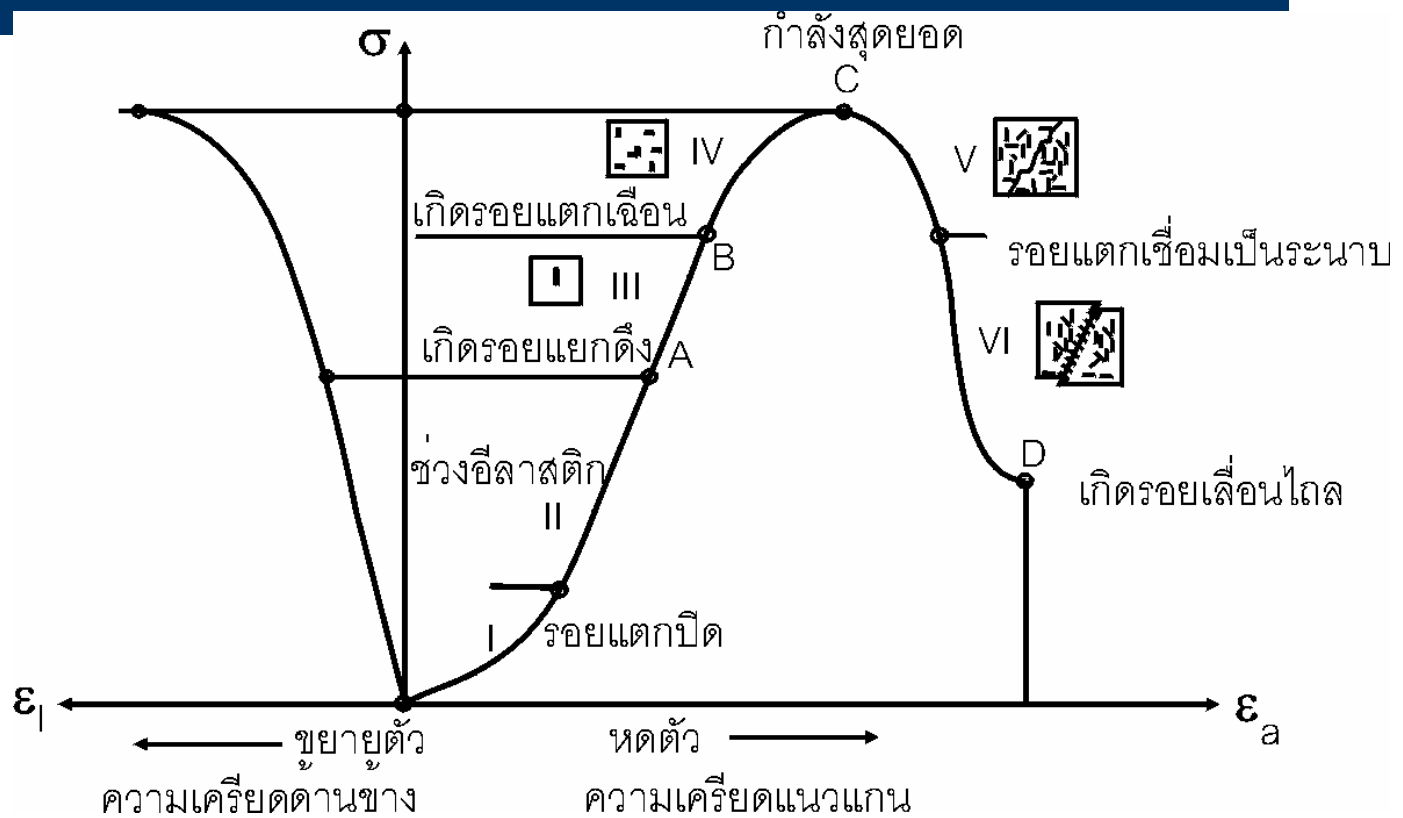


Failure Criteria

Fundamentals of
Rock Mechanics
Department of
Geotechnology Khon Kaen U.

Associate prof. Ladda Wannakao

ภาวะการวิรูป



ระยะของการวิรูป

- ระยะที่ 1 รอยแตกปิด เป็นระยะที่รอยแตกเล็ก ๆ หรือ ช่องว่างภายในตัวอย่างจะปิดลง ทำให้เส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรง
- ระยะที่ 2 ช่วงอีลาสติก เป็นช่วงอีลาสติกที่การวิรูปยังคงคืนสภาพได้เมื่อถอนความเค้นนี้ออกไป กราฟจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยเฉพาะเมื่อความเค้นอยู่ที่ประมาณ 35-40% ของกำลังอัดของตัวอย่าง

ระยะของการวิรูป

- ระยะที่ 3 รอยแตกเปิดจากแรงดึง

ระยะนี้กราฟจะเริ่มเปลี่ยนไปจากเส้นตรงเนื่องจากการขยายตัว (dilation) ของรอยแตกและขยายทั่วทั้งตัวอย่าง ซึ่งการวิรูปในช่วงนี้จะคืนรูปได้บางส่วน ความเค้นจะอยู่ประมาณ 80% ของกำลังอัดของหิน

