

3

การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ (Kinematic Analysis)

- 3.1 กลยุทธ์การวิเคราะห์
- 3.2 การเลื่อนที่
- 3.3 การหมุน
- 3.4 การยืดหด และการบิดเบี้ยว
- 3.5 การวัดความเครียด

บทที่ 3

การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ (Kinematic Analysis)

3.1 หลักการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งของหินที่เกิดการเปลี่ยนลักษณะ(deformation) ในทุกๆขนาดโดยไม่พิจารณาถึงความเค้น(stress) หรือความดัน(pressure) ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะ แต่เป็นเพียง “การศึกษาผลการเปลี่ยนลักษณะที่เกิดขึ้น” (Fig 4-1, 4-2 hatcher) ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาขนาด ทิศทาง และปริมาณแรงเค้นมาพิจารณา ด้วยเหตุนี้จุดประสงค์หลักคือต้องการศึกษาการเปลี่ยนลักษณะแบบทุติยภูมิ(secondary deformation) เช่น การเกิดการคดโค้ง(folding) การเกิดการเลื่อน(faulting) หรือการแตก(fracturing) ตลอดจนผลจากการแทรกซอนของหินอัคนี(igneous intrusion) เป็นต้น

ในการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของวัตถุ เราจำแนกวัตถุเป็น 2 ประเภท(ดังแสดงในรูป 2.1) ได้แก่ **วัตถุเกร็ง (rigid body)** และ **วัตถุไม่เกร็ง(non-rigid body)** แต่จะเป็นวัตถุประเภทใดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขณะเปลี่ยนลักษณะ (รูป 2.1 Piangta) ถ้าวัตถุเปลี่ยนลักษณะโดยไม่สูญเสียปริมาตร เราเรียกว่า “**การเปลี่ยนลักษณะวัตถุเกร็ง(rigid body deformation)**” แต่ถ้าเปลี่ยนลักษณะโดยมีการสูญเสียปริมาตรเรียกว่า “**การเปลี่ยนลักษณะวัตถุไม่เกร็ง (non-rigid body deformation)**” (fig 2-6 dav) โดยทั่วไปการเปลี่ยนลักษณะมี 4 แบบ (Fig 6.1 park) ได้แก่

(1) การเคลื่อนที่(translation), (2) การหมุนตัว(rotation), (3) การยืดหด(dilation) และ (4)การบิดเบี้ยว(distortion)

เมื่อวัตถุเกร็งเกิดการเปลี่ยนลักษณะมักเป็นการเคลื่อนที่ และ/หรือ การหมุน แต่ถ้าเป็นวัตถุไม่เกร็ง การเปลี่ยนลักษณะมักเป็นแบบการหดยึดและ/หรือการบิดเบี้ยว ถ้าการเปลี่ยนลักษณะเป็นการยืดหดโดยไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเดิมไปหรือยังคงรูปเดิมอยู่ (รูป 2.2 Piangta) เราเรียกว่า “**การยืดหดบริสุทธิ์**”(pure dilation) แต่ถ้ามีการเปลี่ยนรูปร่างแต่ยังรักษขนาดไว้เท่าเดิม(รูป 2.2 Piangta) เรียกว่า “**การบิดเบี้ยวบริสุทธิ์**”(pure distortion) ดังนั้นไม่ว่าวัตถุเกร็งหรือไม่เกร็งอาจเกิดการเปลี่ยนลักษณะได้หลายๆ แบบรวมกันได้ เช่น ในมาตราส่วนใหญ่ หินอาจเกิดการเลื่อนแบบการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุเกร็ง(rigid body deformation) แต่เมื่อพิจารณาในมาตราส่วนขนาดเล็กที่บริเวณระนาบของรอยเลื่อน(fault plane) เราอาจพบการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุไม่เกร็ง(non rigid body deformation)ได้

กรณีที่เป็นวัตถุไม่เกร็ง(non-rigid body) เมื่อเกิดการเปลี่ยนลักษณะ(Fig 2.3 Piangta) อาจเป็นได้หลายแบบ ได้แก่ การเปลี่ยนลักษณะแบบต่อเนื่อง(continuous deformation) มักพบเห็นแบบต่อเนื่องเองทั่วทั้งก้อน เช่น การ โคง(folding) ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง

(discontinuous deformation) ที่มักพบเห็นลักษณะเนื้อหินซึ่งขาดออกจากกัน เช่น การเลื่อน (faulting) โดยทั่วไปเรามักเรียกการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุที่ปรากฏในสภาพเหมือนกันทั่วทั้งก้อนว่า “การเปลี่ยนลักษณะเอกพันธ์หรือเนื้อเดียว” (homogeneous deformation) แต่ถ้าการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุเป็นไปแบบวิวิธพันธ์แตกต่างกันเรียกว่า “การเปลี่ยนลักษณะเนื้อผสม”

(heterogeneous deformation) (Fig. 6.2 and 6.3 Park)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยา เรามักสมมติให้วัตถุมีการเปลี่ยนลักษณะแบบต่อเนื่อง (continuous deformation) ทั้งนี้เพราะสามารถนำเอาสูตรทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนลักษณะ ตามหลักทางกลศาสตร์ความต่อเนื่อง (continuum mechanics) ซึ่งหลายคนอาจเห็นว่าสมมติฐานที่ใช้เริ่มต้นไม่ถูกต้อง เพราะโครงสร้างทางธรณีวิทยาอาจเป็นแบบไม่ต่อเนื่องก็ได้ เช่น รอยแยก รอยเลื่อน หรือสภาพการสลับกันของชั้นหิน การเปลี่ยนลักษณะย่อมเป็นไปในแบบไม่ต่อเนื่อง หลักกลศาสตร์ความต่อเนื่อง (continuum mechanics) จึงไม่น่าจะนำมาประยุกต์ได้ แต่ถ้าหากเราพิจารณาโดยกำหนดให้วัตถุเปลี่ยนลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง การนำเอาหลักทางคณิตศาสตร์มาคำนวณหาการเปลี่ยนลักษณะจะซับซ้อนและยุ่งยากมาก ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องพิจารณาให้เป็นแบบต่อเนื่อง โดยแยกวิเคราะห์เป็น **มณฑลโครงสร้าง** (structural domain) ที่เรากำหนดให้ว่ามีการเปลี่ยนลักษณะแบบต่อเนื่องเฉพาะในกลุ่มนั้นๆ (รูป 2.4 piangta) จากนั้นจึงนำผลการเปลี่ยนลักษณะแต่ละกลุ่มมารวมกัน ตัวอย่างการพิจารณาลักษณะการวิเคราะห์โครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับมาตราส่วนที่ใช้ในการพิจารณา (Fig. 2.5 piangta) ซึ่งเป็นลักษณะของการคดโค้งและรอยเลื่อนย้อน (fold-and-thrust belt) บริเวณขอบที่มีการชนกันของแผ่นโลก ซึ่งหากเราจะศึกษาในมาตราส่วนของทั่วทั้งโลก โดยที่ตรงบริเวณรอยคดโค้งและรอยเลื่อนย้อน จะพิจารณาให้เป็นแบบเนื้อเดียวใด แต่ถ้าเราศึกษาในมาตราส่วนขนาดเล็ก (จุลภาค) เราจะเห็นเม็ดเริ่มมีการเปลี่ยนลักษณะในบริเวณที่คดโค้งและรอยเลื่อนต่างๆกัน ซึ่งจำเป็นต้องแยกวิเคราะห์เป็นมณฑล (structural domains) ไป

3.2 การเลื่อนที่ (Translation)

การเลื่อนที่เป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบหนึ่ง ในการเลื่อนแบบบริสุทธิ์ (pure translation) หินจะเลื่อนจากตำแหน่งเดิมซึ่งทุกจุดภายในหินจะเลื่อนด้วยระยะทางที่เท่ากันไปตามทิศทางการเลื่อนที่ ซึ่งหลักฐานแสดงการเลื่อนที่ ได้แก่ การเกิดรอยแตก (jointing) หรือรอยเลื่อนไถล (slip) ไปตามระนาบชั้นหิน เช่น การเลื่อนไถลขณะโค้งงอ (flexural-slip folding) โดยที่หินในระหว่างชั้นที่แทรกสลับเลื่อนออกจากกันคล้ายแผ่นกระดาษในสมุดที่แยกออกจากกันได้ทีละแผ่น การเลื่อนที่มีได้ตั้งแต่ขนาดเล็ก คือ ขนาดรูปผลึกจนถึงขนาดกว้างใหญ่ไพศาล เช่น การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก

การเคลื่อนที่ของวัตถุที่แรงสามารถใช้ขนาดทิศระยะเคลื่อน(Displacement vectors) มาบรรยายลักษณะการเคลื่อนที่ได้โดยใช้ (1) ทิศการเคลื่อนที่ (direction of translation) (2) ระยะการเคลื่อนที่ (distance of translation) และ (3) นัยการเคลื่อนที่ (sense of translation) (ดู Fig 2-19Dav)

