

รอยโค้ง (Folds)

- 7.1 ธรรมชาติแรอยโค้ง (Nature of folds)
- 7.2 รูปลักษณะรอยโค้ง
- 7.3 การจำแนกและการเรียกชื่อแนวโค้ง
- 7.4 การวิเคราะห์รูปร่างแนวคดโค้ง
- 7.5 กลไกการเกิดแนวคดโค้ง (Folding mechanisms) และการหดสั้น

บทที่ 7

รอยโค้ง (Folds)

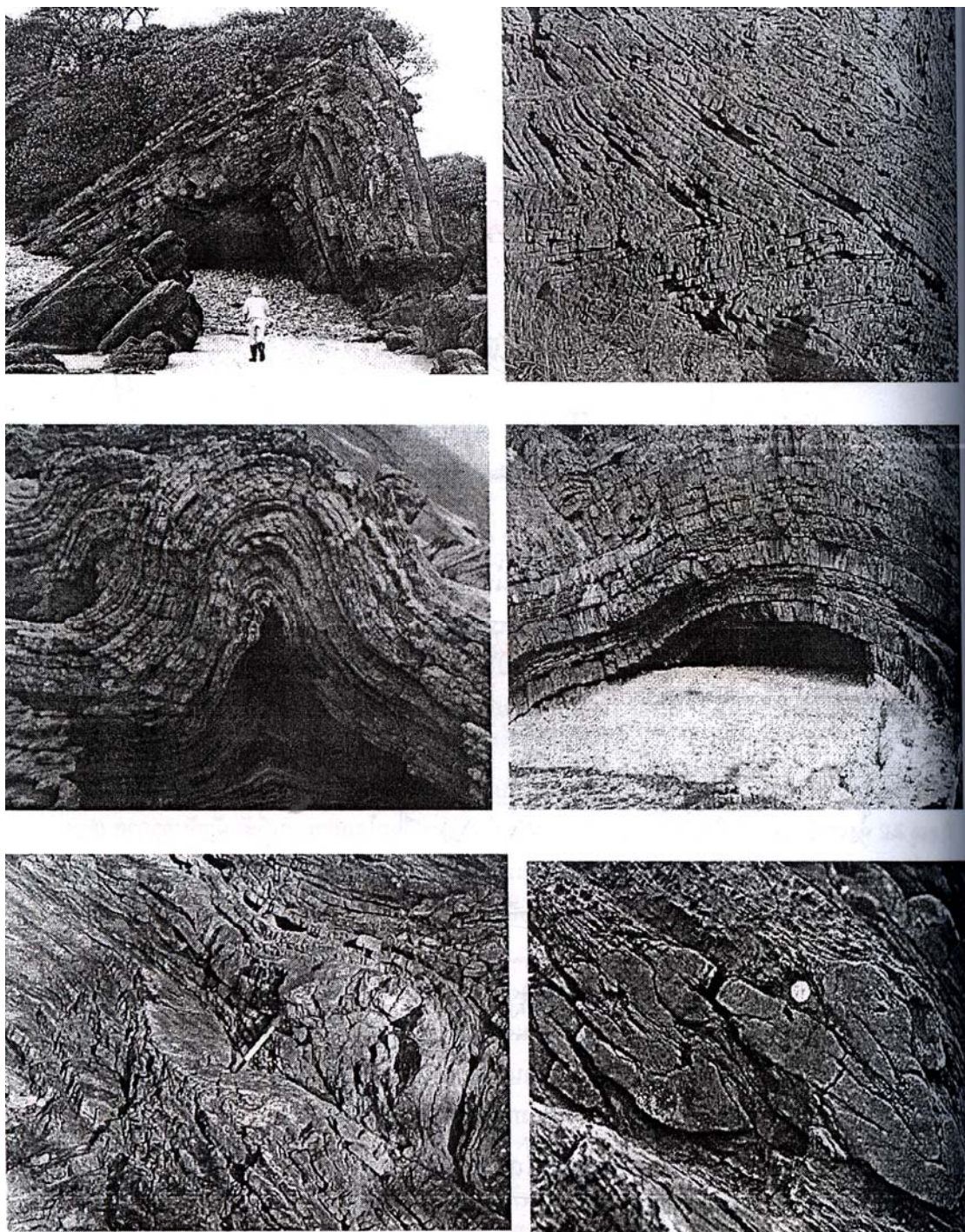
7.1 ธรรมชาติของรอยโค้ง (Nature of folds)

รูปแบบรอยโค้งของหินที่โผล่ให้เราพบเห็นบนผิวโลกเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะ (deformation) ที่เกิดจากผลของแรงเค้น จนเกิดความเครียดในหินโดยแสดงออกในรูปของการคดโค้ง โกงงอ หรือหักพับ รอยโค้งของหินมีรูปร่างโค้งได้อย่างไร้ขอบเขต (limitless) และไม่ตายตัว บางครั้งก็ตั้งตรง (upright) บางครั้งก็เอียงเท (inclined) หรือบางทีก็นอนตะแคง (รูป 7.1 และ 7.2) รอยโค้งมีได้ทั้งขนาดเล็กแบบดูด้วยตาเปล่าไม่เห็น (microscopic scale) ขนาดเท่ากับฝ่ามือ (mesoscale) หรือใหญ่ (macroscopic หรือ regional scale) จนปรากฏในภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายทางดาวเทียมได้ การที่เราจะเข้าใจว่าหินที่ปรากฏบนพื้นผิวโลกเกิดการโค้งงอได้จะเป็นเรื่องที่เหลือเชื่อ เพราะลักษณะผิวเปลือกโลกส่วนบนที่สัมผัสกับอากาศ ซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติแบบเปราะ ดังนั้นการเกิดชั้นหินโค้งจึงต้องเกิดในสภาวะที่หินมีลักษณะอ่อนนุ่ม สามารถเคลื่อนตัวไหลและยืดได้คล้ายดินเหนียวที่อุ่นน้ำ ขี้ผึ้ง พลาสติก หรือยางยืด ความจริงการทำแผนที่โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการโค้งจึงเป็นเรื่องน่าสนใจและน่ายินดี ถ้าเราไม่ทำให้การทำแบบนี้เกิดความซับซ้อนยุ่งยากจนกลายเป็นฝันร้ายไปเสียก่อน การสร้างรูปตัดขวางการโค้งจัดว่าเป็นเรื่องสำคัญพื้นฐานสำหรับการเข้าไปตรวจสอบโครงสร้างทั่วไป เมื่อชั้นหินที่แข็งแรงแสดงชั้นชัดเจนเกิดการโค้ง มักแสดงการโค้งแบบการไหลเลื่อนไปตามชั้น (layer-parallel slippage) เหมือนการโค้งพับหนังสือ แต่สำหรับชั้นหินที่อ่อนนุ่ม การโค้งมักแสดงในรูปไหลลื่นยืดออก หรือบางครั้งเกิดการละลายความดันใน ส่วนที่เป็นรอยแตกเรียบได้

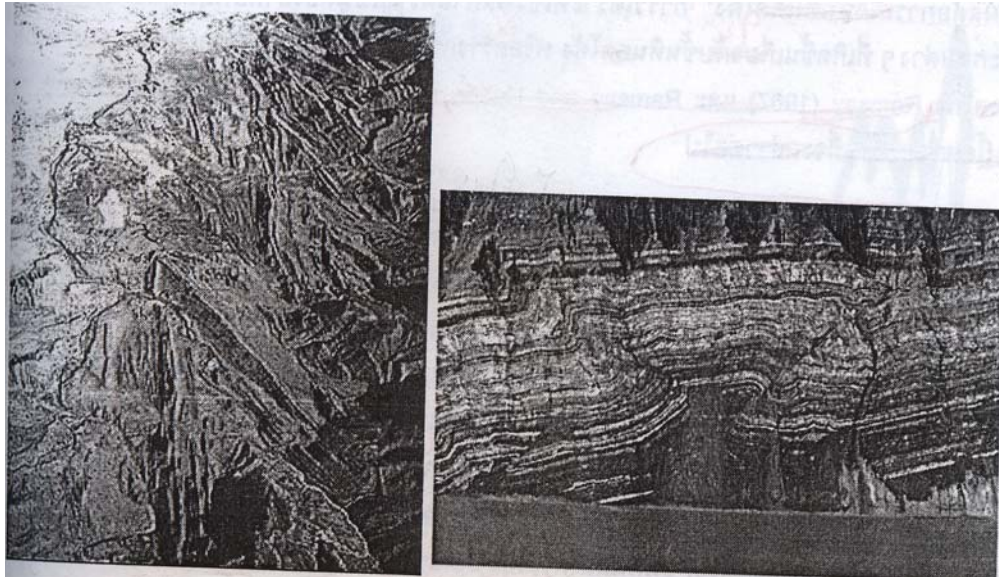
ในการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะและรูปทรงทางเรขาคณิตของรอยโค้ง เรามักวิเคราะห์ด้วยโครงตาข่ายด้วยสเตอริโอเน็ต (stereonet) ซึ่งช่วยคำนวณการวางตัวของแนวโค้งความมากน้อยในการโค้งใช้หาแกนรอยโค้ง ใช้การวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาโครงสร้างก่อนเกิดแนวโค้งหรือโครงสร้างปฐมภูมิได้

7.1.1 โครงสร้างย่อยและรอยโค้ง

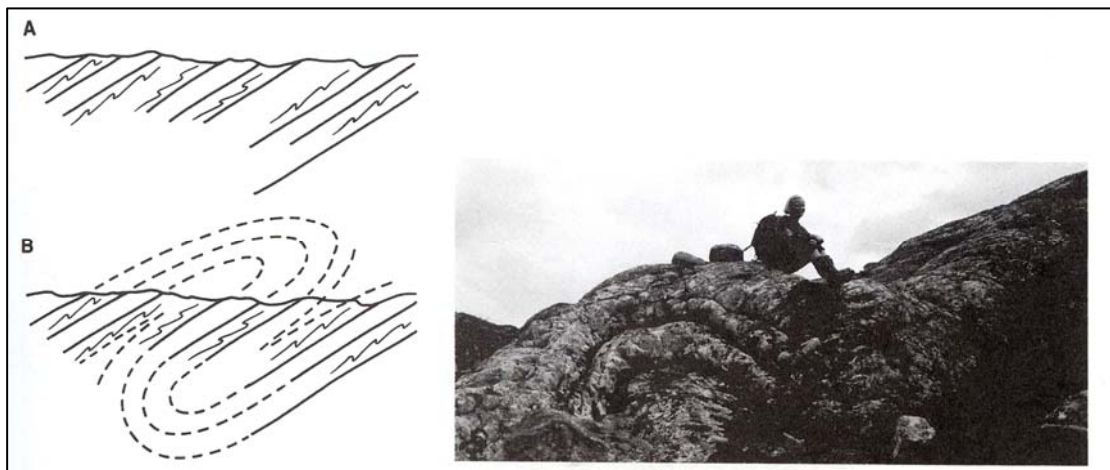
โดยปกติแนวโค้งมักเกิดร่วมกับโครงสร้างอื่นๆ เช่น แนวโค้งเล็กๆภายในแนวโค้งใหญ่ (รูป 7.3) ซึ่งอาจมีรอยเลื่อน รอยแตก รอยแตกเฉียง รอยไถล รอยเส้น รอยแตกเรียบ สายแร่ หรืออื่นๆ โดยที่โครงสร้างร่วมต่างๆมักเกิดในบริเวณตำแหน่งต่างๆกันของรอยโค้ง ทั้งนี้เพราะมีปริมาณความเครียดในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน บางบริเวณแสดงการบีบอัดแต่บางบริเวณแสดงการแตกขยาย บางบริเวณมีการสูญเสียน้ำ ในบางบริเวณกลับพบว่าปริมาตรเพิ่มขึ้น หรือบางบริเวณไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเลย ดังนั้นโครงสร้างร่วมภายในชั้นหินโค้งจึงเป็นตัวช่วยเสริม



รูป 7.1 ลักษณะรูปร่างของชั้นหินคดโค้งในมาตราส่วนต่างๆ (บน) ลักษณะของการคดโค้งแบบ chevron folds (กลาง) ลักษณะการคดโค้งที่มีแกนขนาดเท่ากัน parallel folds (ล่างซ้าย) รอยเลื่อนปรากฏร่วมกับชั้นหินคดโค้ง (ล่างขวา) ชั้นหินคดโค้งรูปร่างคล้ายเบ็ดตกปลาเกิดเนื่องจากมวลของเนื้อหินบางส่วนละลายออกไปของแร่กลุ่มคาร์บอเนต (แหล่งที่มา: บนซ้ายมือและกลางโดย Robert J. Varga, The college of Wooster ล่างขวาโดย Robert Burger, Smith College)



รูป 7.2 (ซ้าย) ภาพถ่ายทางอากาศของ kink folds ในหินตะกอนของบริเวณ Kala Chitta Range (Himalaya foothill) ประเทศปากีสถาน (ขวา) ชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อน พบลักษณะของ pop-up structure พบในบริเวณ Yukon River near Eagle, Alaska หน้าผาสูงประมาณ 250 เมตร (แหล่งที่มา: ภาพโดย Kelvin Pogue, Whitman College)



รูป 7.3 The asymmetry of folds can be used to disclose hidden structures. (A) Z-shaped and S-shaped minor folds in homoclinally dipping strata denote the limbs of (B) a hidden anticline. (C) Minor fold on the flank of a major fold in northern Norway near Bjornfeld. The layer is composed of Cambrian quartzite. The geologist is Lisa Rindstad. (Photograph by G.H. Davis) (Dav)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่คดโค้งได้ รูปที่ 7.4 แสดงลักษณะการคดโค้งที่มีรูปร่างคล้ายคังแซด (z) ในภาษาอังกฤษ บางส่วนในชั้นหินเดียวกันมีรูปร่างคล้ายตัวเอส (s) หรือบางครั้งก็มีรูปร่างคล้ายตัวเอ็ม (m) ซึ่งโครงสร้างเล็กๆ (minor structure) เหล่านี้ ย่อมบ่งบอกให้เราทราบโครงสร้างขนาดใหญ่ (major structure) ได้ ตามกฎพัมเพลลี (Pumpelly's rule)