- ระยะที่ 4 รอยแตกเนียนเพิ่ม

เป็นระยะที่รอยแตกจะขยายด้วยอัตราเร่งมากขึ้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มขึ้น รอยแตกเหล่านี้เริ่มเชื่อมต่อกันเป็นระนาบแตกจากการดึงหรือเฉือน และที่ช่วงปลายของระยะนี้จะเป็นจุดวิบัติหรือความเค้นมีค่าเท่ากับกำลังสุดท้าย (ultimate strength) ของหินพอดี

ระยะของการวิรูป

- **ระยะที่ 5 รอยแตกเชื่อมกันเป็นระนาบ**

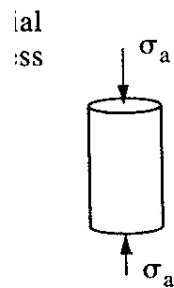
เป็นระยะที่ผ่านการวิบัติหรือกำลังสุดยอดของตัวอย่าง รอยแตกเล็ก ๆ เชื่อมต่อเป็นระนาบขนาดใหญ่หรือเป็นรอยเลื่อน การวิรูปจะเกี่ยวข้องกับ การวิรูปภายใต้กำลังลดลง (**strain softening**) ซึ่งหินจะสูญเสีย กำลังเมื่อความเครียดที่เกิดขึ้นมากขึ้น

- **ระยะที่ 6 เลื่อนไถลบนรอยแตก**

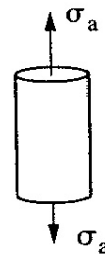
เป็นระยะที่การแตกของหินแยกจากกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการวิรูปจะขึ้นกับ แรงเสียดทานบนระนาบเลื่อนหรือที่เราพบในธรรมชาติของมวลหินในทาง ธรณีวิทยาเรียกว่า รอยเลื่อน (Faults) และความสามารถในการรับแรงจะเป็นกำลังคงเหลือ (**residual strength**) ของหินเท่านั้น

ชนิดของความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ

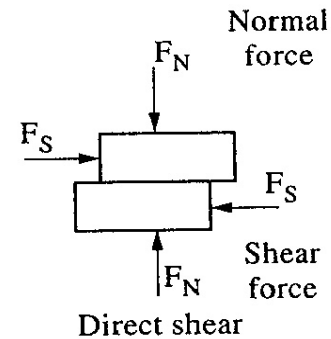
Axial stress



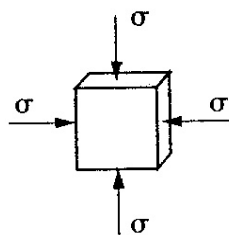
Uniaxial compression



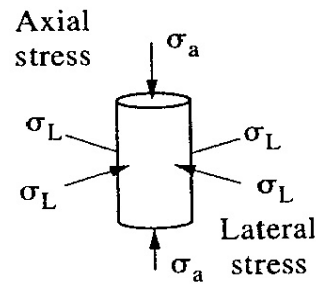
Uniaxial tension



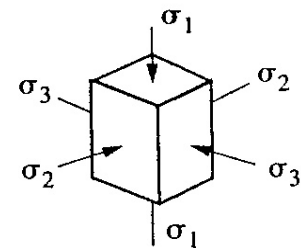
Direct shear



Biaxial compression



Triaxial compression



Polyaxial compression

รูปแบบการวิบัติของหิน (Failure Mode)

- การวิบัติเนื่องจากแรงดึง ระบายที่แตกจะแยกออกไม่มีการบดระหว่างระบาย และผิวหน้าของระบายแตกค่อนข้างขรุขระ
- การวิบัติแบบเฉือน เนื่องจากความเค้นเฉือนที่กระทำมากกว่ากำลังเฉือนของหิน การวิบัติชนิดนี้มักพบการเคลื่อนและการบดตามระบายแตก ผิวหน้าจะละเอียดลื่น เช่น บนระบายรอยเลื่อน (fault plane) หรือการเลื่อนไถลของชั้นหินตามลาดเขา

Tension Failure Mode



Shear Failure Mode



รูปแบบการวิบัติของหิน (Failure Mode)

- การวิบัติเนื่องจากการโก่งงอ (**flexure**) หินที่มีการวางตัวเหมือนลักษณะของคาน เช่น ชั้นหินตะกอนในเหมืองอุโมงค์ ที่มีการวางตัวในระนาบระดับ เมื่อรับน้ำหนักจะเกิดการตกท้องช้างของชั้นหินเกิดการโก่งงอและแตกออกเนื่องจากแรงดึง
- การวิบัติเนื่องจากการบดหรืออัดของแรง รูปแบบการวิบัติค่อนข้างจะซับซ้อน อาจจะผสมระหว่างการวิบัติแบบเฉือน และแบบแรงดึง เช่น ในการทดสอบแรงอัดในหินที่เป็นทรงกระบอก หรือแท่งเสารับน้ำหนักในเหมืองอุโมงค์แบบห้องและเสา (**room and pillar**) จะเห็นการแยกออกตามแนวยาวของแท่งเสาหรือแท่งตัวอย่าง ร่วมกับการเฉือนบนระนาบเฉียงขวางแท่งเสา หรือแท่งตัวอย่าง ในบางครั้งจะพบการวิบัติหลายระนาบได้เมื่อหินนั้นได้รับความดันล้อม (**confining pressure**) ที่ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดมีพฤติกรรมแบบอ่อนคดได้ (**ductile**)