โดยทั่วไปการบอกทิศทาง มักบอกด้วยแนวการวางตัว (trend) และมุมกด (plunge) ของเส้นทางการเคลื่อนที่ เช่น Fig 2.11 dav และ 2.12 dav ตัวอย่างในรูป 2.12 dav $0.1^{\circ} S68^{\circ} W$ หรือเคลื่อนไปในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ ส่วนนัยการเคลื่อนที่มักบอกในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา โดยมากมักนิยมบอกว่าเคลื่อนจากตะวันออกไปตะวันตก หรือเคลื่อนจากขวาไปซ้าย (แต่ไม่นิยมในทางธรณีวิทยา) เป็นต้น หรือถ้ากล่าวรวมวิธีการบรรยายทั้ง 3 แบบ จะได้ดังตัวอย่างคือ เคลื่อนไปทิศตะวันตกเฉียงใต้ ตามทิศทาง $S68^{\circ} W$ ด้วยมุมกด 0.1° จากแกนนอนเป็นระยะ 165 ไมล์ ดังแสดงในรูป 2.12 dav ส่วน รูป 2.13 dav เราบรรยายลักษณะได้ดังนี้ การเคลื่อนที่ของทวีปอินเดียมีทิศทางของการเคลื่อนที่ $N12^{\circ} E$ หรือ $S12^{\circ} W$ และมีนัยของการเคลื่อนที่ไปในทางทิศเหนือเฉียงตะวันออกเฉียงเหนือด้วยระยะทาง 7,000 กิโลเมตร

จากสมบัติของแนวแรงที่ใช้บ่งบอกลักษณะการเคลื่อนที่ เราสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ ซึ่งการจำลองหรืออธิบายของกระบวนการเคลื่อนที่จำเป็นต้องหาจุดอ้างอิงอย่างน้อยสองจุด ซึ่งได้แก่จุดหนึ่งก่อนการเคลื่อนและอีกจุดหลังการเคลื่อน(รูป 2.12 dav) แต่ในทางธรณีวิทยาโครงสร้างการวิเคราะห์เพื่อหาระยะการเคลื่อนที่ เราไม่สามารถกล่าวได้เลยว่าเราสามารถวิเคราะห์หาระยะเคลื่อนจริง(absolute displacement)ของโครงสร้างได้ เพราะหินเปลี่ยนแปลงลักษณะมาอย่างยาวนานซึ่งอาจทำให้เราไม่สามารถกำหนดตำแหน่งเดิมได้ว่าเดิมจริงๆ อยู่ที่ไหน และหินมีการเคลื่อนที่อย่างไรมาบ้าง แต่ปัจจุบันเราบอกตำแหน่งได้จากหินโผล่ให้เห็นที่ผิวโลก เราสามารถวิเคราะห์ได้เพียงระยะเคลื่อนที่แบบเทียบความสัมพันธ์กับจุดใดจุดหนึ่งเท่านั้น(relative displacement) หรือเราสามารถเทียบได้เป็นแบบเฉพาะจุด(local displacement) โดยที่เราต้องกำหนดกรอบ(frame) ที่พิจารณาขึ้นมา (รูป 2.7 piangta) โดยทั่วไปเรากำหนดเป็นแกนหลัก 2 หรือ 3 แกน (x, y หรือ x, y, z) จากนั้นไปคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหรือจุดที่ต้องการ(รูป 2.7)

การบรรยายลักษณะการเคลื่อนที่มักทำในรูปการเคลื่อนไถล(slip) หรือระยะเคลื่อน(S ใน fig 2-14 dav) โดยเราต้องบอกถึงระยะการเคลื่อนปรากฏ(actual displacement) จากการเทียบสัมพันธ์กับชั้นที่อยู่ข้างเคียง ส่วนในรูป 2.16dav แสดงการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนไปในทิศเกือบตะวันออกเฉียงเหนือ ($N60^{\circ} E$) โดยมีมุมเฉียงเทไปในทิศเกือบตะวันออกเฉียงใต้ด้วยมุมประมาณ 50° ($50^{\circ} SE$) โดยที่หินทางซีกตะวันออกเฉียงใต้เคลื่อนลงและเกิดการเคลื่อนแบบไปทางซ้ายมือด้วยระยะทางการเคลื่อนที่คือเวกเตอร์ระหว่างจุด A ไป B ส่วนรูป 2.16dav b แสดงการกำหนดจุดในวงกลมโครงข่าย (stereo net) ของรอยเลื่อนและรอยครูด โดยจะได้แนวแรงดังแสดงในรูป 2.16dav c

3.3 การหมุน (Rotation)

การหมุนเป็นผลจากการที่วัตถุแข็งเคลื่อนที่ไปรอบจุดใดจุดหนึ่ง (Fig 2-20 dav) โดยปกติเราบรรยายการหมุน

ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

- (1) แกนการหมุน(axis of rotation) โดยบอก แนวแกนการหมุน(trend) และมุมกุด(plunge)
- (2) นัยการหมุน(sense of rotation) โดยบอกเป็นทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา ซึ่งการบอกทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกานี้ขึ้นอยู่กับทิศทางที่พิจารณา
- (3) องศาการหมุน(degree of rotation) บอกความมากน้อยของการหมุน โดยบอกเป็นองศาเมื่อเทียบกับทิศหลักทิศใดทิศหนึ่งเสมอ เช่น ทิศเหนือ

การโค้ง(folding) และการเลื่อน(faulting)บางส่วนแสดงถึงการหมุนเช่นกัน (fig 2.22, 2.23 dav) นอกจากนี้ในมาตราส่วนขนาดเล็กของผลึกก็สามารถพบการหมุนได้ (รูป 2.24 dav)

3.4 การยืดหด และการบิดเบี้ยว(Dilation and Distortion)

ความเครียด(strain)ทำให้วัตถุไม่แกร่งเกิดการยืดหดและการบิดเบี้ยว ซึ่งทำให้จุดในบริเวณที่ได้รับมีความเครียดสูญเสียการจัดตัว(configuration)ทางเรขาคณิต ทำให้ระยะของจุดต่างๆ ในวัตถุเครียดเปลี่ยนไป หากเกิดการยืดหรือหดอย่างบริสุทธิ์(pure dilation) ซึ่งยังผลให้การยืดหรือหดที่เป็นแบบสม่ำเสมอ(uniform)และมีรูปร่างคงเดิม (Fig 5-2 hatcher) ในระหว่างที่เกิดการบิดเบี้ยววัตถุจะเปลี่ยนลักษณะไปหมด (fig 2.25 and 2.26 dav) โดยมีการเปลี่ยนทั้งขนาดรูปร่างหรือขนาดเท่าเดิมแต่เปลี่ยนรูปร่าง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรอาจเกิดได้จาก 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ (1) การอัดกันแน่นของช่องว่าง ซึ่งทำให้ได้ปริมาตรลดลง (2) การละลายเม็ด(grain)หรือมวลเนื่องจากถูกบีบอัด โดยเราเรียกกระบวนการละลายจากการบีบอัดว่า การละลายจากแรงดัน(pressure-solution) และ (3) การแตกร้าว(fracturing) ของเม็ด (Fig 4-9 hatcher) ซึ่งกระบวนการทั้งสามทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง (Fig 4-8 hatcher) (dilatational strain, Δ) โดยเรากำนวณได้จากสมการ 2.1

$$\Delta = \frac{v_1 - v_0}{v_0} = \frac{\delta v}{v} \quad (2.1)$$

โดยที่
 v_1 = ปริมาตรสุดท้าย และ
 v_0 = ปริมาตรเริ่มต้น

3.5 การวัดความเครียด (Strain measurement)

ความเครียดเป็นผลการเปลี่ยนรูปร่างหรือปริมาตรของวัตถุขณะก่อน (initial undeformed state) (Fig 5-1 hatcher) และหลังการเปลี่ยนลักษณะ(final deformed state) (Fig 5.11 hatcher) ลักษณะ

ความเครียดอาจเกิดได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (dilation) และ/หรือการเปลี่ยนรูปร่าง (distortion) (รูป 2.11 Piangta)

การเปลี่ยนลักษณะที่พบในหินมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยมีการสะสมความเครียดขึ้นอย่างต่อเนื่องเรื่อยๆ (incremental strain accumulation) จากนั้นจึงค่อยๆ เปลี่ยนลักษณะ ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนลักษณะแบบนี้ว่า “การเปลี่ยนลักษณะแบบต่อเนื่อง (progressive deformation)” ค่าความเครียดสุดท้าย(final strain)จึงเป็นผลรวมของการสะสมความเครียดที่ค่อยเป็นค่อยไปต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังนั้นผลการเปลี่ยนลักษณะที่ปรากฏในวัตถุ(หิน) จึงถือเป็นผลความเครียดทั้งหมด

การที่เราตรวจพบการผิดรูปร่างของวัตถุ(distorted object) ที่เรารู้รูปร่างปกติทำให้เราบอกได้ว่าวัตถุถูกแรงมากระทำให้เกิดความเครียด และผลความเครียดจึงถูกบันทึกไว้ในวัตถุนั้นเพราะมีการผิดรูปร่างเกิดขึ้น โดยปกติวัตถุที่เราใช้ในการวิเคราะห์หาความเครียดเรียกว่า “ตัวบ่งชี้ความเครียด” (strain markers) ซึ่งตัวบ่งชี้ความเครียดที่ดีได้แก่ จุดกลมจากรีดักชัน(reduction spots) (Fig 5.3 hatcher), ก้อนกรวด (Fig 5.4 hatcher), โอโออิด(ooids) (Fig 5.5 Hatcher) พิโซลิต(pisolites) ซากดึกดำบรรพ์ (Fig 5.6 Hatcher) รูฟองอากาศ(vesiclesหรือgas bubbles, Fig 5-7 and 5-9 hatcher) หินละลายรูปหมอน(pillow lava, Fig 5.8 hatcher) และรูซอนไซจากสัตว์(burrows, fig 2-34 dav) โดยที่เราต้องพบตัวบ่งชี้ความเครียดเหล่านี้ก่อน จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความเครียดได้

อนึ่งเรามีวิธีหาปริมาณความเครียดที่ถูกบันทึกไว้ในหินได้หลายวิธี การเลือกวิธีใดวิธีหนึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะตัวบ่งชี้ความเครียดที่ปรากฏ วิธีหาความเครียดที่สำคัญ ได้แก่

