

บทที่ 6 ความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน (Discontinuities in Rockmass)

ความไม่ต่อเนื่องในมวลหินหมายถึงโครงสร้างที่เป็นชั้นบาง(lamina) การวางชั้น (bedding) รอยเลื่อน (fault) รอยแยก (joint) ตลอดจนโครงสร้างย่อย ๆ ในเนื้อหิน เช่น ริวขนาน (foliation) ในหินแปร ความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้จะมีผลต่อพฤติกรรมของหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ หินโผล่ เช่น บริเวณผนังของอุโมงค์ บริเวณลาดเขา ลาดเขาที่ถูกตัดเปิดออก และฐานราก เมื่อมวลหิน เกิดการวิรูป จะมีการเคลื่อนตัวตามระนาบความไม่ต่อเนื่องหรือเกิดการเคลื่อนหมุนของบล็อกหิน มากกว่าการวิบัติภายในเนื้อหิน ดังนั้นการวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องจะมีความสำคัญต่อการเชื่อม ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของมวลหินที่เราได้จากห้องปฏิบัติการกับสมบัติและพฤติกรรมของมวล หินในพื้นที่

6.1 การศึกษาคุณลักษณะความไม่ต่อเนื่อง

ในการศึกษาเราจะทำการสำรวจความไม่ต่อเนื่อง ให้ได้คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่อง ทางวิศวกรรม เพื่อจะได้จัดทำโมเดลของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน เนื่องจากเราไม่สามารถศึกษาความ ไม่ต่อเนื่องของมวลหินได้ทุกตัว ผู้ที่ริเริ่มทำการศึกษาความไม่ต่อเนื่อง ได้แก่ Robertson (1970) และ Piteau (1970) ซึ่งเราสามารถศึกษาความไม่ต่อเนื่องได้จากแหล่งต่าง ๆ เหล่านี้ คือ

1. แท่งตัวอย่างที่ได้จากหลุมเจาะ
2. ผนังหลุมเจาะที่มีขนาดใหญ่
3. ปล่องอุโมงค์แนวตั้งและผนังอุโมงค์
4. ร่องชุดสำรวจ
5. แนวรอยเปิดตัด และด้านหน้าของลาดเขา
6. หินโผล่ที่พบตามธรรมชาติ

ในการศึกษาความไม่ต่อเนื่องจากแท่งตัวอย่างนั้นอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของการวางตัวของ ระนาบไม่ต่อเนื่อง การศึกษาจากผนังหลุมเจาะขนาดใหญ่ มักมีปัญหาเรื่องพื้นที่ที่จำกัดและขนาดของ บุคคลที่จะลงไปศึกษา ส่วนร่องชุดและหน้าเปิดที่เกิดจากการชุดัก มีความยากในการแยกแยะระหว่าง รอยแตกที่เกิดตามธรรมชาติกับรอยแตกที่เกิดจากการชุด สำหรับหินโผล่ตามธรรมชาติมักพบปัญหาการ ผุพังของผิวหน้าคลุมพื้นผิวบดบังรอยความไม่ต่อเนื่อง ระบบสุ่มสำรวจมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบจำกัดพื้นที่ (limited area) และแบบจำกัดแนวสำรวจ (limited linear extent) ที่นิยมมากที่สุดคือแบบจำกัดแนว สำรวจ ซึ่งจะทำการสำรวจแบบเส้นสำรวจ (scan line) และมักจะทำเส้นสำรวจ 3 ทิศทาง ตั้งฉากกัน

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุด ความยาวของระยะทางสำรวจควรจะไม่น้อยกว่า 50 เท่าของค่าเฉลี่ยระยะห่างของระนาบไม่ต่อเนื่องในพื้นที่นั้น ในการสำรวจจะวางแผนด้วยเทปวัดระยะ และจดบันทึกทิศทางและระยะทางเส้นสำรวจ นอกจากนี้แล้วจะต้องบันทึกสิ่งต่อไปนี้เพื่อให้ได้คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่องในพื้นที่ คือ

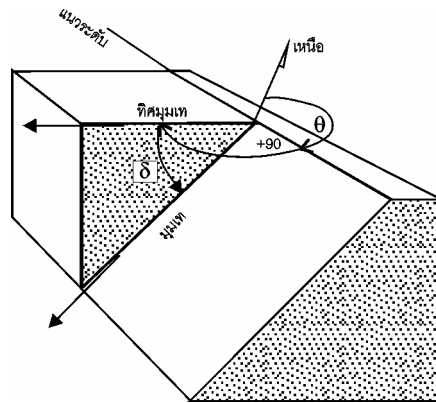
1. ระยะจากปลายเทปวัดด้านหนึ่งจนถึงระนาบความไม่ต่อเนื่องที่จะศึกษา
2. ชนิดของโครงสร้างความไม่ต่อเนื่อง เช่น เป็นชั้นหิน รอยแยก รอยเลื่อน
3. ทิศทางมุมเท (dip direction) ของระนาบความไม่ต่อเนื่อง
4. มุมเท (dip angle)
5. ความยาวของความไม่ต่อเนื่องหากมีการสิ้นสุดของระนาบภายในพื้นที่
6. ความกว้างของรอยแตกรอยแยก
7. ลักษณะผิวหน้าของระนาบและชนิดและคุณสมบัติของมวลที่แทรกในช่องว่าง (infill material)
8. รูปร่างและลักษณะอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องของระนาบความไม่ต่อเนื่อง

แผ่นบันทึกข้อมูลแนวสำรวจความไม่ต่อเนื่องในหินได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ในการสำรวจมักจะเกิดข้อผิดพลาดได้ 2 ลักษณะ คือข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวัด (measurement errors) เช่นการวัดมุมเทผิดไป ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเลือก (Selection error) ได้แก่ การที่ละเลยระนาบไม่ต่อเนื่องที่มีขนาดเล็ก หรือวัดระนาบความไม่ต่อเนื่องขนาดใหญ่มากกว่า 1 ครั้ง การวิเคราะห์ข้อมูลระนาบความไม่ต่อเนื่องสามารถกระทำได้ดังนี้

