

岩體的變形 (Deformations of Rocks)

鍾廣吉、鍾儀仁 2015

一、引起變形作用的機構 (Mechanics of deformation)

(一)、緒言：

我們居住的地球是常變動的東西，所以我們常說是「活生生的地球」；在這個變動中的地球裡當然會發生許多的滄海桑田的故事，當經歷每一個滄海桑田的時期，地殼發生變動，在其過程中一定有應力(Stress)的存在，有應力的存在發生作用，才引起滄海桑田的變化。

如果我們安排一件很理想的物質接受壓力型的應力(Compressive Stress)作用，在這個試驗中，其他的條件保持不變，僅令應力逐漸地增加，則這個物質會經過彈性階段(Elastic stage)，可塑性階段(Plastic stage)，然後發生斷裂(Rupture)，這個斷裂就是地層裡所要發生的斷層作用，如(圖 1)。

至少我們知道斷層有正斷層，逆斷層和橫移斷層，這三類斷層可以說僅是斷層在空間的不同型態而已，而這個型態的安排就是完全受到加於岩層的應力的支配，應力態勢不同，發生的斷層形式當然也不同，這種問題便是本文所要討論的引起斷層作用的機構。

(二)、岩層斷裂的原理：

1、如圖 2 所表示，為一方形柱狀體石材，四側未加以保護(unconfined)，受了如箭頭所指示的壓力之後，會有四組的剪力斷裂(Shear fracture)可能發生，即 ABCD, EFG, HIJ, KLMN(如圖 2A 所表示)，圖 2B 表示兩組斷裂之間的夾角(KOM)必定為銳角，即小於 90°，大約為 60°左右，所以理論上一個層面若發生了二組節理斷裂，此二組所夾的銳角大約是 60°，若將圖 2-A 之左右二側面加以限制保護，則 ABCD 及 EFG 二組斷裂就不會發生，若在前後二側面加以保護，HIJ 及 KLM 二組斷裂就不可能發生。

2、再以圖 3 來說明岩層受應力後所發生的斷裂情形，圖 3-A 表示一正方形框物，中間塗以石臘，然後接受力偶(a couple)的作用(力偶如框外的箭頭)，內部的石臘即發生三種的斷裂作用，在外框架變形成平行四邊形時，平行四邊較長對角線的方向是在一種張力式的變形，所以首先發生平行短對角線的張裂 t, t 的二側向長對角線相反的方向張開，此種情況之下張裂組 t 是最容易發生的，沿著與四個邊平行的方向即受到剪力型的應力，如果力偶繼續作用，剪力式的破裂 S 即隨之發生，產生許多與框邊平行的破裂，沿著與較短對角線平行的方向，在力偶作用下是發生一種壓力式的應力，如果應力足夠持續，即容易發生平行較長對角線方向的壓應力式斷裂 th，其二側岩層沿短對角線方向相向運動，發生如逆斷

層的斷裂，其他二式之 s 組似橫移斷層，t 組為正斷層。

在以上所討論的例子中，我們可以知道岩層是受了應力的作用才斷裂，而應力的形式可為張力，可為剪力，也可以為壓力，不管何種形式的應力，由於其作用程度的不同即產生不同形式的斷裂，斷裂的形式大致有正斷層式，逆斷層式和橫移斷層式，而其中的相互關係可謂甚複雜，在以下的各部份中將逐項予以討論。

(三)、應力與斷裂的關係：

1、若有一應力作用於一點，則我們可以作一參考圖的應力分佈橢圓(stress ellipsoid)，將此應力分解成三個互相垂直的軸，以軸長表示應力的大小(如圖 4)， σ_1 表示最大主應力軸， σ_2 表示中間主應力軸， σ_3 表示最小主應力軸，圖 4-B 中之 SS' 和 S''S''' 表示極大剪力應力面，FF' 和 F''F''' 表示斷裂面(planes of rupture)。

2、圖 5A 表示一圓柱體受一壓力式應力， σ_1 方向表示最大應力， σ_2 ， σ_3 表示中間及最小應力方向，圖 5B 表示圖 5A 之一片剖面，指示應力與斷裂的關係，MN 表示任一想像之面，n 表示在此面上的垂直應力(normal stress)， τ 表示剪力應力(shearing stress)， θ 角為 σ_1 與 MN 面之夾角，則有下列之關係：

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad \text{-----}(1)$$

$$n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad \text{-----}(2)$$

由此可以發現 $\theta = 45^\circ$ 時 τ 值為極大； $\theta = 0^\circ$ 時 n 極小， $\theta = 90^\circ$ 時，n 為極大；一般而言，因為實際的剪力式斷裂面與最大應力方向為之夾角都小於 45° ，所以垂直應力(n)即很重要，當剪力應力(τ)與垂直應力(n)聯合構成使剪力應力(shear stress)變成有作用而發生剪力式破裂。

3、應力(含剪應力和垂直應力)與斷裂的關係可用圖 6 及以下之式子予以表示：圖 6 之縱軸是剪應(τ)，物質之限制壓力(confining pressure) σ_3 和壓應力(compressive stress) σ_1 標示於橫軸，其應力差異(stress difference)為 $\sigma_1 - \sigma_3$ ，劃一圓通過 σ_1 和 σ_3 則：

$$\text{圓心(center)為 } \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad \text{半徑(radius)為 } \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