7.1.2 แนวคิดเรื่องการแปรสัณฐาน

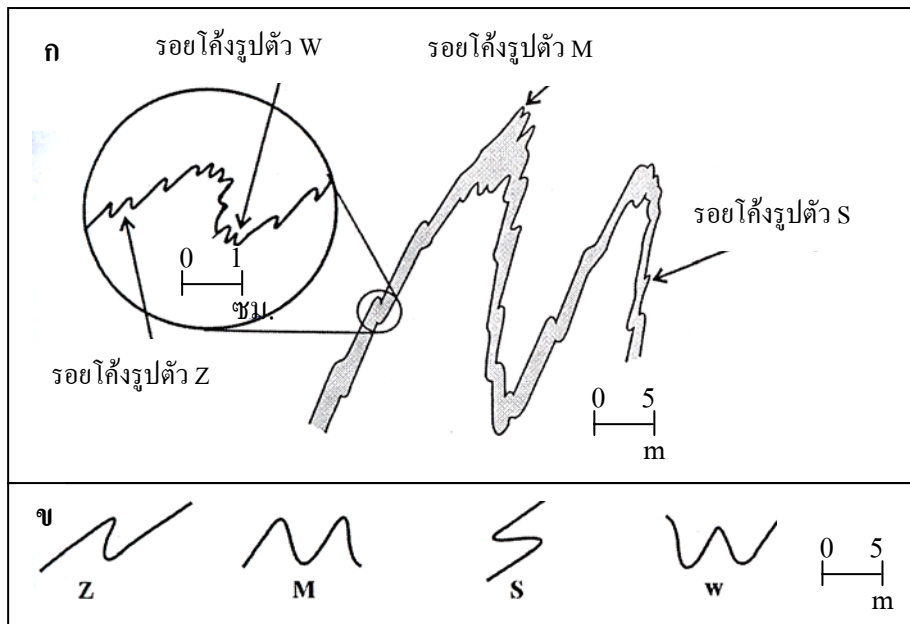
ในการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยการแปรความหมายของโครงสร้างทั้งจากโครงสร้างมาตราส่วนที่เล็กและใหญ่ของชั้นหินโค้ง เพราะต้องอธิบายให้ทราบถึงผลจากการเลื่อนที่ การหมุน การยืดหด และการบิดเบี้ยวให้ได้ ส่วนในการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์สิ่งที่เราต้องการคือการวิเคราะห์แรงที่มีผลต่อการโค้ง ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์จึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีและการทดสอบขององค์ประกอบต่างๆที่เกิดขึ้นในชั้นหินโค้ง หรือการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์การเกิดชั้นหินโค้ง เพื่อให้เข้าใจถึงการเกิดการโค้งในหิน เราคงไม่พิจารณาเพียงรูปร่างการโค้งและการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์หรือทางพลศาสตร์ในพื้นที่เท่านั้น เราควรพิจารณาถึงการโค้งในมาตราส่วนบริเวณกว้าง (regional scale) จนถึงระดับโลก (global scale) ดูรูป 7.5 โดยเราควรพิจารณาค่าแห่งและบริเวณการโค้งในลักษณะของการจัดตัวของแผ่นเปลือกโลกที่สัมพันธ์กับเวลา ซึ่งโดยทั่วไปการโค้งส่วนใหญ่มักพบอยู่ในบริเวณขอบการชนกันของทวีป (convergent plate) เป็นแนวยาวและเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งทำให้เราได้รูปแบบการโค้งที่แตกต่างกันออกไป ในบริเวณมุดตัว (subduction complexes) การโค้งมักเกิดจากผลของแรงเฉือนจนได้รอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (thrust fault) และเกิดการซ้อนทับเกยกันไปของแผ่นทวีป นอกจากนี้ยังพบชั้นหินคดโค้งจากผลของน้ำหนักกดทับ อีกทั้งการโค้งอาจเกิดจากน้ำหนักของตะกอนที่กดทับที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยมากมักเป็นตะกอนที่ยังไม่แข็งตัว การโค้งในบริเวณ โค้งหน้า (fore arc) โค้งภายใน (inter arc) และโค้งหลัง (back arc) จนเกิดการคดโค้งในระหว่างที่แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนชนกันอย่างช้าๆ และค่อยเป็นค่อยไป และมักเกิดการเอียงด้านข้างควบคู่ไปด้วย

การไหลของหินที่ไม่สมบูรณ์อีกทั้งการโค้งที่มักซับซ้อนทำให้การวิเคราะห์การโค้งมักทำได้ไม่ง่ายดาย ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์หรือพลศาสตร์ ด้วยเหตุนี้หลายครั้งที่นักธรณีวิทยาแต่ละคนอาจวิเคราะห์โครงสร้างการโค้งได้ไม่เหมือนกัน ดังนั้นในพื้นที่ที่มีชั้นหินตะกอนหนาๆ เราจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากคลื่นสั่นสะเทือน (seismic data) เข้ามาช่วยด้วย จึงทำให้การแปลความหมายถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน (seismic reflection)

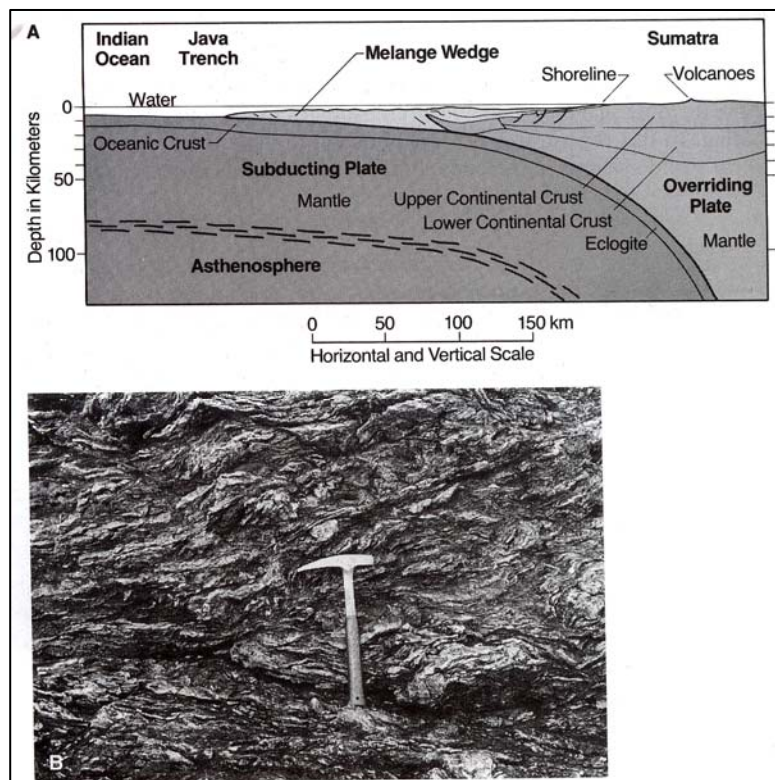
7.1.3 รอยโค้งกับการสำรวจทรัพยากร

มีแรงกระตุ้นหรือแรงจูงใจที่ทำให้อยากรู้จักการโค้ง โดยเฉพาะที่มาอย่างแรกคือประวัติอันยาวนานในการค้นพบปิโตรเลียมในส่วนที่เป็นแหล่งปิดกั้นจากโครงสร้าง (structural trap) ซึ่งเป็น

ผลจากการโค้ง รอยโค้งมักเป็นตัวสะสมน้ำมัน โดยเฉพาะบริเวณยอดรอยโค้ง เพราะน้ำมันเคลื่อนที่
ขึ้นไปตามระนาบชั้นหินที่ลาดเอียง การเคลื่อนที่นี้เข้าไปสู่หินอุ้มน้ำมัน (reservoir rock) ซึ่งมักเป็น



รูป 7.4 (ก) รอยโค้งเล็กๆที่ปรากฏในหินโผล่ บ่งบอกถึงโครงสร้างแนวโค้งขนาดใหญ่ได้ (ข) รอยโค้งที่เห็นอาจเป็นรูปตัว S, M, Z หรือ W ก็ได้โดยประภฏให้เห็นในส่วนต่างๆของรอยโค้ง (ดัดแปลงจาก Hatcher, 1995)



รูป 7.5 (A) True-scale profile view showing the relations of an accretionary prism (mélange wedge) to the fundamental tectonic components of an active continental margin. [From Hamilton (1979). Courtesy of United States Geological Survey.] (B) Folds in foliated mélangé exposed in San Juan Islands, Washington. (Photograph by G.H. Davis) (Dav)

หินที่มีรูพรุน อย่างเช่น หินทรายหรือหินปูน ถ้าหากหินเหล่านี้วางตัวอยู่บนหินที่ปิดทับอยู่ซึ่งเป็น หินเนื้อแน่นที่น้ำไม่ซึมผ่านได้ เช่น หินดินดาน เมื่อแหล่งกักเก็บเกิดการปิด เพื่อกันไม่ให้ น้ำมัน เล็ด ลอดออกไปได้ อาจอยู่ในรูปประทุน (anticline) หรือรูปโดม (dome) ก็ได้ จนกลายเป็นบ่อน้ำมัน (oil pool) ในที่สุด

โครงสร้างรอยโค้งมักทำให้เกิดแหล่งแร่ทางเศรษฐกิจมากมาย อย่างเช่น เป็นโครงสร้างที่ เรียกว่า แหล่งปะการังอานม้า (saddle reef deposits) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีช่องว่างอันเกิดมาจากการ เกิดชั้นหินโค้ง (รูป 7.6) โดยช่องว่างเกิดอยู่ระหว่างชั้นหินหรือแนวของริ้วขนานที่แยกออกจากกัน ขณะเกิดการโค้ง ซึ่งมักพบว่ามีแร่ควอตซ์และแร่โลหะสำคัญๆ มาสะสมตัวในภายหลัง นอกจากนั้น แหล่งแร่ที่เรียกว่า แหล่งล้อมชั้น (strata-bound ore deposits) ซึ่งมักพบร่วมกับหินแปรที่มีการโค้ง ตัว เช่นแหล่งตะกั่ว-สังกะสี-เงิน ในบริเวณเขาโบรคเคน (Broken hill) ในประเทศออสเตรเลีย (รูป 7.7)

ดังนั้นแร่ที่พบในโครงสร้างรอยโค้งจึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับนักธรณีวิทยาอย่างมาก เพราะ สามารถนำเอาแร่ออกมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังนั้นในการสำรวจแร่จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจ โครงสร้างทางธรณีวิทยาที่พบร่วมกับแร่ต่างๆ ให้ถ่องแท้ก่อน

7.1.4 ประทุนและประทุนหงาย (Anticlines and Synclines)

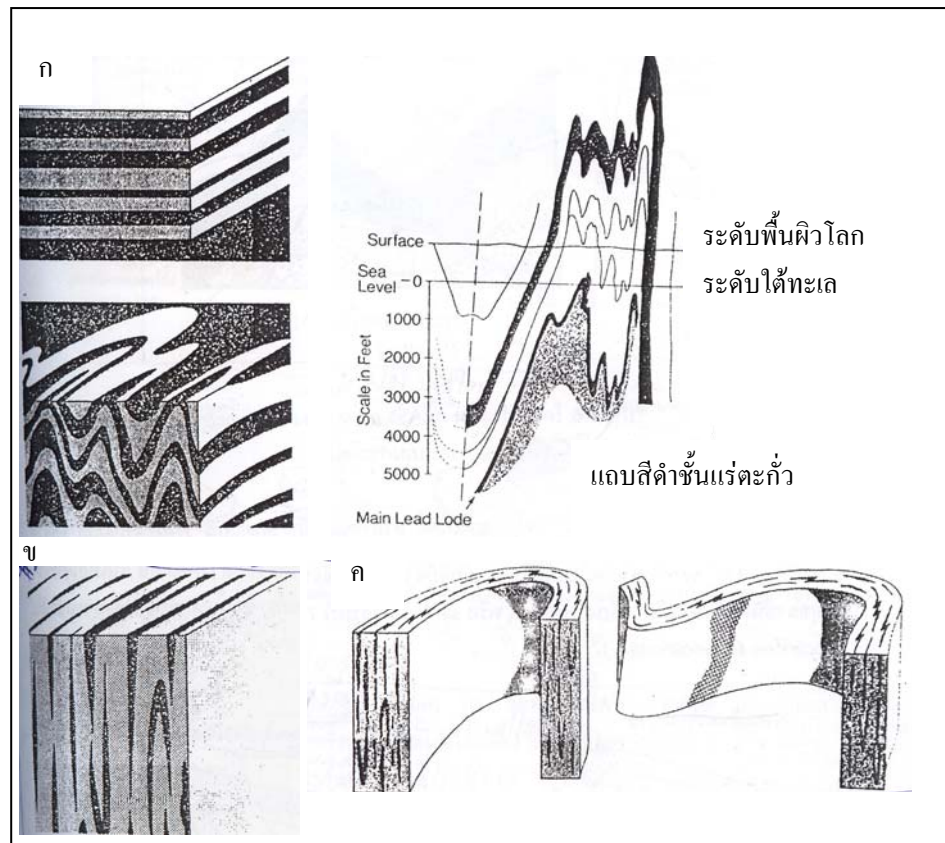
เวลาเรียนเรื่องประทุนและประทุนหงายก็เปรียบเหมือนเรากำลังเรียน ก (โก) ข (ไซ) ค (ควาย) ตอนเป็นเด็กๆชั้นอนุบาล คือพอพูดถึงประทุน (หรือบางท่านใช้คำว่า กระทะคว่ำ) จึง หมายถึง รอยโค้งที่พับนูนขึ้น (convex-upward fold) ส่วนประทุนหงาย (หรือ กระทะหงาย) หมายถึง รอยโค้งที่พับเว้าลง (concave-downward fold) แต่ที่ถูกต้องแล้วคำว่าประทุนต้องใช้ในความหมายว่า นูนขึ้นในทิศทางที่หินอายุอ่อนลงด้วยจึงจะสมบูรณ์ ซึ่งถ้าเป็นรอยโค้งที่พับนูนขึ้น ใดๆ เราเรียกเหมือนประทุน (antiform) ในลักษณะคล้ายกัน ถ้าเป็นกระทะหงายหรือประทุนหงาย หมายถึง รอยโค้งที่พับเว้าลงไปทิศทางที่หินอายุแก่ขึ้น มิเช่นนั้นจะเรียก คล้ายประทุนหงาย (syn-form) ด้วยเหตุนี้ในบางครั้งเราจึงได้โครงสร้างที่เรียก ประทุนหงายแบบประทุน (antiformal syncline) หรือ ประทุนแบบประทุนหงาย (synformal anticline) ได้ (ดูรูป 7.18) หลายคนอาจไม่เข้าใจว่าการเกิดประทุนหงายแบบประทุน หรือ ประทุนแบบประทุนหงาย จะเกิดได้ อย่างไร ซึ่งอาจเป็นไปได้ด้วยซ้ำ แต่ถ้าเราพิจารณาในรูป 7.9 เราอาจจะเข้าใจได้มากขึ้นว่า ใน บางครั้งรอยโค้งแบบพลิกกลับ (overtured fold) ก็อาจทำให้เกิดโครงสร้างดังกล่าวได้

