกึ่งกลางพอดีของแท่งรูปเสาเพราะผิวบนเกิดเร็วกว่าผิวล่าง รูป 8-22 แสดงวิธีการเกิดรอยแตกจนได้ลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม

ส่วนรอยแยกเปลือกหัวหอม(sheet or exfoliation joints)มักพบในหินแกรนิตและหินไนส์เป็นส่วนใหญ่ โดยแสดงลักษณะแบบแผ่นโค้งขนานไปตามรูปผิวหน้าของหิน หรือตามลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของแผ่นจะหนามากขึ้นเมื่อหินปรากฏถึกลงไปจากผิวดินเรื่อยๆ และมักสิ้นสุด ณ ระดับที่ความลึกประมาณ 40 เมตรจากผิวดิน ปัจจุบันนักธรณีวิทยาหลายคน เช่น

Allmendinger (1999) เชื่อว่าการแตกเกิดจากการสูญเสียน้ำหนักหินที่กดทับซึ่งต่อมาหินเหล่านั้นผู้กร่อนออกไป

### 5.1.5 การสิ้นสุดของรอยแตก

จากการศึกษาระนาบรอยแยกหรือรอยแตกในหินทรายแป้งบริเวณที่ราบสูงแอพพาလာเชียน (Appalachian Plateau) โดย Helgeson และ Aydin (1991) ทำให้เราทราบว่าชั้นหินแต่ละชั้นมักแสดงระนาบรอยแตกที่ไม่ต่อเนื่องกัน โดยแต่ละระนาบมีการแพร่กระจายออกไปสู่ผิวบนและผิวล่างของชั้นหิน และในแต่ละระนาบแสดงลักษณะรอยแตกรูปขนนก โดยจุดเริ่มต้นของรอยแยกมักปรากฏจากผิวบนเสมอ

ในบทนี้เราแบ่งลักษณะรอยแตกที่ตัดกันออกเป็น 3 แบบ ตามแนวคิดของ Pollard และ Aydin (1988) โดยพิจารณาจากจุดสิ้นสุดรอยแตก ได้แก่ รอยแตกที่ตัดกันเป็นรูปตัววาย (Y-intersections), รอยแตกที่ตัดกันเป็นรูปตัวเอ็กซ์ (X-intersections) และรอยแตกที่ตัดกันในรูปตัวที (T-intersections) (ดูรูป 5.11)

รอยแยกหรือรอยแตกอาจสิ้นสุดได้ (รูป 5.12) ซึ่งอาจสัมพันธ์กับเวลาที่เกิด ทำให้เราได้ลักษณะรูปแบบรอยแตกแตกต่างกัน และแสดงถึงแรงเค้นที่กระทำให้เกิดรอยแยกนั้นๆ รูปแบบการสิ้นสุดของรอยแยกที่ง่ายที่สุดคือ เมื่อพิจารณาจากจุดปลายโค้งงอหรือรอยแยกสองตัวเกิดในทิศทางเคลื่อนที่แบบเข้าหากัน ทำให้เราคิดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงเค้นดึง หรือรอยแยกแต่ละตัวอาจเอียงโค้งงอเข้าห้ารอยแตกหนึ่ง เมื่อจุดปลายทั้งสองเคลื่อนเข้าหากันและซ้อนทับกัน จนเกิดลักษณะแบบขอเกี่ยวกัน (hook-shaped) หรือเมื่อหินมีการบิดตัว อาจทำให้รอยแยกหยุดเกิดเป็นรอยแยกเหลื่อมขนาน (en echelon joint) ได้

อาจสรุปได้ว่ารอยแยกที่มีจุดสิ้นสุดเป็นรูปตัวที (T) มักมีความแข็งแรงน้อยกว่ารอยแยกที่ถูกทำให้ขาดออกจากผิวของรอยแตกเดิม และที่มีรอยแยกใหม่ตัดเข้ามาโดยแสดงลักษณะการไหลแบบสัมผัสกับอากาศ ทำให้ค่าแรงเฉือนเท่ากับศูนย์ (นั่นคือไม่มีแรงเฉือน) จึงได้เป็นแรงเค้นขนานและตั้งฉากกับผิวของรอยแยก ทำให้รอยแยกใหม่วางตัวในแนวตั้งฉากกับรอยแตกเดิมได้

### 5.1.6 รอยแยกและรอยแตกเฉือนในห้องปฏิบัติการ

โดยปกติเราสร้างรอยแยกและรอยแตกเฉือนในห้องปฏิบัติการได้ และเราสามารถวัดความแข็งแรงในหินตลอดจนวัดทิศทางแรงเค้นและวัดปริมาณแรงเค้นได้ (รูป 5.13)

การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพวงกลมเมอร์ ทำให้เราสามารถหาแรงเค้นเฉือนและแรงเค้นฉากบนระนาบรอยแตกได้ (รูป 5.14) และเมื่อทำการทดสอบการวิบัติ (failure) ของหินหลายๆ ครั้ง เราสามารถหากรอบการวิบัติ (envelope of failure) ของหินได้

## 5.2 การทดสอบแรงเค้นดึง

ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้าง เราสามารถตรวจสอบผลการทดสอบความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงได้(รูป 5.14) ที่เรียกโดยทั่วไปว่าการทดสอบแรงเค้นดึง(tensile strength test)ซึ่งพบว่าหินมีค่าของความแข็งแรงต่อแรงเค้นดึง( $T_0$ )น้อยกว่าแรงเค้นอัด โดยปกติหินทั่วไปมีความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงประมาณ 5 MPa ถึง 20 MPa ซึ่งเรามักให้ความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงมีค่าเป็นลบ และความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นอัดมีค่าเป็นบวก หินที่แตกด้วยแรงเค้นดึงจึงมักเกิดการวิบัติจนได้รอยแตกแบบปริซึ่งรอยแตกนี้จะเกิดขึ้นกับแรง  $\sigma_1$  และตั้งฉากกับแรง  $\sigma_3$  นั่นคือเราจะได้แรงเค้น  $\sigma_3$  เท่ากับ แรงเค้นดึง  $T_0$

ในกรณีที่ไม่มีมีความดันรอบข้าง(confining pressure) เราจะสร้างแผนภาพมอร์ได้โดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับ  $T_0$  (รูป 5.15ก) โดยเส้นตรงนี้แสดงค่าแรงเค้นมากที่สุด ก่อนที่หินจะแตกด้วยแรงเค้นดึง เนื่องจากเป็นแรงเค้นดึงจึงมีค่าติดลบ

ในกรณีที่หินได้รับความดันรอบข้างด้วย ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสามแกน(triaxial test) เรามักให้หินตัวอย่างอยู่ในสภาพที่มีแรงอัด ต่อจากนั้นจึงให้แรงดึง โดยค่อยๆ เพิ่มแรงดันรอบข้างจุดที่แสดงค่าความดันรอบตัวของของเหลว(fluid pressure)อยู่ในแกน  $\sigma_n$  (รูป 5.15ข) เมื่อเราเพิ่มค่าแรงเค้นดึงด้วยแรง  $\sigma_3$  ทำให้แรง  $\sigma_3$  เคลื่อนไปทางซ้ายของแกน  $\sigma_n$  ดังนั้นถ้าเราให้แรงเค้นต่างกันมาก (differential stress หรือ  $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ขึ้นเรื่อยๆ เราก็จะได้วงกลมใหญ่ขึ้น แต่วงกลมทุกวงต้องผ่าน  $\sigma_1$  จนกระทั่งหินแตก ซึ่งเราจะได้  $\sigma_1 = T_0$

ดังนั้นถ้าเราทดสอบความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึง (tensile strength) และแรงเค้นอัด(compressive strength tests) ในหินทรายที่มีค่าของ  $\sigma_1$  อยู่ระหว่าง  $3T_0$  ถึง  $5T_0$  จะได้ผลการวิบัติเป็นไปตามกรอบโค้งวิบัติพาราโบลา (parabolic failure envelope) (รูป 5.16) ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบความแข็งแรงของหินไม่ว่าจะเป็นต่อแรงเค้นดึงหรือแรงเค้นอัด ถ้าหากเราพบว่าหินที่มีรอยแตก หากมีค่าความแตกต่างของแรงเค้นสัมผัสกับกรอบแนวโค้งวิบัติพาราโบลา จุดสัมผัสที่พอดีก็คือ “จุดวิกฤต” ที่หินเกิดการวิบัตินั่นเอง ค่าตรงจุดสัมผัสจึงบอกถึงค่าแรงเค้นเฉือนและค่าแรงเค้นตั้งฉากของระนาบหินที่จะแตก (รูป 5.16ก)

โดยทั่วไปถ้าแรง  $\sigma_1$  น้อยกว่า  $3T_0$  หินมักจะแตก(หรือวิบัติ)แบบเปิด แต่ถ้าแรง  $\sigma_1$  อยู่ระหว่าง  $3T_0$  กับ  $5T_0$  หินมักจะแตกแบบเปิดหรือแบบเฉือน ซึ่งทำให้เราพบรอยครูดและรอยแตกเฉือนที่ไม่ขนานกับแรง  $\sigma_1$  ได้โดยทำมุมกับแนวแรง  $\sigma_1$  ดังแสดงใน(รูป 5.16ข) เราสามารถเขียนกรอบแนวโค้งวิบัติพาราโบลานี้ในรูปสมการสองมิติได้ ซึ่งมักเรียกว่า “กฎวิบัติกริฟฟิธส์ (Griffith's law of failure)” ดังแสดงในสมการ 5.1

$$\sigma_c = \sqrt{4T_0\sigma_n + 4T_0^2} / \dots\dots\dots (5.1)$$

(โดยที่  $\sigma_c$  = แรงเค้นวิกฤตเพื่อให้เกิด,  $T_0$  = แรงเค้นดิ่ง และ  $\sigma_u$  = แรงเค้นตั้งฉาก)

ในกรณีที่เป็นสมการสองมิติ เรามักกำหนดให้  $\sigma_2 = \sigma_3$  แต่ในความเป็นจริงแล้วแรง  $\sigma_1 >$  แรง  $\sigma_2 >$  แรง  $\sigma_3$  ดังนั้นค่า  $\sigma_2$  จึงมีผลต่อการวิบัติด้วย สมการวิบัติสามมิติได้แสดงในสมการ 5.2

$$\sigma_{oct} = \sqrt{J_3 T_0 P} \dots\dots\dots(5.2)$$

(โดยที่  $\sigma_{oct}$  = แรงเค้นเฉือนสำหรับการวิบัติสามมิติ และ  $P$  = แรงเค้นอัดรอบข้าง (confining pressure)

โดยที่  $P$  เป็นค่าเฉลี่ยของแรงเค้นหรือ  $P = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  .....(5.3)

ทำให้สมการใหม่คือสมการ 5.4  $\sigma_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$  .....(5.4)

โดยปกติเราเรียกสมการในแบบสามมิติว่า “กฎวิบัติกริฟฟิธ-เมอร์เรล”(Griffith-Murrell failure criteria) ซึ่งเป็นการเร่งให้ช่องว่างในรอยแตกขนาดเล็กเปิดกว้างขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่หินอยู่ภายใต้แรงเค้นอัดน้อยๆ รอบข้าง แต่ถ้าหินมีแรงเค้นอัดรอบข้างสูงมากๆ ช่องว่างในรอยแตกขนาดเล็กๆ นั้นอาจถูกปิด ซึ่งทำให้ค่าการวิบัติเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ได้

อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณหาความลึกมากที่สุด (maximum depth) ที่หินจะเกิดรอยแตกได้ผิวดินได้ จากผลการทดลองโดยที่เราพบรอยแตกหรือรอยแตก หรือ  $\sigma_1$  มีค่าไม่เกิน  $3T_0$  และเมื่อเรากำหนดให้  $\sigma_1$  อยู่ในแนวตั้ง เราสามารถคำนวณหาความลึกมากที่สุดได้จากสมการ 5.5

$$\sigma_1 = \rho gh \dots\dots\dots(5.5)$$

ดังนั้นจะได้สมการ 5.6 ซึ่งคือ

$$h = \left| \frac{3T_0}{\rho g} \right| \dots\dots\dots(5.6)$$

จากสมการ 5.6 นี้ถ้าเรากำหนดให้ ค่า  $T_0 = 40$  MPa และความหนาแน่นของหิน = 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (หรือ ถ.พ. หิน = 2.65) เราสามารถคำนวณหาความลึกมากที่สุดที่หินจะเกิดรอยแตกได้ประมาณ 4.6 กิโลเมตร แต่ถ้าหากนำเอาค่าความดันน้ำ (fluid pressure) มาคิดด้วย เพราะจะทำให้ได้ความลึกเพิ่มมากขึ้น

ในการนำเอาหินตัวอย่างมาทดสอบหาความแข็งแรงในสภาพเปราะก่อนหินแตกนี้ เราอาจทำได้โดยเพิ่มค่าแรงเค้นเฉือนที่สะสมอยู่ในหินให้มากกว่าครึ่งหนึ่งของค่าแรงเค้นเฉือนที่หินจะวิบัติ จนหินเริ่มแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบถาวร คือมีการขยายรอยแตกขนาดเล็กให้กว้างขึ้น จนอาจกลายเป็นแนวการเลื่อนได้ เมื่อแรงเค้นอัดเพิ่มขึ้นมาอีกจนใกล้ถึงค่าวิบัติ ปริมาตรหินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะมีช่องว่างและรอยแตกขยายกว้างขึ้น ในกรณีที่หินอยู่ในที่ลึกๆ (หลายกิโลเมตร) อาจมีน้ำหรือของเหลวเข้ามาแทรกในช่องว่าง น้ำหรือของเหลวเหล่านี้สามารถรับน้ำหนักแทนเม็ดหินได้ ซึ่งทำให้ความสามารถของหินในการรับน้ำหนักจริงลดลงยังผลให้ค่าความ



แข็งแรงของหินลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้ถ้าหากน้ำไหลออกไปหินก็จะแตกหรือเกิดรอยเลื่อนได้เร็วขึ้น เพราะหินปรับสภาพการรับน้ำหนักไม่ทัน ดังนั้นในการสร้างเขื่อนบนรอยเลื่อนจึงนับได้ว่าเป็นการเร่งให้รอยเลื่อนเคลื่อนตัวได้เร็วกว่าปกติ ซึ่งในบางครั้งอาจตรวจสอบแล้วว่ารอยเลื่อนที่พบได้เขื่อนจะเป็นรอยเลื่อนไม่มีพลังก็ตาม

### 5.3 การทดสอบแรงอัด

ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้าง เรามักถามตัวเองด้วยความอยากรู้ว่า”เมื่อไหร่หินจึงจะแตกนะเมื่อได้รับแรงอัด” ความจริงคำตอบนี้เราอาจบอกได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ที่เรียก การทดสอบแรงอัด(*compressive strength test*) โดยเราเพิ่มแรง  $\sigma_1$  ในหินทดสอบ(rock specimen) ภายใต้อันตรัดความดันอัด(*confining pressure,  $\sigma_3$* ) เพื่อหาค่าความแข็งแรงของหิน

รูป 5.7 เป็นการทดลองแรงอัดเพิ่มแรงดันอัดรอบตัวในหินทรายด้วยแรงขนาด 10, 20 และ 30 เมกะปาสคาล(mega pascal หรือ MPa) จากผลการทดสอบเราพบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นรอยแตกแบบสอง-แบบเฉียง และพบรอยเลื่อนและรอยครูดด้วย ซึ่งเมื่อวัดมุมระนาบรอยเลื่อนโดยเทียบกับทิศทางของแรง  $\sigma_1$  ได้ค่ามุม  $\theta = 25^\circ - 30^\circ$  (เฉลี่ยประมาณ  $27^\circ$ ) ส่วนรูป 5.17 เป็นการทดสอบหินตัวอย่างชนิดเดียวกัน 3 ชุด ด้วยขนาด 4, 10 และ 14 MPa และกำหนดค่าแรงลงในกราฟวงกลมมอร์ด้วยมุม  $2\theta$  ทำกับกับแกนของ  $\sigma_n$  ให้เท่ากันทุกวงกลม และให้จุดรวมของจุดที่วงกลมเกิดจากรัศมีของวงกลมทำมุม  $2\theta$  กับแกนของ  $\sigma_n$  ดังนั้นเมื่อเราต่อจุดวิบัติต่างๆ เราจะได้ *กรอบวิบัติคูลอมบ์(Coulomb failure envelope)* ซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันซึ่งแสดงค่าของมุมเสียดสีในหิน(*internal friction,  $\phi$* ) และค่าคงที่  $\sigma_0$  ซึ่งเป็น *ค่าการยึดเกาะเนื้อหิน(cohesive strength)*

### 5.4 กฎวิบัติคูลอมบ์(Coulomb Law of Failure)

กฎการวิบัติที่คูลอมบ์คิดนี้ขึ้นอยู่กัผลเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ในการศึกษาสมบัติความแข็งแรงของหินโดยหาได้จากสมการ 5.7

$$\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots(5.7)$$

(โดยที่  $\sigma_c$  = แรงดันเฉือนวิกฤต,  $\sigma_0$  = แรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อหิน,  $\sigma_n$  = แรงดันตั้งฉาก และ  $\tan \phi$  = มุมเสียดทานภายใน)

จากรูป 5.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรง  $\sigma_c = 13$  MPa ทำให้หินแตกได้ ส่วนค่าแรง  $\sigma_0 = 7.5$  MPa ซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากภาพโดยมีค่า  $\sigma_n = 0$  และมีมุม  $\phi = 25^\circ$  วัดจากค่าความลาดชันของเส้น

กรอบวิบัติคูลอมบ์ โดยทั่วไปเราพบว่าหินส่วนใหญ่มีมุม  $\phi$  ระหว่าง  $25^\circ$  กับ  $35^\circ$  ซึ่งจากมุม  $\phi$  เราสามารถนำมาหาค่า  $\theta$  ได้โดยพิจารณาจากสมการ 5.8

$$\phi = 90^\circ - 2\theta \dots\dots\dots (5.8)$$

หรือ  $\theta = (90^\circ - \phi) / 2$

จากสมการ 5.8 ถ้าเราให้มุมเสียดทานในหิน( $\phi$ )เฉลี่ย  $\sim 30^\circ$  เราก็คำนวณหาค่ามุม  $\theta = 30^\circ$  ด้วย

**5.4.1 การประยุกต์กฎการวิบัติ**

เราสามารถประยุกต์กฎวิบัติคูลอมบ์เพื่อทำนายการเกิดรอยแตกในหินภายใต้แรงเค้นอัดได้ เช่น เราต้องการทราบว่าหินภายใต้ความดัน 10 MPa (รูป 5.18) จะเกิดการวิบัติแบบใดและควรมีแรงเค้นอัดเท่าใด จากรูป 5.18 ถ้า  $\sigma_1 = 40 \text{ Mpa}$  หินยังไม่วิบัติ แต่ถ้าแรงเค้นอัดมีค่า  $\sigma_1 = 55 \text{ MPa}$  หินจะถึงจุดวิกฤตแห่งการวิบัติ แต่ถ้ามีแรงเค้นมากกระทำเกินกว่านี้หินจะวิบัติ เพราะวงกลมมอร์สันสัมผัสกับกรอบการวิบัติคูลอมบ์พอดีหรืออาจเลยกรอบวิบัติ นอกจากนั้นเรายังสามารถหามุม  $\theta$  ได้ ซึ่งในรูปคือ  $35^\circ$

ด้วยเหตุนี้ถ้าเราเพิ่มความดันมากๆ เรากลับพบว่ากฎวิบัติคูลอมบ์อาจใช้ไม่ได้อีกต่อไป เนื่องจากหินไม่อยู่ในลักษณะเปราะ(brittle)แต่จะเริ่มอ่อนนุ่ม(ductile) ตามที่ได้ทราบแล้วในเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด จากผลการทดลองเมื่อเราเพิ่มความดันให้หินมากขึ้น กรอบวิบัติคูลอมบ์จะเปลี่ยนเป็นจากเส้นความลาดชันมาก ไปเป็นเส้นความลาดชันน้อย และในที่สุดจะเป็นเส้นตรงที่แทบไม่มีมุมเทอีกต่อไป (รูป 5.19) สาเหตุที่ความลาดชันของกรอบวิบัติคูลอมบ์ลดลงอาจเป็นผลมาจาก (1) ความดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้หินเปลี่ยนสภาพแบบเปราะเป็นแบบอ่อนนุ่ม, และ (2) มุมการแตกแบบเฉือนมีค่ามากกว่า  $30^\circ$  กับ  $\sigma_1$  (ถ้าเกิน  $45^\circ$  หินจะวิบัติแบบพลาสติก)

ทฤษฎีที่อธิบายช่วงพฤติกรรมของหินที่แตกแบบเปราะไปเป็นอ่อนนุ่ม คือ เกณฑ์วง มิสเซส (Von Mises criterion) หรือกรอบวงมิตเซสส์ ดังที่แสดงในรูป 5.19 โดยหินเกิดการวิบัติแบบกึ่งเฉือนอ่อนนุ่ม(หรือพลาสติก)กับขนาดความเค้นเฉือนค่ามากที่สุด(maximum shear stress) รูป 5.19 แสดงผลสรุปของแผนภาพการวิบัติของหินทั่วไป ซึ่งแผนภาพนี้เป็นภาพไม่สมตามจริง จากรูปเราพบว่า (1) เส้นกรอบวิบัติพาราโบลา (2) กรอบการวิบัติแรงดึง (3) กรอบการวิบัติคูลอมบ์ และ (4) กรอบวิบัติ วง มิตเซสส์ โดยที่หินแต่ละชนิดมีกรอบการวิบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของหินแต่ละชนิดต่อแรงเค้นนั่นเอง