Multi Failure Mode



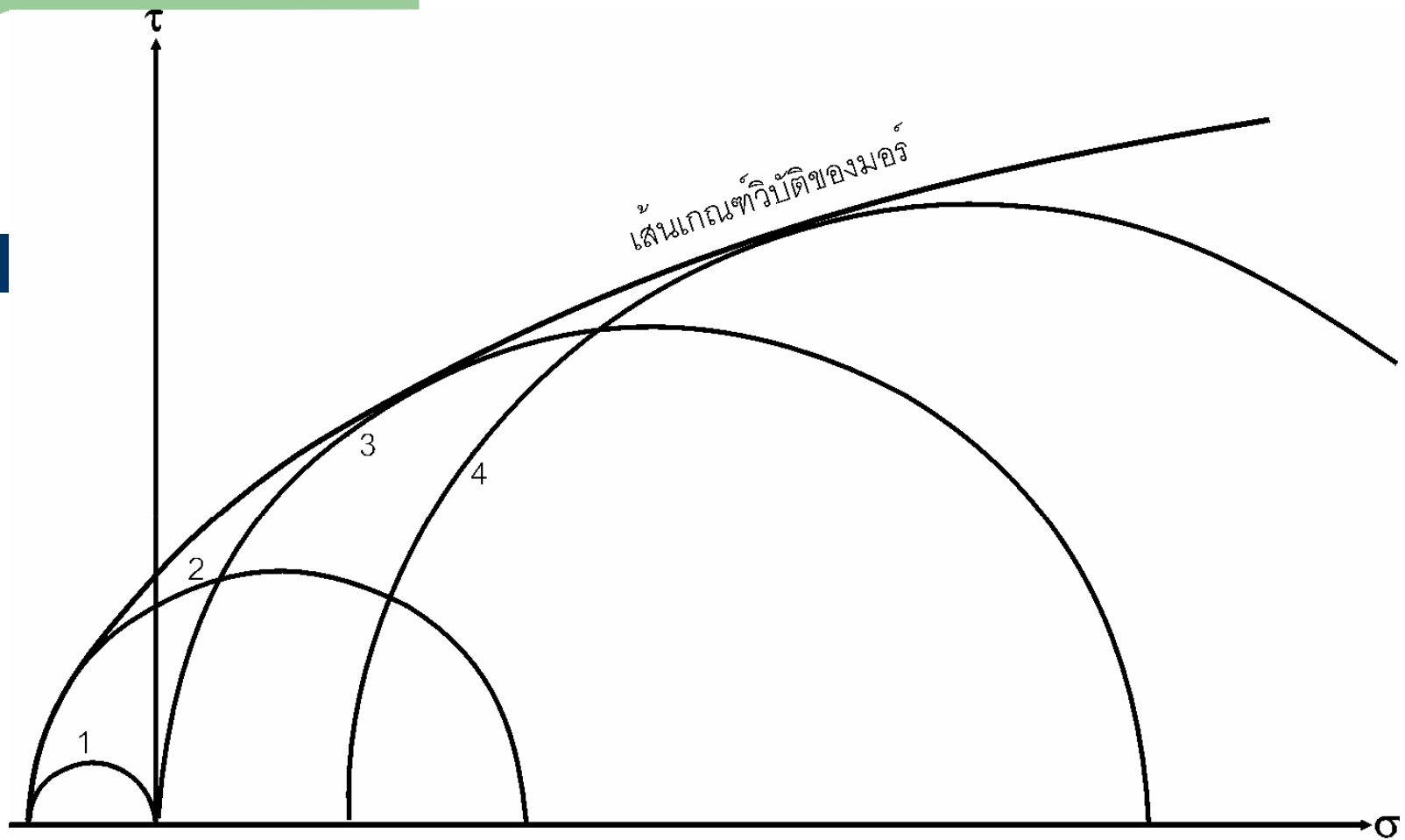
เกณฑ์กำหนดการวิบัติ (Failure Criteria)

- เกณฑ์กำหนดการวิบัติของมอร์ (Mohr's Criteria)
- เกณฑ์กำหนดการวิบัติคูลอมบ์ (Coulomb Criterion)
- เกณฑ์กำหนดการวิบัติของกริฟฟิธ (Griffith Criteria)
- เกณฑ์กำหนดสูกและบราวน์ (Hoek and Brown Criteria)