7.2 รูปลักษณะรอยโค้ง

รูปลักษณะรอยโค้ง (fold morphology) มีได้ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่มากทั้งเขา (รูป 7.1 และ 7.2) รอยโค้งอาจเป็นชั้นการโค้งเดี่ยวๆ หรือประกอบด้วย

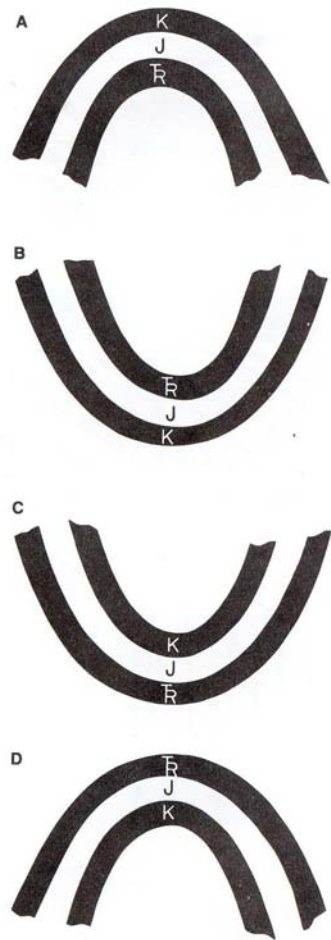


รูป 7.6 Saddle reef deposit in the Bengigo goldfield, Bengigo, Victoria, Australia. Scale in feet. (From Mining Geology by H.E. McKinstry. Published with permission of Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, copyright ©1961) (Dav)



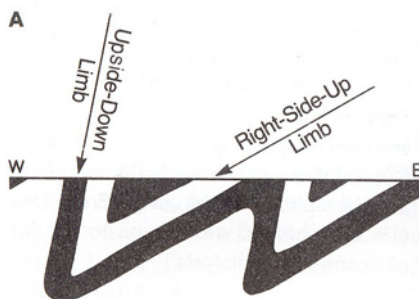
รูป 7.7 (ก) ที่เกิดร่วมกันระหว่างหินแร่ตะกั่วกับชั้นหินตะกอน (บน) ซึ่งต่อมาเกิดการ โโค้ง (ล่าง)
 (ข) หลังจากนั้นจึงเกิดการรีดให้แบน การ โโค้งซ้อนทับ การพังอ็อกทบหนึ่ง
 (ค) ก่อนได้โครงสร้างที่ปรากฏให้เห็นเป็นภาพตัดขวางในปัจจุบัน ดังปรากฏ

(แหล่งที่มา: Figure 7.11 โดย Davis and Reynolds, 1996)



รูป 7.8 Anticlines and synclines, the cornerstones of fold terminology. Oldest layer is Triassic (R); youngest layer is Cretaceous (K); in-between is Jurassic (J).

(A) Anticline. (B) Synformal anticline.
(C) Syncline. (D) Antiformal syncline. (Dav)



รูป 7.9 (A) Schematic rendition of overturned anticline and syncline. (B) The real thing! Overturned anticline and syncline in sedimentary rocks in the Funeral Mountains, Death Valley,

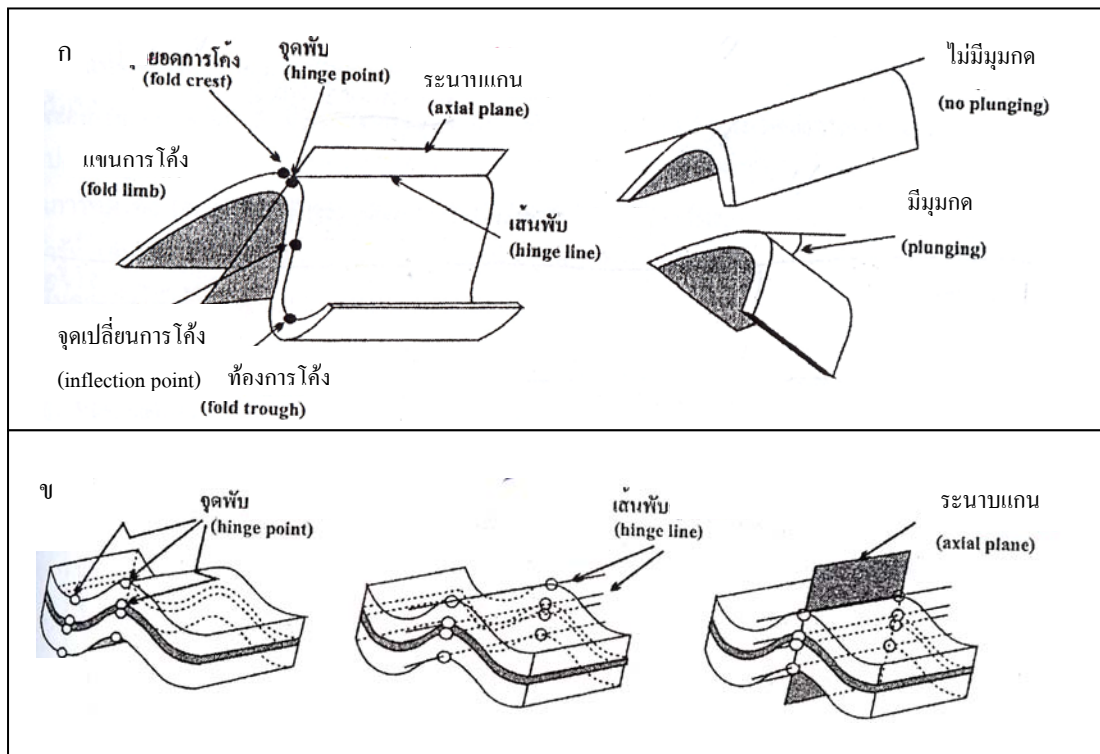
California. Geologist barely visible in core of main anticline is Stan Ballard. (Photograph by S.J.Reynolds) (Dav)

ชั้นหินโค้งย่อย คล้ายลูกคลื่นที่ต่อเนื่องกันก็ได้ รูป 7.10 และ 7.11 แสดงถึงรูปลักษณะและชื่อเรียก ส่วนต่างๆของรอยโค้ง

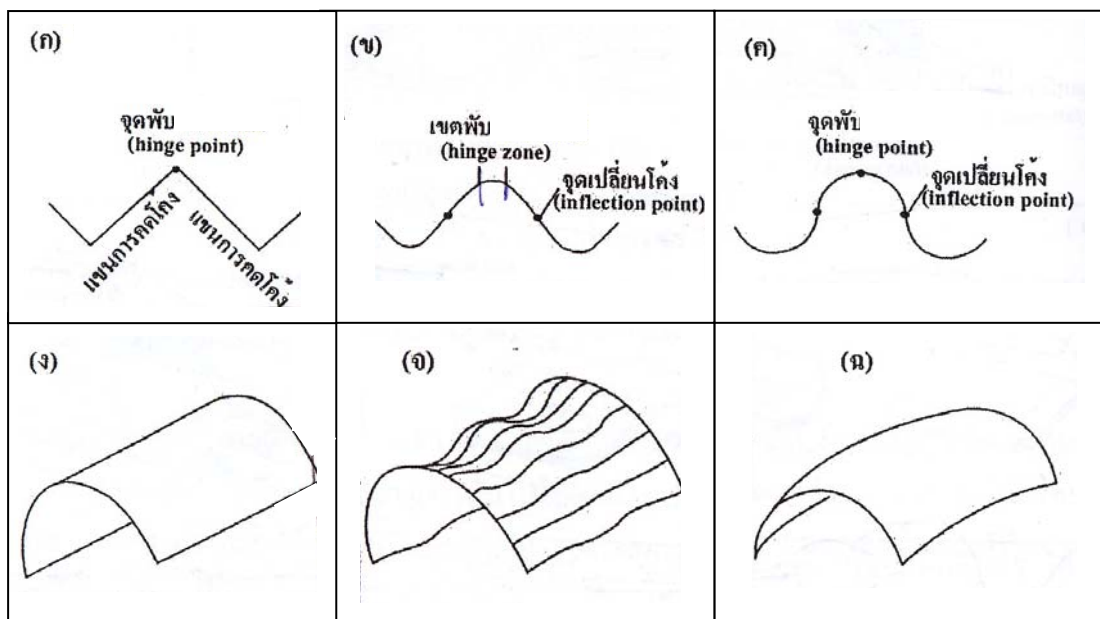
- (1) จุดพับ (hinge point) คือ จุดที่แสดงค่าการโค้งมากที่สุด (maximum curvature) (รูป 7.10) บางครั้งรอยโค้งไม่แสดงจุดพับที่ชัดเจน แต่อาจพบเห็นเป็นแถบหรือเขตได้ ซึ่งเรียกว่า เขตรอยพับ (hinge zone) (รูป 7.11)
- (2) ท้องรอยโค้ง (fold trough) คือ ส่วนที่อยู่ต่ำสุดของชั้นหินโค้งที่ปรากฏให้เห็น (minimum topographic height) (รูป 7.10 ก)
- (3) ยอดรอยโค้ง (fold crest) คือ ส่วนที่อยู่สูงสุดของชั้นหินโค้งที่ปรากฏให้เห็น (maximum topographic height) (รูป 7.10 ก)
- (4) แขนรอยโค้ง (fold limb) คือ ส่วนของชั้นหินที่อยู่ระหว่างสันและท้องรอยโค้ง (รูป 7.10 และ 7.11)
- (5) เส้นพับ (hinge line) คือเส้นที่ลากต่อจุดพับเข้าด้วยกัน (รูป 7.10) เส้นพับเป็นได้ทั้งเส้นตรง เส้นโค้งสวยงามหรือบิดเบี้ยว (รูป 7.11 ง-จ)
- (6) จุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) คือ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแนวโค้งของชั้นหินโค้ง เช่น เปลี่ยนจากโค้งขึ้นเป็นโค้งลง โค้ง (รูป 7.10 และ 7.11) หรือเปลี่ยนจากประทุนไปเป็นประทุนหาง
- (7) ระนาบแกน (axial plane) หรือระนาบแกนการโค้ง คือ ระนาบสมมติที่แบ่งแขนรอยโค้ง ออกเท่าๆ กัน ซึ่งถ้าไม่เป็นระนาบเรขาคณิตเรียกว่า ผิวแกนโค้ง (axial surface) หรือผิวพับโค้ง (hinge surface) โดยทั่วไปในชั้นหินโค้งหลายชั้น ระนาบแกนเกิดจากการเชื่อมต่อเส้นพับ (hinge line) ของแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน ระนาบที่ประกอบด้วย เส้นพับของแต่ละชั้น (รูป 7.10 ข) ผิวแกนโค้งอาจมีรูปร่างต่างๆ (รูป 7.12) ในการวางตัวของระนาบแกนเราวัดค่าแนวระดับ (strike) และมุมเท (dip) ของผิวแกนโค้ง
- (8) ความยาวการโค้ง (wavelength) คือ ระยะทางจากสันการโค้งถึงท้องการโค้งถัดไป
- (9) ความสูงการโค้ง (amplitude) คือ ระยะทางครึ่งหนึ่งที่วัดจากสัน (crest) และท้อง (trough) การโค้ง
- (10) มุมกด (plunge) คือมุมเทของแนวการคดโค้ง (fold axis) (รูป 7.10)

เส้นพับ (hinge line) เป็นเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างจุดพับการโค้ง (hinge point) บนผิวชั้นหินที่เราสนใจ (fold surface) จากรูป 7.10 การที่รอยโค้งมีเส้นพับในแนวเดียวกันไม่ได้หมายความว่า จะมีการวางตัวของรอยโค้งเหมือนกัน (รูป 7.13) ดังนั้นเราจึงบ่งบอกรูปร่างการโค้งไม่ได้ ถ้ารู้การวางตัวของเส้นพับรอบโค้งเพียงอย่างเดียว หรือการรู้ผิวแกนการโค้ง (axial surface) ก็ไม่สามารถ

กำหนดรูปร่างรอยโค้งได้เช่นกัน (รูป 7.13 ง-ค) แต่ถ้ารู้ทั้งเส้นพับ (hinge line) และผิวแกน (axial surface) เราก็สามารถบ่งบอกการวางตัวของรอยโค้งได้ (รูป 7.14)

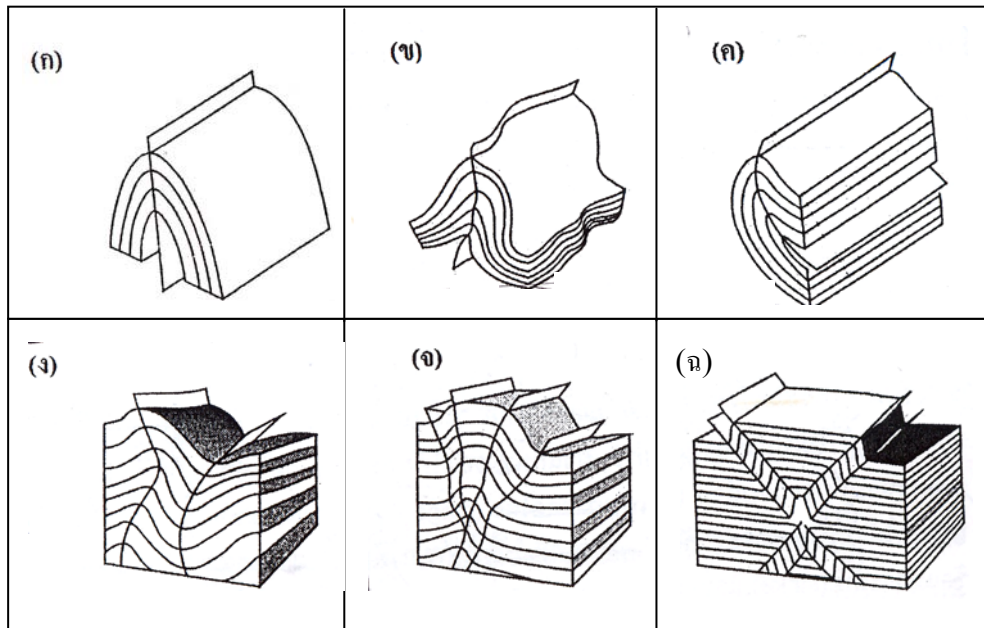


รูป 7.10 รูปร่างลักษณะรอยโค้งและคำนิยามที่เกี่ยวข้อง (ดัดแปลงต่อจาก Powell, 1992) (เพียงตา)