假設有一平面與最大應力軸成一 θ 角，則在圖 6 之圓內軸一半徑 CL 與水平軸交 2θ 角，則可得：

$$\text{垂直應力}(n) = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta$$

$$\text{剪應力}(\tau) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$$

由上二式：

$$\theta = 0 \quad 2\theta = 0 \quad \text{則垂直應力}(n) = \sigma_3 \\ \text{剪應力}(\tau) = 0$$

表示平面平行於最大主應力軸

$$\theta = 45^\circ \quad 2\theta = 90^\circ \quad \text{則垂直應力}(n) = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\begin{aligned} \text{剪應力}(\tau) &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ 為極大} \\ \theta = 90^\circ \quad 2\theta = 180^\circ \quad \text{則垂直應力}(n) &= \sigma_1 \\ \text{剪應力}(\tau) &= 0 \end{aligned}$$

圖 6 亦表示在限制壓力為 σ_3 時要使物質斷裂需以 σ_1 之壓應力，若將限制壓力改變，則使物質斷裂所需之壓應力亦隨之改變，每一組限制壓力和壓應力均可劃成一如圖 6 之圓，圖 7 即表示五組資料的圖示，在此圖中各圓可有二條外公切線，外公切線與水平軸之夾角中即為物質要破裂時所需克服之內磨擦角，由此圖亦可看出限制壓力愈大，要使物質破裂之壓應力亦當愈大，外公切線與縱軸之交點為 τ_0 ，外公切線為 $\tau = \tau_0 + n \tan \psi$ 。

(四)、應力引起的正斷層、逆斷層、橫移斷層及各種斷層的分佈：

1、一般而言，各種斷層現象多屬於剪力式斷裂，各斷裂面的走向大多平行於中間主應力軸，作用的應力可分解成三個互相垂直的應力方向，由於此三個分力的配置之不同即產生不同型式的斷層，圖 8 即最大主應力軸 σ_1 ，中間主應力軸 σ_2 ，最小主應力軸 σ_3 在空間不同的排裂配置而發生了逆斷層，橫移斷層及正斷層的圖示，其中 A 圖表示最大應力水平，最小應力垂直，即發生 B 圖的逆斷層；C 圖表示，最大應力水平，中間應力垂直，即發生 D 圖的橫移斷層；E 圖表示最大應力垂直，中間及最小應力水平，即發生 F 圖之正斷層現象。

2、雖然有二組斷層可能發生，實際的情形均僅發生一組，如圖 9 表示正斷層，A 圖表示一物質受箭頭所示方向的應力，B 圖表示發生上盤在左的逆斷層，C 圖表示上盤在右的逆斷層，發生了 B 圖，C 圖即不發生，發生了 C 圖，B 圖即不發生。

3、至於應力在地層裡的分佈不一定都很均勻，各種凌亂的分佈情形，產出的斷層也都不一樣，我們先假設所有的條件都相等的均質物，圖 10 上圖表示受應力的分佈，箭頭方向指最大主應力的方向，箭頭的長短比例表示應力的大小變化，此圖表示應力的分佈甚為均勻，下圖表示受應力後所發生的斷層，圖內小箭頭指該岩盤的運動方向，斜直線表示滑動面的狀態，此情形產生二組完全相似的逆斷層，若將上下圖均看成一平面圖則就變成橫移斷層的情況了。

圖 11 上圖亦表示應力的分佈情形，其垂直分佈由上而下逐漸增加，表示由上圖之應力分佈所發生的斷層現象，在右側有一不發生斷層的區域，所發生的二組斷層中上盤在右側者為高角度之逆斷層，上盤在左側的一組為低角度的逆斷層。

圖 12 左二圖表示應力分佈的情形，箭頭的長短表示應力的大小，其應力大小分佈及應力線的分佈與圖 11 不同，右圖表示由左二圖之應力分佈所發生的斷層，其中亦於右側不發生斷裂的部份，左側的斷層有二組可能發生，其中上盤在右側的一組為高角度之逆斷層；愈到深處就漸漸轉變成上盤向下滑動之正斷層，所以由此亦可看出應力的分佈狀態亦影響斷層的狀態，若將 11 圖與 12 圖均改為平面的關係，則所有的斷層就成了橫移斷層了。

然後我們再參考圖 13 的更複雜的情形，上二圖亦表示應力的分佈情形，此時的應力分佈可說甚為複雜，大致由垂直的應力和剪應力二類構成，而使最大主應力線之分佈均向地區的中心傾設，最小應力線則成拱形，下圖為因此而發生的

各種斷層：(1)有三部份是不發生斷層的，(2)左上角和右上角均為低角度的逆斷層，即淺部的斷層，(3)中央的上部為高角度甚至垂直的正斷層，中央之二側才漸變為低角度的正斷層，(4)左下角與右下角起向中心為由低角度之逆斷層漸變為高角度之逆斷層。

4、由以上的分佈(圖 8~圖 13)，亦可以看出，不管正斷層或者逆斷層的型態。其角度的變化均很大，由高角度的逆斷層變為低角度的逆斷層，然後角度令其小於 0° 不就成了低角度的正斷層嗎？然後變成高角度的正斷層，這其間的轉變僅是應力分佈的差異變化而已，由應力的分佈可以判斷斷層的型態，同理由斷層的型態亦可以推測發生的應力情況。

