



108.01

工程地質

Engineering Geology

第十一週

斷層

授課教師：邱雅筑

2019/11/18



斷層

1. 斷層

1.1 應變橢圓與斷裂構造

1.2 斷層的幾何要素與位移

2. 斷層的分類

3. 斷層帶的特徵

4. 斷層的識別

5. 斷層對工程的影響

6. 地震與活動斷層

1.1 斷裂/破裂構造(Fracture)

- 岩層受地質應力的作用而發生變形，當所受的力超過岩石本身的強度時，岩石即發生破裂，形成斷裂構造(Fracture)
- 斷裂構造主要包括節理(Joint)及斷層(Fault)
- 地殼中發育的斷裂，其性質隨深度而不同；
 - 淺層：(脆性)斷層與節理
 - 中深：柔性剪裂帶
 - 斷層與剪裂帶之間：過渡斷裂
- 節理：沒有明顯錯移的脆性斷裂，是地殼上部岩石中發育最廣的一種地質構造
- 斷層：斷裂面兩側的岩塊發生明顯錯移現象之一種斷裂
- 原生斷裂(primary fracture)：如岩漿的冷縮節理
- 次生斷裂(secondary fracture)：構造節理及斷層

1.1 應變橢球

- 主應變軸構成之橢球：最大應變軸(最小主應力軸), 中間應變軸(中間主應力軸), 最小應變軸(最大主應力軸)
- 最大應變軸(最小主應力軸)：共軛剪裂面銳角平分線
- 最大應變軸=最長, 中間應變軸=次長, 最小應變軸=最短
- 張力節理：中間應變軸與最小應變軸構成的平面

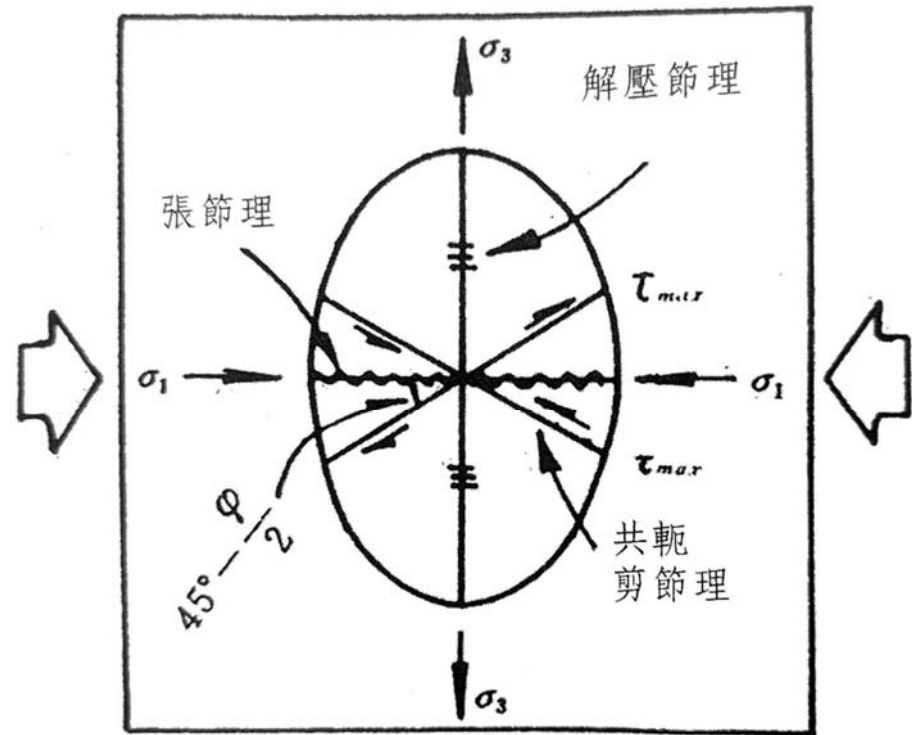


圖 8.1 應變橢圓球與斷裂構造的關係

1.1 應變橢球

- 應變橢球：由岩體斷裂面幾何推測造成斷裂的應力
- 應變橢球只能用來定性分析連續介質中的斷裂與應力之間的幾何關係，不能完全據此分析岩層變形及破壞時的應力狀態或大小
- 最大應變軸A-A
- 中間應變軸B-B
- 最小應變軸C-C
- 共軛剪力節理銳角交線平行C-C

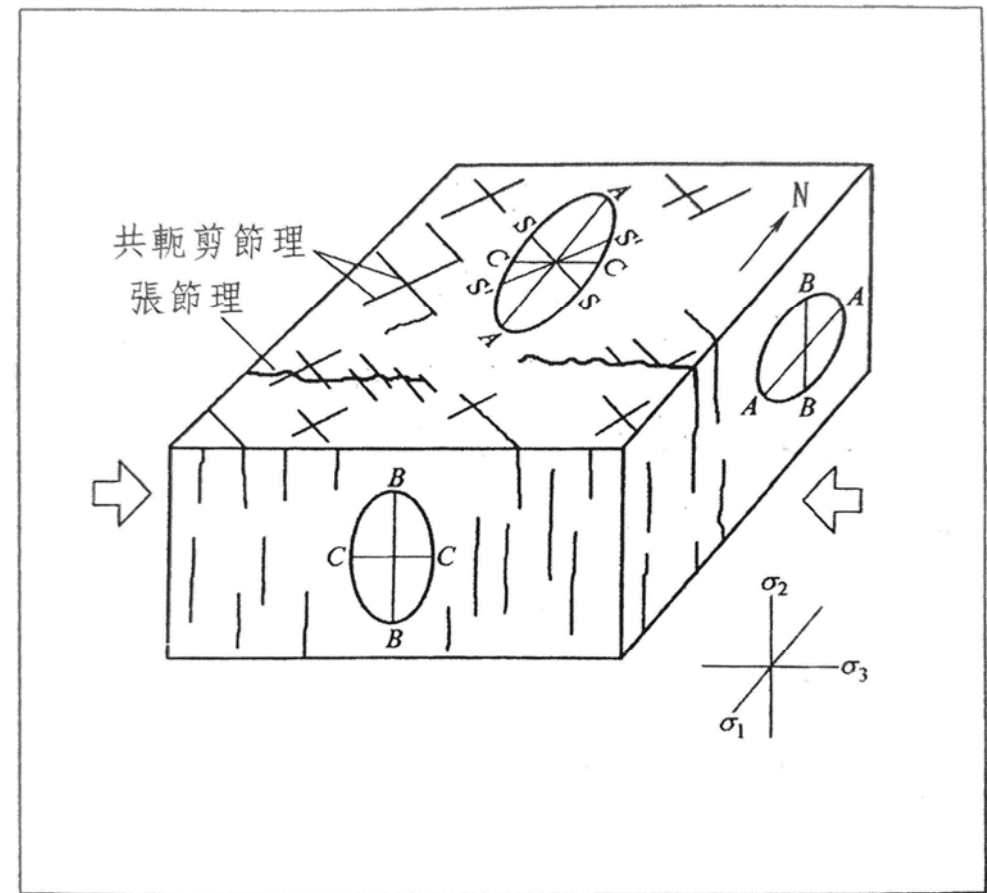


圖 8.2 應變橢圓球的應用

- 岩層受力後先發生塑性變形(褶皺)，再形成脆性斷裂(斷層)
- 圖8.3：SJ形成→岩層受擠壓形成褶皺，生成張力節理(TJ)
→形成剪力節理(SJ')→形成逆斷層(CF)、平移斷層(SF)、
正斷層(TF)
- 後期生成的斷裂面，會中斷(終止)於較早期的斷裂面

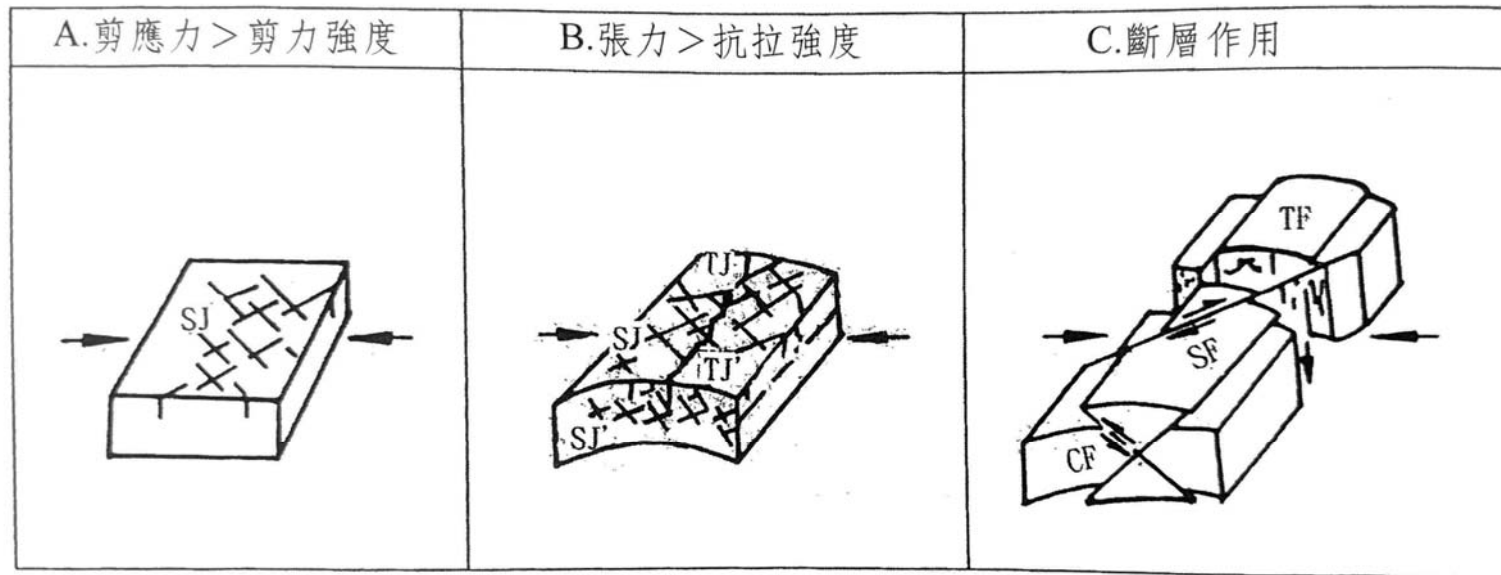


圖 8.3 斷裂構造的形成過程

1.2 斷層的幾何要素

- 斷層面：將岩層斷成兩部分的破裂面，有利於兩側岩塊發生位移的面就是斷層面(Fault Surface)
- 面狀構造，可用走向、傾角、傾向等位態三要素描述
- 斷層帶：有些斷層的位移是沿著許多密集的破裂面發生的，這時的斷層就是一個複雜的破碎帶，稱為斷層破碎帶或斷層帶(Fault Zone)
- 斷層帶的兩側可能還受斷層錯動的影響而伴生節理，或發生牽引彎曲的狹長帶，稱為斷層影響帶

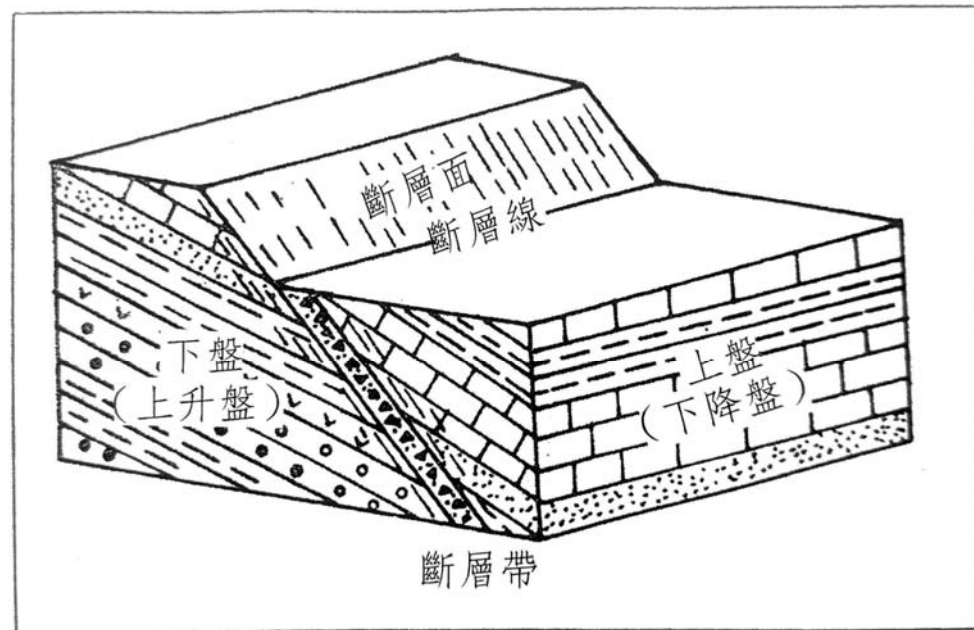


圖 8.4 斷層的幾何要素



照片 4.22 小規模地塹，兩側之裂面為小規模正斷層，
英國 Hartland， Cornwall (洪如江攝)





round**TAIWAN**round

1.2 斷層的幾何要素

- 斷層線：斷層與地面的交線，亦即斷層在地表的出露線，稱為斷層線，或稱斷層跡線
- 斷層面的傾角越緩，地形起伏越大，斷層線的延伸也就越複雜
- V字形法則(V shape rule)

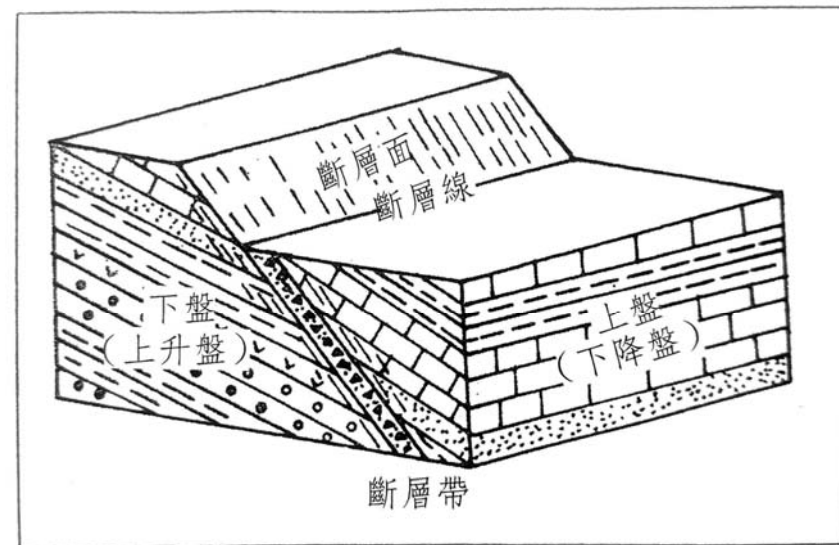


圖 8.4 斷層的幾何要素

岩層位態的地形表現

- 水平層面切過複雜的地形面時，其交線會平行於等高線延展
- 垂直的層面直切等高線，不受崎嶇不平的地形面影響
- 傾斜的層面遇到河谷則會發生局部轉折，並且形成V字形

