:

เขตรอยเฉือน (Shear Zones)

9.1 ธรรมชาติ

9.2 ลักษณะและรูปร่าง

9.3 ทิศระยะเคลื่อนและตัวบ่งบอก

9.4 ชนิดเขตรอยเฉือน

9.5 ขนาดความหนา

บทที่ 9
เขตรอยเฉือน (Shear Zones)

9.1 ธรรมชาติ

เขตรอยเฉือน หมายถึง แผ่นระนาบค่อนข้างราบเรียบ หรือโค้งน้อยๆ ที่เกิดในบริเวณใดบริเวณหนึ่งโดยมีขอบเขตที่ชัดเจน(รูป 9.1 และ 9.2) ซึ่งส่วนใหญ่เรามักพบว่าหินบริเวณนั้นถูกแรงกระทำจนเกิดการยืดตัวอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (ductile deformation) จนแตกต่างจากหินข้างเคียงอย่างมากมาย และทำให้หินในบริเวณที่ถูกเปลี่ยนลักษณะไปนั้นมีรูปร่างที่แปลกจนบางครั้งเราเรียกชื่อหินนั้นผิดได้ เช่น หินแกรนิตเมื่อถูกแรงเฉือนมากๆ จนทำให้บางครั้งเห็นเป็นหินเมตาไรโอไลต์ (metarhyolite) หรือ หินชีสต์ (schist) ได้ ทำนองเดียวกับหินกรวด (conglomerate) เมื่อถูกแรงเฉือนมากๆ อาจพบว่าก้อนกรวดมีการยืดตัว จนมีลักษณะคล้ายกับเป็นหินตะกอนสลับกันหลายๆ ชั้น มีริ้วขนาน และเห็นเป็นหินฟิลไลต์ (phyllite) หรือหินดินดานเมื่อถูกแรงเฉือนมากๆ อาจทำให้เห็นเป็นหินชนวน(slate)ได้ เป็นต้น

แนวแตกเรียบที่ใช้การจำแนกตามการเกิด(origin) อาจทำให้เกิดความสับสนและเข้าใจผิดได้ง่าย(misleading) ที่เห็นได้ชัดคือ หินดินดานในเขตรอยเฉือนมักแสดงแนวแตก ซึ่งแนวแตกนั้นก็เป็นแผ่นหน้าเรียบคล้ายแนวแตกในหินชนวน ทำให้เราบรรยายและเรียกชื่อเป็นหินชนวนได้ แต่โดยแท้จริงแล้ว หินชนวน หมายถึง หินแปรที่เกิดกระบวนการแปรสภาพแบบไพศาล(regional metamorphic rocks) จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันแบบค่อยเป็นค่อยไปและเกิดในบริเวณกว้าง ซึ่งรอยสัมผัสกับหินข้างเคียงอาจเป็นไปได้ตั้งแต่รอยเลื่อน รอยชั้นความไม่ต่อเนื่องหรือการค่อยๆ แปรสภาพ(gradational contact)แต่ตรงกันข้ามกับหินดินดานที่ถูกแรงเฉือน มักเกิดบริเวณแคบๆ ตามเขตรอยเฉือน ซึ่งรอยสัมผัสกับหินข้างเคียงส่วนใหญ่เป็นรอยสัมผัสที่ชัดเจนมากกว่า หินที่แปรสภาพด้วยแรงเฉือน(dynamic metamorphic rock) อาจมีแนวแตกแบบต่อเนื่อง (continuous cleavage) หรือแบบไม่ต่อเนื่อง(spaced cleavage) ก็ได้ ซึ่งควรบรรยายให้ชัดเจน

เราสามารถบ่งบอกเขตรอยเฉือนได้จากในสนาม หรือจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากแผนที่ธรณีวิทยาและจากภาพตัดขวาง การแยกลักษณะของเขตรอยเฉือน จึงขึ้นอยู่กับการที่เราพบการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะ(brittle deformation) หรืออ่อนนิ่ม(ductile deformation) หรือกึ่งทั้งสองอย่าง (brittle-ductile deformation) ซึ่งเราเรียกว่า “เขตรอยเลื่อน(fault zone) ถ้าเป็นเขตรอยเฉือนที่อยู่ในสภาวะการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะ การเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่แยกออกจากกันและเกิดเป็นขอบเขตแคบๆ (เมื่อนึกภาพถึงการแตกแบบเปราะ ให้ลองนึกถึงภาพเศษแก้วที่ตกแตกเป็นเศษกระจัดกระจายตามพื้น ซึ่งเหมือนกับสภาพการแตกของหินในบริเวณรอยเลื่อนที่มีสภาพขณะที่เกิดเป็นแบบเปราะ และเมื่อนึกถึงการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม ลองนึกถึงหมากฝรั่งที่เราเคี้ยวเล่น ซึ่งสามารถยืดยาว และม้วนไปมาได้)

เขตรอยเฉือนมักปรากฏที่ความลึกตั้งแต่ 5-10 กิโลเมตรลงไป เพราะเขตรอยเฉือนแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะของหินจากแรงกระทำในสภาพอ่อนนิ่ม การที่หินมีสภาพแบบนี้จึงควรจัดอยู่ในที่ที่มีความดันและอุณหภูมิสูง (นั่นคือตั้งแต่ 5-10 กิโลเมตร) และด้วยเหตุนี้จึงทำให้เราเห็นหินในเขตรอยเฉือนที่มักเป็นหินแปร เมื่อถูกแรงกระทำ เช่นหินไนส์ หินชีสต์ หรือหินแอมพลิโบล ถูกเฉือนที่ระดับลึก ดังนั้นการเปลี่ยนลักษณะของหินในเขตรอยเฉือนจึงเกิดขึ้นอย่างน้อยสองครั้งขึ้นไป นั่นคือแปรสภาพในครั้งแรก และถูกเฉือนในครั้งต่อมา เรามักเรียกรวมๆ กันว่า หินคาตาคลาไซต์ (cataclasite) หินไมโลไนต์ (mylonite) หรือหินฟิลโลไนส์ (phyllonite) (ดูรายละเอียดในบท 5)

เมื่อเขตรอยเฉือนเกิดภายใต้สภาวะอ่อนนิ่ม การเปลี่ยนแปลงจึงมีผลต่อการที่หินนั้นแปรสภาพและเปลี่ยนลักษณะไปจนเกิดโครงสร้างแบบริ้วขนาน แนวเส้นหรือแนวโค้ง บางครั้งเขตรอยเฉือนอาจเกิดภายใต้สภาวะระหว่างเปราะ-อ่อนนิ่ม จึงมักพบว่าบางส่วนเป็นส่วนของเขตรอยเลื่อน แต่บางส่วนเป็นส่วนของเขตรอยเฉือน โดยทั่วไปเขตรอยเฉือนเปลี่ยนลักษณะแบบไม่ไปตามแกน(non-coaxial or simple shear) (ดังรูป 9.3) เพราะถ้าแรงเค้นตั้งฉากที่เกิดในรูป 9.3 เท่ากันทั้งสองด้านและมีการเฉือนในปริมาณที่เท่ากันทั้งสองด้านเขตรอยเฉือนย่อมเกิดขึ้นได้

การเฉือนในเขตรอยเฉือน (รูป 9.1 และ 9.2) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างภายในตัวหิน เช่น (1) ทำให้เนื้อหินเปลี่ยนไปโดยเฉพาะขนาดเม็ดแร่ (2) ทำให้เนื้อหินพรุนมากขึ้น ผลก็คือของเหลวผ่านเข้าออกได้ง่าย ทำให้ความแข็งแกร่งของหินลดลงได้มากกว่าบริเวณอื่น (3) ทำให้เกิดการครูดถูในหิน อุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแกร่งของหินลดลง และหินเปลี่ยนสภาพจากเปราะไปเป็นอ่อนนิ่ม (4) หินเกิดการแปรสภาพ แร่มีขนาดเล็กลงหรือมีการตกผลึกแร่ใหม่

เห็นได้ว่า (1) อุณหภูมิและความดันเป็นตัวการสำคัญในการเปลี่ยนลักษณะของหินเปลือกโลก(crustal rocks) หากหินเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะหินจะเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง แต่หากหินเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มหินจะเป็นแบบการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (2) มาตราส่วนของการพิจารณาเขตรอยเฉือนเป็นสิ่งสำคัญด้วยเช่นกัน เมื่อดูด้วยมาตราส่วนเล็กอาจจะเป็นแบบเปราะแต่เมื่อดูด้วยมาตราส่วนใหญ่ในภาพรวมอาจเป็นแบบอ่อนนิ่ม และแร่บางตัวอาจจะแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะขณะที่แร่อีกบางตัวแสดงลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (รูป 9.3) การเกิดเขตรอยเฉือนอาจเกิดด้วยเวลาที่ยาวนานมาก (แบ่งเป็นมาตรส่วนของล้านปี) การเปลี่ยนลักษณะจึงขึ้นกับเวลาและตำแหน่ง อีกทั้งเขตรอยเฉือนอาจตัดทั้งเปลือกโลกได้ เขตรอยเฉือนจึงยิ่งมีความซับซ้อนหากมีการเกิดซ้ำขึ้นมาใหม่ อาจมีการเกิดการเปลี่ยนลักษณะใหม่ซ้อนทับการเปลี่ยนลักษณะเดิม เช่น กรณีที่หินถูกเฉือนอยู่ที่ระดับลึก 15-20 กิโลเมตรและถูกดึงตัวขึ้นสู่ผิวโลก(exhumation) อาจพบหินไมโลไนต์แตกป่นเป็นลักษณะของคาตาคาไซต์หรือหินบีบแตก(cataclasit) หรือกรวดเหลี่ยม (breccia) ซึ่งเรียกว่าโครงสร้างซ้อนทับ(superimposed structure)

ในทางธรณีวิทยาโครงสร้างเขตรอยเฉือนประกอบด้วยหินที่เปลี่ยนลักษณะอย่างมากด้วยแรง รูปร่างที่ปรากฏของหินในเขตรอยเฉือนจึงเป็นภาพบันทึกที่สวยงามตามธรรมชาติ นอกจากความสวยงามแล้ว ยังช่วยให้เราบอกนัยการเลื่อน(sense of movement) ได้อีกด้วย อีกทั้งอาจบอกถึงปริมาณการเคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน โดยอาศัยลักษณะผลึกแร่ซากดึกดำบรรพ์หรือองค์ประกอบอื่น

9.2 ลักษณะและรูปร่าง

9.2.1 ลักษณะ

ปกติความหนาของเขตรอยเฉือนน้อยกว่าความยาวและความกว้าง และบางครั้งอาจลอกออกได้เป็น
แผ่นๆ คล้ายกระดาษ (รูป 9.2) เขตรอยเฉือนพบได้ในทุกมาตราส่วนไม่ว่าเล็กหรือใหญ่ บางครั้งพบว่ายาวมากกว่า 100 กิโลเมตร และบางครั้งอาจหนามากกว่าถึง 10 กิโลเมตร (รูป 9.4ก) หรืออาจมีขนาดเล็กมากๆ เช่น พบได้ในแผ่นหินบาง(thin section) ดังรูป 9.4ข

เขตรอยเฉือนบ่งบอกให้เราทราบถึงการเปลี่ยนลักษณะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่จำกัด การพบเห็นเขตรอยเฉือน จึงแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะเนื่องจากความเครียด(strain)แบบเนื้อผสมหรือเป็นแบบวิวิธภัณฑ์(heterogeneous) ไม่ใช่เนื้อเดียว หรือเป็นแบบเอกพันธ์(homogeneous) ด้วยเหตุนี้เขตรอยเฉือนจึงเป็นผลจากการเปลี่ยนลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป(gradation) โดยปกติในเขตรอยเฉือน มักมีความเครียดมากที่สุดที่ตรงกลาง และลดลงจากจุดกลางไปเรื่อยๆ ถ้าปริมาณความเครียดลดลงเรื่อยๆ โดยไม่ทำให้หินข้างเคียงแสดงลักษณะปรากฏที่แตกต่างออกไป เรามักเรียกเขตรอยเฉือนนั้นว่า เขตรอยเฉือนต่อเนื่องหรือเฉือนย้วย(continuous shear zone) แต่ถ้าแสดงการเลื่อน(offset) ปรากฏให้เห็นเราเรียกว่า เขตรอยเฉือนไม่ต่อเนื่องหรือเฉือนขาด(discontinuous shear zone) (รูป 9.5) ในเขตรอยเฉือนหนึ่งๆ อาจเป็นได้ทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นกับมาตราส่วนที่เราศึกษา ดังนั้นในหินโผล่เราอาจพบว่าเขตรอยเฉือนเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง แต่ในแผ่นหินบางกลับกลายเป็นแบบต่อเนื่องได้

9.2.2 รูปร่าง

เขตรอยเฉือนอาจมีรูปร่างที่เป็นได้ทั้งระนาบแผ่นเรียบหรือระนาบแผ่นโค้งก็ได้ หรืออาจมีรูปร่างซับซ้อน(complex form)มาก แต่จะซับซ้อนยุ่งยากขนาดไหนก็ต้องแสดงลักษณะควบเป็นแผ่นกึ่งขนาน และมีความหนาที่ค่อนข้างคงที่ไปตามความยาว(รูป 9.6 ก) แต่ถ้าปลายด้านหนึ่งเกิดแยกออกจนกว้างขึ้น (รูป 9.6ข) การที่ปลายหรือจุดที่สิ้นสุดของเขตรอยเฉือนเปิดกว้างขึ้นอาจเป็นผลมาจากการที่หินเปลี่ยนลักษณะลดลงไป แต่บางครั้งก็อาจพบเห็นเขตรอยเฉือนตีบลงได้เมื่อเข้าสู่

หินชนิดใหม่ที่ไม่ต่อเนื่องและแข็งแกร่งกว่า (รูป 9.6ค) ดังนั้นในมาตราส่วนขนาดใหญ่ เขตรอยเฉือนอาจจัดกลุ่มออกเป็นชุด(set of shear zone) แต่ละชุดมีรูปร่างต่างกัน บางชุดอาจมีลักษณะเส้นระนาบขนานกันตลอดแนวเรียกเขตรอยเฉือนขอบขนาน(parallel margins) เนื่องจากเกิดในหินกลุ่มหรือชนิดเดียวกันตลอด บางชุดมีขอบแผ่กว้างออกด้านข้างเรียกเขตรอยเฉือนขอบแผ่กว้าง (diverging margins) เนื่องจากเกิดในหินแข็งน้อยกว่า แต่บางชุดมีขอบตีบเข้าเรื่อยๆ เรียกเขตรอยเฉือนขอบตีบลง (converging margins) เนื่องจากตัดเข้าไปในหินที่แข็งกว่า เช่น หินอัคนี เป็นต้น หรือเราอาจแบ่งย่อยเขตรอยเฉือนออกไปอีกตามรูปร่างลักษณะที่พบเห็น (รูป 9.7) เช่น รอยเฉือนขนานกัน รอยเฉือนตัดกัน รอยเฉือนแนวนอน รอยเฉือนโค้ง เป็นต้น

9.3 ทิศระยะเคลื่อนและตัวบ่งบอก (Offset direction and markers)

การที่เขตรอยเฉือนตัดเข้าไปในหินตะกอนแสดงชั้นหรือที่ถูกตัดด้วยผนังหิน ทำให้เราตรวจหาทิศทางการเคลื่อนตัวของเขตรอยเฉือนนั้นๆ ได้ เพราะเนื่องจากเราอาศัยตัวบ่งบอก (markers) และเราเรียกทิศทางการเคลื่อนของเขตรอยเฉือนว่าทิศระยะเคลื่อน(offset direction) และทำให้เราจัดแบ่งประเภทย่อยของเขตรอยเฉือนออกเป็นรูปแบบต่างๆ โดยอาศัยตัวบ่งบอกได้ดังแสดงในรูป 9.8 เนื่องจากเขตรอยเฉือนมักพบบริเวณขอบแผ่นเปลือกโลก จึงมักปรากฏเป็นเขตรอยเฉือนในบริเวณดังกล่าวที่แสดงในรูป 9.9 เช่น รอยเลื่อนยักษ์ San Andreas Fault แถบตะวันตกของประเทศอเมริกา รอยเลื่อนเหลื่อมตัว Alpine fault ในนิวซีแลนด์ หรือรอยเลื่อนด่านเจดีย์สามองค์แถบจังหวัดกาญจนบุรี และรอยเลื่อนคลองมาริน แถบจังหวัดพังงา กระบี่ หรือรอยเฉือนแม่จับ ในเขตจังหวัดเชียงราย เป็นต้น ในบริเวณเขตรอยเฉือนเราอาจพบแกนหินแปรซับซ้อน (Metamorphic Core Complexes) โผล่ให้เห็นเป็นบริเวณกว้าง เช่น ในอเมริกาและตอนใต้ของทิเบตที่ดึงเอาหินแปรระดับลึกขึ้นมาจากเทือกเขาหิมาลัย หรือในบริเวณเทือกเขาตะวันตกของดอยอินทนนท์ และดอยสุเทพทางตอนเหนือของประเทศไทย มีหลักฐานยืนยันว่าพบแกนหินแปรซับซ้อน (Metamorphic Core Complexes)เหมือน ซึ่งอาจมีลักษณะการเกิดคล้ายที่แสดงในรูป 9.10

9.2 ชนิดเขตรอยเฉือน

โดยทั่วไปแบ่งเขตรอยเฉือนออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

(1) เขตรอยเฉือนเปราะ(brittle shear zone) (หรือรอยเลื่อนนั่นเอง)

(2) เขตรอยเฉือนอ่อนนิ่ม(ductile shear zone)

(3) เขตรอยเฉือนกึ่งเปราะ(semi brittle shear zone) และ

(4) เขตรอยเฉือนผสม(ระหว่างแบบเปราะและอ่อนนิ่ม) (brittle-ductile shear zone)

โดยทั่วไปถ้าพบการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะในเขตรอยเฉือน (brittle shear zone deformation) แสดงว่าบริเวณนั้นมีอุณหภูมิ-ความดันต่ำ มีอัตราความเครียดเร็ว(fast strain rate) และมีความดันของเหลวสูง(high hydrostatic pressure) ส่วนการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มในเขตรอยเฉือน(ductile shear zone deformation) แสดงว่าบริเวณนั้นมีอุณหภูมิ-ความดันสูง มีอัตราความเครียดช้า(slow strain rate) และความดันน้ำหรือของเหลวต่ำ นอกจากนั้นสมบัติของแร่ในหินก็มีส่วนสำคัญที่จะทำให้หินเกิดการเปลี่ยนลักษณะได้แตกต่างกันด้วย เช่น แร่ทอง. เงิน หรือทองแดงมักมีลักษณะอ่อนนิ่มในสภาวะอุณหภูมิห้อง เมื่อเทียบกับแร่ควอตซ์และเฟลด์สปาร์มีลักษณะแบบเปราะ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนลักษณะในเขตรอยเฉือนที่มีทองแดง-เงิน เป็นองค์ประกอบมากๆ ในหินจึงแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม แต่พวกที่มีแค่แร่ควอตซ์อย่างเดียวแสดงแบบเปราะ เป็นต้น

9.4.1 เขตรอยเฉือนเปราะ (Brittle shear zone)

ในช่วงระดับความลึกประมาณ 5-10 กม จากผิวดินมักเกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะซึ่งเรามักได้รอยเลื่อน เพราะมักเกิดในขณะที่มีอัตราความเครียดสูงๆ เกิดขึ้นในหิน (ซึ่งก็หมายถึงเกิดแผ่นดินไหวนั่นเอง) ดังนั้นหินในเขตรอยเฉือนเปราะ ได้แก่ หินกรวดเหลี่ยม รอยเลื่อน(fault breccia) ซึ่งเป็นได้ทั้งแบบมีการยึดเกาะกันแน่นหรือไม่มีการยึดเกาะเลย ซึ่งเรามักพบว่ามีกรวดเหลี่ยมอยู่ในเนื้อหินมากกว่า 30% แต่ถ้าเราพบว่ามีกรวดเหลี่ยมน้อยกว่า 30% ในเนื้อหิน เรามักเรียกว่า หินคาตาคลาไซต์ (cataclasite) ซึ่งเม็ดกรวดมีการยึดเกาะกันแน่นหรืออาจพบผารอยเลื่อน (fault gouge) ที่เป็นเม็ดละเอียดมากอยู่ระหว่างเขตรอยเฉือน การที่หินมีการยึดเกาะกันแน่นในเขตรอยเฉือนเนื่องจากแร่บางตัวละลายออกไป ส่วนบางตัวเกิดใหม่และประสานตัวกันใหม่ในเนื้อหิน นอกจากนี้เรายังพบรอยแตกเฉือน(shear fractures) ริ้วขนาน(foliations) ริ้วลายขนาน (striations) รอยไถล (sllickenlines) แนวฟันหิน (stylolites) และสายแร่(veins) เขตรอยเฉือนแบบเปราะที่พบในหินมีความแตกต่างกันชัดเจน แสดงการขาดออกจากกันของชั้นหินด้วย เหมือนกับรอยเลื่อน ดังนั้นถ้าเราพบรอยเลื่อนหลายรอยเลื่อนอยู่ในเขตเดียวกัน เราจึงมักเรียกว่า เขตรอยเลื่อน(fault zone) (ดูรูป 9.11)

9.4.2 เขตรอยเฉือนอ่อนนิ่ม (Ductile shear zone)

เขตรอยแอนแบบอ่อนนิ่มมักเกิดจากการเฉือนภายใต้สภาวะที่ยืดหดได้ดี ซึ่งหมายถึงหินที่เปลี่ยนลักษณะต้องอยู่ในระดับลึกมากกว่า 10-15 กิโลเมตรลงจากผิวดิน นั่นคือส่วนของเปลือกโลกชั้นกลางและเปลือกโลกชั้นล่างและอาจถึงชั้นธรณีภาคชั้นกลาง (middle lithosophere) ด้วยเหตุนี้ในบริเวณเขตรอยเฉือนอ่อนนิ่มเราจึงพบเห็นหินไนส์ หินชีส และหินแอมพิโบไลต์ ปรากฏในเขตรอยเฉือนได้ ซึ่งแท้จริงแล้วหินแปรเหล่านี้เป็นหินแปรที่ถูกเฉือน จึงมีการเรียงตัวของกลุ่ม

แร่ที่ถูกเฉือนแล้วแปรสภาพร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นหินจึงถูกทั้งแปรสภาพและเฉือนจนแสดงการเปลี่ยนลักษณะอย่างน้อยสองครั้ง และอาจมีของเหลว เช่น สายแร่ควอตซ์มีทอง(gold-bearing quartz veins) ตัดผ่านเข้ามาด้วย จึงทำให้แยกได้ยากยิ่งขึ้นกว่าหินดังเดิม (protolith) เป็นหินอะไรกันแน่

โดยปกติเรามักเรียกหินที่เกิดในเขตรอยเฉือนแบบอ่อนนิ่มว่าหินไมโลไนต์ (mylonite) ซึ่งเป็นหินเกิดจากการตกผลึกใหม่ หากมีการเรียงตัวแบบริ้วขนานเรียกว่าหินไมโลไนท์เอส (S-mylonite) หากมีการยืดและแสดงลักษณะแนวเส้นเรียกว่าหินไมโลไนท์แอล(L-mylonite) การเรียงตัวทั้งแบบริ้วขนานและมีแนวเส้นแบบยืดร่วมด้วยเรียกว่า หินไมโลไนส์แอล-เอส(LS-mylonite) โดยทั่วไปหินที่เกิดในบริเวณรอยเฉือนแบบอ่อนนิ่มบางที่เรียกว่า หินเทคโทไนต์(tectonite) เช่น หินอ่อนเทคโทไนต์(marble tectonite) หินแปรเทคโทไนต์(metamorphic tectonite) หรือหินชีสเทคโทไนต์(schist tectonite) เป็นต้น