6.1.1 ข้อมูลการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง

ในทางธรณีวิทยา จะกำหนดทิศทาง ของระนาบต่างๆ ในรูปของ แนวระดับ (strike) ซึ่งจะวัดจากทิศเหนือทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ ไปทางทิศตะวันออก (90°) วนไปทางทิศใต้ (180°) ตะวันตก (270°) กลับสู่ทิศเหนือ (360°) และมุมเท (dip, δ) ของระนาบนั้น (รูปที่ 6.2) แสดงเป็น แนวระดับ/มุมเท เช่น ชั้นหินมีการวางตัว $220/30$ คือ มีแนวระดับ 220° จากทิศเหนือ และเอียงเททำมุม 30° กับแนวระดับ ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาหาการกระจายตัวของโครงสร้างความไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ดาข่ายมิติ (stereographic projection) ซึ่ง ดาข่ายมิตินี้เป็นการฉายภาพ ระนาบความไม่ต่อเนื่องสู่พื้นราบ อาจจะแสดงการฉายภาพเป็นระนาบ (plane) หรือเป็นจุดโพล (pole) ดาข่ายมิติที่ใช้มี 2 แบบ คือแบบเมริเดียน (meridional net) และแบบโพลาร์ (Polar net) (รูปที่ 6.3) ซึ่งทั้งสองแบบสามารถแยกย่อยออกเป็นดาข่ายมุมเท่า (equal angle หรือ Wulff net) และดาข่ายพื้นที่เท่า (equal area net หรือ Schmidt net) การฉายภาพที่อยู่ด้านใต้ของทรงกลม สู่พื้นผิว (Lower Hemisphere Projection) จะอาศัยจุดกำหนดจากขั้วเหนือ (Z) และการฉายภาพด้านบนของทรงกลม (Upper Hemisphere Projection) จะอาศัยจุดกำหนดจากขั้วใต้ (Z')

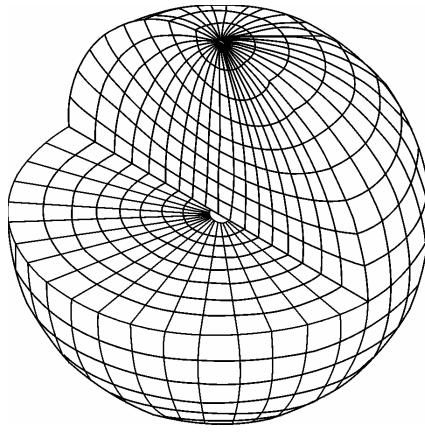
รูปที่ 6.1 แผ่นข้อมูลสำหรับบันทึกการสำรวจแบบเส้นแนวสำรวจ



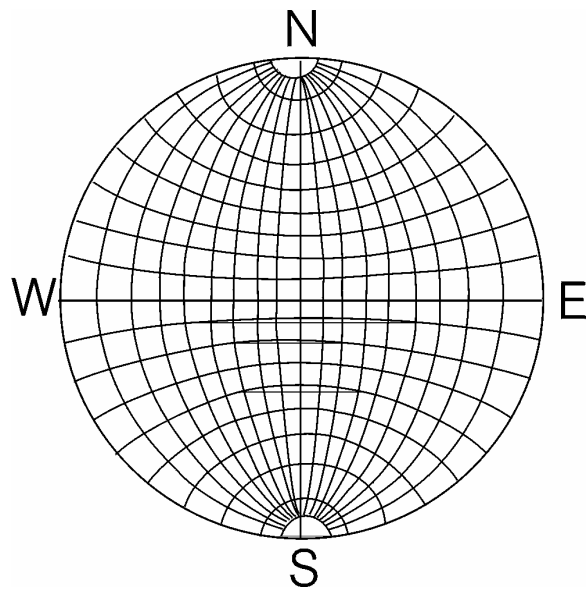
รูปที่ 6.2 การวางตัวของระนาบไม่ต่อเนื่อง แสดงแนวระดับ และมุมเท และทิศมุมเท

- (1) กำหนดทิศเหนือบนแผ่นใสหรือกระดาษลอกลาย
- (2) วัดจากทิศเหนือทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ เขียนจุดมุม θ ที่ขอบของตาข่าย
- (3) หมุนแผ่นใสให้จุดที่หมายถึงไว้บนขอบของตาข่าย มาในแนวตะวันออก - ตะวันตก
- (4) วัดมุมเท “ δ ” จากขอบตาข่ายเข้าสู่ศูนย์กลาง ที่ขอบตาข่ายมุมเทเท่ากับ 0° ส่วนที่ศูนย์กลางมุมเทจะเป็น 90° เมื่อได้มุมตามที่กำหนด ทำเครื่องหมายจุดไว้ แล้วลากเส้นโค้งตามเส้นโค้งหลัก จากเหนือไปได้ผ่านจุดที่หมายไว้ เส้นโค้งนี้จะเป็นภาพของระนาบความไม่ต่อเนื่อง ที่ฉายสู่ระนาบระดับ (ดูรูปที่ 6.4 ค ประกอบ)
- (5) ส่วนของระนาบนี้อาจแสดงด้วยจุดโพล (pole) ซึ่งจะตั้งฉากกับระนาบ และตัดทรงกลมเป็นจุด เมื่อฉายภาพสู่ระนาบระดับ ถ้าจะทำมุม 90° กับระนาบที่ฉายในทิศทางของมุมเท (dip direction) ดังนั้น เราสามารถเขียนจุดได้ โดยวัดมุมเทออกจากจุดที่หมายไว้ในข้อ (4) ไป 90°

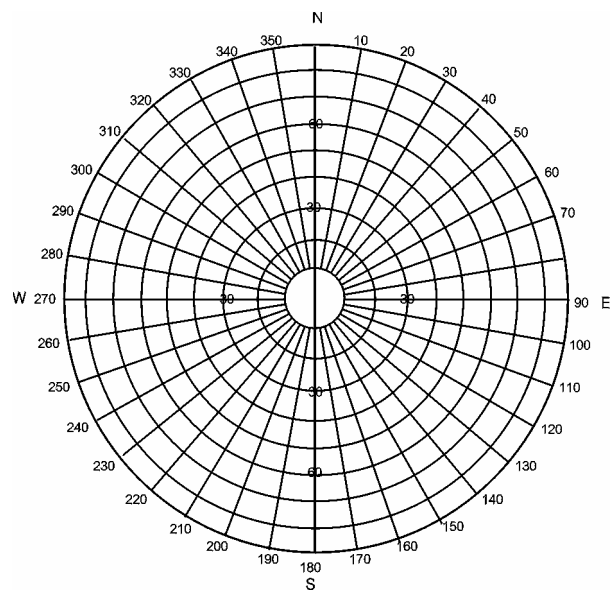
เพื่อสะดวกในการเขียนจุดโพล เรามักจะใช้ ตาข่ายโพลาร์ โดยข้อมูลที่จะทำการเขียนลงในตาข่ายจะเป็น ทิศมุมเท และมุมเท ดังนั้นหากข้อมูลเป็น แนวระดับ/มุมเท ต้องทำการปรับแก้เป็นทิศมุมเท/มุมเท $\text{ทิศมุมเท} = \theta + 90^\circ$ ข้อมูลจุดโพล ทำให้เราได้จำนวนกลุ่มของโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มโครงสร้างได้ ดังรูปที่ 6.5 แสดงการแยกกลุ่มโครงสร้างจากตาข่ายโพลาร์แบบพื้นที่เท่า ซึ่งแยกได้ว่าโครงสร้างความไม่ต่อเนื่องหลักจะเป็นโครงสร้างในกลุ่ม I , II ส่วนกลุ่ม III เป็นโครงสร้างรอง