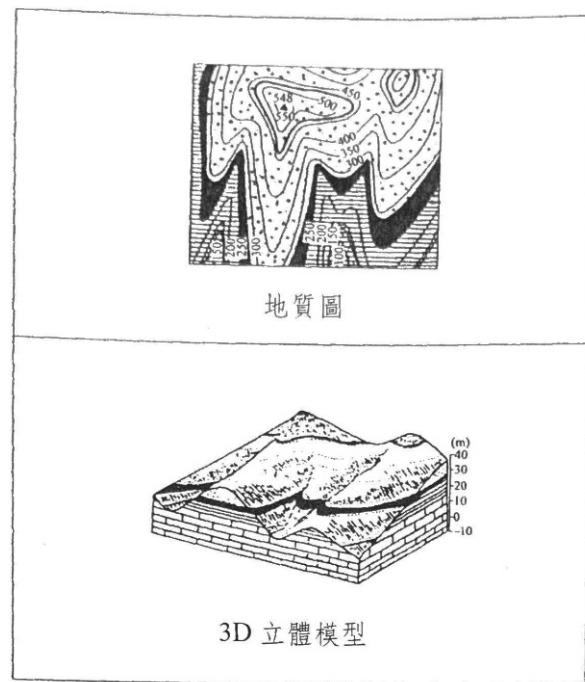


圖 7.4 水平岩層在地質圖上的表現 (徐九華等, 2001)

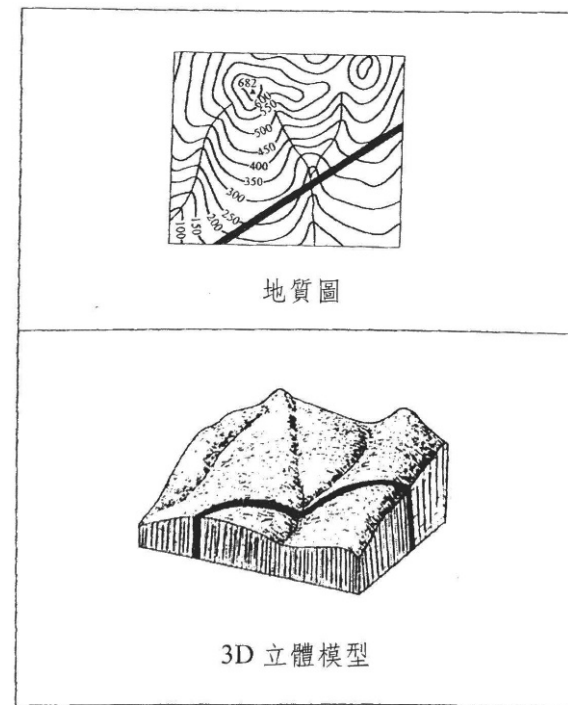


圖 7.5 垂直岩層在地質圖上的表現 (徐九華等, 2001)

V字形法則(V shape rule)

- 傾斜岩層遇河谷顯現V字或U字
- V字型指向下游：岩層一定向下游傾斜
- V字型指向上游：岩層可能向上游或下游傾斜。
 - 岩層傾角 $>$ 河谷坡度，V字型指向上游
 - 岩層傾角 $<$ 河谷坡度，V字型指向下游

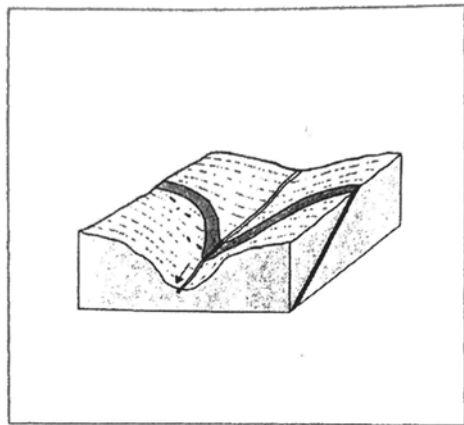


圖 7.6 V 字型露頭線指向下游，岩層一定向下游傾斜

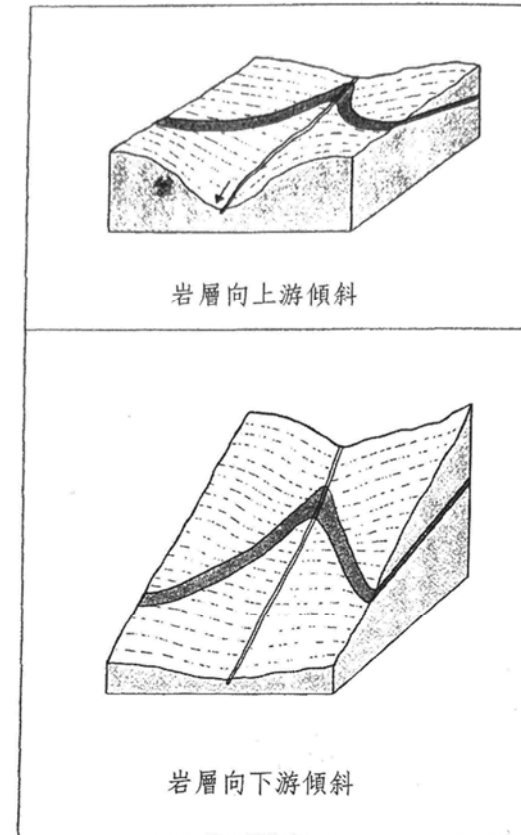


圖 7.7 V 字型露頭線指向上游，岩層可能向上游傾斜，也可能向下游傾斜

岩層三角面

- V字如果不明顯，觀察相鄰河谷間的谷間嶺
- 如果岩層的走向橫過河谷，在谷間嶺會出現岩層三角面，頂角指向上方
- 三角面即層面，故為順向坡
- 岩層傾角越緩，V角越尖銳；岩層傾角越陡，V角越寬大

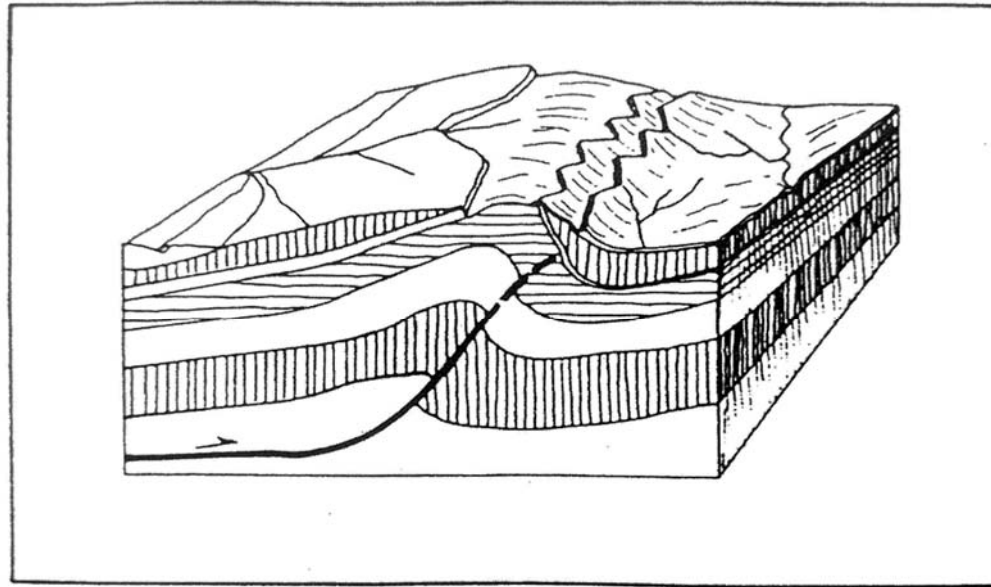
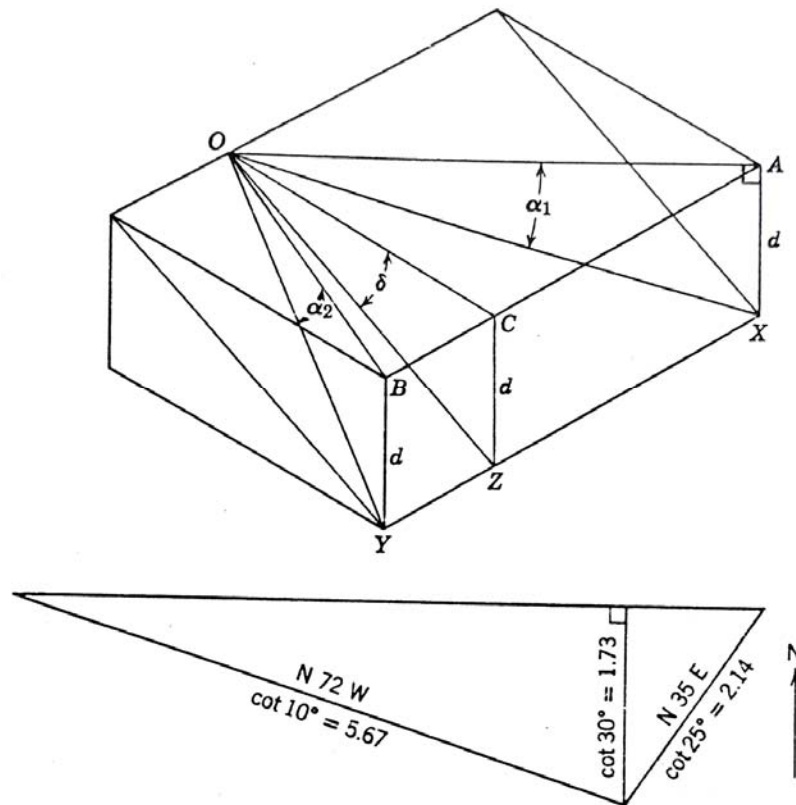


圖 7.8 岩層三角面

用兩個視傾角決定岩層位態

- 同岩層，量到兩個視傾角 $N72^\circ W, 10^\circ E$ 以及 $N35^\circ E, 25^\circ E$



• 求解流程

- 求三角形 OBA 之 OA 與 OB 比例(以 d 之倍數表示)
- 餘弦定理、正弦定理
- $\angle BOC$ (或 $\angle AOC$)
- OC 長
- $\delta = \tan^{-1} \left(\frac{d}{OC} \right)$

用三孔鑽探資料求岩層位態

孔號	井口高程	鑽遇岩層界面的深度	岩層界面的高程
A	500	0	500
B	675	675	0
C	520	320	200

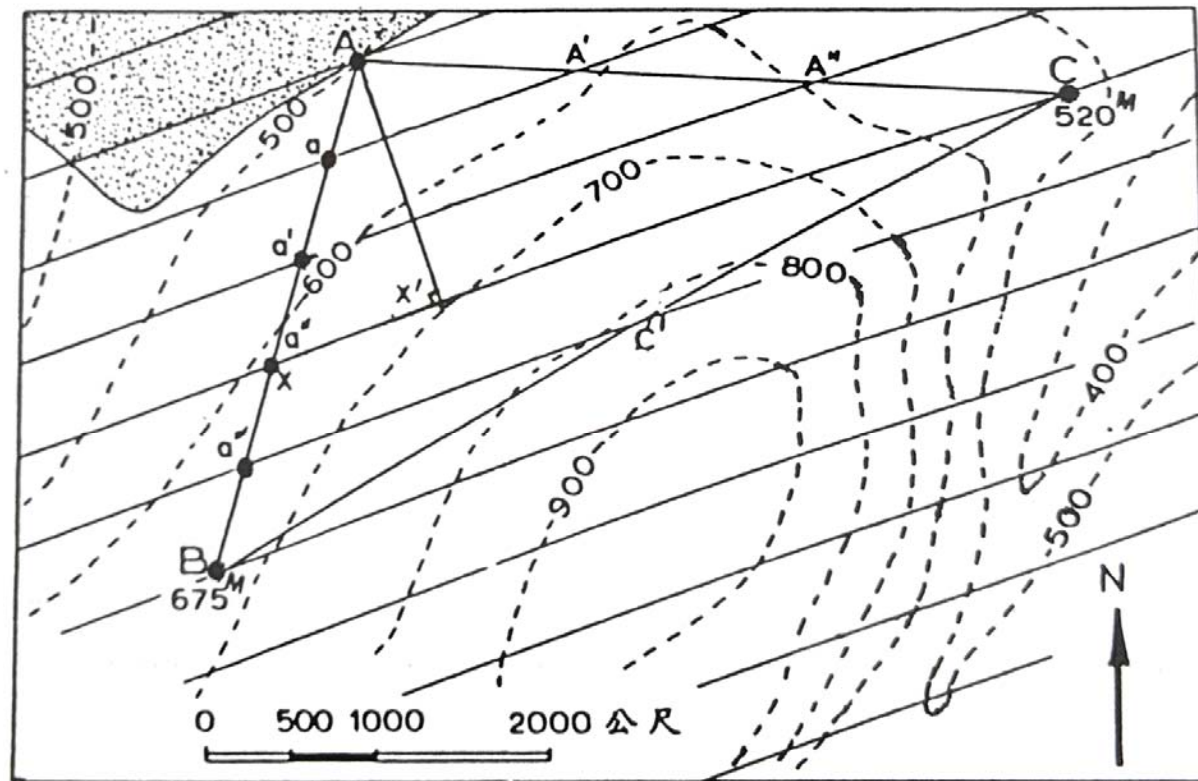


圖7.3 利用三個鑽孔的資料求取岩層的位態

- 將深度轉換為高程
- 取同高程位置求岩層位態

1.2 斷層的幾何要素

- 斷盤：斷層面兩側的岩體稱為斷盤(Fault Wall)
- 如果斷層是傾斜的，則位於斷層面上側的部分稱為上盤(Hanging wall)，位於斷層面下側的部分稱為下盤(Footwall)
- 根據兩盤相對運動，可以把相對上升的一盤稱為上升盤(Upthrown Side)，相對下降的一盤稱為下降盤(Downthrown Side)
- 相對運動：只知斷層發生後的結果，而不知其過程

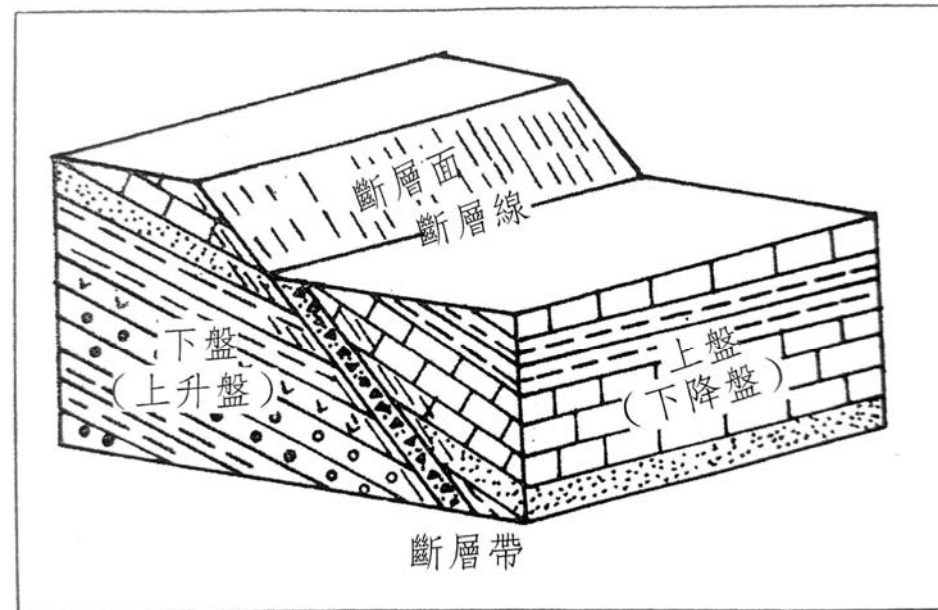


圖 8.4 斷層的幾何要素

1.2 斷層的位移

- 測定斷層位移需要先找到對應點或對應層
- 滑距(slip)：斷層兩盤的實際位移量稱為滑距。
- 兩個對應點間的真正位移距離稱為**總滑距(Net slip)**，總滑距在斷層走向線上的分量稱為**走向滑距**，在斷層傾斜線上的分量稱為**傾向滑距**