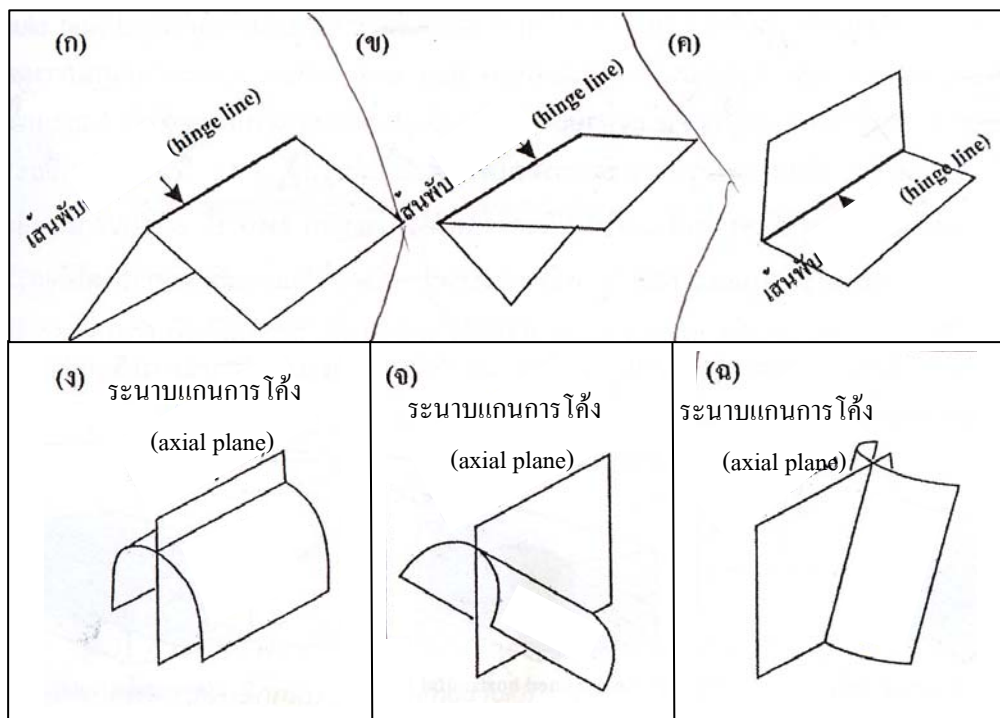


รูป 7.11 ลักษณะจุดพับและเส้นพับของรอยโค้ง (ก) แบบมุมแหลมแสดงจุดพับปรากฏชัดเจน (ข) เขตรอยพับ (hinge zone) (ค) การคดโค้งแบบกลมแสดงจุดพับการคดโค้งชัดเจน (ง) เส้นพับการคดโค้งเป็น

เส้นตรง (straight) (ก) เส้นพับการคดโค้งมีระบบ (systematic curved) และ (ข) เส้นพับการคดโค้งบิดเบี้ยว (irregularly curved) (ดัดแปลงจาก Davis และ Reynolds, 1996) (เพียงตา)



รูป 7.12 (ก) รอยโค้งที่มีระนาบแกนรียบตรง (planer axial plane) (ข-ค) รอยโค้งที่มีแกนแบบโค้งอย่างเป็นระบบ (systematic curriplaner) หรือแบบบิดไปมาไม่เป็นระนาบ (irregularly curriplanar axial plane) (ด) แบบตัดกัน (ดัดแปลงจาก Davis และ Reynolds, 1996 และ Powell, 1992) (เพียงตา)



รูป 7.13 (ก-ค) เส้นพับ (hinge line) ที่มีแนวเดียวกันแต่ลักษณะการโค้งต่างกัน ซึ่งใช้บอกรูปร่างชั้น หินคดโค้งไม่ได้ (ง-ฉ) ระนาบแกนโค้ง (axial plane) ที่มีแนวเดียวกัน แต่ถ้าการวางตัวของรอย โค้งต่างกัน เราใช้บ่งบอกรูปร่างรอยโค้งไม่ได้ (ดัดแปลงจาก Davis และ Reynolds, 1996) (เพียง ตา)

หลายคนมักเข้าใจผิดระหว่างเส้นพับ (hinge line) และแกนการโค้ง (fold axis) ว่าเป็นสิ่งเดียวกัน และใช้แทนกัน แต่โดยทั่วไปคำว่า “เส้นพับ” มักใช้ในความหมายที่ว่า จุดที่มีค่าความโค้งมากที่สุด (fixed point at maximum curvature) เพื่อกำหนดแนวแต่แกน (รูป 7.7) การโค้งเป็นการกำหนดแนว โดยใช้จินตนาการเข้าช่วยจึงเป็นการประมาณเท่านั้น

โดยปกติเส้นพับ (hinge line) มักอยู่บนผิวแกนโค้ง (axial surface) ซึ่งจะง่ายหากพบเส้น พับขนานกับแนวระดับ (strike) ของระนาบการโค้ง ดังรูป 7.14 ก และ ข อย่างไรก็ตามเส้นพับการ โค้ง อาจขนานหรือเปลี่ยนมุมไปได้ ตั้งแต่ $0-90^{\circ}$ กับแนวระดับของระนาบการโค้งได้ (รูป 7.14 ค) ดังนั้น ถ้าเราทราบทิศทางการวางตัวและมุมกุด (trend and plunge) เส้นพับการโค้ง และทราบแนว ระดับมุมเท (dip and strike) ของระนาบแกนการโค้งเราก็จะบอกรูปร่างการคดโค้งได้ ซึ่ง Fleuty (1964) ได้นำมุมเทของระนาบการโค้ง และมุมกุดของเส้นพับการโค้งมาจัดแบ่งรูปร่างการคดโค้ง ดังแสดงในรูป 7.15 วิธีการเรียกชื่อชั้นหินคดโค้งทำได้ดังตัวอย่าง เช่นถ้าพบชั้นหินคดโค้งที่มีผิวการ คดโค้งในระนาบ $N40^{\circ} E, 82^{\circ} NW$ และเส้นพับการคดโค้งมีมุม plunge 5° ในแนว $N38^{\circ} E$ พลี้อด ค่าของผิวการคดโค้งและเส้นพับการคดโค้งลงในไดอะแกรมจะได้ชื่อว่า subhorizontal upright folds หรืออีกตัวอย่างหนึ่งเช่น ถ้าพบเส้นพับการคดโค้ง มีแนว $20^{\circ} N65^{\circ} E$ และ axial surface มี ระนาบ $N30^{\circ} W, 20^{\circ} NE$ พลี้อดลงในไดอะแกรมเรียกว่า gently plunging, gently inclined, reclined fold

รูปร่างรอยโค้ง (รูป 7.16) หากแขนทั้งสองข้างยาวเท่ากันและมีมุมเทที่ไปในทิศทางตรงกัน ข้ามกันมีค่าเท่ากันเรียกว่า ชั้นหินโค้งแบบสมมาตร (symmetric fold) แต่ถ้าแขนการโค้งยาวไม่ เท่ากันและมุมเทไม่เท่ากันเรียกว่า ชั้นหินโค้งอสมมาตร หรือ ไม่สมมาตร (asymmetric fold) หากชั้น หินโค้งแบบอสมมาตรมีมุมเทของแขนทั้งสองข้างไม่เท่ากัน แขนข้างหนึ่งจะมีการหงายขึ้น เรียกว่า ชั้นหินโค้งแบบพลิกกลับ (overturn fold) (รูป 7.16)

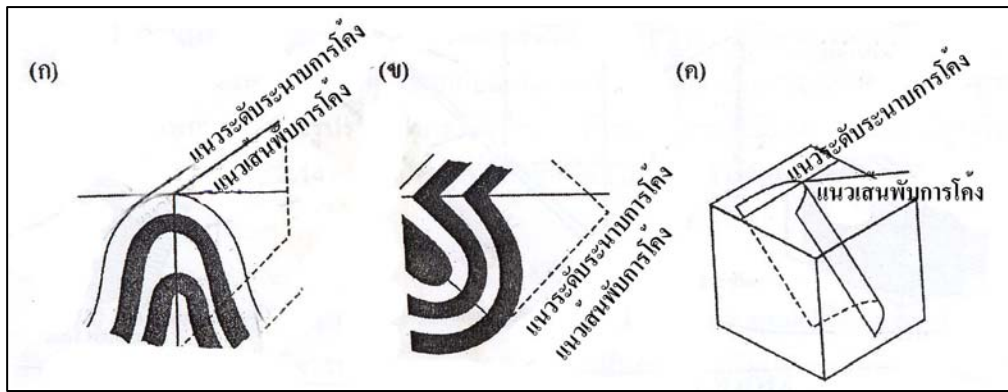
7.3 การจำแนกและการเรียกชื่อรอยโค้ง

ในการจำแนกประเภทรอยโค้งและการเรียกชื่อรอยโค้ง มีที่นิยามกันอยู่หลายวิธีด้วยกัน และแต่ละวิธีอาศัยเกณฑ์การจำแนกแตกต่างกัน วิธีจำแนกที่สำคัญ ๆ ได้แก่

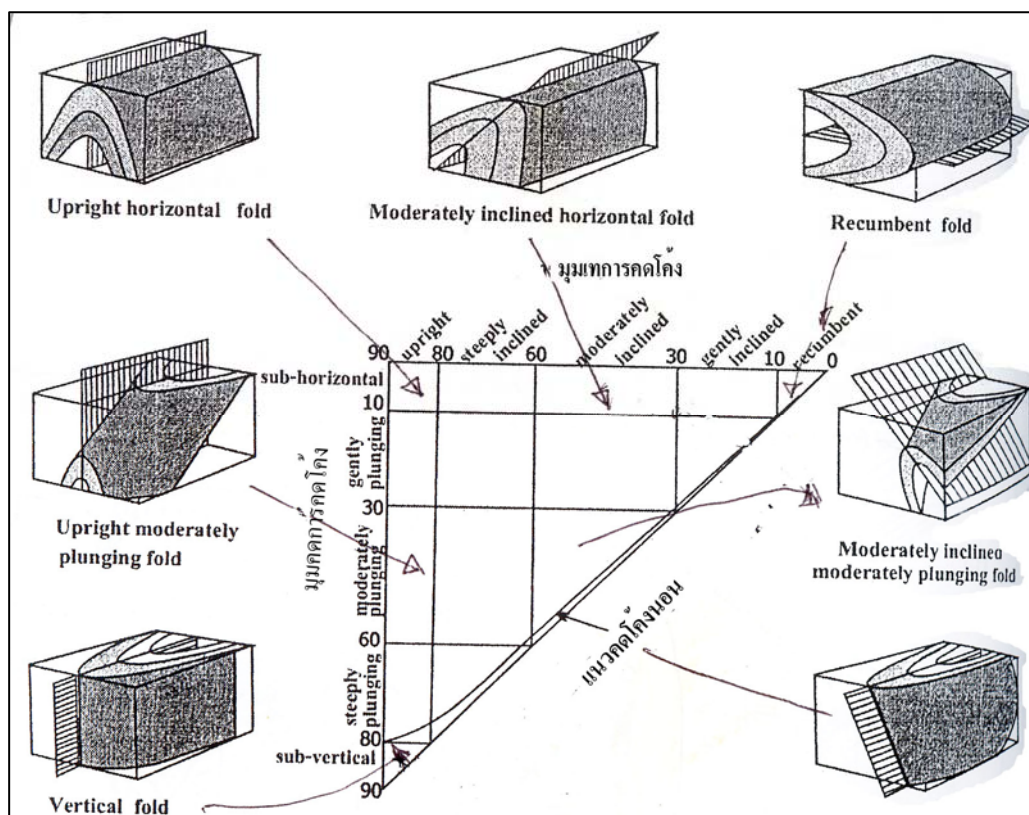
- (1) ภาพตัดขวาง (Normal profile view) การจำแนกประเภทรอยโค้งแบบนี้จำเป็นต้อง

พิจารณาจากภาพตัดขวางโดยให้ตั้งฉากกับแกนรอยโค้ง(fold axis)ของชั้นหิน การเรียกชื่อรอยโค้งจึงเรียกตามลักษณะเด่นของรูปร่างรอยโค้งที่พบ ตัวอย่างรูป 7.14 แสดงถึงรอยโค้งและชื่อที่นิยมเรียก

(2) การอัดแน่นรอยโค้ง(Fold tightness) ในการจำแนกแบบนี้เป็นการใช้มุมระหว่างแขนรอยโค้งเป็นเกณฑ์ ซึ่งทำให้แบ่งรอยโค้งออกเป็น 5 ชนิด (ดังรูป 7.18 และ 7.19) โดยที่ถ้ามุมระหว่างแขนอยู่ในช่วง 180° - 120° เรียกว่า รอยโค้งน้อย (gentle fold) ถ้ามุมระหว่างแขนอยู่ในช่วง 120° - 70° เรียกว่ารอยโค้งเปิด(open fold) มุมระหว่างแขนเท่ากับ 70° - 30° เรียกว่ารอยโค้งปิด (close fold) มุมระหว่างแขนน้อยคือตั้งแต่ 30° - 0° เรียกว่ารอยโค้งอัดแน่น(tight fold) และถ้ามุมระหว่างแขนเป็น 0° เรียกว่ารอยโค้งเอียงเท่า (isoclinal fold)

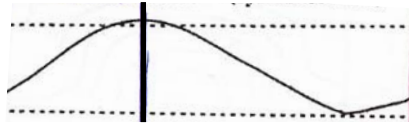


รูป 7.14 (ก) และ (ข) เส้นพับ(hinge line) ที่ขนานกับระนาบแกนโค้ง (axial plane) (ค) รอยโค้งที่เส้นพับการโค้งอยู่คนละแนวกับระนาบการโค้ง (Davis และ Reynolds, 1996) (เพียงตา)

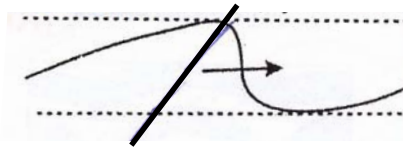


รูป 7.15 แผนภาพของ Fleuty(1964) ใช้บ่งบอกรูปร่างชั้นหินโค้งโดยอาศัยมุมเท(dip) ของระนาบการโค้ง (axial surface or axial plane) และ มุมกค (plunge) เส้นพับ (hinge line) (Twiss และ Moores, 1992) (เพียงตา)

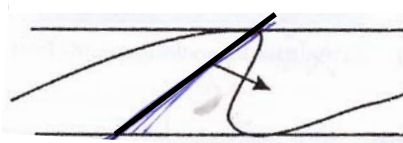
ก. แบบสมมาตร (symmetric fold)



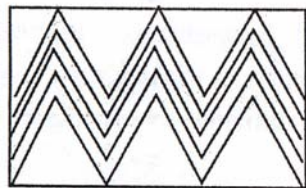
ข. แบบอสมมาตร (asymmetric fold)



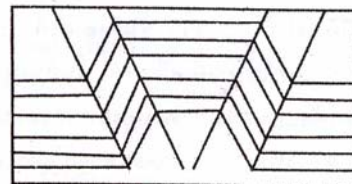
ค. แบบพลิกกลับ (overturned fold)