9.4.3 เขตรอยเฉือนกึ่งเปราะ (Semi brittle shear zone)

เขตรอยเฉือนกึ่งเปราะมักแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะชัดเจนกว่าการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม โดยมักพบโครงสร้างแบบเหลื่อมขนาน(en echelon) (รูป 9.12 และ 9.13) แนวฟันหิน(stylolite) และหินคาตาคลาไซต์(cataclasite)

9.4.4 เขตรอยเฉือนผสม (Brittle-ductile shear zone)

เขตรอยเฉือนผสมแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนลักษณะที่เป็นทั้งแบบเปราะและแบบอ่อนนิ่มร่วมกัน โดยที่หินมักถูกกระทำด้วยแรงเค้น(under stress) จนทำให้แร่มีการเรียงตัวและเกิดการเฉือน เช่น mylonite foliation ซึ่งเรามักพบแร่เพียงบางตัวเท่านั้นที่เรียงตัวเป็นริ้วขนาน หรืออาจพบเป็นโครงสร้างไส้กรอก(boudin structure)หรือพบแร่ดอกแปร(porphyroclasts) ที่ยังแสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะและแบบอ่อนนิ่ม เขตรอยเฉือนแบบผสมนี้จะเกิดได้ต่อเมื่อมีปัจจัยหลายอย่างควบคุมหรือเป็นตัวกำหนด ซึ่งได้แก่ (1) ลักษณะสภาพทางกายภาพอำนวยทั้งสองแบบ (2) หินมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน (3) เขตรอยเฉือนเกิดการแข็งตัว (4) ความเครียดเปลี่ยนแปลงจากช้าเป็นเร็ว จนทำให้ได้หินเปลี่ยนจากสภาวะอ่อนนิ่มเป็นแบบเปราะ (5) ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปขณะเปลี่ยนลักษณะ และ (6) เขตรอยเฉือนเกิดซ้ำ(reactivate) ภายใต้สภาวะใหม่ เช่น จากเดิม ซึ่งเป็นแบบเปราะและต่อมาเกิดใหม่เป็นแบบอ่อนนิ่ม

รูป 9.14 แสดงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะและแบบอ่อนนิ่มของเขตรอยเฉือน ซึ่งเป็นลักษณะการซ้อนทับ(superimposed) ของหินที่ถูกเปลี่ยนลักษณะไปแล้วในระดับลึก แต่เมื่อมีการเคลื่อนที่ขึ้นใกล้ผิวดิน(exhumation) อาจเกิดการเปลี่ยนลักษณะใหม่กลายเป็นสภาวะแบบเปราะ ดังนั้นจึงไม่แปลกที่เราจะเห็นหินที่แสดงทั้งการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะและแบบอ่อนนิ่มในตำแหน่งเดียวกันได้

9.5 ขนาดความหนา

เขตรอยเฉือนจะเกิดได้ต่อเมื่อความเครียดสะสมอยู่จำกัดเฉพาะในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ไม่ใช่กระจายไปทั่วทั้งมวลหิน ดังนั้นเมื่อเกิดเขตรอยเฉือนขึ้นจึงมักเกิดเป็นเขตเล็กๆ ก่อนแล้วจึงแผ่ขยายออกไป การที่เขตรอยเฉือนขยายออกไปจนหนาหรือบาง ย่อมเป็นผลมาจาก

9.5.1 สภาวะการอ่อนตัวในเขตรอยเฉือน

โดยทั่วไปเขตรอยเฉือนอาจแข็งตัวใหม่ได้ เพื่อแสดงการต่อต้านการเปลี่ยนลักษณะเมื่อถูกทำลาย ซึ่งทำให้เราเห็นการขยายตัวของรอยเลื่อนที่มีลักษณะที่กว้างใหญ่ไปทางด้านข้าง ซึ่งทำให้หินเกิดสภาวะแข็งตัวตึงความเครียด (strain hardening) เหมือนเราถูกมีดบาดที่แขนเมื่อเลือดหยุดผิวหนังเกิดการสมานตัว จนเห็นเป็นรอยแผเป็นนั่นเอง แต่บางครั้งเราก็กลับพบว่าเขตรอยเฉือนยังคงอ่อนตัวอยู่อย่างเดิมและไม่แข็งแกร่งเหมือนก่อนเปลี่ยนลักษณะ เราเรียกสภาวะเช่นนี้ว่าสภาวะอ่อนตัวจากความเครียด (strain softening) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก

(ก) เม็ดแร่ในเนื้อหินมีขนาดเล็กลง (Grain size reduction) อันเป็นผลมาจากการครูดถูหรือไถลในระหว่างที่เกิดการเลื่อนจนสูญเสียการยึดเกาะของโมเลกุลในเม็ดแร่ หรือเม็ดแร่เสียความแข็งแรงไปเนื่องจากเกิดการคืบคลาน (creep) จากการเปลี่ยนลักษณะ

(ข) รูปร่างของเม็ดแร่เปลี่ยนแปลงไป (Grain shape modification) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการหมุนตัวระหว่างการเฉือน หรือเลื่อนไถล ในเม็ดแร่วางตัวใหม่ในสภาพพันธะยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรง จนเกิดระนาบเลื่อนที่สามารถถูกทำลายหรือเหลี่ยนลักษณะไปได้ง่าย เมื่อเกิดแรงกระทบ

(ค) การเกิดแร่ใหม่ที่อ่อนตัวกว่าอันเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาภายในหิน (Reaction softening) เช่น แร่เซอร์เมนทีน ซึ่งจัดว่าเป็นแร่อ่อนที่มักพบในเขตรอยเฉือน ที่หินเป็นจำพวกสีเข้มจัด (Ultramafic rocks) หรือแร่ไมกาที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เฟลสปาร์ในระหว่างที่เกิดการเฉือนต่อเนื่องระยะยาวนาน

(ง) การมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องขณะเฉือน (Fluid-related softening) ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำที่อยู่ภายในเม็ดแร่อาจถูกขับออกมาในระหว่างที่เกิดการเฉือน (hydrofracturing sinv hydrolytic weakening) และไปรวมตัวกับแร่บางตัวในเนื้อหินซึ่งกาจเกิดในรูปสายแร่ เช่น สายแร่แคลไ.ซต์ ซึ่งมักเป็นแร่ที่อ่อนตัวกว่าหินข้างเคียงหรือหินรอยข้าง เมื่อเกิดการเฉือนต่เนื่อง หรือถูกแรงต่อเนื่งจนหินเปลี่ยนลักษณะไป ทำให้หินบริเวณเขตรอยเฉือนไม่แกร่งเท่าหินที่อยู่ห่างออกไป

9.5.2 ลักษณะการแข็งตัวในเขตรอยเฉือน

ตามที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่า หากเกิดกระบวนการเฉพาะการอ่อนตัวขณะเกิดรอยเฉือนเพียงอย่างเดียวเราก็คงไม่พบเขตรอยเฉือนที่บางได้ แต่แท้จริงแล้วเรามีโอกาสพบเขตรอยเฉือนทั้งที่บางและที่หนาได้ ซึ่งเราเรียกกระบวนการที่ทำให้หินแข็งตัวขณะเกิดรอยเฉือนว่า กระบวนการแข็งตัวขณะเฉือน (strain hardening) และเรียกกระบวนการที่ทำให้หินเกิดการอ่อนตัวขณะเกิดรอยเฉือนว่า กระบวนการอ่อนตัวขณะเฉือน (strain softening) ในบางครั้งเราพบว่าในบางเขตรอยเฉือน หากมีระยะเคลื่อนที่ยาวมากๆ (long slip length) อาจทำให้ได้เขตรอยเฉือนที่หนามากกว่าเขตรอยเฉือนที่มีระยะเคลื่อนที่สั้นกว่า ดังแสดงในรูป 15 ซึ่งอธิบายขั้นตอนของการเฉือนอย่างง่ายในเขตรอยเฉือน จนในที่สุดได้เขตรอยเฉือนเป็นรูปตัวเอส (sigmoidal form) ซึ่งถ้าเขตรอยเฉือนหนามากๆ หินบริเวณรอยสัมผัสหับเขตรอยเฉือนจะเปลี่ยนลักษณะไปได้ง่ายกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อหินเกิดการเปลี่ยนลักษณะไปแล้วจนอ่อนตัว (softening) อาจเกิดภาวะการต่อต้านขึ้นในหินหลังจากที่หินแตกหัก (นึกถึงไทยตอนเสียกรุงให้พม่า และต้องแตกกระจายตัว) เพื่อให้เกิดการสมดุลใหม่ในหิน โดยเม็ดแร่เปลี่ยนตำแหน่งการยึดเกาะใหม่เพื่อให้อัดแน่นได้มากขึ้น (เหมือนตอนพระเจ้าตากรวบรวมพล และจัดกำลังกองทัพให้แข็งแกร่งขึ้น) แต่การจะแข็งตัวใหม่ได้ ต้องขึ้นกับปัจจัยบางอย่าง เช่น อุณหภูมิ และอัตราความเครียดที่เข้ามาในหิน อุณหภูมิยิ่งสูงมากอาจช่วยทำให้เกิดการสมานตัวได้ดี แต่ด้วยอัตราความเครียดที่มากๆ ทำให้หินแข็งตัวได้ช้าลง เป็นต้น

9.6 การบอกทิศการเฉือน (shear sense)

การบอกทิศทางของการเฉือนในเขตรอยเฉือนอาจทำได้ทั้งในมาตราส่วนขนาดเล็ก เช่น ในแผ่นหินบาง หรือในมาตราส่วนขนาดใหญ่ เช่น จากหินโผล่หรือทั้งภูเขา โดยทั่วไปถ้าเป็นการเกิดรอยเฉือนแบบอ่อนนิ่ม (ductile shear zone) การบอกทิศการเฉือนทำได้ง่าย เพราะทิศทางการเฉือนมักขนานไปกับแนวการเฉือนนั่นเอง แต่บางครั้งเราะไม่สามารถมองเห็นแนวการเฉือนได้ถนัดในมาตราส่วนของหินโผล่ เราจึงจำเป็นต้องใช้ริ้วขนาน (foliation) ช่วยในการพิจารณาหาทิศ เมื่อได้การวางตัวของริ้วขนาน หรือระนาบเฉือน (shear plane) แล้ว เราต้องหาเส้นทางการเลื่อน (line of transport) ที่อยู่ภายในเขตรอยเฉือน ซึ่งบ่งบอกถึงทิศการเลื่อนได้ ถ้าการเปลี่ยนลักษณะเป็นแบบการยืดเป็นเส้น (ตามแนว S_1) เราก็สามารถบอกระนาบที่ขนานแนวเส้นและตั้งฉากกับระนาบเขตรอยเฉือน หรือระนาบริ้วขนานได้ ระนาบนั้นก็จะเป็นระนาบที่มีเส้นทางการเลื่อนอยู่ ซึ่งระนาบนี้คือระนาบ S_iS_g (รูป 9.34) ซึ่งเราใช้เป็นตัวบอกทิศการเฉือน และเรามักเรียกระนาบนี้ว่าระนาบ “SOS” หรือ sense-of-shear plane โดยทั่วไปตัวบอกทิศการเฉือนสมหมายที่สำคัญได้แก่ มีตัวบอกความเครียด (strain markers หรือ shear – senseindicators) ตัวอื่นอีก ที่สำคัญ ได้แก่

1) ตัวบอกระยะเฉือน (offset markers) ตัวบอกแบบนี้ถือว่าบอกทิศทางการเคลื่อนที่ในเขตรอยเฉือนได้เป็นอย่างดี เช่น พนังหิน (dike) หรือชั้นหิน ทำให้เราวัดระยะการเลื่อนจากหินโผล่ได้ (ดูรูป 9.35 A Dav)

2) ตัวบอกความเบี่ยง (deflection of markers) ในกรณีที่เราไม่สามาระทำตัวบอกระยะเคลื่อนได้ เราอาจใช้ตัวบอกที่เกิดการเบี่ยงตัวในการบ่งบอกได้ เมื่อตัวบ่งบอกไปถึงเขตรอยเฉือน (รูป 9.35 A) ดังนั้นแนวที่ตัวบ่งบอกเบี่ยงไปจึงแสดงถึงเขตรอยเฉือนได้ (ซึ่งอาจมองไม่เห็นในสนาม)

3) แบบริ้วขนาน (foliation pattern) เราใช้แบบริ้วขนานเป็นตัวบ่งบอก โดยที่ริ้วขนานมักเกิดขนานกับแรงเฉือนเขตรอยเฉือนอ่อนนิ่ม ในกรณีที่เป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบมีแกนร่วม (coaxial deformation) หรือมีการเฉือนแบบริ้วขนาน (pure shear) (รูป 9.41 A) ซึ่งปกติริ้วขนานมักแสดงถึงระนาบ S_1S_2 ของวางรีความเครียดสุดท้าย (finite strain) โดยมักทำมุมกับระนายเฉือน ในกรณีที่เป็นการเฉือนอย่างง่าย หรือการเปลี่ยนลักษณะแบบไร้แกนร่วม (noncoaxial deformation) (รูป 9.37 A) โดยมักมีรูปร่างคล้ายตัว S (เอส) ขวางกับเขตรอยเฉือน (รูป 9.37 B) โดยมีการเปลี่ยนลักษณะมากที่สุดในส่วนกลางของเขตรอยเฉือน (รูป 9.37 C)

ทีนี้เราจะทำอย่างไรหากพบริ้วขนานแสดงแนวเกือบขนานกับเขตรอยเฉือน ในกรณีนี้เราอาจอธิบายได้ 3 ลักษณะ (รูป 9.41) อย่างแรกริ้วขนานจริง ๆ แล้วขนานกับเขตรอยเฉือน ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะบริสุทธิ์ (pure shear) โดยมีแกนร่วม (coaxial) (ดูรูป 9.41 A) ที่มีแรงเฉือนตั้งฉากกับเขตรอยเฉือน หรืออีกกรณีอาจแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะอย่างง่าย (simple & shear) โดยไร้แกนร่วม (noncoaxial) เนื่องจากกันแรงเฉือนอย่างรุนแรงจนทำให้ริ้วขนานหมุนตัวจนเกือบขนานในเขตรอยเฉือน (รูป 9.41 B) หรือเราอาจอธิบายว่าริ้วขนานที่เราเห็นแสดงถึงเขตรอยเฉือนบางๆ เล็กๆ ที่วางตัวขนานกัน (รูป 9.41 C) ซึ่งจากการศึกษาวิจัยพบว่า สองอย่างหลังนี้มีโอกาสเกิดได้มากที่สุด

4) แถบรอยเฉือนหรือแถบเฉือน (shear bands) แถบรอยเฉือนหมายถึงบริเวณแคบๆ บางๆ ที่เกิดจากการเฉือนอย่างรุนแรง จนเกิดความเครียดเฉือน (high shear strain) (ดูรูป 9.42) ซึ่งก็คือเขตรอยเฉือนเล็กๆ มากมายในเขตรอยเฉือนใหญ่นั่นเอง โดยมากมักมีความหนาน้อยมากประมาณ 2-3 ซม. และมีความยาวประมาณ 10-20 ซม. จึงมักปรากฏชัดภายในกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งแต่ละแถบรอยเฉือนอาจวางตัวขนานกันหรือไม่ก็ได้ (รูป 9.43) ถ้าเป็นแถบรอยเฉือนที่วางตัวเกือบไปตามทิศทางส่วนใหญ่ของริ้วขนานหรือทิศรอยเฉือน เราเรียกแถบเฉือนเหมือน (synthetic) (รูป 9.43 A) แต่ถ้าวางตัวขวางกับทิศรอยเฉือนส่วนใหญ่ เราเรียกแถบเฉือนต่าง (antithetic) (ดูรูป 9.43 B)

ในบางครั้งเราพบว่าแถบเฉือนตัดริ้วขนานในเขตรอยเฉือน (เช่น ในรูป 9.42 B) จนดูเหมือนตัดรอยเฉือน ทั้งที่เป็นแบบเลื่อนปกติหรือเลื่อนย้อนภายในเขตรอยเฉือน เราเรียกแถบเฉือนที่แสดงการเลื่อนตัวแบบปกติว่า แถบเฉือนยืด (extensional shear bands) และหลายครั้งที่มีลักษณะ

เหมือน รอยแตกเฉือน (crenulation cleavage) ทำให้นักธรณีวิทยาบางท่านใช้คำนี้แทนแถบเฉือนดังกล่าวได้

อาจกล่าวได้ว่าในบรรดาตัวบอกทิศด้วยกันดูเหมือนนักธรณีวิทยาโครงสร้างในปัจจุบันจะให้ความสำคัญกับแถบเฉือนที่ประกอบด้วยแนวเซส-ซี (S-C fabric) มากที่สุด แนวเซส-ซีนี้ประกอบด้วยระนาย 2 ระนายทำมุมกัน (รูป 9.42 และ 9.44) คือ ระนายริ้วขนานที่เรียกระนายเอส (S-surface) โดยที่ S ย่อมาจาก schestosity ในภาษาฝรั่งเศส (Berthe และคณะ, 1979) และระนายซี (C-surface) โดยที่ C ย่อมาจากระนาบความเครียดสูงที่ในภาษาฝรั่งเศสใช้คำว่า cisaille ระนาบซีนี้เป็นระนาบหรือแนวที่แยกจากกัน หนาประมาณ 1 มม. ยาวประมาณ 2-20 ซม. มักเป็นแนวที่ขนานกับเขตรอยเฉือน และตัดริ้วขนาน ส่วนระนาบเอส (ซึ่งคือริ้วขนานนั่นเอง) จะวางตัวเบนเข้าหาแนวริ้วขนานที่วางตัวขนานกัน ซึ่งสามารถมองเห็นได้จากหินโผล่ (ถ้าตาดีหน่อย) ที่พบบ่อยและสังเกตได้ง่ายก็คือแนวไมโลไนต์ในหินโผล่ แต่บางครั้งก็ไม่บพในหินโผล่ แต่เห็นชัดเจนในแผ่นหินบาง ซึ่งมีประโยชน์ในการบ่งบอกทิศแรงเฉือนในสนามได้ รูป 9.45 แสดงริ้วขนานจุลน์ชนิดเอียง (oblique microscopic foliation) ซึ่งเป็นริ้วเล็กๆ วางตัวขนานกัน และขวางริ้วขนานหลักและตัวผลึกใหญ่ ซึ่งแนวนี้นี่แหละที่นักธรณีวิทยาโครงสร้างใช้เป็นตัวบ่งบอกทิศแรงเฉือน

5) ปลาแผ่นไมก้า (mica fish) หินไมโลไนต์มากมายที่มักแสดงผลึกดอกแปร (porphyroblast) เป็นรูปเลนซ์ ผลึกเหล่านี้เป็นแร่แผ่นของไบโอไตต์ หรือมัสโคไวท์ก็ได้ เนื่องจากมีรูปร่างคล้ายปลาเทราจึงเรียกปลาแผ่นไมก้า (Lister และ Snoke, 1984) ซึ่งจัดว่าเป็นตัวบอกทิศแรงเฉือนที่ดีมาก เพราะมักแสดงลักษณะเลซ์ที่ไม่ตามแนวริ้วขนาน มักเห็นได้ชัดเจนภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (รูป 9.46) แต่บางครั้งก็อาจพบได้ในสนามเหมือนกัน (เช่น รูป 9.47) ซึ่งจำเป็นต้องมีวิธีการมองแบบแวบแสง ปลา (fish flash method) คือ หันตัวอย่างมี่มีเครื่องหมายแสดงทิศเทิน โดยให้หมุนตัวอย่างจนกระทั่งตรงกับทิศทางที่แสงวาบ ๖ (สะท้อน) มากที่สุด ทิศทางนั้นคือทิศทางการเฉือน ซึ่งไปตามแนวเส้น โดยที่แร่ไมก้าวางตัวขวางกับแนวขนานมากที่สุดนั่งเอง

6) สิ่งแปลกปลอม หรือ มลหิน (inclusions) ในหินโผล่ที่มีเขตรอยเฉือน บางครั้งเราอาจเห็นสิ่งแปลกปลอมปรากฏภายในเนื้อหินของเขตรอยเฉือนได้ ของแปลกปลอมนี้อาจเป็นหินเดิมที่เกิดอยู่ก่อน หรืออาจเป็นปลึกดอกขนาดใหญ่ที่เกิดระหว่างการแปรสภาพหินก็ได้ ขนาดสิ่งแปลกปลอมมีได้ตั้งแต่ไม่กี่ ซม. จนถึงเป็นเมตรๆ ในที่นี้เราได้ให้ความหมายของสิ่งแปลกปลอมตามที่เสนอโดย Hanmer & Pass chier (1991) ว่า ห้อนหินหรือแร่ซึ่งแสดงความแข็งแกร่งมากกว่าหินที่อยู่โดยรอบในเขตรอยเฉือนที่มักอ่อนนิ่มมากกว่า สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อมีการหมุนตัวขณะเกิดการเฉือน (รูป 9.49 และ 9.50) ซึ่งภาวการณ์หมุนที่เราจะสังเกตเห็นได้ขึ้นกับตัวแปรซึ่งได้แก่ ขนาดรูปร่าง ความแกร่งและการวางตัวของสิ่งแปลกปลอมเอง ในการเปลี่ยนลักษณะแบบแกนร่วม เมื่อเกิดการเฉือนแบบบริสุทธิ์ (รูป 9.50 A) หรือที่ถูกยืดออกได้ (deformable) จะแสดงการหมุน สิ่งแปลกปลอมไม่กลมที่วางตัวตั้งฉากหรือขนานกับเขตรอยเฉือน

จะไม่หมุน แต่สิ่งแปลกปลอมที่กลมก็ไม่แสดงการหมุนเหมือนกัน เนื่องจากมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบในเขตรอยเฉือนในตอนแรกจึงเกิดการหมุนได้ทั้งแบบตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา แต่จำนวนที่หมุนตามเข็มและทวนเข็มมีประมาณไม่เหมาะสม ทั้งนี้แล้วแต่ตัวแปร ถ้าเป็นการหมุนในเขตรอยเฉือนชนิดไร้แกนร่วม ในระหว่างที่เกิดการเฉือนแบบง่าย (รูป 9.50 B) สิ่งแปลกปลอดจะหมุนไปในทิศทางเกียวกับทิศการเฉือน แต่จะเร็วช้าขึ้นกับตำแหน่งที่ของสิ่งแปลกปลอมหรือตัวแปรตัวอื่น

7) เงาความดัน (pressure shadows) เมื่อสิ่งแปลกปลอมแข็งแกร่ง เมื่อเทียบกับเนื้อหิน บางครั้งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นโล่กำบังเนื้อหินจนแรงเฉือน โดยเฉพาะตรงขอบของสิ่งแปลกปลอม พื้นที่กำบังแรงเฉือนนี้เรียกเงาความดัน ซึ่งมักมีลักษณะเป็นลิ่ม และมีแร่ในเนื้อหินที่ไม่เปลี่ยนลักษณะ หรือแร่ที่เกิดใหม่บรรจุอยู่ ขณะเกิดการเปลี่ยนลักษณะ (รูป 9.51) เงาความดันมักปรากฏให้เห็นชัดภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แต่บางครั้งก็อาจพบได้จากหินโผล่ แต่ก็มักมีขนาดไม่เกิน 1 ซม. เงาความดันส่วนใหญ่หนาที่สุดตรงส่วนที่ติดกับสิ่งแปลกปลอม และตีบแคบลงเมื่อห่างสิ่งแปลกปลอม เงาความดันจึงเป็นจุดการตกผลึกของแร่ที่เคลื่อนตัวได้ง่าย เช่น แร่ควอร์ต แคลไซต์ และคอลไรต์ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนลักษณะ โดยแร่พวกนี้มักสะสมตัวในลักษณะของการเข้าแทนที่ (metamorphic metasomatic replacement) ตกผบึกในช่องว่าง (void fillings)