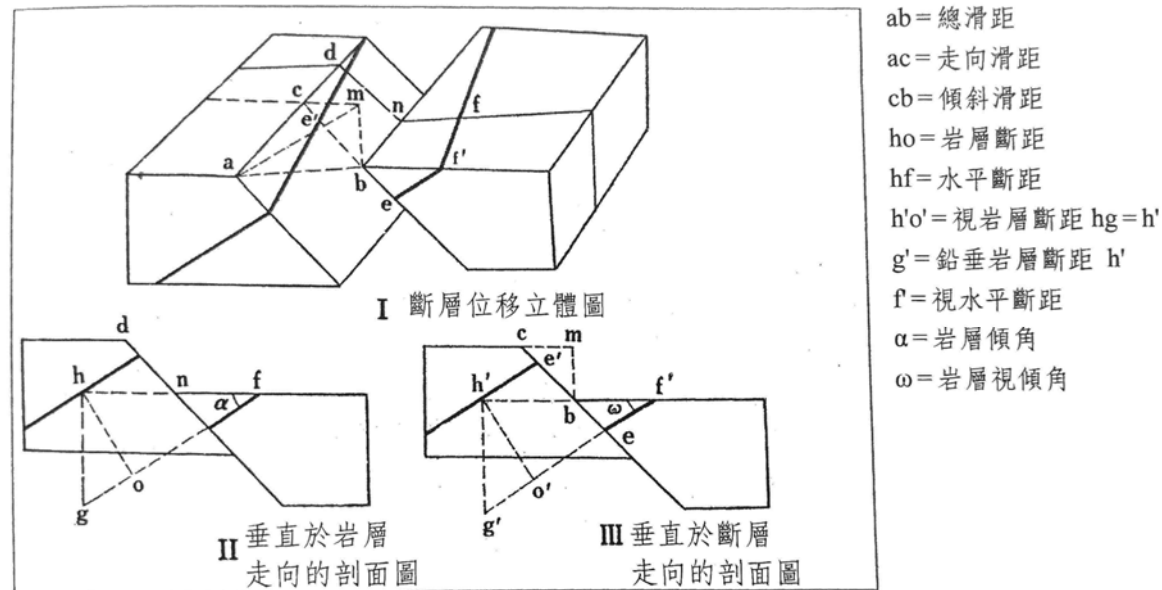


圖 8.5 斷層的滑距及斷距

1.2 斷層的位移

- 斷距(Separation)：指斷層面上任何參考面被斷層錯開的兩部分之間的相對距離
- 垂直於岩層走向的剖面：岩層斷距、鉛錘岩層斷距、水平斷距
- 垂直於斷層走向的剖面：視岩層斷距、視鉛錘岩層斷距、視水平斷距

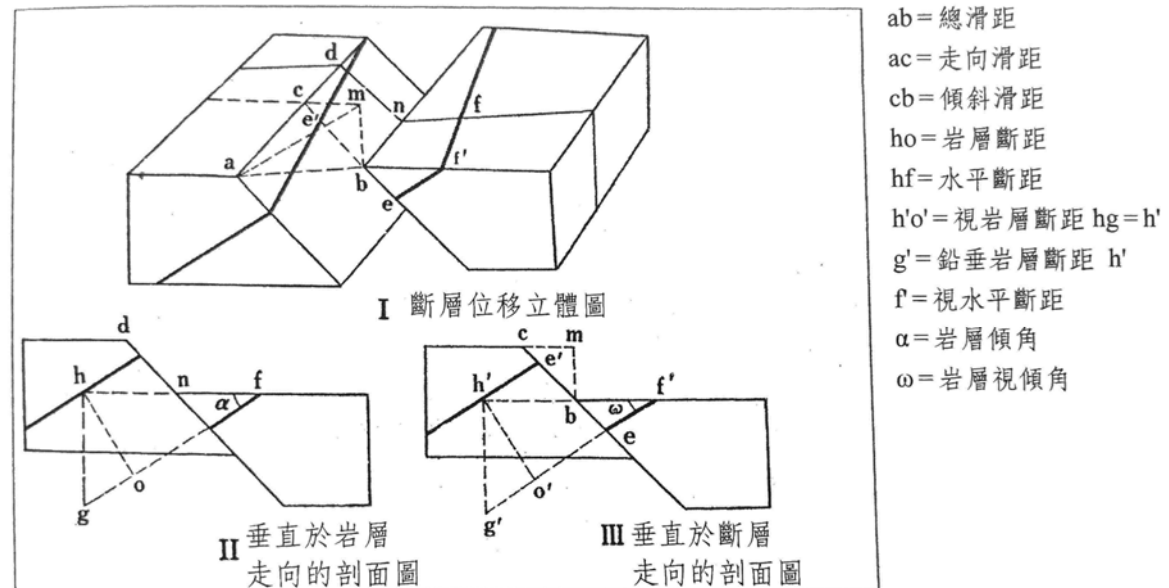


圖 8.5 斷層的滑距及斷距

- 工程師比較關心的是岩層錯開的距離，而不是斷層的真正位移

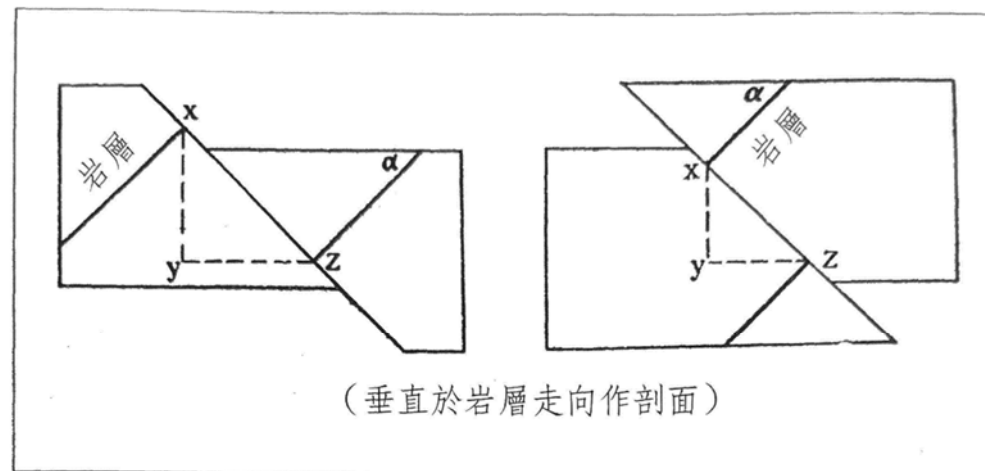


圖 8.6 岩層的落差 (xy) 及平錯 (yz)

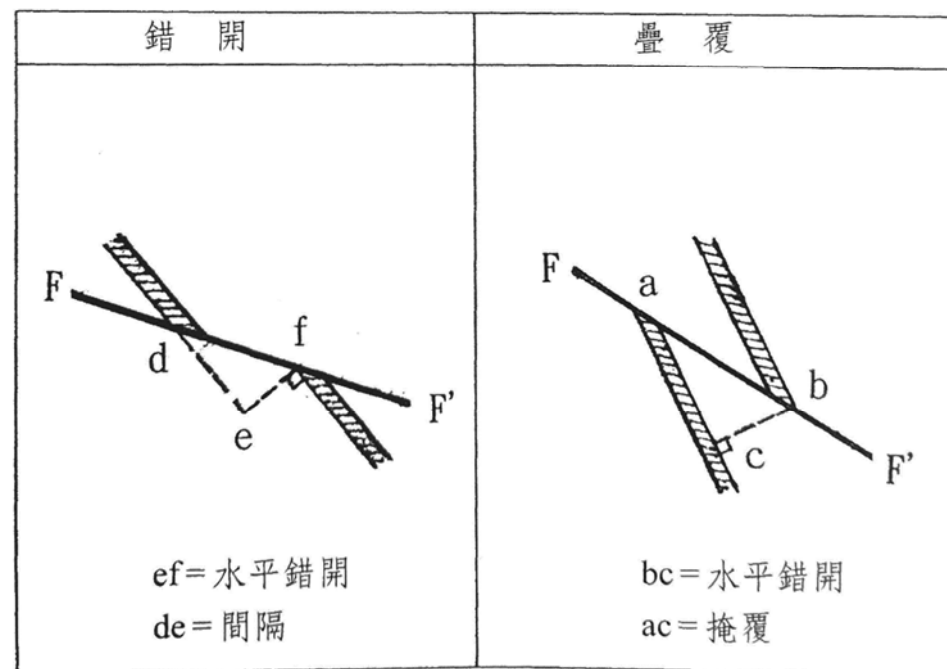
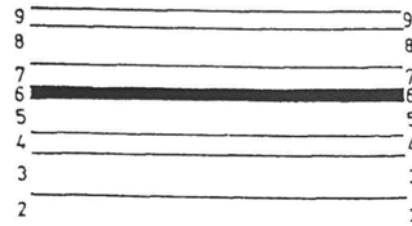


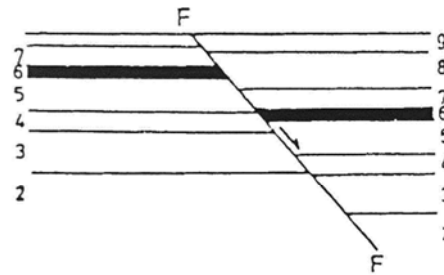
圖 8.7 岩層的錯開與掩覆

2. 斷層的分類

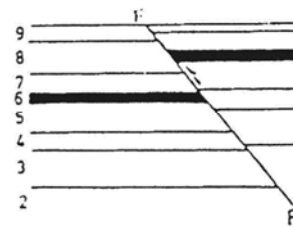
- 依據斷層兩盤相對運動的方向，分成正斷層、逆斷層、平移斷層三大類



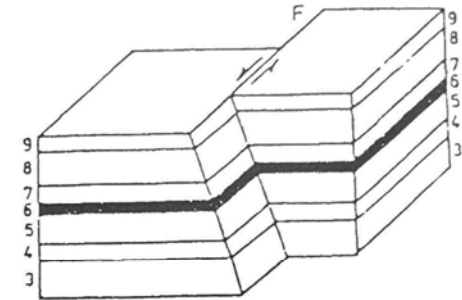
(a) 沈積岩在未發生斷層前之剖面



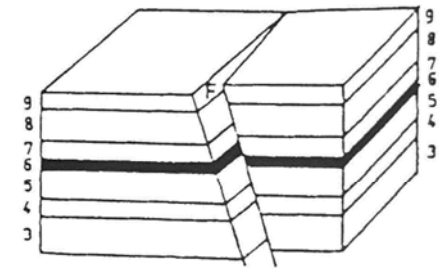
(b) 正斷層 (Normal Fault)



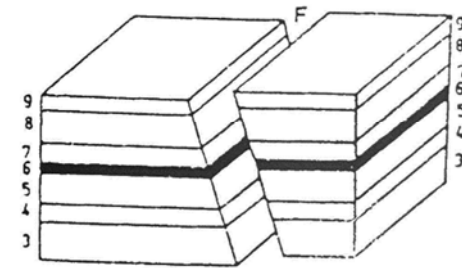
(c) 逆斷層 (Thrust Fault)



(d) 平移斷層 (Strike-Slip Fault)



(e) 鉸移斷層 (Hinge Fault)

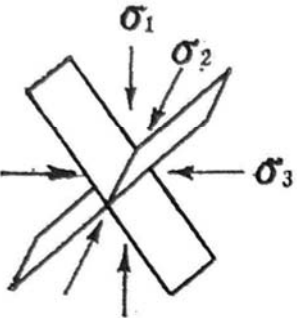
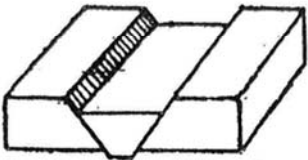
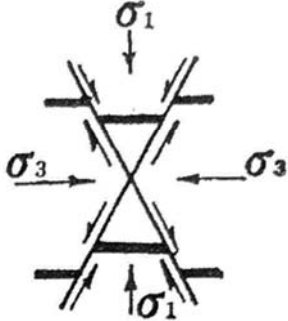


(f) 斜移斷層 (Oblique-Slip Fault)

圖 4.3 常見斷層之示意圖(圖中數字示地層或岩層沉積次序，F 示斷層面)

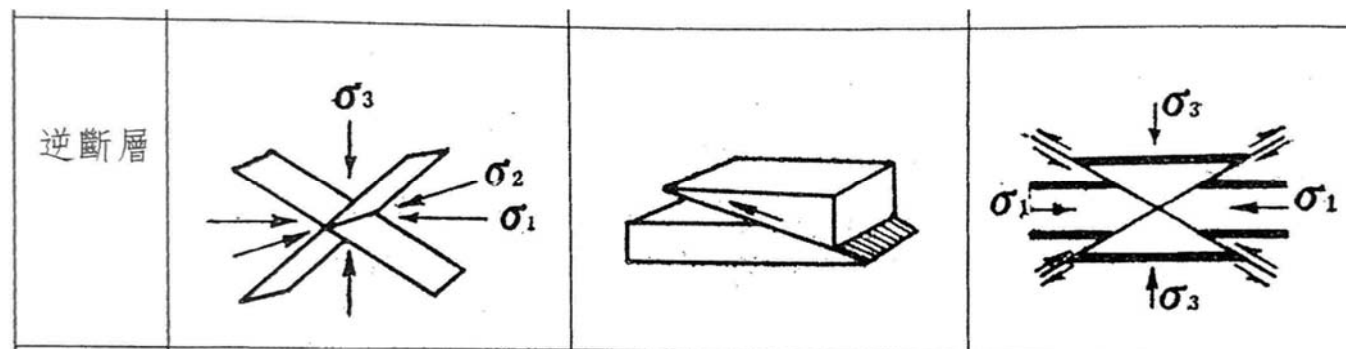
2. 斷層的分類

- 正斷層：相對於下盤而言，上盤沿斷層面向下方運動的斷層，稱為**正斷層(normal fault)**
 - 多數正斷層是岩層在水平張力及自身重力的雙重作用下形成的，故又稱為**重力斷層**
 - 斷層面比較粗糙，傾角較陡
 - 常形成張裂斷層角礫岩的斷層帶，往往充填有岩脈，型態不規則
 - 斷層面上幾乎沒有擦痕，少有擠壓變形現象

斷層類別	應力場	錯動斷塊圖	應力與錯斷
正斷層			

2. 斷層的分類

- 逆斷層：上盤沿層面相對上升的斷層，稱為逆斷層 (reverse fault)
 - 若斷層面的傾角小於 45° ，則稱為逆衝斷層 (Thrust fault)
 - 對於規模很大，位移以公里計，斷層傾角小於 30° 的逆斷層，則稱為逆掩斷層 (Overthrust fault)
 - 由近乎水平的擠壓應力所造成
 - 容易產生褶皺構造，因此逆斷層常與褶皺伴生
 - 先褶皺後斷層