เกณฑ์กำหนดการวิบัติของมอร์ (Mohr's Failure Criteria)

- เกณฑ์กำหนดของมอร์เกิดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในเกณฑ์กำหนดระบุว่า การวิบัติของมวลวัตถุเกิดจากความเค้นเฉือนที่กระทำบนระนาบวิบัติและจะเป็นความสัมพันธ์ทางฟังก์ชันกับความเค้นปกติที่กระทำบนระนาบนั้น นั่นคือ

$$\tau = f(\sigma_n)$$



- 1 = ผลทดสอบการดึงโดยตรง
- 2 = ผลทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลเลียน
- 3 = ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว
- 4 = ผลทดสอบกำลังอัดความดันลอม

เกณฑ์กำหนดการวิบัติคูลอมบ์ (Coulomb Failure Criterion)

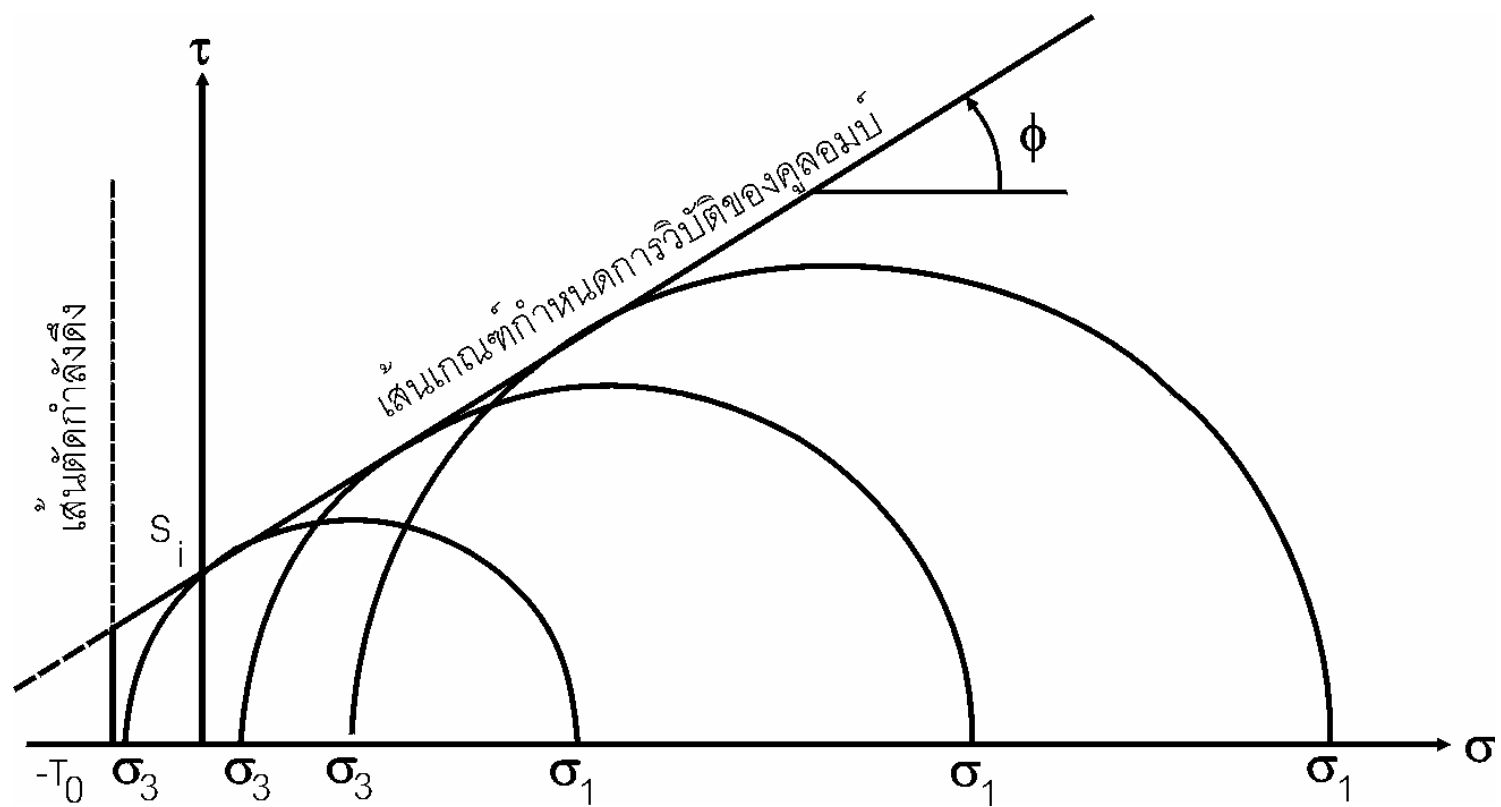
- เกณฑ์กำหนดคูลอมบ์ หรือบางครั้งอาจจะเรียกเกณฑ์กำหนดคูลอมบ์-เนเวียร์ กำหนดว่า ในวัตถุที่แข็งและเปราะ ณ จุดวิบัติ ค่าความเค้นบนระนาบเฉือนนั้นจะถูกต้านด้วยกำลังยึดเหนี่ยวภายใน (inherent shear strength, S_0) ของมวลวัสดุและกำลังเสียดทานภายใน ($\mu \sigma_n$) ดังนั้นกำลังเฉือน (shear strength, S) ของมวลวัสดุสามารถแสดงได้ดังนี้