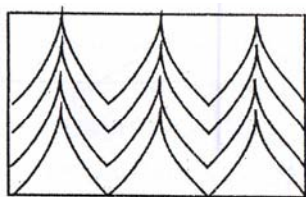
รูป 7.16 รูปร่างรอยโค้งแบบต่างๆ (ก) แบบสมมาตร(symmetric fold) (ข) แบบอสมมาตร (asymmetric fold) และ (ค) แบบพลิกกลับ(overturned fold) (เพ็ญตา)



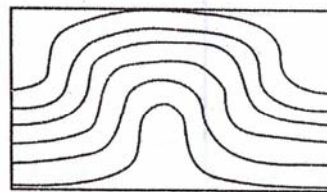
การโค้งแบบตัววี



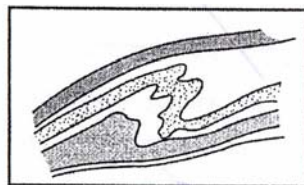
การโค้งแบบ kink bands



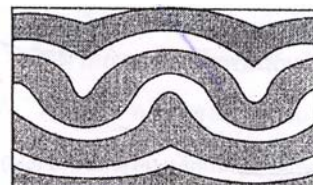
การโค้งแบบเขี้ยว cusped folds



การโค้งแบบกล่อ่ง

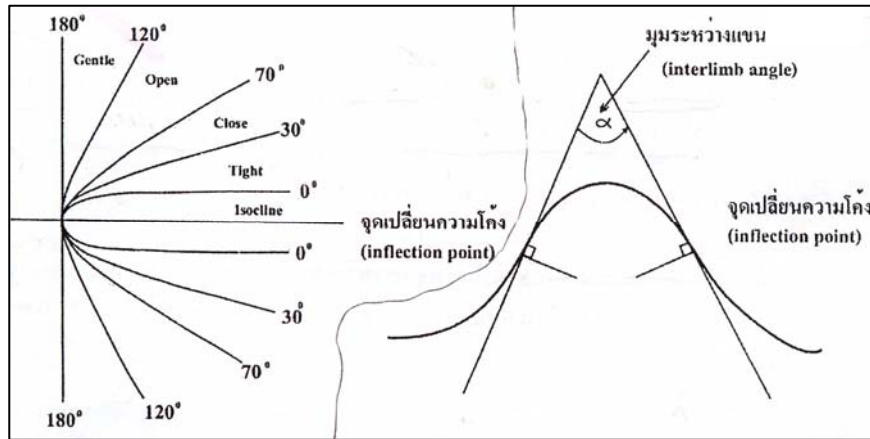


การโค้งแบบไม่ไปตามกัน (disharmonic fold)

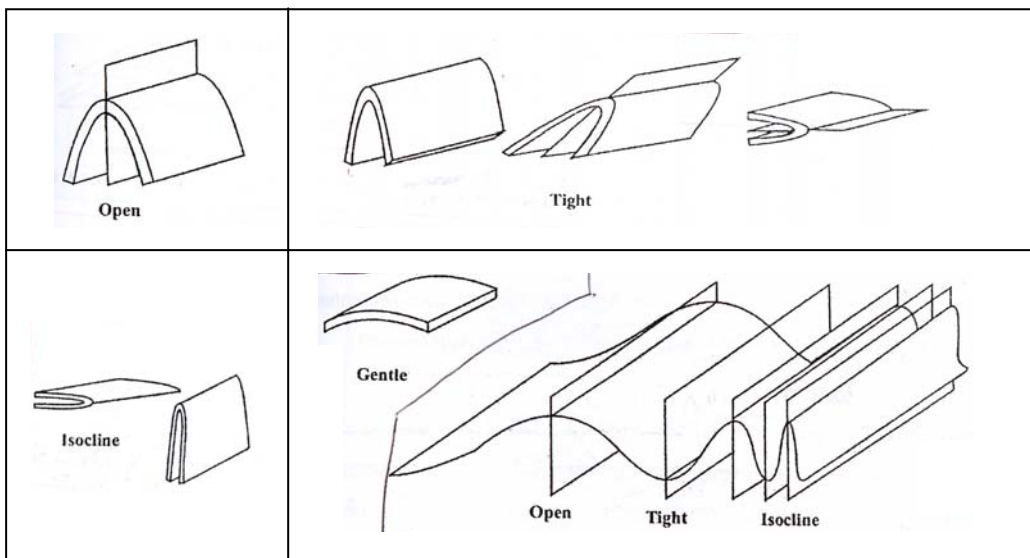


การโค้งแบบขนาน parallel-concentric folds

รูป 7.17 การพิจารณาเรียกชื่อชั้นหินคดโค้งตามลักษณะปรากฏจากภาพตัดขวางที่ตัดตั้งฉากกับชั้นหินคดโค้ง ชื่อได้จากลักษณะที่รูปร่างการคดโค้งมีความคล้ายคลึงกับสิ่งของที่นำมาตั้งชื่อ (เพียงตา)



รูป 7.18 (ก) การแบ่งชั้นหินคดโค้ง โดยใช้มุมระหว่างแขนทั้งสองข้างเพื่อเรียกชื่อลักษณะของชั้นหินคดโค้ง (ข) มุมที่เกิดจากแขนทั้งสองข้าง (Park, 1997)



รูป 7.19 การพิจารณา tightness จากแขนทั้งสองข้าง (ภาพปรับปรุงต่อจาก Hatcher, 1995 และ Malcolm Reeves, University of Saskatchewan)

(3) สมมาตรรอยโค้ง (Fold symmetry) ในการพิจารณาความสมมาตรของชั้นหินโค้ง เราอาจแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือแบบสมมาตร (symmetry) และอสมมาตร (asymmetry) โดยพิจารณาจากเส้นกลาง (median trace) หากพบว่าเส้นกลางแบ่งแขนชั้นหินโค้งได้เท่ากัน ให้ถือรอยโค้งนั้นเป็นสมมาตร ถ้าไม่เท่ากันถือเป็นรอยโค้งอสมมาตร

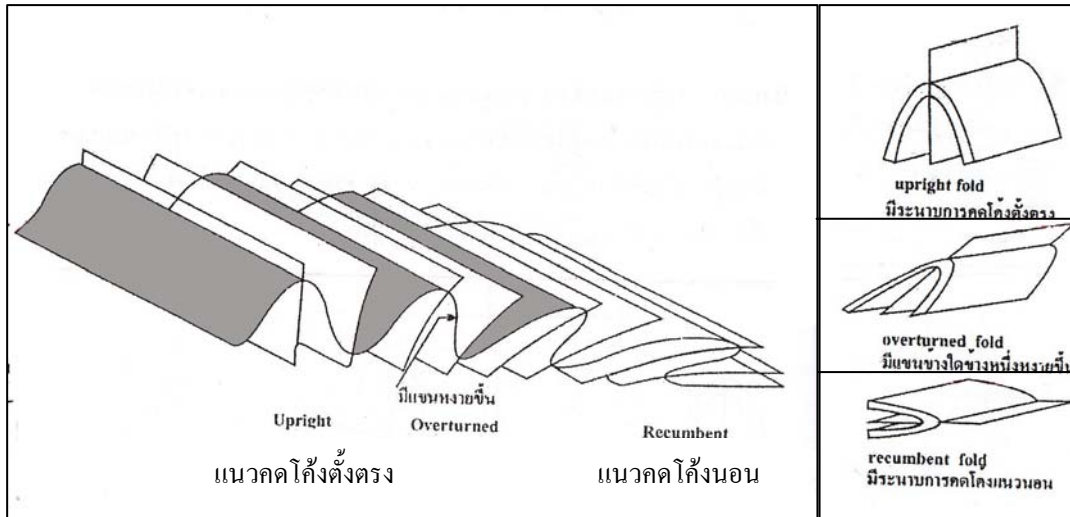
(4) ระนาบแกนการโค้ง (Axial plane) เราสามารถใช้ระนาบแกนการโค้งแบ่งได้ 3 ประเภท ประกอบด้วย (1) แนวคดโค้งตั้งตรง (upright fold) เป็นแนวคดโค้งที่มีระนาบการคดโค้งอยู่ในแนวตั้ง (2) แนวคดโค้ง (inclined fold) เป็นแนวคดโค้งที่มีระนาบการโค้งไม่เป็นแนวตั้ง อีกทั้งแนวคดโค้งพลิกกลับ (overturned fold) ถือเป็นแนวคดโค้งเอียง ที่มีลักษณะของแขนเอียงเข้าไปในทางเดียวกัน (3) แนวคดโค้งนอน (recumbent fold) เป็นแนวคดโค้งที่มีระนาบการคดโค้งในแนวนอน และแขนวางตัวในแนวเดียวกัน (รูป 7.20)

(5) การวางเส้นพับ (Hinge line) และผิวการโค้ง (axial surface) เสนอโดย Fleuty (1964) ชื่อของชั้นหินคดโค้งเรียกได้โดยอาศัยรูปร่างการวางตัวของเส้นพับการคดโค้ง (hinge line) และผิวการคดโค้ง (axial surface) ไดอะแกรมของ Fleuty ดังแสดงมาแล้วในรูป 7.18 ซึ่งมีวิธีการเรียกชื่อของรูปร่างการคดโค้งดังที่ยกตัวอย่างมาแล้ว ควรนำรูปที่ 7.18 มาพิจารณาอีกครั้ง

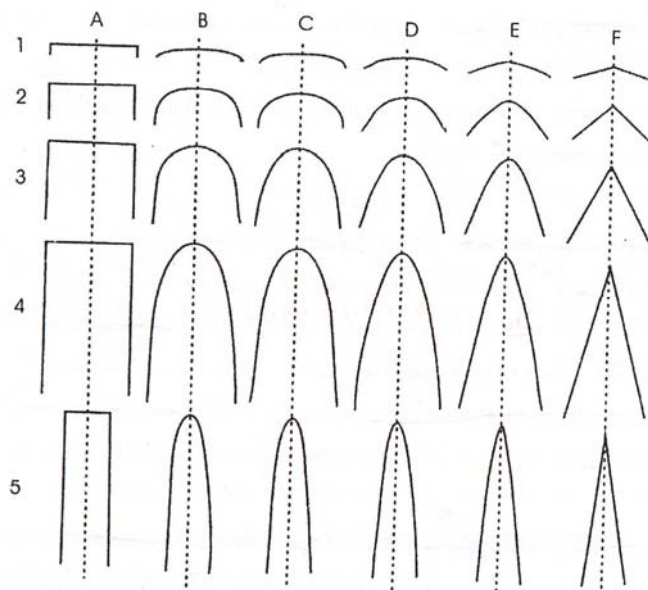
(6) รูปร่างการคดโค้งโดยวิธีของ Hudleston (1973) ซึ่งพิจารณาลักษณะปรากฏของแนวคดโค้ง ซึ่งได้แก่ การโค้งงอ ความสมมาตร อัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างของสันและท้องการคดโค้ง Hudleston (1973) ได้เสนอวิธีจำแนกชั้นหินคดโค้งออกเป็น 30 แบบ โดยอาศัยลักษณะปรากฏจาก ชั้นหินคดโค้งที่พบในหินโพล (รูป 7.21) วิธีแบ่งของเขา ช่วยทำให้เราทราบว่าหินบางชนิดเกิดเฉพาะชั้นหินคดโค้งบางรูปร่างเท่านั้น และส่วนใหญ่เป็นการคดโค้งแบบสมมาตร

(7) ความหนาของชั้นหินคดโค้ง ชั้นหินคดโค้งพบว่ามีทั้งแบบชั้นหินที่คดโค้งมีความหนาที่คงที่และไม่คงที่ แสดงว่าเกิดไหลขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะร่วมอยู่ในระหว่างชั้นของหิน ถ้าชั้นหินคดโค้งแสดงความหนาของหินไม่เปลี่ยนแปลงเรียกว่า parallel fold และถ้ามีลักษณะทรงกระบอกกลมเรียกว่า concentric fold หรือ parallel concentric fold และเรียกชั้นหินคดโค้งที่มีความหนาของหินที่จุดพับการคดโค้ง (hinge point) มากกว่าบริเวณแขนว่า similar folds ดังรูป 7.22 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ parallel fold โดยที่มีความหนาของชั้นหินคง เมื่อวัดตั้งฉากกับชั้นหิน และ similar fold โดยที่มีความหนาของคงที่เมื่อวัดขนานกับแกนการคดโค้ง

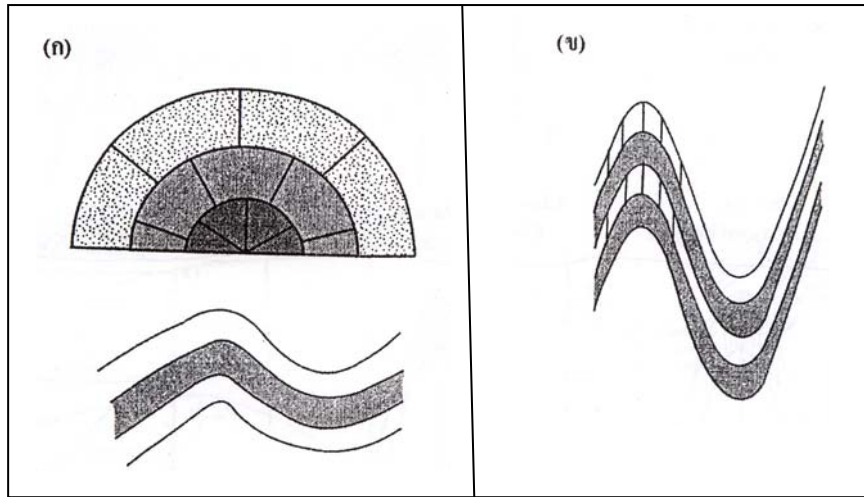
(8) จุดต่อมุมเท่า (dip isogon ซึ่งเสนอโดย Ramsay (1967)) dip isogon เป็นเส้นที่ลากต่อจุด