- (1) การหาความยืดหดของเส้นจากตัวบ่งชี้ความเครียด ซึ่งถือว่าการวิเคราะห์แบบมิติเดียว (one-dimension)
- (2) การหาการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่หรือเชิงมุมจากตัวบ่งชี้ความเครียด ซึ่งจัดว่าการวิเคราะห์แบบสองมิติ (two-dimension) และ
- (3) การหาการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรของตัวบ่งชี้ความเครียด ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสามมิติ (three-dimension หรือ 3D, fig 2-52 dav)

3.5.1 หลักการวิเคราะห์ความเครียด

ในการวิเคราะห์ความเครียดในแบบสองมิติหรือสามมิติ เรามักวิเคราะห์โดยกำหนดให้วัตถุที่วิเคราะห์นั้นเป็นอัตราเอกพันธ์หรือเป็นเนื้อเดียวกัน(homogeneous) แต่การวิเคราะห์หาความเครียดทำได้ยากหรือไม่ได้เลยถ้าการเปลี่ยนลักษณะไม่เป็นระบบหรือมีการบิดเบี้ยวมากมาย ดังนั้นเมื่อวัตถุเปลี่ยนลักษณะจึงต้องให้วัตถุเปลี่ยนลักษณะแบบเอกพันธ์ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

- (1) เส้นตรงที่ปรากฏในวัตถุไม่ว่าเกร็งหรือไม่เกร็งก่อนการเปลี่ยนลักษณะจะต้องเป็นเส้นตรงหลังจากเปลี่ยนลักษณะไปแล้ว และ
- (2) เส้นขนานของวัตถุเกร็งและไม่เกร็งก่อนเปลี่ยนลักษณะจะยังคงเป็นเส้นขนานต่อไปเมื่อเปลี่ยนลักษณะไปแล้ว

สำหรับเงื่อนไขที่กล่าวมาแสดงว่าการเปลี่ยนลักษณะต้องเป็นแบบสม่ำเสมอและเป็นระบบตลอดทั้งมวลของวัตถุที่เปลี่ยนลักษณะ โดยที่เส้นตรงไม่มีการแตกหัก ตัวอย่างเช่น เมื่อวงกลมเกิดการเฉือนจนวงกลมเปลี่ยนลักษณะไปเป็นวงรี รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากจะเปลี่ยนลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน(รูป 2.12 Piangta) แต่ในธรรมชาติเนื่องจากหินที่ถูกทำให้เกิดความเครียดจะเปลี่ยนลักษณะที่ไม่เป็นแบบเอกพันธ์หรือเนื้อเดียวกัน ดังนั้นเราต้องปรับให้หินเปลี่ยนลักษณะแบบเนื้อเดียวกัน หรือเอกพันธ์เสียก่อนซึ่งอาจทำได้ โดยแบ่งกลุ่มหินออกเป็นหน่วยย่อยๆแต่ละย่อยเพียงใดขึ้นอยู่กับว่าเราอมรับว่าเป็นเนื้อเดียวกันได้หรือไม่ (รูป 2.4 และ 2.5 Piangta) ถ้ายังไม่ได้ก็ต้องแบ่งย่อยลงไปอีกจนได้ลักษณะที่ยอมรับได้ว่าเป็นเนื้อเดียว

3.5.2 วงรีความเครียด

โดยทั่วไปเราแบ่งวงรีความเครียด(strain ellipse) ออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) พวกที่แสดงการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปหรือทีละเล็กละน้อย(instantaneous strain ellipse) และ (2) พวกที่แสดงผลรวมการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด(finite strain ellipse)

โดยทั่วไปในทางธรณีวิทยาโครงสร้างเรามักศึกษาถึงผลรวมที่ปรากฏนั่นคือ เรานิยมศึกษาผลรวมการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด(finite strain ellipse) จากโครงสร้างนั้นๆ(Fig 6-10 park) เช่น เราเห็นชั้นหินเปลี่ยนลักษณะไปแบบสมมาตร เราสามารถสร้างขนาดและรูปร่างของวงรีความเครียดได้ ถ้าเราทราบเส้นที่ตั้งฉากกันภายในวงรีสองเส้นโดยเส้นหนึ่งเป็นเส้นที่ยาวที่สุดและอีกเส้นหนึ่งเป็นเส้นที่สั้นที่สุดภายในวงรีนั้น(Fig 2-27 dav) เราสามารถลากเส้นรอบรูปของวงรีได้ ด้วยเหตุนี้ในการวิเคราะห์ความเครียดเราจึงศึกษาการวางตัวของเส้นและมุมที่อยู่ระหว่างเส้นตรงสองเส้นนี้ เราไม่จำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างทั้งหมด เราเพียงแต่วัดความยาวของเส้นและมุมที่เปลี่ยนไป การเปลี่ยนความยาวของเส้นและมุมระหว่างเส้นที่ตั้งฉากกันทำให้เราสามารถหาขนาดของความเครียดที่เกิดขึ้นได้

3.5.3 การเปลี่ยนลักษณะยืดเชิงเส้น

ในการบรรยายการเปลี่ยนลักษณะโดยการเปลี่ยนขนาดของวัตถุว่าสั้นลงหรือยาวขึ้น เรามักใช้คำว่า วัตถุมี (1) การยืด(extension) ที่ใช้สัญลักษณ์ e และ(2) การเหยียด (stretch) ซึ่งใช้

สัญลักษณ์ S สมมติให้มีเส้นตรงยาว 5 เซนติเมตร ($I_0=5$ เซนติเมตร) ขณะเกิดการเปลี่ยนลักษณะ และได้ความยาวใหม่ 8 เซนติเมตร ($I_f=8$ เซนติเมตร) (ดังแสดงในรูป 2.29 dav)

เราสามารถคำนวณหาการยืด(e) ได้ดังสมการ (2.2)

$$E = (I_f - I_0) / I_0 \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{I_f - I_0}{I_0} \\ &= \frac{8 - 5}{5} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

ค่า $e = 0.6$ หมายถึงมีการยืดออก 60 % กรณีค่าการเหยียด(S) เราสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.3

$$S = I_f - I_0 \dots \dots \dots (2.3)$$

$$S = \frac{I_f}{I_0} = \frac{8}{5}$$

$$S = 1.6$$

$$S = e + 1$$

ค่า e มีค่าได้ตั้งแต่ -1 ถึง ∞ และค่า S มีได้ตั้งแต่ 0 ถึง ∞ (fig 2-31 dav)

จะเห็นได้ว่าตามที่แสดงในรูป 2.33 และ 2.34 Dav กระบวนการคดโค้งและการเลื่อนตัวทำให้เกิดการยืดหรือขยาย(e)ได้ รูป 2.34 dav เป็นการแสดงการเปลี่ยนลักษณะของรูหนอน(worm burrow) การหาค่า e ที่นิยมใช้เปลี่ยนตัวแทนประกอบด้วยซากบรรพชีวิน เช่น เบเลมไนต์ (belemnites) ไครนอยด์(crinoids)โอโออิด(ooids) หรือรูปร่างของผลึกที่ดูได้จากแผ่นหินบาง หรือลักษณะของโครงสร้างแบบไส้กรอก(boudins) หรือก้อนกรวด(pebble) หรืออื่นๆ ส่วนรูป 2.33 dav เป็นการวิเคราะห์หาการยืด

จากภาพตัดขวางวงรีในรูป 2.34 dav ของรูหนอนที่เดิมเป็นวงกลมเมื่อได้รับความเครียดจะเปลี่ยนลักษณะไปเป็นวงรีในลักษณะวงรีความเครียดทั้งหมด (finite strain ellipse) โดยที่หินจะมีแกนการยืดและแกนการหด การหา S และ e สามารถทำได้ถ้าหากเราทราบขนาดรูหนอนเดิมโดยวัด

ขนาดของรูปหอนก่อนเปลี่ยนและหลังเปลี่ยนเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โดยสมมติให้พื้นที่ไม่เปลี่ยน ขนาดของพื้นที่เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะจากภาพตัดขวางที่แสดงจะได้

$$\text{พื้นที่วงรี} = \text{พื้นที่วงกลม} \text{ หรือ } \pi ab = \pi r^2$$

เมื่อเราให้ a = ความยาวที่สุดของเส้นแกนวงรี b = ความยาวสั้นที่สุดของเส้นแกนวงรี และ r = รัศมีวงกลม

$$\text{นั่นหมายถึง} \quad r = (ab)^{1/2}$$

จากรูป 2.43 dav เราทราบว่า $a=2.6$ และ $b=2.2$ ดังนั้น $r=1.2$ ซม.