**5.4.2 หินที่มีรอยแตกจะวิบัติแบบใด**

หากเราทดสอบด้วยแรงเค้นดึงหรือแรงเค้นอัดในหินที่มีรอยแตกอยู่แล้ว เราจะพบว่า หินมักแตกตามรอยแตกที่มีอยู่แล้วรอยใดรอยหนึ่ง เพราะหินมีค่าความแข็งแรงจากการยึดเหนี่ยวของเม็ดในเนื้อหิน(cohesive strength) ซึ่งไม่มากพอที่จะชนะแรงเค้นเฉือนที่จะทำให้หินแตกได้ ดังนั้นจึงเพียงแต่เอาชนะแรงเสียดทานต่อการเลื่อนไถล(frictional resistance to sliding)เท่านั้น ซึ่งแรงเสียดทานนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ที่สำคัญๆ ได้แก่ แรง  $\sigma_n$  ที่กระทำกับระนาบรอยแตก โดยที่แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนตรงกับแรง  $\sigma_n$  ส่วนแรงต้านทานของหินต่อการเลื่อนไถลหรือครูดถุนั้นขึ้นอยู่กับผิวเดิมของรอยแตก นอกจากนี้แรงต้านของหินต่อการเลื่อนไถลหรือครูดเพิ่มขึ้นเมื่อหินมีความขรุขระ(asperity)มากและกระจุกกระจายตรงผิวรอยแตกเดิม (รูป 5.20)

เราสามารถทดลองหาแรงต้านทานการต้านทานของหินต่อการเลื่อนไถลหรือครูดในหินที่มีรอยแตกเดิมได้(รูป 5.21) โดยในที่นี่มุมความลาดชัน คือ มุมแรงต้านทานหินต่อการเลื่อนไถลหรือครูดที่ได้แสดงไว้ใน (angle of sliding friction หรือ  $\phi$ ) ซึ่งแรงต้านทานของหินต่อการเลื่อนไถลหรือครูดได้แสดงไว้ในสมการ 5.9

$$\sigma_c = \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots (5.9)$$

โดยที่เราเรียกสมการใหม่นี้ว่า “กฎไบเยอร์ลี(Byerlee’s law)” รูป 5.22 แสดงค่าการเสียดทานของหินต่อการเลื่อนไถลที่ศึกษาโดยไบเยอร์ลี ซึ่งถ้า  $\sigma_n$  น้อยๆ จะได้มุมเสียดทาน(ของหินต่อการเลื่อนไถล)~40° แต่ถ้าเราเพิ่มความดันให้มากขึ้น มุมเสียดทานจะลดลงเหลือประมาณ 31° ส่วนในรูป 5.23 แสดงลักษณะกรอบการเสียดทานของหินต่อการเลื่อนไถล โดยเราพบว่ากรอบอยู่ต่ำกว่ากรอบการวิบัติคูลอมบ์สำหรับกรอบการวิบัติของหิน เรามักพบการแตกตามรอยแตกเดิมถ้าหินมีแรงเค้นแตกต่างกันมาก วงกลมจะตัดเกินออกไปจากกรอบการเสียดทาน(รูป 5.23ค)

จุดระหว่างวงกลมที่ตัดกับกรอบการเสียดทานของหินต่อการเลื่อนไถล แสดงถึงแรง  $\sigma_n$  และ  $\sigma_c$  ของการวางตัวของรอยแตก รอยแตกเดิมสามารถทำให้หินแตกหรือวิบัติได้ แต่ถ้าหินยังไม่แตกและเราเพิ่มแรง  $\sigma_1$  ไปเรื่อยๆ จนเกินกรอบการวิบัติคูลอมบ์(รูป 5.23ง) หินอาจพัฒนารอยแตกใหม่ขึ้น โดยทำมุมประมาณ 30° กับ  $\sigma_1$  ซึ่งไม่ใช่ระนาบรอยแตกเดิมของหิน

**5.4.3 แรงดันน้ำ**

แรงดันน้ำ(pore fluid pressure,  $P_p$ ) มีความสำคัญรองจากความแกร่งของหิน จากสมการ 5.9 ถ้า  $\sigma_0 = 0$  เราจะได้สมการเดิมคือสมการ 5.10

$$\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots (5.10)$$

แต่ถ้ามีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เราจะได้สมการ 5.11

$$\sigma_c = \sigma_0 + (\sigma_n - P_f) \tan \phi \dots\dots\dots (5.11)$$

$$\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_n \tan \phi$$

โดยที่  $\sigma_n$  = แรงเค้นประสิทธิผล (effective stress)

จากสมการ(5.11) จะเห็นได้ว่าแรงดันน้ำทำให้ความแข็งของหินลดลงเพราะความแกร่งต่อแรงเฉือนลดลง ถ้า  $\sigma_n = 0$  เช่นกัน ดังนั้นเราจึงพบว่ารอยแตกสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเพราะต้องการแรงที่กระทำให้มีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของเนื้อหิน ด้วยเหตุนี้เราจึงสรุปได้ว่าถ้าหินที่มีรอยแตกอยู่ก่อนแล้วย่อมเกิดรอยแตกได้ง่ายขึ้นอีก

อนึ่งสำหรับความดันของเหลวซึ่งพบได้มากมายที่ระดับลึกหลายๆ กิโลเมตรจากผิวโลก Davis และ Reynolds(1996) และ Twiss และ Moores(1992) ได้เสนอว่า ณ ระดับความลึก 3 กิโลเมตร ความดันน้ำ (hydrostatic pressure,  $P_f$ ) คำนวณได้จากสมการ 5.12

$$P_f = \rho_f gh \dots\dots\dots (5.12)$$

(โดยที่  $h$  = ความลึกจากผิวโลก,  $\rho_f$  = ความหนาแน่น และ  $g$  = ค่าแรงดึงดูดของโลก)

แต่ ณ ความลึกมากกว่า 3 กิโลเมตร แรงดันน้ำจะมากกว่าแรงเค้นจากน้ำหรือหินโดยรอบได้ (hydrostatic pressure) ทั้งนี้เนื่องจากผลการกดอัด ทำให้น้ำถูกขับออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดหินและเกิดความดันสะสมมากขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นยังทำให้น้ำมีความดันเพิ่มมากขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำกับเม็ดตะกอน น้ำก็มีอุณหภูมิสูงมากกว่าเม็ดตะกอนเพราะน้ำมีอัตราการขยายตัวอุณหภูมิ (rated thermal expansion) มากกว่าเม็ดตะกอนนั่นเอง ซึ่งยังผลให้แรงดันน้ำมากกว่าความดันหินรอบข้าง (lithostatic pressure) ( $P_I$ ) ด้วยจากสมการ 5.13

$$P_I = \rho_r gh \dots\dots\dots (5.13)$$

(โดยที่  $\rho_r$  = ความหนาแน่นของหิน,  $g$  = ค่าแรงดึงดูดของโลก และ  $h$  = ความลึกจากผิวโลก)

และทำให้อัตราส่วนความดันน้ำหรือของเหลว (fluid pressure ratio หรือ  $\lambda$ ) มีค่าตามสมการ 5.14

$$\lambda = P_f / P_I = \rho_f gh / \rho_r gh = \rho_f / \rho_r \dots\dots\dots (5.14)$$

นอกจากนั้นความดันของเหลวยังเป็นความดันน้ำโดยรอบ(hydrostatic pressure) เมื่อ  $\lambda$  มีค่าระหว่าง 0.37 ถึง 0.47 แต่ถ้าในภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้น  $\lambda$  จะมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.9 ซึ่งทำให้เราได้รับความดันของเหลวไม่ปกติ(abnormal fluid pressure) ดังนั้นจากสมการ(5.14)เราสามารถคำนวณหาความลึกมากที่สุดของหินที่จะเกิดรอยแยกหรือรอยแตกได้ เมื่อพิจารณาความดันน้ำมาเกี่ยวข้องด้วยจากสมการ 5.15

$$h = \frac{|3T_0|}{\sigma g(1-\lambda)} \dots\dots\dots (5.15)$$

ด้วยเหตุนี้ถ้าเราให้ค่า  $T_0 = 40$  MPa และหินมีความหนาแน่น = 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่า  $\lambda = 0.40$  จะได้รับความลึกมากที่สุดของหิน = 7.7 กิโลเมตร ซึ่งเป็นความลึกที่ทำให้ผลจากแรงดันน้ำมีผลต่อการเกิดรอยแตกได้มาก

#### 5.4.4 รอยแตกจากความดันของเหลว

กฎความดันของเหลวไม่ปกตินี้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมรอยแยกหรือรอยแตกจึงเกิดที่ความลึก 5 ถึง 10 กิโลเมตรหรือมากกว่าได้ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดันของเหลว(หรือ  $\lambda$ ) ดังสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

Secor(1965), Davis และ Reynolds(1996) ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ของความดันของเหลวในช่องว่าง(pore fluid pressure) (รูป 5.24ก) โดยกำหนดโคอะแกรมมอร์และกรอบการวิบัติของหินให้อยู่ภายใต้แรงเค้นอัด ดังนั้นถ้าค่า  $\sigma_1 - \sigma_3$  มีค่าไม่มากหินจะไม่วิบัติ แต่เมื่อมี  $P_f$  มากๆ หินอาจวิบัติได้(รูป 5.24ข) ถ้าอยู่ลึกมากขึ้นจะเกิดอยู่ในกรอบวิบัติคลุมมบ(รูป 5.24ค) ซึ่งมีรอยแตกเฉียงเกิดขึ้นจากความดันและทำให้ของเหลวเคลื่อนออกตามรอยแตก ในที่สุด  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  จัดตัวใหม่แบบย้อนกลับ การย้อนกลับของการเปลี่ยนแปลง(รูป 5.24ง) ถ้ามีน้ำเข้ามาอีกหินจะเกิดแตกอีกตามเงื่อนไข ดังที่กล่าวมาจนสามารถเกิดเป็นวงจรถัดรูป

#### 5.4.5 การเกิดสายแร่

ผลความดันของเหลวอาจทำให้เกิดรอยแตกขึ้นได้ และต่อจากนั้นจึงเกิดสายแร่(vein) โดยพัฒนามาจากรอยแตกก่อน เช่น สายแร่ควอตซ์ หรือสายแร่แคลไซต์ เป็นต้น แบบ I (รูป 5.25) หากพบว่าแร่ในสายแร่วางตัวตั้งฉากกับผนังของหิน นั่นแสดงว่าหินเกิดรอยแตก-แบบเปิด (รูป 5.25ก) ถ้ามีมุมเฉียง(รูป 5.25ค) ในรูปโค้งของแร่แบ่งได้เป็น 2 แบบ (รูป 5.26) คือ แบบที่เกิดจากผนังไปสู่ส่วนกลางเรียกว่าสายแร่อกเข้า(syntaxial vein) และแบบที่เกิดจากส่วนกลางไปหาผนัง

เรียกว่าสายแรงออกออก(antitaxial vein) แต่บางครั้งเราพบว่าบางสายแรงแจกสลับกลับไปกลับมาด้วยได้เช่นกัน

เราอาจศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะและทิศทางแรงเค้นที่กระทำต่อสายแร่ได้ (รูป 5.26 และ 5.27) โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือความเครียดที่เป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป(increment of strain) นอกจากนี้ในสายแรมีแร่บางตัวที่สามารถนำมาหาอายุได้ เช่น สายแร่เพกมาไทด์ที่มีแร่เฟลสปาร์ ไมก้า หรือทัวมาลีน เป็นต้น รวมทั้งบ่งบอกถึงสภาพทางกายภาพ เช่น ความดันและอุณหภูมิขณะที่สายแรมันๆ เกิดได้

## 5.5 รอยแตกขนาดเล็กมาก

หลายคนอาจสงสัยว่า ทำไมหินจึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่าแรงอัด และอาจถามต่อไปอีกว่าทำไมจึงเกิดตรงช่วงต่อระหว่างการวิบัติจากแรงเค้นดึงและแรงเค้นอัด (ดังรูป 5.23) จนได้รูปโค้งพาราโบลา และไม่เป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับกรอบการวิบัติคูลอมบ์ และทำไมแรงที่ทำให้หินแตกด้วยแรงอัดเมื่อคำนวณจากการทดสอบในสนามหรือในห้องปฏิบัติการจึงมักได้ค่าน้อยกว่าที่ได้จากทางทฤษฎี

### 5.5.1 รอยแตกจุล(Microcracks)

ในการคำนวณหาความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึง ถ้าพิจารณาเฉพาะพื้นที่จับกันของอะตอม ความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงจะมีค่าประมาณ 1/10 ของค่าโมดูลัสยัง(E) แต่ถ้าหินมีค่า  $E = -100,000 \text{ MPa}$  ค่าความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงจะประมาณ  $-10,000 \text{ MPa}$  แต่จริงๆ กลับพบว่ามีความเพียง  $-10 \text{ MPa}$

อลัน กริฟฟิท (Alan Arnold Griffith, 1724) วิศวกรชาวอังกฤษได้อธิบายถึงเหตุผลที่ว่าทำไมความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึงจึงมีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณทางพันธะการยึดเหนี่ยวของอะตอม กริฟฟิทพบว่าการแตกสลายของหินเป็นผลมาจากรอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจุล (microcrack) ที่รู้จักกันในชื่อ รอยแตกกริฟฟิท(Griffith crack) ว่าเป็นตัวการทำให้หินไม่แข็งแรง อันเนื่องมาจากแรงเค้นจะมาสะสมที่จุดปลายรอยแตกขนาดเล็กจนมีค่ามากกว่าความแข็งแรงของหินได้ เราอาจสร้างแบบจำลองรอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจุลได้โดยเปรียบเทียบกับสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนเล็กๆ ที่มีช่องว่าง(ดังรูป 5.28) โดยให้มีความยาวประมาณ 100 ถึง 1,000  $\mu\text{m}$  และกว้างประมาณ 1  $\mu\text{m}$  ซึ่งรอยแตกอาจปรากฏภายในเม็ดผลึกแร่หรือระหว่างผลึกแร่ก็ได้

ถ้ารอยแตกอยู่ในเม็ดแร่เดี่ยวๆ เราเรียกว่ารอยแตกภายในเม็ด(intragranular crack) แต่ถ้าอยู่ระหว่างเม็ดหลายๆ เม็ด เราเรียกว่า รอยแตกระหว่างเม็ด(transgranular crack) หรือถ้าอยู่ระหว่างรอยต่อ เรียกว่ารอยแตกระหว่างรอยต่อ(intergranular crack)

โดยทั่วไปเราพบว่ารอยแตกจุลกระจายตัวไม่เป็นทิศทาง แต่ในหินอัคนีกลับพบว่ารอยแตกจุลมีการกระจายมักคงที่(uniform distribution) ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นเนื้อเดียว (อนุพันธ์) ของมวลเม็ดแร่ในหินนั่นเอง

**5.5.2 การสะสมแรงเค้นที่จุดปลาย**

แรงเค้นอาจสะสมตัวได้มากในรอยแตกจุลโดยเฉพาะตรงจุดปลายทั้งสองข้าง (รูป 5.23) จนทำให้เกิดการเสริมแรง ซึ่งในที่สุดสามารถเอาชนะค่าความแกร่งทางพันธะยึดเหนี่ยวของอะตอมได้ ดังสมการ 5.16

$$\sigma_t = \frac{2}{3} \sigma_3 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \dots\dots\dots (5.16)$$

(โดยที่ a = ความยาว และ b = ความกว้าง)

ในรูป 5.23 เมื่อเราให้แรงเค้นดึงจากภายนอกมีค่าเพียง -2 MPa จนทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กที่ยาว ~ 10 μm และกว้าง ~1 μm เราคำนวณแรงเค้น σ<sub>t</sub> ตรงจุดปลายรอยแตกจุลได้โดย

$$\sigma_t = \frac{2}{3} (-2MPa) \left( \frac{100}{1} \right)^2$$

นั่นก็คือได้แรงเค้น  $\sigma_t = -13,000MPa$

**5.5.3 มุมวิกฤตในรอยแตกจุล**

ในหัวข้อย่อยข้างต้นเราพบว่าแรงเค้นดึงมีค่ามากที่สุดตรงจุดปลายรอยแตกจุล และมักมีทิศทางการวางตัวด้วยมุมที่สัมพันธ์กับแรงเค้นหลัก ดังนั้นจึงมีเพียงมุมเดียวที่มีการสะสมแรงเค้นดึงมากที่สุด นั่นคือ มุม θ ซึ่งเราอาจเขียนเป็นสมการ (5.17) ได้ดังนี้

$$\cos 2\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \dots\dots\dots (5.17)$$

และถ้าเรากำหนดให้ σ<sub>3</sub> = T<sub>0</sub> และ σ<sub>1</sub> = 3T<sub>0</sub> แทนค่าในสมการ 5.17

$$\cos 2\theta = \frac{3T_0 - (-T_0)}{2(3T_0 + (-T_0))}$$

$$2\theta = 0$$

ดังนั้นด้วยเหตุนี้รอยแตกจุดจึงมีแนวของปลายทั้งสองขนานกับ  $\sigma_1$  และตั้งฉากกับ  $\sigma_3$

#### 5.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด

ในการทดสอบหินตัวอย่าง โดยทั่วไปหินจะแสดงรอยแตกแบบยืดหยุ่นถ้าเราไม่นับรวมบริเวณจุดปลายรอยแตกจุดที่แพร่ออกไปเพราะนั่นเป็นจุดที่หินเกิดการวิบัติไปแล้ว หากมีรอยแตกจุดมากๆ หินจะแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบพลาสติก แต่ถ้าไม่มีรอยแตกจุด หินจะแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะ ดังนั้นถ้าเราสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียดเพื่อบอกสภาพการเปลี่ยนลักษณะที่เกิดจากรอยแตกจุดร่วมกับจุดที่หินแตก เราจะพบว่าเส้นกราฟไม่ได้แสดงลักษณะที่สอดคล้องกับหลักการยืดหยุ่น ก็ต้องเป็นเส้นตรงตามกฎของฮอค(Hock's law) แต่กราฟจะแสดงเส้นโค้งที่จุดปลายของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด ซึ่งทั้งหมดนี้สาเหตุจากการเปลี่ยนลักษณะไปเป็นแบบพลาสติกนั่นเอง จนทำให้แรงเค้นลดลงก่อนที่หินจะแตก และรอยแตกจุดเคลื่อนเข้าไปหาบริเวณที่มีการสะสมตัวแรงเค้นมากๆ ทำให้เกิดการแตกแบบเปิด(แบบ I)

#### 5.6 แบบจำลองรอยแตกหรือรอยแยกธรรมชาติ

ในการเกิดรอยแยกหรือรอยแตกเราต้องให้  $\sigma_3$  มากกว่าความแกร่งของหินต่อแรงเค้นดึง( $T_0$ ) ในหินโดยให้ความแตกต่างของแรงเค้นน้อยกว่า  $4T_0$  และถ้าเราอยากให้หินเกิดรอยแตกจากแรงดึง เราต้องให้  $\sigma_3$  เป็นแรงเค้นดึง ส่วน  $\sigma_1$  เป็นค่าแรงเค้นอัด และให้  $\sigma_1 - \sigma_3$  น้อยกว่า  $4T_0$  จึงจะมีผลทำให้เกิดรอยแตกตามกรอบวิบัติพาราโบลาได้ แต่ถ้ารอยแตกเป็นแบบเฉือน (แบบเฉือน-แบบ II) เราต้องให้  $\sigma_1$  เป็นแกนแรงเค้นอัด และ  $\sigma_3$  เป็นแรงเค้นดึง และให้  $\sigma_1 - \sigma_3$  ต้องมีค่ามากพอที่จะตัดกรอบวิบัติลูอมป์

กระบวนการทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดรอยแตกแบบนี้ได้ต้องมีการจมตัว การยกตัว(uplift), การผ่านร้อนผ่านเย็น และการยืดหดจากการแปรสัณฐาน(tectonics)

##### 5.6.1 สภาพการเกิดรอยแตกธรรมชาติ

ตะกอนหินทรายที่แทรกสลับกันจนเป็นชั้นหนา เป็นผลมาจากการตกตะกอนจากน้ำทะเลที่ถูกลำชายฝั่งทะเลเข้าไปในแผ่นดินมากขึ้นๆ และหลายครั้งๆ จนตะกอนทรายจมตัวลงไปลึกได้ถึง 1.5 กิโลเมตร จนในที่สุดตะกอนเริ่มจับตัวเป็นหินแข็งจนเกิดเป็นหินทรายผนวกกับความร้อนที่



เพิ่มมากขึ้นในหินตามลาดความร้อนได้พิภพ(geothermal gradient) คือ ประมาณ  $25^{\circ}$  ในทุกๆ 1 กิโลเมตร (รูป 5.30)

ในหัวข้อแรงดันน้ำเราทราบว่าความดันของเหลว นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงของหิน ถ้าอัตราส่วนความดันของเหลว ( $\lambda = P_f/P_v$ ) มีค่าระหว่าง 0.4 ณ ที่ลึกลงไปจากผิวโลก 3 กิโลเมตร และช่วง 3 ถึง 5 กิโลเมตร อัตราความดันจะมากขึ้นถึง 0.7 ตะกอนทรายที่จมตัวโดยน้ำหนักกดทับจะขยายตัวออกด้านข้างเรียกว่าผลบัพของค์ "Poissons' effect" ซึ่งเป็นผลกระทบจากการขยายตัวตามแกนที่ตั้งฉากกับทิศแรงเค้น เช่น ถ้าทิศแรงเค้นเข้ามาตามแนวดิ่งจะเกิดการขยายตัวตามแกนนอน และเช่นเดียวกันเมื่อมีการขยายตัวด้านข้าง การขยายตัวจะถูกจำกัดเพราะมีผลจากตะกอนที่อยู่โดยรอบ ส่วนแรงเค้นตามแกนนอนที่เป็นผลมาจากการแปรสัณฐานจะเริ่มสะสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลบัพของค์ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีแรงเพิ่มขึ้นจากแรงเค้นตามแกนนอน เนื่องจากรงการแปรสัณฐานใดๆ อีก เมื่อตะกอนทรายร้อนขึ้น จึงพยายามขยายตัวออกแต่เมื่ออยู่ในที่ที่จำกัดเพราะมีตะกอนรอบข้าง จึงเกิดแรงเค้นอัดสะสมในตะกอนทราย