(ก)

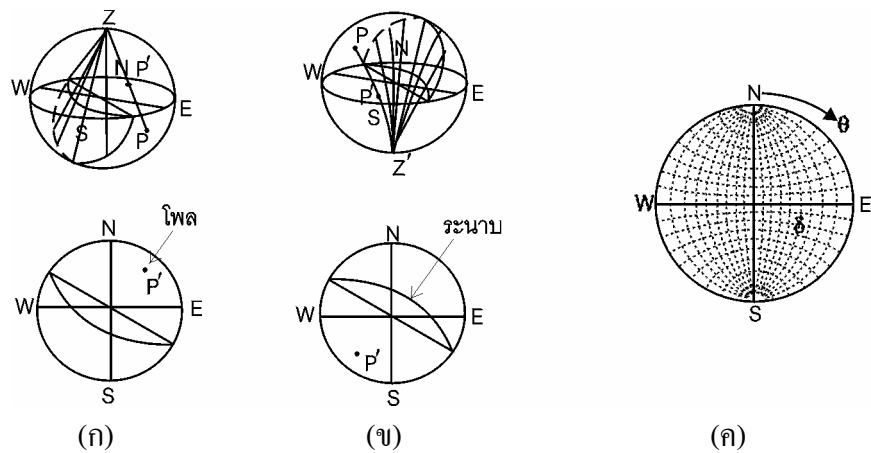


(ข)

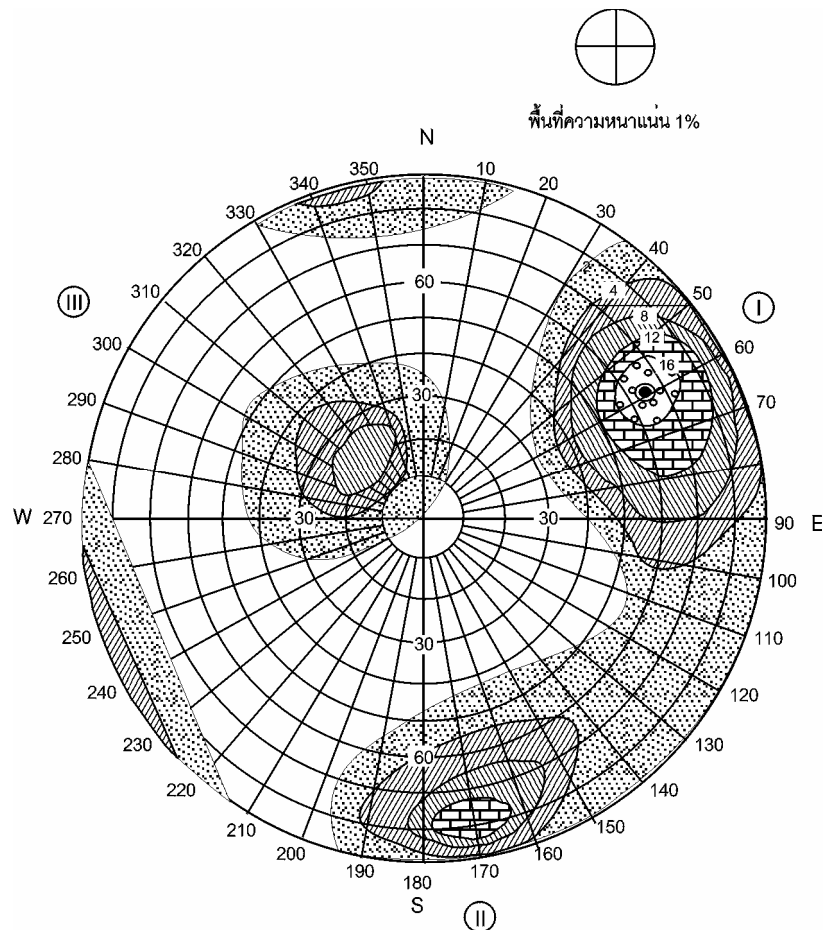


(ค)

รูปที่ 6.3 (ก) แสดงการฉายภาพจากทรงกลมสู่ตาข่ายมิติเมอริเดียน (ข)
และตาข่ายโพลาร์ (ค)



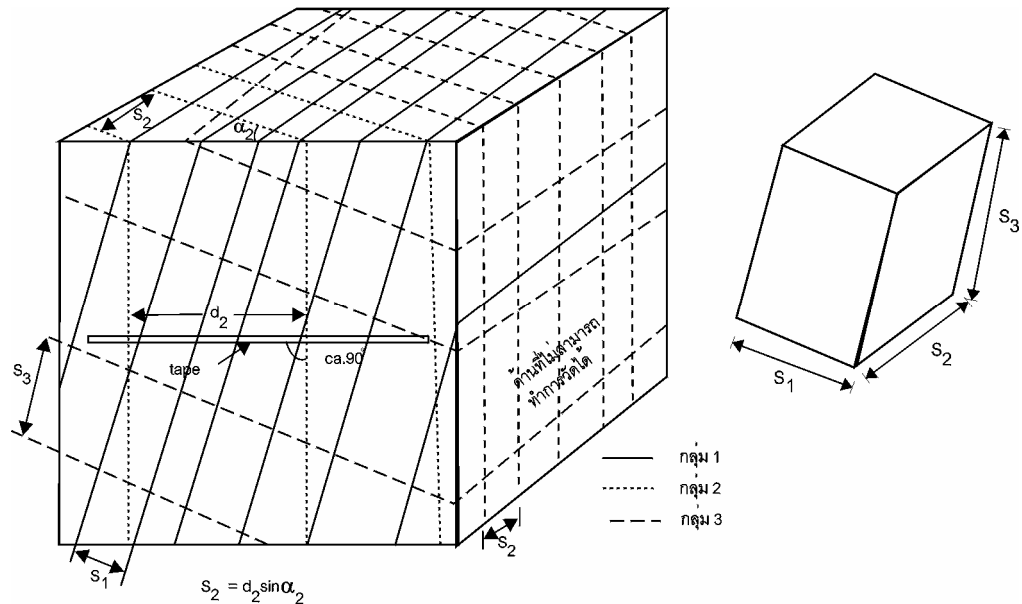
รูปที่ 6.4 (ก) การฉายภาพใต้ทรงกลม(Lower Hemisphere Projection) (ข)การฉายภาพเหนือทรงกลม (Upper Hemisphere Projection) (ค) การเขียนระนาบไม่ต่อเนื่องลงตาข่ายมิติ