$$S = S_0 + \mu \sigma_n$$

$$\mu = \text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน} \quad (\mu = \tan \phi)$$

$$S_0 = \text{กำลังยึดเหนี่ยวภายใน}$$

$$\phi = \text{มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle)}$$

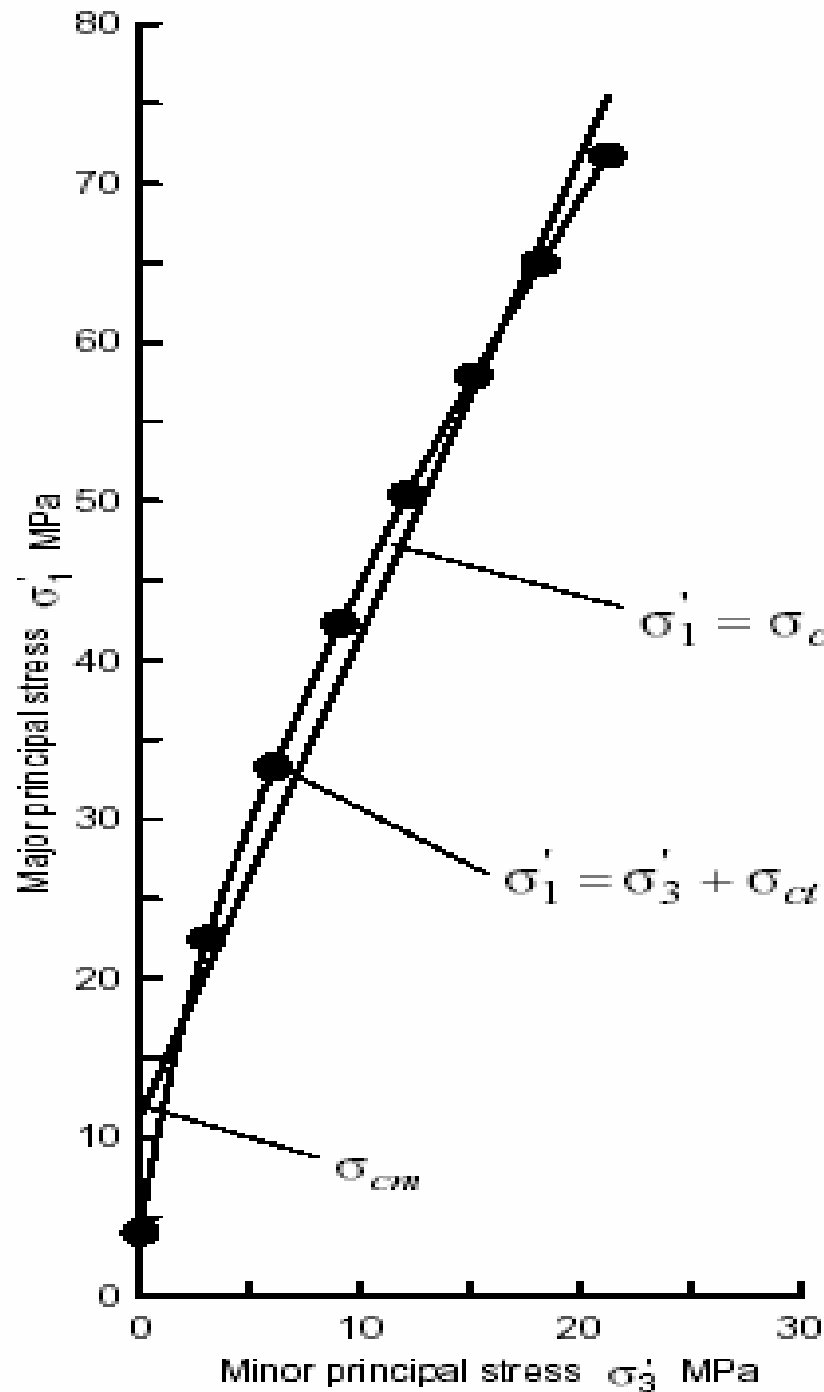


Mohr-Coulomb parameters

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + k\sigma_3'$$

$$\sin \phi' = \frac{k-1}{k+1}$$

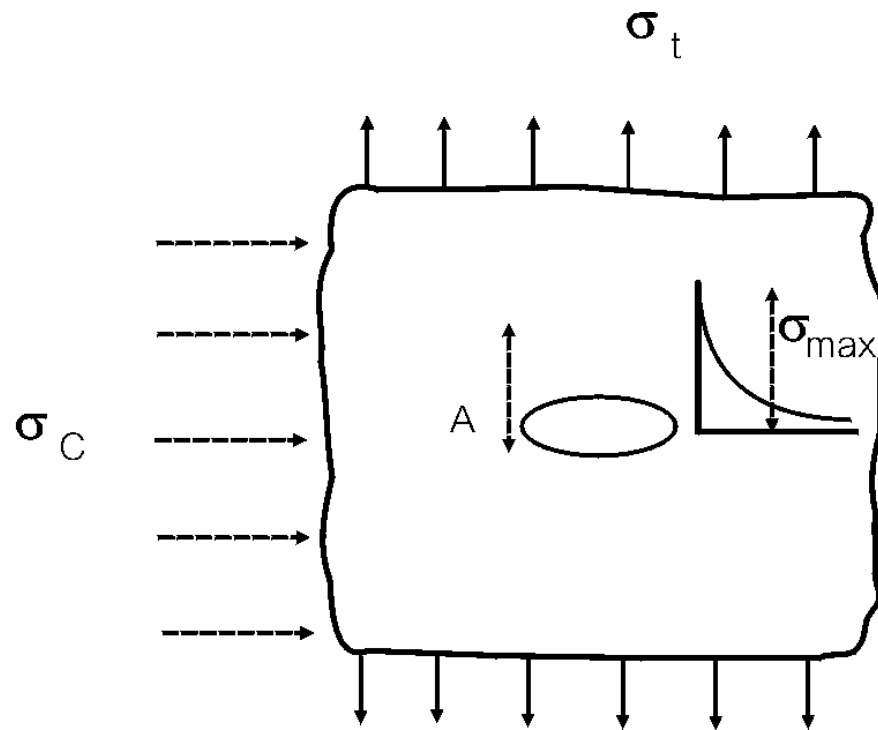
$$c' = \frac{\sigma_{cm}(1 - \sin \phi')}{2 \cos \phi'}$$



Mohr-coulomb

Hoek-Brown

เกณฑ์กำหนดการวิบัติของกริฟฟิธ (Griffith Criteria)



(ก)

- ทฤษฎีของกริฟฟิธได้กล่าวถึงรอยแตกเป็ดวงรีเล็ก ๆ มีอยู่ในมวลวัสดุ เมื่อมวลวัสดุได้รับความเค้นถึง σ_t ซึ่งเป็นความเค้นหลัก (principal stress) จะทำให้เกิดความเค้นดึงสะสมมากที่ปลายของรอยแตก และถ้ามีความเค้นกด σ_c ที่เป็ดความเค้นหลักเช่นเดียวกัน ความเค้นสะสมสูงสุดที่จุด A จะเกิดขึ้น และถ้าความเค้นนี้มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึง (Tensile strength, T_0) จะทำให้รอยแตกเปิดออก ซึ่งเขียนเป็นเกณฑ์กำหนดทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