และเราคำนวณหาการเหยียดและการยัด(e) ได้โดยที่

$$\text{ค่าการเหยียด} \quad S_A = \frac{l_f}{l_0} = \frac{2.6}{2.4} = 1.1$$

$$S_B = \frac{l_f}{l_0} = \frac{2.2}{2.4} = 0.92$$

$$\text{ค่าการยัด} \quad e_A = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{2a - 2r}{2r} = 0.083$$

$$\text{ค่าการยัด} \quad e_B = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{2b - 2r}{2r} = -0.083$$

ดังนั้นคำตอบคือหินที่มีรูปหอนเกิดการยัด 8.3% และหด 8.3%

3.5.4 มุมเฉือน (Angular Shear)

ในหัวข้อก่อนนี้เราได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเชิงเส้นด้วยค่าการยัด(e) และการเหยียด(stretch) แต่ทั้งสองค่าไม่ได้ให้ข้อมูลการเปลี่ยนมุมระหว่างเส้นตรง ซึ่งโดยทั่วไปเราเรียกการเปลี่ยนมุมเมื่อได้รับแรงจากการเฉือนที่เรียกว่า “มุมเฉือน(angular shear)” ซึ่งใช้สัญลักษณ์ ϕ (อ่านว่าฟาย) แต่เราต้องกำหนดให้มีเส้นตรงอีกเส้นที่ตั้งฉากกับเส้นตรงที่เราสนใจก่อน(รูป 2.18 piangta) ดังนั้นในการหามุมเฉือน เราจึงวัดมุมที่เบี่ยงเบนจากเส้นที่เคยตั้งฉากกันก่อนการเปลี่ยนแปลงลักษณะ

ในการการบอكمุมเฉือน เรามักบอกโดยเทียบกับเข็มนาฬิกาว่าคือ ถ้าทวนเข็มจะได้ค่ามุมเป็นลบ(-) และถ้าตามเข็มจะได้ค่ามุมเป็นบวก(+) ตามเข็มนาฬิกา(+) (fig 2-35 dav) และจำนวนองศาของมุม (รูป 2.45 dav) ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะของซากดึกดำบรรพ์ไทรโลไบต์ที่เราสามารถหามุมเฉือนได้แสดงในรูป 2.19

3.5.5 ความเครียดเฉือน

ถ้าเราพิจารณาจุดบนเส้นตรงในรูป 2.38 dav ซึ่งต่อมาเกิดการเลื่อนที่โดยมีมุมเฉือน ($\phi = 35^\circ$) โดยเรากำหนดให้จุด 1 ถึง 4 บนเส้น AC เลื่อนที่อย่างเป็นระบบไปตามมุมเฉือนและระยะระหว่างจุดที่มีค่าเท่ากันและไม่เท่าเดิมก่อนการเลื่อนที่ไป

จากรูป 2.20 เราได้สมการ 2.4

$$\tan \phi = \Delta x / y \quad (2.4)$$

$$\Delta x = y \tan \phi$$

เมื่อ $\tan \phi$ เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งซึ่งใช้บ่งบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลง ที่มักนิยมเรียกว่า “ความเครียดเฉือน (shear strain)” ใช้สัญลักษณ์ γ (อ่านว่า แกมมา- gamma) ความเครียดเฉือนมีค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุน ค่าความเครียดเฉือนจึงมีได้ตั้งแต่ 0 ถึง ∞ โดยเราเขียนเป็นสมการ 2.5 ได้

$$\gamma = \tan \phi \quad (2.5)$$

จากรูปจะเห็นได้ว่า รูป 2.21 piangta แสดงลักษณะรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนความเครียดเฉือนจากรูปทรงเรขาคณิตที่มีการเปลี่ยนค่าของ 0 ถึง 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าแกนอน (AC) ในรูปสี่เหลี่ยมไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะเปลี่ยนเฉพาะแกนตั้ง (BD) ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนลักษณะแบบนี้ว่า “ความเครียดเฉือนอย่างง่าย” (simple shear) ส่วนในรูป 2.22 piangta ค่าความเครียดเฉือนเท่ากับศูนย์ แต่มีการเปลี่ยนลักษณะของรูปร่างโดยที่มุมการวางตัวไม่เปลี่ยนแปลงการวางตัว ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนลักษณะแบบนี้ว่า “ความเครียดเฉือนบริสุทธิ์” (pure shear) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าการยืด (e) และการเหยียด (s) แต่ไม่มีค่าการเฉือน (γ)

รูป 2.23 piangta แสดงแบบจำลองการเปลี่ยนลักษณะที่เป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ในหินที่เรียกการเฉือนบริสุทธิ์ (pure shear) โดยใช้แท่งฟองน้ำที่สามารถกดหรือบีบได้ ส่วนแบบการเฉือนอย่างง่ายทำได้โดยใช้ไฟ 2 ลำรับมาวางซ้อนกัน จากนั้นจึงออกแรงเฉือนด้านข้าง (ดูตามรูป 2.24) ด้วยมุมต่างๆ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนลักษณะ เช่น ถ้าเราวาดรูปวงกลมลงบนสันไฟแล้วให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงจากวงกลมไปเป็นวงรี ดังที่แสดงในรูป 2.21 และ 2.22 piangta ในปัจจุบันอาจใช้โปรแกรมวาดรูปด้วยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยจะช่วยให้เราเห็นการเปลี่ยนลักษณะแบบนี้ได้ชัดเจนขึ้น

3.5.6 วงรีความเครียดรวม (Finite Strain Ellipse)

เมื่อเราพิจารณารูปวงรีซึ่งเปลี่ยนลักษณะมาจากวงกลม (รูป 2.21-2.23) เราจะเห็นว่าเส้นตรงเส้นหนึ่งที่มีการยืดและอีกเส้นหดสั้น เส้นที่ยืดมากที่สุดเราเขียนเป็น I_1 และ S_3 เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ความเครียด เรามักเรียก S_1 ว่า “แกนหลักค่ามากที่สุด” (maximum principle strain axis) และเราเรียก S_3 ว่า “แกนหลักค่าน้อยสุด” (principal strain axis) ในรูป 2.41 ให้สังเกตเส้นของ S_1 และ S_3 ตั้งฉากซึ่งกัน (fig 2-42 และ 2-43)

ในการวิเคราะห์ความเครียดที่สมบูรณ์เราต้องทำเป็นรูปสามมิติ โดยให้มีรูปร่างลักษณะแบบทรงรีและมีแกน S_2 ร่วมด้วย และให้แกน S_2 ตั้งฉากกับ S_1 และ S_3 และเรามักเรียกแกน S_2 ว่าแกนหลักค่าปานกลาง (intermediate finite stretch หรือ intermediate strain axis)

3.5.7 ความเครียดเชิงเส้น

โดยปกติเรานิยามค่าความเครียดเชิงเส้น จากการเปลี่ยนแปลงความยาวและทิศทางของเส้นตรงที่เปลี่ยนไปในวัตถุเครียด (fig 2-45) ตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.44 โดยสมมติให้แผ่นดินเหนียวเป็นวงกลม (รูป ก) ต่อมาจึงเกิดการบีบอัดจนดินเหนียวมีการยืดตัวออก (รูป ข) จากรูปเราสามารถหาค่า e และ s ได้ ในรูปปรากฏมุม θ_d ซึ่งเรียกว่า “การหมุนภายใน (internal rotation)” แต่ไม่ใช่ค่าความเครียดเฉือน (γ) เราหาความเครียดเฉือนได้โดยลากเส้นตั้งฉากกับเส้น O/L และวัดมุม (รูป ข) ค่าของความเครียดเฉือนที่ได้คือ

$$\gamma = \tan \Phi = -0.84$$

โดยทั่วไปในการเขียนสมการความเครียด เรามักนิยามเขียนด้วยสมการหลัก 2 สมการ ซึ่งเราต้องทราบค่า S_1 และ S_3 โดยมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

$$\text{เนื่องจาก } \lambda = S^2 \quad \text{และ} \quad \lambda' = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{S^2}$$

$$\text{โดยที่} \quad \lambda = \text{quadratic elongation}$$

$$\lambda = \text{reciprocal quadratic elongation}$$

ดังนั้น เราจึงเขียนสมการความเครียดตาม Ramsay (1967) ได้ดังนี้

$$\lambda' = \frac{\lambda'_3 + \lambda'_1}{2} - \frac{\lambda'_3 - \lambda'_1}{2} \cos 2\theta_d \quad (2.5)$$

$$\frac{\gamma}{\lambda} = \frac{\lambda'_3 - \lambda'_1}{2} \sin 2\theta_d \quad (2.6)$$

ก. วิธีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเครียด รูป 2.21-2.23 piangta และ 2-42 dav แสดงการเปลี่ยนลักษณะเส้นตรงที่เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมและเมื่อมีการเปลี่ยนลักษณะโดยการเลื่อนเทียบกับสภาพก่อนเปลี่ยนและหลังเปลี่ยนลักษณะ จากรูปทำให้เราสามารถสรุปเหตุการณ์ดังต่อไปนี้ได้

- (1) S_1 และ S_3 มีค่าเท่ากันเมื่อ $\gamma=0$
- (2) เมื่อเกิดความเครียดแบบระนาบ (plane strain) มักมีเส้นสองเส้นที่ไม่แสดงการเปลี่ยนลักษณะโดยมีค่า $S=1$
- (3) มีสองทิศทางที่แสดงความเครียดเฉือนค่ามากที่สุด (maximum shear strain) และ
- (4) ค่า S และ γ จะเพิ่มและลงอย่างเป็นระบบตามทิศทางของการเปลี่ยนลักษณะ

ข. แผนภาพความเครียดมอร์ (Mohr-Strain diagram) วิศวกรชาวเยอรมันที่ชื่อ Otto Mohr (1882) ได้สร้างสมการความเครียดโดยใช้แผนภาพที่เรียกว่า “แผนภาพความเครียดมอร์” (Mohr Strain diagram) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความเครียดของวัตถุว่าอาจเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ในภาวะการเปลี่ยนลักษณะแบบเนื้อเดียวกัน จากสมการความเครียดที่กล่าวมาเราสามารถเขียนวงกลมมอร์เพื่อใช้หาค่า λ' และ γ/λ ได้ดังรูป 2.47 and 48 dav โดยที่เราให้

$$\lambda' = \frac{\lambda_3' + \lambda_1'}{2} - \frac{\lambda_3' - \lambda_1'}{2} \cos 2\theta_d \quad (2.5)$$

$$\text{และ } \frac{\gamma}{\lambda} = \frac{\lambda_3' - \lambda_1'}{2} \sin 2\theta_d \quad (2.6)$$