ตรงกันข้ามถ้าหากตะกอนทรายที่กลายเป็นหินทรายไปแล้วมีการยกตัวขึ้นสู่ผิวดิน ผลของบัพของค์ และอุณหภูมียังมีผลต่อหินทำให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้าง ความดันของเหลวภายในหินจะเข้ามามีผลต่อหินโดยจะต่อต้านแรงเค้นอัดในแนวดิ่งและแรงเค้นอัดในแนวนอน ถ้าหินทรายจมตัวลงไปทีละระดับถึง 5 กิโลเมตร โดยสมมติให้หินทรายถูกแรงเค้นอัดจากการแปรสัณฐานในแนวนอน 20 MPa ก็จะทำให้เกิดรอยแตกเหมือนได้ เราจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่เกิดในหินทรายเป็นผลมาจากการขั้บความดันของเหลวออกไปตามรอยแตกเหมือน

ถ้ามีการยกตัวของหินทรายระดับความลึก 5 กิโลเมตรมาที่ระดับ 3 กิโลเมตร แรงจากผิวสัมผัสทางด้านข้างจะลดลง 3 กิโลเมตร และเมื่อเคลื่อนขึ้นมาที่ผิวโลก โดยสมมติว่าเรายอมให้หินทรายยืดได้ประมาณ 0.001 ต่อกิโลเมตร ดังนั้นในช่วงสุดท้ายหินทรายจะมีการยืดออกทางด้านข้างได้ประมาณสามส่วนในสิบส่วนของหนึ่งเปอร์เซ็นต์ นั่นก็คือ 0.003 ของทั้งหมด ภาพไดอะแกรมแสดงการจมตัวและยกตัวอย่างของหินทรายดังรูป 5.30

### 5.6.2 การคำนวณ

ในการคำนวณจุดประสงค์ของเราคือการคำนวณหาแรงเค้น  $\sigma_1^*$  และ  $\sigma_3^*$  โดยให้  $\sigma_1^* = \sigma_v^*$  และ  $\sigma_1^* = \sigma_h^*$

$$\sigma_v = \rho gh - P_f$$

(โดยที่  $\sigma_v^*$  = ความเค้นประสิทธิผลแนวดิ่ง,  $\rho$  = ค่าความหนาแน่น,  $g$  = ค่าแรงดึงดูดของโลก,  $h$  = ความลึก และ  $P_f$  = ความดันน้ำ)

$$\sigma_h^* = \left[ \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \sigma_v - \left( \frac{E}{1-\nu} \right) \alpha \Delta T \right] - P_f$$

โดยที่  $\sigma_v^*$  = แรงเค้นประสิทธิผลแนวอน,  $\nu$  = อัตราส่วนปัวซอง,  $\sigma_h^*$  = แรงเค้นแนวตั้ง,  $E$  = โมดูลัสยัง,  $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อน และ  $\Delta T$  = ค่าแตกต่างของอุณหภูมิ

สมการข้างต้นเป็นการหาค่าแรง  $\sigma_h^*$  ที่เสนอโดย Engelder(1985) ซึ่งแต่เดิมให้ใช้

$$\sigma_h^* = \left[ \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \sigma_v \right] - P_f$$

เราคำนวณหาแรงเค้นแนวตั้งและแนวอนทุกๆ 0.5 กิโลเมตรขณะเกิดการจมตัวและยกตัวได้จากรูป 5.31 (ก และ ข) เริ่มเปลี่ยน  $\sigma_h^*$  หรือแรงเค้นอัดในแนวตั้งขณะชั้นตะกอนจมลงเพิ่มจาก 0 MPa ไปถึง 48 MPa (จากผิวดินถึง 3 กิโลเมตร) ณ ที่ 3 กิโลเมตรความดันของเหลวเพิ่มขึ้น และเกิดแรงเค้นอัดในแนวตั้งลดลงจาก 48 MPa ลงมาที่ 22 MPa (รูป 5.31ค) ระหว่าง 3 และ 5 กิโลเมตรความเค้นอัดในแนวตั้งเพิ่มเป็น 40 MPa

โดยปกติ  $\sigma_h^*$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง -5 MPa จากผิวถึงความลึก 1.5 กิโลเมตร (รูป 5.31ก) เมื่อตะกอนทรายเป็นหินจะได้แรงอัด  $\sigma_h^*$  มากขึ้นถึง 4 MPa และเพิ่มขึ้นจนถึง 9 MPa ในช่วงความลึกระหว่าง 3 ถึง 5 กิโลเมตร(รูป 5.31ข) เมื่อมีความดันของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้องกับ  $\sigma_h^*$  จะลดลงถึง -14 MPa (รูป 5.31ค) และลดลงเรื่อยๆ ถึง -25 MPa เมื่ออยู่ที่ความลึก 5 กิโลเมตร

รอยแยกจะเกิดขึ้นที่หินตะกอนจมตัว (รูป 5.31ค) โดยหินจะเกิดการแตกในโหมดหนึ่งจนเกิดการวิบัติแบบเปิด ณ ที่ระดับตื้นประมาณ 1.5 ถึง 3 กิโลเมตรรอยแยกยังไม่เกิด เพราะสภาพไม่เอื้ออำนวย แต่เมื่อลึกเกิน 3 กิโลเมตร จะเกิดรอยแตกพาราโบลาแบบกิปฟิท อันเนื่องมาจากผลความดันในของเหลว ซึ่งพบได้ทั้งในการวิบัติแบบเปิด(โหมดหนึ่ง) และการวิบัติแบบเลื่อน(โหมดสอง) ได้

เมื่อถึงความลึกที่ 5 กิโลเมตร (หรือประมาณ 20 MPa) ของแรงจากการแปรสัณฐาน (tectonics) ที่จะกดอัดในหินทางด้านข้าง โดยที่แรงเค้นแนวตั้งไม่เปลี่ยนแปลง หินเกิดการแตกแบบรอยแตกเลื่อนและค่าความแตกต่างทางแรงเค้นอยู่ในกรอบการวิบัติคลุมอัมบ์ ถ้ามีการเพิ่มความดันของเหลวหินเกิดการแตกได้และหินทรายอาจถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกอีกครั้งได้

หินทรายจะถูกยกตัวขึ้นโดยแรงเค้นแนวตั้งและแรงเค้นแนวอนลดลง ดังนั้นถ้าไม่มีการเปลี่ยนบริเวณขอบเขตผิวสัมผัสความเค้นจะลดลง(ดังรูป 5.31จ) เส้นความลาดชันของแรงเค้นแนวอนที่ลดลงจะชันกว่าแรงเค้นแนวตั้ง ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงค่าความแตกต่างจากแรงเค้นค่งที่ การเกิดรอยแตกจะปรากฏในหินขณะที่หินยกตัวสูงขึ้น(รูป 5.31จ) ถ้าเรายอมให้หินทรายมี

การยืดออกได้เมื่อโผล่ขึ้นมาที่ผิวโลก วงกลมในไดอะแกรมมอร์จะเคลื่อนจากซ้ายมาอยู่ในขอบ การวิบัติการยืดพาราโบลาคของกิปฟิท(รูป 5.31ฉ) รอยแยกจึงเกิดขึ้นและเรียกว่า “release joint” โดยจะแตกเป็นช่วงๆ ขึ้นอยู่กับความหนาของหิน

## 5.7 การแปลความหมายรอยแยก

สำหรับตัวอย่างปรากฏการณ์การเกิดรอยแยกขณะยกตัว ในที่นี้เราใช้กรณีศึกษาในหินพรีแคมเบียน รัฐไวโอมิง โดยมีผลรอยแตกจุดช่วยทำให้เกิดรอยแยกแบบเปิด(โหมคหนึ่ง) โดยการแปรสัณฐานและแรงดันน้ำภายในหิน ซึ่งรอยแตกนี้วางตัวขนานกับทิศแรงเค้นอัดที่ขวางรอยโค้ง (cross-fold joint) (ดังรูป 5.32) โดยเกิดจากผลความดันของเหลวที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับรอยแตกจากการแปรสัณฐาน ส่วนรอยแตกจากแรงดันน้ำ(hydraulic joint) เกิดจากน้ำหนักรัดทับจากส่วนบนร่วมกับความดันของเหลว

ตรงกันข้ามกับรอยแตกแบบผ่อนคลาย(release joint) และรอยแยกแบบยกออก(unloading joint) จะเกิดบริเวณใกล้ผิวโลกที่มีการผุพัง เมื่อแรงเค้นอัดหายไป รอยแตกผ่อนคลายจะเกิดในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงเค้นจากการแปรสัณฐานเดิมและมีลักษณะคล้ายกับรอยแตกตามทิศการวางตัว(strike joint) โดยขนานกับแนวการโค้ง รูป 5.32 แสดงถึงภาระน้ำหนักที่หายไปจนเกิดรอยแตกแบบเปิดหรือโหมคหนึ่ง ส่วนรูป 5.33 เป็นการกำหนดที่รอยแยกในพื้นที่เดียวกันกับรูป 5.32 โดยการศึกษากอง Engelder และ Geiser (1980)

สนามแรงเค้นประจำถิ่น(Local stress field) อาจมีผลต่อแนวการเกิดรอยแตกจากการแปรสัณฐานด้วย โดยเราอาจพบรอยแตกที่ไม่เป็นไปตามทิศแนวรอยแตกจากการแปรสัณฐาน ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่ใหญ่กว่ามากได้

### 5.7.1 รอยแตกและรอยแตกเฉียงในหินอัคนี

โครงสร้างปฐมภูมิของรอยแตก และรอยแตกเฉียงที่ปรากฏในหินอัคนีแทรกซอนเป็นผลมาจากอุณหภูมิ (รูป 5.34) และเรามักเรียกว่ารอยแตกตามขวาง(cross joint) ซึ่งมักเป็นรอยแตกยาวๆ เป็นระนาบที่มักมีแร่ลาบที่ผิวและตั้งฉากกับโครงสร้างแนวเส้น ถ้ารอยแตกขนานกับโครงสร้างแนวเส้นเรามักเรียกว่า รอยแตกแนวยาว (longitudinal fracture) ซึ่งมักเป็นรอยแตกที่ระนาบไม่พบแร่ลาบ บริเวณที่ผิวสัมผัสกับอากาศหิน มักมีรอยแตกโดยมีมุมของระนาบรอยเลื่อนเป็นมุมต่ำและแสดงริ้วลายขนาน(striation) ในแนวเดียวกับโครงสร้างแนวเส้น

### 5.7.2 รอยแตกจากการกระแทก

ผลจากการตกกระทบของอุกกาบาตหรือเทหวัตถุจากนอกโลก(identified flying object หรือ UFO) อย่างแรงมักทำให้หินบนผิวโลกเกิดการแตกกระจายออกอย่างเฉียบพลัน จนทำให้ได้รอยแตกส่วนใหญ่เป็นรูปกรวย (shatter cone)

รูป 5.1 รอยแยกที่พบในโครงสร้างรอยโค้งและรอยเลื่อน (ก) รอยแตกที่เกิดจากแรงดึง(extension) (ข) รอยแตกเฉียงในลักษณะขวางกัน(conjugate) (ค) รอยเลื่อนและรอยแตกเฉียงที่เกิดร่วมกัน (ง) แผนภาพดอกกุหลาบ(rose diagram) ที่แสดงเฉพาะทิศทางของรอยแตกเฉียงและรอยแตกตามแนวรอยเลื่อน ซึ่งพบว่ามีสองทิศทางหลัก (ดัดแปลงจาก Twiss and Moores, 1992)

รูป 5.2 รอยแตกและรอยแตกเฉียงในโครงสร้างรอยโค้งในบริเวณต่างๆ พร้อมภาพสเตริโอเน็ตของแนวรอยแตกและรอยแตกเฉียง ชั้นหินแสดงด้วยเส้นปะ ส่วนเส้นทึบในสเตริโอเน็ต แสดงทิศทางกรวางตัวของรอยแตกและรอยแตกเฉียง (ดัดแปลงจาก Twiss and Moores, 1992)

รูป 5.3 ลักษณะการเกิดรอยแตกสามประเภท ได้แก่ (ก) รอยแตกปริ (ข) รอยแตกเฉียง และ (ค) รอยแตกฉีก (ดัดแปลงจาก Atkinson, 1987)

รูป 5.4 ลักษณะรูปแบบรอยแยกที่พบบ่อยๆ (ก) (ค) และ (ง) เป็นรอยแตกมีระบบ (systematic joints) และ (ข) รอยแตกไม่มีระบบ (non-systematic joints) ปรากฏในรอยแตกแบบมีระบบ (Twiss และ Moores, 1992)

รูป 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะรอยแตกกับความหนาชั้นหิน ให้เปรียบเทียบระหว่างหินปูนและหินทรายเกรย์แวค(greywackes) (Twiss และ Moores, 1992)

รูป 5.6 รอยแตกที่พบในสนาม (ก)-(ง) รอยแตกที่พบในหินทรายกลุ่มหินโคราช เป็นรอยแตกแบบปริ (จ) รอยแยกในหินทราย (แหล่งที่มา: ภาพโดย Robert J. Varga) (ฉ) รอยแตกที่ถูกผนังแทรกชั้นของหินอัคนีตัดเข้ามาทำให้รอยแตกหยุด เป็นการแตกแบบโหมคหนึ่ง (ช) ผิวระนาบรอยแตกพบเป็นลักษณะที่ไม่มีรอยครูด เป็นการเลื่อนแบบแยก โหมคหนึ่ง (ซ) ผิวระนาบรอยเลื่อนที่พบรอยครูด (slickenline) เป็นหลักฐานบ่งบอกการเลื่อนแบบโหมคสอง และโหมคสาม ในรูปแสดงทิศการเลื่อนอย่างน้อยสองทิศทาง

รูป 5.7 การพิจารณาลำดับอายุรอยแตกแบบชนปลาย (putting relationship)

รูป 5.8 (ก) รูปร่างโครงสร้างขนนก (plumose structure) บนผิวระนาบรอยแตกเส้นขนนก(Hackels) แสดงแนวหรือทิศทางเคลื่อนที่ ส่วนซี่โครง(rib)แสดงหน้าคลื่นที่แรงเคลื่อนที่ไป (ข) การเกิด

โครงสร้างขนนกในชั้นหินจากแรงดึง และ (ค) การเกิดโครงสร้างขนนกในชั้นหินจากแรงดึงและการหมุนตัวของชั้นหิน (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 5.9 (ก) ลักษณะการเกิดของรอยแตกรูปเสา ซึ่งมองดูคล้ายเป็นรูปหกเหลี่ยม และแต่ละหน้าเหลี่ยมมักพบโครงสร้างขนนก(plumose structure) และ (ข) ลักษณะรอยแตกรูปเสาแบบกระจายพบในบริเวณ Grand Canyon สหรัฐอเมริกา

รูป 5.10 ภาพรอยแตกเปลือกหุ้มของหินแกรนิต บริเวณ Yosemite National Park รัฐ California, สหรัฐอเมริกา (ภาพโดย Robert Varga)

รูป 5.11 ลักษณะการตัดกันของรอยแยก ภาพบนเป็นการตัดกันแบบรูปตัว Y ภาพกลางเป็นการตัดกันแบบรูปตัว X และภาพล่างเป็นการตัดกันรูปตัว T (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 5.12 ลักษณะการสิ้นสุดของรอยแยก (ก) ปลายรอยแยกเกิดการโค้งงอและหยุด (ข) สองปลายรอยแยกโค้งเข้าหากัน (ค) สองปลายรอยแยกโค้งเข้าหากันและชนกันเป็นรูปตัว T (ง) รอยแยกแตกออกเป็นส่วนย่อยๆ แบบหล่อมขนาน

รูป 5.13 ภาพการทดลองหาความแข็งแรงของหิน (ก) ต่อความเค้นดึง และ (ข) ต่อแรงเค้นอัด

รูป 5.14 แผนภาพวงกลมมอร์ แสดงกรอบการวิบัติ(envelope of failure) ของหินพื้นที่ภายในกรอบเป็นเขตที่หินวิบัติ แต่ถ้ามีค่าแรงเค้นแตกต่างกันมากระหว่าง  $\sigma_1$  กับ  $\sigma_3$  จนเกิดกรอบการวิบัติ หินจะวิบัติทันที

รูป 5.15 แผนภาพวงกลมมอร์แสดงการทดสอบความแข็งแรงของหินต่อแรงเค้นดึง (ก) เมื่อไม่มีความดันรอบข้าง (no confining pressure) วงกลมแสดงการเพิ่มขึ้นของความเค้นดึงที่เพิ่มขึ้นก่อนวิบัติ เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมคือ ค่าความแตกต่างของแรงเค้น(differential stress) (ข) เมื่อมีความดันรอบข้าง(confining pressure) โดยเริ่มจากการให้แรงเค้นต่อหิน แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มแรงเค้นดึง ดังนั้นจึงมักเรียกว่าการทดสอบสอแรงเค้นอัดและแรงเค้นดึง(compressive and tensile strength test)

รูป 5.16 (ก) วงกลมมอร์ของหินแสดงการทดสอบหาแรงเค้นอัดและแรงเค้นดึงภายใต้แรงเค้นอัดรอบข้าง(confining pressure) ที่มีค่าระหว่างสามเท่าถึงห้าเท่าของค่าความแข็งแรงของแรงเค้นดึงของหิน ในรูปกรอบการวิบัติแสดงด้วยเส้นโค้งพาราโบลา (เส้นสีดำเข้ม) (ข) การเกิดรอยแตกไขว้

(conjugate fractures) ภายใต้งั๋นไขที่กล่าวไว้ใน รูป (ก) โดยพบว่าชนิดรอยแตกเป็นแบบแตกปริ และแตกเ็อน

รูป 5.17 วงกลมมอร์แสดงแรงเค้นอัด โดยให้ความดันเริ่มต้นเท่ากับ 4, 10 และ 14 MPa ทำให้เราสามารถลากกรอบการวิบัติสัมผัสกับจุดที่แสดงระนาบของการแตก

รูป 5.18 เส้นกรอบการวิบัติคูลอมบ์ ถ้ามีความดันรอบข้าง 10 MPa หากให้ค่าความเค้นอัดเพิ่มเป็น 40 MPa จะยังไม่เกิดการวิบัติแต่ถ้าหากเพิ่มเป็น 55 MPa จะถึงจุดวิกฤตเมื่อเกินไปจากนี้ห็นจะเกิดการวิบัติ

รูป 5.19 เส้นกรอบการวิบัติต่างๆ ที่พบในหินทั่วไปเมื่อเพิ่มแรง  $\sigma_1$  มากขึ้นเรื่อยๆ พบว่ากรอบการวิบัติคูลอมบ์ไม่สามารถทำนายได้ แต่จะได้กรอบการวิบัติ วง มิสเชสส์ แทน

รูป 5.20 (ก) ลักษณะผิวขรุขระ(asperity) และช่องว่าง(void) ที่ปรากฏอยู่ในระนาบรอยแตกของหิน (ข) โดยใช้สปริงออกแรงดึง P (ค) กราฟระหว่างความเร็วการเลื่อนเทียบกับเวลา ในช่วงแรกเป็นการเอาชนะการยึดติดระหว่างผิวขรุขระกับช่องว่าง เมื่อหินเลื่อนผ่านผิวขรุขระ ต้องใช้แรงเอาชนะการเสียดทาน แต่เมื่อผ่านช่องว่างไปได้หินจะเลื่อนได้เร็วขึ้น และเมื่อสามารถเอาชนะได้หมดจะเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ (Hatcher, 1995)

รูป 5.21 แผนภาพมอร์เมื่อไม่มีค่ายึดเหนี่ยวระหว่างมวลเม็ด โดยที่มุม  $\phi$  คือมุมการต้านทานการเลื่อนไถลหรือการครูดถู(angle of sliding friction)

รูป 5.22 มุมการต้านทานต่อการเลื่อนหรือครูดถู(angle of sliding friction) ของหินต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นตั้งฉากกับแรงเค้นดึง (Byerle, 1978)

รูป 5.23 แผนภาพมอร์ แสดงกรอบวิบัติคูลอมบ์และกรอบวิบัติมุมเสียดทาน (ก) เมื่อกำหนดให้  $\sigma_3$  มีค่าคงที่เท่ากับ 6 MPa และเพิ่มค่า  $\sigma_1$  ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสัมผัสกับกรอบการวิบัติมุมเสียดทาน และ (ข) ถ้ามีรอยแตกเดิมที่ทำมุม = 25° (ซึ่งเท่ากับมุม  $2\theta$  ที่เกิดจากเส้นรัศมีวงกลมที่ลากไปยังจุดสัมผัส กับแกน  $\sigma_3$ ) กับ  $\sigma_1$  จะเกิดการเลื่อนไถลไปตามรอยแตกเดิม (ค) สมมติให้หินยังไม่เกิดการวิบัติและเราเพิ่มค่าแรง  $\sigma_1$  เลยออกไปจากกรอบการวิบัติมุมเสียดทาน จนกระทั่ง  $\sigma_1 = 37$  MPa ถ้ามีรอยแตกเดิมระหว่าง 12.5° และ 32.5° หินจะเกิดการเลื่อนไถล (ง) สมมติหินยังไม่มีการวิบัติและ

เพิ่ม  $\sigma_1$  ขึ้นจนสัมผัสกับกรอบการวิบัติคูลอมบ์ หินแตกตามกฎของคูลอมบ์ หินไม่มีการแตกตามแนวแตกเดิมอีกต่อไป (ภาพปรับปรุงต่อจาก Davis and Reynolds, 1996)

รูป 5.24 แบบจำลองของ Secor(1965) (ก) เริ่มจากให้มีค่าของ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  มากๆ เมื่อให้ค่าความดันของไหลในช่องว่าง(pore fluid pressure) มากค่าของ  $\sigma_1$  และค่าของ  $\sigma_3$  ลดลงในปริมาณที่เท่ากัน หากวงกลมแรงเค้นเคลื่อนมาจนสัมผัสกับกรอบการวิบัติแบบแรงดึง เราจะพบการแตกเป็นแบบโหมดหนึ่งหรือแบบเปิด (ข) กรณีที่มีค่าความแตกต่างทางความเค้นมากขึ้น เมื่อค่าความดันของไหลในช่องว่างสูงขึ้น วงกลมจะเลื่อนไปสัมผัสกับเส้นโค้งพาราโบลา และเกิดการแตกแบบกิ่งแรงดึงและแรงเฉือน (ค) ถ้าค่าความแตกต่างทางแรงเค้นมาก หินจะแตกตามกฎคูลอมบ์โดยเกิดการเลื่อนไหลแบบโหมดสอง-แบบเฉือน (ง) การเกิดสลับกลับไปมาในการเปลี่ยนค่าความดันของไหลในช่องว่างในหิน (Davis และ Reynolds, 1996 และ Secor, 1965)