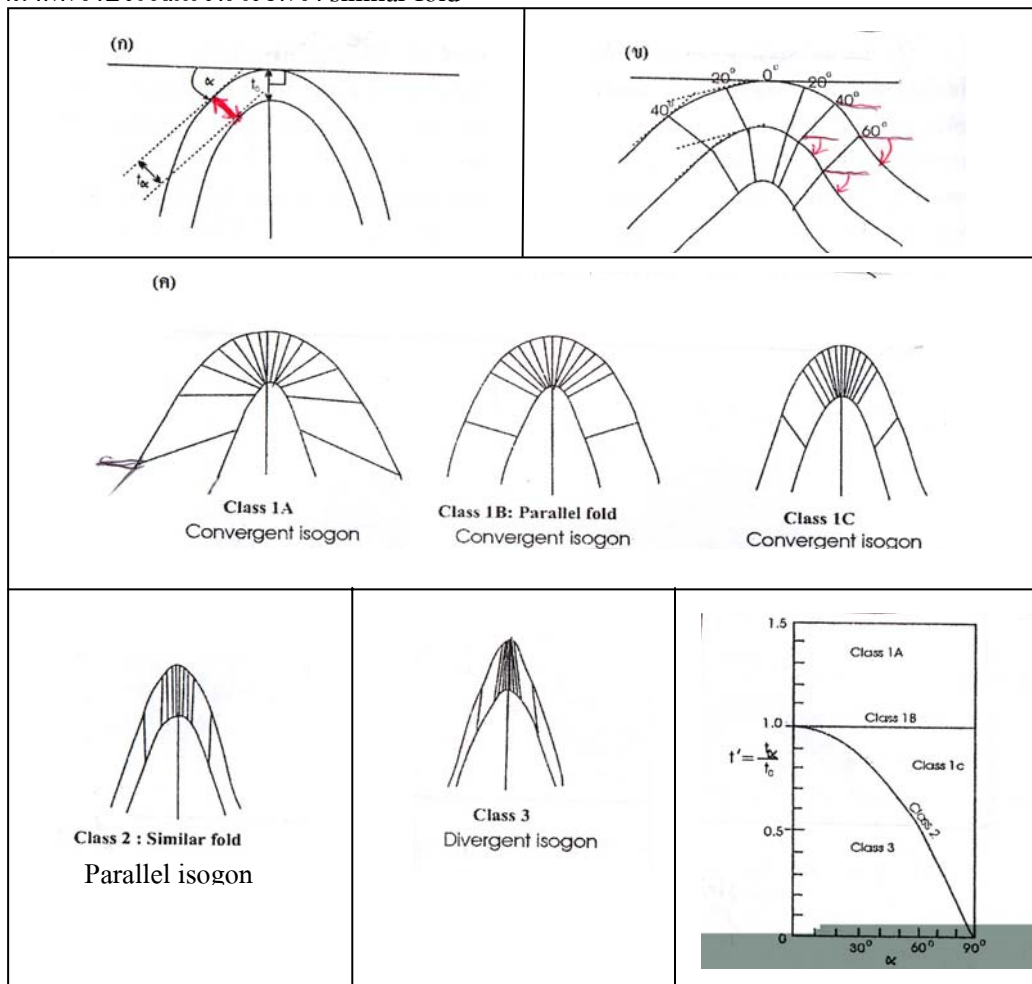
รูป 7.20 ลักษณะของการเกิดแบบ upright, inclined แบบ overturned, และ recumbent folds (ภาพปรับปรุงต่อจาก Hatcher, 1995 และ Malcolm Reeves, University of Saskatchewan)



รูป 7.21 การจำแนกชั้นหินคดโค้งโดยอาศัยรูปร่างที่พบของ 30 ประเภทโดย Hudleston (1973) (แหล่งที่มา: Figure 14.22 โดย Hatcher, 1995 อ้างถึง Hudleston, 1973)



รูป 7.22 การพิจารณาความหนาของชั้นหินคดโค้ง ถ้าความหนาไม่เปลี่ยนเรียกว่าแนวคดโค้งขนานกัน (concentric fold หรือ parallel fold แต่ถ้าความหนาเปลี่ยนโดยที่ที่จุดพับการคดโค้งหนามากกว่าบริเวณแขน เรียกว่า similar fold



รูป 7.23 (ก) และ (ข) การสร้าง dip isogon line เส้นของ isogon ลากต่อจุดที่มีมุมระหว่างชั้นหินแทรกสลับเท่ากัน (ค) การจำแนกชั้นหินคดโค้งโดยอาศัยรูปร่างความหนา และความโค้งของชั้นหินคดโค้งโดยวิธีของ Ramsay (แหล่งที่มา: Figure 13.11 โดย Park, 1997 และ Figure 7.16 โดย Ramsay and Huber, 1987)

ในชั้นหินระหว่างผิวบนและผิวล่างที่มีมุมเทเท่ากัน ดังรูป 7.23 หรือ dip isogon เทียบได้ง่ายๆ โดยพิจารณาที่ความโค้งของชั้นหินคดโค้งตามรูปร่างของการโค้งดังแสดงในรูป 7.23 โดยแบ่งเป็น 3 ประเภท ประกอบด้วย

ชั้น 1(Class 1) วงโค้งด้านในมีค่ามากกว่าวงโค้งด้านนอกและแบ่งย่อยออกเป็น 3 ชนิด โดยพิจารณาจากความหนาของชั้นหินโค้ง

โดยเรียก class 1A เมื่อความหนาตรงจุดพับ(hinge point) น้อยกว่าที่แขน

1B : เมื่อแขนหนาเท่ากัน(parallel fold) และ

1C: เมื่อความหนาตรงจุดพับมากกว่าที่แขน

ชั้น 2 (Class 2): วงโค้งด้านนอกและด้านในเท่ากัน (similar fold)

ชั้น 3 (Class 3) วงโค้งด้านนอกโค้งกว่าวงโค้งด้านใน

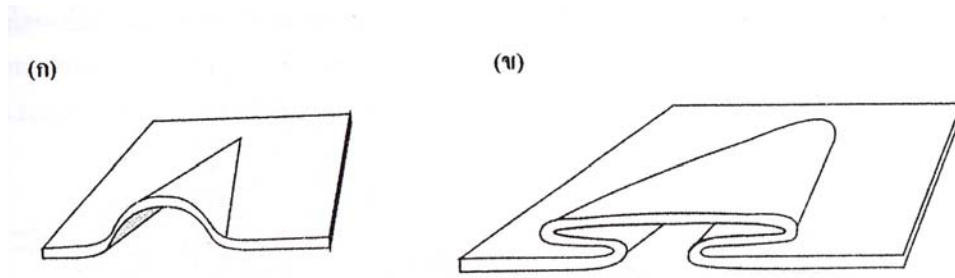
(9) โดยแกนการโค้ง(fold axis) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ประกอบด้วย (1) แนวคดโค้งรูปทรงกระบอก (cylindrical fold) และ (2) ชั้นหินคดโค้งที่ไม่เป็นทรงกระบอก(non-cylindrical fold) แกนการคดโค้งจะมีเฉพาะชั้นหินคดโค้งรูปทรงกระบอก แบ่งย่อยเป็น parallel fold โดยที่มีความหนาของชั้นหินคง เมื่อวัดตั้งฉากกับชั้นหิน และ similar fold โดยที่มีความหนาของคดโค้งที่เมื่อวัดขนานกับแกนการคดโค้ง (รูป 7.22) ส่วนชั้นหินคดโค้งที่ไม่เป็นทรงกระบอก จะแบ่งย่อยเป็น conical fold และ sheath fold (รูป 7.24)

(10) โดยค่าความยืดหยุ่นและความยืดหยุ่น(ductility contrast และ mean ductility) ซึ่งเสนอโดย Donath and Parker (1964) ซึ่งพวกเราได้เสนอการแบ่งแนวคดโค้งออกเป็น 2 ประเภทคือ flexural folds และ passive folds ดังรูป 7.25 โดยที่ flexural folds แยกเป็น flexural slip และ flexural flow ถ้าพบการไถลระหว่างชั้นหินและแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะแบบเปราะ (brittle deformation) ถ้ามีค่าความเป็นพลาสติกสูง (high ductility) จะได้ passive folds ถ้าไม่อยู่ในกลุ่มเรียก quasi-flexural

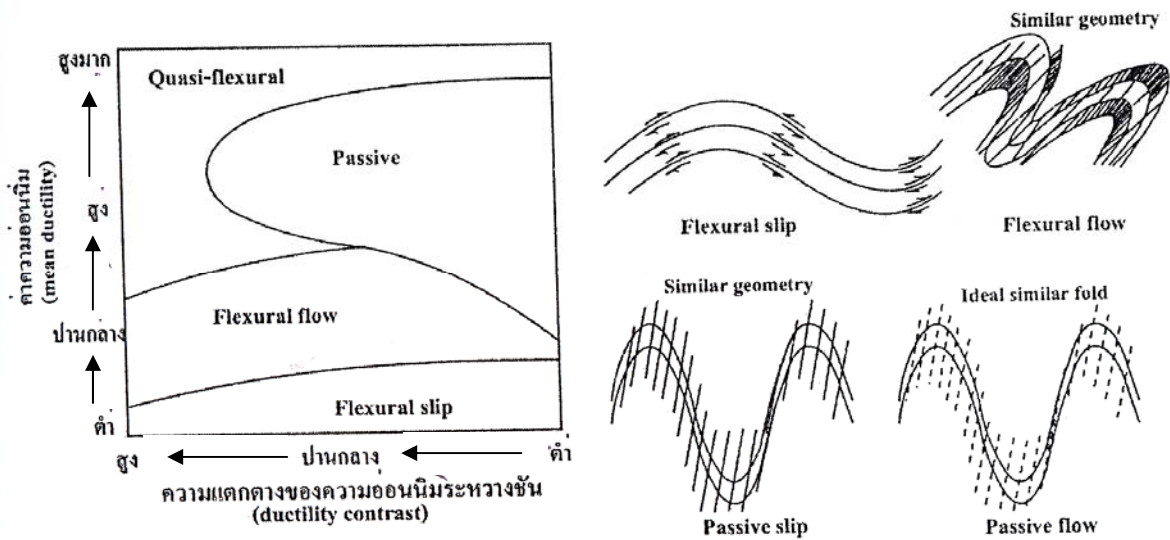
7.4 การวิเคราะห์รูปร่างแนวคดโค้ง

แนวคดโค้งในชั้นหินที่มีรูปร่างทรงกระบอก (cylindrical fold) หากกำหนดขั้ว(pole) ของชั้นหิน(bed) ที่คดโค้ง แต่ปรับให้อยู่ในวงใหญ่ในโครงข่าย ดังรูป 7.26 โดยที่ตั้งฉากกับเส้นพับการคดโค้ง (hinge line) แต่ในธรรมชาติชั้นหินคดโค้งที่มีรูปร่างทรงกระบอกพบน้อยมากหากโพล (poles) ของชั้นหินพบอยู่ในแนวของ great circle ได้บ้างก็จะเรียกว่า near-cylindrical folds (รูป 7.27) หรือถ้าไม่อยู่ในแนวเดียวกันเลยเรียกว่า non cylindrical folds (รูป 7.27)

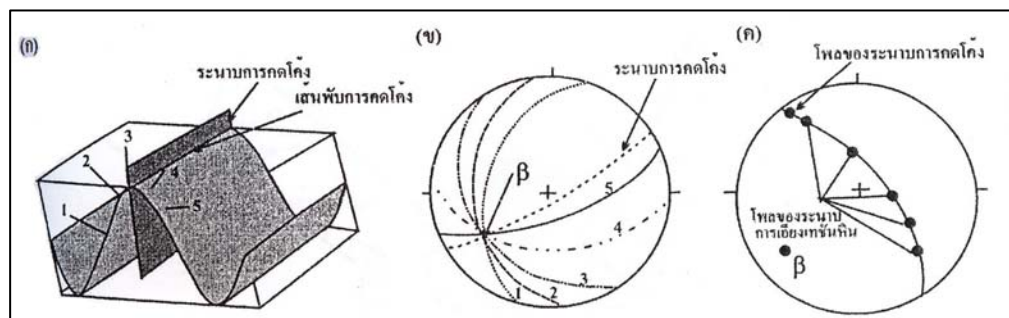
บางครั้งพบว่าแนวคดโค้งใหญ่มาก ไม่สามารถพบสมบูรณ์ได้ในหินโผล่เดี่ยว จึงเป็นการยากที่จะวัดผิวแกนคดโค้ง (axial surface) ได้ เราต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายเขาช่วยจึงหาผิวแกนคดโค้งได้ โดยที่แนวการวางตัว (trend) ต้องผ่านเส้นพับ(hinge line) ของชั้นหินซึ่งทำได้โดยทำให้แนวและมุมกุดของเส้นพับต้องอยู่ในแนวของวงใหญ่ (great circle)ของผิวการคดโค้งดังรูป 7.28 การหาทรานด์และพัจันท์ ของแกนการคดโค้ง (fold axis) หาได้โดยการที่เราทราบแขนของ



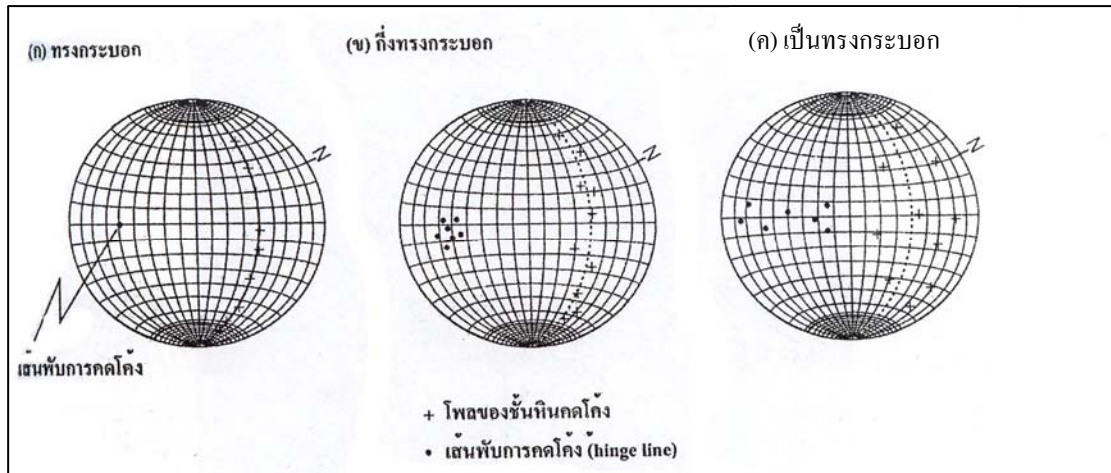
รูป 7.24 ลักษณะของชั้นหินคดโค้งที่ไม่เป็นทรงกระบอก (non-cylindrical folds) ไม่มีแกนการคดโค้ง (ก) conical fold (ข) sheath fold



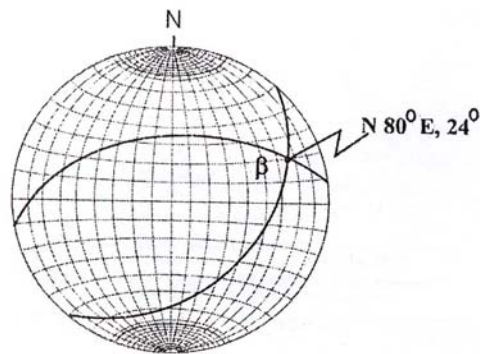
รูป 7.25 การจำแนกชนิดของรอยโค้งโดย Donate และ Parker (Hatcher, 1995)