การเติบโตของผลึกแร่ในเงาความดันมักเกิดในบริเวณที่มีการยืดตัว และเกิดอยู่ระหว่างสิ่งแปลกปลอมที่แข็งแกร่ง กับเนื้อหินที่เคลื่อนไหลได้ โดยทั่วไปยิ่งการเปลี่ยนลักษณะเกิดขึ้นมากเท่าใด การตกผลึกของแร่ก็จะมีมากตามมาจนเป็นสายใยยาวและสวยงาม เราจัดแบ่งเงาความดันเป็น 3 ชนิด (รูป 9.52) คือ (1) ไฟไรต์ (2) ไครนอยต์ และ (3) พวกรวมมิตร (composite) พวกแรกไฟไรต์ (รูป 9.52 A) เป็นเงาความดันที่ประกอบด้วยแร่ที่มีองค์ประกอบเหมือนเนื้อหินแต่ต่างจากสิ่งแปลกปลอม โดยมีสายในเติบโตไปตามแกนผลึกในเนื้อหิน จึงเป็นการเติบโตจากเนื้อหินเข้าหาสิ่งแปลกปลอม จัดเป็นการเติบโตเข้าไปข้างใน(grow inward) ซึ่งเรียกการเติบโตแบบนี้ว่า “antitaxial growth” ส่วนพวกที่สอง คือ แบบไครนอยต์ เป็นเงาความดันที่ประกอบด้วยผลึกที่มีองค์ประกอบเหมือนกับสิ่งแปลกปลอม ผลึกแร่จึงเติบโตตามแกนผลึกของสิ่งแปลกปลอม (รูป 9.52 B) จึงเป็นการเติบโตออกไปข้างนอก(grow outward) ซึ่งเรียกการเติบโตแบบนี้ว่า “syntaxial growth” มักพบเห็นน้อย เมื่อแร่แคลไซต์เติบโตจากซากไครนอยด์ หรือซากดึกดำบรรพอื่น สำหรับพวกที่สาม คือ พวกรวมมิตร ซึ่งหมายถึงพวกที่ประกอบด้วยลักษณะรวมทั้งจากไครนอยด์และจากไมไรต์ จึงมีทั้งพวกที่แร่งอกเข้าไปข้างใน และที่งอกออกมาข้างนอก

รูปร่างลักษณะของสายในแร่ในเงาความดันมักถูกควบคุมด้วยทิศการเลื่อนที่อย่างต่อเนื่องและการจัดตัวของสิ่งแปลกปลอมในเนื้อหิน เราเรียกสายใยแร่ที่เติบโตขนานกับทิศการเลื่อนที่ระหว่างสิ่งแปลกปลอมกับเนื้อหิน (รูป 9.53 A) ว่า สายใยจากการเฉือน (displacement-controlled fibers) โดยรูปร่างของสิ่งแปลกปลอมเป็นตัวควบคุมการกระจายตัวของสายใย (ไม่ใช่การวางตัว

ของสาย) ในบางกรณีการเติบโตของสายใยถูกควบคุมด้วยการจัดวางตัวของสิ่งแปลกปลอม ซึ่งเราเรียก สายใยจากหน้า (face-controlled fibers) (รูป 9.53 B) ซึ่งมักเติบโตตั้งฉากกับหน้าของสิ่งแปลกปลอม สายใยที่รองจากหน้าสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ติดกันจะเชื่อมต่อกันในบริเวณรอยตะเข็บ (suture line) ยื่นยาวออกไปจากมุมของหน้าสิ่งแปลกปลอม

โดยมากเงาความดันมักเกิดไปตามแกนการยืดตัว ด้วยเหตุนี้จึงขนานกับเขตรอยเฉือนในกรณีที่เป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบแกนร่วม (รูป 9.54 A) แต่จะเติบโตทำมุมกับเขตรอยเลื่อนกรณีที่เป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบไร้แกนร่วม (ดูรูป 9.54 B) ดังนั้นรูปร่างสายใยจึงใช้เป็นตัวบอกทิศการเฉือนได้ ถ้าเป็นสายใยจากการเลื่อนมักเติบโตในทิศที่ขนานกับทิศที่มีการดึงมากที่สุด ส่วนสายใยจากหน้าให้ข้อมูลอันเป็นผลจากการที่สารแปลกปลอมหมุน และทำให้เราบอกทิศการเฉือนได้

8) ผลึกดอกแปรและดอกผลึกแปร (Porphyroclast and porphyroblasts)

ในเขตรอยเฉือนอ่อนนิ่มมักประกอบด้วยผลึกแร่เม็ดใหญ่ที่แกร่งกว่าฝังอยู่ภายในเนื้อหิน หรือเนื้อพื้นที่ประกอบด้วยแร่ขนาดเล็กมากกว่า 1 ชนิดที่มีแสดงการเปลี่ยนลักษณะได้ง่ายกว่า เม็ดผลึกแร่ขนาดใหญ่นี้อาจแสดงถึงส่วนของแร่หรือหินเดิมที่เหลือค้างจากการเปลี่ยนลักษณะ โดยที่แร่เหลือค้างดังกว่าวอาจเป็นผลึกดอกของหินอัคนีหรือเม็ดแร่ในหินตะกอน (รูป 9.56 A) ที่เรามักเรียกผลึกแร่ขนาดใหญ่ดังกล่าวว่าผลึกดอกแปร (porphyroclast) ถ้าหินเดิมเป็นหินแกรนิต หลังเปลี่ยนลักษณะกราจะเห็นผลึกดอกแปรของแร่เฟลสปาร์ปรากฏในเนื้อพื้นที่ประกอบด้วยแร่ควอร์ด เฟลสปาร์ และไมก้าขนาดเล็กกว่า หรือถ้าเดิมเป็นหินตะกอน หรือหินภูเขาไฟ เราก็อาจเห็นผลึกแร่เฟลสปาร์ ควอร์ด หรือแร่สีเข้ม เหมือนลอยอยู่ท่านกลางเนื้อพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นแร่ไมก้า

ในบางครั้งเราพบว่าแร่ผลึกขนาดใหญ่ ไม่ใช่เป็นแร่เดิม แต่เป็นผลจากการแปรสภาพหินซึ่งอาจเกิดระหว่าง หรือหลังการเปลี่ยนลักษณะ ที่เราเรียกแร่พวกนี้ว่า ดอกผลึกแปร (porphyroblast) ถ้าดอกผลึกแปรเกิดระหว่างการเปลี่ยนลักษณะ เราเรียกว่า synkinematic porphyroblast แต่การเกิดหลังการเปลี่ยนลักษณะ เราเรียกว่า postkinematic porphyroblast เมื่อเกิดดอกผลึกแปรแล้วมักมีลักษณะแข็งแกร่งกว่าเนื้อพื้น เช่น แร่การ์เนต (หรือโกเมน) (รูป 9.56 B) แต่ก็มีดอกผลึกแปรบางตัว เช่น แร่แอนคาลูไซด์ และมัสโคไวด์ อาจอ่อนตัวเหมือนเนื้อพื้นดอกพวกหลังนี้จึงมักไม่ค่อยมีประโยชน์ต่อการบอกทิศแรงเฉือนเท่าพวกที่แข็งแกร่งกว่า ด้วยเหตุนี้พวกดอกผลึกแปรจึงมักวางตัวเป็นสายสิ่งแปลกปลอม (inclusion trails) ซึ่งอาจเห็นเป็นแบบเกลียวสว่าน (spiral) หรือแค่รูปตัวเอส (รูป 9.56 B และ C) สายสิ่งแปลกปลอมนี้มีประโยชน์ เพราะประกอบด้วยผลึกแร่เล็กๆ ที่หลุดมาจากดอกผลึกแปร ขณะที่มีการเติบโตและหมุนตัวระหว่างการเปลี่ยนลักษณะ แนวการวางตัวของสายจึงแสดงถึงทิศการเฉือนนั่นเอง เมื่อผลึกดอกแปรและดอกผลึกแปร หรือสิ่งแปลกปลอมแบบอื่น ทำปฏิกิริยากับเนื้อพื้น ขอบภายนอกของผลึกมักเป็นศูนย์รวมของความเค้น และเกิดการตกผลึกใหม่ได้เป็นแร่เล็กๆ ที่อ่อนตัวกว่าแกนกลาง (mantle) ของผลึกดอก จึงดูเหมือนแกนกลางถูกเฉือนออกจนได้เป็นสายแร่เล็กๆ ยืดยาวเข้าไปข้างในเนื้อพื้น

(รูป 9.57) คล้ายปีกนก ปีกนกของผลึกดอกพวกนี้มีหลายรูปแบบ (รูป 9.58) และจัดกลุ่มได้ 5 แบบ ตามอักษระกรีก (Passchier, 1994) ได้แก่แบบซีตา (theta, θ) ซึ่งมีแกนกลางกลมจนถึงรี แต่ไม่เห็นปีกชัดเจน ส่วนอีก 4 แบบจัดเป็นพวกที่เห็นปีกนกชัดเจน แบบไฟด์ (phi, θ) มีปีกยื่อยาวจากแกนกลางแบบสมมาตร แบบซิกมา (sigma, σ) มีปีกที่โค้งเล็กน้อย และไม่สมมาตร และอยู่ตรงข้ามกัน อีกพวกคือแบบเดลต้า (delta, δ) เป็นปีกโค้งมากและยืดยาวเป็นลายไม่สมมาตร ส่วนพวกสุดท้าย คือ แบบลูกผสม (complex) ประกอบด้วยปีกนกหลายแบบด้วยกันผสมกันภายในเนื้อพื้น รูป 9.59 แสดงถึงชนิดของปีกนกแบบกึ่งสามมิติ เทียบกับแกนความเครียด จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าปีกนกแบบ θ มีการเติบโตของผลึกใหม่ช้า แต่ถ้าเป็นพวกอื่นมักมีการเติบโตของผลึกใหม่รวดเร็ว ถ้าการเติบโตของผลึกใหม่ แม้จะมีอัตราเร็วแต่ก็ช้ากว่าอัตราความเครียด ทำให้ปีกหมุนไปกับสิ่งแปลกปลอม จนทำให้เกิดปีกแบบ δ แต่ถ้าเร็วกว่าอัตราความเครียด อาจมีเวลาพอที่จะทำให้เกิดปีกคล้ายลิ่มได้ ซึ่งถ้าสมมาตรจะได้ปีกแบบ ϕ แต่ถ้าไม่สมมาตรจะได้แบบ σ (รูป 9.60) จากการศึกษาพบว่าปีกแบบ δ มักพบเห็นในผลึกรูปกลมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนปีกแบบผสมมักเห็นในผลึกรูปรีๆ ในบางครั้งเราอาจพบสิ่งแปลกปลอมแสดงการเปลี่ยนลักษณะเป็นริ้วขนาน ซึ่งขวางทางกับริ้วขนานในเนื้อพื้น ซึ่งเรามักเรียกว่าปลาริ้วขนาน โดยสามารถบ่งบอกทิศการเฉือนได้ (ดูรูป 9.61)

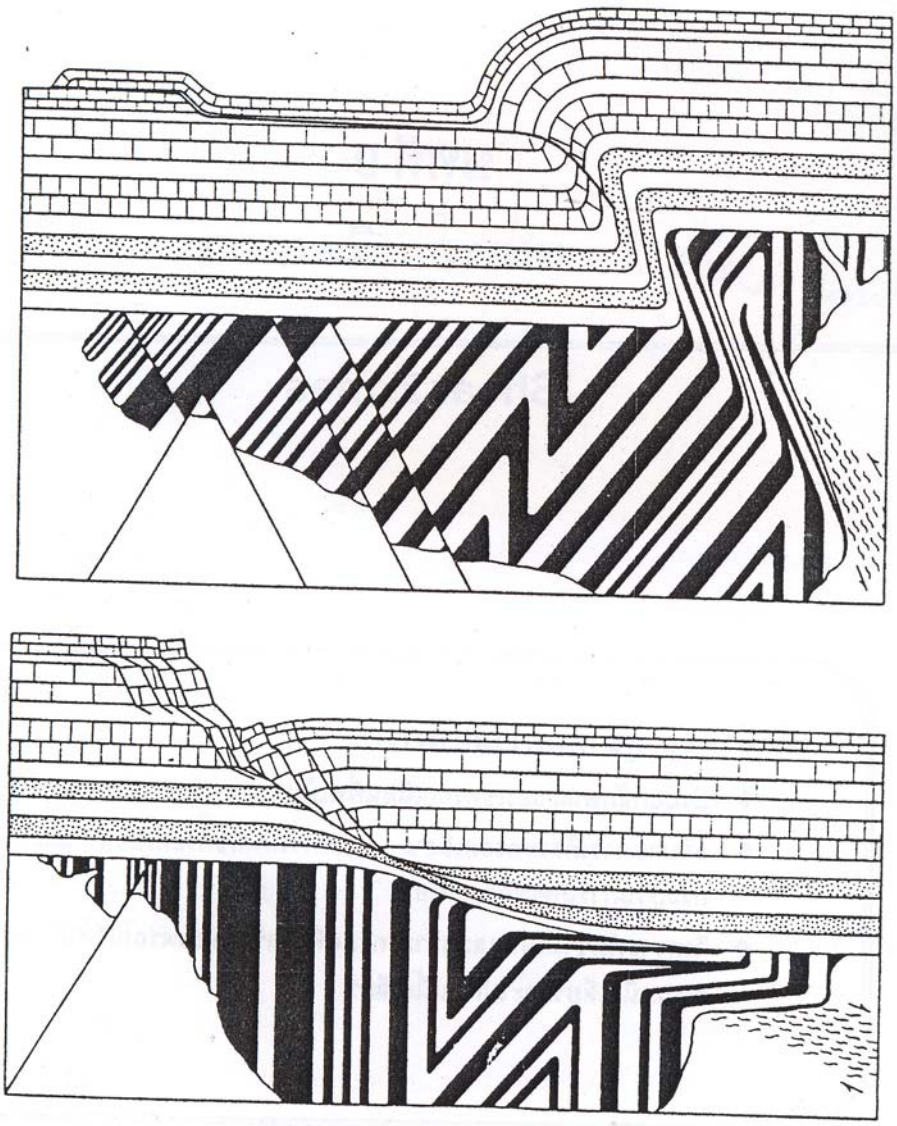
9) เม็ดแร่เลื่อน

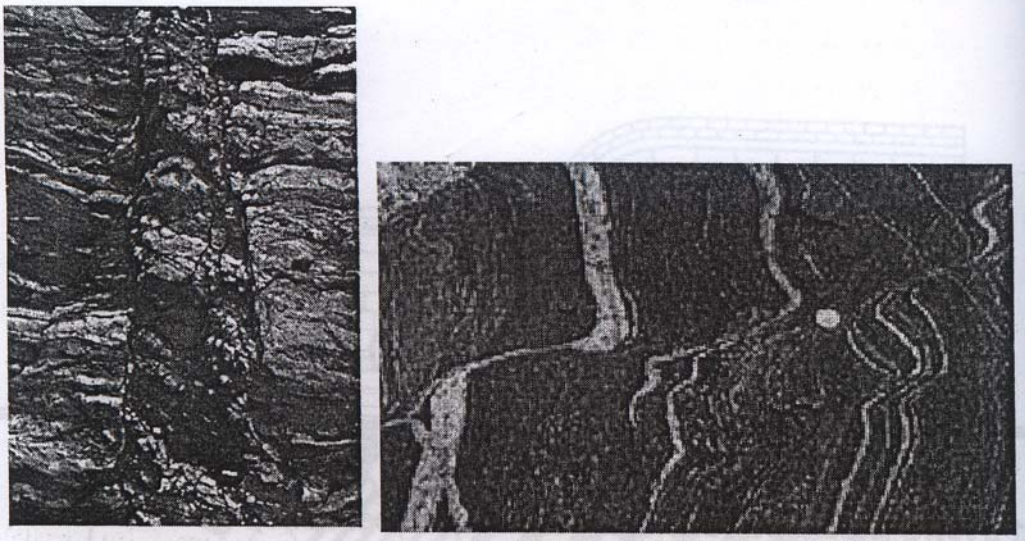
ในบางครั้งผลึกดอกแปรอาจปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนลักษณะโดยเกิดเป็นรอยเลื่อนขนาดเล็กๆ ในเม็ดแร่ (grain-scale gault) ซึ่งเราอาจหาทิศการเฉือนอย่างเคร่าๆ (แบบไม่ถูกนักได้) โดยที่เมื่อรอยเลื่อนทำมุมไม่มากนักกับเขตรอยเฉือน เรามักได้ทิศการเลื่อนตัวตามแนวรอยเลื่อนตามทิศการเฉือนได้ (รูป 9.62) ซึ่งเราเรียก “synthetic” แต่ถ้ารอยเลื่อนทำมุมกับเขตรอยเฉือนมากๆ ทำให้เราได้ทิศการเลื่อนตัวตามแนวรอยเลื่อน ตรงข้ามกับทิศการเฉือนได้ ซึ่งเราเรียกว่า “antithetic” แต่ต้องไม่สับสนกับการที่สิ่งแปลกปลอม 2 อันที่อยู่ติดกัน และเหมือนเกยกันอยู่ (ซึ่งเรียก “tiling”) เลยทำให้คิดว่าเป็นผลจากการเลื่อนจากรอยเลื่อนได้ (รูป 9.63)

10) สายแร่ (veins)

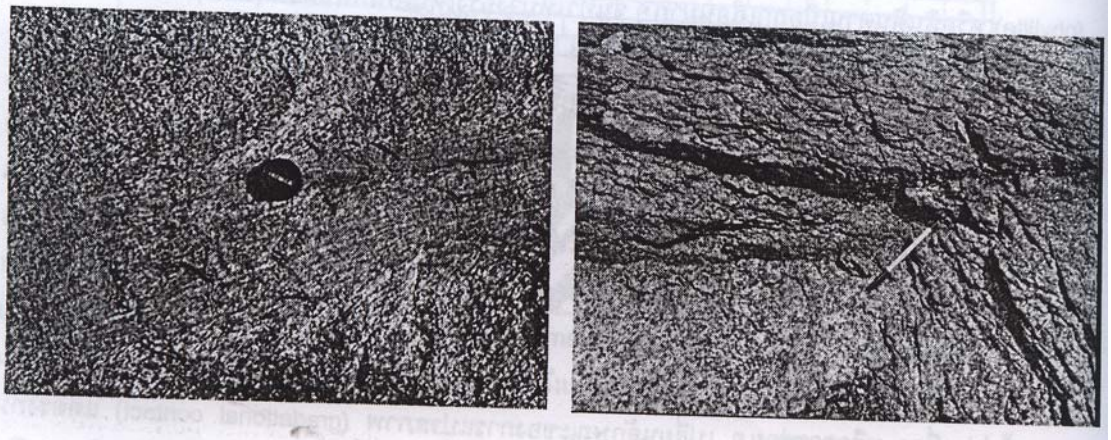
ในบริเวณเขตรอยเฉือนเรามักพบสายแร่ขนาดเล็กเกิดขึ้นมากมาย และอาจวางตัวแบบช่วงขนาน (enechelon) (รูป 9.64) ซึ่งสายแร่เหล่านี้มักประกอบด้วยแร่ควอร์ซหรือแคลไซด์ แต่ก็พบว่าเป็นแร่เฟลสปาร์ ไมก้า แร่เหล็กแดง และยิปซัม หรือโคโลไมด์ได้ สายแร่เหล่านี้อาจเป็นตัวบอกทิศการเลื่อนได้ดีมาก เนื่องจากการวางตัวของสายแร่ถูกควบคุมโดยการยืดออก ในกรณีของการเปลี่ยนลักษณะแบบแกนร่วม (หรือการเฉือนบริสุทธิ์) สายแร่มักเกิดตั้งฉากกับริ้วขนานหรือเส้นขนาน แต่ถ้าสายแร่วางเป็นมุมเกือบ 15° (แต่ไม่ขนานหรือไม่ตั้งฉาก) กับเส้นขนานหรือริ้วขนานมักเกิดในการเปลี่ยนลักษณะแบบไร้แกนร่วม (หรือการเฉือนอย่างง่าย) (รูป 9.65) ในบางครั้งอาจ

พบเห็นสายแร่วางตัวซ้อนกันและตัดกัน (รูป 9.64 และ 9.66) ซึ่งแสดงว่าการมีแรงมากระทำต่อเนื่องเรื่อยๆ โดยตอนแรกสายแร่วางตัวทำมุมกับริ้วขนาน 45° และต่อมาจึงเกิดการหมุนต่อเนื่องตามทิศการเฉือนขณะเกิดการเปลี่ยนลักษณะ จนเกิดสายแร่ใหม่ขึ้นได้ซ้อนทับไปบนสายแร่เดิมที่หมุนและเบี่ยงตัวไปจากตำแหน่งเดิม ในหินโผล่เราจึงเห็นสายแร่ที่เกิดก่อนแสดงการเปลี่ยนลักษณะมากกว่าสายแร่ที่เกิดทีหลังที่เปลี่ยนลักษณะน้อยกว่า และจากลักษณะการวางตัวซ้อนทับของสายแร่ทำให้เราสามารถหาทิศการเฉือนได้

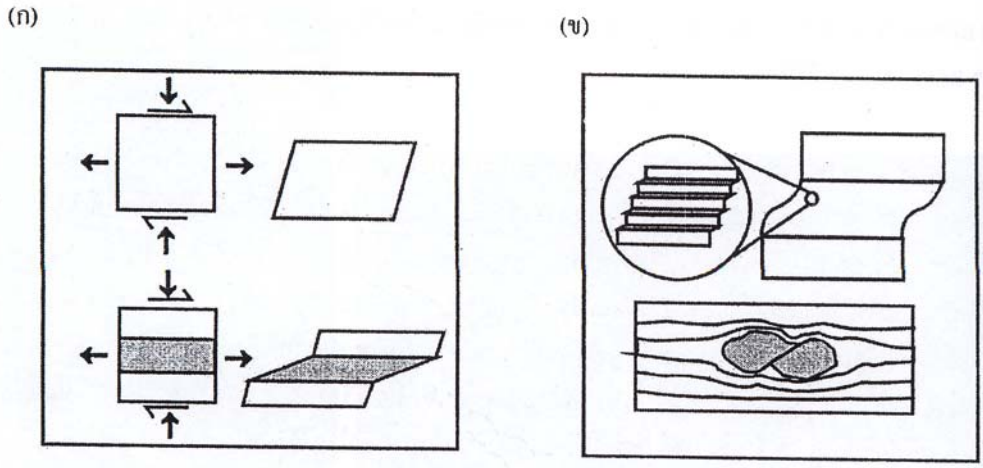




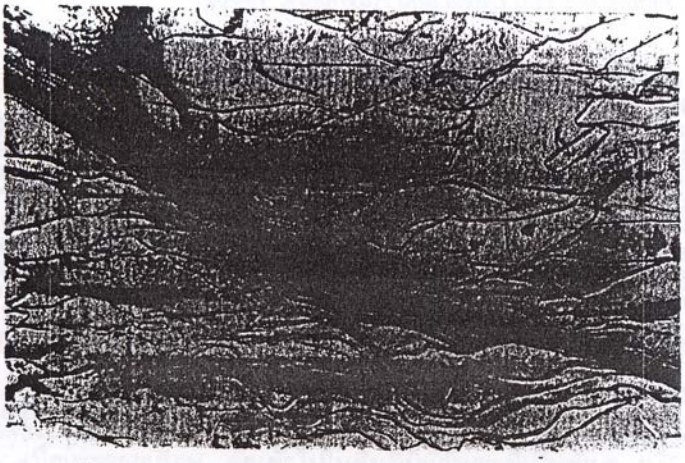
รูปที่ 9.1 เขตรอยเฉือนที่พบในสนาม ภาพซ้ายมือ เขตรอยเฉือนแบบเปราะ (brittle shear zone) ในหินทราย พบที่บริเวณ Hoover Point, near Marble Falls, Texas, USA. ภาพขวามือเขตรอยเฉือนสภาพอ่อนนิ่ม (ductile shear zone) สังเกตแถบหินสีขาวที่มีการเลื่อน แต่ไม่มีการแตกหัก (แหล่งที่มา: ภาพซ้ายมือโดย Robert Burger, Smith college ภาพขวามือโดย Robert J. Varga, The College of Wooster)