逆斷層

- 斷層面常呈舒緩的波浪狀，面上可見與走向大致垂直的逆衝擦痕
- 斷層破碎帶的岩石都為壓碎角礫岩、破碎岩、糜稜岩等
- 斷層帶附近岩層有擠壓、柔皺、劈理化、片理化等現象
- 大規模逆掩斷層常見老岩層逆掩覆蓋在新岩層之上，這些老岩層稱為外來岩體或推覆體，斷層面以下的岩體則稱為原地岩體

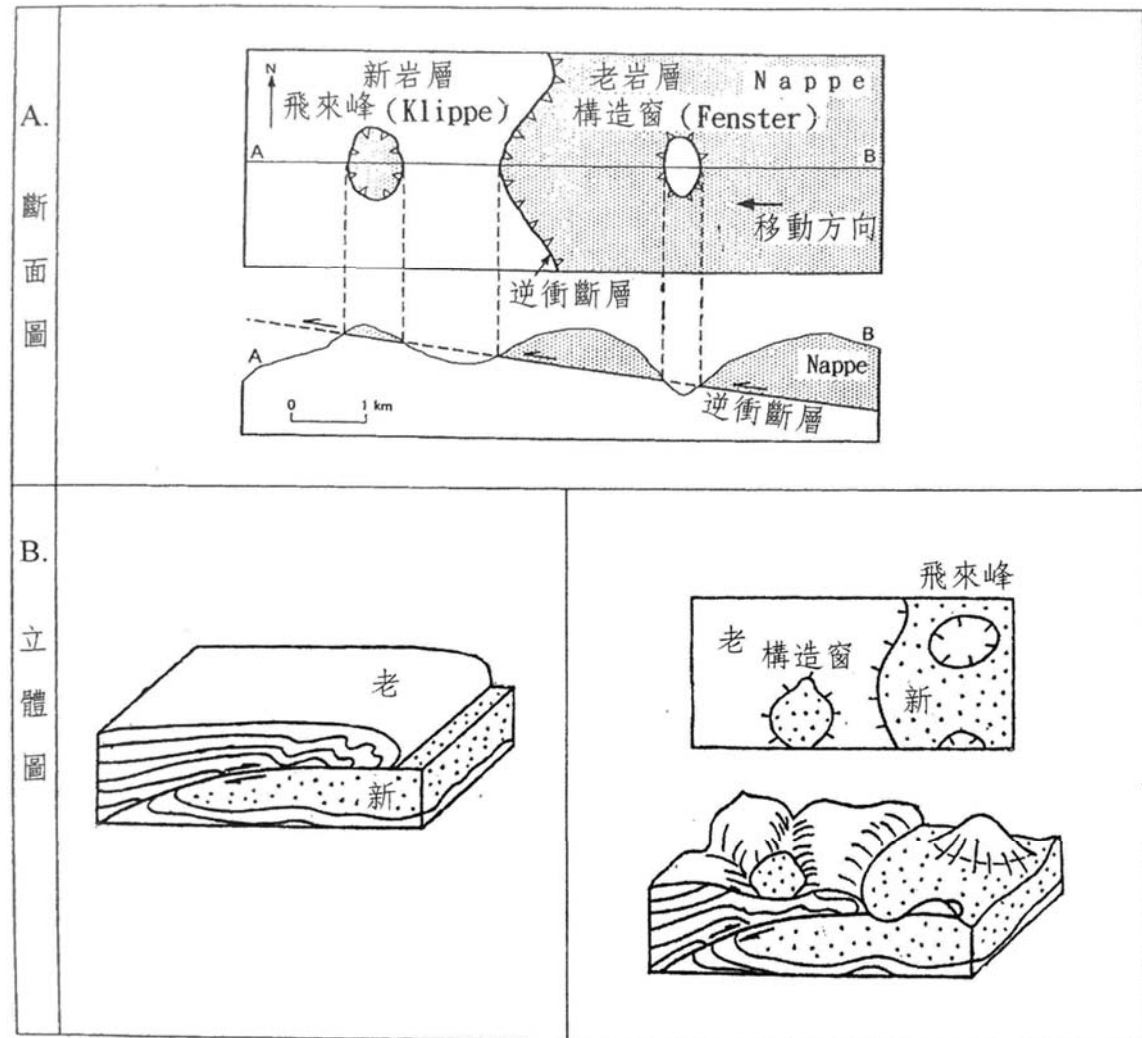
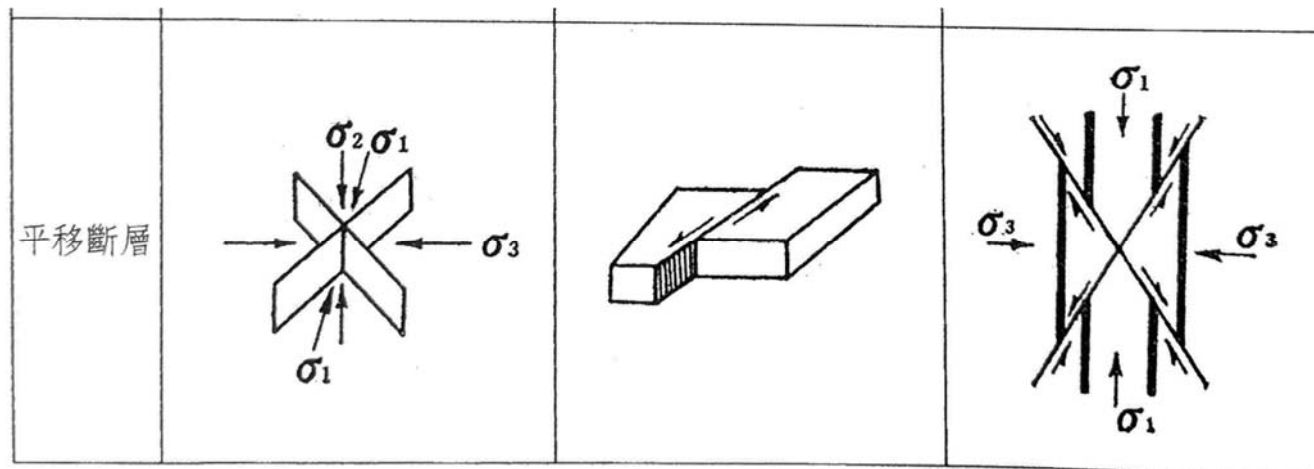


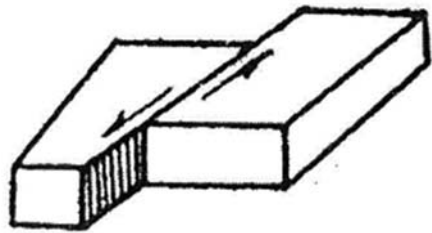
圖 8.10 構造窗及飛來峰的形成發育過程

2. 斷層的分類

- 平移斷層：兩盤沿著斷層面的走向發生相對錯動的斷層，稱為**平移斷層**，又稱為**走向斷層(Strike-slip fault)**
 - 最大與最小主應力呈水平狀態，斷層面走向與最大主應力方向夾銳角 $45^\circ - \phi/2$ ，有時成對出現，一個右移，一個左移
 - 按照兩盤相對位移的方向，可分為**左移斷層**及**右移斷層**。立於斷層線上，斷層線右側地塊向自己移動就是右移斷層；斷層線左側地塊向自己移動就是左移斷層。



- 一般傾角較大，接近直立，面上有大量的擦痕
- 斷層可能同時具有上下及水平方向平移分量，也可能具有旋轉運動的性質。
 - 旋轉軸位於斷層的尾端
 - 旋轉軸位於斷層的中點



平移斷層

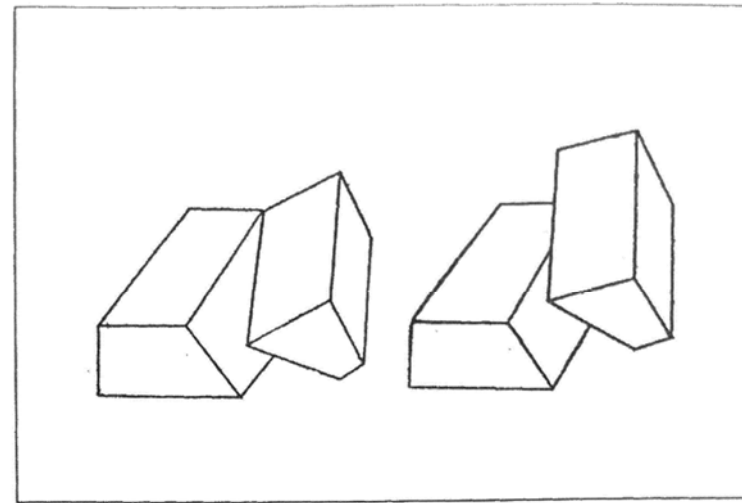


圖 8.11 斷層的旋轉運動

三類斷層之綜合比較

FIGURE 9.8 The different categories of faults.

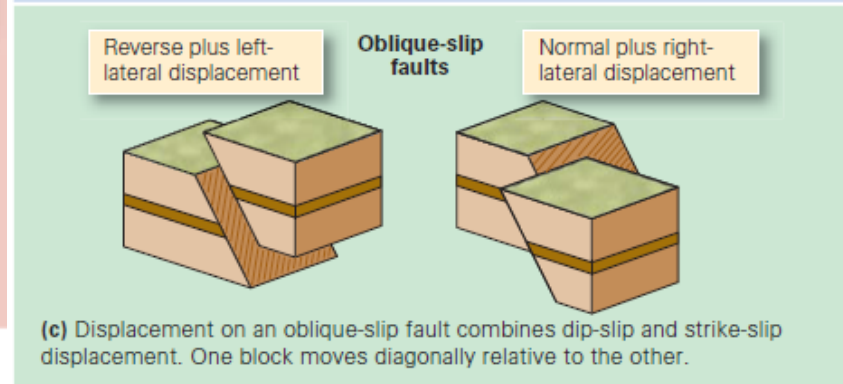
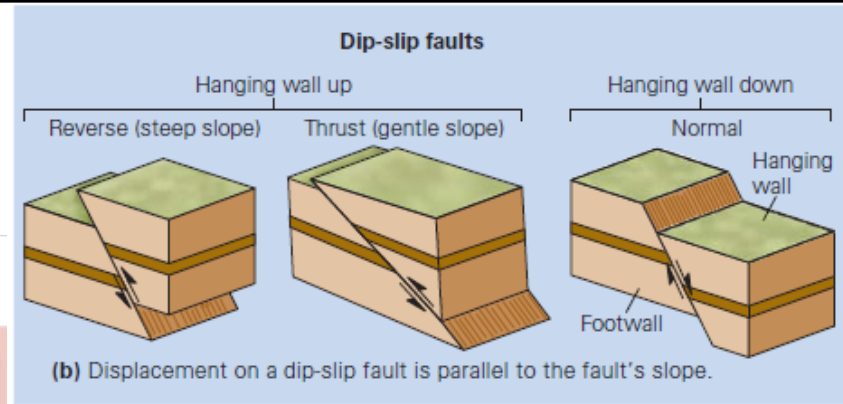
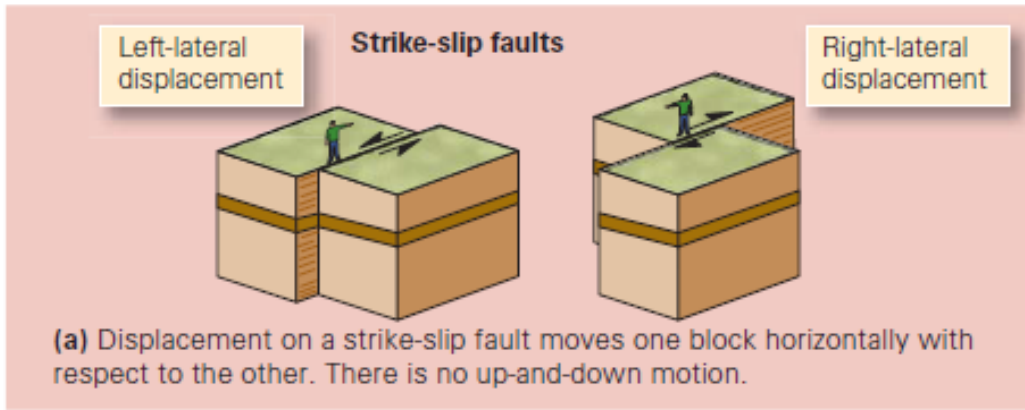


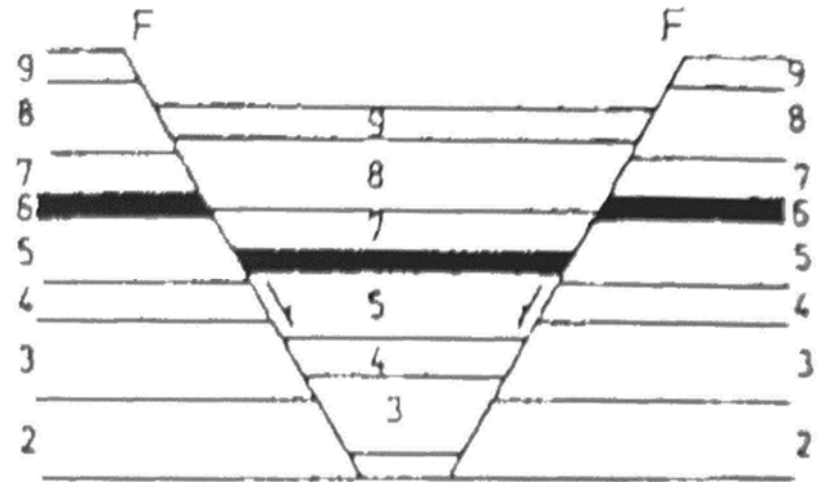
表 8.1 斷層的類型與區別

Marshak (2012)

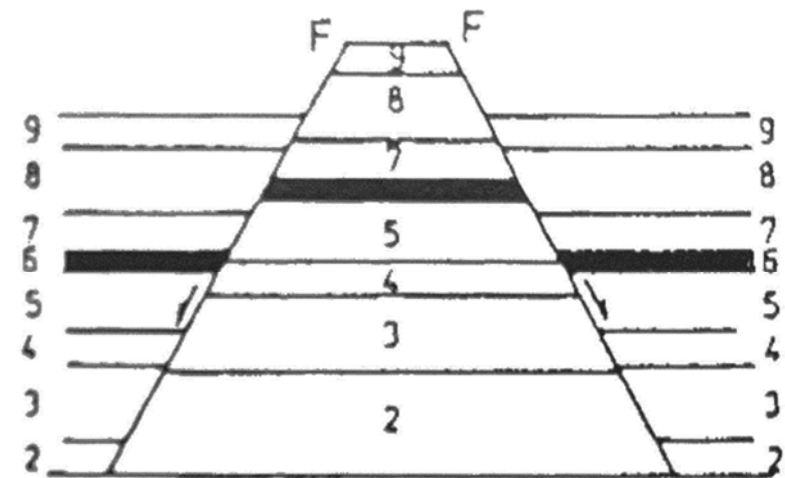
依兩盤相對運動的方向分類	上盤的相對運動方向	斷層面的傾角	σ_1 的位態	σ_3 的位態	σ_2 的位態	斷層的走向	斷層帶	通水性
正斷層	向下	$> 45^\circ$ ($60^\circ \sim 80^\circ$)	鉛直	水平	水平	$\parallel \sigma_2$	寬而破碎	通水
逆斷層	向上	$< 45^\circ$ ($20^\circ \sim 40^\circ$)	水平	鉛直	水平	$\parallel \sigma_2$	最寬，斷層泥	阻水
平移斷層	水平	$\sim 90^\circ$	水平	水平	鉛直	$\perp \sigma_2$ 與 σ_1 成 ($45^\circ - \Phi/2$) 夾角 (約 30°)	窄	中等