รูป 5.25 การเกิดสายแร่เส้นใย(fiber vein) ซึ่งเป็นผลจากรอยแตกโดยเริ่มจาก (ก) เกิดรอยแตกแบบโหมดหนึ่ง-แบบเปิด (ข) ต่อมาเกิดโหมดสอง-แบบเฉือนร่วมด้วย และ (ค) ที่ปรากฏสุดท้ายของลำดับการเกิดของสายแร่เส้นใย

รูป 5.26 การเปลี่ยนลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป (ก) ผลึกเริ่มเปลี่ยนลักษณะจากตรงกลางไปที่ผนัง (antiaxial crystal) ผลึกเริ่มเปลี่ยนลักษณะจากผนังไปยังส่วนกลาง(syntaxial crystal) ในรูปแนวผลึก 1 ไม่แสดงการเปลี่ยนลักษณะ ส่วนแนวผลึก 3 เปลี่ยนแปลงไปมาก

รูป 5.27 แนวแรงเค้นที่เปลี่ยนทิศทางและบันทึกไว้ในสายแร่ ซึ่งมักวางตัวขนานกับแนวผลึกแร่ ในรูปสายแร่แสดงการเปลี่ยนลักษณะ

รูป 5.28 รอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจมนที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยมีแรงเค้นดึงเพียง -2 MPa ที่ทำให้เกิดแรงเค้นตรงจุดปลายมีค่า -13,000 MPa ได้ ถ้ารอยแตกจุกกว้าง (b) 1  $\mu\text{m}$  และยาว (a) 100  $\mu\text{m}$

รูป 5.29 ขั้นตอนการแพร่กระจายรอยแตก โดยผ่านแรงไปตามแนวเปิดรูปลิ้ม(Atkinson, 1987)

รูป 5.30 กระบวนการจมนตัวของตะกอนทรายจนเกิดเป็นหินทราย (ภาพด้านซ้าย) ต่อจากนั้นจึงเกิดการยกตัวของหินทราย โดยปรากฏรอยแตกในช่วงลำดับต่างๆ (ภาพด้านขวา) (Davis และ Reynolds, 1996)

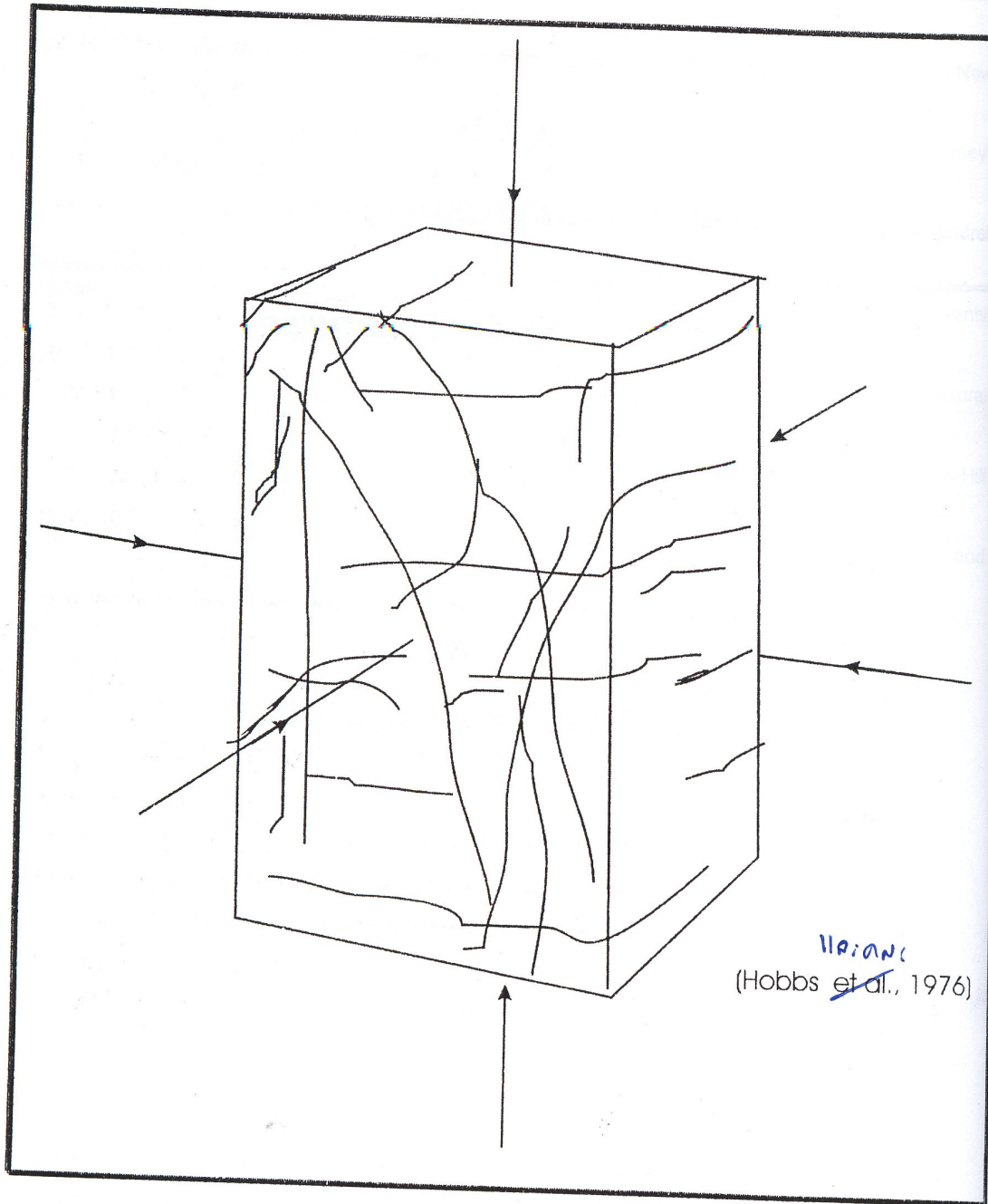
รูป 5.31 ขั้นตอนของการเกิดรอยแยก แสดงโดยการสเกตไดอะแกรมมอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับรูป 5.30 (ดัดแปลงจาก Davis และ Reynolds, 1996)

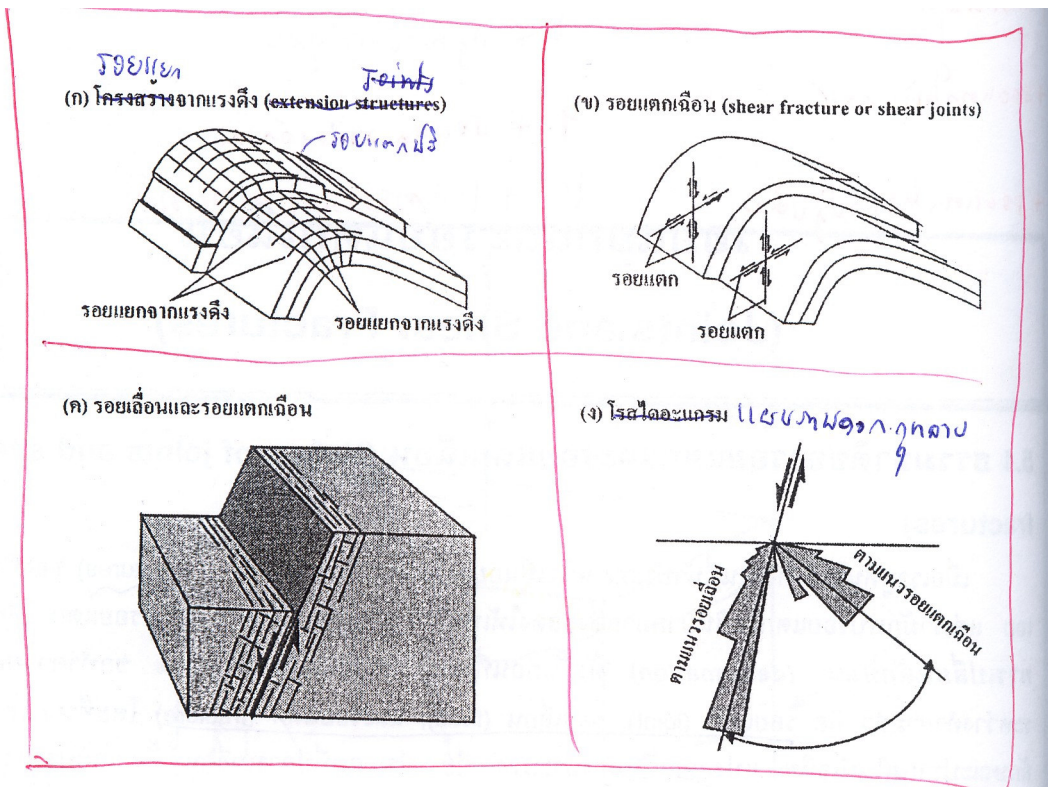
รูป 5.32 รอยแตกแบบตัดขวางรอยโค้ง(cross-fold joints) และ ตามแนวการวางตัว (strike joints) ที่ Catskill Delta ในตอนกลาง New York ซึ่งรอยแตกขวางรอยโค้งจัดเป็นประเภทรอยแตกจากการแปรสัณฐานและไฮดรอลิก(tectonic and hydraulic joints) ส่วนรอยแตกตามแนวการวางตัวจัดเป็นรอยแตกจากการผ่อนคลาย(release and unloading joints) (Engelder และ Oerter, 1985)

รูป 5.33 แผนที่รอยแตกของ Engelder and Geiser (1979) บริเวณที่เดียวกันกับรูป 5.32 (Engelder และ Geiser, 1980)

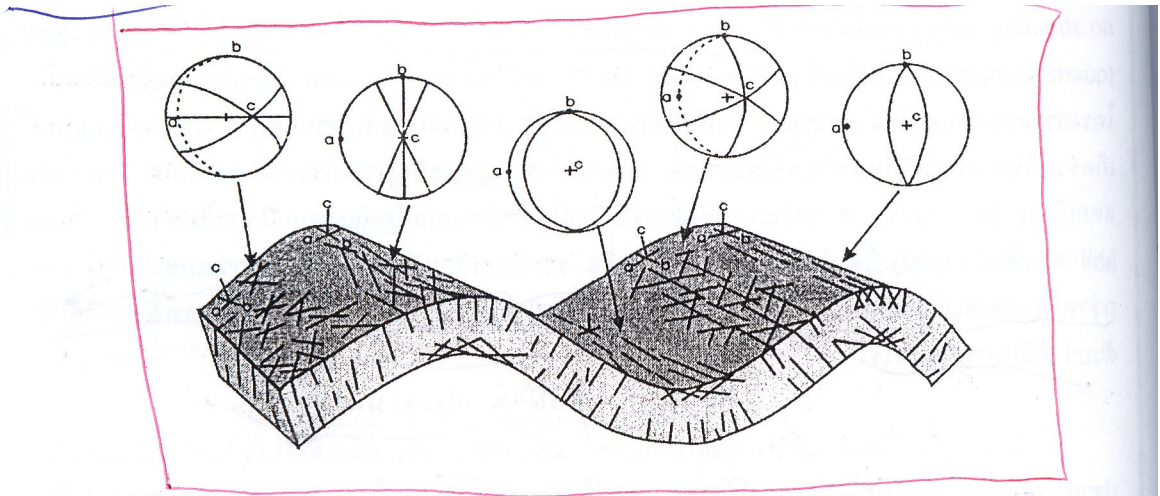
รูป 5.34 แผนภาพแสดงรูปแบบรอยแตกที่ปรากฏจากการแทรกดันในหินอัคนี (Cloos, 1922)



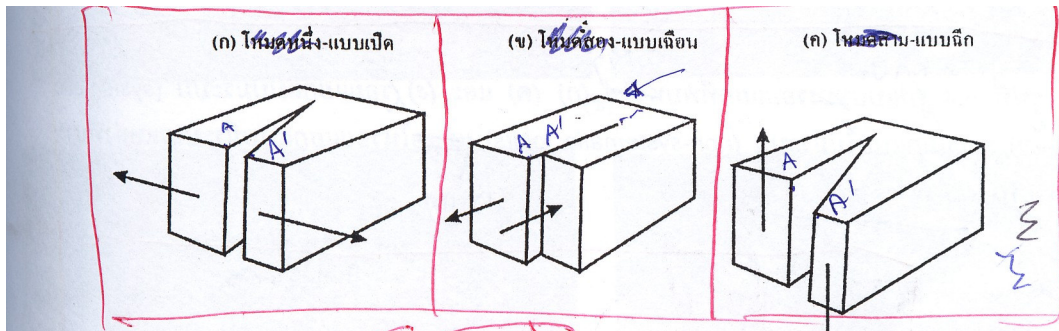




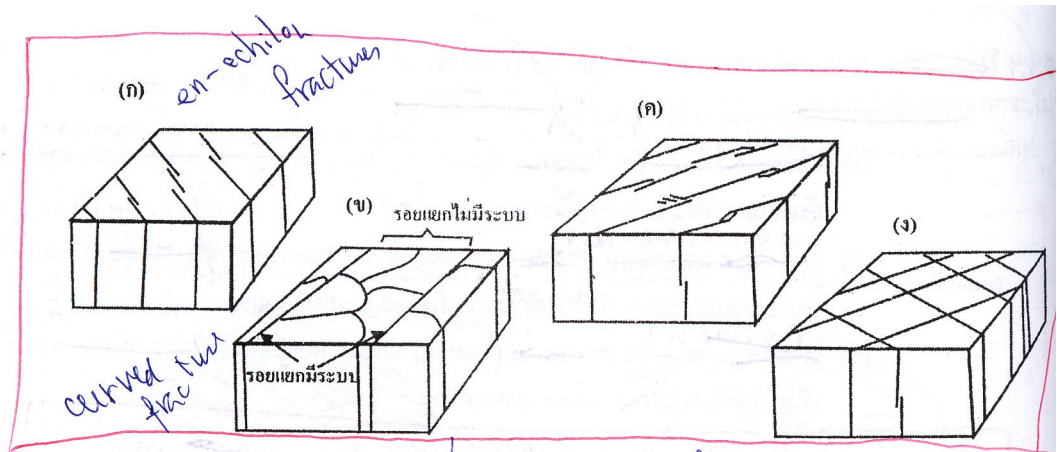
รูปที่ 5.1 รอยแยกที่พบในโครงสร้างการคดโค้งและรอยเลื่อน (ก) รอยแยกเกิดจากแรงดึงหรือบีบอัด (extension) (ข) รอยแตกเฉือน *พบในลักษณะแนว* (conjugate) (ค) รอยเลื่อนและรอยแตกเฉือน *ซึ่งรอยแตกเฉือนเกิดร่วมกับรอยเลื่อน* (ง) ภาพของโรสไดอะแกรม *แสดงเฉพาะทิศทางของรอยแตกเฉือน และรอยแตกตามแนวของรอยเลื่อน* *พบมีสองทิศทาง* (ภาพปรับปรุงต่อจาก Twiss and Moores, 1992)



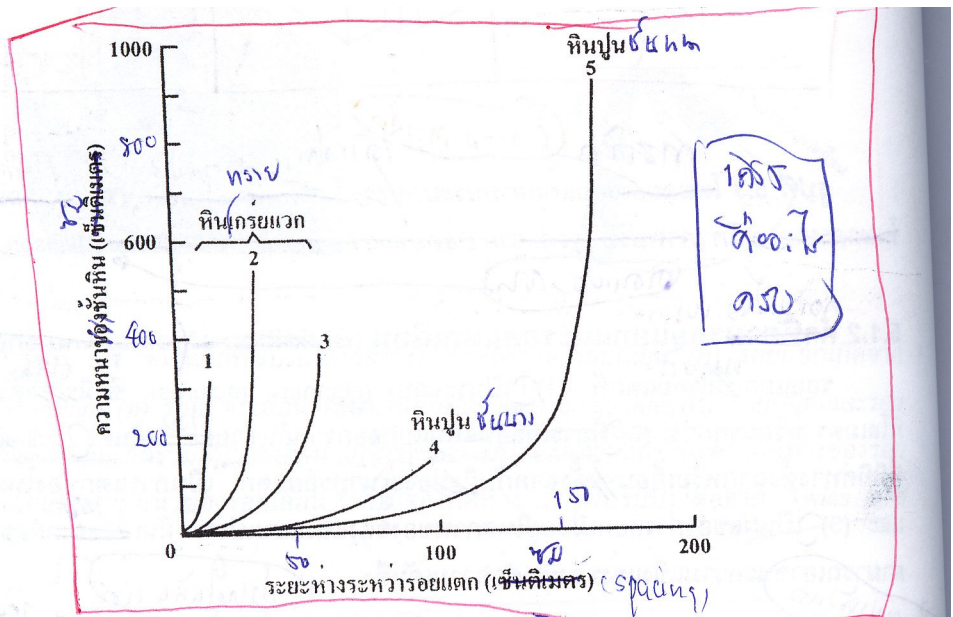
รูปที่ 5.2 รอยแยกและรอยแตกเฉือนในโครงสร้างการคดโค้งในบริเวณต่างๆ พร้อมภาพสเตอริโอเน็ตของแนวรอยแยกและรอยแตกเฉือน ชั้นหินจะแสดงด้วยเส้นปะ ส่วนเส้นทึบในสเตอริโอเน็ตแสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกและรอยแตกเฉือน (ภาพปรับปรุงต่อจาก Twiss and Moores, 1992)



รูปที่ 5.3 โหมดของรอยแตกสามประเภท (ก) โหมดหนึ่ง-แบบเปิด (ข) โหมดสอง-แบบเฉือน (ค) โหมดสาม-แบบฉีก (ภาพปรับปรุงต่อจาก Davis and Reynolds, 1996 อ้างถึง Atkinson, 1987)



รูปที่ 5.4 รูปแบบของรอยแยกที่พบทั่วไป (ก) (ค) และ (ง) รอยแยกแบบมีระบบ (systematic joints) (ข) รอยแยกแบบไม่มีระบบ (non-systematic joints) พบมากในรอยแยกแบบมีระบบ (แหล่งที่มา: Figure 3.10 โดย Twiss and Moores, 1992)



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรอยแยกและความหนาของชั้นหิน ระหว่างหินปูนและหินกรวยแวก (greywackes) (แหล่งที่มา: Figure 3.11 โดย Twiss and Moores, 1992)

นอกจากนี้ มีบางส่วนของรอยแตกพบเป็นลักษณะของการถูกครูดด้วยแรงเฉือน แต่ยังมีบางส่วนไม่ปรากฏการครูด ทั้งนี้เนื่องมาจากการแตกใหม่อีกครั้งของรอยแตกเดิม (reactivate) ซึ่งมีแรงกระทำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงมักพบว่ามีการเฉือนไปตามแนวระนาบหลังจากเกิดรอยแตกมาก่อนแล้ว



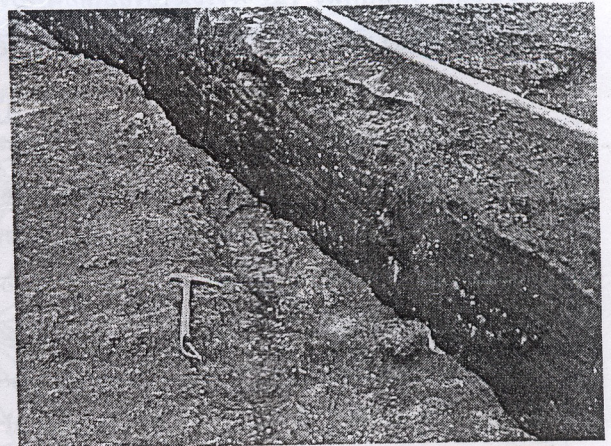
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

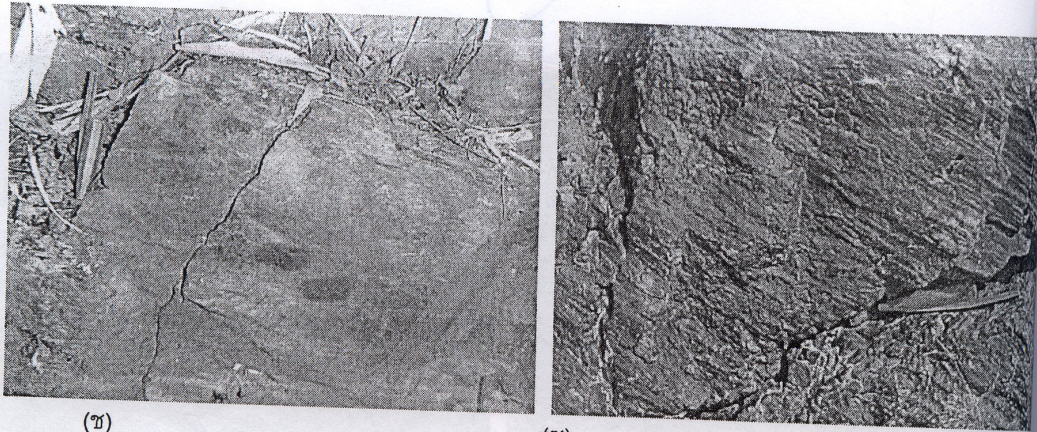


(จ)



(ฉ)