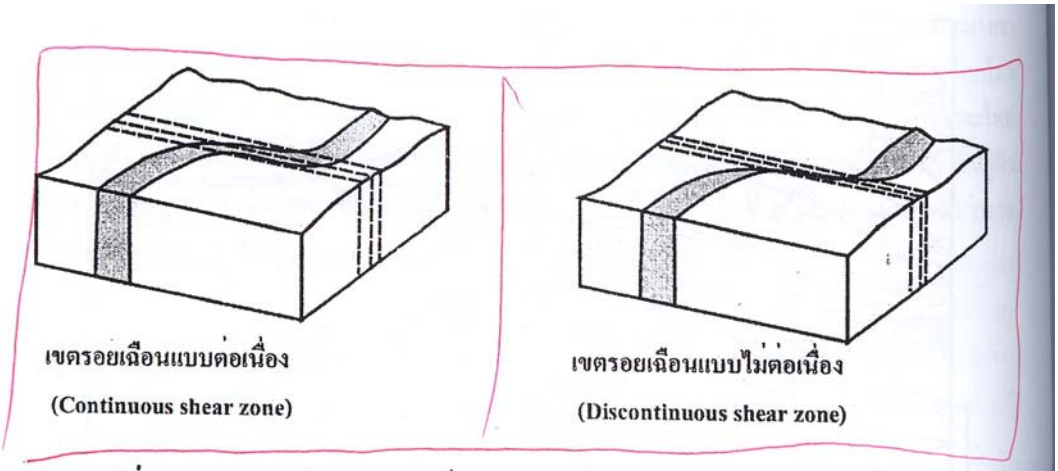
รูปที่ 9.2 ภาพซ้ายมือ เขตรอยเฉือนพบใน Maggi nappe, Switzerland ภาพขวามือ หินไมโลไนต์ในบริเวณเขตรอยเฉือนที่มีการแตกเป็นแผ่นๆ พบในบริเวณ Catalina Mountains, Arizona, USA. (แหล่งที่มา: ภาพซ้ายมือโดย Paul Karabinos, Williams Collage)



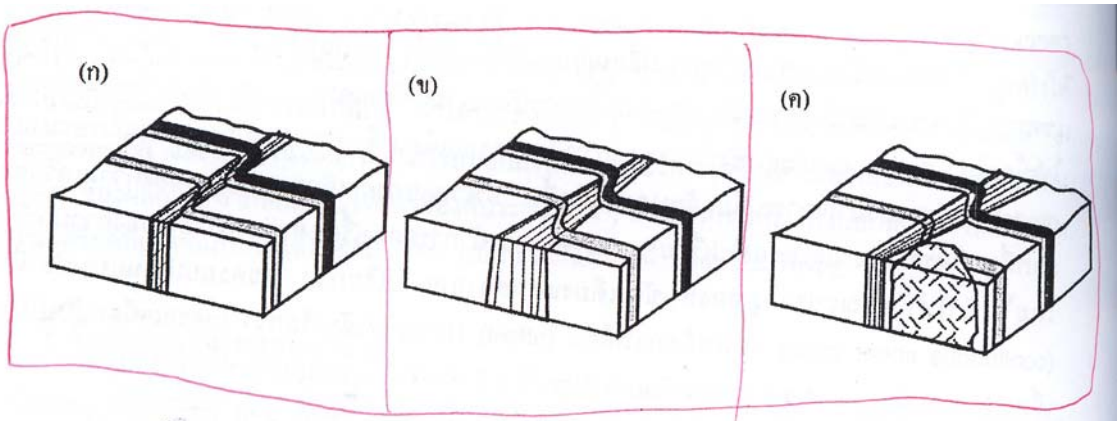
รูปที่ 9.3 (ก) เขตรอยเฉือนจะมีการเปลี่ยนลักษณะแบบ non-coaxial (simple shear) (ข) บริเวณเขตรอยเฉือนพบการเปลี่ยนลักษณะได้ทั้งแบบอ่อนนิ่ม (ริ้วขนาน) และเปราะ (รอยแตก)



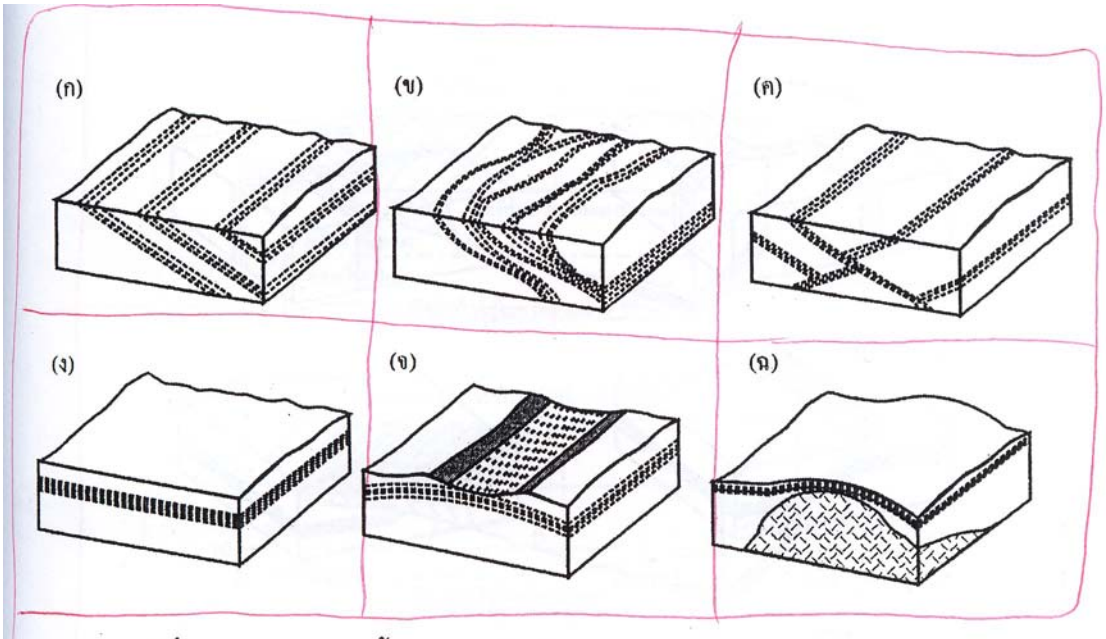
รูปที่ 9.4 *ขนาดเล็กหรือใหญ่ของเขตรอยเฉือน ภาพบนเขตรอยเฉือนพบในบริเวณ Nordre Stromfjord shear zone, Greenland ภาพล่างเขตรอยเฉือนจากแผ่นหินบางของหินอะไพลต์ (aplite) กว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร (แหล่งที่มา: Figure 9.4 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



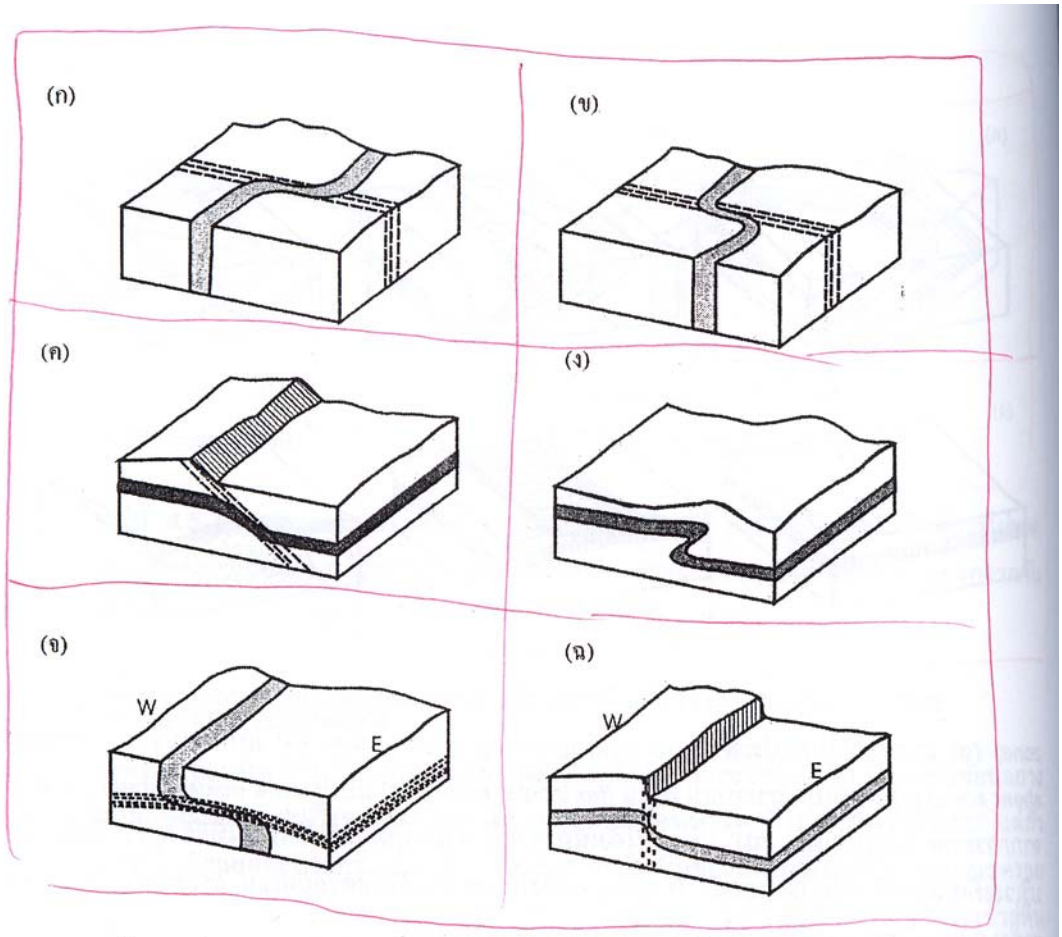
รูปที่ 9.5 เขตรอยเฉือนแบบต่อเนื่อง (continuous shear zone) สังเกตชั้นหินสีเทาไม่ขาดออกจากกัน และเขตรอยเฉือนแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous shear zone) ชั้นหินสีเทาขาดออกจากกันในเขตรอยเฉือน (แหล่งที่มา*: Figure 9.5 โดย Davis and Reynolds, 1996)



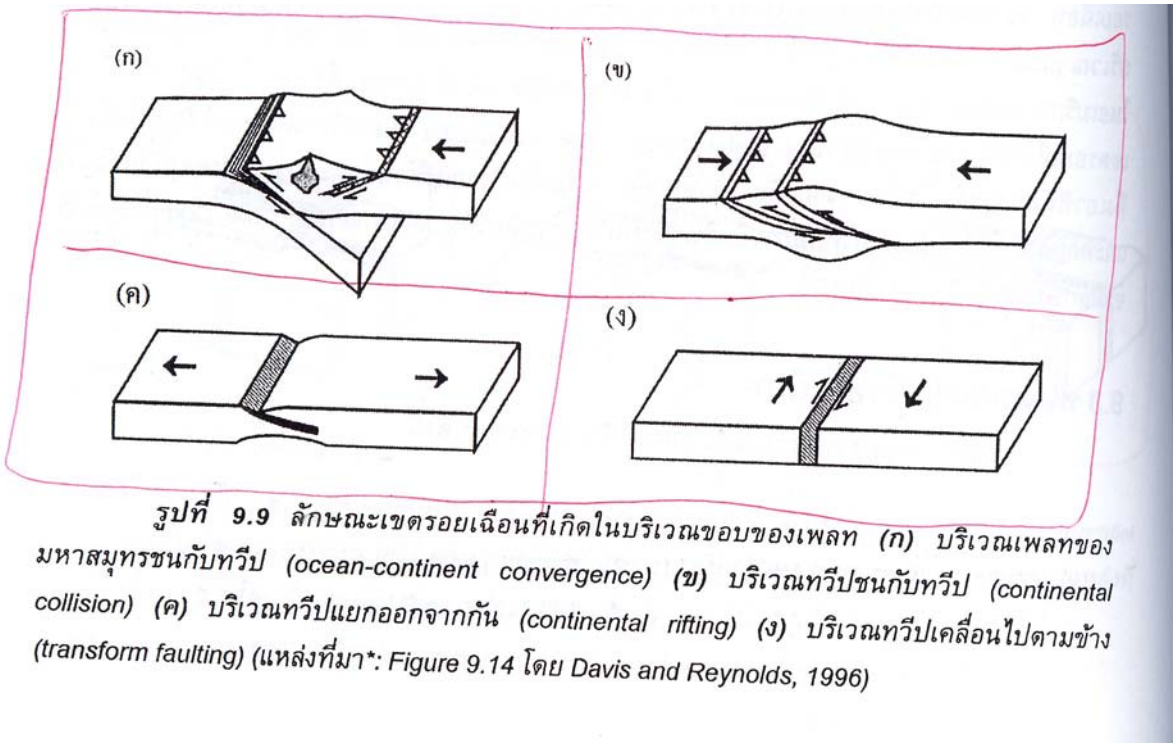
รูปที่ 9.6 ลักษณะปรากฏของเขตรอยเฉือน (ก) แบบขนานไปทั้งแนวเขตรอยเฉือน (parallel margins) (ง) แบบกว้างออก (diverging margins) (ค) แบบบีบเล็กลง (converging margins) (แหล่งที่มา*: Figure 9.8 โดย Davis and Reynolds, 1996)



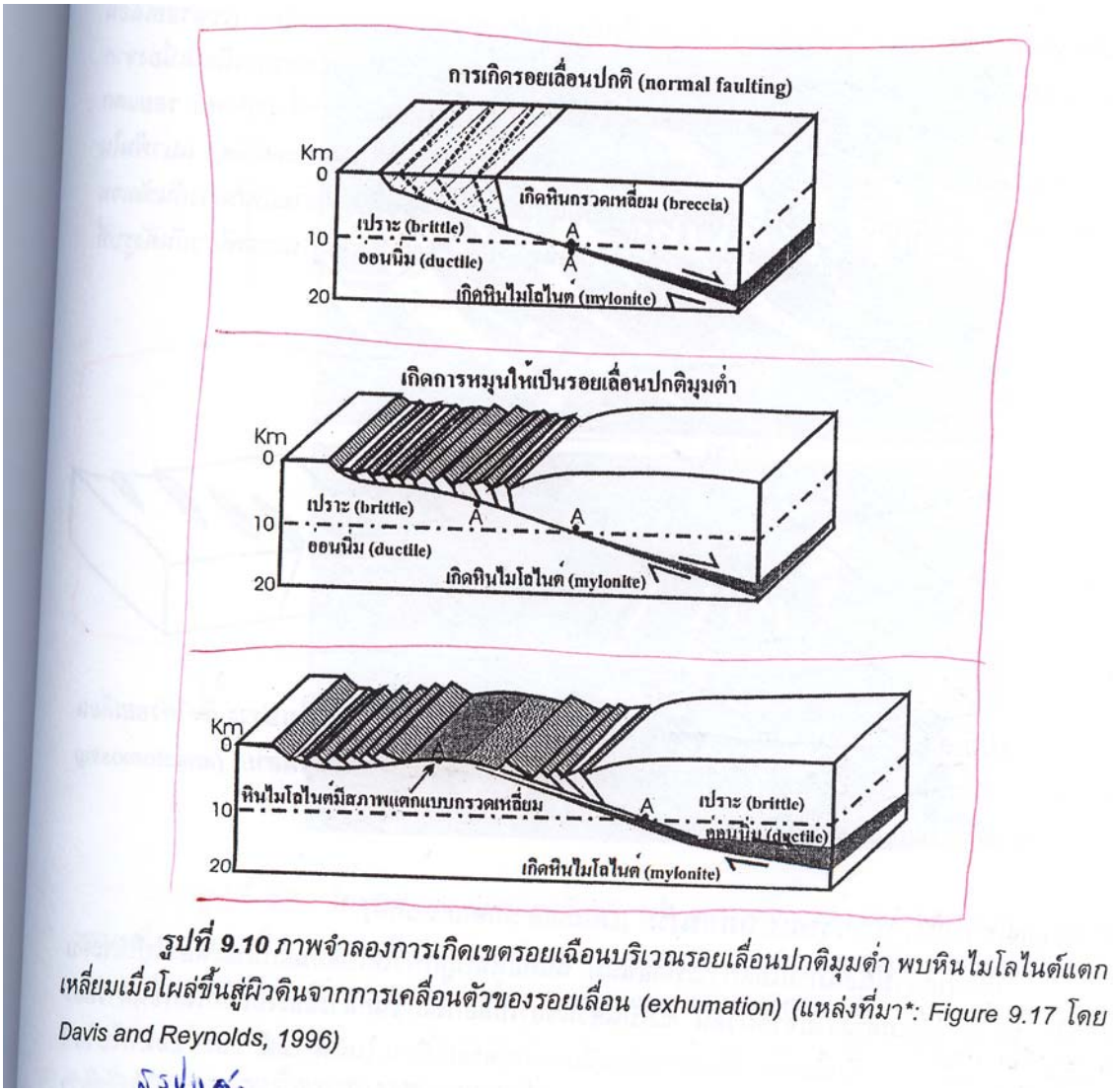
รูปที่ 9.7 ลักษณะของริ้วรอยเฉือนในบริเวณเขตรอยเฉือน (ก) แบบขนาน (parallel shear zone) (ข) แบบกลับไปมาประสานสาย (anastomosing shear zone) (ค) แบบคอนจูเกต (conjugate shear zone) (ง) แบบเป็นระนาบแนวนอน (horizontal plane) (จ) แบบรูปโค้ง (folded shear zone) เกิดจากการยกตัวของแผ่นดิน (ฉ) แบบรูปโค้งเนื่องจากไม่สามารถตัดเข้าไปในหินที่แข็งกว่า จึงโค้งไปหาบริเวณที่เปลี่ยนลักษณะได้ง่ายกว่า ถือเป็นการโค้งในระหว่างเกิดเขตรอยเฉือน (original planar shear zone) (แหล่งที่มา: Figure 9.9 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



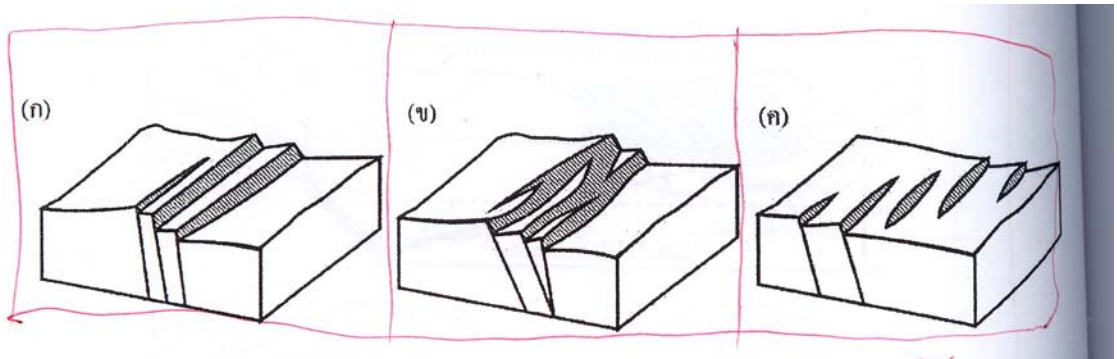
รูปที่ 9.8 ชื่อของเขตรอยเฉือน (ก) เขตรอยเฉือนแบบเคลื่อนไปทางขวามือ (right-handed (dextral) shear zone) (ข) เขตรอยเฉือนแบบเคลื่อนไปทางซ้ายมือ (left-handed (sinistral) shear zone) (ค) เขตรอยเฉือนแบบปกติ (normal shear zone) (ง) เขตรอยเฉือนแบบย้อน (reverse shear zone) (จ) เขตรอยเฉือนแบบซีกบนไปทางตะวันตก (top to the west shear zone) (ฉ) เขตรอยเฉือนแบบฝั่งตะวันตกเลื่อนขึ้น (west side up (แหล่งที่มา: Figure 9.13 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



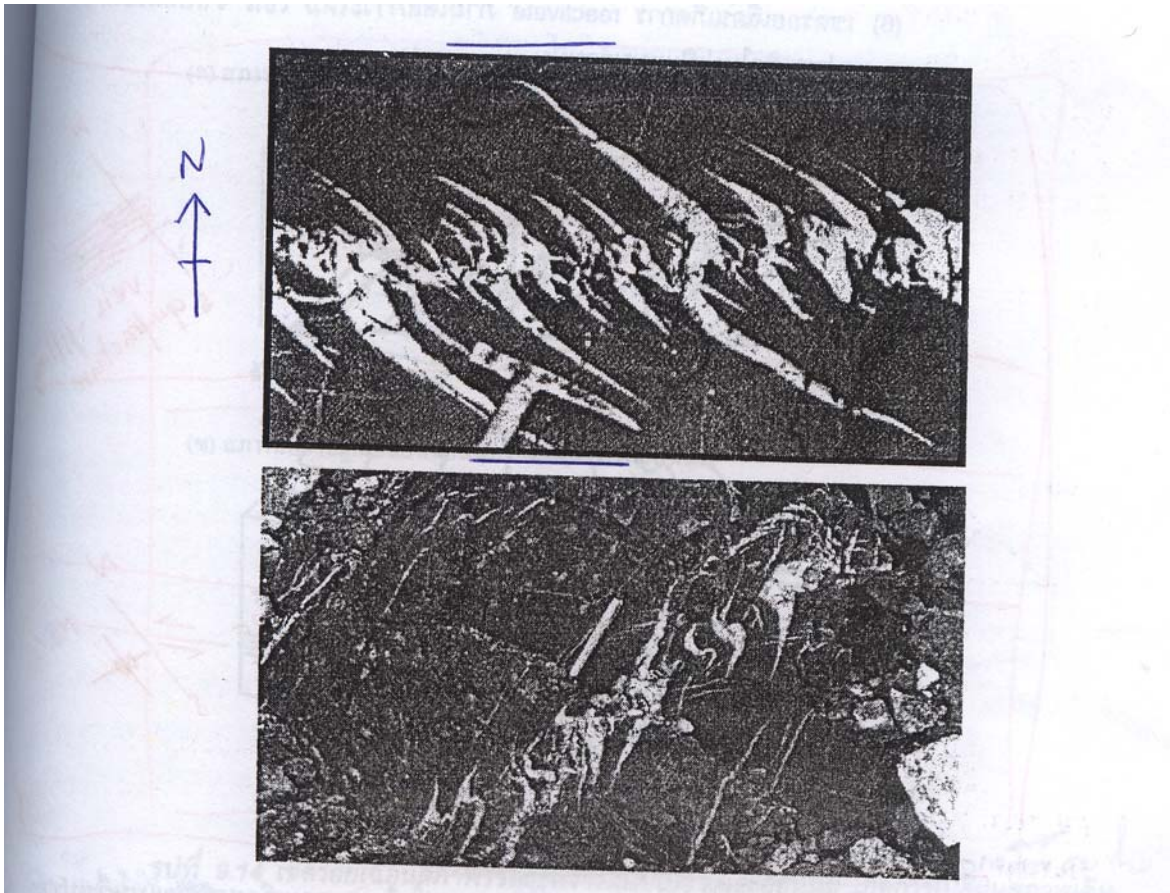
รูปที่ 9.9 ลักษณะเขตรอยเลื่อนที่เกิดในบริเวณขอบของเพลท (ก) บริเวณเพลทของมหาสมุทรชนกับทวีป (ocean-continent convergence) (ข) บริเวณทวีปชนกับทวีป (continental collision) (ค) บริเวณทวีปแยกออกจากกัน (continental rifting) (ง) บริเวณทวีปเคลื่อนไปตามข้าง (transform faulting) (แหล่งที่มา: Figure 9.14 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