ดังนั้นความยาว MN ในรูป 2.44 dav จึงมีค่าเท่ากับ λ' และความยาว ST เท่ากับ γ/λ หรือ $(\lambda_3' - \lambda_1')/2 \sin 2\theta_d$ วงกลมมอร์ช่วยให้เราหาค่าความเครียดเฉือนได้จากการอ่านค่าจากกราฟที่กำหนดจุดได้โดยตรง ดังนั้นเมื่อค่า θ_d เปลี่ยนแปลงไป การสร้างวงกลมมอร์จะช่วยให้เราสามารถหาค่าความเครียดเฉือนได้รวดเร็วขึ้น นักธรณีวิทยาโครงสร้างส่วนใหญ่จึงนิยมใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มาก อย่างไรก็ตามต้องพึงระลึกเสมอว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการและจากวงกลมมอร์ต้องได้ค่าที่เท่ากัน

โดยสรุปในการวิเคราะห์โดยใช้การสร้างวงกลมมอร์ควรทำเป็นขั้นๆ คือ

- (1) เราต้องทราบค่าของการยืดหด(e)ของตัวบ่งชี้ความเครียดเสียก่อน จากนั้นจึงค่อยหาค่าการเหยียด(stretch, S)

(2) เมื่อได้ค่าเหยียด จึงหาค่า λ โดยที่ $\lambda = S^2$ และส่วนกลับของ λ ที่เรียกว่า แลมดาไพรม์ (lambda prime) ซึ่งก็คือค่าส่วนกลับของ S^2

(3) เราต้องหาทิศทางค่าการเหยียดมากที่สุด(maximum stretch, S_1) และ

(4) เมื่อทราบทิศทางของ S_1 จึงวัดค่ามุม θ_d เทียบกับทิศทางของ S_1 การวัดมุมต้องคิดค่าของมุมเป็นบวกหรือลบ(เทียบกับตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา) เช่น โดยที่ถ้ามุมวัดทวนเข็มนาฬิกาเทียบกับ S_1 จะได้ค่ามุมเป็นลบ และกำหนดจุดแกนของวงกลมมอร์ทางแกนลบ ทำนองเดียวกันถ้ามุมที่วัดตามเข็มนาฬิกาเทียบกับ S_1 จะได้ค่ามุมเป็นบวก โดยกำหนดจุดในแกนของวงกลมมอร์ทางแกนบวก

อนึ่งตัวอย่างการใช้วงกลมมอร์ได้แสดงในรูป 2.49 และ 2.50dav ตัวอย่างแรก (รูป 2.49dav) แสดงซากหอยบราคิโอพอด E และ M ก่อนเปลี่ยนและหลังเปลี่ยน ค่าที่วัดได้แสดงในตาราง เมื่อนำค่าเหล่านั้นมาสร้างวงกลมมอร์ ดังรูป 2.50dav เราสามารถหาค่า λ' , γ/λ และ ψ ได้

ค. วิธีหาความเครียดอื่นๆ

นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆ ที่ใช้วิเคราะห์หาความเครียดที่เกิดขึ้น เช่น โดยอาศัยลักษณะปรากฏที่ผิดปกติของ ตัวบ่งชี้ความเครียดทั้งแบบที่อาศัยแนวเส้นตรง แนวสมมาตรรูปร่าง ตัวบ่งชี้ความเครียด และพื้นที่หรือปริมาตร ซึ่งจริงๆ แล้ว ง่ายๆ ก็คือเราต้องทราบรูปร่างเดิมก่อน Ramsay และ Haber (1983) ได้เสนอและรวบรวมวิธีการหาปริมาณความเครียดจากลักษณะของตัวบ่งชี้ความเครียดในรูปแบบต่างๆ

(1) วิธีของคลอส (Cloos's method) Emst Cloos (1947) ได้ริเริ่มทำการวิเคราะห์ความเครียดโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนรูปร่างโดยไม่สูญเสียปริมาตร คลอสได้วิเคราะห์ความเครียดโดยใช้หินปูนโอลิติก(Oolitic)จากรัฐ Maryland สหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมเป็นวงรี โอโออิดเป็นสารจำพวกปูน(calcareous) ที่จับล้อมรอบเม็ดตะกอนเล็กๆ และขยายออกไปในรัศมีของวงกลมกว้างขึ้นเรื่อยๆ รอบเม็ดตะกอนเล็กๆ(รูป 2.53 dav) โดยที่คลอสได้เก็บตัวอย่างส่วน 227 ตัวอย่างที่มีโอโออิดและวัดค่าต่างๆ เช่น ชั้นหิน รอยแยก และแนวแตกเรียบ โดยที่เขาได้ลงตำแหน่งของบริเวณที่เก็บตัวอย่าง นอกจากนี้เขาเตรียมแผ่นหินบาง (thin section) ถึง 400 แผ่น ที่มีโอลิตซึ่งคลอสได้วิเคราะห์รูปทรงสันฐานทางเรขาคณิตและการวางตัวของความเครียดได้ ในการคำนวณเขาได้สมมติให้โอลิตแต่ละวงก่อนเปลี่ยนลักษณะมีสภาพเป็นทรงกลม(เหมือนรูปเดิมจริงๆ) และสมมติให้การเปลี่ยนลักษณะของโอโออิดไม่สูญเสียปริมาตร ดังนั้น

$$V_s = \frac{4}{3}\pi r^3$$

ถ้าให้ r แทนรัศมีวงกลม และเมื่อทรงกลมเปลี่ยนเป็นทรงรี(ellipse)

$$V_e = \frac{4}{3} \pi abc$$

และถ้าให้ a , b , และ c เป็นความยาวแกนมากที่สุด, ความยาวแกนปานกลาง และความยาวแกนน้อยสุดของวงรีตามลำดับ และกำหนดให้

$$V_s = V_e$$

และ $r = \sqrt{abc}$

จากการวัดค่าต่างๆ ในหินตัวอย่างโดยเฉพาะค่า a , b , และ c ได้ เราสามารถคำนวณหาค่า r ได้ และเมื่อได้ค่า r เราก็สามารถหา S_1 , S_2 และ S_3 ได้ในที่สุด

(2) วิธีของเวลแมน (Wellman's method) Wellman (1962) ได้เสนอวิธีหาความเครียดที่เกิดขึ้นจากตัวบ่งชี้ความเครียด โดยมีเงื่อนไขคือตัวบ่งชี้ความเครียดที่นำมาวิเคราะห์นั้นต้องมีรูปร่างก่อนการเปลี่ยนลักษณะที่สามารถแสดงได้ด้วยเส้นตรงสองเส้นตั้งฉากกัน ตัวอย่างเช่นลักษณะรูปร่างของหอยบราซิโอพอด(brachiopod) และซากไตรโลไบต์(trilobite) ดังแสดงในรูป (รูป 5-12 hatcher) เมื่อวัตถุถูกกระทำให้ผิดรูปร่างไป เส้นตรงที่เคยตั้งฉากกันจะเปลี่ยนไป(รูป 5-12 hatcher) การเปลี่ยนไปของมุมฉากของเส้นตรงสองเส้นสามารถนำมาคำนวณหาวงรีความเครียด(strain ellipse) ได้ดังแสดงในรูป(รูป 5-12 hatcher) ซึ่งเป็นรูปร่างไตรโลไบต์(trilobite) ที่ถูกทำให้ผิดรูปหรือบิดเบี้ยวไป โดยปกติเพื่อให้ได้ค่าที่มีความเชื่อถือได้ดี เราควรตรวจสอบจากวัตถุที่เป็นตัวบ่งชี้ความเครียดมากกว่า 10 ตัวขึ้นไป โดยมีวิธีวิเคราะห์ ดังนี้

- (1) ลอก(trace) ลักษณะปรากฏของวัตถุที่เป็น ตัวบ่งชี้ความเครียด ดังแสดงในรูป โดยลอกเฉพาะแนวเส้นตรงที่ก่อนการเปลี่ยนลักษณะเคยเป็นเส้นที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน
- (2) ลากเส้นตรง AB ในทิศทางใดๆ ด้วยความยาวที่ควรจะมีมากกว่าความยาวของเส้นตรงที่ปรากฏจากวัตถุในข้อ 1
- (3) วัดมุมของเส้นตรงทั้งสองเส้นของวัตถุแต่ละตัวนำมาเทียบกับเส้นตรง AB ที่ลากไว้ในข้อ 2
- (4) กำหนดมุมที่วัดได้จากข้อ 3 ลงบนจุดปลายของเส้นตรง AB ทั้งสองปลายดังแสดงในรูป 2.33 ก โดยกำหนดจุดทั้งช่วงบนและช่วงล่าง ทำให้ครบทุกวัตถุ หากวัตถุถูกกระทำให้ผิดรูปร่างไปจะปรากฏเป็นรูปวงรีความเครียด(strain ellipse) ดังนั้นถ้าวัตถุเปลี่ยนลักษณะไปมากจะมีค่าความเป็นวงรีมาก และ

- (5) หาแกนที่ยาวที่สุด(e_1) และแกนที่สั้นที่สุด(e_2) ของวงรีจากข้อ 4 และคำนวณหาค่าความเป็นวงรี(ellipticity, R) ดังสมการ $R = 1 + e_1/1 + e_2$

อนึ่งพึงระลึกว่าในวิธีของเวลแมน หากตัวบ่งชี้ความเครียดไม่มีลักษณะปรากฏตามที่เวลแมนต้องการคือแนวเส้นตรงที่เคยตั้งฉากกันทั้งสองเส้น เราไม่สามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธีนี้ได้