地塹與地壘

- 地塹(Graben)常為長條形的相對下降之斷塊，兩邊受相向傾斜的正斷層所限
 - 大：裂谷，如東非裂谷
 - 小：背斜軸部
- 地壘(Horst)常為長條形的相對上升之斷塊，兩邊受相向傾斜的正斷層所限



(a)地塹



(b)地隆 (或譯地壘)

成組出現的斷層

- 階梯狀斷層(Step Fault)：由一組位態大致相同的正斷層，各自的上盤依次下降，形成有如階梯一樣的斷層組合；總體位移為各單一斷層位移之和。
- 覆瓦狀斷層(Imbricate Fault)：由一系列位態相近的低角度逆斷層所組成，各斷層的上盤依次相對上升，在剖面上呈屋瓦狀或鱗片狀。

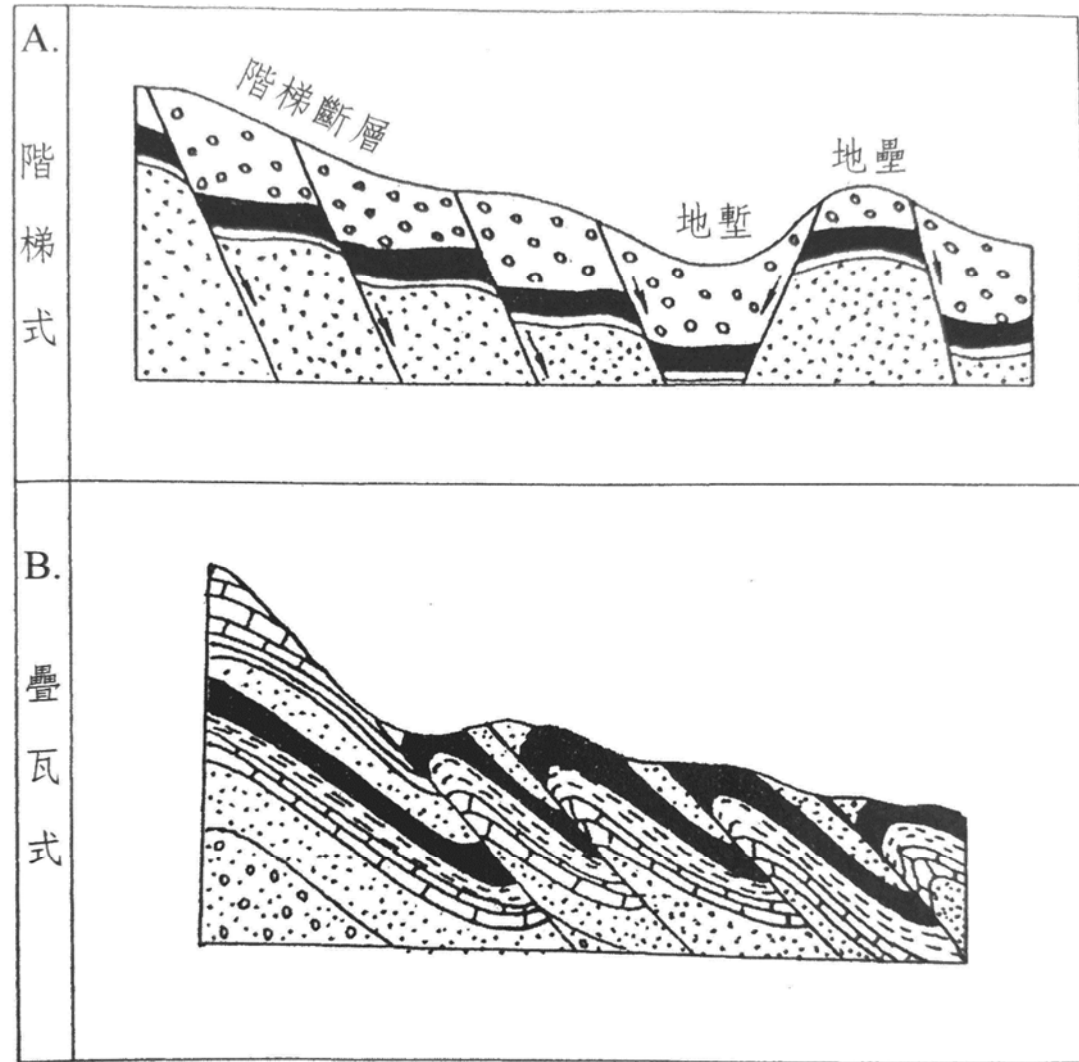
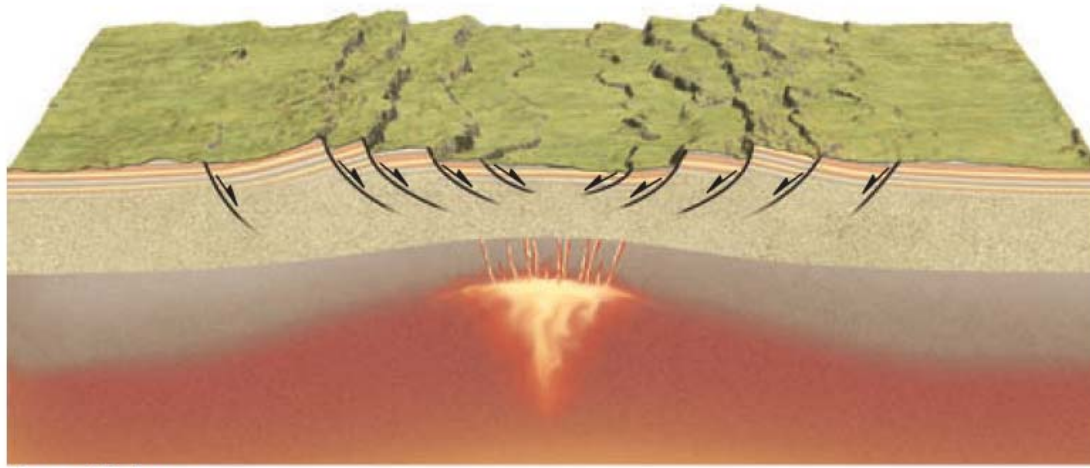
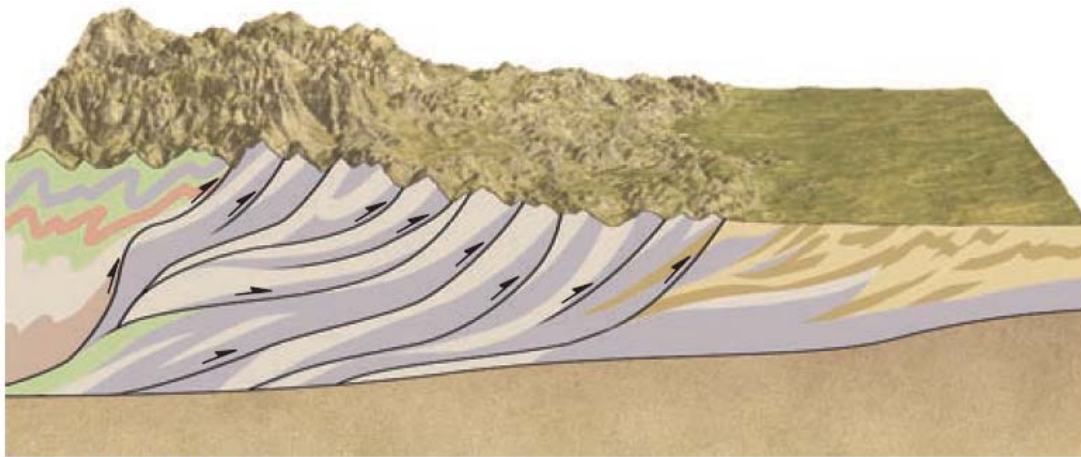


圖 8.13 幾種常見的斷層組合型態

成組出現的斷層



East Africa



Canadian Rockies

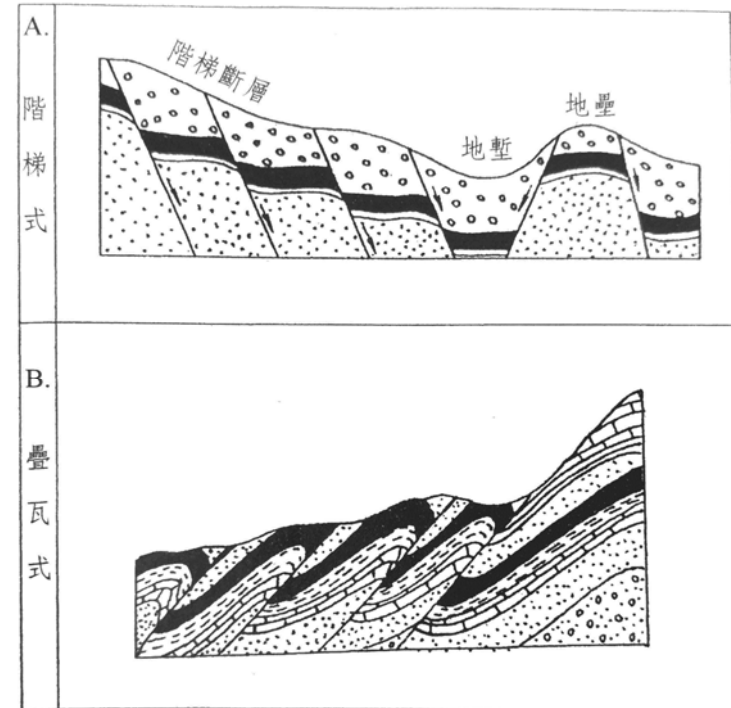


圖 8.13 幾種常見的斷層組合型態

3. 斷層帶的特徵

1) 擦痕(slickensides)：斷層發生過程中，其兩盤岩層在相對滑動時，由岩石被磨碎的岩屑及岩粉在斷層面上磨擦刻劃而留下來的痕跡

- 彼此平行或均勻的細條
- 一系列相間排列的脊和槽
- 一端寬且深，另一端窄而淺
- 由寬且深的一端向窄而淺的一端通常指示對盤的運動方向；食指順此方向觸摸會感覺光滑。

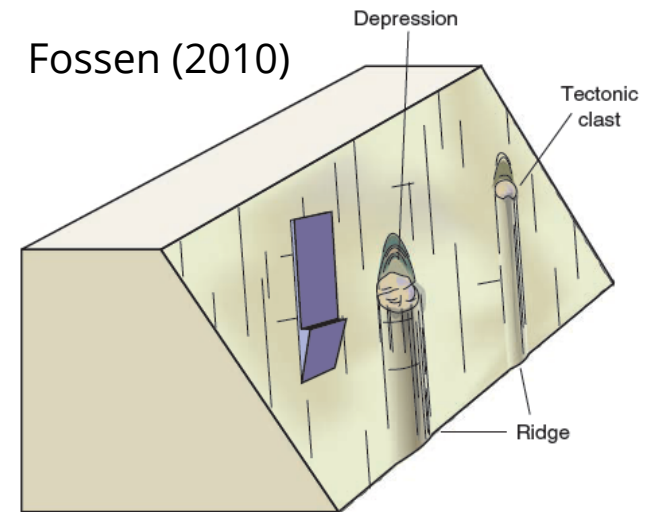


Figure 9.4 Pointed asperities or tectonic clasts sitting on fault surfaces may form depressions on the lee side and ridges on the opposite side. Such lineations are ridge-in-groove lineations.



<http://www.turnstone.ca/rom82.htm>

3. 斷層帶的特徵

2) 斷層岩：斷層運動使其兩側原來的岩石發生破碎、重結晶及礦物定向排列等一系列新形成的岩石，稱為斷層岩。按破碎及構造特徵，斷層岩可分為：

- 斷層角礫岩(fault breccia)：由稜角狀碎屑所組成的角礫，經過重新膠結的構造岩，其角礫能保持原岩特點
- 糜稜岩(mylonite)：斷層帶中的岩石被強烈搓碎及研磨後又膠結起來，形成一種粉狀微粒的岩石，肉眼不易辨認其顆粒。
- 斷層泥(fault gouge)：泛指斷層中鬆軟、未固結的、粉末狀的黏土或黏土狀物質，通常是親水性較強的黏土礦物及石英所組成。

斷層角礫岩&糜稜岩

- 淺層形成斷層角礫岩，深層形成糜稜岩

▶ SmartFigure 8.25

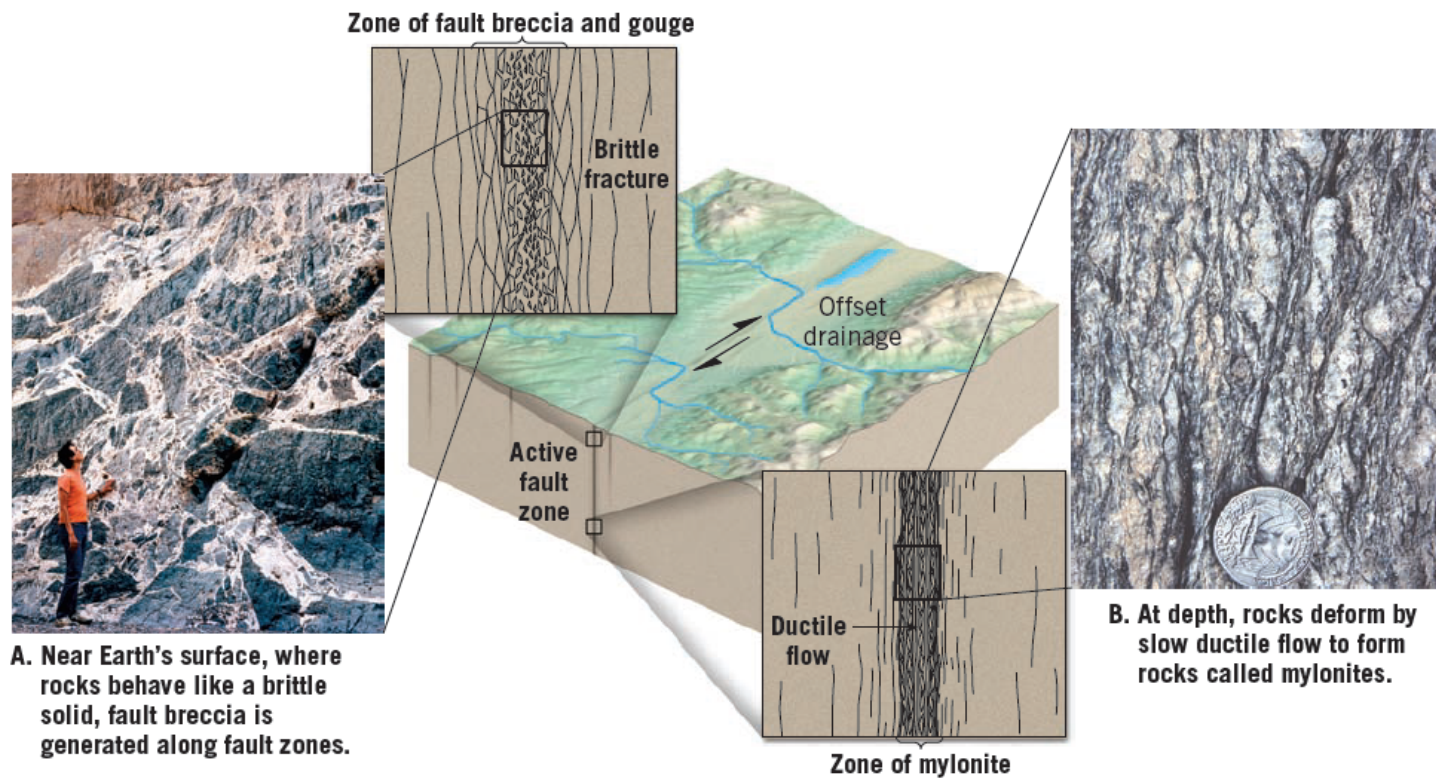
Metamorphism along a fault zone (Photo A by A. P. Trujillo; photo B by Ann Bykerk-Kauffman)