5、圖 8~圖 13 之討論均假設所有其他的條件均相同，僅應力條件發生變化，所以得到的結果，是甚為整齊的斷層狀況，斷層線顯示得相當明顯的一條線，但實際上地質作用其他的條件亦相當的複雜，其他的條件也很難予以控制，一個條件改變所引起的影響常是變化多端的，至於可以影響斷層型態的其他因素，大約可以歸納為如下幾項：

(1)、應力的分佈如圖 8~圖 13 的規則化者在地質作用上不存在，常是相當複雜的分佈，在相當複雜的分佈條件下產生的斷層型態就不可能如圖 8~圖 13 之規則，一定會被改變成複雜零亂的型態。

(2)、地殼的物質並不是均勻的(Homogeneous)，常是不同的岩性，不同的結構如層面，破碎、節理，不是均質就容易使作用於其中的應力發生偏差，應力的分佈線就不會那麼的規則，遇到此種物理性不連續帶就會發生偏向，折曲的現象，複雜的應力分佈，當然發生複雜的斷層現象。

(3)、地殼的物質並非全為脆性的，常具有韌性，至少在深度 5-10 公里的岩石為可塑性(plastic state)的東西，應力傳到可塑性材料內時，在發生斷裂之前定有一變形階段，將物質之形狀予以改變，然後應力達到某一程度才發生斷裂斷層，在發生變形的階段就將應力的作用方式予以改變，結果的斷層即不可能再表現出規則的樣子了。

(4)、圖 8~圖 13 均假設斷層僅由一種應力即剪應力所引起，但實際上其他型式的力如壓應力，張應力亦可以發生斷層作用，其結果當然不會如上述之剪應力來的有規則，也即可以將斷層現象略加以修飾改變一番。

(5)、一個地區受了應力的作用發生應變(Strain)，應變並不僅祇有斷層而已，尚亦可於斷層作用前或斷層作用後發生褶皺作用，將斷層現象加以修飾，不考慮其他因素的規則化斷層分佈即不可能發生。

(6)、由於顯示出的空間位置條件並非僅垂直或水平方位，介於垂直和水平間的傾斜方位亦常存在，而在斜向方位顯示出的現象將更為複雜，在一方向為正斷層或逆斷層的，在另一方向也許即成為橫移斷層，顯示的分佈亦當有變化才對。

6、因之不管正斷層或逆斷層或橫移斷層，其發生不外乎應力作用的結果，而為何型式何分佈的斷層組，除了應力分佈條件外，尚受有許多因素的控制，所顯示出給吾人看到的斷層常是受許多因素相互作用後的結果，是複雜的複合結果。

(五)、逆掩斷層量的估計：

1、逆掩斷層為低角度大規模的斷層，斷層岩塊常被搬移十幾或二十幾公里，如此大量的物資搬動那麼遠的距離，在理論上的確困擾了地質學家許多年，我們

可由下列的討論得到理論的支持。

如圖 14 所表示以一力量下要移動 Block A，Block A、B 間的磨擦力的克服是必要的，可以下式表示之：

$u = F/W$ u 表示其間的磨擦係數， W 是 Block A 的重量， F 為推動所需的力量，然後可如下予以換算：

$W = bcdpg$ $F = scd$ b, c, d 表示 Block A 各邊長的度量， p 為 Block A 的比重， g 為重力加速度， s 為單位面積受到的推力，

則 $u = scd/bcdpg = s/bpg$ $s = ubpg$

例若令 b 為 $20\text{km}(=2 \times 10^6\text{cm})$ $u = 0.5$ $p = 2.3 \text{ 克}/\text{cm}^3$ 則得 $s = 2.25 \times 10^9$ 達因，因岩石的破碎強度(Crushing strength)為 7×10^8 達因/ cm^2 ， s 已超此限度，故可使岩塊破碎。又上式可改為

$b = s/upg$ 或 $B = s/upg$ 應用於逆掩斷層 B 即為斷層移動的極大體積， s 為破碎強度 7×10^8 達因/ cm^2 若 u, p, g 如前所示則 $B = 6.2 \times 10^5\text{cm} = 6.2\text{km}$

2、一般而言，斷層面均有傾斜度，假如斷層面傾斜向作用力的方向(如圖 15 所表示)，則 s 除需克服磨擦力外，尚需有一些力去推動 Block 向上，則得如下之公式：

$$s = \frac{bpg(u + \tan \theta)}{(1 - u \tan \theta)} \quad \theta \text{ 表示斷層面的傾角}$$

則最大的斷層塊 $B = \frac{s(1 - u \tan \theta)}{pg(u + \tan \theta)}$

若 $u \tan \theta > 1$ 則 $s = \text{無限大}$ $B = 0$

若 $u = 0.5$ $u \tan \theta = 1$ $\theta = 63.5^\circ$

即當作用推力為水平時逆斷層之斷層面傾角不能大於 63.5° ，反之若斷層面傾斜與作用力同向則上面之公式為

$$s = \frac{bpg(u - \tan \theta)}{(1 + u \tan \theta)} \quad B = \frac{s(1 - u \tan \theta)}{pg(u - \tan \theta)}$$