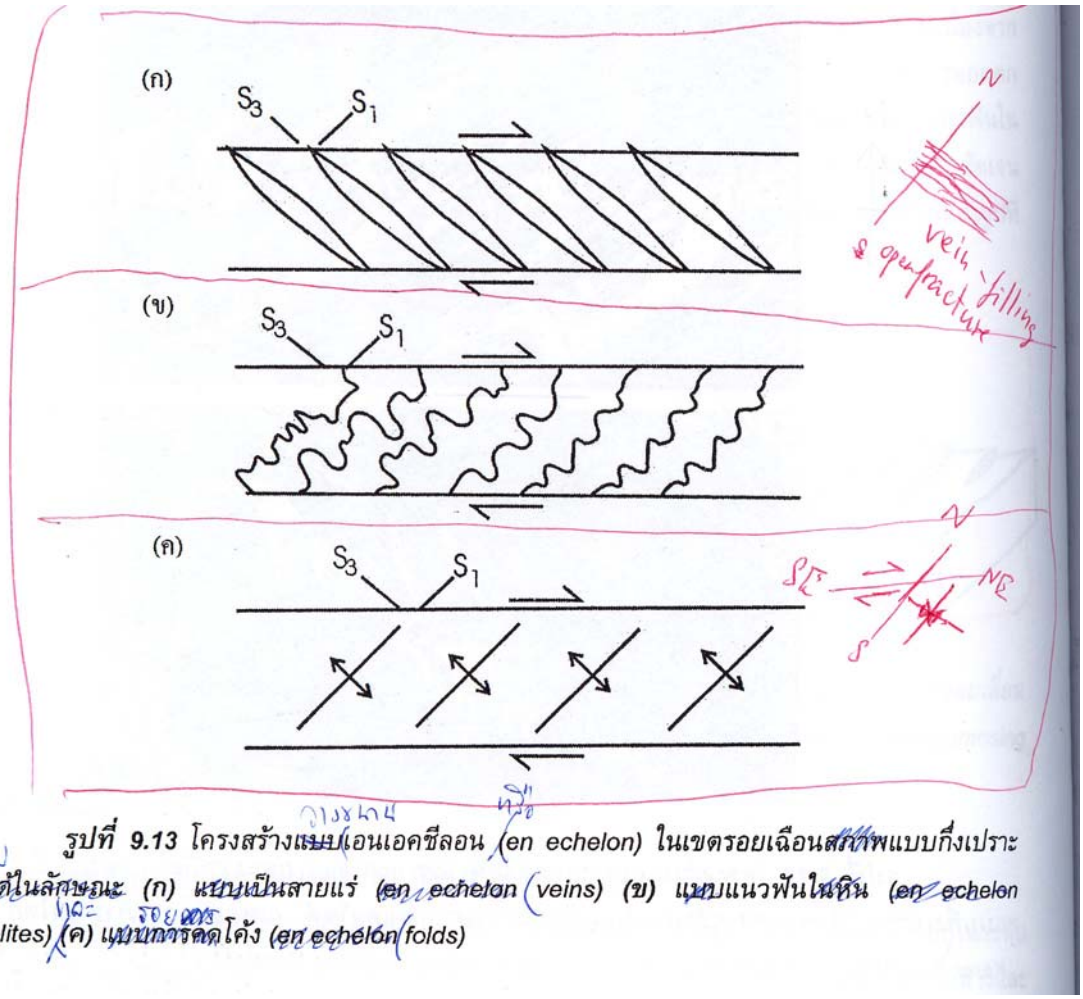
รูปที่ 9.10 *ภาพจำลองการเกิดเขตรอยเฉือนบริเวณรอยเลื่อนปกติมุมต่ำ พบหินไมโลไนต์แตกเหลี่ยมเมื่อโผล่ขึ้นสู่ผิวดินจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน (exhumation) (แหล่งที่มา*: Figure 9.17 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



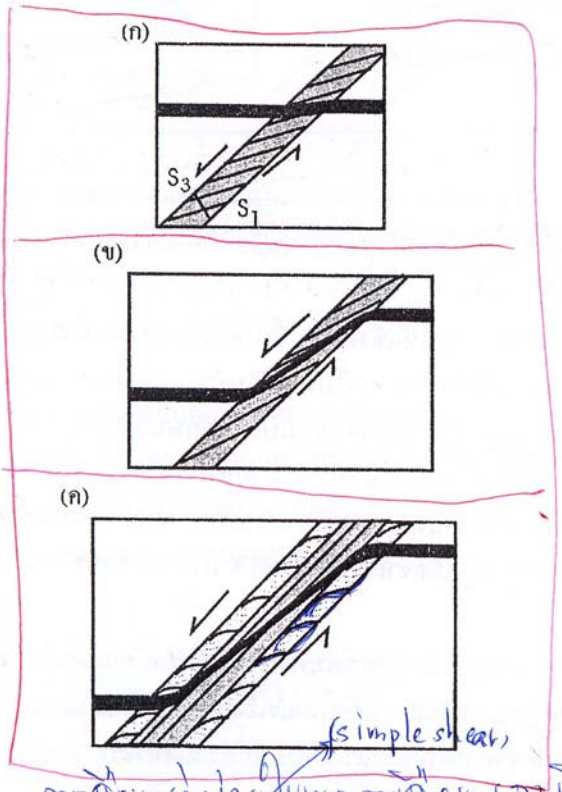
รูปที่ 9.11 ลักษณะของบริเวณที่มีการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะและกึ่งเปราะ ซึ่งได้รอยเลื่อน (ก) รอยเลื่อนแบบขนาน (parallel faults) (ข) รอยเลื่อนแบบกลับไปมาประสานสาย (anastomosing faults) (ค) รอยเลื่อนแบบแอนเอคซีลอน (en echelon faults)



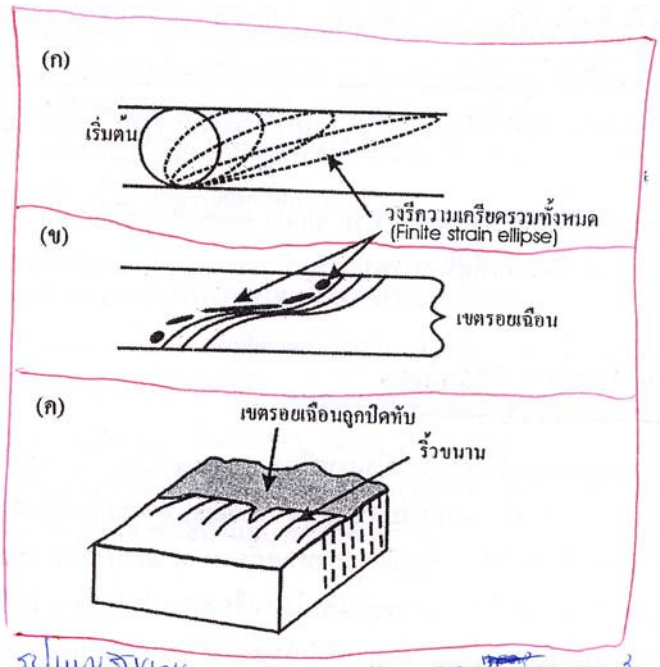
รูปที่ 9.12 โครงสร้างแบบเอนเอคซีลอน (en echelon) แสดงว่าเกิดในเขตรอยเฉือนสภาพแบบกึ่งเปราะ ทั้งสองภาพเป็นเอนแอคซีลอนของสายแร่แคลไซต์ (แหล่งที่มา: ภาพบนโดย Pual Karabinos, Williams College; ภาพล่างโดย Tekla Harns, Amherst College)



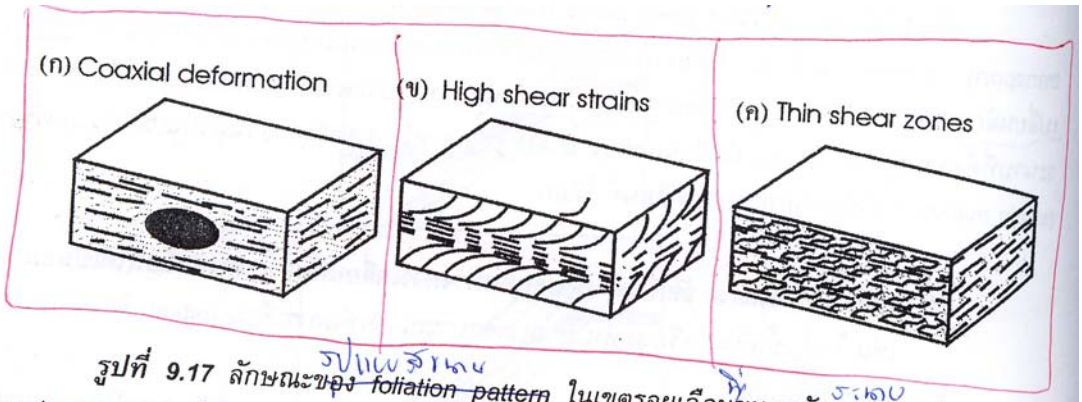
รูปที่ 9.13 โครงสร้างแบบเอนเอคชีลอน (en echelon) ในเขตรอยเฉือนสภาพแบบกึ่งเปราะ พบได้ในลักษณะ (ก) แบบเป็นสายแร่ (en echelon veins) (ข) แบบแนวฟันในหิน (en echelon stylolites) (ค) แบบการคดโค้ง (en echelon folds)



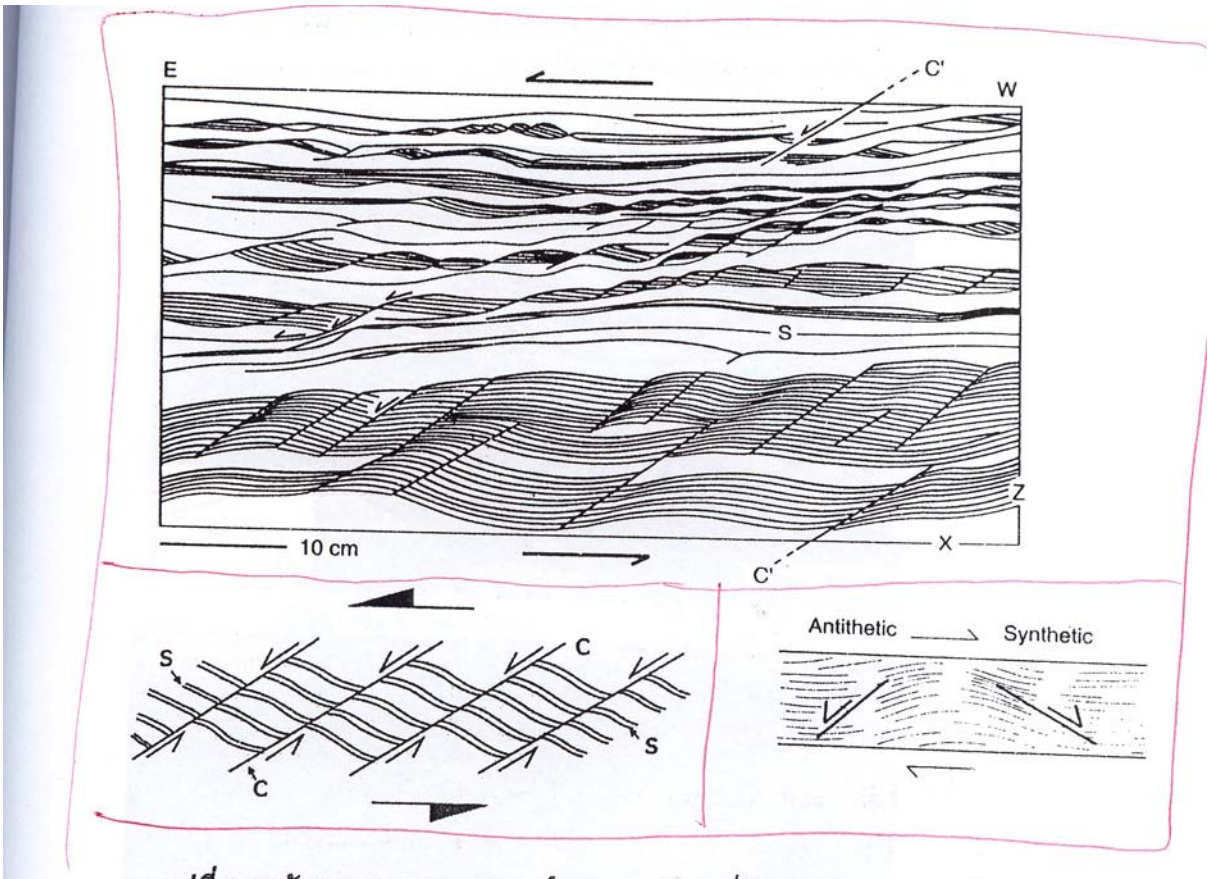
รูปที่ 9.15 แสดงการเกิดแบบ simple shear ของเขตรอยเฉือน **(ก)** เมื่อเกิดการเฉือนเกิดริ้วขนานแนว 45° **(ข)** และเมื่อเกิดต่อเนื่องริ้วขนานจะเปลี่ยนไปในแนวเกือบขนานการทิศทางความเค้นเฉือน **(ค)** ถ้าเขตรอยเฉือนกว้างขึ้นริ้วขนานจะเป็นแนวรูปตัว S (sigmoidal form)



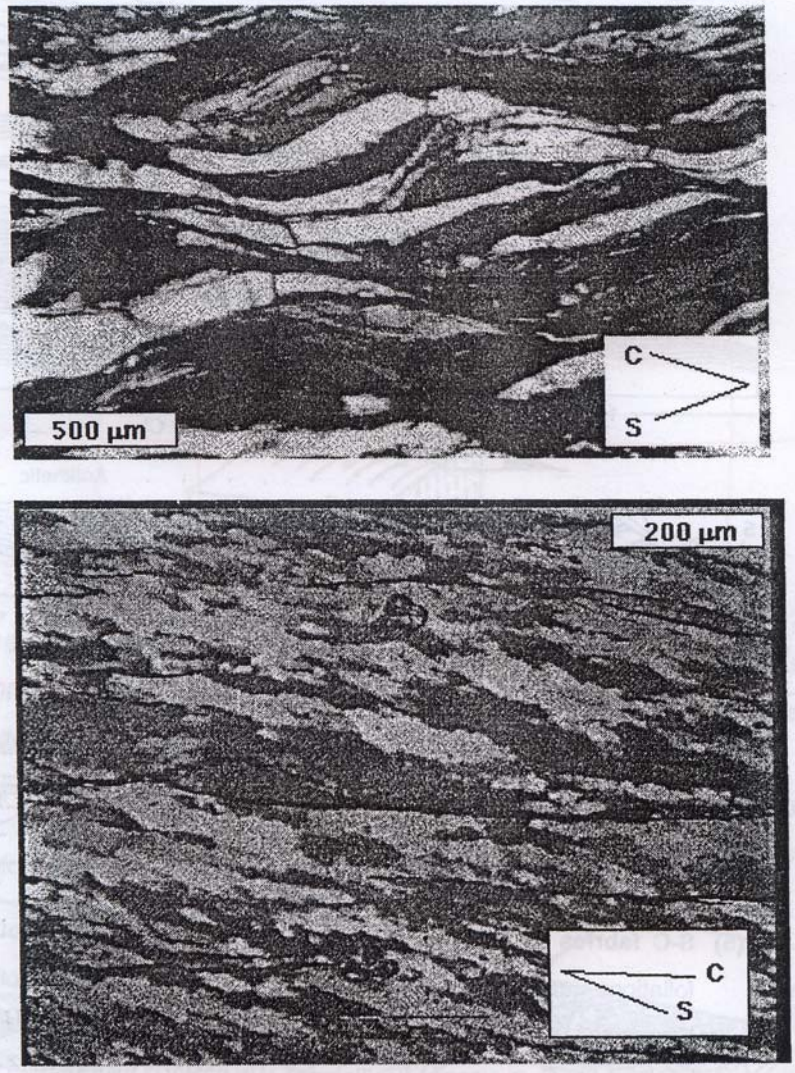
รูปที่ 9.16 ลักษณะของ foliation pattern ในเขตรอยเฉือน (A) finite strain ellipse เมื่อเกิดการเฉือนด้วยปริมาณต่างๆ variation ของ finite strain ellipse ตามลักษณะของ foliation pattern (C) ลักษณะ foliation pattern ที่อาจจะปรากฏเพียงด้านเดียว



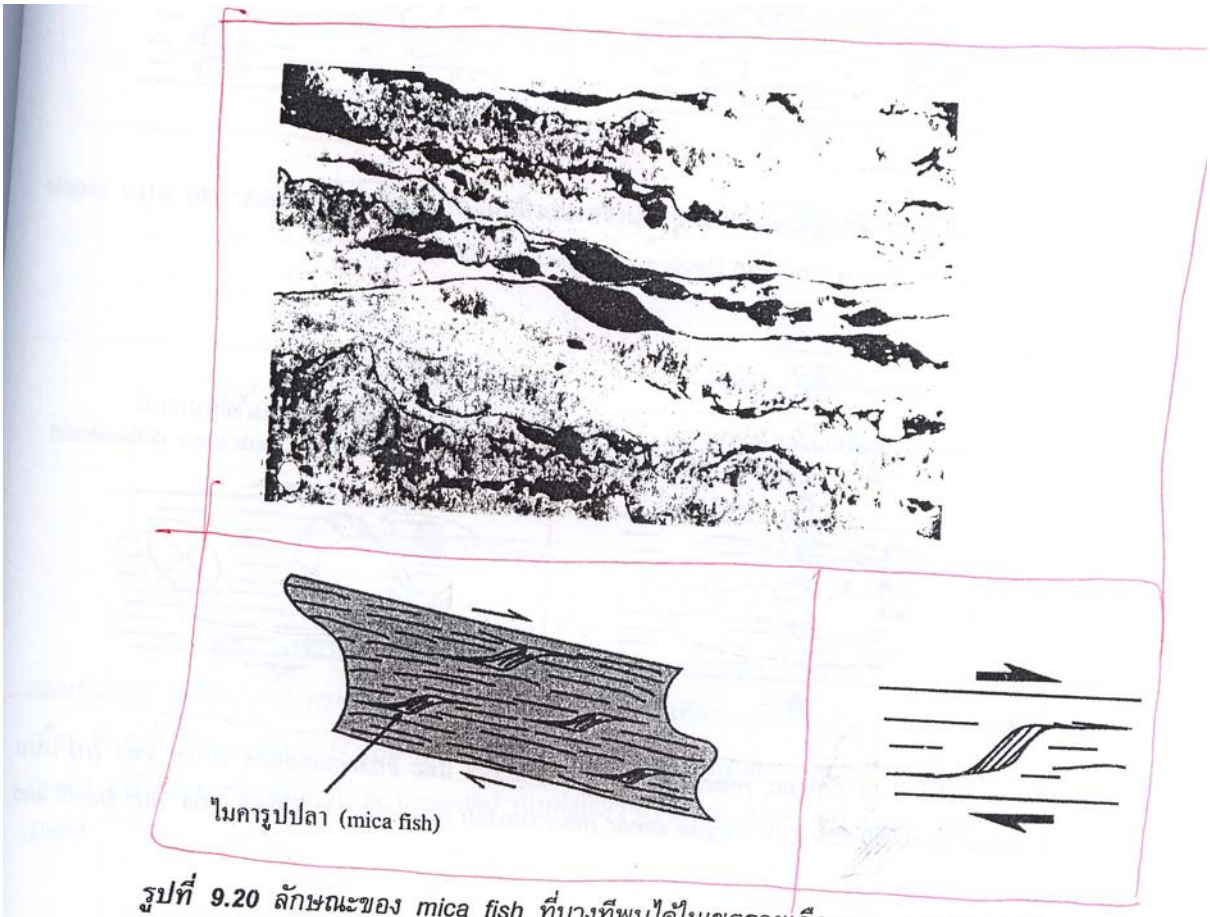
รูปที่ 9.17 ลักษณะของ foliation pattern ในเขตรอยเฉือนขนานกับแนวการเฉือน (shear plane) อาจจะหมายถึง (A) coaxial deformation (B) high shear strain (C) thin shear zones ที่รวมกันอยู่ในแนวใหญ่ (แหล่งที่มา*: Figure 9.41 โดย Davis and Reynolds, 1996)



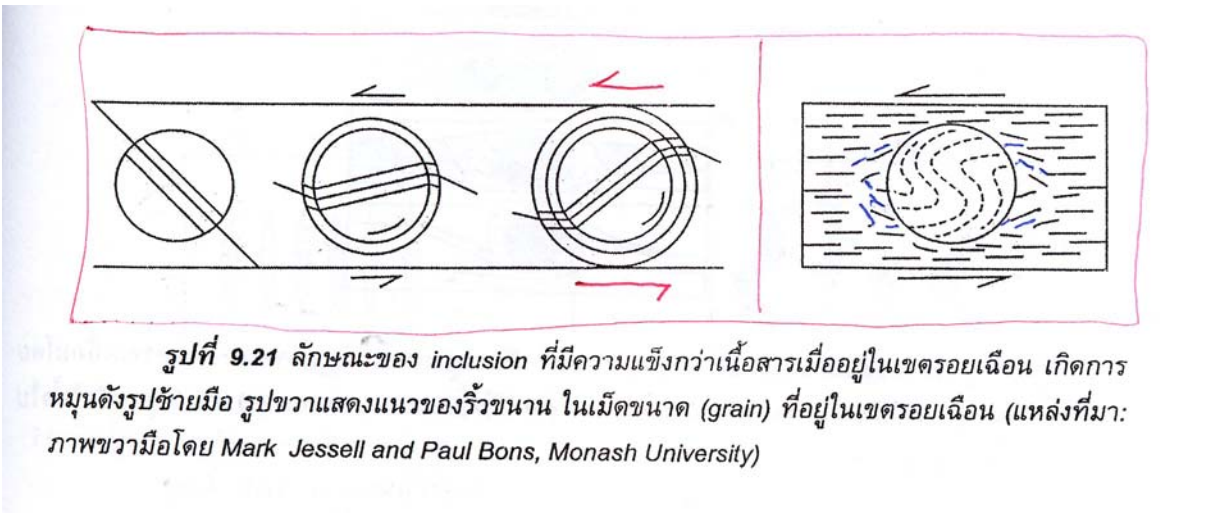
รูปที่ 9.18 ลักษณะของ shear band ในเขตรอยเฉือน ที่ตัดแนว ของ foliation ถ้า shear band ตัดตามแนวการเฉือนเรียก synthetic ถ้าตรงกันข้ามเรียก antithetic (แหล่งที่มา: Figure 9.42 และ 9.43 โดย Davis and Reynolds, 1996)