TUTORIAL

<https://goo.gl/BbHSb8>



Lutgens et al.
(2016)



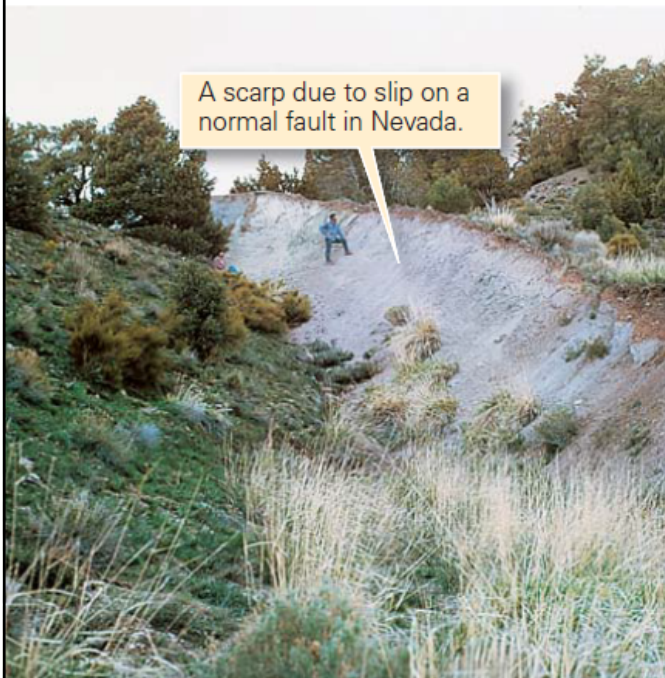
斷層泥



斷層帶的特徵

- 斷層角礫岩+擦痕

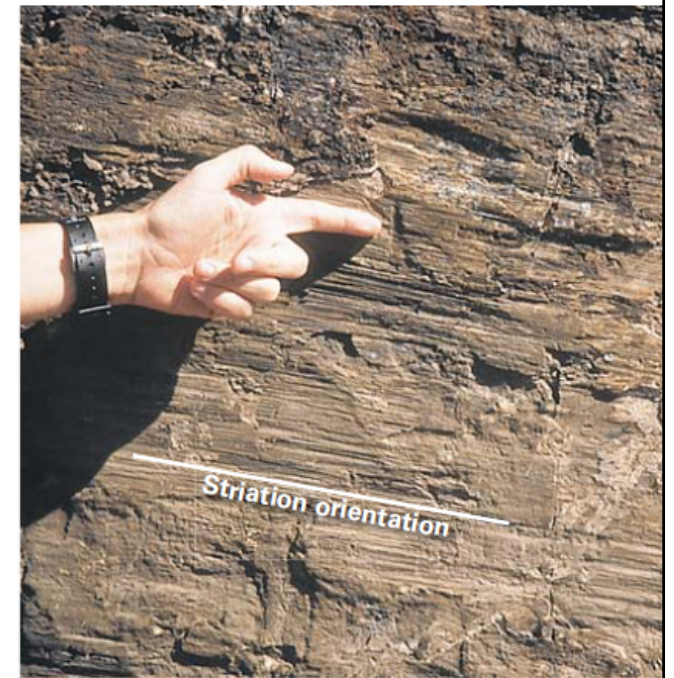
FIGURE 9.10 Features of exposed fault surfaces.



(a) A fault scarp develops where faulting displaces the land surface.



(b) This fault breccia consists of irregular fragments of light-colored rock.



(c) Striations on the surface of a strike-slip fault may look like grooves or scratches.

Marshak (2012)

3. 斷層帶的特徵

3) 拖曳構造(Drag)：斷層兩盤沿著斷層面發生相對運動時，斷層旁側的岩層受到摩擦力之拖曳而產生的弧形彎曲現象

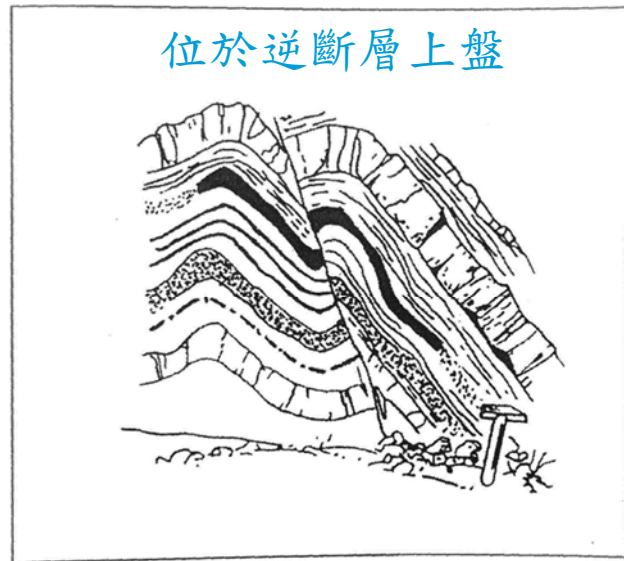


圖 8.16 斷層旁側的拖曳構造及其指示兩盤的相對運動方向 (徐開禮及朱志澄, 1984)

位於正斷層上盤，與沉積同時發生

岩層沉積並膠結後，正斷層上盤如為脆性，形成反向斷層

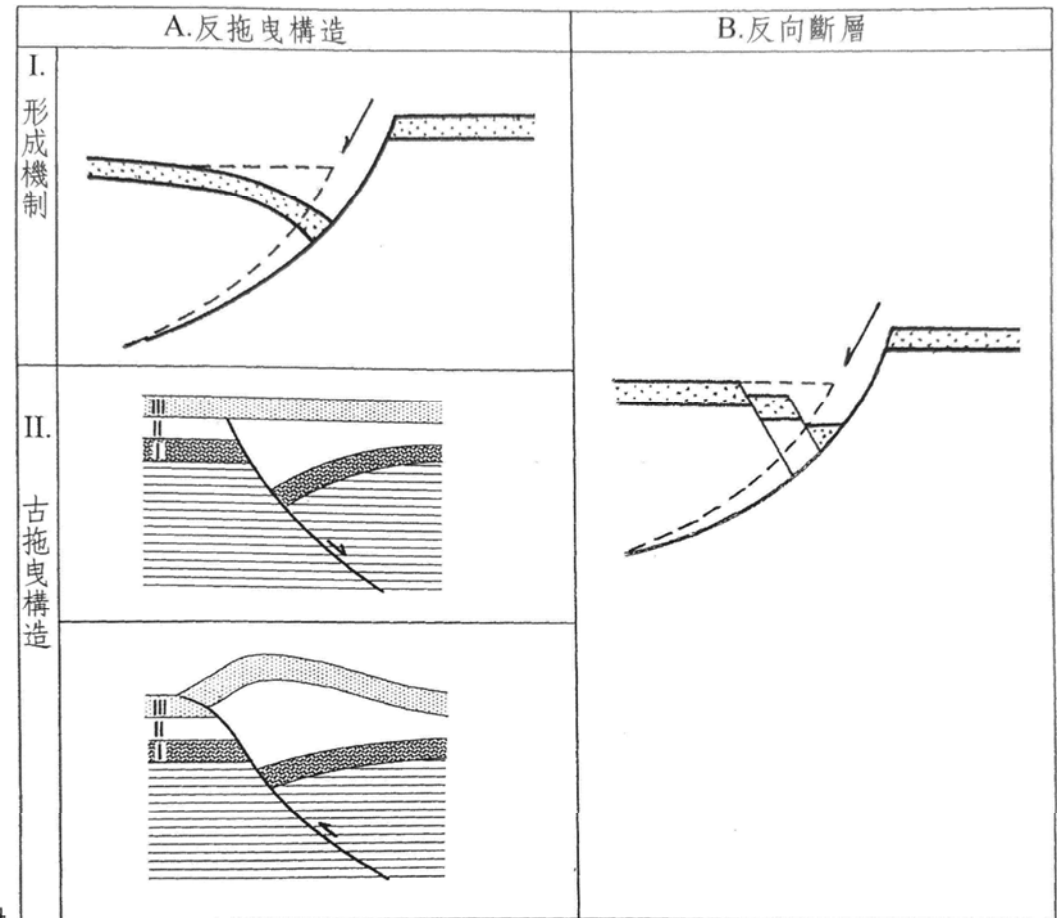
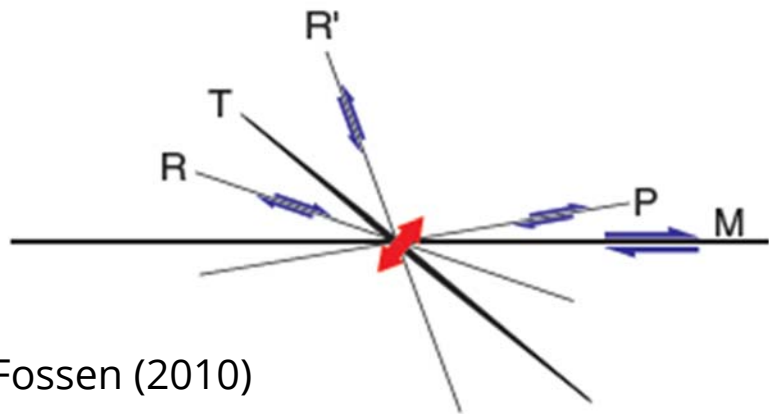


圖 8.17 反拖曳構造與反向斷層

3. 斷層帶的特徵

4) 伴生節理：

- 兩組剪力節理(R, R')：Riedel shears。一組與斷層面小角度相交，另一組與主斷層大角度相交。低角度正斷層。
- 剪力節理(P)：與斷層面夾小角度，低角度逆斷層。
- 張力節理(T)：呈雁型排列的張力節理



Fossen (2010)

R, Riedel shears; P, shear fractures;
T, extension fractures;
M, average slip surface (fault)