若 $u = 0.5$ 則 $\theta > 26.5^\circ$ $s < 0$ 則岩塊可以自動滑下。

3、圖 16 為依據：

$B = s(1 - u \tan \theta) / pg(u + \tan \theta)$ 和 $B = s(1 - u \tan \theta) / pg(u - \tan \theta)$ 而作的關係曲線，橫軸表示磨擦係數，縱軸表示最大移動岩體體積之寬度，各曲線代表不同斷層面之傾角， $\theta < 0$ 者表示斷層面之傾角與作用力(水平)同方向者，由此曲線圖可觀察出下列的事實：

- (1)、若一斷層面的傾角固定，則磨擦係數愈小，移動的岩塊體積寬度之極限也就愈大，在斷層面傾角為水平或與作用力同向(負角時)，磨擦係數若變小，可能使移動體積之寬度之極限趨向無限大。
- (2)、斷層面的坡度愈陡，移動岩體體積之寬度極限也就愈小。
- (3)、假如斷層面傾角與作用力同方向，則在小傾角和磨擦係數小的情況下，很大之岩體亦可由其重量使其滑落下發生斷層。

由上之討論，我們也可以在理論上得到支持，低角度大規模的逆掩斷層是有可能發生的，而且可使其移動相當遠的距離。且由理論上亦可估量出逆掩斷層的情況，進而設法復原原來的地質狀況。

(六)、橫移斷層與彈性斷裂的關係：

1、對於斷層的發生位移之速度，有些是一種緩慢且持續性的移動，如在美國加州的 San Andress 斷層，它就是一條活動斷層，是尚在緩慢移動的橫移斷層，由於板塊的移動，使此斷層亦受到影響，其移動速度甚至可用簡單的方法予以測出。

2、但有些斷層的移動似是一種突發事件地突然發生，以後就停止了，這可用彈性彈迴理論(elastic rebound theory)予以解釋。

如圖 17aa`線是想像中原先在一起的部份，當如箭頭所指示的 Block A 和 Block B 相互移動之後，aa`線即移動成 bb`，FF 為斷層線，bb`在斷層線附近即發生一伸張部份(stretched part)，但仍然沒有分開，此變形達到一極限之後，即突然拆斷(snaps)成 cc`和 c`c``，這一種斷層現象即為一突發的突變現象(catastrophic)，速度甚快，其整個的過程大約為：靜止→加速→減速→停止，其加速和減速過程僅為甚短不到一秒的時間而已。

(七)、斷層與褶皺構造的關係：

如圖 18 所示，ABCD 為垂直傾斜(vertical dip)的斷裂，EFGH 為垂直走向(vertical strike)的斷裂，仍是褶皺作用力作用之後鬆弛(release)所發生的斷裂，此時的作用力為東西向的水平壓力。

圖 19A 表示受到東西向的水平壓力，首先發生軸為南北的褶皺，在作用力作用時有剪應力的分力(如圖 2 所示)，使發生東北-西南和東南-西北向的二組斷裂，其斷裂面為垂直，B 圖表示作用褶皺的應力若繼續作用，則發生走向平行褶皺軸傾角為 30°左右的二組斷裂，此亦為剪應力分力的作用結果。

在以上三種情況下，圖 18 和圖 19A 可視為橫移斷層的情況，圖 19B 可視為逆斷層的情況，均常伴隨褶皺作用的發生。

由前(四-1~四-6)的討論，我們可以由應力的分佈推測出斷層的分佈，反之亦可由斷層的分佈逆推測出應力的分佈，當然進一步可以建立起原來的壓應力的狀態，一般而言，褶皺常為壓應力的作用結果，所以壓應力知道了，亦可推測可能存在褶皺構造。也就是說由褶皺構造推測出應力分佈而後可以推測斷層存在的可能性；反之由斷層構造亦可推測應力分佈，而後也可推測出褶皺構造存在的可能性。

當然斷層與褶皺若為圖 18 和圖 19 的關係，亦可由一構造推測另一條構造的存在，他們之間有很密切的關係存在，因為他們都是受了應力後所發生的應變之

二種型態。

(八)、結論：

以上對引起斷層作用的機構之討論，雖略有用數理的證明，但仍以敘述性的解說為主，達到詳細的數理數據的證明支持仍為必要的努力。

斷層和褶皺一樣，仍是岩層受了應力作用之後所發生的應變的型式而已，主要的控制因素有其本身的性質條件，和外來的應力條件組合構成甚為複雜的結果。

二、地層的斷層作用

(一)、斷層的定義及描述：

1、斷層是岩層發生破裂並且使破裂後的兩塊岩層沿此破裂面或破裂帶發生相對的移動；有些斷層的規模極小僅幾公分，但有些斷層規模則甚大可延伸數公里；斷層部份有時成帶，叫斷層帶，有時僅一個面，為斷層面，為研究方便，地質學家均把它看成一個面來研討；對於斷層面的表示也與地層面相同，以走向與傾角來表示。

2、以斷層面為分割，位於斷層面上方的岩塊我們叫它上盤(Hanging well)，位於斷層面下方的岩塊即叫下盤(Foot wall)；斷層面或斷層帶表現在水平面上即成一線或一帶，我們全叫它做斷層線(Fault line)，或斷層痕跡(Fault trace)或斷層露頭(Fault outcrop)如圖 20 所表示。