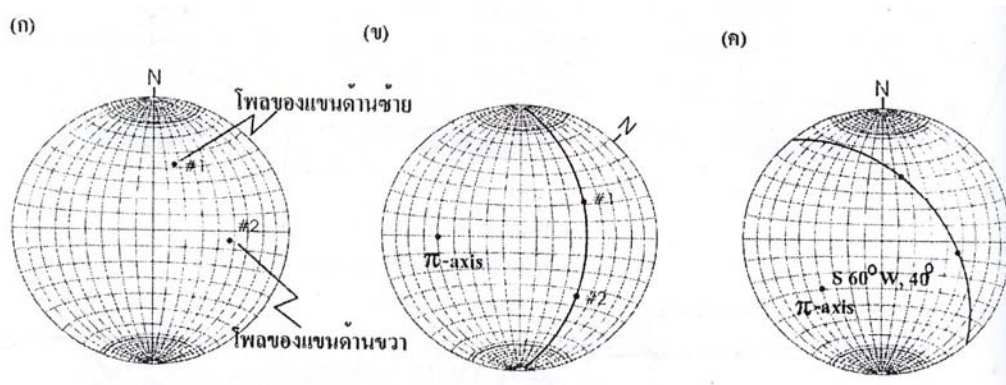
รูป 7.26 (ก) ระนาบคดโค้งรูปทรงกระบอก (ข) ภาพสเตริโอเน็ตของระนาบแกนการคดโค้งที่วัดตามจุดต่างๆ (ค) ภาพสเตริโอเน็ตของโพล (poles) ของระนาบแกนการคดโค้งที่วัดตามจุดต่างๆ (แหล่งที่มา: Figure 11.6 โดย Twiss and Moores, 1992)



รูป 7.27 ลักษณะโครงตาข่ายที่แสดงขั้ว (poles) ของชั้นหิน (bed) คดโค้ง (ก) รูปทรงกระบอก สมบูรณ์ (ข) เกือบหรือถึงสมบูรณ์ (ค) ไม่ใช่ทรงกระบอก (แหล่งที่มา: Figure 7.28 โดย Davis and Reynolds, 1996)



รูป 7.28 β -diagram analysis ซึ่งจะได้ค่าประมาณของ fold axis และ β ที่เป็นจุดตัดของแกนของชั้นหินคดโค้ง (Davis and Reynolds, 1996)



รูป 7.29 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพายู (π -diagram analysis) (ก) แสดงขั้ว (poles) ของแกนชั้นหินคดโค้ง (ข) การปรับขั้วให้อยู่ในวงใหญ่ (ค) ได้การวางตัว (trend) และมุมกคของแกนพายู (Davis and Reynolds, 1996)

ชั้นหินคดโค้งทั้ง 2 ข้าง จุดตัดกันของ great circle ของแกนทั้งสองข้างคือ เทอร์น และพจน์ที่ ของ แกนการคดโค้งเรียกการวิเคราะห์ในรูป 7.28 ว่า β -diagram analysis ซึ่งจะได้ค่าประมาณของเส้น พับการคดโค้ง หรืออีกวิธีคือ π -diagram analysis โดยการพล็อตโพล (poles) ของแกนสองข้างของ ชั้นหินคดโค้ง ลาก great circle ผ่านโพลทั้งสอง จากนั้นหาโพลของ great circle ที่ลากผ่านโพล ทั้งสองตำแหน่ง โพลใหม่ที่ได้คือ แกนการคดโค้ง นั่นก็คือค่าประมาณของเส้นพับการคดโค้งดัง รูป 7.29

7.5 กลไกการเกิดแนวคดโค้ง (Folding mechanisms) และการหดสั้น

การวิเคราะห์เชิงไคนEMATIKS หรือการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นหินคดโค้ง ช่วยทำให้เราเข้าใจถึงกลไกของการเกิดชั้นหินคดโค้งในระดับลึก กลไกการเกิดชั้นหินคดโค้งแบ่งตาม ลักษณะปรากฏของวงรีความเครียดได้ 6 กระบวนการ ประกอบด้วย

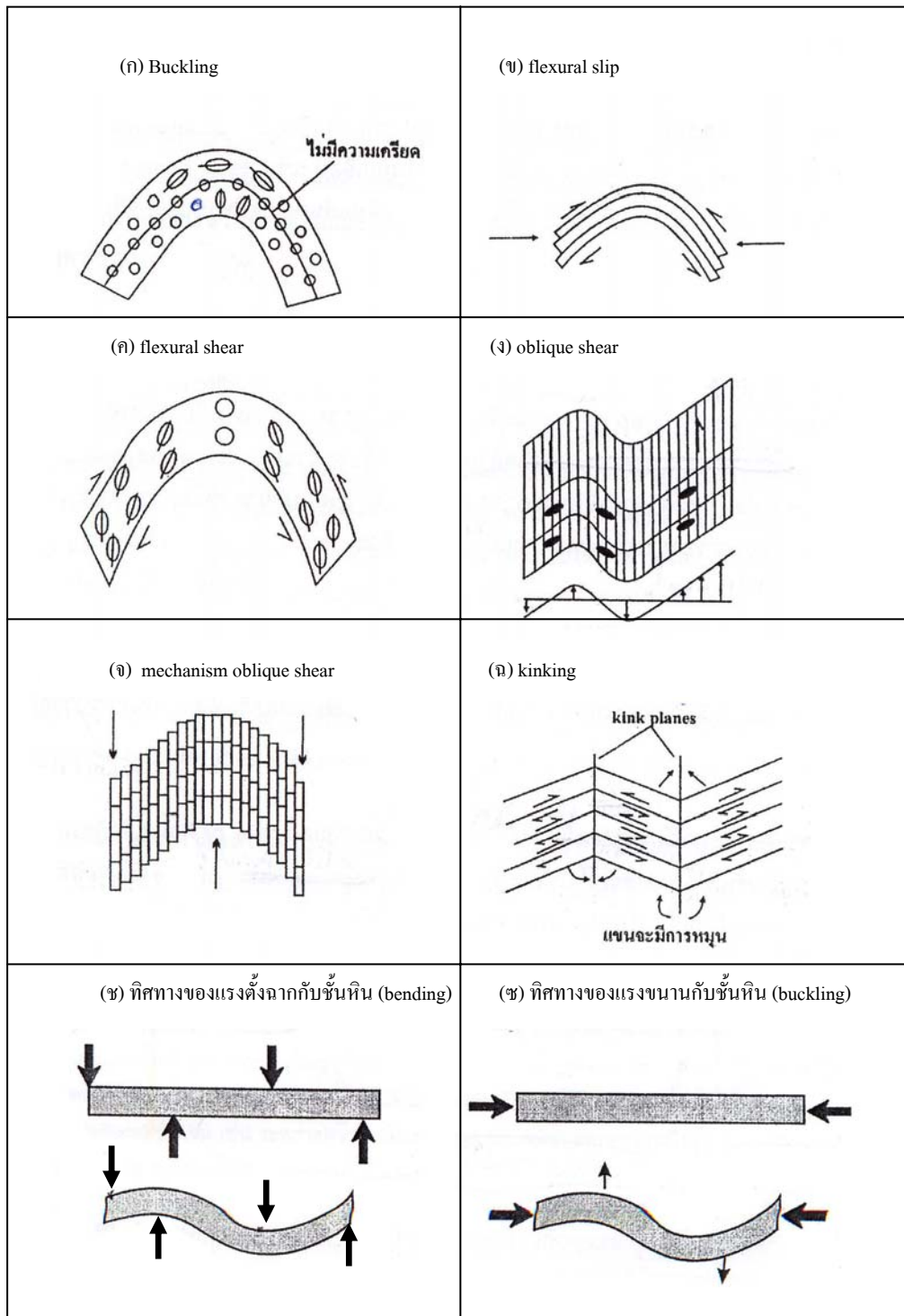
7.5.1 กลไก

(1) การโก่งจากแรงอัด(buckling) กลไกนี้เป็นผลมาจากแรงอัดเข้ามาที่ด้านข้างตาม ความยาวของชั้นหิน (force parallel layers) ทำให้เกิดการโค้งงอ แต่ชั้นหินยังคงรักษาความหนาไว้ ได้คงที่ จึงเชื่อกันว่าน่าจะทำให้เกิดแนวคดโค้งแบบขนาน (parallel หรือ concentric folds) เมื่อเรา พิจารณาแกนแนวคดโค้ง วงรีความเครียดจึงแสดงการยืด (extension) ทางด้านนอกและอัด (compression) ทางด้านใน โดยที่ตรงกลางไม่แสดงความเครียด (รูป 7.30) การพิจารณาจะ พิจารณาจะพิจารณาเป็นชั้นหิน (single layer)

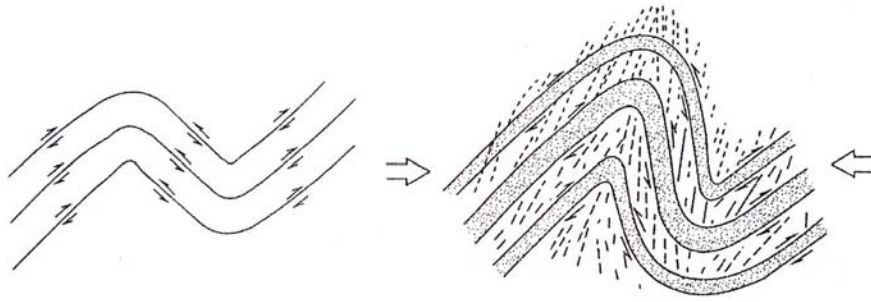
(2) การแอ่นตัวจากแรงอัด(bending) ลักษณะดังกล่าวเกิดจากแรงที่ตัดตั้งฉากกับชั้น หิน(force across layers) ดังรูป 7.30 ทำให้หินเกิดการแอ่นตัวลงหรือโก่งตัวขึ้น ชั้นหินคดโค้งที่พบ จากกระบวนการนี้ จึงมีรูปร่างแบบ gentle fold หรือ open fold เช่น พบเป็นรูปโดม เนื่องจากมีหิน อักนีแทรกซอน, การยกตัวของหินฐาน(basement uplift), การเกิดรอยเลื่อน เช่น fault bend fold หรือ fault propagate fold หรือการที่น้ำหนักกดทับหายไป ทำให้แผ่นดินแอ่นตัวลงเป็นรูปแอ่ง หรือคดตัวขึ้นเป็นรูปโดม

(3) การเลื่อนไถลขณะคดโค้ง (flexural slip) กลไกนี้เป็นกระบวนการที่เกิดจากการไถล ระหว่างชั้นหินแทรกสลับกันระหว่างชั้นหินอ่อนกับชั้นหินแข็ง ขณะเกิดการคดโค้ง (buckling) โดยที่วงรีความเครียดที่เกิดการชั้นหินคดโค้งโดยกระบวนการทางอุดมคตินี้ คือ รูปวงกลม เพราะ ไม่มีการยืดหรือหดในชั้นหินเลย ลักษณะการเลื่อนแบบนี้คล้ายกับการเคลื่อนที่ของแผ่นกระดาษ ในสมุดเมื่อเราม้วนให้เกิดรูปร่างการคดโค้ง กระดาษจะเลื่อนระหว่างแผ่นโดยไม่สูญเสียปริมาตร หรือความหนา เราวัดค่าความเครียดเฉือนจากมุมของการเลื่อนระหว่างแผ่นแสดงในรูป 7.31

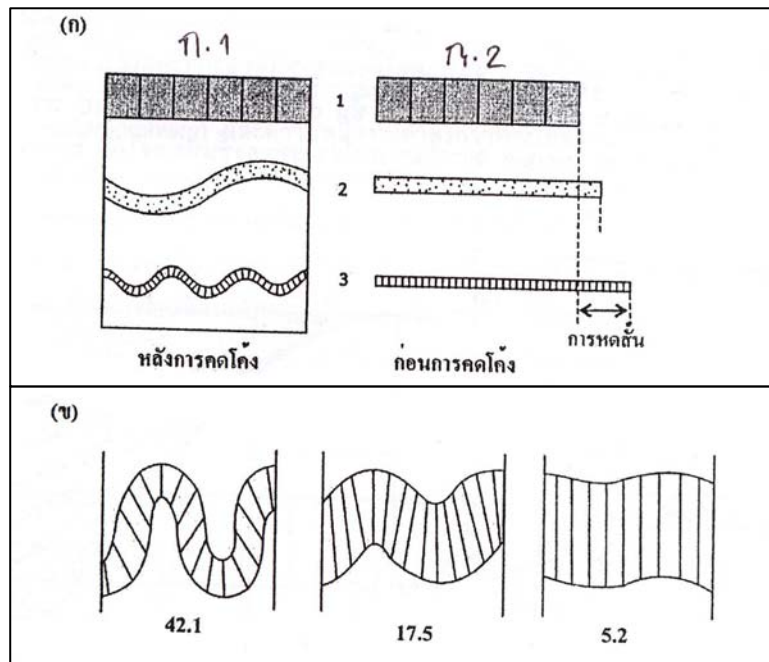
(4) การเฉือนขณะคดโค้ง (flexural shear) กลไกนี้เกิดร่วมกับกระบวนการคดโค้ง



รูป 7.30 กระบวนการคดโค้ง (ก) แบบโค้ง (buckling) (ข) flexural slip (ค) flexural shear (ง) oblique shear (จ) ภาพจำลองของแผ่นการัดของการเกิด oblique shear (ฉ) kinking (แหล่งที่มา: Figure 10.1 โดย Park, 1997) (ช) การคดโค้งแบบโค้งงอ (buckling) (ซ) การคดโค้งแบบแอ่น (bending) (แหล่งที่มา: Figure 15.8 and 15.9 โดย Hatcher, 1995)



รูป 7.31 ลักษณะของ flexural slip fold ลูกศรแสดงการเคลื่อนไถลระหว่างชั้น ชั้นหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของความหนา (แหล่งที่มา: Figure 15-10 โดย Hatcher, 1995)



รูป 7.32 (ก) การคดโค้งเมื่อถูกกดอัดของชั้นหินที่ความหนาต่างกัน ก.1 แสดงหลังการคด โค้ง และ ก.2 ก่อนถูกทำให้คดโค้ง (ข) การคดโค้งที่เกิดจากการกดอัดที่เท่ากัน ฉ ความหนืด ต่างกัน ตัวเลขแสดงสัดส่วนของค่าความแตกต่างของความหนืด (แหล่งที่มา: Figure 10.7 โดย Park, 1997)

(buckling) โดยเรากำหนดให้แรงเฉือนขนานไปในระหว่างแนวการคดโค้ง ทำให้เกิดวงรี ความเครียด ส่วนปลายแนวคดโค้ง ดังรูป 7.30 ตรงจุดยอดของชั้นหินคดโค้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของวงรีความเครียดเลย นั่นคือรูปวงกลม ดังรูป 7.30