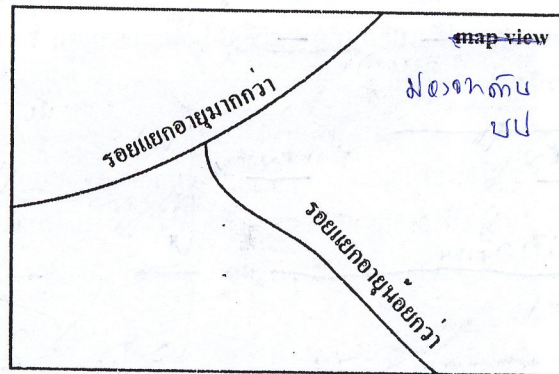
รูปที่ 5.6 ลึกลงของรอยแตกที่พบในสนาม (ก)-(ง) รอยแยกพบในหินทรายกลุ่มหินโคราช เป็นการแตกแบบไหมดหนึ่ง (จ) รอยแยกในหินทราย (แหล่งที่มา: ภาพโดย Robert J. Varga, The college of Wooster) (ฉ) รอยแยกที่ถูกผนังแทรกชั้นของหินอัคนีตัดเข้ามาทำให้พบการหยุดของรอยแยก เป็นการแตกแบบไหมดหนึ่ง



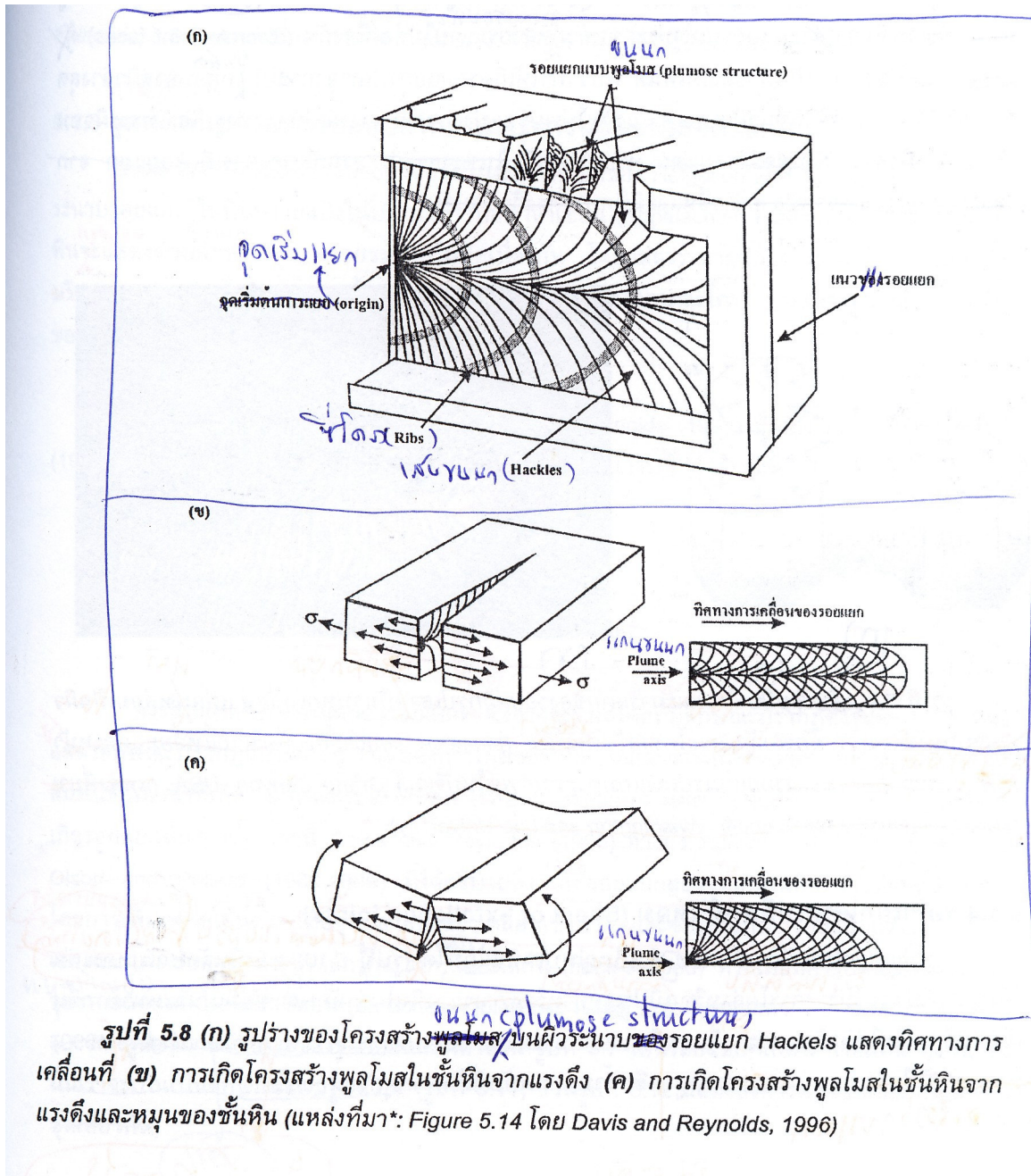
(ข)

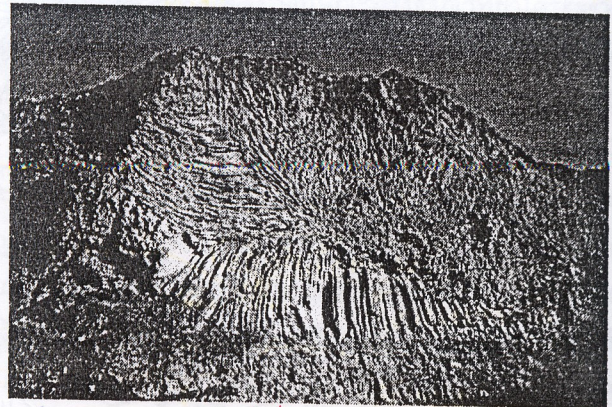
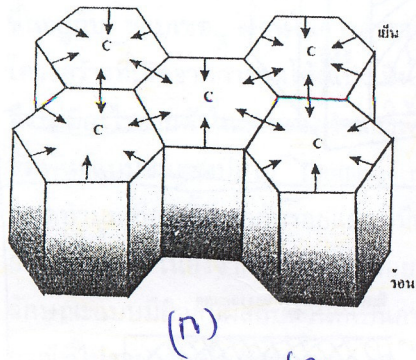
(ค)

รูปที่ 5.6 (ต่อ) (ข) ผิวของระนาบรอยแยก จะพบเป็นลักษณะเรียบไม่มีรอยครูด เป็นการเลื่อนแบบแยก โหมดหนึ่ง (ค) ผิวระนาบรอยเลื่อนพบรอยครูด (slickensite) เป็นหลักฐานบ่งบอกการเลื่อนแบบโหมดสอง และโหมดสาม ในรูปแสดงทิศการเลื่อนอย่างน้อยสองทิศทาง

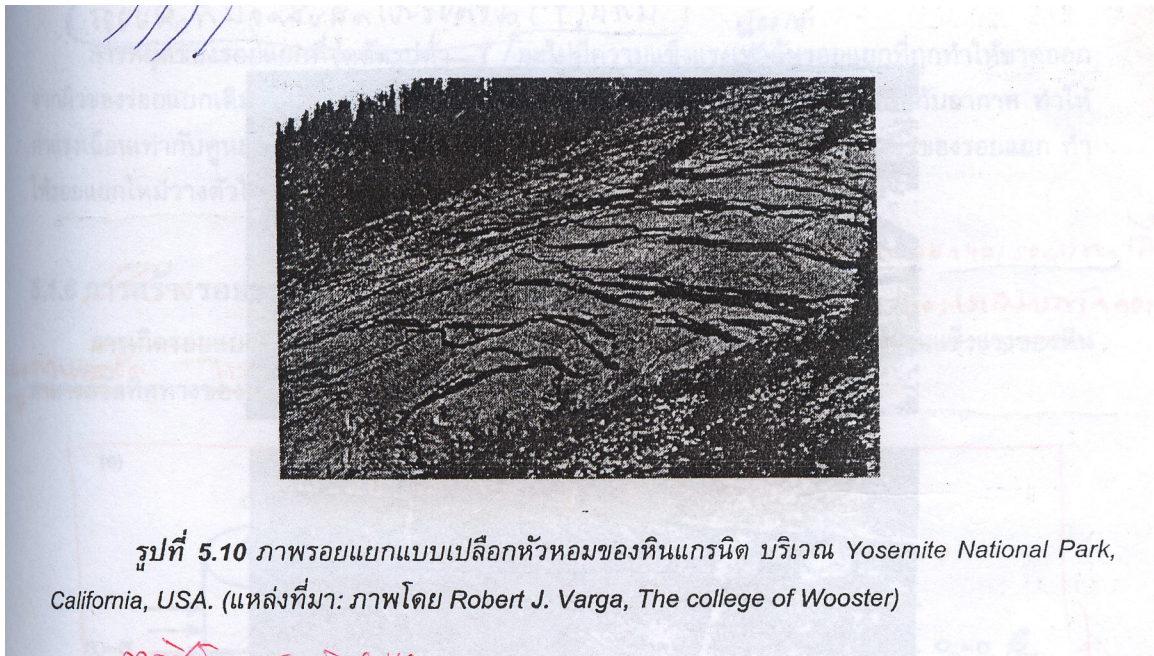


รูปที่ 5.7 การพิจารณาอายุของรอยแยกแบบ butting relationship (ภาพปรับปรุงต่อจาก Richard W. Allmendinger, 2003 Lecture note in Structural geology, Cornell University)





รูปที่ 5.9 ภาพขยายมือ ลักษณะการแตกของรอยแยกรูปเสาคือเป็นรูปหกเหลี่ยม แต่ละเหลี่ยมเป็นหัว  
 ระบายของรอยแยก มักพบลักษณะโครงสร้างพุ่มไม้ (plumose structure) ที่บริเวณเหลี่ยมแต่ละหน้า  
 ด้วย ภาพขวามือเป็นของรอยแยกแบบกระจาย พบในบริเวณ Grand Canyon, USA. (แหล่งที่มา:  
 ภาพขยายมือโดย Edgar Spencer, Washington and Lee University)

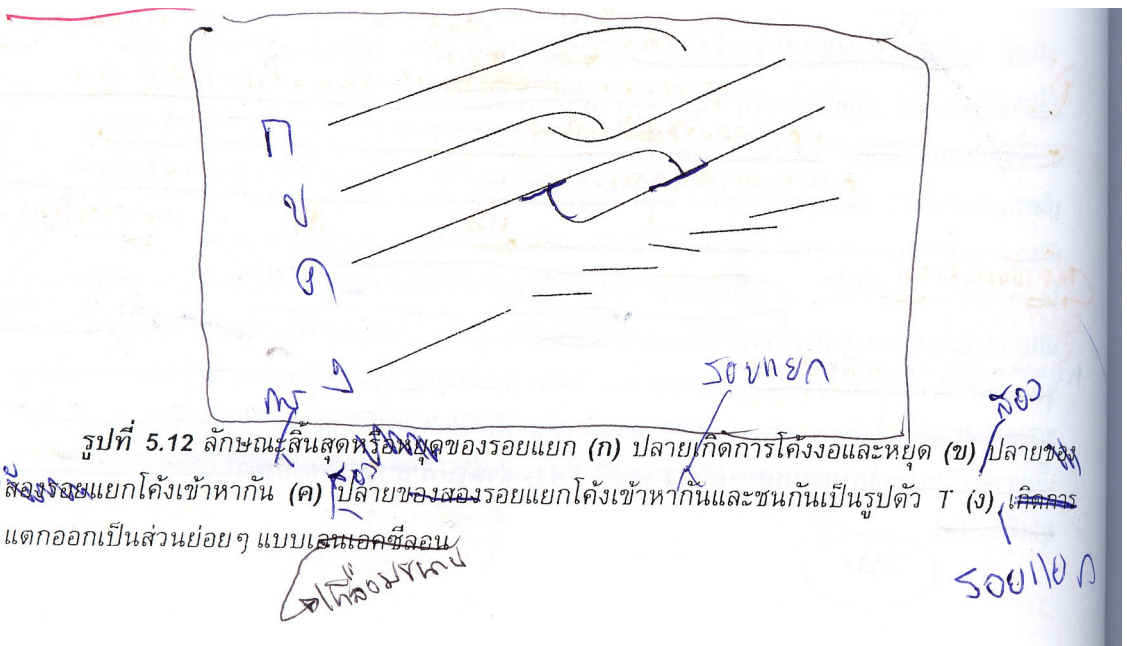


รูปที่ 5.10 ภาพรอยแยกแบบเปลือกหัวหอมของหินแกรนิต บริเวณ Yosemite National Park,  
 California, USA. (แหล่งที่มา: ภาพโดย Robert J. Varga, The college of Wooster)

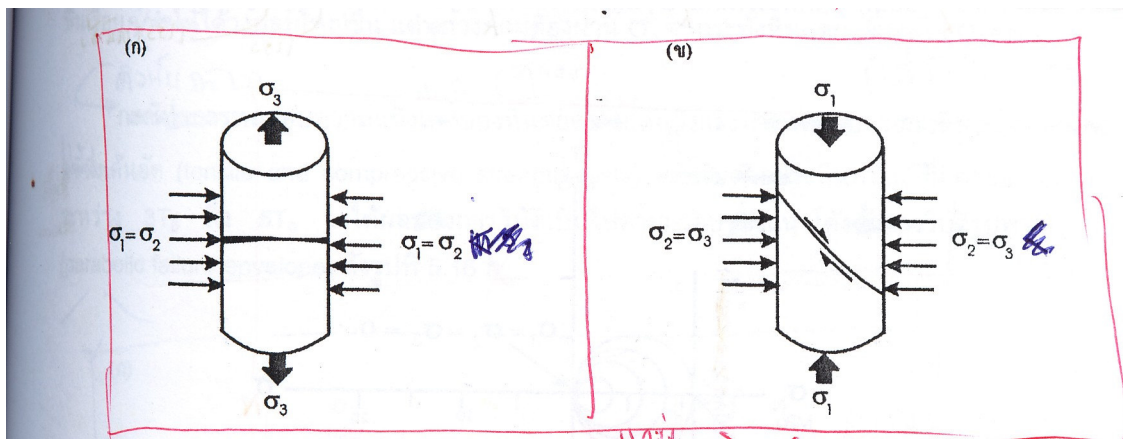




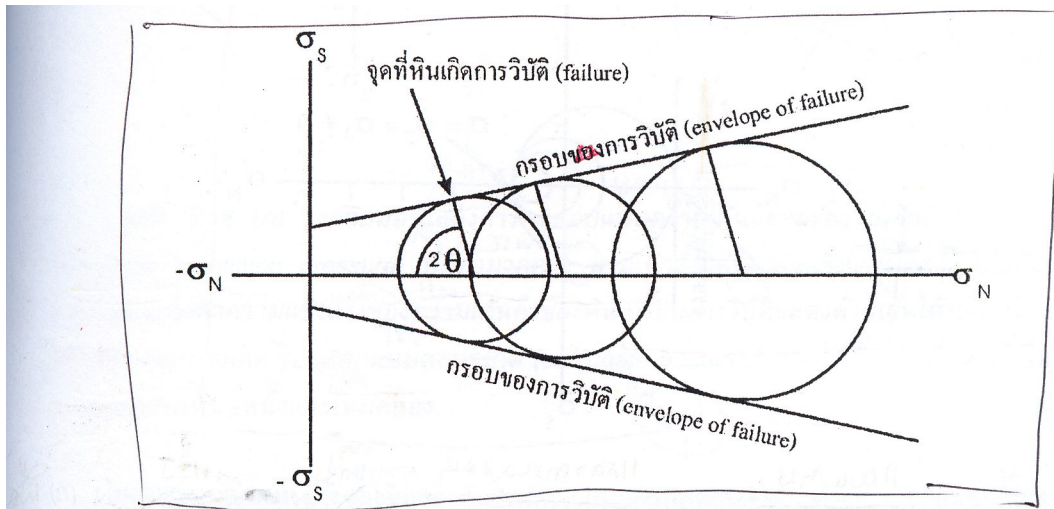
รูปที่ 5.11 ลักษณะการตัดกันของรอยแยก ภาพบนเป็นการตัดกันแบบรูปตัว Y ภาพกลางเป็นการตัดกันแบบรูปตัว X และภาพล่างเป็นการตัดกันรูปตัว T (แหล่งที่มา: Figure 5.30 โดย Davis and Reynolds, 1996)



รูปที่ 5.12 ลักษณะเส้นตรงหรือพหุคูณของรอยแยก (ก) ปลายเกิดการโค้งงอและหยุด (ข) ปลายของสองรอยแยกโค้งเข้าหากัน (ค) ปลายของสองรอยแยกโค้งเข้าหากันและชนกันเป็นรูปตัว T (ง) เกิดการแตกออกเป็นส่วนย่อยๆ แบบเส้นเอคซีออน



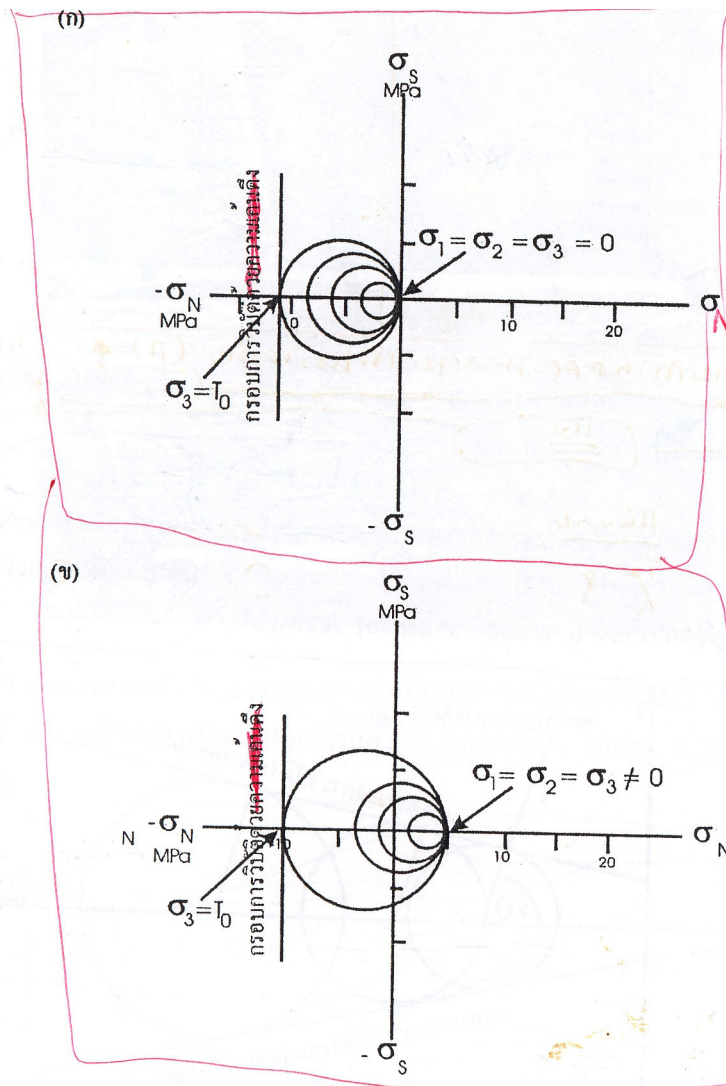
รูปที่ 5.13 (ก) ภาพอุดมคติของการทดลองแบบความแข็งแรงต่อความเค้นดึง (ข) ภาพอุดมคติของการทดลองความแข็งแรงต่อความเค้นอัด



รูปที่ 5.14 <sup>11.4.4.4.4</sup> ~~ไดอะแกรมของวงกลมมอร์~~ <sup>11.5.1.5</sup> เมื่อทำการทดสอบหาการวิบัติ (failure) ของหิน กรอบของการวิบัติ (envelope of failure) พื้นที่ที่อยู่ในกรอบ เป็นเขตที่หิน ~~ไม่เกิดการวิบัติ~~ แต่ถ้ามีค่าความแตกต่างทางความเค้น ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) มากเกินออกไปจากกรอบจะเกิดการวิบัติทันที

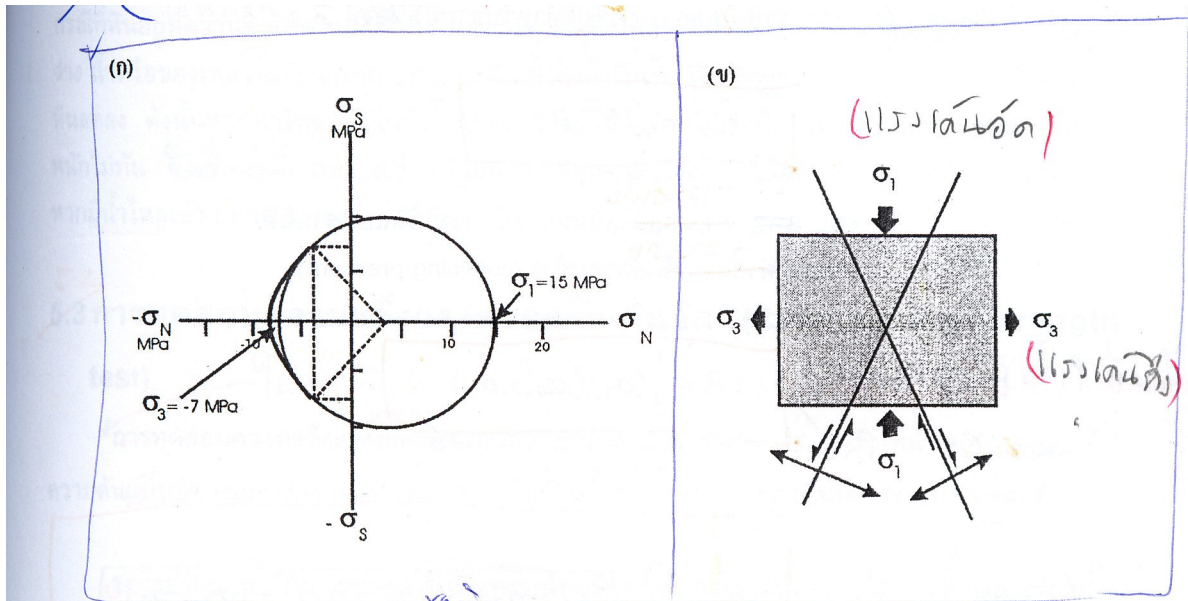
ทันที

หรือโดยแตกหักเกิดขึ้น  
 51 หรือ  $\sigma_1$  กับ  $\sigma_3$  จนเกินกรอบ  
 การวิบัติ ทันที: 51 หรือ  $\sigma_1$