3、岩塊沿著斷層面移動(Movement)，大致可以有二種型式(如圖 21 所表示)：其一為平行移動(Translational movement)，即在斷層面兩側的直線，在移動前為平行，移動之後，還是平行者，如圖 21 之 A、B，其中之 c 與 c' 二直線移動前為平行，移動後仍然保持平行；其二為旋轉移動(Rotational movement)，即未移動前平行之二直線，經移動之後不再平行了，如圖 21 之 C，bc 與 c'd 原為平行，旋轉移動後不再平行了，圖 21 之 D 內 cd 和 c'e 原亦為平行，旋轉移動之後沒有平行，所以 C、D 二種型式均為旋轉移動。

就一般的情況而言，大部份的斷層移動，或多或少均有旋轉，而發生旋轉移動是不等量移動的結果，一個大斷層的移動很難使每個部位移動的量均相等的，也因此之故，有謂斷層是一種旋轉移動。

4、一般而言，地質學家很難知道一個斷層運動裡的實際移動情形，而僅能以相對的移動關係予以表示，如圖 22 所表示，其 A 是表示上盤沿斷層面傾斜方向相對往下滑落，ab 為斷距(net slip)，亦為傾斜斷距(clip slip)；其 B 是表示上下盤沿斷層面走向方向相對移動，ab 為斷距，亦為走向斷距(strike slip)；其 C 是表示上盤沿斷層面傾斜斜交方向相對向下滑落，其中之 ab 為斷距，此斷距可分為二向量即 ac 為走向斷距，bc 為傾斜斷距；D 與 A 相反，表示上盤沿著斷層面傾斜的方向相對向上衝動，ab 是為斷距，此斷距亦為傾斜斷距；E 是表示上盤沿著斷層面傾斜斜交之方向相對向上衝動，ab 為斷距，此斷距又可分為二個向量，即 ac 為傾斜斷距，bc 為走向斷距。

圖 23 是表示斷層切過岩脈(Vein)的情形，其中 ab 為傾斜斷距，ac 為走向斷

距，bc 為傾斜斷距，ab 平行岩脈之分向量，bd 為遺跡距(trace slip)，垂直岩脈之分向量 ad 叫垂直斷距(Perpendicular slip)。

對於斷層相對移動之各種表示法，除如上所敘述之斷距(如圖 24 之 ab)，走向斷距(圖 24 之 ac)和傾斜斷距(bc)外，又如圖 24 之表示，斷距 ab 在水平之分向量，bd 叫水平斷距，ae 為斷距或傾斜斷距的垂直分向量叫做垂直斷距(vertical slip)又叫落差(throw)，ed 為傾斜斷距的水平分向量叫水平傾斜斷距(horizontal dip slip)，又叫橫移量(heave)。一般對斷層移動量的描述上常使用的是落差和橫移量。

(二)、斷層所表現的現象：

斷層雖為地層斷裂移動，但其移動的方式有許多，且地質作用並非發生了斷層作用即停止，其他的地質作用仍然不斷地在進行著，尤其侵蝕作用，將高地削低，將多出的地削去，因之由於斷層作用及後來的地質作用的結果，使斷層與地層狀態表現在平面上或剖面上就成了各種異樣了，茲以下列十個圖例為代表舉例予以說明斷層與地層表現出的現象，各圖中之 A 為斷層發生時的情況，B 為經侵蝕削平後的現象。

1、圖 25，地層為水平，斷層之斷距與視移動(apparent movement)相等之傾斜斷層，A 表示斷層發生之後，侵蝕作用發生之前的情形，在垂直剖面上可以發現有上下錯動的現象，B 表示經過侵蝕作用之後的情形，除垂直剖面上發現有上下之錯動外，平面上亦發現有地層之水平分佈不連續，突然被另外一層所接觸，剖面圖上是上下關係的二地層，因斷層關係帶來互相接觸，使吾人很容易判斷有斷層的存在。

2、圖 26，地層為水平，斷層沿斷層面之走向移動，斷距為走向斷距，在剖面上沒有視移動或傾斜斷距，A 為斷層發生之後，侵蝕作用發生前的情況，尚容易察覺有斷層之發生，B 為侵蝕作用發生之後，不管在平面或剖面裡地層均是一種正常的相對關係，不容易覺察到有斷層的現象。

3、圖 27，地層非為水平，斷層面的走向與地層的走向垂直，沿斷層面的傾斜滑落，A 為斷層發生後侵蝕發生之前，在剖面上可以見到視移動與斷距相等，地層已有上下錯動的現象了，B 為經過侵蝕之後的情形，在剖面上見到的是地層有上下錯動的現象，但在平面上，由於地層為傾斜，使新舊地層沿斷層線相接觸，看起來會有因前後錯動的結果的錯覺，此亦暗示我們，單憑平面圖或剖面圖的判斷會錯誤的，唯有設法恢復原來的情况才能作合理的推斷。