- เมื่อ $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$

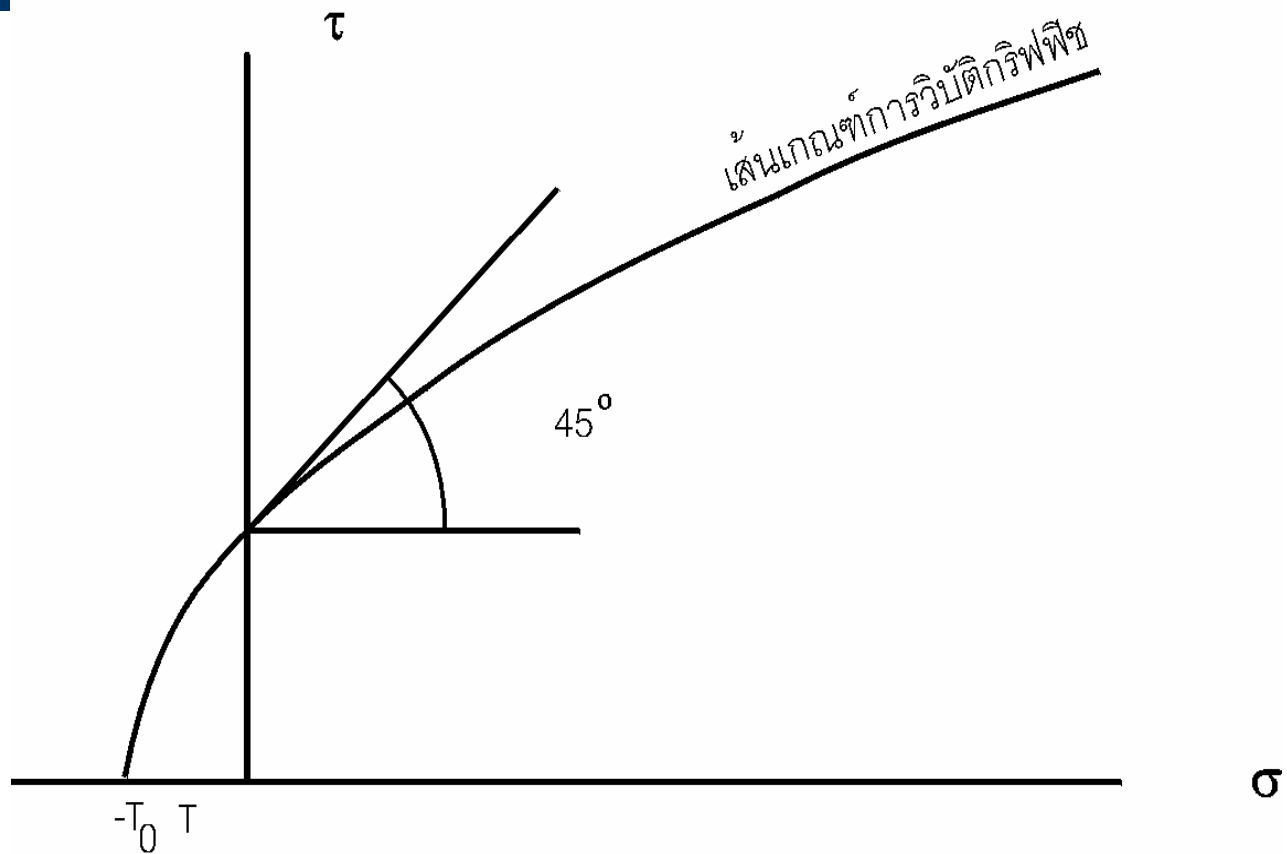
$$\sigma_3 = -T_0$$

- เมื่อ $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8 T_0 (\sigma_1 + \sigma_3)$$

(3-22)

กราฟเกณฑ์การวิบัติแบบกริฟฟิธ



- Murell ได้ปรับเปลี่ยนทฤษฎีกราฟิฟเทียบกับเกณฑ์กำหนดของมอร์ โดยให้ เป็นมุมระหว่างระนาบแตก และความเค้นหลักค่าน้อย (minor principal stress, σ_3) จะได้ว่า ซึ่งจะได้อสมการพาราโบลาของมอร์ (Parabolic Mohr's Envelope) ดังนี้คือ