(3) วิธีของแรมเซ หรือ R_f/ϕ' J.G. Ramsay (1967) ได้เสนอวิธีหาวงรีความเครียดของวัตถุที่มีลักษณะปกติเป็นลักษณะทรงกลมหรือวงรี แต่เมื่อผิวดรูปรางไปจะเปลี่ยนเป็นวงรี ในการหาวงรีความเครียดด้วยวิธีนี้มีตัวแปรที่ต้องพิจารณา 3 ตัว ได้แก่ (1) รูปร่างความเป็นวงรีเริ่มต้น (initial ellipticity) ก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (2) ทิศทางการวางตัวของวงรี และ (3) การวางตัวและขนาดแกนหลักของวงรีความเครียด(principal strain axes)

Ramsay และ Huber (1983) ได้แสดงรายละเอียดของวิธีนี้ ซึ่งมีหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ดังนี้ (1) หาตัวบ่งชี้ความเครียดมากพอที่จะเป็นตัวแทนของบริเวณที่วิเคราะห์ ตัวบ่งชี้ความเครียดที่ใช้ เช่น ก้อนกรวด(pebbles), อูลิด(ooids), หรือเม็ดทราย(sand grains) (2) หาค่าความเป็นวงรีของวัตถุที่ผิวดรูป(R_f) และวัดมุม ϕ' โดยที่มุม ϕ' วัดจากแนวของแกนที่ยาวที่สุด(e_1)ทำกับเส้นอ้างอิงที่กำหนดขึ้น (3) หลังจากวัดค่า R_f และ ϕ' เราจึงสร้างกราฟระหว่าง R_f และ ϕ' จากนั้นจึงนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟที่คำนวณทางทฤษฎี เราก็จะสามารถหาวงรีความเครียดได้

หลักการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นเราถือว่าเป็นการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ เพราะจริงๆ แล้วสิ่งที่เราพบมีการเปลี่ยนลักษณะจนผิวดรูปไปแล้ว แต่เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงขอยกตัวอย่างดังแสดงในรูป 5-13 **hatcher** และอธิบายโดยเริ่มจากวัตถุก่อนเปลี่ยนลักษณะซึ่งยังไม่ถูกกระทำให้ผิวดรูปไป โดยในรูป ก วัตถุมีรัศมียาวสุดของวงรีเท่ากับสอง ($R_f=2$) วางตัวอย่างกระจัดกระจาย (random) และวงรีนี้มีแกนยาวที่สุดทำมุม ϕ กับเส้นอ้างอิงซึ่งในรูปใช้เส้นแกนนอนของกรอบสี่เหลี่ยม และกำหนดจุดค่าความเป็นวงรีเริ่มต้น (R_f) กับ ϕ ของวัตถุที่ปรากฏได้ในกราฟ และให้ค่าวงรีความเครียดเท่ากับหนึ่ง($R_f=1$) ทั้งนี้เพราะยังไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง รูป ข แสดงให้เห็นว่าวัตถุเกิดความเครียดจนผิวดรูปไปด้วยค่าวงรีความเครียดเท่ากับหนึ่งเท่าครึ่ง($R_f=1.5$) ค่าความเป็นวงรีเปลี่ยนไปในลักษณะขึ้นลง(fluctuation) คือมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงได้ ซึ่งในที่นี้คือค่า R_f เมื่อค่าความเป็นวงรีเปลี่ยน มุมก็เปลี่ยนไปด้วยซึ่งเราเรียกว่า ϕ' ดังนั้นเมื่อกำหนดจุด R_f และ ϕ' เราจะได้กราฟดังแสดงในรูป จะเห็นได้ว่าค่า ϕ' อยู่ระหว่าง $\pm 90^\circ$ รูป ค เป็นรูปที่ทำให้เกิดค่าความเครียดสามเท่า($R_f=3$) เมื่อหาค่าความสัมพันธ์ของ R_f และ ϕ' ได้กราฟดังแสดงในภาพ จะพบว่าการ

เปลี่ยนแปลงขึ้นลงของ ϕ' ลดลง อยู่ระหว่าง $+15^\circ$ ถึง -15° เราจึงสรุปได้ว่าถ้าหากมีความเครียดมากๆ การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของ ϕ' จะน้อย

สำหรับ รูป 5-14 *hatcher* แสดงผลการเปลี่ยนค่า R_f และ R_s ที่อัตราส่วนต่างๆ จากข้อมูลในรูป 5-13 และ 5-14 *hatcher* ซึ่งเราสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของค่า ϕ' เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณความเครียด การหาวงรีความเครียดโดยการวิเคราะห์ของ Ramsay และ Huber (1983) แสดงว่าถ้าค่าความเป็นวงรีเริ่มต้นของวัตถุมากกว่าวงรีความเครียด ($R_f > R_s$) เราจะพบว่าร้อยละ 50 ของข้อมูลมักสะสมอยู่ในบริเวณวงรีความเครียด (รูป 5-13 *hatcher*) ดังนั้นเราจึงสามารถลากวงรีความเครียดจากการคิดร้อยละ 50 ของข้อมูลกับค่ามากที่สุดของ R_f แต่ถ้าค่าความเป็นวงรีเริ่มต้นของวัตถุมีค่าน้อยกว่าวงรีความเครียด ($R_f < R_s$) เราจะพบว่าข้อมูลส่วนมากสะสมอยู่ในบริเวณวงรีความเครียดโดยไม่แผ่กระจาย

(4) *วิธีของแรมเซ และเฮเบอร์* หรือวิธีต่อจุดกึ่งกลาง(center-to-center) วิธีนี้เสนอโดย J.G. Ramsay และ M.I. Huber (1983) เพราะเนื่องจากวิธี R_f/ϕ' ทำให้เสียเวลาในการวิเคราะห์ จึงได้เสนอวิธีต่อจุดกึ่งกลางเพื่อช่วยให้วิเคราะห์ได้เร็วขึ้น ก็คือวัดระยะห่างระหว่างวัตถุที่อยู่ติดกันและวัดมุมโดยกำหนดเส้นสมมติขึ้นเส้นหนึ่ง ดังแสดงในรูป 5-15 *hatcher* วัดค่า d' และ α' จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง d' และ α' ทำการลากเส้นโค้ง ให้ที่ผ่านข้อมูลมากที่สุดที่ได้ (fit curve) เพื่อหาค่า $d'_{\max}$ และ $d'_{\min}$ จากนั้นจึงคำนวณค่าวงรีความเครียดจากสมการ

$$R_s = d'_{\max}/d'_{\min}$$

(1) *วิธีของฟราย(Fry's method)* วิธีนี้เสนอโดย Norman Fry (1979) ซึ่งปรับปรุงวิธีของ center-to-center ให้ง่ายขึ้นและใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยลง วิธีนี้มีหลักกำหนดจุดกึ่งกลางของวัตถุทั้งหมดที่ปรากฏ โดยใช้กระดาษใสที่มองเห็นวัตถุที่เป็นตัวบ่งชี้ความเครียด และเริ่มจากต่อมาจึงกำหนดจุดที่สนใจไว้จุดหนึ่ง วางจุดนั้นลงบนกึ่งกลางของวัตถุที่เป็นตัวบ่งชี้ความเครียด จากนั้นจึงกำหนดจุดกึ่งกลางของตัวบ่งชี้ความเครียดที่ปรากฏอยู่รอบๆ ทั้งหมด ต่อจากนั้นจึงเลื่อนจุดนั้นไปที่วัตถุตัวอื่นๆ และกำหนดจุดกึ่งกลางของวัตถุทั้งหมดที่ปรากฏอยู่รอบๆ โดยให้ทำในลักษณะนี้จนกว่าจะพบลักษณะปรากฏเป็นรูปวงรี (ดังแสดงในรูป 5-16 *hatcher*) ซึ่ง Fry เชื่อว่าวงรีที่ปรากฏคือวงรีความเครียดนั่นเอง และถ้าปรากฏว่าวงที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นวงกลมก็ให้ถือว่าวัตถุนั้นไม่ได้เปลี่ยนลักษณะ

3.5.8 การเปลี่ยนลักษณะโดยการยืดหด

มีหลายครั้งที่เราพบว่าเกิดความเครียดโดยไม่มีการสูญเสียปริมาตร แต่เมื่อมีการบิดเบี้ยว อาจทำให้ปริมาตรเพิ่มหรือลดได้(dilational change) เช่น เมื่อหินแตกออกอาจมีสายแร่ไปแทรกในภายหลังทำให้ปริมาตรมวลหินที่เกิดจากพนักหิน(dike rock) หรือเมื่อแร่ในหินถูกละลายออกไปจนทำให้ปริมาตรโดยรวมของหินลดลง(รูป 2.38piangta) เช่น การเกิดแนวแตกเรียบ (cleavage) ซึ่งปริมาตรที่หายไปนี้ (Fig 2-55 dav) หรืออาจเป็นผลมาจากการละลายด้วยความดัน(pressure solution) เช่นที่ทำให้เกิดแนวฟัน(stylolites)ในหินปูนซึ่งเป็นเพราะหินปูนถูกแรงกระทำจนเกิดการละลายและเหลือค้าง ส่วนที่ไม่ละลายในลักษณะแนวฟันในหิน (รูป 2.39piangta) ดังนั้นเราจึงมักพบเศษตะกอนละเอียดมากเหนียวเป็นสีดำหรือสีน้ำตาล(เข้ม) และเมื่อเราพิจารณาวงรีความเครียดในลักษณะแบบสองมิติ เราพอสรุปได้ว่า

เมื่อ S_1 และ $S_3 = 1.0 \rightarrow$ ปริมาตรที่ไม่เปลี่ยนแปลง
 S_1 และ $S_3 < 1.0 \rightarrow$ ปริมาตรจะลดลง
 S_1 และ $S_3 > 1.0 \rightarrow$ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น