4、圖 28，其地層為傾斜，斷層面之走向與地層之走向互相垂直之走向橫移斷層，其斷距相等於走向斷距，A 圖為斷層發生之後，侵蝕作用發生之前的情況，經過侵蝕作用削去多餘的部份，使成為 B 圖的情況，在 B 圖的平面圖上見到的是一種走向橫移斷層(strike slip fault)，但在其剖面圖上卻發現有上下錯動的現象，似為上盤上升的逆斷層，此種狀況若沒有相當純熟的地質知識，甚難作成合理的解釋。

5、圖 29，地層為傾斜，斷層面之走向與地層之走向垂直，斷層沿著與斷層面傾角方向斜交的方向移動；A 圖表示斷層發生之後，侵蝕作用發生之前的情形，B 圖表示經過侵蝕之後的情形，在 B 圖裡我們可以發現，剖面圖是顯示出正斷層的上盤相對下降，在平面圖裡則顯示出前後錯動的樣子，此二者頗不相一致，其合向量即為真正斷層活動的方向，由此圖亦即告訴我們，要由各個角度去判斷一個構造現象，才易接近事實，否則常有偏差。

6、圖 30，其地層為傾斜，斷層面之走向與地層面之走向垂直，但斷層之斷距(net slip)與層面成平行關係之斷層，此種斷層亦為沿斷層面傾角方向移動的斷層，其與圖 29 之差異在於此種之斷層與層面平行；圖 A 表示斷層發生後侵蝕作用發生之前情形，可明顯地看出有斷層的現象；B 圖表示侵蝕作用發生之後的情形，很明顯地，我們不論在平面上或剖面上均沒有發現有地層互相錯動的情況，好像沒有斷層發生過一般，容易有這樣的錯覺，所以必須加上其他的地質現象，才容易發現斷層，並作合理的解釋。

7、圖 31，是一種比較特殊的情況，地層為傾斜，斷層亦為傾斜，但二者向相反的方向傾斜，而其走向平行，斷層沿著斷層面傾角的方向上盤相對下降，A 圖表示斷層發生後侵蝕作用發生之前的斷層情況；B 圖表示侵蝕作用完成之後的情況：在剖面上可以看到地層互相有錯動，使位於下部的老地層與上部的新地層在水平方向直接接觸，在平面圖上可以發現地層有重複出現的狀況，同一方向傾斜重複出現的地層，當然等斜褶皺(isocline folds)亦有可能，但吾人可加上其他資料協助研判，更易確定構造型式，一般而言，地層的重複出現亦為斷層的特徵之一。

8、圖 32，此圖所表示之斷層與圖 31 相似情況，其差別僅為前者是正斷層，此為逆斷層，斷層面亦與層面走向平行，傾斜反方向，沿斷層面斜角之方向上盤相對上升；A 圖表示斷層發生後，侵蝕作用完成之前情形，極明顯地為一逆斷層；B 圖為侵蝕作用完成的情況，在剖面圖上明顯可見到上盤相對向上移動的現象，使下部的老地層可以與上部的新地層水平接觸；在平面上按理若地層多則可發現亦有重複的現象，至少此圖我們可發現下部的老地層與上部的新地層接觸了，亦即為斷層現象之特徵。

9、圖 33，為一特殊之情況，表示斷層沿著地層面發生，斷層面之走向、傾斜與地層面完全一致，斷層沿此層面發生正斷層，或逆斷層；A 圖表示斷層發生後，侵蝕作用發生前之情況，確實可見到是有斷層的發生；B 圖表示侵蝕作用發生後的情形，我們不管由 B 圖之平面上或剖面上均看不出有地層錯動的情況，不容易判斷有斷層的現象發生，必須佐以其他的證據才能找到斷層。

10、圖 34，地層為傾斜，與斷層面是斜交的關係，走向互相不平行，也不垂直，斷層沿著斷層面傾斜之方向移動；A 圖表示斷層發生之後，侵蝕作用發生之前情況，為一正斷層；B 圖表示侵蝕作用發生之後的情形：在平面上看為一橫移斷層，在剖面上看為一上下錯動之斷層，顯示出來的結果互相不一致，因之正確之判斷，唯有將其恢復至原來的情況方好作正確的判斷。

以上略舉十種斷層的情況予以說明，我們可以看出由斷層作用後的地質現象甚多且複雜，若再經侵蝕作用，則更難判斷其正確的相互移動，同一種結果似乎可以有幾種情況去產生，將複雜性予以簡單化，恢復舊觀即可正確地研判斷層現象。

(三)、認識斷層與斷層的特性：

斷層亦為一重要的地質構造，有的斷層構造甚為明顯，很容易就可以判別認識，有斷層就不容易認出，幸好斷層作用的發生亦可有許多現象的遺跡留下來，吾人即可依此來推斷。

1、構造的不連續現象(discontinuity of structures)：一個地層的突然消失與另一沒有關係的地層相接觸，一個老的斷層突然中斷，在左右一段距離之後再出現

(offset)的現象；一個褶皺軸之突然中斷，一個山脊(ridge)之突然中斷等等，均有可能指示斷層構造的存在，但這種現象僅為有可能性，亦必須佐以其他的現象證據才可以精確地判定。