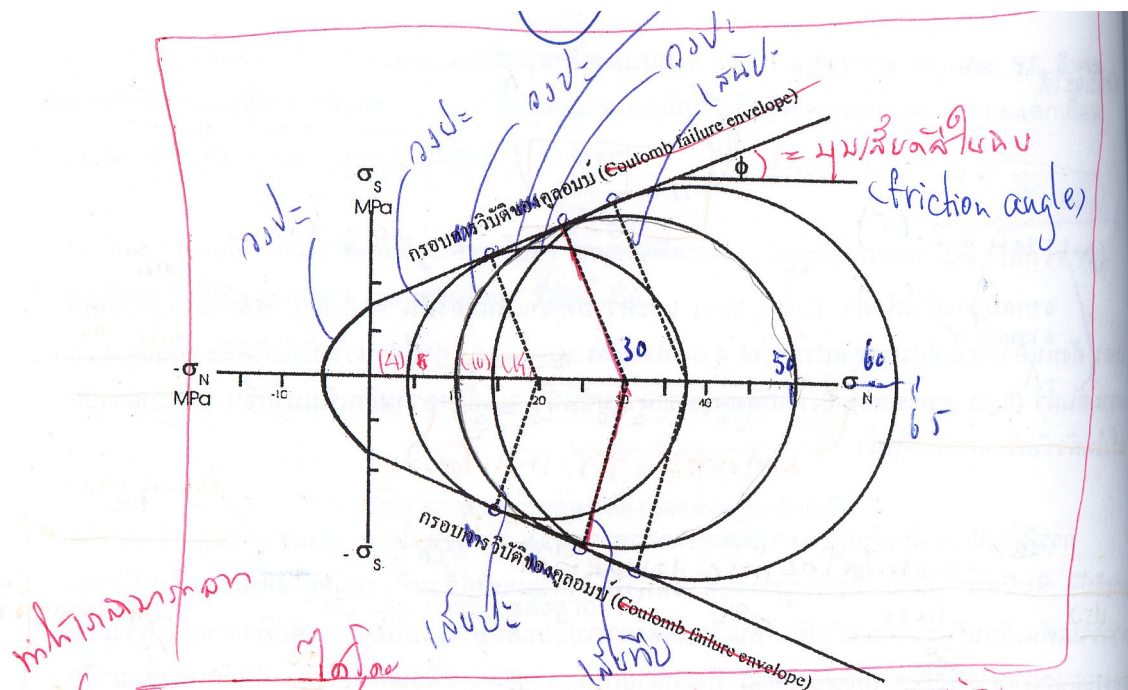


รูปที่ 5.15 <sup>115</sup> โดยกรรมของวงกลมมอร์ของการทดสอบความแข็งแรงของหินต่อ <sup>115</sup> ~~ความเค้นดึง~~ <sup>115</sup> (ก) <sup>115</sup> ไม่มีความดันรอบข้าง (no confining pressure) วงกลมแสดงการเพิ่มขึ้นของความเค้นดึง <sup>115</sup> ~~ก่อนถึง~~ <sup>115</sup> เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมคือ ค่าความแตกต่างของความเค้น <sup>115</sup> (differential stress) (ข) <sup>115</sup> เมื่อมีความดันรอบข้าง (confining pressure) <sup>115</sup> เป็น <sup>115</sup> การทดสอบแบบให้ <sup>115</sup> ความเค้นอัดก่อนต่อมาให้ <sup>115</sup> ความเค้นดึง <sup>115</sup> ซึ่งเรียกว่า <sup>115</sup> การทดสอบความเค้นอัดและความเค้นดึง (compressive and tensile strength test) <sup>115</sup> ดึงเค้นอัด

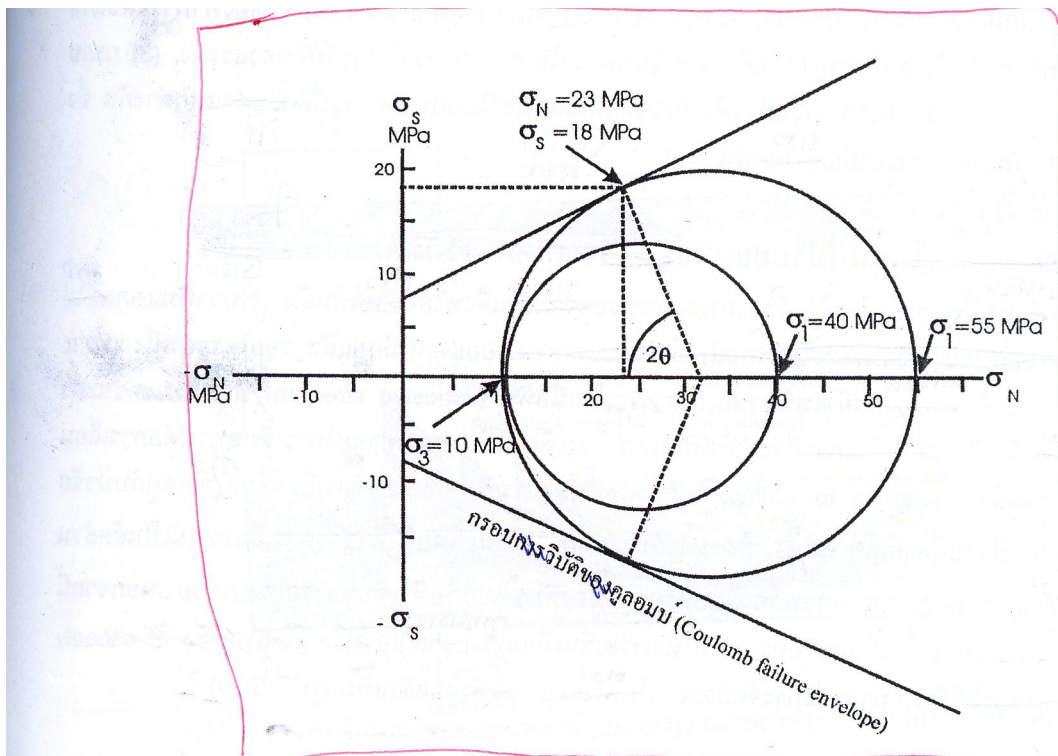
โดยเริ่มทดสอบให้ทรู เจนอัดก่อนให้ดึง กิ่ง 10 องศา เพิ่ม 115



รูปที่ 5.16 (ก) วงกลมมอร์แสดงการทดสอบแบบความเค้นอัดและกรรมเค้นดึงภายใต้ความเค้นอัดรอบข้าง (confining pressure) ที่มีค่ามากกว่า ตามเท่าของค่าความแข็งแรงต่อความเค้นดึงแต่โดยทั่วไปค่าความแข็งแรงของกรรมเค้นดึงของหิน กรอบการวิบัติแสดงด้วยเส้นโค้งพาราโบลา (เส้นสีดำเข้ม) (ข) การเกิด รอยแตกแบบคอนจูเกต (conjugate fractures) ภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวไว้ใน ข พหุคูณหน้า 16 หน้า 500 หน้า

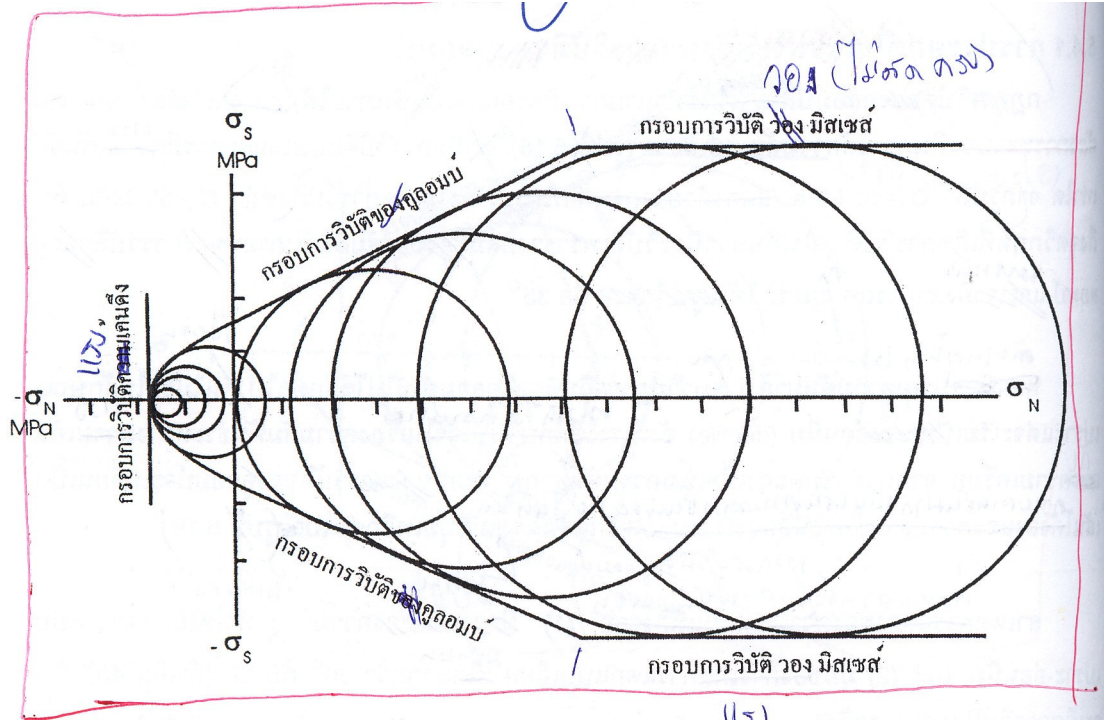


รูปที่ 5.17 วงกลมมอร์แสดงการทดสอบแบบความเค้นอัด โดยให้ความดันเริ่มต้น 4, 10, และ 14 MPa กรอบของการวิบัติลวกสมผัสกับจุดที่แสดงระนาบของการแตก

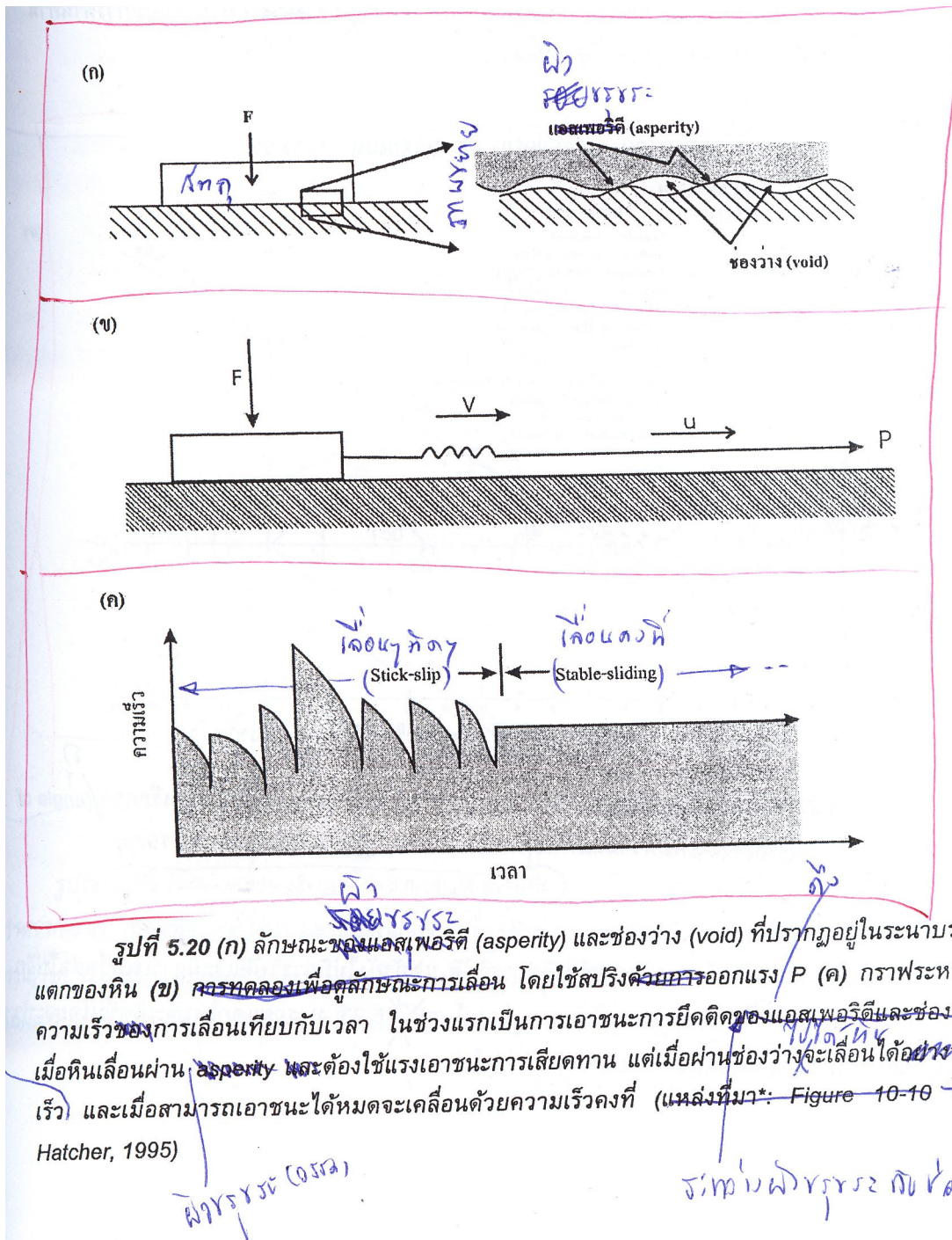


รูปที่ 5.18 เส้นกรอบการวิบัติของคูลอมบ์ ดังนั้นสามารถที่จะทำนายการวิบัติที่เกิดขึ้น ถ้ามีความดันรอบข้าง 10 MPa หากให้ค่าความเค้นอัดเพิ่มเป็น 40 MPa จะยังไม่เกิดการวิบัติ แต่ถ้าหากเพิ่มเป็น 55 MPa จะถึงจุดวิกฤตเมื่อเกินไปจากนี้ห็นจะเกิดการวิบัติ

คูลอมบ์  
 15  
 10  
 20  
 30  
 40  
 50  
 60  
 70  
 80  
 90  
 100  
 110  
 120  
 130  
 140  
 150  
 160  
 170  
 180  
 190  
 200  
 210  
 220  
 230  
 240  
 250  
 260  
 270  
 280  
 290  
 300  
 310  
 320  
 330  
 340  
 350  
 360  
 370  
 380  
 390  
 400  
 410  
 420  
 430  
 440  
 450  
 460  
 470  
 480  
 490  
 500  
 510  
 520  
 530  
 540  
 550  
 560  
 570  
 580  
 590  
 600  
 610  
 620  
 630  
 640  
 650  
 660  
 670  
 680  
 690  
 700  
 710  
 720  
 730  
 740  
 750  
 760  
 770  
 780  
 790  
 800  
 810  
 820  
 830  
 840  
 850  
 860  
 870  
 880  
 890  
 900  
 910  
 920  
 930  
 940  
 950  
 960  
 970  
 980  
 990  
 1000



รูปที่ 5.19 เส้นกรอบการวิบัติต่างๆ ที่พบในหินทั่วไปเมื่อเพิ่ม  $\sigma_1$  มากขึ้นเรื่อยๆ พบว่ากรอบการวิบัติของคูลอมบ์ไม่สามารถทำนายได้จะได้กรอบการวิบัติของ มิสเซส (Von Mises failure) 174

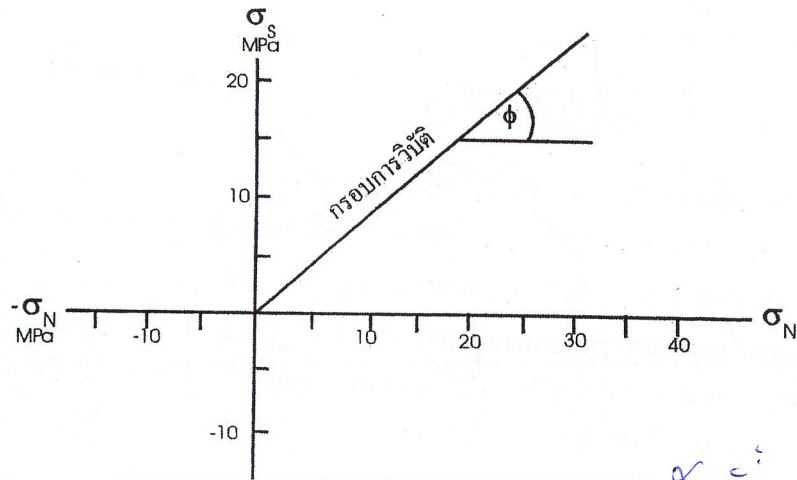


รูปที่ 5.20 (ก) ลักษณะของแอสนเพอริตี้ (asperity) และช่องว่าง (void) ที่ปรากฏอยู่ในระนาบรอยแตกของหิน (ข) การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อน โดยใช้สปริงด้วยแรงออกแรง  $P$  (ค) กราฟระหว่างความเร็วของการเคลื่อนเทียบกับเวลา ในช่วงแรกเป็นการเอาชนะการยึดติดของแอสนเพอริตี้และช่องว่าง เมื่อหินเคลื่อนผ่าน asperity และต้องใช้แรงเอาชนะการเสียดทาน แต่เมื่อผ่านช่องว่างจะเคลื่อนได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อสามารถเอาชนะได้หมดจะเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ (แหล่งที่มา: Figure 10-10 โดย Hatcher, 1995)

ผิวสัมผัส (ผิวสัมผัส)

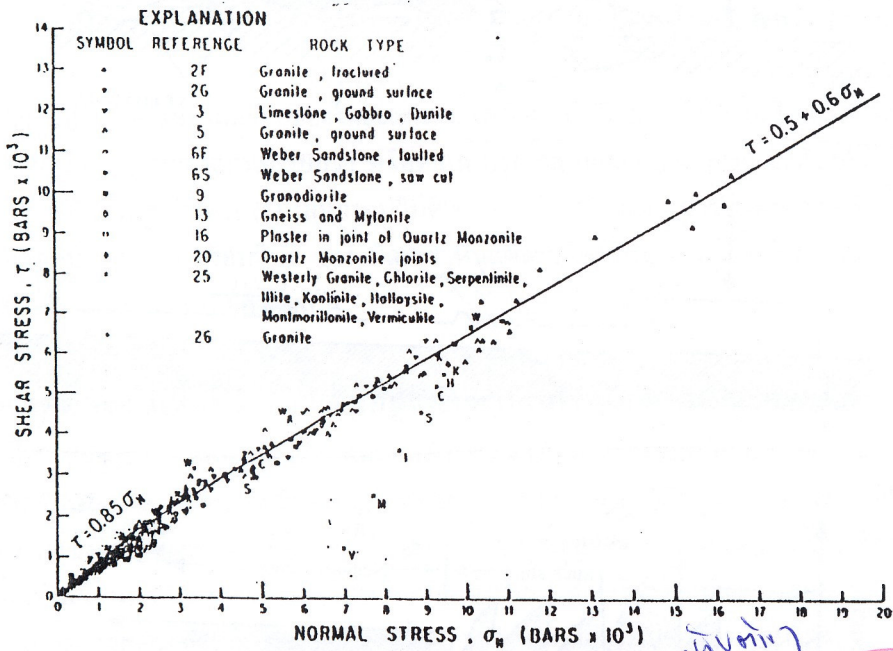
ร่วมกับผิวสัมผัส กับผิวร่วม





รูปที่ 5.21 โค้งความเค้นของมอร์เมื่อไม่มีค่ายึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดขนาด  $\phi$  คือมุมการต้านทานต่อการเลื่อนไถลหรือครูด (angle of sliding friction)

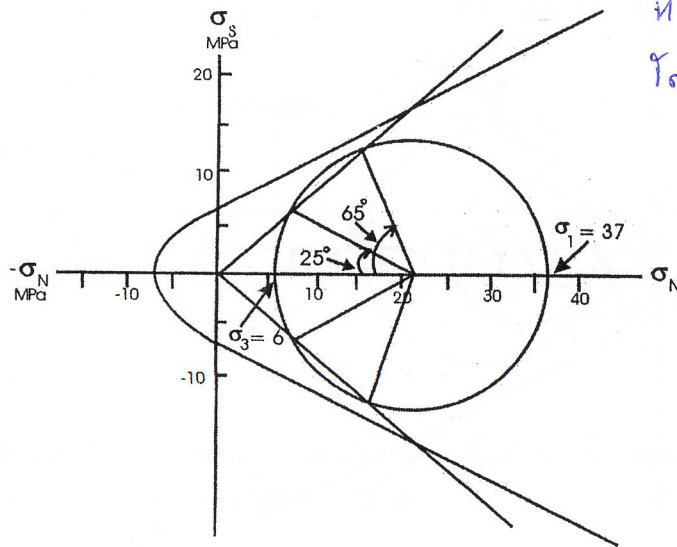
FRICITION MEASURED AT MAXIMUM STRESS



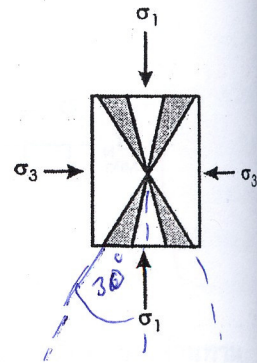
รูปที่ 5.22 ไบเยอร์ลี (Byerlee) ได้คำนวณหามุมการต้านทานต่อการเลื่อนไถลหรือครูด (angle of sliding friction) ของหินต่าง ๆ พบความสัมพันธ์ดังแสดงในกราฟ (แหล่งที่มา: Byerlee, 1978)