ซึ่งทั้งหมดอาจพิจารณาได้จากแผนภาพสนามความเครียด(strain field diagram)ที่แสดงไว้ในรูป 2.58 dav

3.5.9 แผนภาพฟลินน์

ในการพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดความเครียด เนื่องจากหินอาจสูญเสียปริมาตรในลักษณะสามมิติ เราจึงมักใช้แผนภาพของฟลินน์(Flinn diagram) ที่เสนอโดย Flinn (1962) (รูป 5-10 hatcher and 2.41piangta) โดยกำหนดให้อัตราส่วนของ S_1/S_2 และ S_2/S_3 ซึ่งคำนวณจากค่า S_1, S_2 และ S_3 ตามวิธีวิเคราะห์ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ไม่ว่าเราจะเลือกใช้เทคนิคหรือวิธีใด เราจำเป็นต้องวิเคราะห์ให้ได้ครบทั้งสามแกนตัวบ่งชี้ความเครียด

ต่อมาRamsay(1967)ได้ดัดแปลงจากแผนภาพของฟลินน์จากมาตราส่วนปกติมาเป็นมาตราส่วนลอการิทึม(logarithmic Flinn diagram) ซึ่งทำให้ตรวจสอบได้ทั้งการบิดเบี้ยวและการเสียปริมาตรซึ่งค่าความเครียดมาตราส่วนลอการิทึม(logarithmic strain) หรือบางที่เรียกว่า ความเครียดปกติ(natural strain) หรือความเครียดจริง(true strain) โดยที่ $e = \log_e(S)$ ดังแสดงในรูป 2.41Piangta ข

(Aj. Punya, in the future, please add some more from page 88-94 hatcher.)

These are the figure caption which I modified from Piangetta, so some are not in this chapter.

รูป 2.1 สภาพการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม abcd (ก) เมื่อวัตถุมีการเลื่อนที่ (rigid body deformation by translation) (ข) เมื่อวัตถุมีการหมุน (rigid body deformation by rotation) (ค) วัตถุมีการยืดหด (nonrigid body deformation by dilation) และ (ง) วัตถุมีการบิดเบี้ยว (nonrigid body deformation by distortion)

รูป 2.2 การเปลี่ยนลักษณะของวัตถุ (ก) ลักษณะที่วัตถุมีการเปลี่ยนลักษณะแบบบริสุทธิ์ (pure dilation) ซึ่งมีรูปร่างคงเดิมแต่พื้นที่หรือปริมาตรเปลี่ยนไป (ข) ลักษณะที่วัตถุมีการเปลี่ยนลักษณะแบบบิดเบี้ยวบริสุทธิ์ (pure distortion) ซึ่งมีพื้นที่หรือปริมาตรคงเดิมแต่รูปร่างเปลี่ยนไป

รูป 2.3 สภาพการเปลี่ยนลักษณะของวัตถุไม่แข็ง (non-rigid body deformation) (ก) การเปลี่ยนลักษณะแบบต่อเนื่อง (continuous deformation) (ข) การเปลี่ยนลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous deformation) (ค) การเปลี่ยนลักษณะแบบเนื้อเดียว (homogeneous deformation) และ (ง) การเปลี่ยนลักษณะแบบเนื้อผสม (heterogeneous deformation)

รูป 2.4 การพิจารณามาตราส่วนการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างแบบต่อเนื่อง เพื่อแยกวิเคราะห์ (structural domains) ตามความละเอียดของการวิเคราะห์

รูป 2.5 การพิจารณาลักษณะโครงสร้างการคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนเพื่อบ่งบอกความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับมาตราส่วนของความละเอียดที่ใช้พิจารณา (ภาพปรับปรุงต่อจาก Richard Allmendinger, 2003, Lecture note in structural geology, Cornell University, USA)

รูป 2.6 (ก) การเขียนบอกขนาดทิศระยะเคลื่อน (displacement vector) จากจุด A ไปยัง B ซึ่งระยะทางให้คิดจากระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุด A และ B ในภาพนี้ของการเลื่อนที่ไปทางตะวันตกเฉียงใต้และมีทิศทาง 30 จากทิศใต้ (ข) แสดงการเขียนขนาดทิศระยะเคลื่อนของทวีปอินเดียเมื่อประมาณ 71 ล้านปีถึงปัจจุบัน (แหล่งที่มา: 2.13 Davis and Reynolds, 1996)

รูป 2.7 หลักการพิจารณาการเลื่อนจริง (absolute displacement) ทั้งในแบบเทียบสัมพัทธ์ (relative displacement) และแบบเฉพาะจุด (local displacement) (ก) วัตถุก่อนการเปลี่ยนลักษณะและอยู่ในตำแหน่งที่เราทราบระยะและทิศทาง (coordinate) แน่นอน (ข) เมื่อเกิดการเปลี่ยนลักษณะ

แบบมีการหมุน การเลื่อนที่ และการบิดเบี้ยว ไปจากตำแหน่งเดิม โดยสามารถหาได้ทั้งจากการเลื่อนจริง การเลื่อนเทียบสัมพันธ์ และการเลื่อนเฉพาะจุด (ค) (ง) และ (จ) ภาพขยายการเลื่อนที่ของรูปที่แสดงในภาพ ข (แหล่งที่มา*: Figure 4.6 โดย Ramsay and Huber, 1993)

รูป 2.8 การเลื่อนไถลของชั้นหินไปตามระหว่างชั้นเมื่อเกิดการโค้งงอในหินที่มีสภาพความแข็งแตกต่างกัน

รูป 2.9 (ก) ลักษณะการเลื่อนเฉียงไปทางซ้ายแบบมุมเฉียง(left-hand oblique slip) พบแนวของรอยครูด(slickenline) โดยมีมุมครูด(rake) 35 อยู่บนระนาบรอยเลื่อน (ข) เสดริโอเน็ต หาแนวการวางตัว (trend) และมุมกด(plunge) ของเวกเตอร์การขจัด (ค) ระยะเลื่อนจริง(net slip), การเลื่อนตามแนวระดับ(strike slip) และการเลื่อนตามมุมเท(dip slip) ของเวกเตอร์การขจัด(แหล่งที่มา: Figure 2.16 โดย Davis and Reynolds, 1996)

รูป 2.10 การหมุนตัวของแร่โกเมน(garnet) ในหินแปรที่พบในบริเวณแถบคาลิโดไนส์ (Caledonides) ประเทศนอร์เวย์ (แหล่งที่มา: Figure 2.24 โดย Davis & Reynolds, 1996)

รูป 2.11 การเปลี่ยนลักษณะแบบผิดรูปร่าง(distorted shape) ไปจากเดิมของซากบราซิโอพอด(brachiopod) และไตรโลไบต์(trilobite)

รูป 2.18 สภาพการเปลี่ยนลักษณะจากวงกลมเป็นวงรี (ก) วงกลมที่มีเส้นตรงสองเส้นที่ตั้งฉากกันก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (ข) สภาพการเปลี่ยนลักษณะจากวงกลมในรูป ก ไปเป็นวงรี และ (ค) การหามุมเฉือน (angular shear) โดยการวัดมุมที่เบี่ยงเบนจากเส้นที่เคยตั้งฉากกันก่อนการเปลี่ยนลักษณะ การกำหนดค่ามุมนิยมนำเป็นองศาและมีเครื่องหมายกำกับ + เมื่อตามเข็มนาฬิกา และ - เมื่อทวนเข็มนาฬิกาไปจากเส้นตรงเดิม

รูป 2.19 สภาพการเปลี่ยนลักษณะ (ก) ของซากดึกดำบรรพ์ไตรโลไบต์(trilobite) ที่ตรวจสอบได้โดยการวัดมุมเฉือน (ค) ระหว่างเส้น L-L' และ W-W''

รูป 2.20 (ก) สภาพก่อนการเปลี่ยนลักษณะของเส้นตรง AC และ CB โดยที่จุด 4 จุด (1, 2, 3 และ 4) ห่างเท่ากัน (ข) สภาพหลังเปลี่ยนลักษณะไปที่เส้น AC เกิดการเฉือนไปจากเดิมด้วยมุม $\phi = 35^\circ$ สังเกตการเปลี่ยนลักษณะจะเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบเนื้อเดียว และจุดทั้ง 4 จุด เคลื่อนที่ด้วยมุมเท่ากัน

รูป 2.21 รูปแบบการเปลี่ยนลักษณะชนิดความเครียดการเฉือนแบบง่าย(simple shear) (ก) สภาพก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (ข) ถูกเปลี่ยนลักษณะความเครียดเฉือนที่ค่า $\gamma = 1.0$ และ (ค) ถูกเปลี่ยนลักษณะด้วยค่า $\gamma = 2.0$ ให้สังเกตการเปลี่ยนของวงกลมและเส้นตรงก่อนการเปลี่ยนและหลังการเปลี่ยนลักษณะ

รูป 2.22 รูปแบบการเปลี่ยนชนิดความเครียดเฉือนแบบบริสุทธิ์(pure shear) (ก) สภาพก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (ข) สภาพที่วัตถุถูกเปลี่ยนลักษณะด้วยค่า $S=1.8$ และ (ค) สภาพที่วัตถุถูกเปลี่ยนลักษณะด้วยค่า $S=3.4$ ให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงวงกลมและเส้นตรงก่อนการเปลี่ยนและหลังการเปลี่ยนลักษณะจะเป็นการเปลี่ยนขนาดแต่ไม่เปลี่ยนการวางตัว

รูป 2.23 การเปลี่ยนลักษณะวงกลม เมื่อถูกบีบอัดจะได้เป็นวงรี แสดงผลจากการกดลงไป ในแท่งฟองน้ำด้วยแรงกดเท่ากัน ให้สังเกตว่าไม่ว่าวงรีจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะต้องมีเส้นตรงสองเส้นที่ยังคงความยาวเช่นเดิม ในรูป คือ ด้วยเส้นประ A และ B