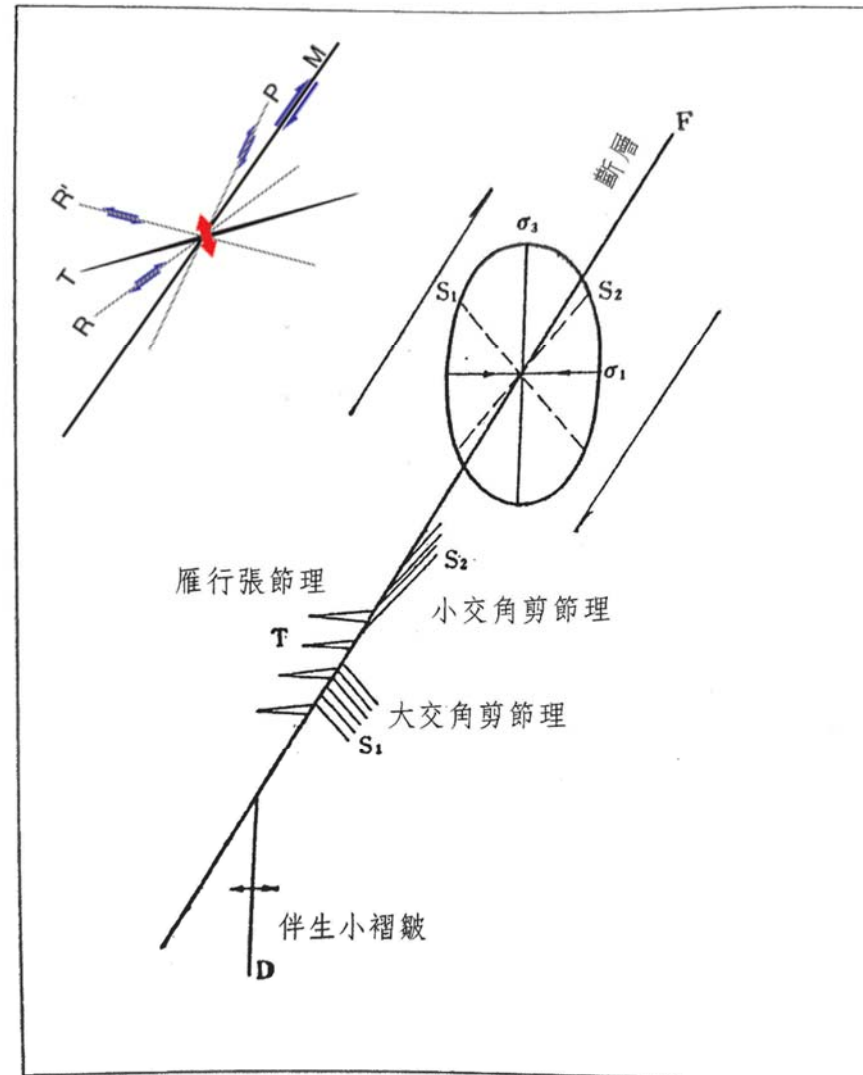


圖 8.18 與斷層伴生的雁行節理及小褶皺

伴生節理、擦痕與錯動方向

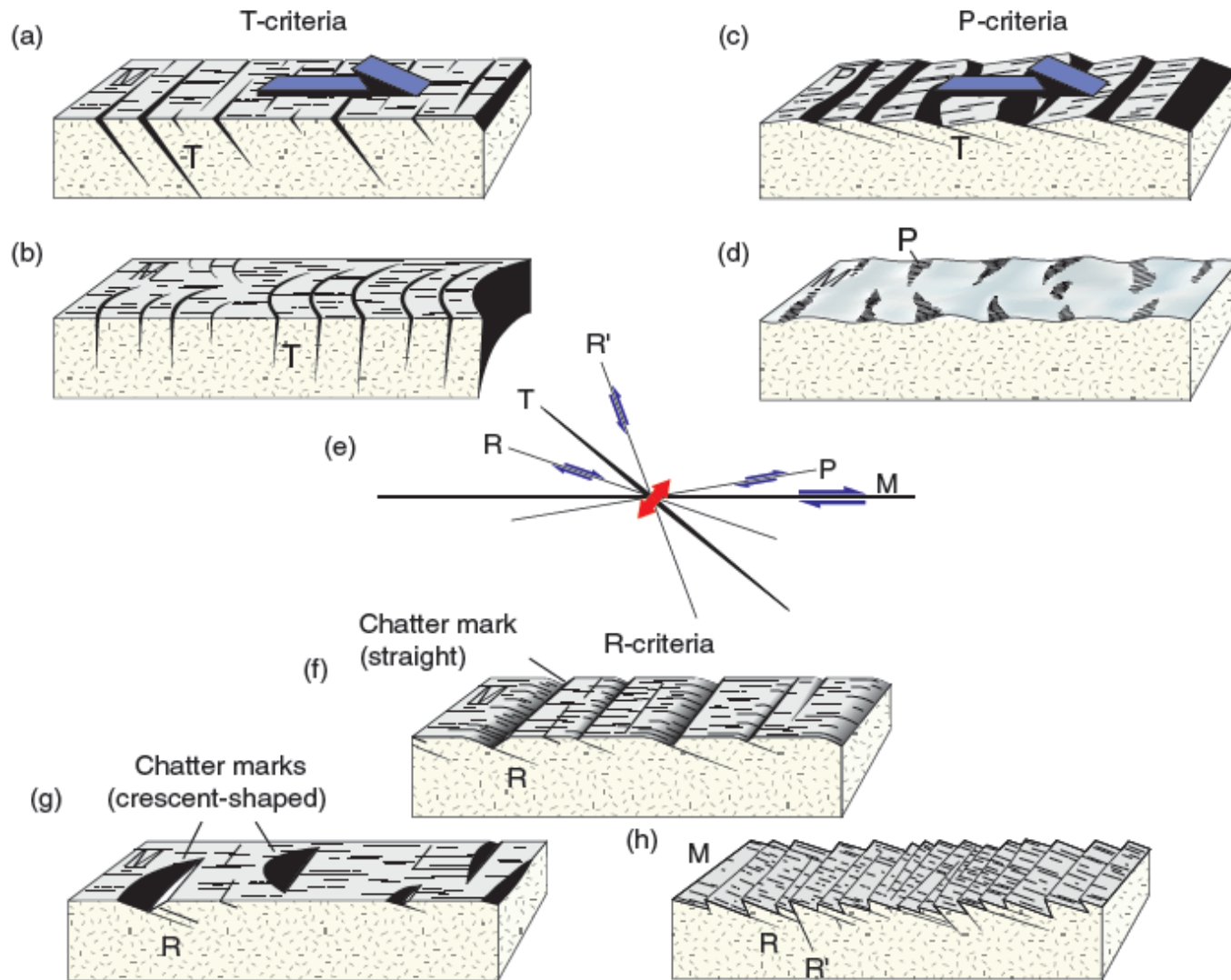


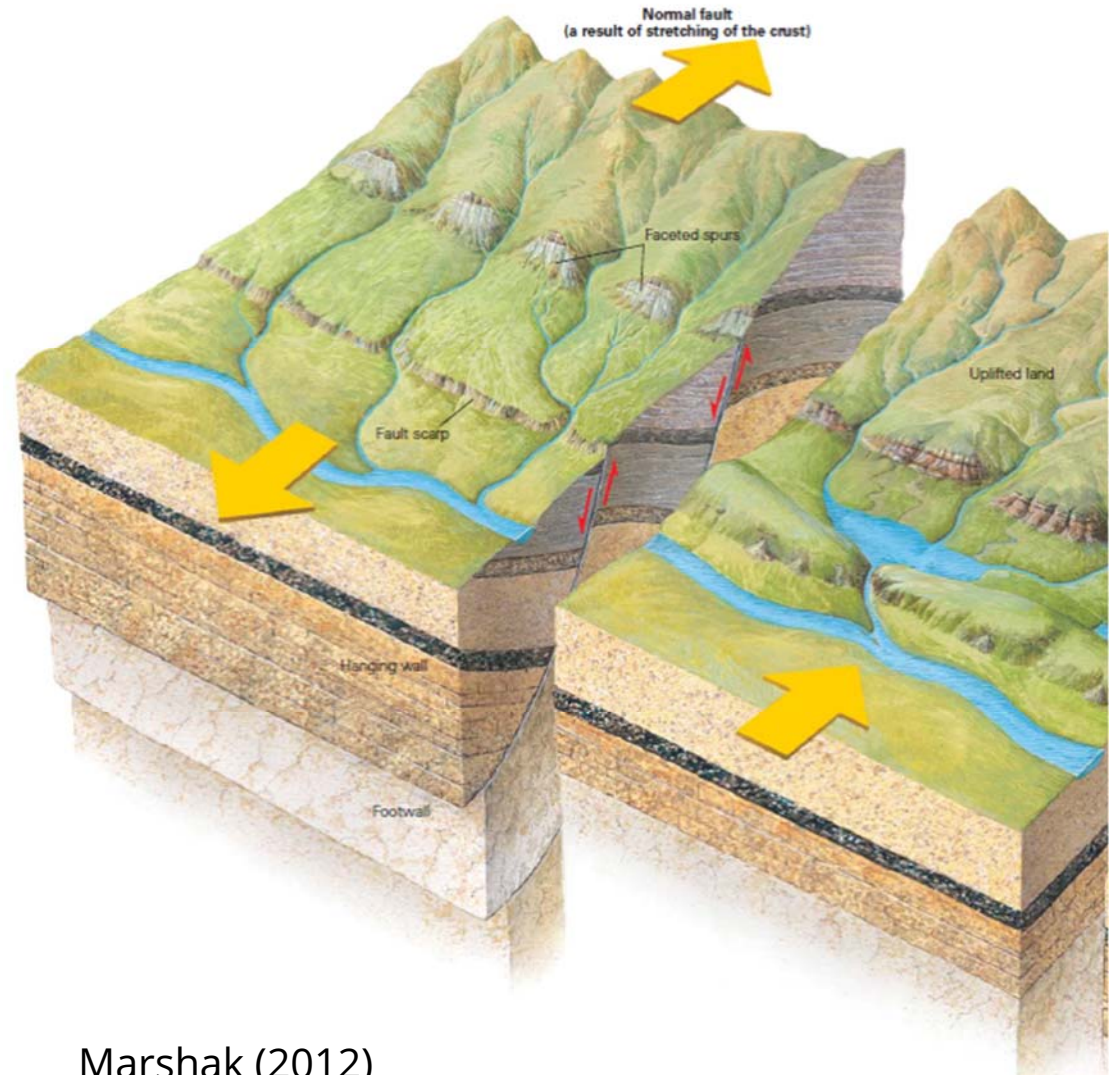
Figure 9.3 Kinematic criteria along a dextral fault with subordinate fractures or irregularities. The general nomenclature for fractures in a shear system is used (R, R', P, T and M fractures). R, Riedel shears; P, shear fractures; T, extension fractures; M, average slip surface (fault). Identification of the type of subordinate fracture helps interpret the movement on the fault. Based on Petit (1987).

Fossen (2010)

4. 斷層的識別

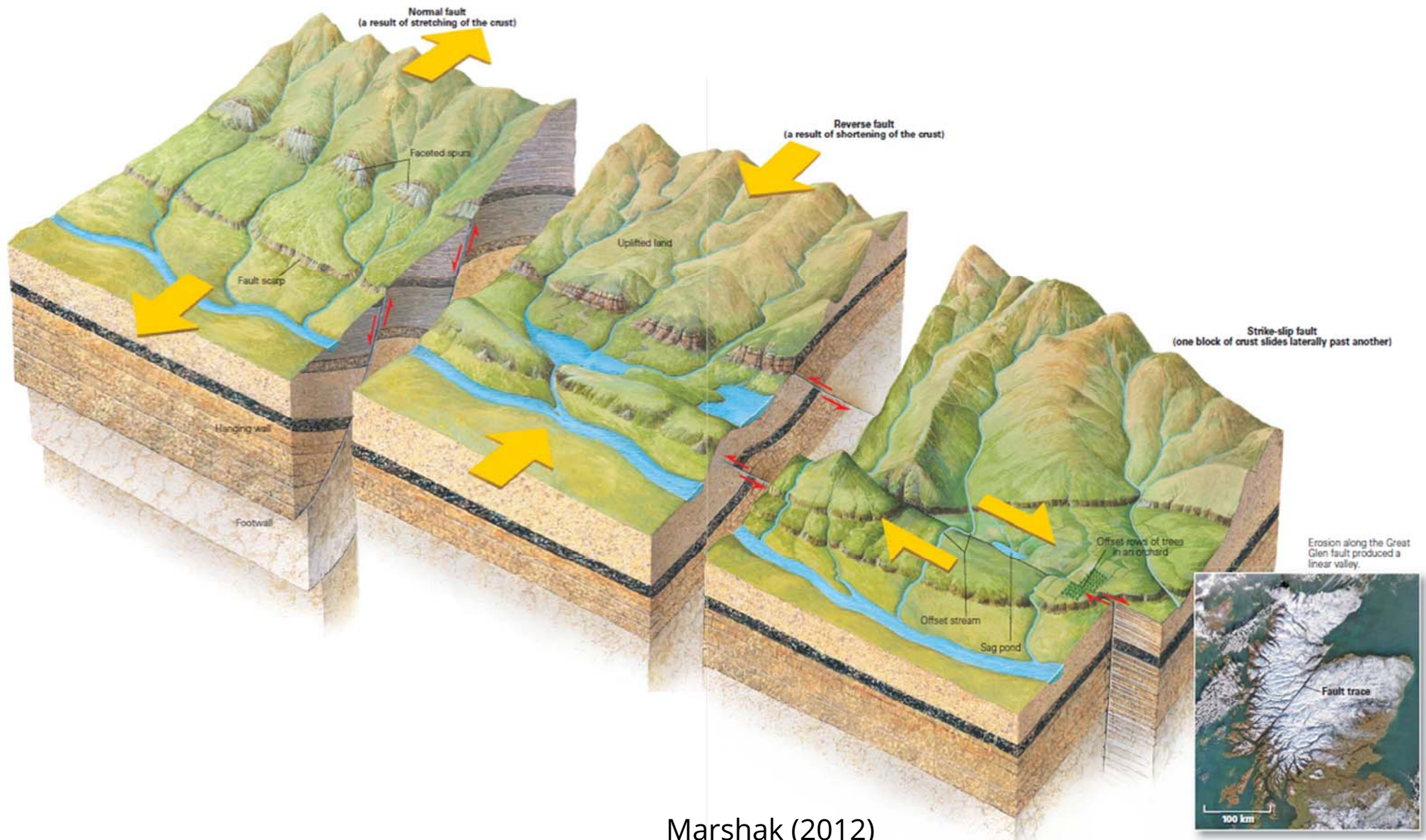
1) 地形上的證據

- 線狀槽溝：斷層造成岩石破碎，易被流水侵蝕
- 山脊被錯斷或錯開
- 斷層鞍部或隘口 (Fault Gap)
- 斷層崖：形成時間較新的斷層，上升盤突起形成陡崖
- 斷層三角面：斷層遭受流水沖蝕，在相鄰的谷間嶺形成三角面 (triangular facet)



Marshak (2012)

斷層在地形上的證據



Marshak (2012)

4. 斷層的識別

2) 岩層上的證據

- 地質界線被截斷或錯開
- 岩層重複或缺失

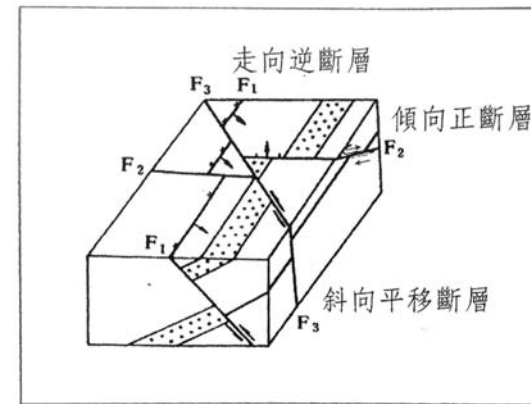


圖 8.25 岩層及早期形成的斷層被較新的斷層所錯開

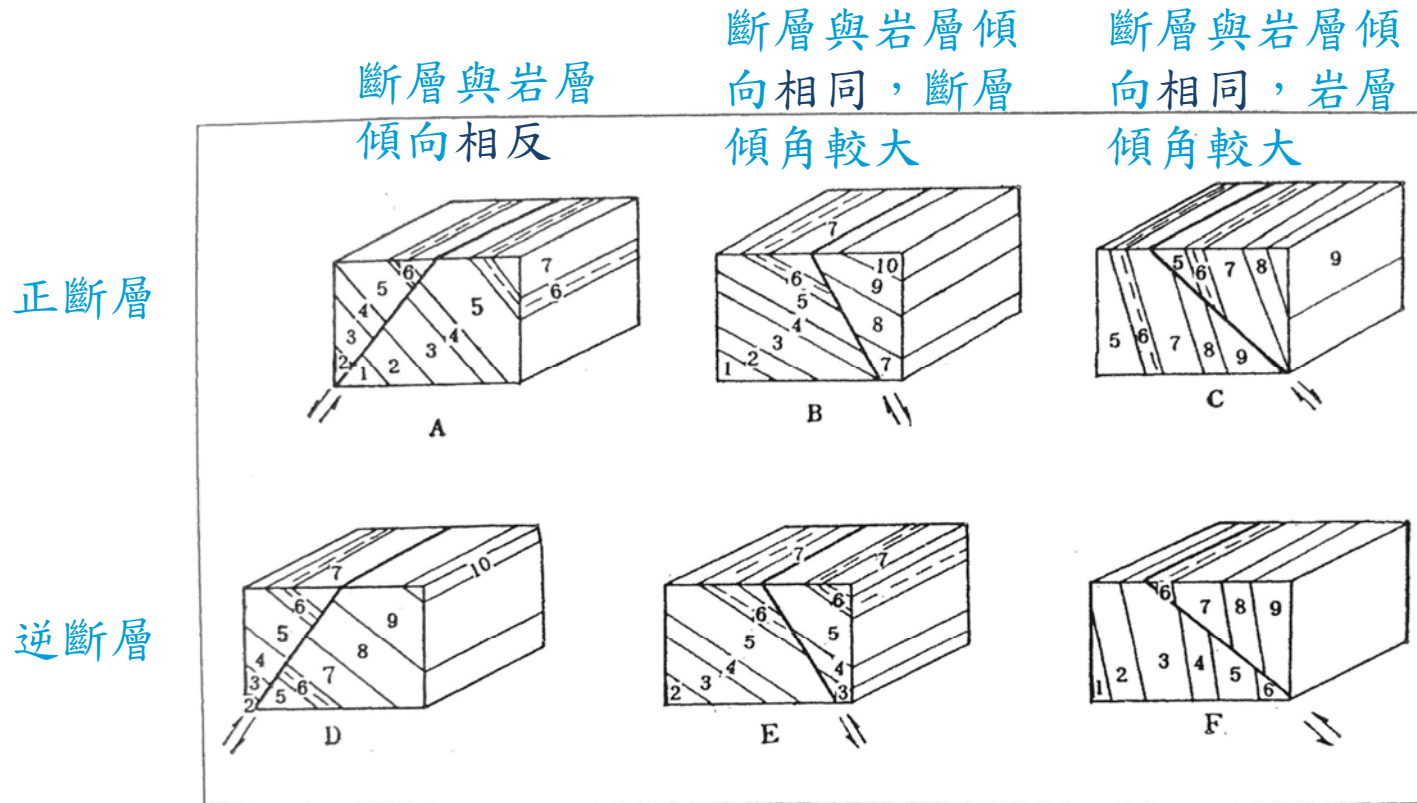


圖 8.27 走向斷層造成的岩層重複及岩層缺失現象 (數字愈小示岩層愈老)

4. 斷層的識別

3) 構造上的證據

- 斷層伴生的構造現象：拖曳彎曲、斷層角礫、糜稜岩、斷層泥、斷層擦痕
- 岩層位態發生劇烈的變化。越靠近斷層，變化越大。

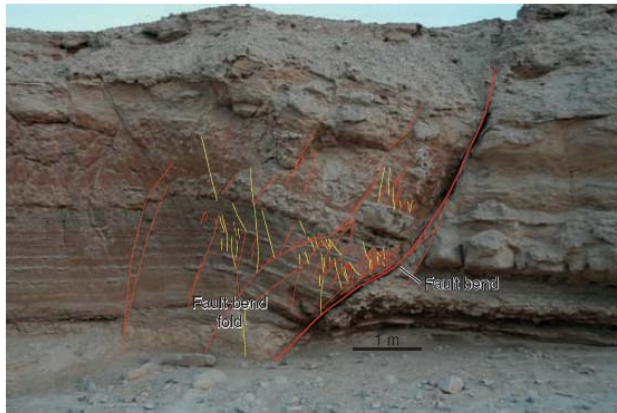


Figure 8.26 Hanging-wall rollover (fault-bend fold) related to bend in the main fault. The damage zone is unusually wide due to the complications posed by the fault bend. Synthetic and antithetic shear bands are separated by color. Matulla Formation, Wadi Matulla, Sinai. The offset of the fault exceeds the 4 m cliff height.