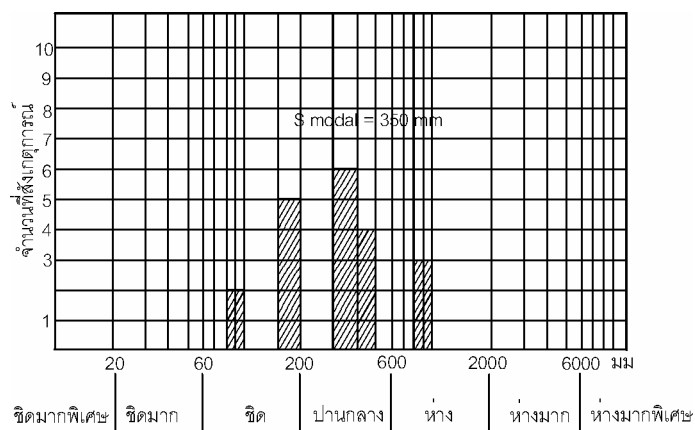
รูปที่ 6.5 การเขียนข้อมูลระนาบไม่ต่อเนื่องลงในตาข่ายโพลาร์เพื่อทำการวิเคราะห์แยกกลุ่มข้อมูล (จาก Brown, 1981)

6.1.2 ระยะห่างระหว่างโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง (Spacing, S)

ระยะห่างระหว่างโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง เป็นข้อมูลที่จะทำให้เราทราบขนาดของบล็อกที่เกิดจากรอยแตก และมีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ซึมผ่านได้ การเลื่อนไถลระหว่างระนาบไม่ต่อเนื่อง วิธีการวัดจะแสดงไว้ใน (รูปที่ 6.6) ซึ่งระยะห่าง (S) สามารถคำนวณได้จาก $S = d_m \sin \alpha$ เมื่อ α เป็นมุมระหว่างเทป วัดระยะกับรอยแยก ระยะรอยแยกนี้จะวิเคราะห์โดยใช้กราฟแท่ง (รูปที่ 6.7) ซึ่งเราสามารถแยกรอยแยกออกตามระยะได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.6 การวัดระยะห่างของระนาบไม่ต่อเนื่องโดยวิธีการเส้นสำรวจ (จาก Brown, 1981)



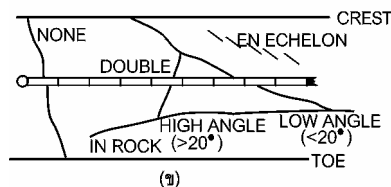
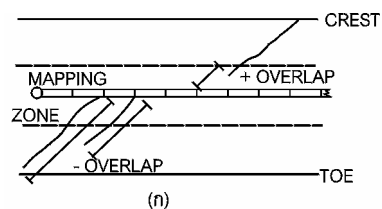
รูปที่ 6.7 การแสดงผลระยะระนาบไม่ต่อเนื่องในรูปของกราฟแท่ง (จาก Brown, 1981)

ตารางที่ 6.1 การจัดจำแนกขนาดระยะห่างรอยความไม่ต่อเนื่อง (ISRM, 1981)

ขนาดรอยความไม่ต่อเนื่อง	ระยะห่าง (มม)
ชิดมากพิเศษ	< 20
ชิดมาก	20 - 60
ชิด	60 - 200
ปานกลาง	200 - 600
ห่าง	600 - 2000
ห่างมาก	2000 - 6000
ห่างมากพิเศษ	> 6000

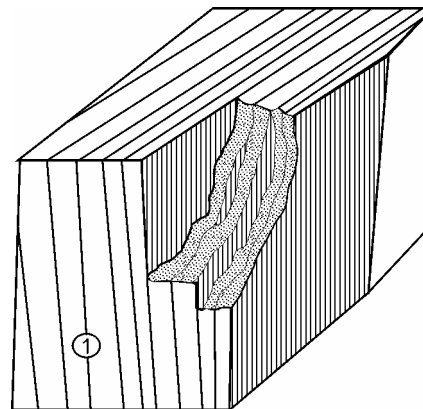
6.1.3 ข้อมูลอื่นๆที่ทำการบันทึก

ข้อมูลอื่นๆ เช่นระยะเหลื่อมของแนวความไม่ต่อเนื่องสามารถวัดและบันทึกผล เป็นบวก(+) เมื่อระนาบความไม่ต่อเนื่องอยู่เหนือเทปวัดระยะ และเป็นลบ(-) เมื่อระนาบความไม่ต่อเนื่องอยู่ใต้เทปวัดระยะ(รูปที่ 6.8 ก) นอกจากนี้การสิ้นสุดของเส้นแนวความไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏ ก็ยังบันทึกเพื่อแสดงความต่อเนื่องของระนาบ (รูปที่ 6.8 ข) ซึ่งอาจไม่เห็นจุดสิ้นสุด(none) หรือสิ้นสุดในหิน (in rock) หรือเป็นเส้นหัก (en echelon)