รูป 2.24 การเปลี่ยนลักษณะของวงกลม เมื่อถูกแรงเฉือนจะเปลี่ยนเป็นวงรี แสดงจากแผ่นกระดาษ ด้วยไฟสองลำรับที่วางซ้อนกัน(cards model) ซึ่งไม่ว่าวงรีจะเปลี่ยนไปในลักษณะใดจะต้องมีเส้นตรงสองเส้นที่ไม่เปลี่ยนความยาว ในรูปแสดงด้วยเส้นประ

รูป 2.25 วงรีความเครียดที่มี S_1 เป็นแกนหลักมากที่สุด(principal maximum strain axes) และ S_3 เป็นแกนหลักค่าน้อยสุด(principal minimum strain axes) ในรูปแสดงการเปลี่ยนลักษณะในแบบ 2 มิติ ถ้าต้องการแสดงต้องมีค่าความเค้นหลักปานกลาง(S_2) โดยที่ทั้งสามแกนจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน

รูป 2.26 (ก) รูปแบบวงกลมก่อนการเปลี่ยนลักษณะ (ข) และ (ค) การเปลี่ยนลักษณะของวงกลมเป็นวงรี สังเกตความยาวที่เปลี่ยนไปของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมเริ่มต้น และแกนของวงรีที่เกิดจากการเปลี่ยนลักษณะ

รูป 2.27 การเปลี่ยนลักษณะเชิงเส้นของแผ่นเค้กดินเหนียว (ก) รูปวงกลมและเส้นตรง LO และ MM' ตั้งฉากกัน ซึ่งต่อมากการเปลี่ยนลักษณะ (ข) มุม θ_d วัดเทียบจากแกนหลักค่ามากที่สุดของวงรี (ค) รูปภาพอย่างง่ายเฉพาะเส้นตรง L และ M ก่อนการเปลี่ยนลักษณะ และ (ง) มุมเฉือน (angular shear) ของเส้นตรง M ซึ่งมีค่า 40°

รูป 2.28 (ก) การเปลี่ยนรูปแบบเส้นตรง AB ที่ตัดรูปวงรีโดยทำมุม $\theta_d = +25^\circ$ กับแกน S_1 จากการเปลี่ยนรูป เมื่อให้ค่า $\lambda_3 = 2.0$ และ $\lambda_1 = 0.57$ (ข) ลักษณะวงกลมมอร์ที่ใช้หาความเครียดเฉือน (ค) ระยะทางที่วัดได้จากการสร้างรูปวงกลมของมอร์ (ง) การเปลี่ยนรูปแบบเส้นตรง AB ที่ตัดในรูปวงรีโดยทำมุม $\theta_d = -25^\circ$ กับแกน S_1 จากการเปลี่ยนรูป เมื่อให้ค่าของ $\lambda_3 = 2.0$ และ $\lambda_1 = 0.57$ และ (จ) ลักษณะวงกลมมอร์ที่ใช้หาความเครียดเฉือน (shear strain) โดยวัดมุมในแกนที่เป็นลบ

รูป 2.29 (ก) ซากหอยบราซิโอพอด E และ C ก่อนเปลี่ยนลักษณะ (ข) หอย E และ C ถูกเปลี่ยนลักษณะและวัดค่า λ และ S ของ hinge line และ back line ของ บราซิโอพอดได้ โดยกำหนดเป็น H_E, H_C, B_E และ B_C (ค) วัดค่ามุมเครียดเฉือน (angular shear) เทียบกับ H_E และ H_C (ง) วัดมุมระหว่าง การยืดค่ามาก (maximum stretch) กับ hinge line (Davis และ Reynolds, 1996)

รูป 2.30 การใช้ประโยชน์วงกลมมอร์เพื่อหาค่าการเปลี่ยนลักษณะของหอยบราซิโอพอด (ก) กำหนดจุดเฉพาะข้อมูลที่วัดได้ที่แสดงในตาราง (ข) การสร้างวงกลมมอร์ จากข้อมูลทั้งหมด (Davis และ Reynolds, 1996)

รูป 2.31 การใช้ประโยชน์วงกลมมอร์เพื่อหาค่าการเปลี่ยนลักษณะของซากเบlemnite โดยที่เราไม่ทราบค่าวงรีความเครียด (strain ellipse) และทิศวงรีความเครียด (ก) ซากเบlemnite ที่พบต้องมีย่านน้อยสามตัวขึ้นไปโดยเราวัดมุมดังภาพในกรอบสี่เหลี่ยม (ข) กำหนดจุดมุม 2 มุมจากที่วัดได้ใน (ก) ให้เป็น 2 เท่าและเทียบกับเบlemnite ตัวใดตัวหนึ่งลงในกรอบสี่เหลี่ยมในที่นี้เลือกซาก C (ค) ลากเส้นตรงให้แนวครึ่งกรอบสี่เหลี่ยม (ง) พยายามหมุนปรับและเลื่อนภาพจนกระทั่งได้ค่า $x=y$ $\lambda'_B - \lambda'_A$ และ $\lambda'_C - \lambda'_B$ และ (จ) ได้ค่ามุม θ ของเบlemnite แต่ละตัว (Ramsay และ Huber, 1983)

รูป 2.32 (ก) รูปก่อนการเปลี่ยนลักษณะของอูลิต (ข) เมื่ออูลิตเปลี่ยนลักษณะไป 50% จนแบนราบ (Davis และ Reynolds, 1996)

รูป 2.33 การหาวงรีความเครียดโดยวิธีของเวลแมน (ก) ลักษณะรูปร่างซากไทรโลไบต์ที่ให้ผลรูปหรือบิดเบี้ยวไป (ข) การลอกรูปที่ปรากฏใน ก เฉพาะฐานและเส้นแบ่ง และ (ค) วงรีความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ (Hatcher, 1995)

รูป 2.34 (ก) ซ้ายความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงรีเริ่มต้น (R_i) กับการวางตัวเริ่มต้น (ϕ)

ของตัวบ่งชี้ความเครียดก่อนการเปลี่ยนลักษณะ โดยมี $R_s = 1.0$ และของกราฟแสดงค่า R_i และ ϕ
 (ข) ซ้ายการเปลี่ยนลักษณะเมื่อมีค่าวงรีความเครียด $R_s=1.5$ ของกราฟแสดงค่า R_i กับ ϕ
 (ค) การเปลี่ยนลักษณะเมื่อมีค่าวงรีความเครียด $R_s=3.0$ และขวกราฟที่ปรากฏ R_i เทียบกับ ϕ (Ramsay และ Huber, 1983)

รูป 2.35 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงรีเริ่มต้น $\ln R_i$ กับ ϕ โดยที่ R_s เปลี่ยนไป
 จาก 1.5 (บน), เป็น 2.0 และ 3.0 (ล่าง) (ข) ลักษณะ $R_i\phi$ โดยรูปซ้ายมือเมื่อค่า $R_i > R_s$ และขวามือ
 เมื่อค่า $R_i < R_s$ (Ramsay และ Huber, 1995)

รูป 2.36 (ก) การต่อจุดศูนย์กลางของวงกลมที่ใกล้เคียงกันระหว่างระยะทาง (d) และมุม
 (∞) ก่อนการเปลี่ยนลักษณะและหลังการเปลี่ยนลักษณะ จากรูปวัดเฉพาะ AB, AC, AD ไม่วัด AE
 (ข) กราฟแสดงค่าของ d' และ ∞' ที่วัดได้จากการกำหนดจุดที่ใกล้เคียงกันของตัวบ่งชี้ความเครียด
 ทั้งหมดที่วิเคราะห์ (Ramsay และ Huber, 1983)

รูป 2.37 (ก) การกำหนดจุดกึ่งกลางของตัวบ่งชี้ความเครียดที่ 1 และกำหนดจุดกึ่งกลาง
 รอบๆ (ข) เปลี่ยนตัวบ่งชี้ความเครียดมาที่ 2 (ค) เมื่อเสร็จจะได้รูปวงรีปรากฏออกมานั้นคือ วงรี
 ความเครียด (Ramsay และ Huber, 1983)

รูป 2.38 การเปลี่ยนลักษณะโดยการลดปริมาตรเนื่องจากการอัดแน่นแบบการลดปริมาตร
 (decrease in volume) โดยการอัด (compaction) และการละลายด้วยความดัน (pressure solution) โดย
 ที่แนวการละลายด้วยความดัน อาจพัฒนาเป็นแนวแตกเรียบ

รูป 2.39 แนวพินหิน (stylolite) ที่เป็นผลจากการเกิดการละลายจากความดัน (solution) พบ
 ในบริเวณ พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

รูป 2.40 กราฟแสดงสถานะความเครียด (strain field diagram) โดยเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง S_1
 กับ S_3 (Davis และ Reynolds, 1996)

รูป 2.41 (ก) กราฟของพลาตินน์ที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนลักษณะที่ได้รูปวงรีความเครียด
 โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง S_1/S_2 และ S_1/S_3 ถ้ามีค่า S_1/S_2 น้อยกว่า S_2/S_3 จะได้วงรีความเครียดแบน
 ราบ (oblate spheroid) แต่ถ้า S_1/S_2 มากกว่า S_2/S_3 จะได้วงรีความเครียดยืดอก (prolate spheroid) (ข)

แผนภาพของฟลินน์(Logarithmic Flinn diagram) ที่ใช้ตรวจสอบการเพิ่มหรือลดปริมาตรหากหิน
เปลี่ยนลักษณะไป