รหัสนี้ หรือเลขที่อื่น กับ เลขที่อื่น

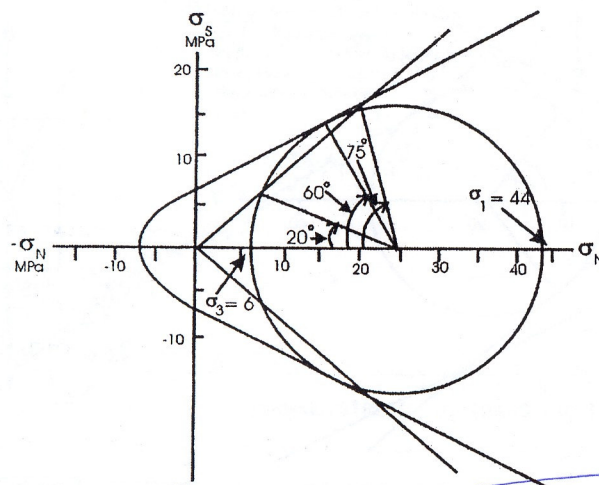
(ค)



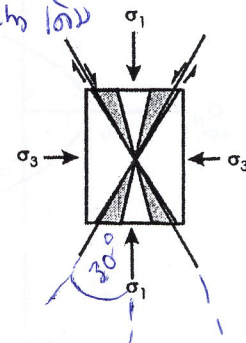
หินเกิดรอยร้าวโดยรอบหินไม่ร่อน



(ง)

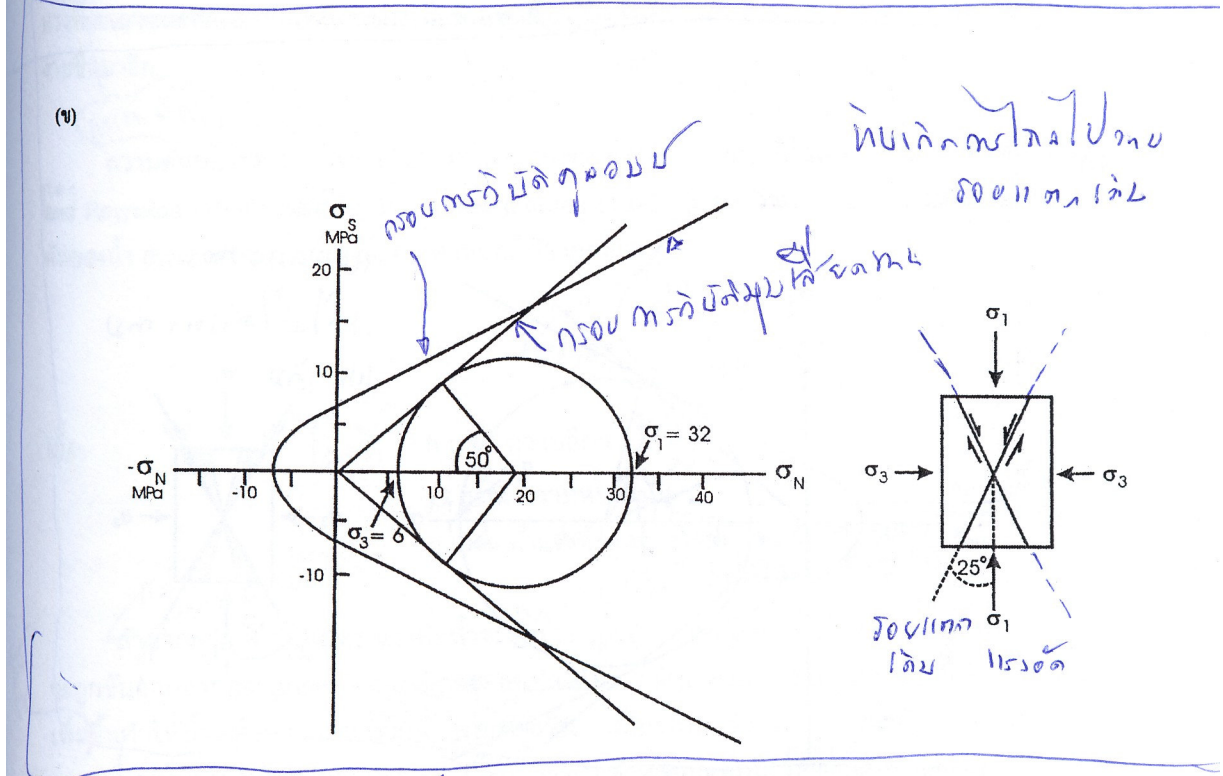
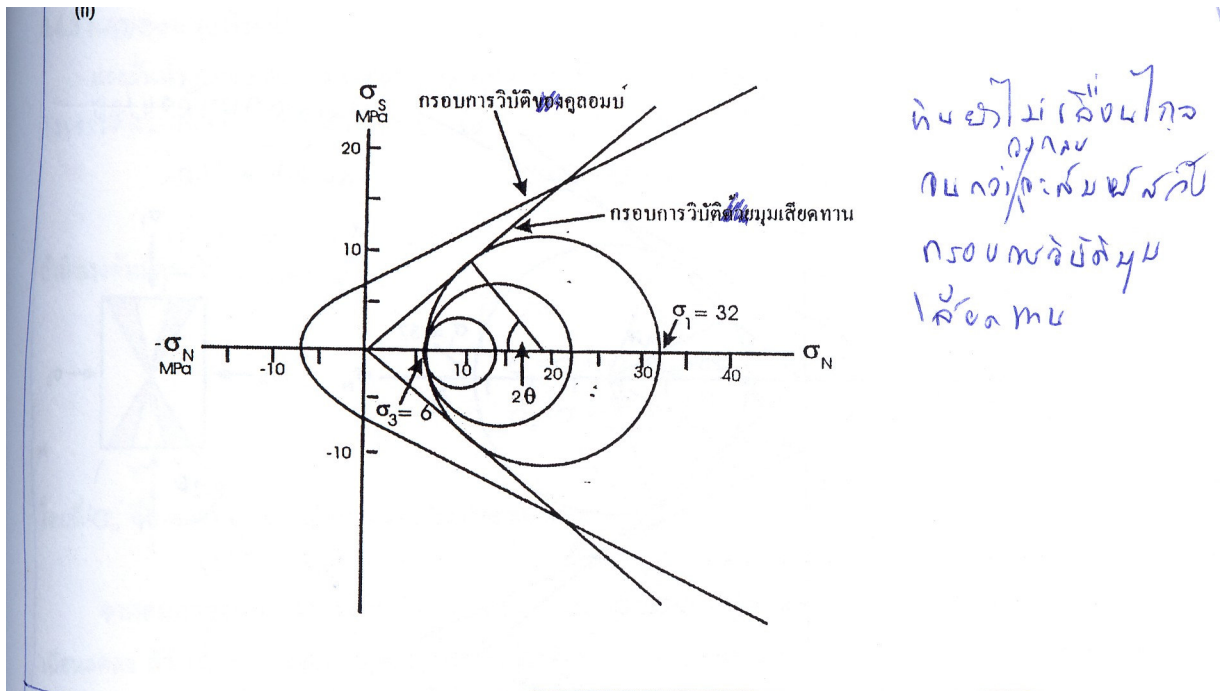


หินเกิดรอยแตกแต่ยังไม่ได้ออกมาเลย

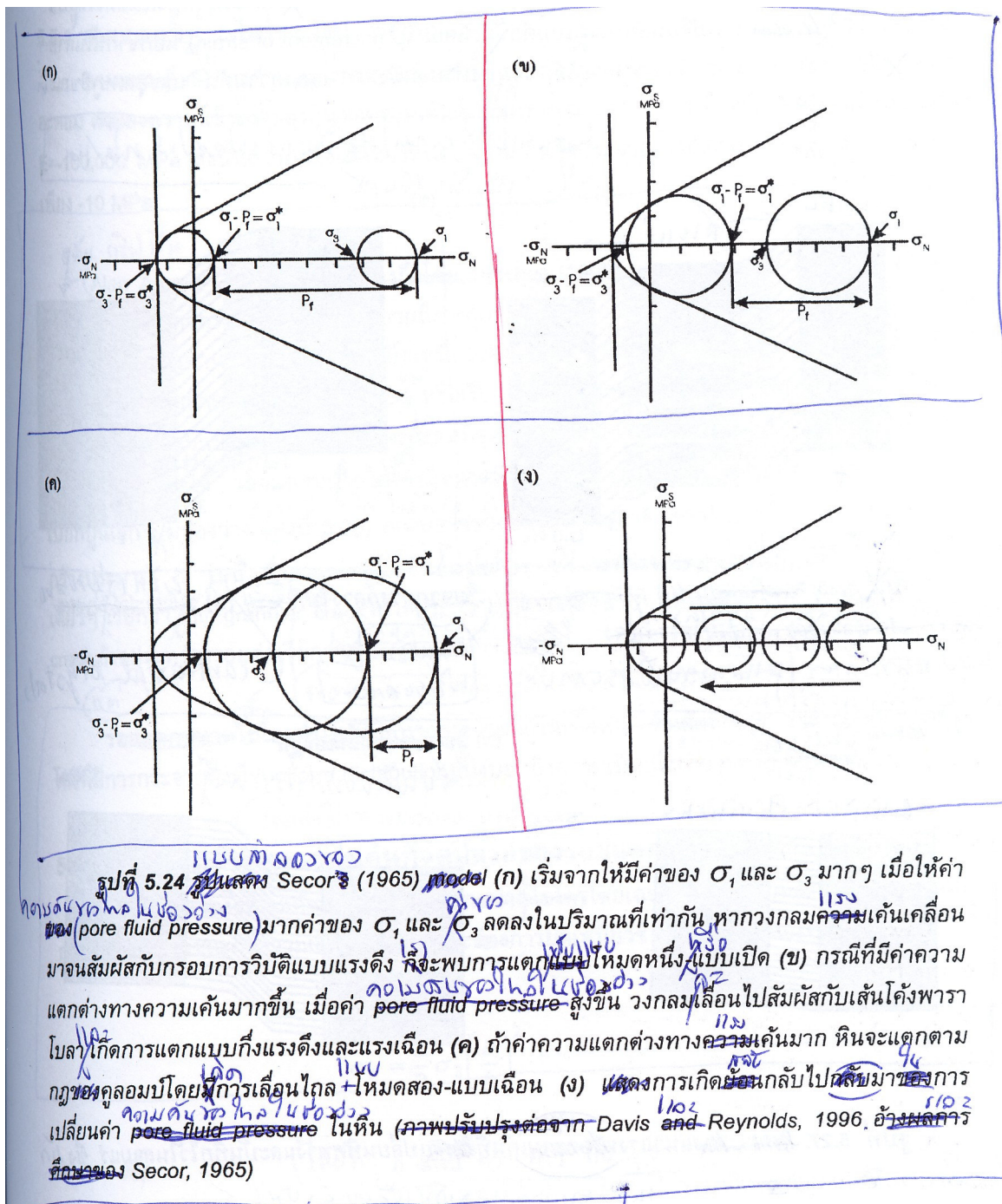


รูปที่ 5.23 (ต่อ) (ค) สมมติให้หินยังไม่เกิดการวิบัติและเพิ่มค่าของ  $\sigma_1$  เลยกออกไปจากกรอบการวิบัติมุมเสียดทาน จนกระทั่ง  $\sigma_1 = 37 \text{ MPa}$  ถ้ามีรอยแตกเดิม ระหว่าง  $12.5^\circ$  และ  $32.5^\circ$  หินจะเกิดการเลื่อนไถล (ง) สมมติให้หินยังไม่มีการวิบัติและเพิ่ม  $\sigma_1$  ขึ้นจนสัมผัสกับกรอบการวิบัติคูลอมบ์ หินแตกตามกฎของคูลอมบ์ หินไม่มีการแตกตามแนวแตกเดิมอีกต่อไป (ภาพปรับปรุงต่อจาก Davis and Reynolds, 1996)

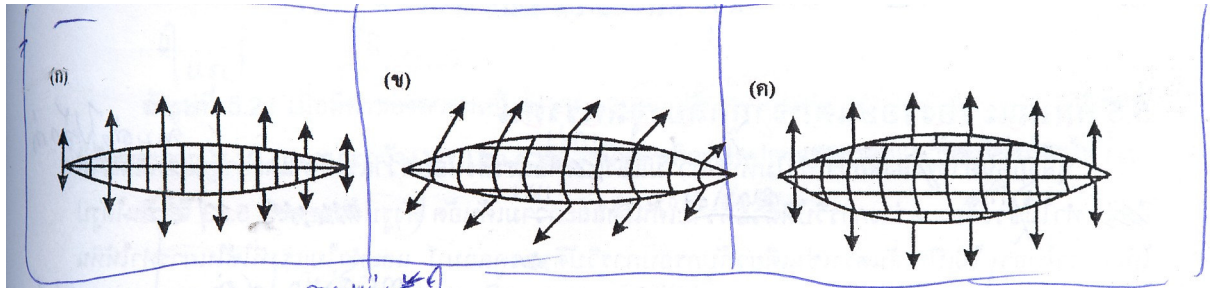
Handwritten notes in blue ink: 'รอยร้าว' (cracks), 'มุม 15' (angle 15), '1/50', 'รอย' (cracks), and a circled '15'.



รูปที่ 5.23 <sup>แบบคาน</sup> ~~โดย~~ <sup>แนว</sup> ~~แสดง~~ <sup>แนว</sup> กรอบการวิบัติแบบดูลอมบ์และกรอบการวิบัติแบบมุมเสียดทาน (ก) <sup>แนว</sup>  
 กำหนดให้  $\sigma_3$  มีค่าคงที่เท่ากับ 6 MPa <sup>แนว</sup> เพิ่มค่า  $\sigma_1$  ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสัมผัสกับกรอบการวิบัติแบบมุมเสียดทาน <sup>แนว</sup>  
 (ข) ถ้ามีรอยแตกเดิมที่ทำมุม =  $25^\circ$  (ซึ่งเท่ากับมุม  $2\theta$  ที่เกิดจากเส้นรัศมีวงกลมที่ลากไปยังจุดสัมผัสกับแกน  $\sigma_N$ ) กับ  $\sigma_1$  จะเกิดการเลื่อนไหลไปตามรอยแตกเดิม <sup>แนว</sup>  
<sup>11.25</sup>  
<sup>11.25</sup>



รูปที่ 5.24 แบบจำลอง Secor's (1965) model (ก) เริ่มจากให้มีค่าของ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  มากๆ เมื่อให้ค่าความดันของไหลในช่องว่าง (pore fluid pressure) มากค่าของ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  ลดลงในปริมาณที่เท่ากัน หากวงกลมความเค้นเคลื่อนมาจนสัมผัสกับกรอบการวิบัติแบบแรงดึง ก็จะพบการแตกแบบใหม่หนึ่งแบบเปิด (ข) กรณีที่มีค่าความแตกต่างทางความเค้นมากขึ้น เมื่อค่า pore fluid pressure สูงขึ้น วงกลมเลื่อนไปสัมผัสกับเส้นโค้งพาราโบลาเกิดการแตกแบบกึ่งแรงดึงและแรงเฉือน (ค) ถ้าค่าความแตกต่างทางความเค้นมาก หินจะแตกตามกฎของคูลอมบ์โดยการเลื่อนไถล + ใหม่สอง-แบบเฉือน (ง) แสดงการเกิดย้อนกลับไปกลับมาระหว่างเปลี่ยนค่า pore fluid pressure ในหิน (ภาพปรับปรุงจาก Davis and Reynolds, 1996 อ้างผลการศึกษานี้ของ Secor, 1965)



รูปที่ 5.25 การเกิด fiber vein ซึ่งเป็นผลจากรอยแตกโดยเริ่มจาก (ก) เกิดโหมดหนึ่ง-แบบเปิด (ข) ต่อมาเกิดโหมดสอง-แบบเงื่อนไขร่วมด้วย และ (ค) ที่ปรากฏสุดท้ายของลำดับการเกิดของ fiber vein

*จากหนังสือ*

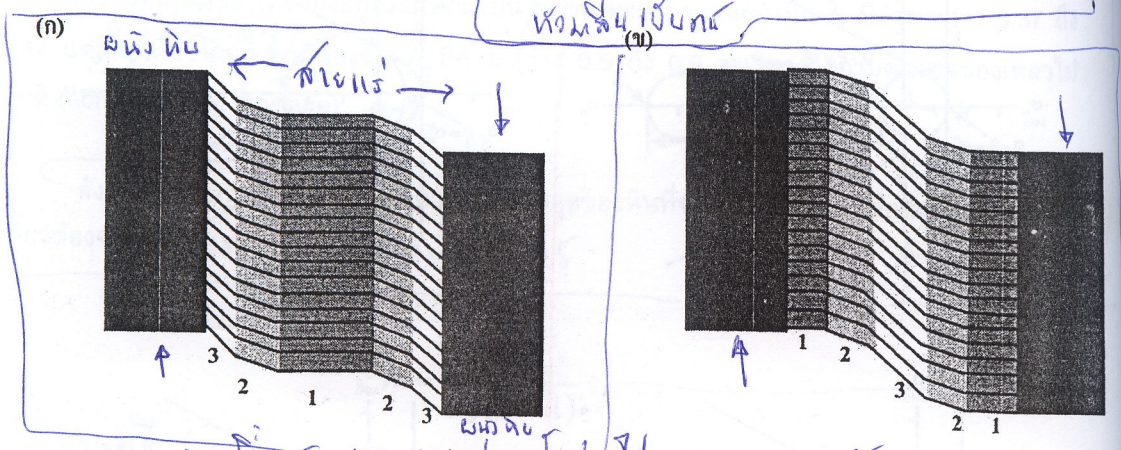
*So et al. 1997*

โดยพิจารณา หน้า (198)

ที่กระหน่ำ

เราสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะ และทิศทางของ <sup>แนว</sup>ความเค้นในสายแร่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.26 และ 5.27 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป (increment of strain) นอกจากนี้ในสายแร่อาจจะมีแร่บางตัวที่สามารถนำมาหาอายุได้ รวมทั้งบ่งบอกถึงสภาพของความดัน และอุณหภูมิขณะที่เกิดสายแร่ขึ้นๆได้

แนวสายแร่ปกติที่มุม  $45^\circ$  หรือ  $135^\circ$  หอนลับเป็นปกติ



รูปที่ 5.26 การเกิดแบบ (ก) *antiaxial crystal* เริ่มจากตรงกลางไปที่ <sup>ผนัง</sup> wall (ข) *syntaxial crystal* เริ่มจาก wall rock เคลื่อนมาตรงกลาง

ลักษณะของแนวสายแร่แบบสองเหลี่ยม (syntaxial crystal) ในรูป แนวหลัก 1 มีแนวความเค้นหลักสองแนว แนวหลัก 3 เปลี่ยนแนวระนาบ

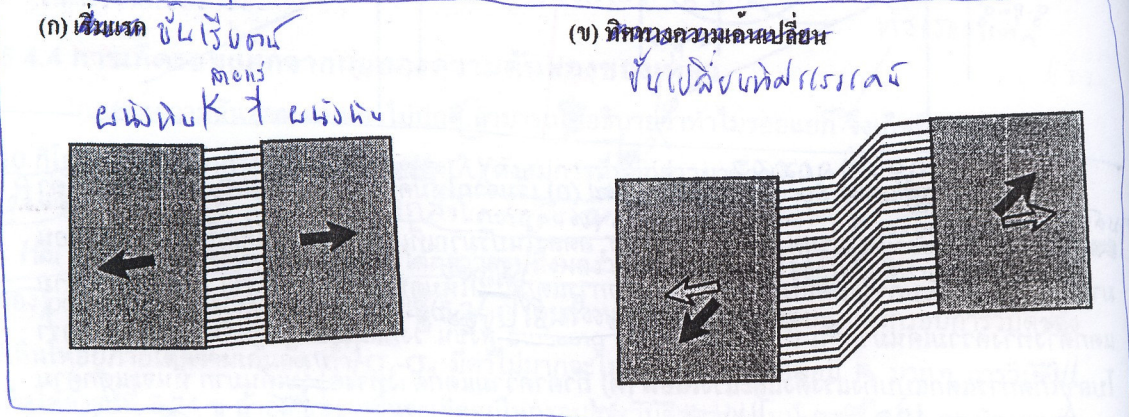
แนวสายแร่เปลี่ยนลักษณะ

ผนัง

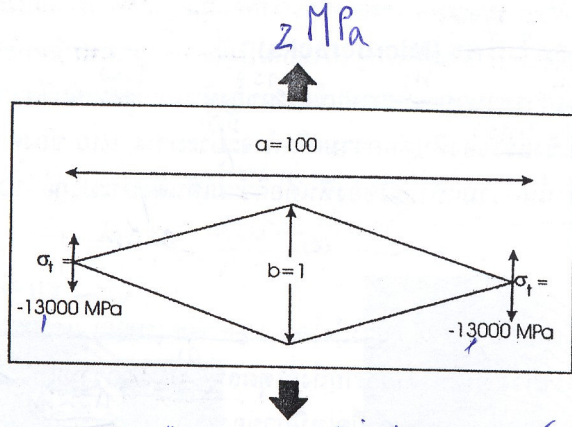
ผนังเริ่มเปลี่ยน

ผนังเริ่มเปลี่ยน

ผนังเริ่มเปลี่ยน



รูปที่ 5.27 ทิศทางของแนวแรงหรือความเค้นที่มีผลเปลี่ยนทิศทางและบันทึกไว้ในสายแร่ ซึ่ง มักจะยาวนานไปกับแนวของผลึกแร่ ในรูป สายแร่ แสดงแนวเปลี่ยนลักษณะ