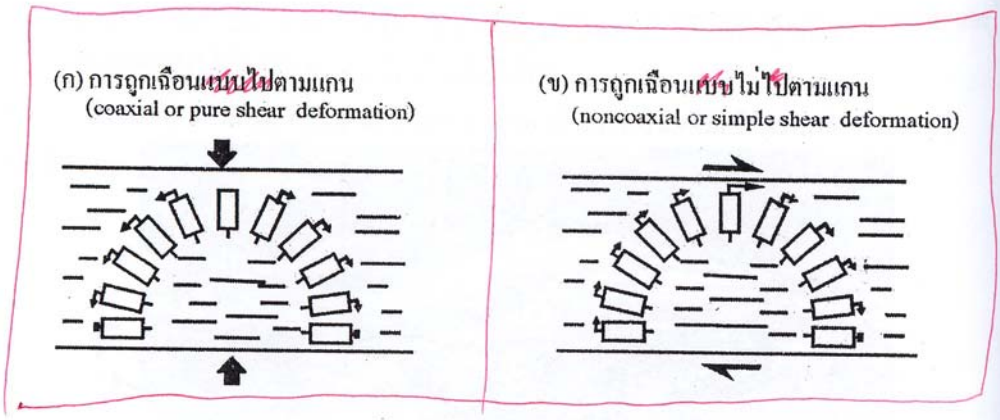
รูปที่ 9.19 ลักษณะของ S-C fabric C-surface ขนานกันแนวของการเฉือน (แหล่งที่มา: ภาพโดย Mark Jessell and Paul Bons, Monash University)



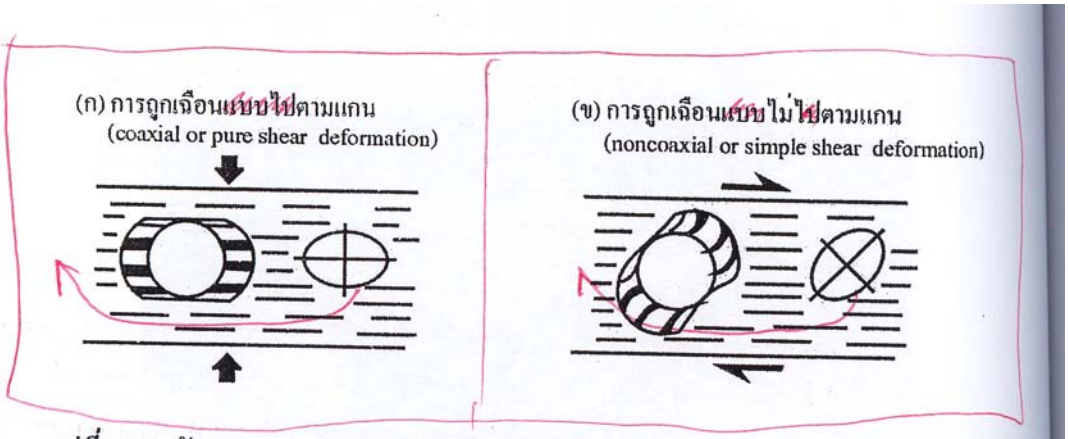
รูปที่ 9.20 ลักษณะของ mica fish ที่บางทีพบได้ในเขตรอยเฉือนของภาพจากแผ่นหินบางของ mylonitic granodiorite หางยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร และภาพขยายแสดง mica fish และ mica trail (แหล่งที่มา: Figure 9.46 โดย Davis and Reynolds, 1996)



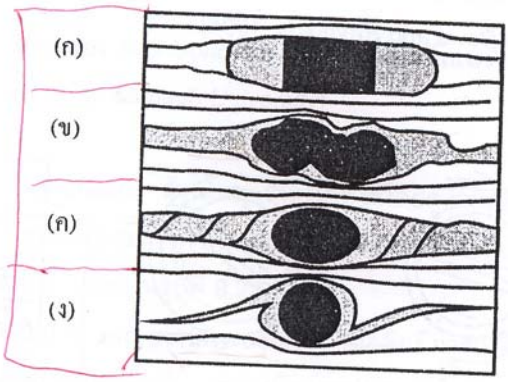
รูปที่ 9.21 ลักษณะของ inclusion ที่มีความแข็งกว่าเนื้อสารเมื่ออยู่ในเขตรอยเฉือน เกิดการหมุนดังรูปซ้ายมือ รูปขวาแสดงแนวของริ้วขนาน ในเม็ดขนาด (grain) ที่อยู่ในเขตรอยเฉือน (แหล่งที่มา: ภาพขวามือโดย Mark Jessell and Paul Bons, Monash University)



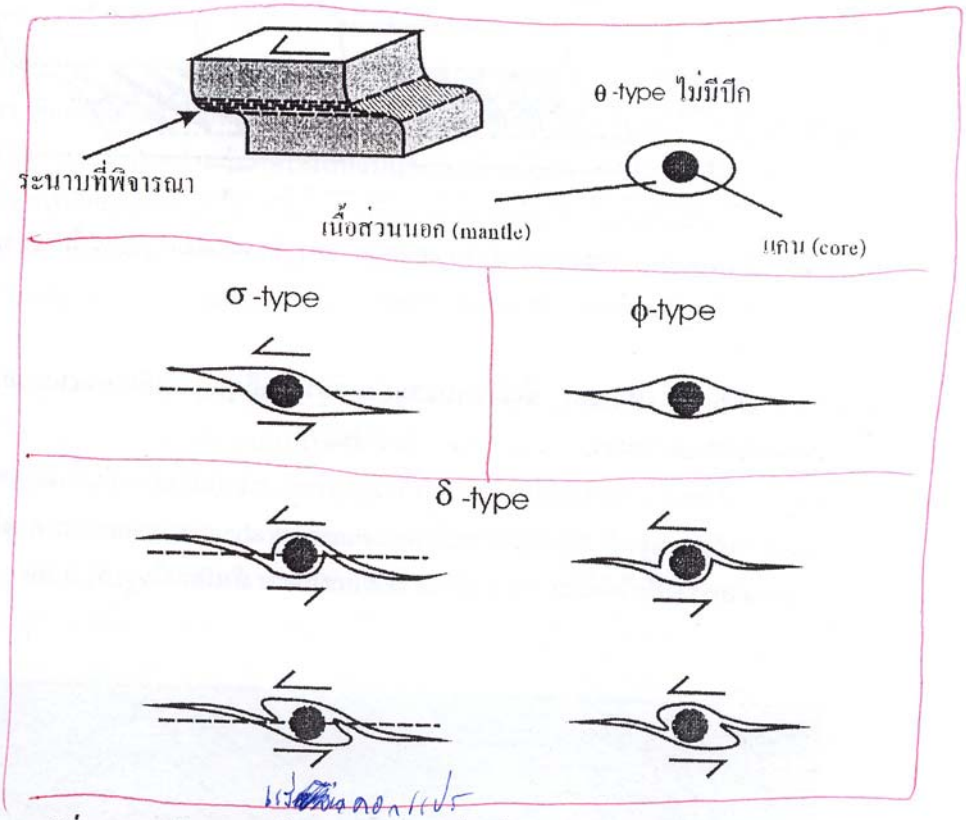
รูปที่ 9.22 ลักษณะของการหมุนในเขตรอยเฉือน (ก) แบบ pure shear (ข) แบบ simple shear (แหล่งที่มา: Figure 9.50 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



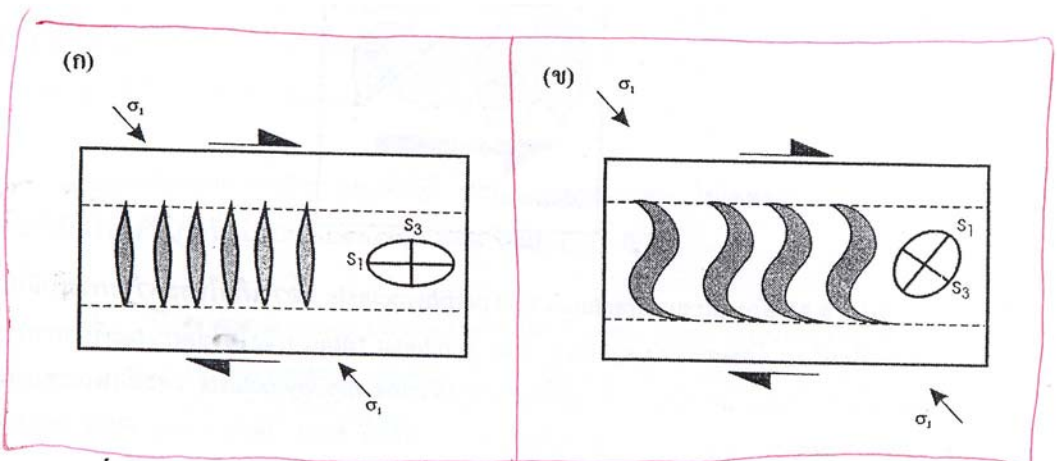
รูปที่ 9.23 ลักษณะ pressure shadows, fibers และ instantaneous strain ของ (ก) แบบ pure shear (coaxial) (ข) แบบ simple shear (noncoaxial) (แหล่งที่มา: Figure 9.54 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



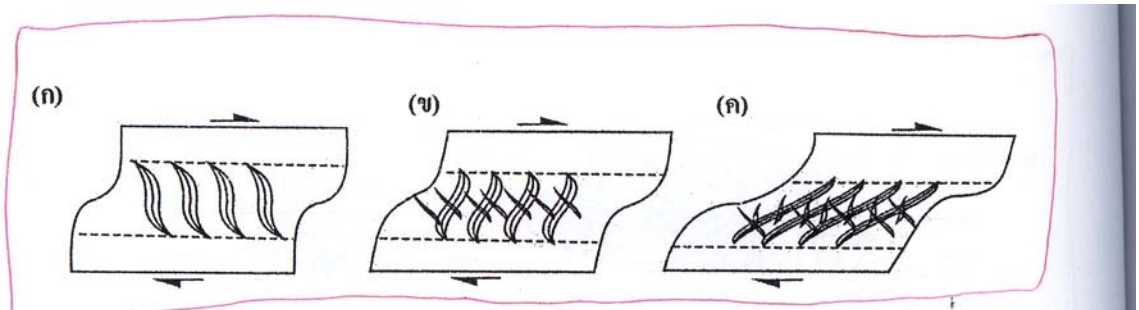
รูปที่ 9.24 ลักษณะของ porphyroclasts ที่อาจเกิดการเปลี่ยนลักษณะในเขตรอยเฉือนโดย (ก) เกิด extensional failure (ข) เกิด shear failure (ค) เกิด pressure shadow (ง) เกิด หมุนหรือไหลไปตามแนวการเฉือน



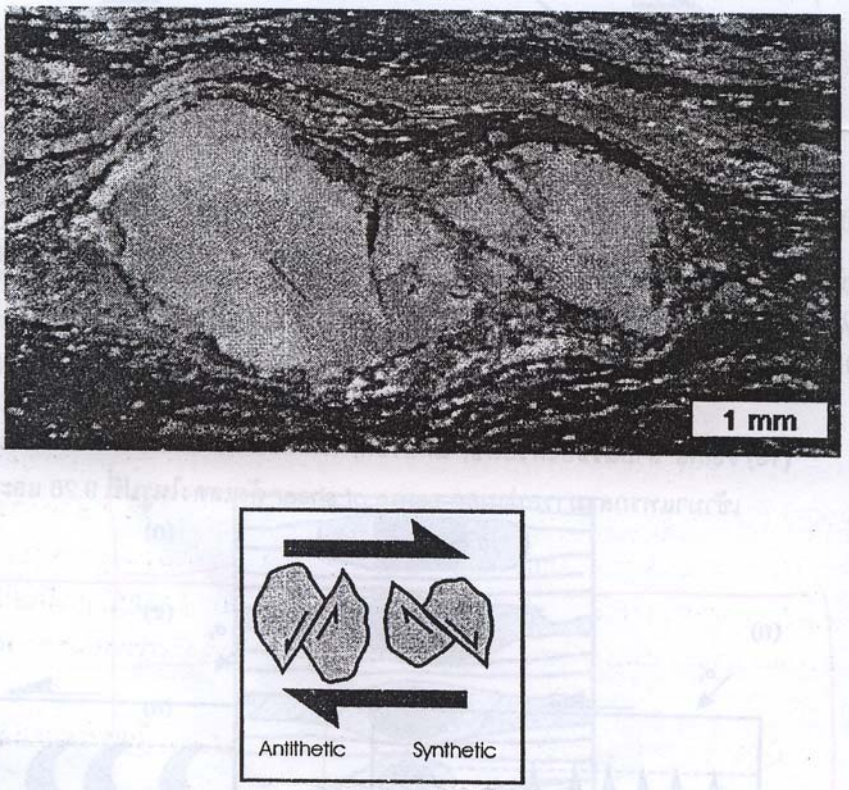
รูปที่ 9.25 รูปร่างของ porphyroclasts ซึ่งมีชื่อตามอักษรกรีก ส่วนมากมีขนาดเล็ก ต้องดูในแผ่นหินบาง (หรือบางครั้งพบด้วยตาเปล่า) โดยตัดแผ่นหินในทิศทางที่แสดงในภาพของบริเวณเขตรอยเฉือน หากเป็นลักษณะแบบ θ-type ไม่สามารถบ่งบอกทิศทางการเคลื่อนที่ได้ การบ่งบอกทิศทางดูที่ปีก (wing) ที่เป็นส่วนของเนื้อส่วนนอก (mantle) (แหล่งที่มา: Figure 9.58 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



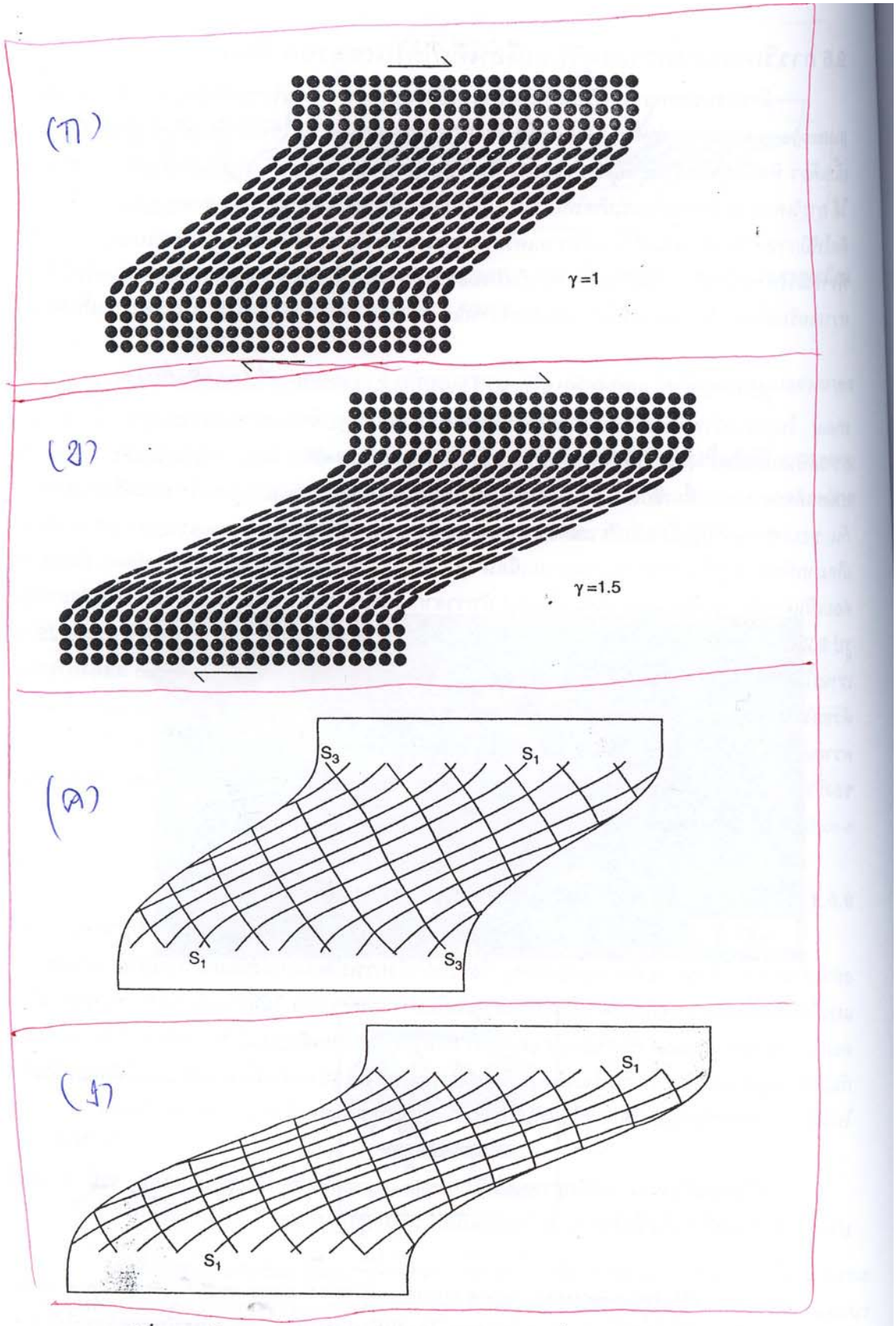
รูปที่ 9.26 การวางตัวของลายแร่ (veins) ของ coaxail และ noncoaxial เทียบกับ instantaneous strain (แหล่งที่มา*: Figure 9.65 โดย Davis and Reynolds, 1996)



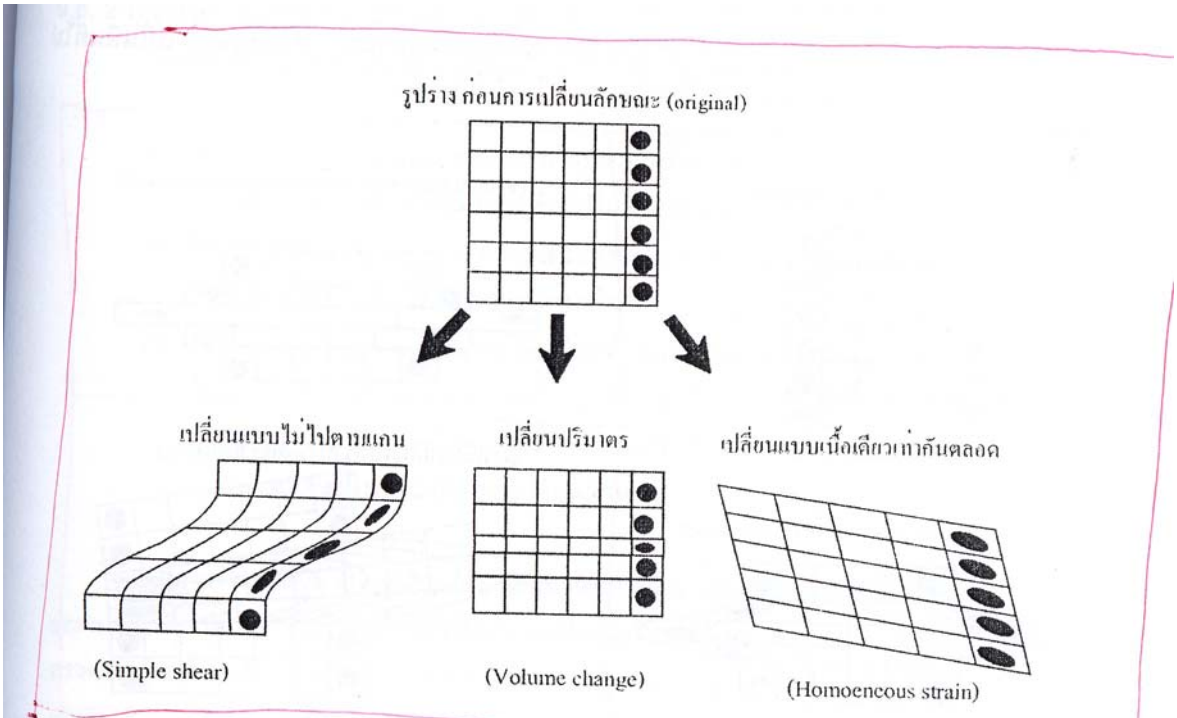
รูปที่ 9.27 ลักษณะของ progressive deformation ของ en echelon veins ในเขตรอยเฉือน (แหล่งที่มา*: Figure 9.66 โดย Davis and Reynolds, 1996)



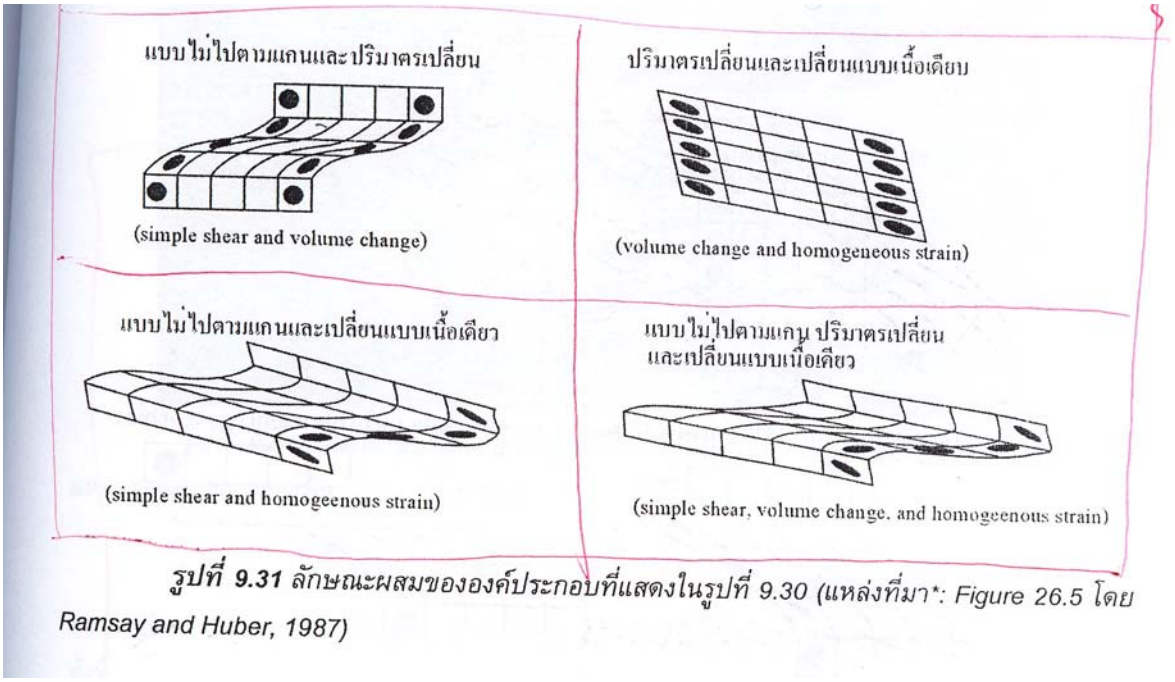
รูปที่ 9.28 ลักษณะของ fractures ของ porphyroclasts ที่อาจเกิดในระหว่างการเปลี่ยนลักษณะในเขตรอยเฉือนโดย ลักษณะของ synthetic และ antithetic รอยแตกจึงไม่ใช่ลักษณะที่นำมากำหนดแนวการเฉือนที่ดีเพราะแนว fractures ขึ้นอยู่กับการวางตัวของ prophyroclasts และลักษณะของผลึก ที่บ่งบอกได้เพียงว่ามีการเกิดการเฉือน (แหล่งที่มา: ภาพบนโดย Mark Jessell and Paul Bons, Monash University)