Fossen (2010)

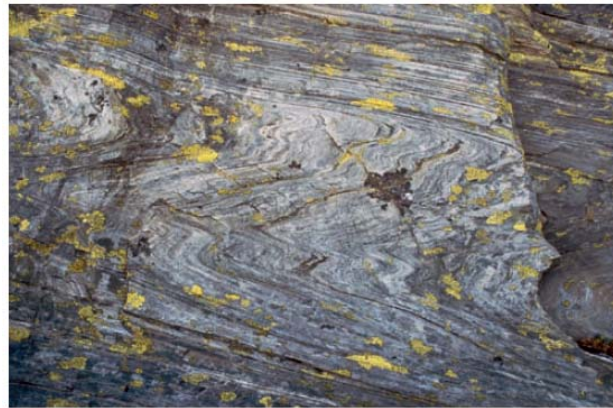


Figure 11.24 Passive harmonic folding of quartzite in a Caledonian mylonite zone. The similar geometry of this Z-fold and its setting in a Caledonian shear zone indicate that it is a shear fold.



Figure 8.28 Drag of layers of siltstone and sandstone along vertical fault located along the left margin of the picture. Colorado National Monument, USA.

5. 斷層對工程的影響

- 多數斷層並非單一的面，而是由一系列**密集的破裂面**及由揉搓的岩層組成的**破碎帶**，構成**應力集中帶**。岩石裂隙多、壓縮性大，以致強度與承載力明顯降低
- 斷層破碎帶**風化較強烈**，**地下水循環較活躍**，剪力強度因之弱化，穩定性降低，常發育地質災害
- 如於斷層破碎帶，**能避則避**
- 斷層一般以上盤的岩體較破碎，建築物與工程體以安置在下盤為佳

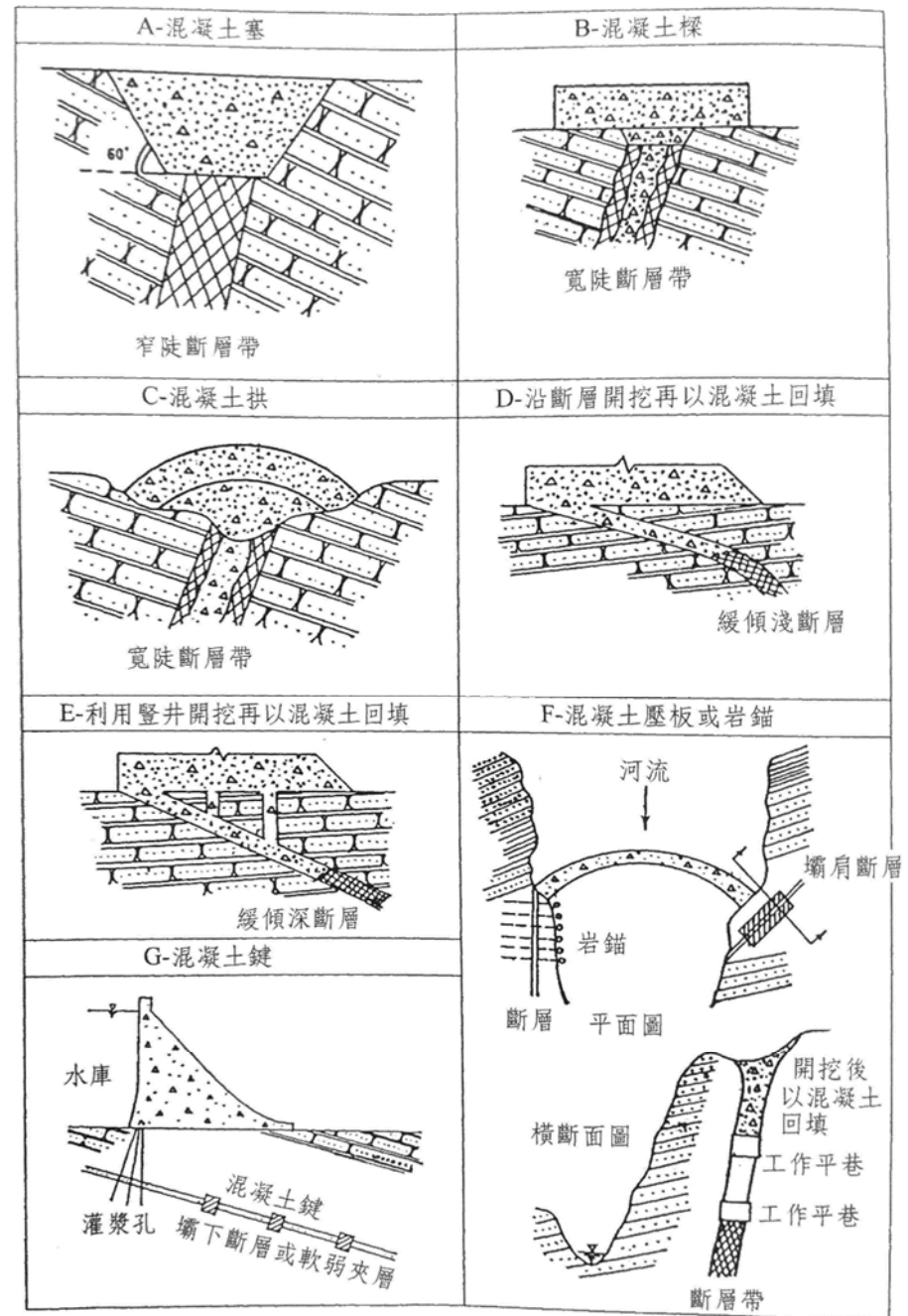


圖 8.28 斷層帶的各種處理方法 (張咸恭等, 1988)

5. 斷層對工程的影響

- 由露頭或鑽孔單點已知斷層位置，延伸作圖求工程體與斷層交會點
- 只能用在斷層位態變化不大時

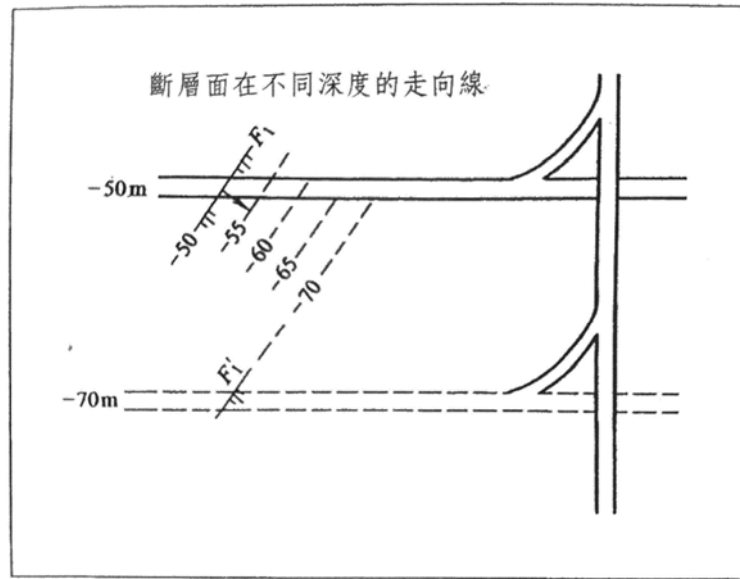


圖 8.29 預測地下工程的斷層出露點之圖解法（平面圖）

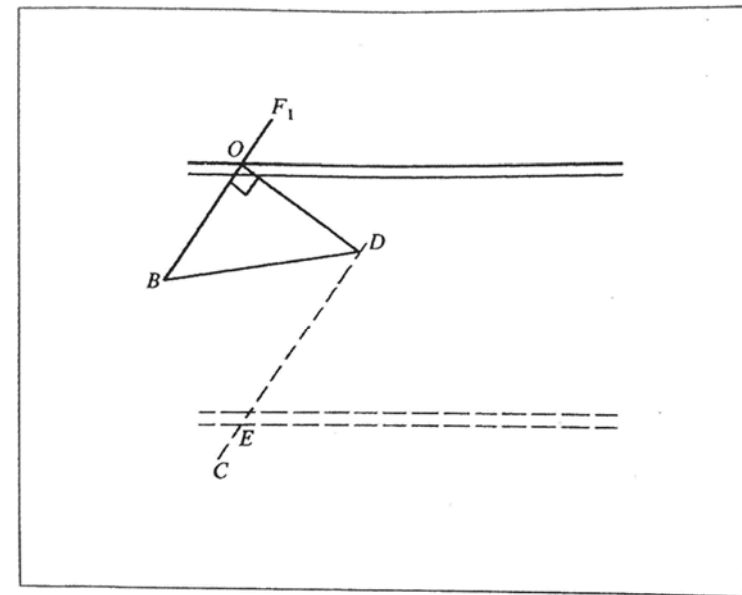
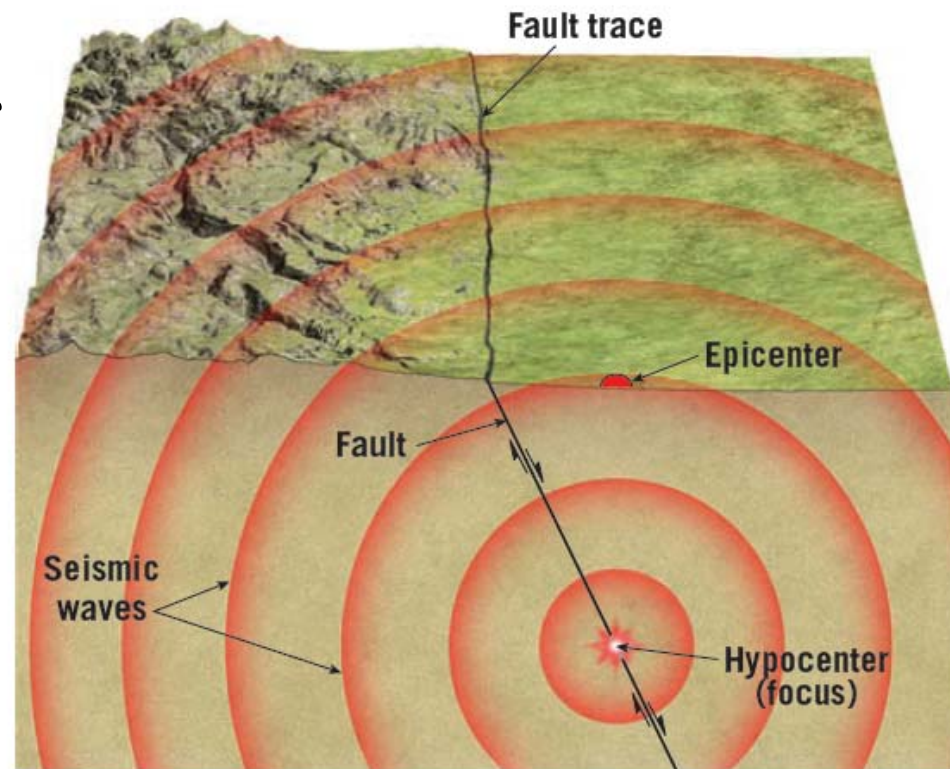


圖 8.30 預測地下工程的斷層出露點之簡便圖解法（平面圖）

6. 地震與活動斷層

- 地震：岩體沿著破裂面(發震斷層)急遽錯動時所產生的波動。是先於岩體內累積能量(一般是板塊移動及擠壓所造成的)，然後突然釋放的結果。
- 震源(Hypocenter)
- 震央(Epicenter)：震源在地表的垂直投影
- 斷層(破裂)跡(Fault trace)

► **Figure 9.1 Earthquakes hypocenter and epicenter**
The *hypocenter* is the zone at depth where the initial displacement occurs. The *epicenter* is the surface location directly above the hypocenter.



6. 地震與活動斷層

- **活動斷層**：目前正在活動，或者近期曾有過活動，而且不久的將來也可能重新活動的斷層。中央地質調查所(2010)定義**10,000年**(全新世開始的年代)內曾發生錯移的斷層為第一類活動斷層；**100,000年**(更新世晚期)內曾發生錯移的斷層為第二類活動斷層。
 - 碳十四同位素定年最高可測：60,000年前
 - 工程的壽命年限：100年
- 斷層活動方式：連續緩慢的潛移(creeping)，稱為**蠕動斷層**，或突然的錯動，稱為**發震斷層**
- 斷層對建築物及工程體的影響：
 - 地面錯動
 - 地表變形與地裂
 - 二次災害



活動斷層分類標準2010版

• 中央地質調查所採用的活動斷層分類標準

第一類活動斷層

(全新世活動斷層)：

1. 全新世 (距今**10,000年**內) 以來曾經發生錯移之斷層。
2. 錯移 (或潛移) 現代結構物之斷層。
3. 與地震相伴發生之斷層 (地震斷層)。
4. 錯移現代沖積層之斷層。
5. 地形監測證實具潛移活動性之斷層。

第二類活動斷層

(更新世晚期活動斷層)：

1. 更新世晚期 (距今約**100,000年**內) 以來曾經發生錯移之斷層。
2. 錯移階地堆積物或台地堆積層之斷層。

存疑性活動斷層

(為有可能為活動斷層的斷層，包括對斷層的存在性、活動時代、及再活動性存疑者)：

1. 將第四紀岩層錯移之斷層。
2. 將紅土緩起伏面錯移之斷層。
3. 地形呈現活動斷層特徵，但缺乏地質資料佐證者。

台灣的活動斷層

- 2012年版活動斷層分布圖中包括地表斷層長度超過5公里的斷層共33條（其中20條屬於第一類，13條屬於第二類），此次也將以往所區分的存疑性活動斷層予以移除
- 自103年起至107年底共公布17處活動斷層地質敏感區，總面積達136平方公里
- 地質敏感區查詢系統
http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys_2014b/
- 台灣活動斷層
<https://fault.moeacgs.gov.tw/MgFault/>