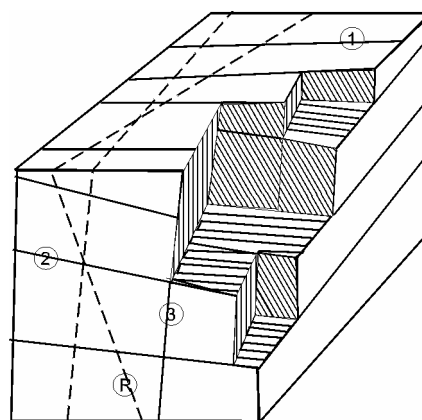


รูปที่ 6.8 (ก) แสดงการวัดระยะเหลื่อมและ(ข) ระยะสิ้นสุดของแนวไม่ต่อเนื่อง

จากผลการสำรวจไม่ว่าทิศการวางตัว ระยะห่าง ตลอดจนจำนวนกลุ่มโครงสร้างจะมีผลต่อการนำไปสร้างโมเดลของมวลหิน ดังรูปที่ 6.9 ซึ่งมีผลต่อถึงพฤติกรรมการวิรูปที่ตอบสนองต่อแรงกระทำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.9 แสดงผลของระยะและจำนวนกลุ่มโครงสร้างไม่ต่อเนื่องที่มีผลต่อขนาดของบล็อกหิน
(ก) ระบายไม่ต่อเนื่อง หนึ่งกลุ่ม และ (ข) ระบายไม่ต่อเนื่องมากกว่า หนึ่งกลุ่ม (ISRM, 1981)

6.2 กำลังเฉือนของมวลหินที่มีระนาบไม่ต่อเนื่อง

ถ้ากำลังเฉือนบนระนาบความไม่ต่อเนื่อง จะมีค่าน้อยกว่ามวลหินที่ไม่มีระนาบความไม่ต่อเนื่อง ถ้าให้ C_d และ ϕ_d เป็นพารามิเตอร์ของกำลังเฉือนบนระนาบความไม่ต่อเนื่อง เราสามารถสร้างเส้นกำหนดการวิบัติได้ดังนี้คือ

$$\tau_d = c_d + \sigma_{nd} \tan \phi_d \quad (6-1)$$

จากรูปที่ 6.10 ให้ระนาบความไม่ต่อเนื่อง ทำมุม β กับ แกน σ_3 เราจะได้ว่า

$$\sigma'_{nd} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\beta \quad (6-2)$$

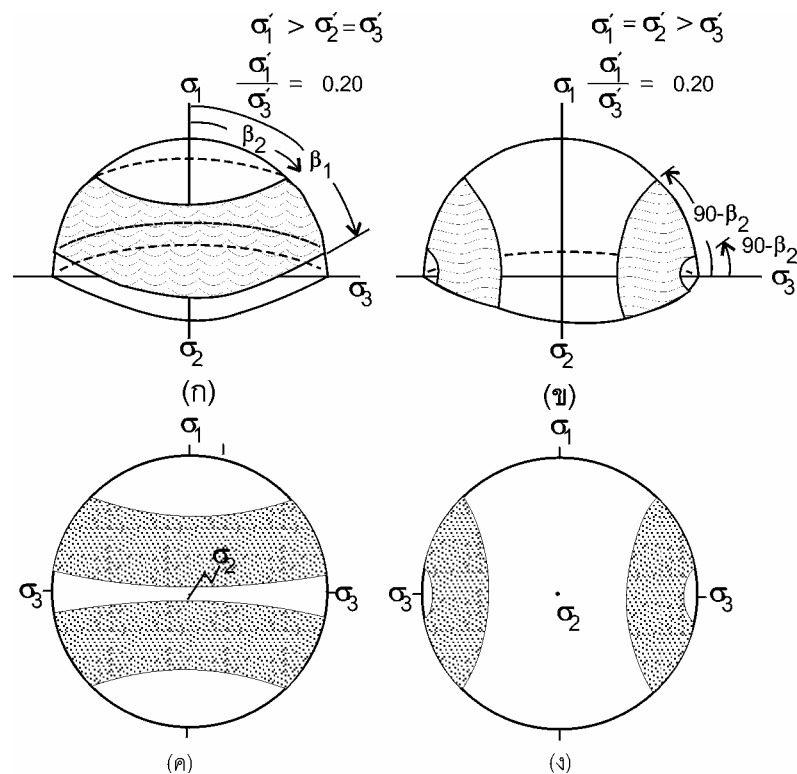
$$\tau_d = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin 2\beta \quad (6-3)$$

รูปที่ 6.11 (ก) ภาวะความเค้นการเลื่อนไถสของระนาบไม่ต่อเนื่องที่ β ต่างและ (ข) กราฟ
 สันสุดเมื่อรอยแตกในหินมี $\phi = \phi_0$ และ $C = 2C_0$ (จาก Farmer, 1983)

ในกรณีการวิเคราะห์แบบ 3 มิติพบว่า ค่าความเค้นหลักทรง (σ'_2) จะมีผลต่อการกำหนดทิศทางการวางตัวของระนาบที่จะเกิดการเลื่อนไถลหรือวิบัติ ดังนี้

ถ้า $\sigma'_1 > \sigma'_2 = \sigma'_3$ แกนของความเค้นปกติบนระนาบที่จะเกิดการวิบัติเลื่อนไถล จะทำมุม β_1 กับ β_2 กับ σ'_1 (รูปที่ 6.12 ก)

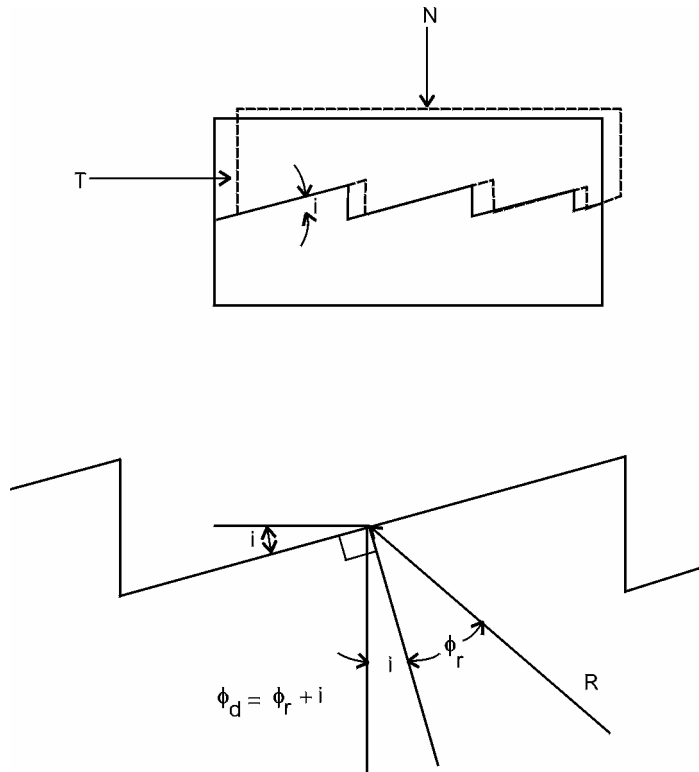
ถ้า $\sigma'_1 = \sigma'_2 > \sigma'_3$ แกนของความเค้นปกติบนระนาบที่จะเกิดการวิบัติจะทำมุม β ระหว่าง $\frac{\pi}{2} - \beta_1$ และ $\frac{\pi}{2} - \beta_2$ กับแกน σ'_3 (รูปที่ 6.12 ข)