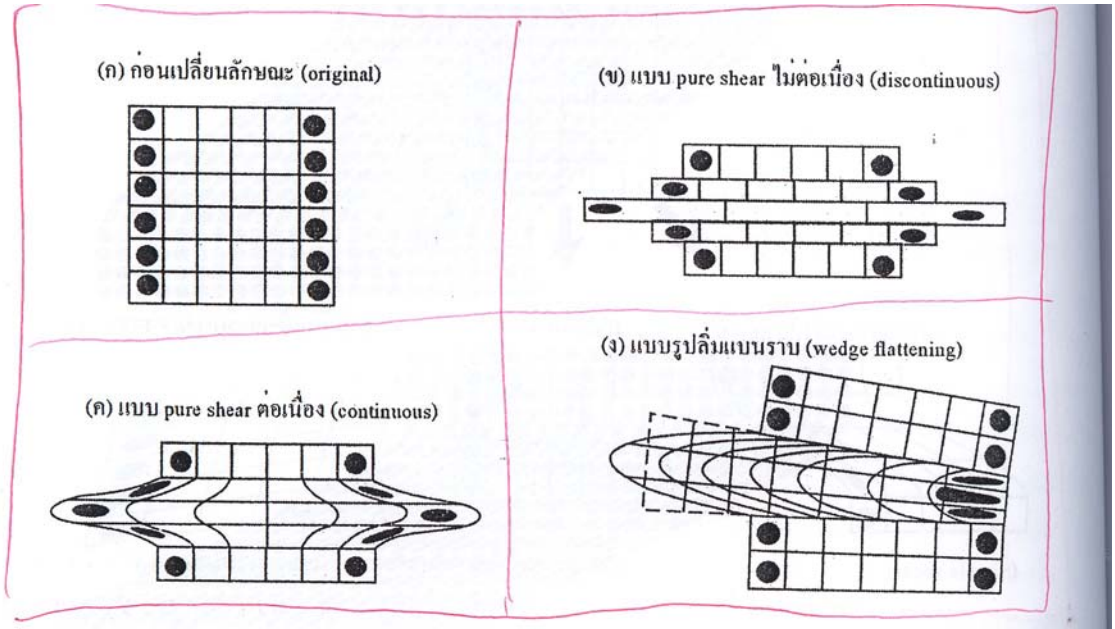
รูปที่ 9.29 ลักษณะของ heterogeneous strain (ก) เมื่อมีการเฉือนด้วย γ=1 (ข) เมื่อเฉือนเพิ่มมากขึ้น γ=2 (ค) finite strain trajectory สำหรับ ก (ง) finite strain trajectory สำหรับ ข (แหล่งที่มา: Figure 3.2 และ 3.12 โดย Ramsay and Huber, 1983)



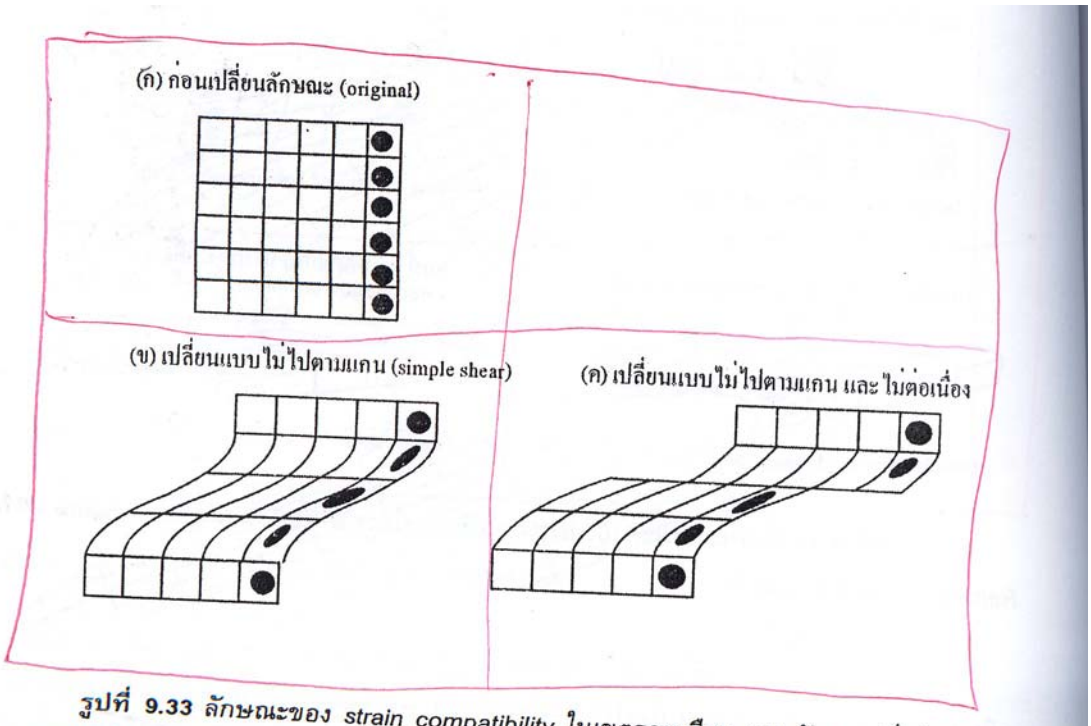
รูปที่ 9.30 สามองค์ประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อมีแนวการเฉือนอยู่ด้านข้าง ประกอบด้วย simple shear, volume change และ homogenous (แหล่งที่มา: Figure 26.4 โดย Ramsay and Huber, 1987)*



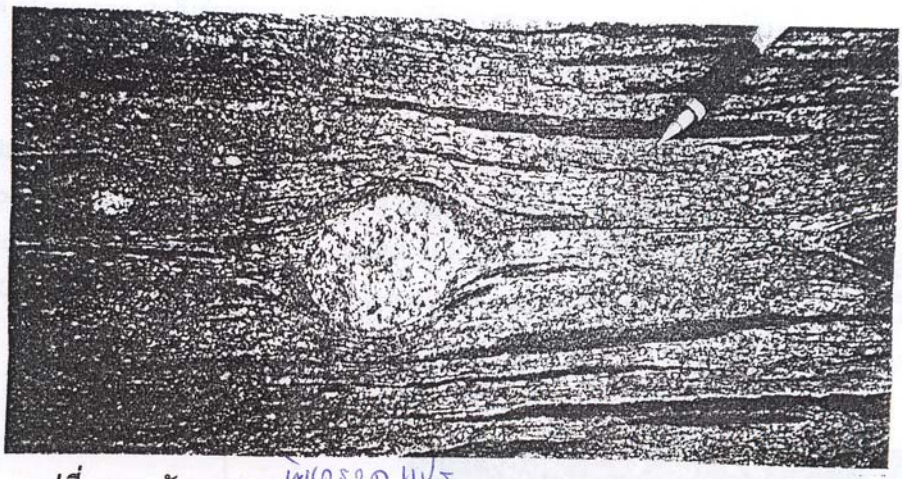
รูปที่ 9.31 ลักษณะผสมขององค์ประกอบที่แสดงในรูปที่ 9.30 (แหล่งที่มา: Figure 26.5 โดย Ramsay and Huber, 1987)*



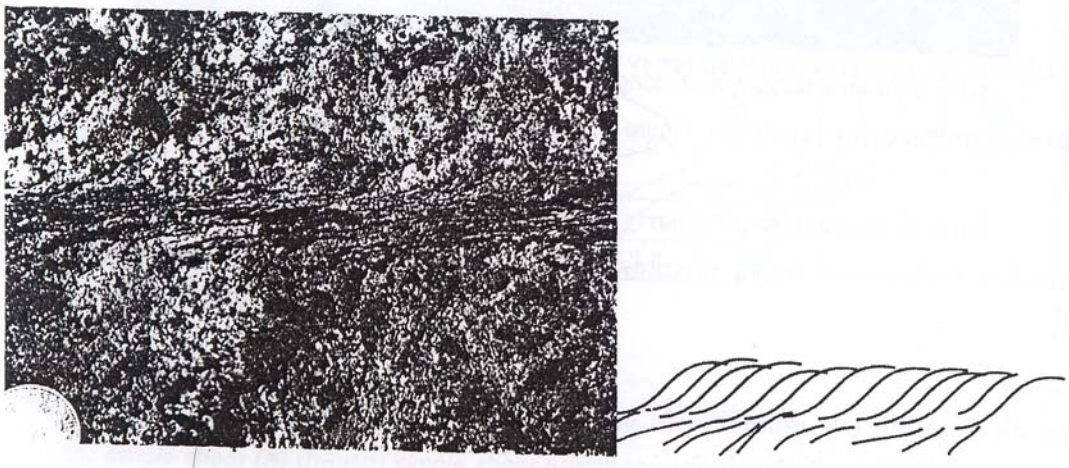
รูปที่ 9.32 ลักษณะของ strain incompatibility ในเขตรอยเฉือน (ก) ก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (ข) แบบ pure shear ไม่ต่อเนื่อง (ค) แบบ pure shear ต่อเนื่อง (ง) แบบรูปลิ่ม (แหล่งที่มา*: Figure 26.24 โดย Ramsay and Huber, 1987)



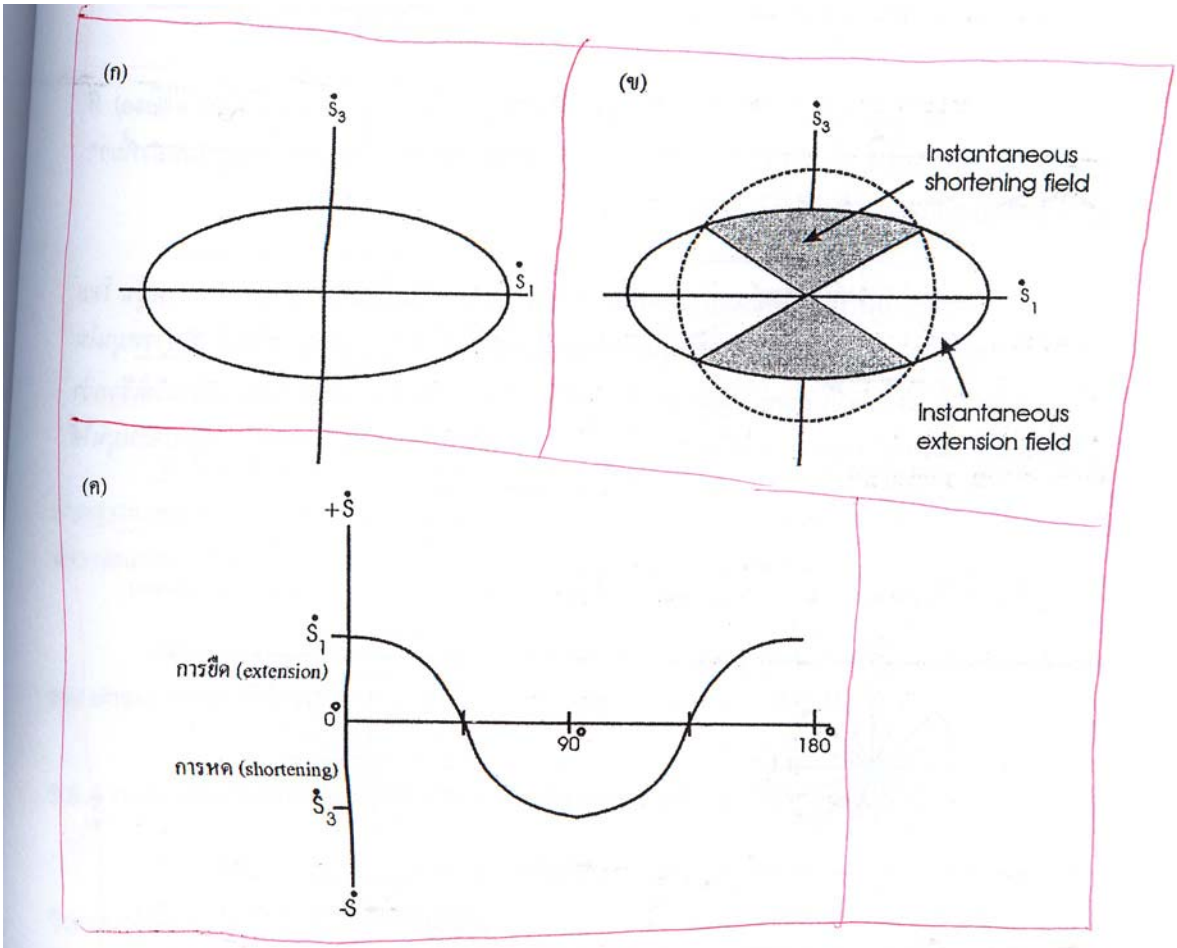
รูปที่ 9.33 ลักษณะของ strain compatibility ในเขตรอยเฉือน (ก) ลักษณะเริ่มต้น (ข) เกิดแบบ simple shear (ค) เกิดแบบ simple shear แต่ขาดความต่อเนื่องเกิดขึ้น (แหล่งที่มา*: Figure 26.35 โดย Ramsay and Huber, 1987)



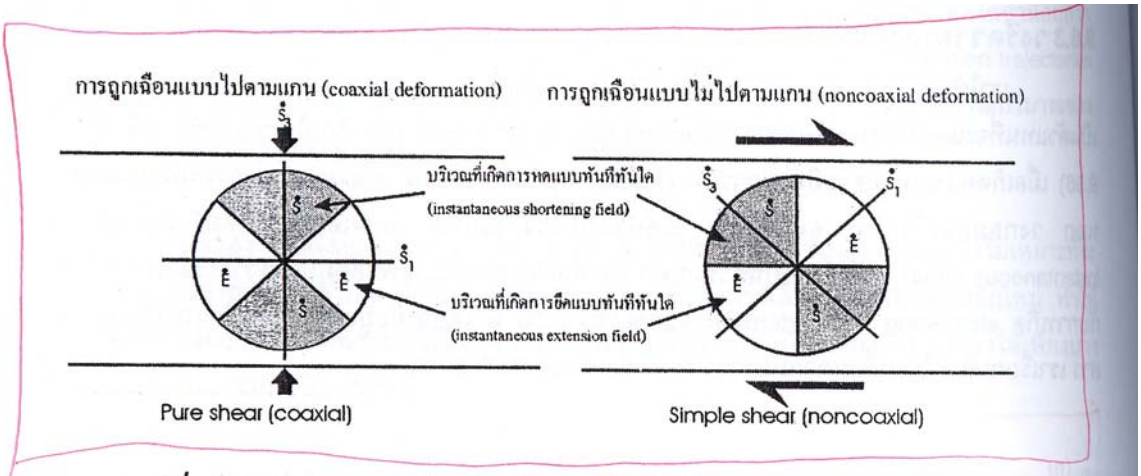
รูปที่ 9.34 ลักษณะของ metaconglomerate ถูกแปรสภาพ granitic cobble เป็นตัวแทนที่แสดง finite strain ของหิน (แหล่งที่มา: Figure 9.74 โดย Davis and Reynolds, 1996)



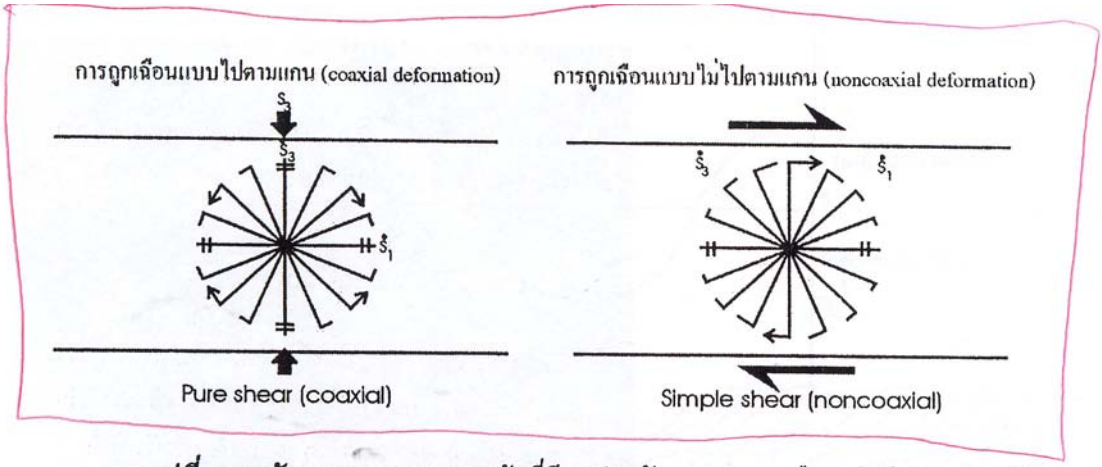
รูปที่ 9.35 ลักษณะของ dextral shear zone (ก) ตัดเข้าไปในแกรนิต (ข) foliation trajectories สำหรับเขตรอยเฉือน (แหล่งที่มา: Figure 9.81 โดย Davis and Reynolds, 1996)



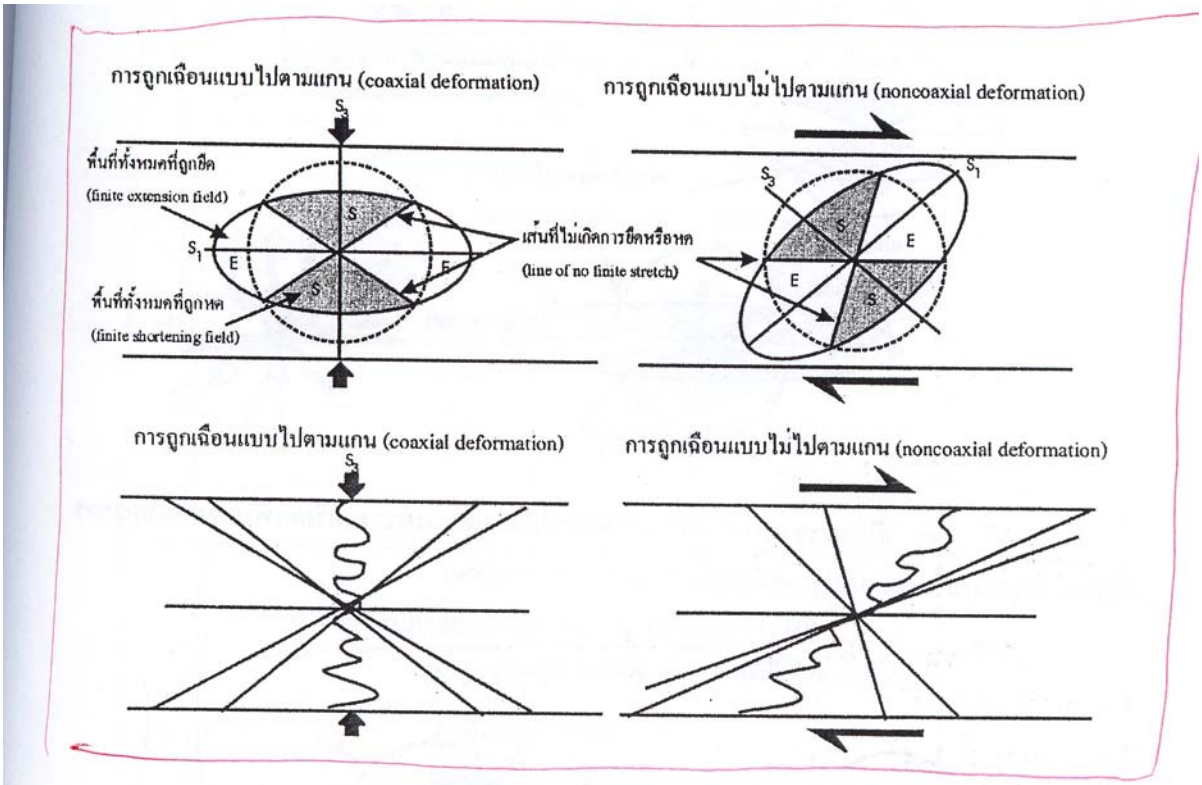
รูปที่ 9.36 *ลักษณะของวงรีความเครียดแบบทันทีทันใด (instantaneous strain ellipse)* ***(ก)*** *เมื่อมีการยืดบางส่วนหดสั้นบางส่วน* ***(ข)*** *นำเอาวงกลมก่อนการเปลี่ยนลักษณะมาซ้อนทับ* ***(ค)*** *ลักษณะอัตราการยืดและหด (แหล่งที่มา*: Figure 9. 89 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



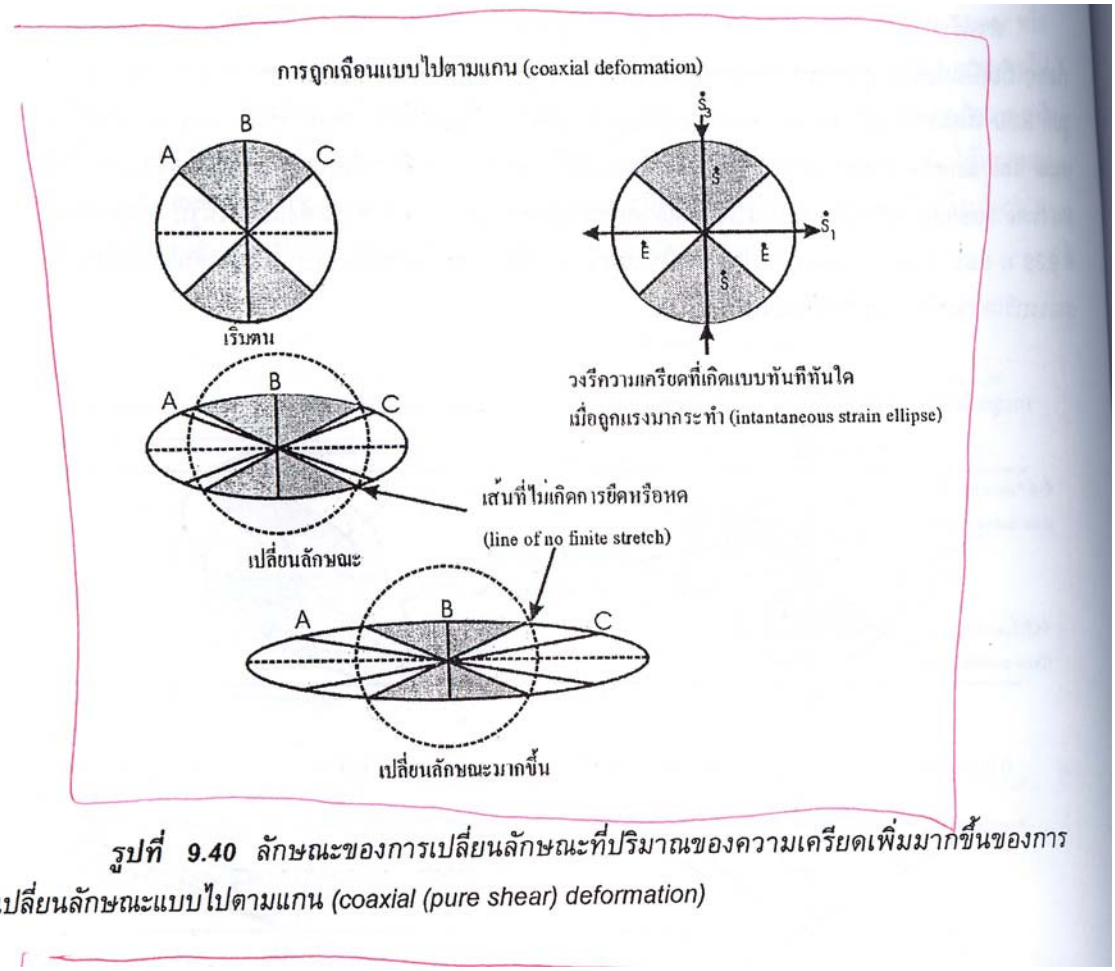
รูปที่ 9.37 ลักษณะของวงรีความเครียดแบบทันทีทันใด (instantaneous strain ellipse) ที่แสดงถึงอัตราความเครียดที่เกิดทันทีทันใด (ก) แบบ pure shear (ข) แบบ simple shear (แหล่งที่มา: Figure 9.90 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