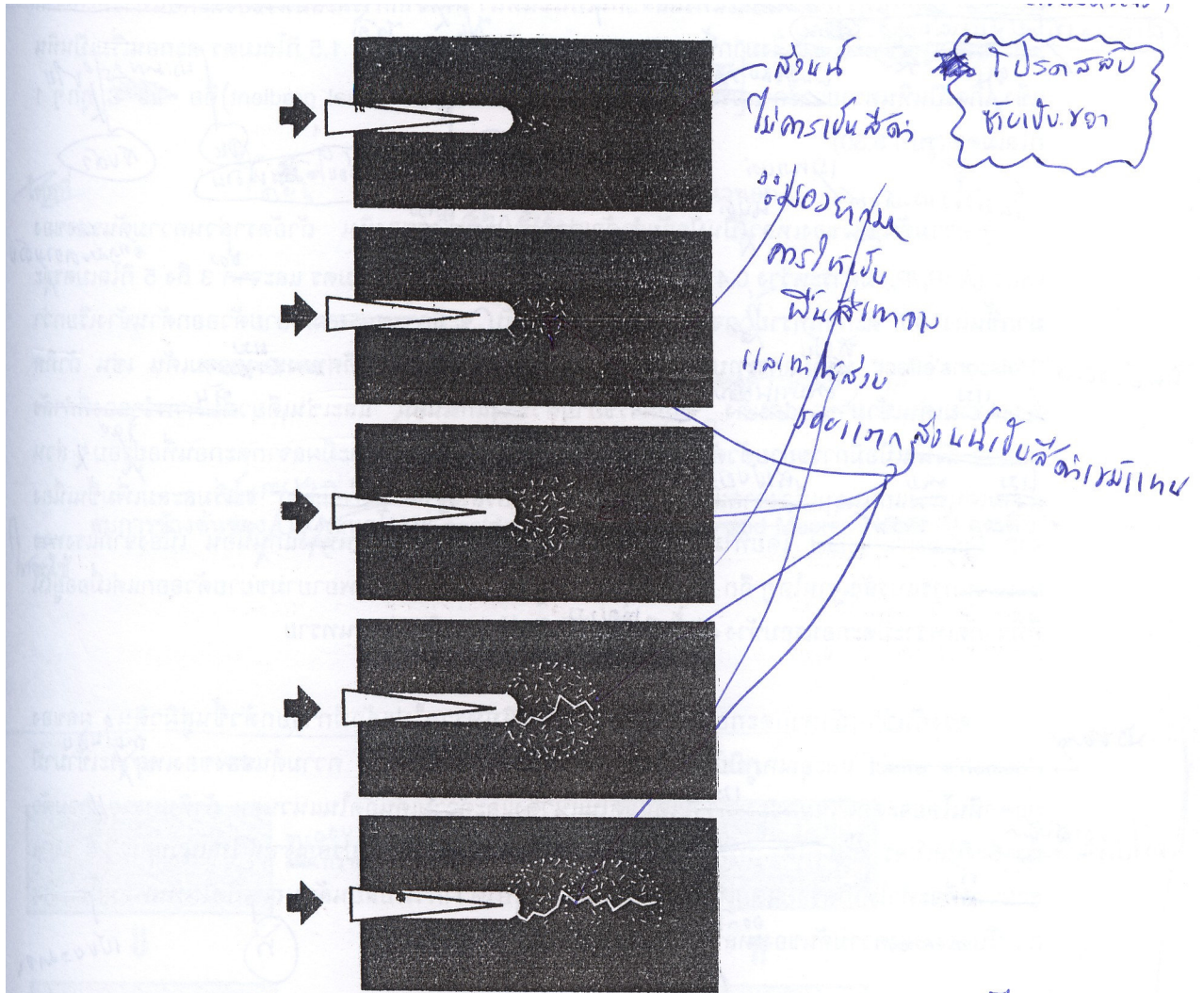


รูปที่ 5.28 การเกิดรอยแตกในบริเวณจุดปลายของรอยแตกขนาดไมโคร โดยมี tensile stress เกิดขึ้นเพียง  $-2 \text{ MPa}$  ในพื้นที่จุดปลายหากมีความกว้าง  $(b) 1 \mu\text{m}$  และความยาว  $(a) 100 \mu\text{m}$

รอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจุดที่มีรูปทรงคล้ายเส้นโค้งหรือรอยแตกที่มีรูปร่างคล้ายเส้นโค้ง

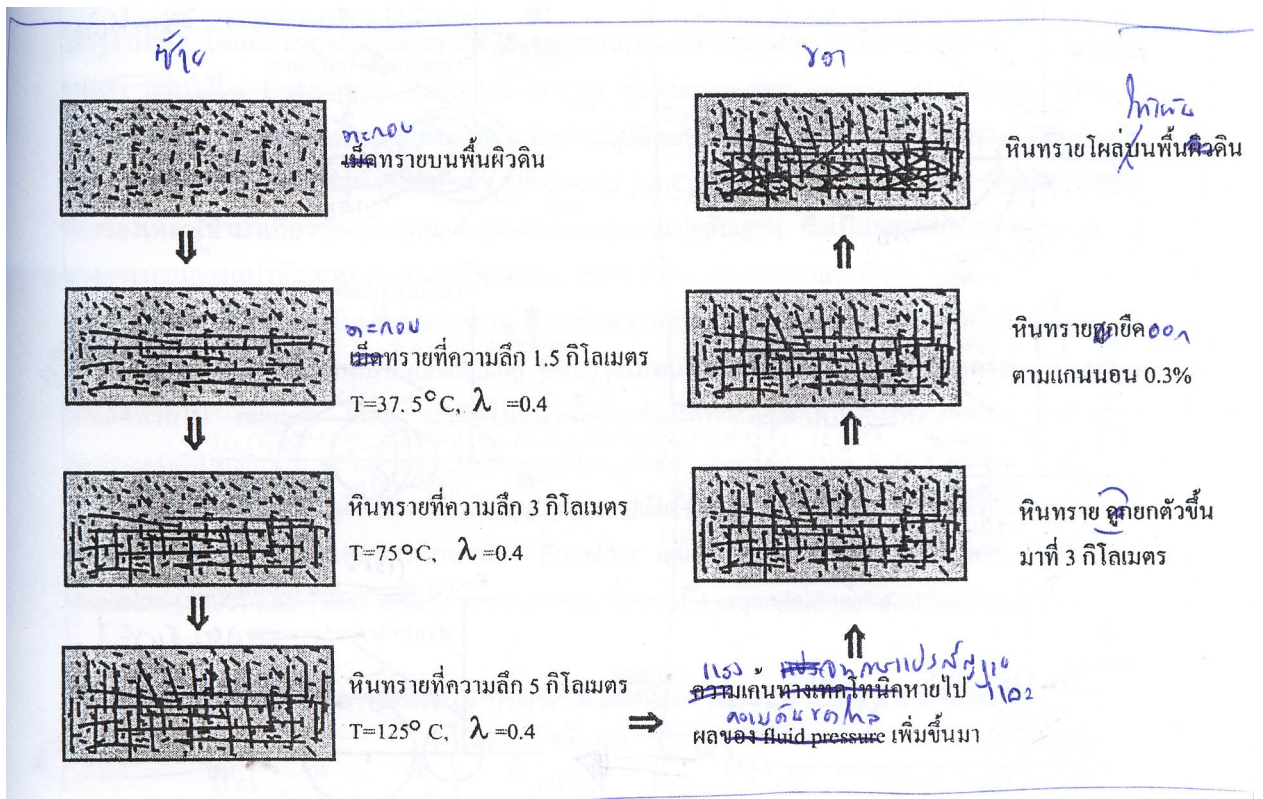
รอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจุดที่มีรูปทรงคล้ายเส้นโค้งหรือรอยแตกที่มีรูปร่างคล้ายเส้นโค้ง

รอยแตกขนาดเล็กหรือรอยแตกจุดที่มีรูปทรงคล้ายเส้นโค้งหรือรอยแตกที่มีรูปร่างคล้ายเส้นโค้ง



รูปที่ 5.29 <sup>รับจาก</sup> ~~การแพร่กระจายของรอยแตก จากการทดลองโดยผ่านแรงไปตามแนวรูปลิ้ม~~  
 (แหล่งที่มา: Figure 5.58 โดย Davis and Reynolds, 1996 อ้างถึง Atkinson, 1987) <sup>เปิด</sup>

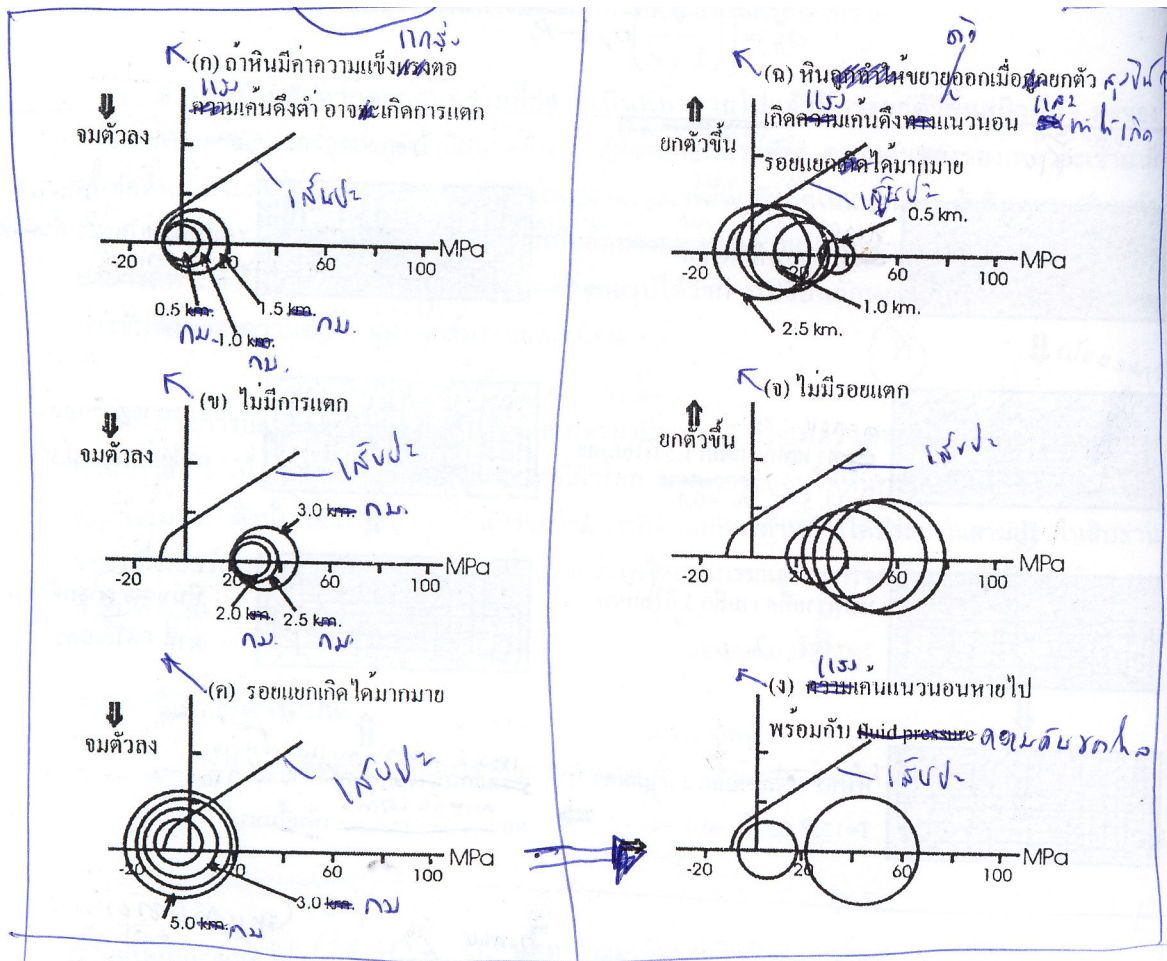




รูปที่ 5.30 ~~เงื่อนไข~~ เกิดการรวมตัวของหินทรายเกิดเป็นหินทราย ต่อจากนั้นเกิดการยกตัวของหินทราย ~~พบรอยแยกในช่วงลำดับต่างๆ~~ (ภาพปรับปรุงต่อจาก (Davis and Reynolds, 1996))

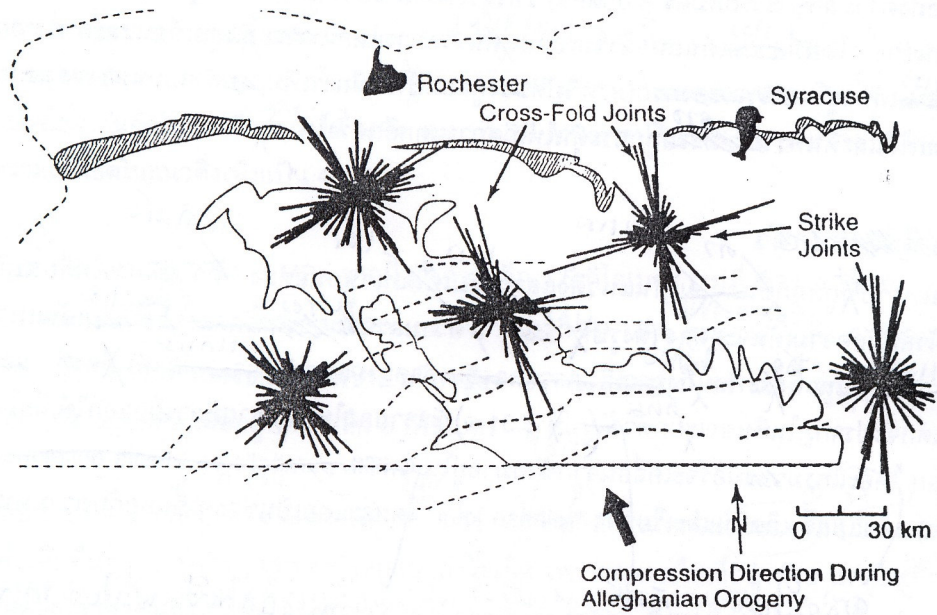
โดย รศ.ดร. ส.ค. 1107

ภาพอธิบาย



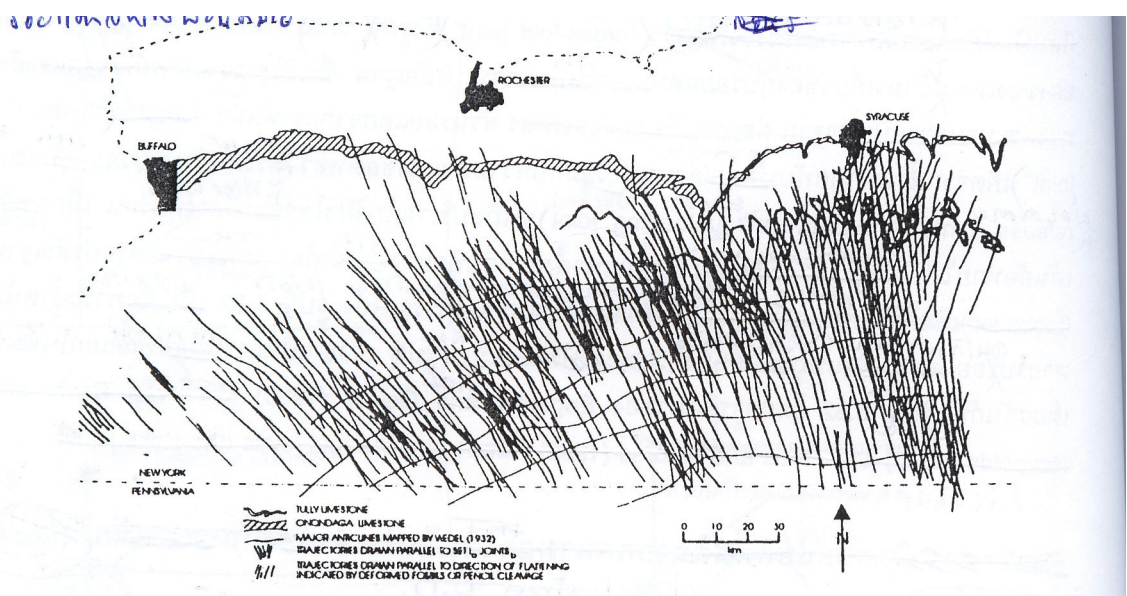
รูปที่ 5.31 ขั้นตอนของการเกิดรอยแตก แสดงโดยการสเกตไดอะแกรมมอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับรูปที่ 5.30 (ภาพปรับปรุงต่อจาก Davis and Reynolds, 1996)

(ติดต่อกัน)

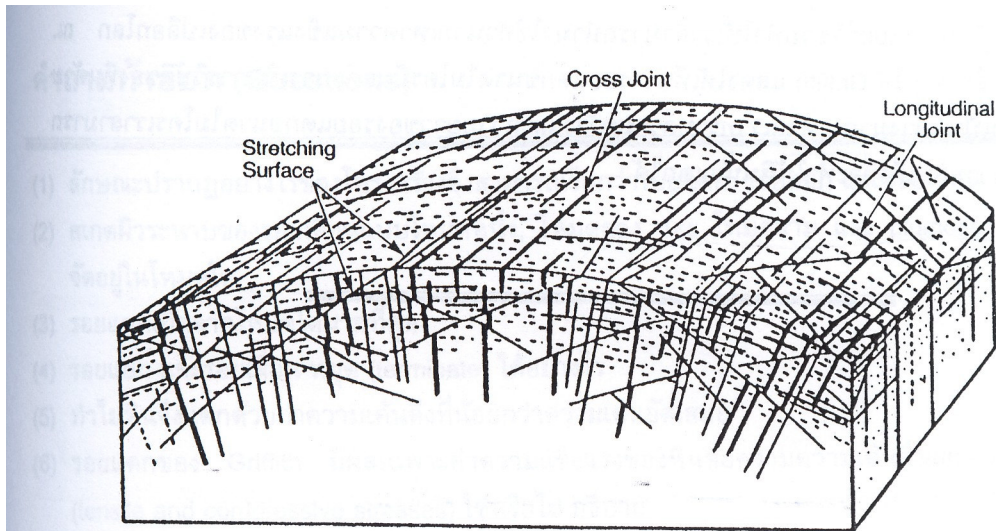


รูปที่ 5.32 ลักษณะของรอยแยกแบบ (cross-fold joints และ strike joints) ที่ Catskill Delta of Central New York ซึ่ง cross fold joints จัดเป็นประเภท (tectonic and hydraulic joints) ส่วน strike joints จัดเป็น (release and unloading joints) (แหล่งที่มา: Figure 5.66 โดย Davis and Reynolds, 1996 อ้างถึง Engelder and Oerter, 1985)

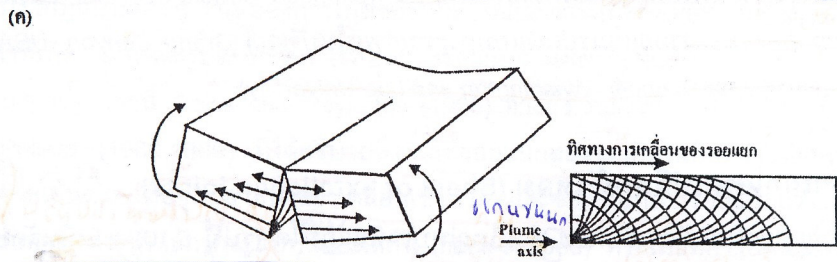
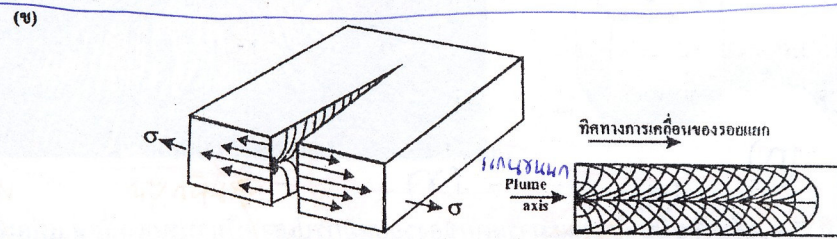
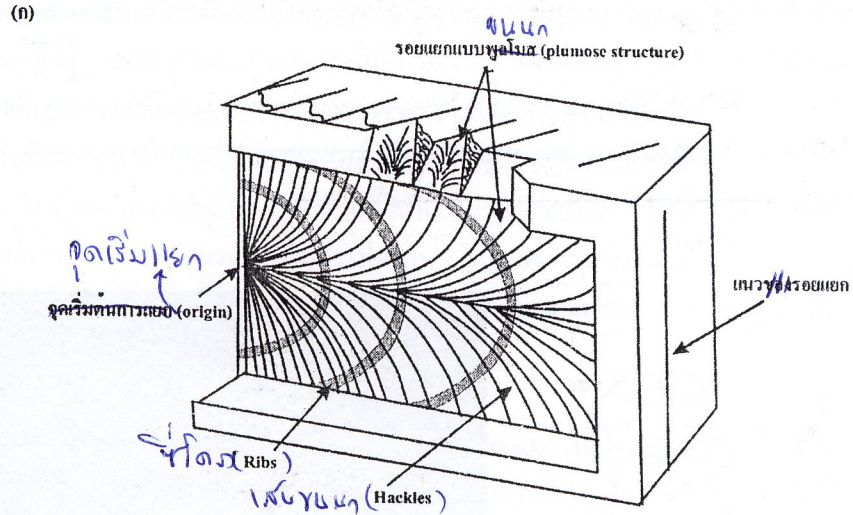
*Handwritten notes in Thai:*  
 - ตัดขวางรอยพับ (ตัดขวางรอยพับ)  
 - รอยแตกแบบปลดปล่อย (รอยแตกแบบปลดปล่อย)  
 - รอยแตกแบบคลายตัว (รอยแตกแบบคลายตัว)  
 - รอยแตกแบบคลายตัว (รอยแตกแบบคลายตัว)  
 - รอยแตกแบบคลายตัว (รอยแตกแบบคลายตัว)



รูปที่ 5.33 ตัวอย่างการทำแผนที่รอยแยกของ Engelder and Geiser (1979) บริเวณที่เดียวกันกับ รูปที่ 5.32 (แหล่งที่มา: Figure 5.67 โดย Davis and Reynolds, 1996 อ้างถึง Engelder and Geiser, 1980)



แผนผัง + รูปแบบรอยแตกที่ปรากฏจากสภาพการกัดเซาะที่ขจัด  
 รูปที่ 5.34 ลักษณะของรอยแยกพบในหินแกรนิต (แหล่งที่มา: Figure 5.70 โดย (Davis and Reynolds, 1996) อ้างถึง Cloos, 1922) ยอดทศกัณฐ์หรือยอดปราสาท หรือ เหนือ



รูปที่ 5.8 (ก) รูปร่างของโครงสร้างพวยมอส/รอยแยก Hackles แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ (ข) การเกิดโครงสร้างพวยมอสในชั้นหินจากแรงดึง (ค) การเกิดโครงสร้างพวยมอสในชั้นหินจากแรงดึงและหมุนของชั้นหิน (แหล่งที่มา\*: Figure 5.14 โดย Davis and Reynolds, 1996)