$$\tau_f^2 = \frac{1}{4} \sigma^2 - \frac{1}{4} \sigma_3^2$$

เมื่อ $\tau_f =$ ค่าความเค้นเฉือนที่ระนาบการวิบัติ

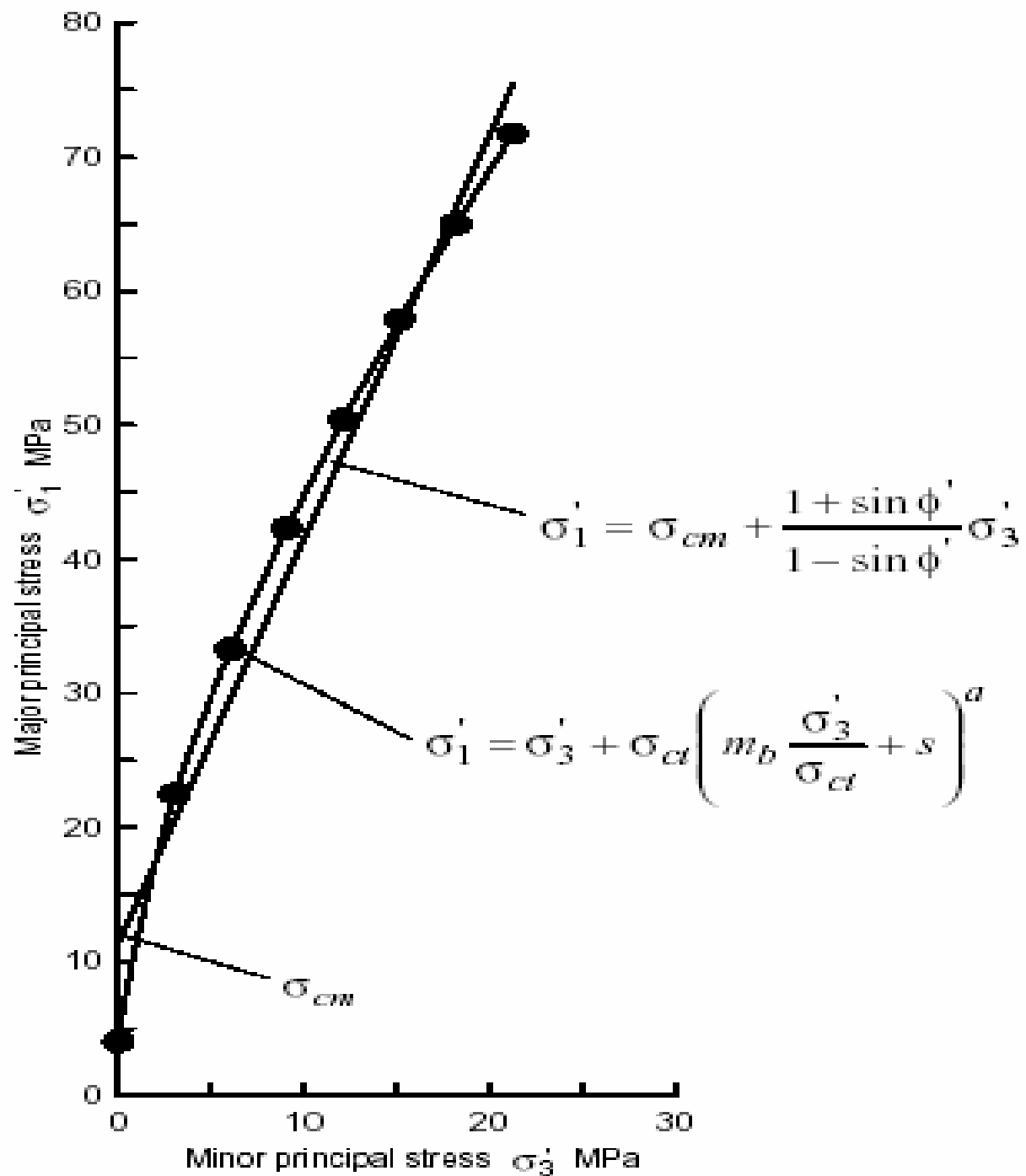
เกณฑ์กำหนดฮุกและบราวน์

(Hoek and Brown Criteria) Rockmass

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

where:

- m_b = a reduced value (for the rock mass) of the material constant m_i (for the intact rock)
- s = constants which depend upon the characteristics of the rock mass
- σ_{ci} = the uniaxial compressive strength (UCS) of the intact rock pieces
- σ_1, σ_3 = axial and confining effective principal stresses respectively



Hoek and Brown Failure Criteria

Intact rock condition

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Failure criteria for rockmass

- In most cases it is practically impossible to carry out triaxial or shear tests on rock masses at a scale which is necessary to obtain direct values of the parameters in the Generalized Hoek-Brown equation. Therefore some practical means of estimating the material constants m_b , s and a is required. According to the latest research, the parameters of the Generalized Hoek-Brown criterion [Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002)], can be determined from the following equations:

การหาค่าคงที่ในเกณฑ์กำหนดการวิบัติสุกและบราวน์
โดยค่า ดัชนีกำลังของมวลหิน (Geological Strength Index, GSI)

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right)$$

$$GSI > 25$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$$

$$a = 0.5$$

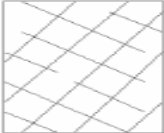
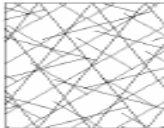
$$GSI < 25$$

$$s = 0$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

- GSI = Geological Strength Index
- m_i = a material constant for the intact rock parameter
- D = "disturbance factor" which depends upon the degree of disturbance to which the rock mass has been subjected by blast damage and stress relaxation.

varies from 0 for undisturbed in situ rock masses to 1 for very disturbed rock masses.

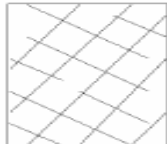
ROCK MASS CHARACTERISTICS FOR STRENGTH ESTIMATES		SURFACE CONDITIONS				