(5) การเฉือนเชิงมุมขณะคดโค้ง(oblique-shear or flow) ถ้าทิศทางของแรงเฉือนไม่ได้ขนานกับชั้นหินที่แทรกสลับกันทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเฉือนปกติ (simple shear) ดังแสดงในรูป 7.30 ของแผ่นการ์ดที่เลื่อนไม่เท่ากันระหว่างแผ่น จะได้ลักษณะการคดโค้งแบบ similar fold

(6) การพับงอ (kinking) ลักษณะนี้เกิดจากระบวนการที่ทำให้หินเกิดการคดโค้งแบบตัววี (chevron fold หรือ kink fold) ที่มีแกนเป็นเส้นตรง มีมุมพับที่จุดยอดชัดเจน รูปทรงเรขาคณิตของชั้นหินคดโค้งเกิดจากการหมุนของแกนของชั้นหินคดโค้ง ดังแสดงรูป 7.30 แกนมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบการเฉือนขณะคดโค้ง เกิดขึ้นในขณะที่หินเป็นแบบอ่อนนุ่มแต่มีความแข็งแรงมีสูง (competent) จึงมักพบกับหินเชิร์ตเป็นส่วนใหญ่ กระบวนการอาจจะถือว่าเป็นกระบวนการประเภทเดียวกับ กระบวนการเลื่อนไถลขณะคดโค้ง (flexural slip)

การคำนวณหาความเครียดเฉือนของการพับงอ ทำได้โดยใช้สมการ

$$\tan \varphi = 2 \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \text{เมื่อ } \delta \text{ คือค่ามุมของชั้นหินการคดโค้ง}$$

ถ้าแนวคดโค้งไม่แสดงจุดพับ (hinge point) แต่จะเป็นรูปโค้ง (curved hinge) ค่าความเครียดเฉือนประมาณได้จากสมการ

$$\tan \varphi = \frac{\pi}{180^\circ} \delta = 0.0175\delta$$

กลไกที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดรูปทรงเรขาคณิตของชั้นหินคดโค้งแตกต่างกันออกไป โดยที่เรามักพบว่าการเกิด buckling และ flexural shear ให้ parallel folds ส่วน oblique shear ให้ similar folds และ kinking ให้ chevron fold โดยที่ chevron folds มีแกนเป็นเส้นตรง และมุมที่จุดพับ ประมาณ 60 หากมีหินแทรกสลับระหว่างหินอ่อนและหินแข็ง หินที่แข็งจะมีความหนาที่คงที่ หินที่อ่อนจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนา

สำหรับกลไกการเกิดชั้นหินคดโค้ง มีนักธรณีวิทยาบางกลุ่มแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การแอ่นตัว (bending) และการโก่งงอ (buckling) (รูป 7.30) ซึ่งการโก่งตัวแบ่งออกได้เป็น flexural slip, flexural flow และ kinking อยู่กลุ่มเดียวกันกับการโก่งตัว(buckling) หรือ Donath และ Parker (1964) แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ flexural folding และ passive folding โดยที่ flexural folding เป็นการเกิดชั้นหินคดโค้งที่เกิดจากหินตอบสนองต่อแรงกระทำจากภายนอก ชั้นหินมีการเกิด flexural slip หรือ/และ flexural flow โดยที่กระบวนการ flexural slip และ/หรือ flexural flow ทำให้หินที่ทนต่อการคดอัดไม่ได้เกิดการตอบสนองต่อแรงแบบการไหล(flow) หรือเลื่อนไถล (slip)

ส่วน passive folding เป็นกระบวนการเกิดจากผลของหินที่อ่อนนุ่มมีการบิดโค้งด้วยตนเองมากกว่าเกิดจากแรงภายนอก (จึงเรียกว่า passive) นั่นคือหินจะเกิดภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง มีสภาพอ่อนนุ่ม บางครั้งสามารถคิดได้ว่าเป็นการเกิดการคดโค้งแบบหลอกๆ คือ ไม่มีผลจากความแรงภายนอกมากกระทำ การพบ passive fold หากพบแนวแตกเรียบ (cleavage) รวมอยู่ด้วย แนวของแนวแตกเรียบจะตัดขนานหรือตั้งขนานกับผิวแกนการคดโค้ง (axial surface)

ลักษณะการคดโค้งแบบโค้งงอ (buckle fold)s คำว่า “buckling” ใช้ในกระบวนการที่ทำให้เกิดการคดโค้งโดยมีรูปตัว S มีการค่อยๆ เปลี่ยนไปของโค้ง โดยแรงอัดที่ขนานไปกับชั้นของหิน ชั้นหินที่เกิดการคดโค้งแบบนี้คงรูปร่างการคดโค้งแบบ Class 1 แบ่งย่อยเป็นแบบ Class 1A, 1B (parallel folds) และ 1C พบจากการทดลองและจากในสนาม แสดงให้เห็นว่า การคดโค้งแบบโค้งงอ (buckle fold) มักเกิดกับชั้นหินแทรกสลับที่มีชั้นอ่อนและแข็ง แทรกสลับกันมีค่าขึ้นอยู่กับความหนืด (viscosity) ระหว่างชั้นหิน

7.5.2 การคำนวณหาการหดสั้น

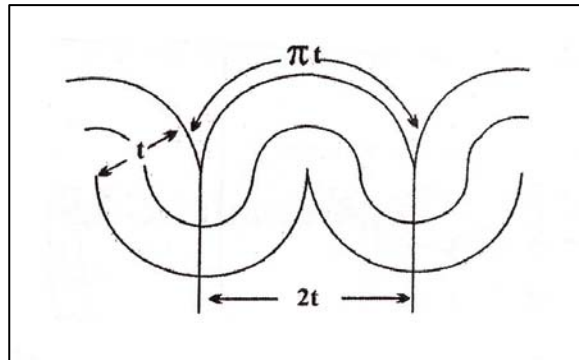
เปรียบเทียบความยาวคลื่น (wave length) ของชั้นหินคดโค้งที่ต่างๆ กัน ทำให้เราสามารถหาปริมาณการหดสั้นที่เกิดขึ้นได้ รูป 7.32 ก เป็นตัวอย่างของหิน 3 ชั้น ที่มีความยาวต่างกันก่อนเกิดการคดโค้ง ชั้น 1 หนามาก จึงไม่เกิดการโค้งงอ ชั้น 2 เกิดความเครียดแบบเนื้อเดียว (homogeneous strain) ก่อนเกิดการคดโค้ง ชั้น 3 ไม่แสดงความเครียดแต่เกิดเฉพาะการคดโค้ง รูป 7.39 ข แสดงถึงสภาพการคดโค้ง ณ ที่ความหนืดต่างๆ กัน คือถ้ายิ่งหนืดมากก็ยิ่งเกิดการโค้งงอได้มาก

วิธีการหาการหดสั้น (shortening) อย่างง่ายคือการวัดความยาวของแนวคดโค้ง ดังรูป 7.33 ซึ่งเราได้

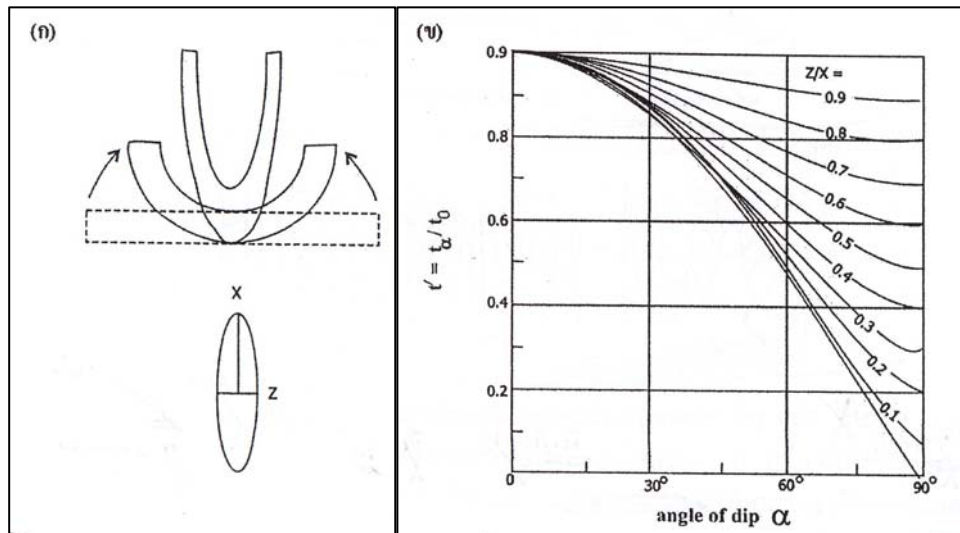
$$e = (\pi t - 2t) / 2t$$

$$e = (\pi - 2) / 2 = 0.36 = 36\%$$

หรือจะใช้วิธีของ Ramsay (1967) ดังรูป 7.33 โดยการวัดมุม α และ t', t_0 การหา t', t_0 และ α



รูป 7.33 การคำนวณการหดสั้น(shortening) ของ concentric fold เสนอโดย Ramsay (1967)
(แหล่งที่มา: Figure 10.8 โดย Park, 1997)



รูป 7.33 (ก) ลักษณะการซ้อนทับ เมื่อเกิดการคดโค้งแบบ parallel fold ก่อนการบีบอัดแบบ pure shear (flattening) และวงรีความเครียดที่เกิดจากการคดโค้ง มีการบีบอัดแบบ pure shear (ข) กราฟความสัมพันธ์ของ t' และ α สำหรับหา z/x ในการคดโค้งแบบโค้ง (buckle fold) (แหล่งที่มา: Figure 10.9 โดย Park, 1997)

คำอธิบายได้รูป

รูป 7.38 (ก) การคดโค้งมีความแตกต่างของความหนืดในแต่ละชั้น และความหนาของแต่ละชั้น (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวลูกคลื่นของการคดโค้ง และความหนา (ค) การเกิดการคดโค้งแบบโก่ง (buckle folds) มีลูกคลื่นเล็กๆ ซ้อนอยู่ในลูกคลื่นขนาดใหญ่ๆ (ง) การเกิดการคดโค้งจากชั้นหินที่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน (จ) การเกิดการคดโค้งของหินสองชนิดที่ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงมากๆ เกิดการคดโค้งที่แตกต่างเด่นชัดตรงรอยระหว่างชั้น ได้ลักษณะ cusped folds โดยที่ ส่วนแหลมที่ชี้ไปในชั้นที่มีความหนืดสูง ให้โครงสร้างแบบ mullion (แหล่งที่มา: Figure 10.5 โดย Park, 1997)

รูป 7.42 (ก) ลักษณะแนวแตกเรียบแบบหักเห (cleavage refraction) เกิดได้ทั้งการกระจายออกจากจุดกลาง (convergence) และบางชั้นเกิดการกระจายจากด้านนอกเข้าหาจุดกลาง (divergence) เนื่องจากชั้นหินที่อ่อนแทรกกับหินที่แข็ง (ข) ภาพขยายแสดงการเปลี่ยนทิศทางของแนวแตกเรียบของชั้นหินอ่อนแทรกกับหินแข็ง (แหล่งที่มา: Figure 10.10 โดย Park, 1997)

รูป 7.43 ลักษณะการเกิด simple shear หรือ pure shear เข้ามาหลังจากเกิดการคดโค้ง ทำให้ได้วงรีความเครียดที่แตกต่างกัน และจะให้ลักษณะของ similar folds (แหล่งที่มา: Figure 10.11 โดย Park, 1997)

รูป 7.53 ลักษณะของ dextral และ sinistral kink folds (แหล่งที่มา: Figure 7.74 โดย Davis and Reynolds, 1995)

รูป 7.54 รูปลักษณะของ kink band อยู่ระหว่างระนาบการคดโค้ง (axial surface) ตรงบริเวณ kink band จะถูกเปลี่ยนลักษณะ บริเวณ kink band จะเกิดการหมุน (แหล่งที่มา: Figure 12.19 โดย Twiss and Moores, 1992)

รูป 7.55 การขยายของ kink band จากแนว AB (ก) kink band ขยายโดยการหมุนและเปลี่ยนมุมไปเรื่อยๆ เฉพาะ kink band เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนลักษณะ (ข) การขยายของ kink band โดยมีมุมคงที่ (แหล่งที่มา: Figure 12.20 โดย Twiss and Moores, 1992)

รูป 7.56 (ก) การเกิด kink band แบบ simple shear โดยที่ความกว้างของ kink band จะคงที่

มุมระหว่างแขนของ kink fold จะไม่เท่ากัน (ข) การเกิด kink band จากการหมุนของชั้นหินบาง ความยาวคงที่ (L) ขณะที่ชั้นหินบางจะหมุนเข้ามาตามแนว kink band ความกว้างของ kink band จะขยายขึ้น จนกระทั่งชั้นหินบางหมุนตั้งฉากกับระนาบการคดโค้งที่ ทำให้ความหนาของชั้นหินบางลดลงเพราะถูกอัดแน่นขึ้น และมีมุมระหว่างแขนทั้งสองข้างกับระนาบการคดโค้งเท่ากัน การเกิด kink band ถือว่าสิ้นสุดไม่เกิดอีกต่อไป (แหล่งที่มา: Figure 12.21 โดย Twiss and Moores, 1992)

รูป 7.57 รูปซ้ายมือแบบจำลองการคดโค้งที่พบของชั้นหินหลายๆ ชั้นแทรกสลับ โดยมีค่า friction ระหว่างผิวน้อยเมื่อเทียบกับรูปขวามือของแบบจำลองการคดโค้งที่พบของชั้นหินหลายๆ ชั้นแทรกสลับ โดยมีค่า friction ระหว่างผิวมากเมื่อเทียบกับ (แหล่งที่มา: Figure 7.77 โดย Davis and Reynolds, 1995)

รูป 7.58 แบบจำลองของ Weiss (1966) ซึ่งทำให้เกิดการหดสั้นในปริมาณต่างๆ กัน อันเป็นที่มาของ kink folds (แหล่งที่มา: Figure 7.78 โดย Davis and Reynolds, 1995)

รูป 7.59 รูปแบบของการเกิด Kink bands ของผลึก (ก) เกิดจากน้ำหนักกดขนานกับทิศทางของ planar anisotropy (ข) kink bands ตัดกับ conjugate กับน้ำหนักกด ที่ขนานกับ planar anisotropy (ค) Symmetrical kink ในผลึกที่มี slip plane ทำมุมกับ shear stress (แหล่งที่มา: Figure 7-8 โดย Spencer, 1988)

รูป 7.60 ลักษณะของ refolded folds แสดงลักษณะของการซ้อนทับกัน(แหล่งที่มา: Figure 22-15 โดย Ramsay and Huber, 1987)