2、地層的重複和地層消失(Repetition and omission of strata)，在前圖 31 中即為一地層重複出現的實例，圖 32 即為地層消失的實例，由於斷層的作用，可以將原在下部的地層衝上來，也可以將原來在上部的地層帶下去，因此使一套地層即表現了有局部的重複，或者局部的消失。圖 35 即表示在一平面圖上的一個向斜構造(syncline)，其兩翼有斷層的發生(即 FF 與 F'F')而使地層有重複(FF)及消失(F'F')的現象，在 FF 斷層上 abc 地層重複出現。在 F'F' 上 cd 地層消失，均為斷層的指示。

3、斷層面上的特徵(Features characteristic of Fault Planes)：許多斷層的斷層面上伴隨著發生許多的特徵，茲分述如下：

(1)、磨擦痕跡(Slickenside)：發生在斷層面上，由於上下岩盤互相錯動磨擦的關係，即留下磨擦痕跡，用手指頭於其上輕輕予以撫摩，可以發覺一個方向是平滑，另一相反方向一定是粗糙，平滑的方向即為相對的一岩塊運動的方向，所以可以利用它來判斷岩塊互相錯動的方向，但需注意的一點是磨擦痕跡僅能代表最後一次錯動的遺跡，前幾次者可說俱已被破壞，不可能再保存了。

(2)、斷層泥(gouge)：沿著斷層面，有些岩石可能被擠壓粉碎為細粒之斷層泥，看來似粘土(clay)夾雜在斷層角礫岩之內。

(3)、拖拉現象(drag)：如圖 36 所表示，斷層面兩側之上下盤常是不明顯尖銳的界面，而是帶有拖拉的作用，使其界限成一很平滑的曲度；此乃因岩體在某種溫度和壓力之下成為具有韌性的關係，一般而言，堅硬的砂岩不會有這種現象，發生在淺處或地表的斷層，這種現象也較少。

(4)、斷層角礫岩(faulted breccias)，磨礫岩(mylonite)的發生：當斷層作用發生之時，定有擠壓的力量伴隨著發生，即可將堅硬的岩塊擠成碎塊，這些碎塊有二類，一類由肉眼即可看出具有菱角(angular)的碎塊，叫做角礫岩，另一類除受了擠壓外尚有熱之作用發生輕度的變質作用，產成似玄武岩的微角礫岩，在顯微鏡下始可見其角礫構造，此二種岩石均為斷層上的產物。

(5)、其他在斷層面上的特徵尚有溝痕及脊痕，均為受磨擦與擠壓的結果。

地質學家即可由斷層面上的這些特徵來研判所有的斷層構造。

4、矽化作用和礦化作用(Silicification and Mineralization)因發生斷層，使地層均有破裂，這些破裂即能為溶液流過的通路，這些溶液可以細粒之矽質取代裂隙的圍岩，即為矽化作用，若這些溶液含有較具經濟價值的礦物成份元素，即為礦液(mineralizer)，流經斷層的裂隙，發生置換作用，即產生有經濟價值的礦物，是為礦化作用，台灣金瓜石礦區的礦化作用據研究亦即如此方式完成的；所以在有矽化帶和礦化作用帶的位置很可能會有斷層構造的存在。

5、沈積相的突然改變(sudden changes in sedimentary facies)，正常的沈積相之水平變化可如圖 37 所表示的樣子，淺者為砂岩相，向深海處依次漸變為砂岩→頁岩相，頁岩→石灰岩相，石灰岩相，如果讓石灰岩相與砂岩相突然地接觸，即表示由砂岩相突然變化為石灰岩相，即指示我們這之間可能有斷層的存在，有待進一步的探索研究。

6、地文資料特性(physiographic data)：沈積岩中較堅硬的岩層不易受風化和侵蝕，在地形上即形成山脊，常會因斷層的切過，使這些明顯的山脊突然的中斷，即表示有斷層的存在，如圖 38 所表示者，其他地文上的特徵如斷層崖(fault scarp)

及斷層線崖(fault-line scarp)即為斷層之故所造成的地勢之高低懸崖；一個地區所有的溫泉若成線狀排列，亦可能與斷層有關，這些地文資料顯示之後得作進一步的觀察研究，才能研判斷層構造。

如上 1-6 提出之斷層特性即是協助構造地質學家如何去認識斷層的方法，此地需特別強調的是這些特徵並非全部都可以出現在斷層上，有的特徵很容易發生而保存下來，有的易發生而不易保存，有的不易發生，更談不到保存，利用這些特徵可以協助地質學家研判斷層，但其他的知識則不可忽略，一個地質事件的解釋，依據的資料愈多，愈可以作合理的解釋，而野外的實際工作經驗更為重要。

(四)、斷層構造的種類：

地質學者對斷層構造有二種分類形式，其一是根據斷層的外形，其幾何圖形特徵予以分類，不考慮其成因，叫幾何分類(Geometrical classification)，另一是依其成因的分類(Genetic classification)。

1、幾何分類

(1)、按斷距之傾角劃分(Based on rake of net slip)

(a)走向滑動斷層(strike-slip fault)：斷距平行於斷層面之走向者，如圖 28。

(b)傾斜滑動斷層(dip-slip fault)：斷距平行於斷層面之傾角方向者，如圖 27。

(c)斜交滑動斷層(diagonal-slip fault)：斷距與斷層面之走向，傾斜方向均不平行者，如圖 29。

(2)、按斷層面與地層面之關係劃分(based on attitude of fault relative to attitude of adjacent beds)