Based upon the appearance of the rock, choose the category that you think gives the best description of the 'average' undisturbed in situ conditions. Note that exposed rock faces that have been created by blasting may give a misleading impression of the quality of the underlying rock. Some adjustment for blast damage may be necessary and examination of diamond drill core or of faces created by pre-split or smooth blasting may be helpful in making these adjustments. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration.		VERY GOOD Very rough, fresh, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY ▼				
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	B/VG	B/G	B/F	B/P	B/VP
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	VB/VG	VB/G	VB/F	VB/P	VB/VP
	BLOCKY/DISTURBED- folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	BD/VG	BD/G	BD/F	BD/P	BD/VP
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces	D/VG	D/G	D/F	D/P	D/VP

¹ In earlier versions of this table the terms BLOCKY/SEAMY and CRUSHED were used, following the terminology used by Terzaghi (1946). However, these terms proved to be misleading and they have been replaced, in this table by BLOCKY/DISTURBED, which more accurately reflects the increased mobility of a rock mass which has undergone some folding and/or faulting, and DISINTEGRATED which encompasses a wider range of particle shapes.

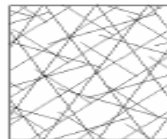
GEOLOGICAL STRENGTH INDEX

From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38.

STRUCTURE



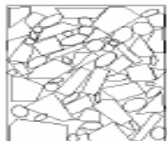
BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets



VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets



BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets



DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces

SURFACE CONDITIONS

VERY GOOD

Very rough, fresh unweathered surfaces

GOOD

Rough, slightly weathered, iron stained surfaces

FAIR

Smooth, moderately weathered or altered surfaces

POOR

Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments

VERY POOR

Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings

DECREASING SURFACE QUALITY ↗

↘ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES