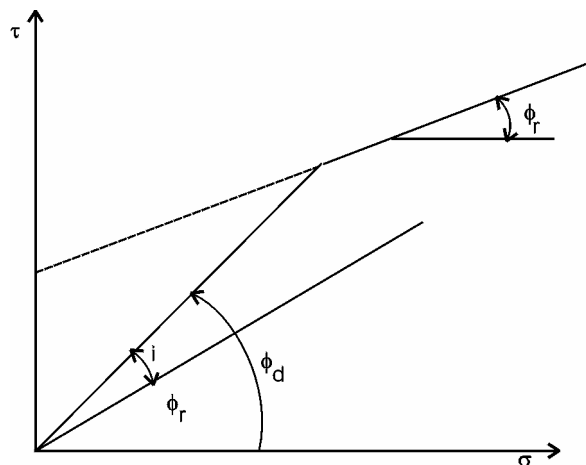
รูปที่ 6.12 (ก-ข) ผลของความเค้นหลักค่ารองที่มีต่อทิศทางของระนาบเลื่อนไถล

(ค-ง)แสดงระนาบเลื่อนไถลในตาข่ายมิติ (จาก Jaeger and Cook, 1969)

ค่ากำลังเฉือนของระนาบไม่ต่อเนื่องที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นเพียงค่าเบื้องต้นที่ไม่ได้คิดถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังเฉือน เช่น มวลวัสดุในช่องว่างระหว่างระนาบ ผิวหน้าของระนาบไม่ต่อเนื่อง เราพบว่าความขรุขระบนผิวหน้าระนาบความไม่ต่อเนื่องจะเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งยวดที่จะทำให้ค่ากำลังเฉือนเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการขยายตัว (dilation) ทำให้เกิดการขยายปริมาตร (รูปที่ 6.13) ของระนาบตามรอยหยัก (asperity) ของผิวหน้าเหล่านี้ Patton (1966) ได้ศึกษาโมเดลของกำลังเฉือนบนระนาบไม่ต่อเนื่องนี้ โดยนำผลของความขรุขระบนผิวหน้าระนาบ เรียกกฎของ Patton หรือเกณฑ์กำลังเฉือนเชิงเส้นทวี (Bilinear Shear Strength Criterion) (รูปที่ 6.14)



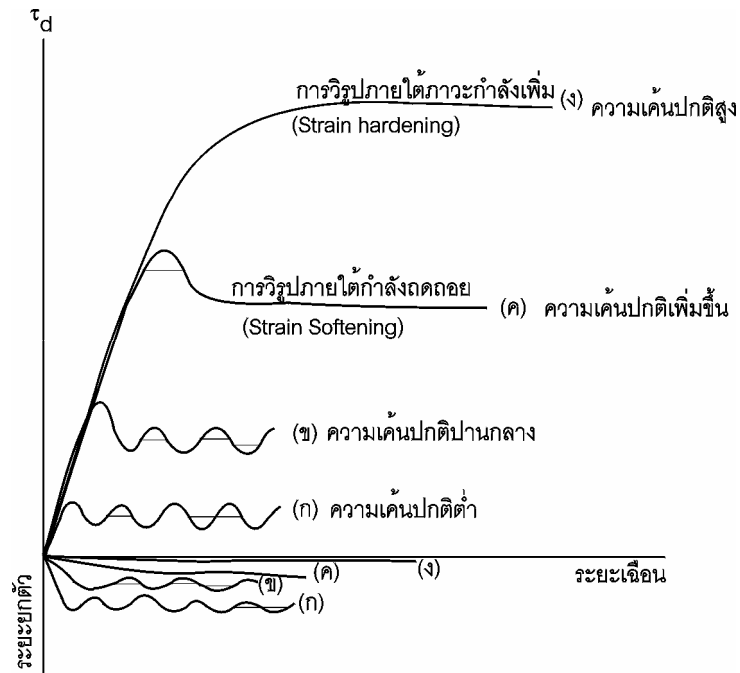
รูปที่ 6.13 แสดงการยกขยายตัว (dilation) ของระนาบที่มีรอยหักทำมุม i



รูปที่ 6.14 เหน้กกำลังเฉือนทวของ Patton ที่เป้นผลจากคิวนรขระของระนาบไม่ต่อเนื่อง

ถ้าให้ i เป้นมุมหักทำกับระนาบไม่ต่อเนื่อง และระนาบไม่ต่อเนื่องนี้ไม่มีค่ากำลังยึดเหนียว (c_d) แต่มีกำลังเสียดทาน พิจารณาจากสมการที่ (6-1) $\tau_d = \sigma_{nd} \tan \phi_d$ ที่ภาวะความเค้นปกติระดับต่างๆ กันดังนี้คือ (รูปที่ 6.15)

- ก. ภาวะความเค้นปกติต่ำ (low normal stress) จะพบว่ากำลังเฉือนจะเพิ่มจนถึงจุดสูงสุด พร้อมกับการยกตัวตามรอยหัก เมื่อรอยหักนี้เคลื่อนตัวข้ามลงสู่ด้านราบ ความเค้นเฉือนจะลดลงและจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเกิดการยกตัวตามรอยหักอีกครั้ง



รูปที่ 6.15 ผลของมุมหยักต่อการวิรูปของหินที่ภาวะความเค้น (ก) ระดับต่ำ (ข) ระดับปานกลาง (ค) ระดับเพิ่มขึ้น (ง) ระดับสูง

ข. ภาวะความเค้นปกติระดับปานกลางถึงสูง (moderate - high normal stress) ในช่วงแรกของการเฉือนความเค้นจะขึ้นถึงจุดสูงสุดเกิดการขกตัวและยอดของรอยหยักจะถูกทำลายลง เมื่อรอยหยักนี้เคลื่อนตัวข้ามส่วนยอดลง ความเค้นเฉือนจะลดลงคล้ายในภาวะความเค้นปกติต่ำ แต่รูปกราฟจะเริ่มแสดงการวิรูปได้ภาวะกำลังถดถอย strain softening และเมื่อเพิ่มความเค้นปกติสูงขึ้นก็จะได้ว่ารอยหยักนั้นจะถูกทำลายมากขึ้นและการวิรูปเพิ่มมากขึ้นภายใต้กำลังถดถอยอย่างสมบูรณ์ เมื่อเพิ่มความเค้นปกติสูงมากขึ้นอีก รอยหยักเหล่านี้จะถูกทำลายทันทีและเกิดพฤติกรรมการวิรูปภายใต้ภาวะกำลังเพิ่ม (strain hardening)

ตามที่ Patton ได้สร้างโมเดลกำลังเฉือนของระนาบไม่ต่อเนื่อง โดยคำนึงถึงผิวหน้าหยักบนระนาบไว้ดังนี้ คือที่ภาวะความเค้นปกติ ระดับต่ำเมื่อผิวหน้าระนาบเรียบ

$$\tau'_d = \sigma'_{nd} \tan \phi_r \quad (6-5)$$

ϕ_r = มุมเสียดทานภายในของระนาบเรียบ

$$\tau'_i = \sigma'_{ni} \tan \phi_r \quad (6-6)$$

จากสมการ (7-5) และ (7-6) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง τ'_d, σ'_{nd} และ τ'_i, σ'_{ni}

$$\frac{\tau'_d}{\sigma'_{nd}} = \left(\frac{\tau'_i \cos i + \sigma'_{ni} \sin i}{\sigma'_{ni} \cos i - \tau'_i \sin i} \right) = \tan \phi_d$$

$$\text{นั่นคือ } \tan \phi_d = \tan \phi_r + i \quad (6-7)$$

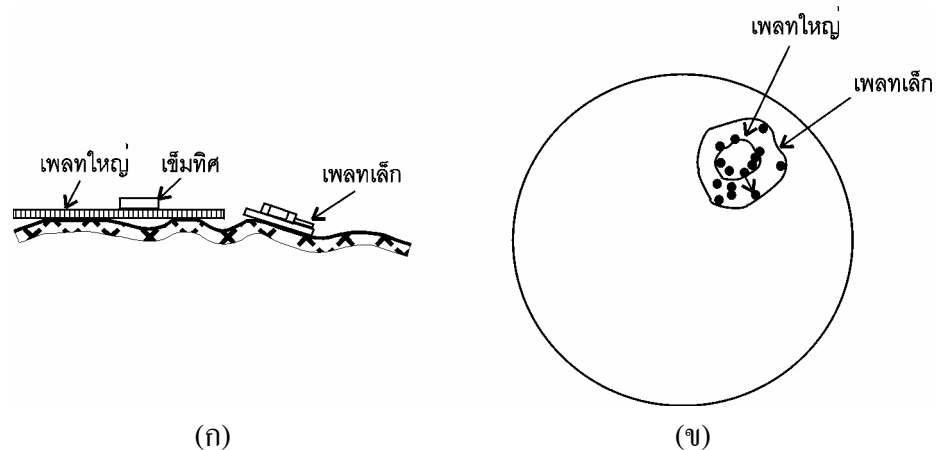
ดังนั้นกำลังเฉือนบนระนาบไม่ต่อเนื่อง ที่มีผิวขรุขระ จะมีค่า

$$\tau'_d = \sigma'_{nd} \tan(\phi_r + i) \quad (6-8)$$

แต่ที่ภาวะความเค้นปกติที่มีค่าสูงบนระนาบไม่ต่อเนื่อง การเคลื่อนตัวของระนาบจะเกิดขึ้นเมื่อผิวหัยนั้นถูกทำลาย ความเค้นที่สูงทำให้ระนาบไม่ต่อเนื่องนั้นมีค่ากำลังยึดเหนี่ยว (c_d) เกิดขึ้น และผิวหน้าของระนาบจะเรียบเนื่องจากรอยหัยถูกบดอัดทำลายทำให้มีมุมเสียดทานภายในเป็น ϕ_r กำลังเฉือนจึงมีค่าเป็น

$$\tau'_d = c_d + \sigma'_{nd} \tan \phi_r \quad (6-9)$$

ซึ่งสมการ (6-8) และ (6-9) จะแสดงเกณฑ์กำลังเชิงเส้นทวิ ค่าของมุมหัย i สามารถหาได้จากการวัดและวิเคราะห์โดยวิธีของ Renger (1970) โดยใช้เพลทขนาดต่าง ๆ เพื่อวัดค่ามุมหัย (รูปที่ 6.16 ก) และนำค่ามุมหัยนี้ไปพล็อตในตาข่ายมิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยของมุมหัย ค่าที่ได้จะขึ้นกับขนาดของเพลทที่ใช้วัด (รูปที่ 6.16 ข) ส่วนค่า ϕ_r ของหินชนิดต่าง ๆ และวัสดุที่แทรกระหว่างระนาบไม่ต่อเนื่องได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.16 (ก) การวัดมุมหัย i โดยวิธีของ Renger (ข) การแสดงผลการกระจายในตาข่ายมิติ

ตารางที่ 6.2 แสดงค่า ϕ_r ของหินและวัสดุแทรกระหว่างระนาบไม่ต่อเนื่อง จาก Hoek (1970)

ชนิดของหิน	ϕ_r	วัสดุแทรก	ϕ_r
หินแกรนิต	31 - 33	ผงรอยเลื่อน	10 - 20
หินปูน	33 - 37	แคลไซต์	20 - 27
หินทราย	25 - 34	Breccia	22 - 30
หินควอตไซต์	26 - 34	มวลรวมหิน	40
หินดินดาน	27 - 32	-	-

Ladanyi และ Archambault (1969) ได้ปรับเปลี่ยน สมการของ Patton เพื่อเสริมค่าของการยกตัวและการเชื่อมเข้าของรอยหัยผิวหน้าระนาบดังนี้

$$\tau_d = \frac{\sigma'_{nd}(1-a_s)(d\varepsilon_v/d\varepsilon_s + \tan \phi_r) + a_s \tau_f}{1 - (1-a_s)(d\varepsilon_v/d\varepsilon_s) \tan \phi_r} \quad (6-10)$$

a_s = เป็นสัดส่วนของพื้นที่ระนาบไม่ต่อเนื่องที่เชื่อมผ่านรอยแยก

$d\varepsilon_v/d\varepsilon_s$ = อัตราการยกตัว (dilation rate) ที่กำลังเฉือนสูงสุด (peak)