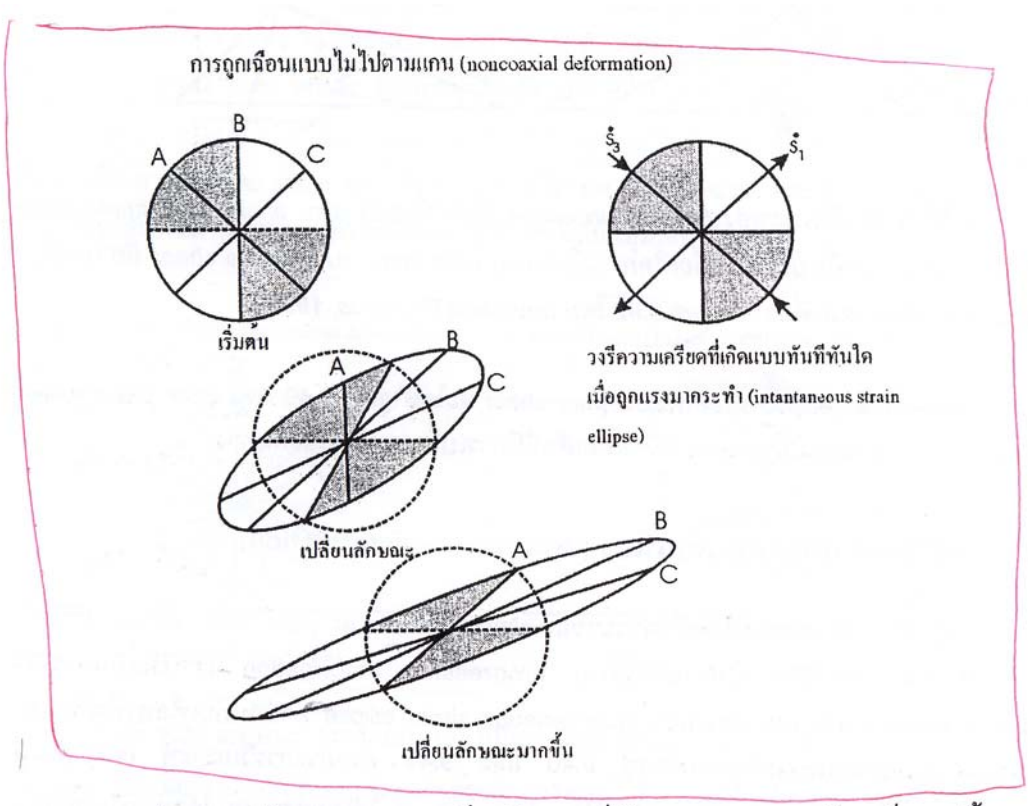
รูปที่ 9.38 ลักษณะการหมุนของเส้นที่มีมุมต่างกับระนาบการเฉือน ถ้ามีเส้นขนานคู่เล็กแสดงว่าเส้นนั้นไม่มีที่เปลี่ยนทิศทาง (ก) แบบ pure shear การหมุนเกิดมากที่เส้น 45 ^{o} กับระนาบการเฉือน (ข) แบบ simple shear การเกิดมากที่เส้นวางมุมตั้งฉากกับระนาบการเฉือน (แหล่งที่มา: Figure 9.91 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



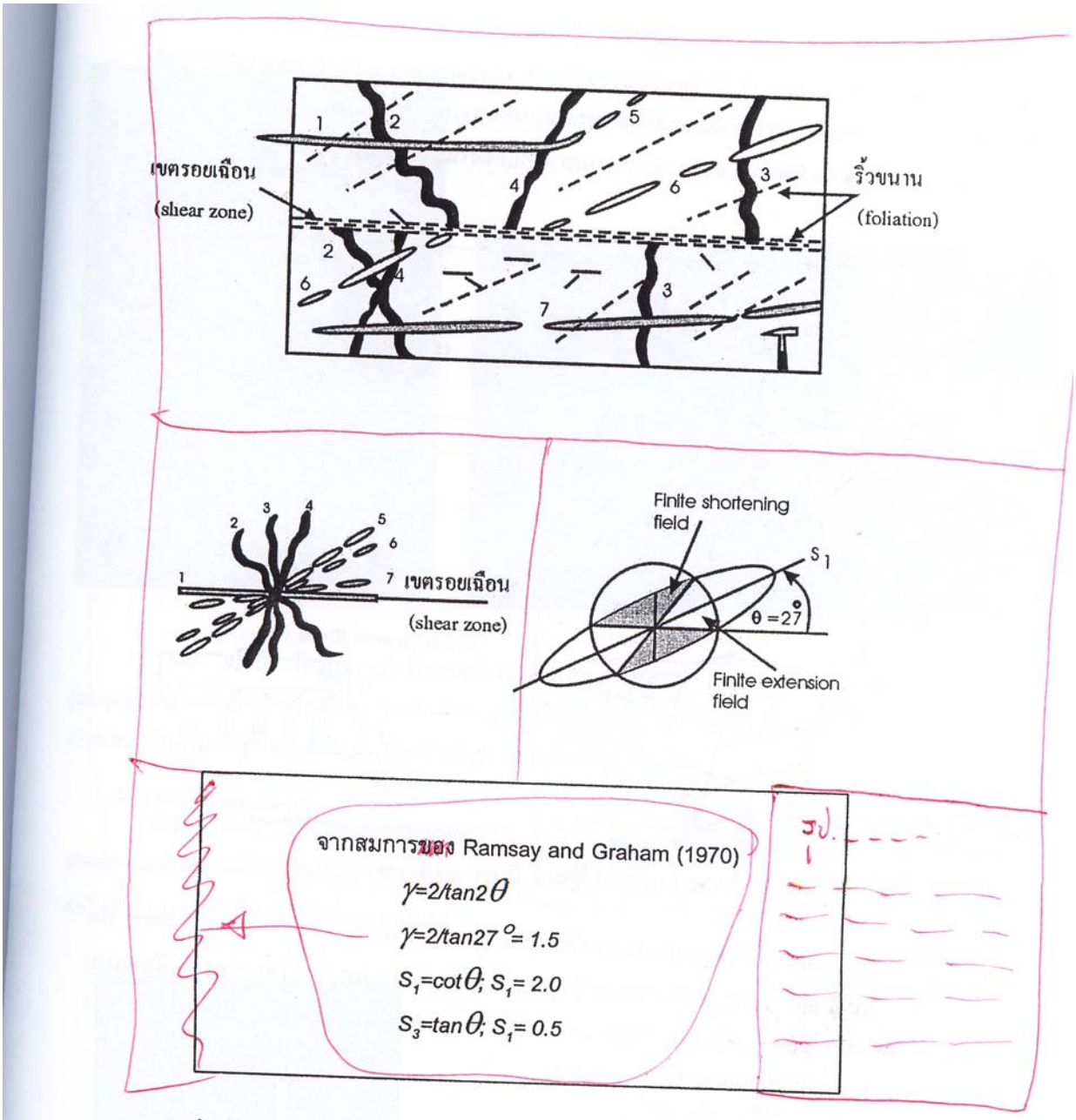
รูปที่ 9.39 *ลักษณะของ finite strain ellipse ที่เกิดขึ้นของ pure shear และ simple shear ภาพล่างแสดงเส้นต่างๆที่พบในหิน เมื่อเกิดการเฉือนแบบ pure shear และ simple shear มีการเปลี่ยนลักษณะแตกต่างกัน (แหล่งที่มา*: Figure 9.92 โดย Davis and Reynolds, 1996)*



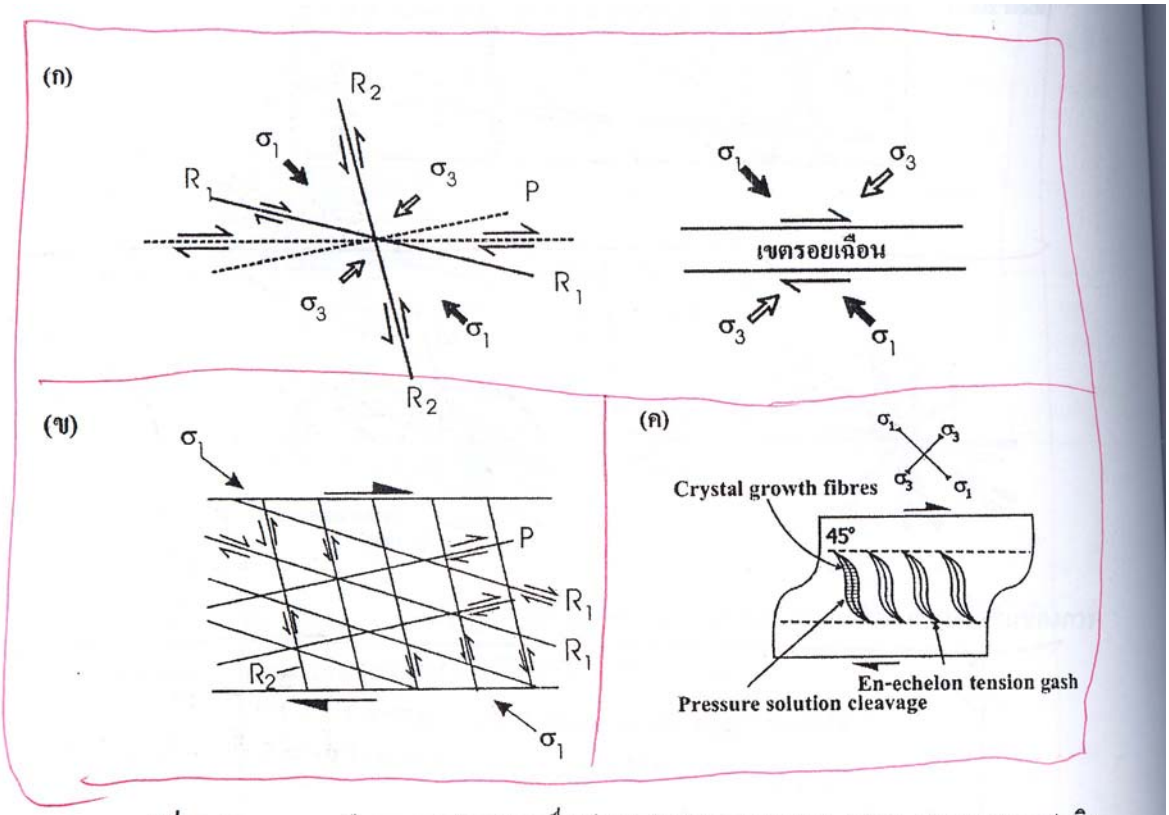
รูปที่ 9.40 *ลักษณะของการเปลี่ยนลักษณะที่ปริมาณของความเครียดเพิ่มมากขึ้นของการเปลี่ยนลักษณะแบบไปตามแกน (coaxial (pure shear) deformation)*



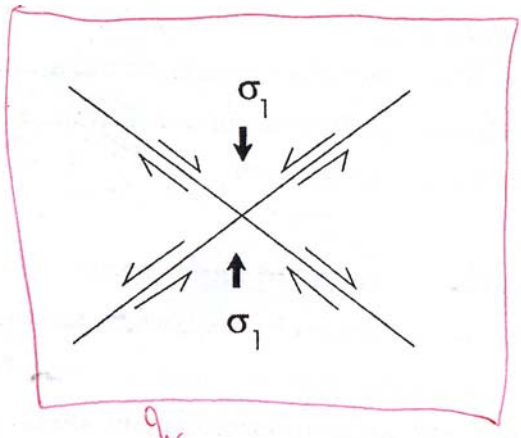
รูปที่ 9.41 *ลักษณะของการเปลี่ยนลักษณะที่ปริมาณของความเครียดเพิ่มมากขึ้นของการเปลี่ยนลักษณะแบบไม่ไปตามแกน (noncoaxial (simple shear) deformation)*



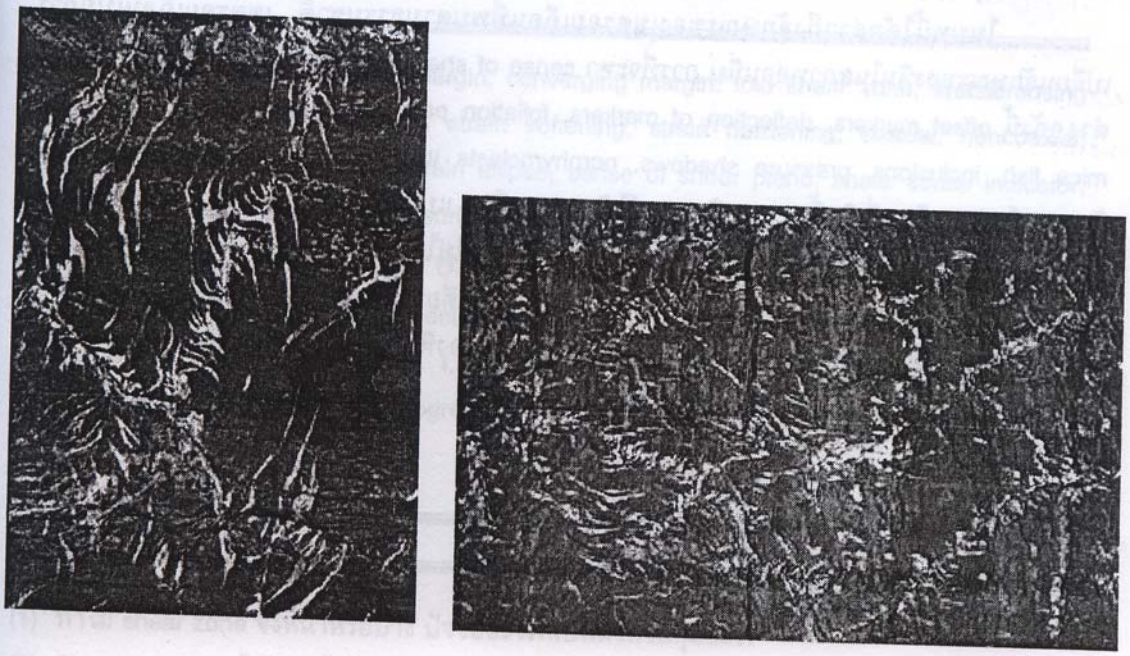
รูปที่ 9.42 ตัวอย่างการวิเคราะห์แบบ progressive deformation ของไดค์ที่พบในสนามในเขตรอยเฉือน (ก) ภาพสเกตลักษณะของหินโผล่ (ข) พล็อตภาพรวมของโครงสร้างแนวเส้นต่าง ๆ ที่พบในหินโผล่ (ค) แสดงวงรีความเครียดเริ่มต้นและสุดท้ายจากค่าที่คำนวณเมื่อทราบมุม θ ดังแสดงในบล็อก (แหล่งที่มา*: Figure 9.98 โดย Davis and Reynolds, 1996)



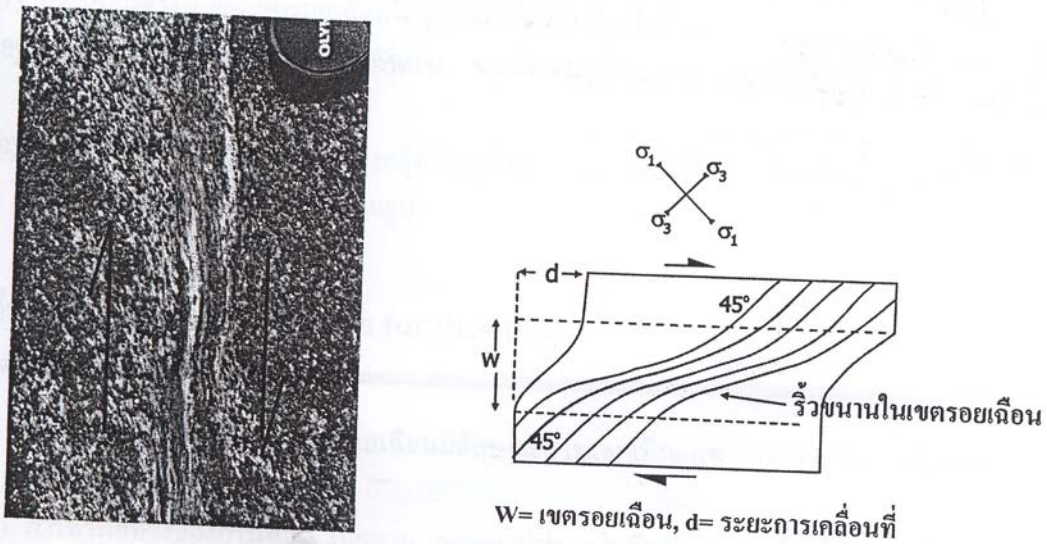
รูปที่ 9.43 เขตรอยเฉือนแบบเปราะและกึ่งเปราะ (brittle and semi brittle shear zones) ทิศทางของความเค้นหลักค่ามาก (σ_1) ประมาณ 45 ^{o} กับขอบของรอยเฉือน (ก) และ (ข) เขตรอยเฉือนแบบเปราะ ลักษณะของ R_1 และ R_2 Riedel shears และ P synthetic shear (ค) เขตรอยเฉือนกึ่งเปราะ ของแอนเอคซิลอน (ภาพปรับปรุงต่อจาก McClay, 1987)



รูปที่ 9.43 ทิศทางของ σ_1 เขตรอยเฉือนแบบเปราะและกึ่งเปราะ เมื่อมีเขตรอยเฉือนแสดงลักษณะแบบคอนจูเกต (conjugate shear zone)



รูปที่ 9.45 ลักษณะของโครงสร้างแบบแอนเอคซีลอน (en echelon) แบบคอนจูเกต (conjugate) แสดงแนวการเฉือน (แหล่งที่มา: ภาพซ้ายมือโดย Richard Stenstrom, Beloit Colleage, ภาพขวามือโดย Robert J. Varga, The College of Wooster)



รูปที่ 9.46 เขตรอยเฉือนแบบเปราะ-อ่อนนิ่ม และอ่อนนิ่ม แสดงลักษณะของริ้วขนานที่พบในเขตรอยเฉือน ทิศทางของ ทิศทางของความเค้นหลักค่ามาก (σ_1)ประมาณ 45 ^{o} กับขอบของรอยเฉือน (แหล่งที่มา: ภาพโดย Karabino, Williams Colleage)

รูป 9.1 เขตรอยเฉือนที่พบในสนาม ภาพซ้ายมือ เขตรอยเฉือนแบบเปราะ(brittle shear zone) ในหินทราย พบที่บริเวณ Hoover Point, near Marble Falls, Texas, USA. ภาพขวามือเขตรอยเฉือนสภาพอ่อนนิ่ม(ductile shear zone) สังเกตแถบหินสีขาวที่มีการเลื่อน แต่ไม่มีการแตกหัก(ภาพซ้ายมือโดย Robert Burger, Smith college ภาพขวามือโดย Robert J. Varga, The College of Wooster)

รูป 9.2 ภาพซ้ายมือ เขตรอยเฉือนพบใน Maggi nappe, Switzerland ภาพขวามือ หินไมโลไนต์ในบริเวณเขตรอยเฉือนที่มีการแตกเป็นแผ่นๆ พบในบริเวณ Catalina Mountains, Arizona, USA.(แหล่งที่มา: ภาพซ้ายมือโดย Paul Karabinos, Williams Collage)

รูป 9.3 (ก) เขตรอยเฉือนที่เปลี่ยนลักษณะแบบไม่ไปตามแกน(non-coaxial หรือ simple shear) (ข) บริเวณเขตรอยเฉือนพบการเปลี่ยนลักษณะได้ทั้งแบบอ่อนนิ่ม(ริ้วขนาน) และเปราะ(รอยแตก)

รูป 9.4 ขนาดเล็กหรือใหญ่ของเขตรอยเฉือน ภาพบนเขตรอยเฉือนพบในบริเวณ Nordre Stromfjord shear zone, Greenland ภาพล่างเขตรอยเฉือนจากแผ่นหินบางของหินอะไพลต์(aplite) กว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร (แหล่งที่มา: Figure 9.4 โดย Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.5 (ก) เขตรอยเฉือนต่อเนื่อง หรือเฉือนย้วย(continuous shear zone) สังเกตชั้นหินสีเทาไม่ขาดออกจากกัน และ (ข) เขตรอยเฉือนไม่ต่อเนื่อง หรือเฉือนขาด(discontinuous shear zone) ชั้นหินสีเทาขาดออกจากกันในเขตรอยเฉือน (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.6 ลักษณะปรากฏของเขตรอยเฉือน (ก) ขอบขนานกัน(parallel margins) (ข) ขอบแผ่กว้าง (diverging margins) (ค) ขอบตีบลง(converging margins) (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.7 ลักษณะรอยเฉือนในเขตรอยเฉือน (ก) เฉือนขนานกัน(parallel shear zone) (ข) ประสานสาย(anastomosing shear zone) (ค) เฉือนตัดกัน(conjugate shear zone) (ง) เฉือนแบบแนวนอน (horizontal plane) (จ) เฉือนรอยโค้ง(folded shear zone) จากการยกตัว และ (ฉ) เฉือนรูปโค้ง (เนื่องจากไม่สามารถตัดเข้าไปในหินที่แข็งกว่า จึงโค้งไปหาบริเวณที่เปลี่ยนลักษณะได้ง่ายกว่า ถือเป็นการโค้งในระหว่างเกิดเขตรอยเฉือน(original planar shear zone) (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.8 การเรียกชื่อเขตรอยเฉือน (ก) เขตรอยเฉือนไปขวามือ(right-handed (dextral) shear zone) (ข) เขตรอยเฉือนไปซ้ายมือ (left-handed (sinistral) shear zone) (ค) เขตรอยเฉือนเลื่อนปกติ(normal shear zone) (ง) เขตรอยเฉือนเลื่อนย้อน(reverse shear zone) (จ) เขตรอยเฉือนซีกบนไปตะวันตก (top to the west shear zone) (ฉ) เขตรอยเฉือนตะวันตกเลื่อนขึ้น (west side up shear zone)(Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.9 เขตรอยเฉือนขนาดใหญ่ที่พบแถบขอบแผ่นเปลือกโลก(plate margins) แผ่นมหาสมุทรชนทวีป(ocean-continent convergence) (ข) ทวีปชนทวีป (continental collision) (ค) ทวีปแยกออกจากกัน(continental rifting) (ง) แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนไปตามข้าง(transform faulting)(Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.10 ภาพจำลองการเกิดเขตรอยเฉือนที่พบในบริเวณรอยเลื่อนปกติมุมต่ำ ซึ่งเรามักพบหินไมโลไนต์แตกเหลี่ยมโผล่ขึ้นสู่ผิวดินจากอิทธิพลของรอยเลื่อน(exhumation) (Davis and Reynolds, 1996)

รูป 9.11 การเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะและกึ่งเปราะ จนทำให้ได้รอยเลื่อนชนิดต่างๆ (ก) รอยเลื่อนขนาน(parallel faults) (ข) รอยเลื่อนประสานสาย(anastomosing faults) และ (ค) รอยเลื่อนเหลื่อมขนาน(en echelon faults)

รูป 9.12 โครงสร้างแบบเหลื่อมขนาน(en echelon) แสดงว่าหินเกิดในเขตรอยเฉือนแบบกึ่งเปราะ สีขาวในภาพทั้งสองเป็นสายแร่แคลไซต์ (ภาพบนโดย Pual Karabinos, Willams College: ภาพล่างโดย Tekla Harns, Amherst College)

รูป 9.13 โครงสร้างแบบเหลื่อมขนาน(en echelon) ที่เกิดในเขตรอยเฉือนแบบกึ่งเปราะ ได้แก่ (ก) แบบสายแร่(en echelon veins) (ข) แบบแนวฟันหรือรอยหยัก(en echelon stylolites) (ค) แบบการโค้ง(en echelon folds)

รูป 9.14 เขตรอยเฉือนผสมระหว่างแบบเปราะและอ่อนนิ่ม เกิดการเปลี่ยนสภาพเดิมของสิ่งแวดล้อม (ก) เมื่อเปลือกโลกมีการยกตัว (ข) เมื่อเปลือกโลกมีการจมตัวลง