τ_f = กำลังเฉือนของหินปราศความไม่ต่อเนื่อง

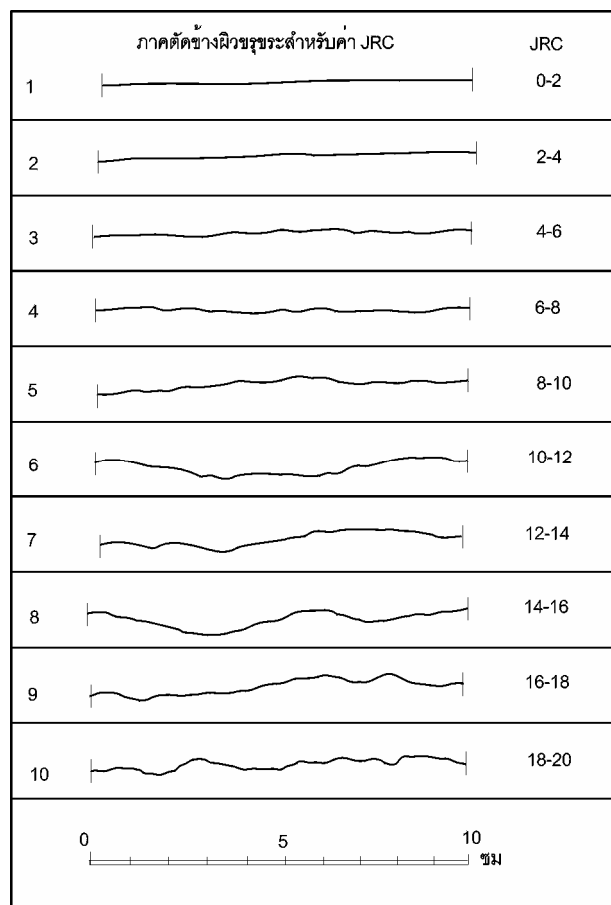
Barton (1973) ได้พัฒนาค่ากำลังเฉือนของระนาบไม่ต่อเนื่องจากการทดสอบบนระนาบที่มีลักษณะผิวแตกต่างกันตั้งแต่ผิวเรียบ ผิวลอนคลื่น ไปจนผิวหยาบขรุขระ โดยได้สมการดังนี้

$$\tau'_d = \sigma'_{nd} \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_{nd}} \right) + \phi_r \right] \quad (6-11)$$

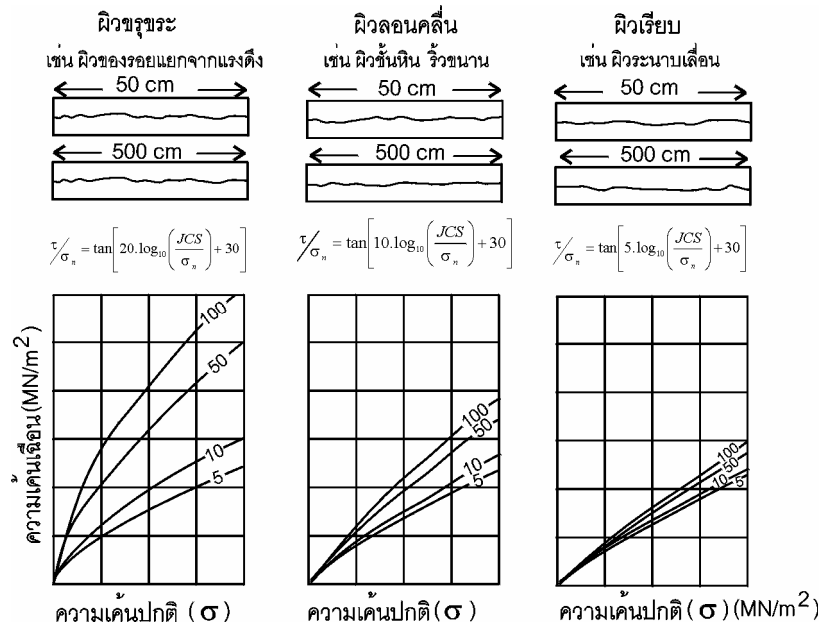
JRC = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของผิวรอยแยก

JCS = กำลังกดประสิทธิผลของผิวรอยแยก

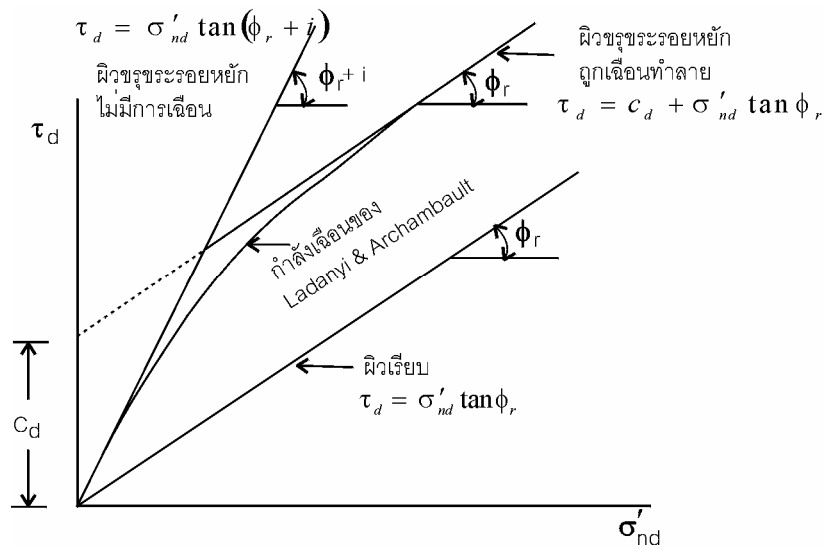
Barton ได้กำหนดค่า JRC จาก 0-20 (รูปที่ 6.17) ตามลักษณะผิวน้ำจากหน้าเรียบถึงผิวหยาบขรุขระมาก รูปที่ 6.18 แสดงค่ากำลังเฉือนของระนาบไม่ต่อเนื่องที่มี JRC และ JCS ต่าง ๆ กำลังเฉือนที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดสามารถสรุปรวมได้ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.17 การกำหนดค่า JRC ตามลักษณะของผิวน้ำระนาบโดย Barton , 1973



รูปที่ 6.18 แสดงกำลังเฉือนของมวลหินที่มีผิวระนาบไม่ต่อเนื่องแบบ ขรุขระ เป็นลื่นคลื่น ผิวเรียบ และที่ค่า JCS ของผิวหน้า (JCS) ระดับต่างๆ (Barton, 1973)



รูปที่ 6.19 สรุปเกณฑ์กำลังเฉือนของมวลหินที่มีระนาบไม่ต่อเนื่อง