(a)走向斷層(strike fault)：斷層面的走向平行於地層面的走向者，如圖 31 和圖 32。

(b)層面斷層(Bedding fault)：即斷層面與地層面平行者，如圖 33。

(c)傾斜斷層(dip fault)：指斷層面之走向平行於地層之傾斜者，如圖 28、圖 29 和圖 30。

(d)斜交斷層(diagonal fault)：指斷層面之走向與地層面之走向斜交者，如圖 34。

(e)縱斷層(longitudinal fault)：即斷層面之走向與區域之構造方向平行者。

(f)橫斷層(transverse fault)：指斷層面之走向與區域之構造方向垂直或斜交者。

(3)、按一地區斷層排列的型式劃分(Based on fault pattern)

(a)平行斷層(parallel faults)：斷層互相平行，有相同的走向和傾斜，如圖 39A。

(b)雁行斷層(En'echelon faults)：此類均較短，斷層之走向和傾斜亦相同，但排成雁行，互相有重疊之部份，為平行斷層沒有發育完全者；如圖 39B。

(c)環圓狀斷層(Peripheral faults)：此類斷層互相構成圓圈或圓圈的一部份，如圖 39C。

(d)放射狀斷層(Radial faults)：所有斷層的排列表現出從一個點放射出的排列表式，如圖 39D。

(4)、按斷層面的傾角量劃分(Based on value of dip of fault)如此的分類我們大致可以將它分成二類，即傾角大於 45°之高角度斷層(High-angle faults)和傾角低於 45°之低角度斷層(Low-angle faults)。

(5)、按斷層上下盤相對錯動的型式劃分(Based on apparent movement)

(a)正斷層(apparent normal fault)：如果上盤相對下降的斷層我們就叫它為正

斷層，如圖 26、圖 27、圖 31、圖 33、圖 34。

(b)逆斷層(apparent thrust 或 reverse fault)：即上盤相對上升的斷層，如圖 32。

2、成因分類(genetic classification)：地質學家按在野外實際見到的斷層中上下岩盤之相對運動來分類即是成因分類法，如此可將斷層分為三類，茲分述如下：

(1)、逆斷層(Thrust fault)：即指所有上盤相對上升的斷層，此類斷層吾人又可依其斷層面角度的大小再劃分成三種，角度大於 45°者叫做逆斷層(Reverse fault)，角度小於 45°者叫做逆衝斷層(thrust fault)，若小於 10°且移動之斷距甚大者，就叫做逆掩斷層(overthrust)。

(2)、正斷層(Normal fault)：即上盤岩塊相對下降的斷層，有時認為此類斷層可能因重力關係而發生，所以也有叫做重力斷層(gravity fault)。

(3)、橫移斷層(Strike-slip fault)或也叫做扭曲斷層(Wrench fault)：這類斷層岩盤沒有上下之移動，僅發生沿斷層面走向方向移動的現象者，此類斷層可分為左移(sinistral)和右移(Dextral)二種，若有原來連續之岩脈，經橫移斷層分開之後(offset)，我們沿原岩脈向斷層前進，若遇斷層而要再碰到被分開的另一斷岩脈需左轉者即為左移型(如圖 40A)，需右轉者為右移型(如圖 40B)。

3、當然斷層也可依二個岩塊的絕對移動(Absolute movement)來分類，但這甚為困難，一個上盤下降的正斷層之發生若按其絕對運動來分類，我們可以指出五種運動方式均可造成正斷層的：(1)上盤下降，下盤上升(圖 41A)；(2)上盤下降，下盤不動(如圖 41B)；(3)上盤下降量大於下盤之下降量(圖 41C)；(4)上盤不動，下盤上升(圖 41D)；(5)上盤上升量小於下盤上升量(圖 41E)；依此類推引起逆斷層的形式亦可有五種絕對運動，引起左移及右移之橫移斷層亦各有五種絕對運動，但是一般在地質討論上吾人很難達到此種地步，事實上也無此必要。

(五)結論：

要研討斷層構造並不是一件容易的事，此文僅為敘述性介紹一般斷層的型態，至於發生斷層的機構(mechanics)，各類斷層所具有的獨立特性，一般的例子解說，與其他的構造關係，因涉及專門知識，在此文中不便敘述。

對斷層構造的瞭解，除了認清上面所論及的說明外，到野外實地的觀察甚為重要，構造地質以外的地質知識更是研究斷層構造的基本知識，地質這門科學是個開放性，區域性者，各地區有其獨特的地質特性，因此找不出一放諸四海皆準的原則，各種性質及原理運用之妙，僅存乎一心而已。

三、地層的褶皺作用

(一)、褶皺的定義及描述：

如圖 42 所表示，多層相重疊軟性厚紙板，若受了來自兩側的水平壓力之作用，即發生變彎曲(Bent)的現象；成層的地層狀亦如多層相疊的厚紙板，若受了水平的壓力作用，同理亦產生變彎曲的現象，這就是地層的褶皺現象。

在地質學上對地層受了褶皺的作用後可分為二大類型。即背斜褶皺(anticline)和向斜褶皺(Syncline)，如圖 43 之上，若由外側向中心再從另外側出來，所經過的地層關係為由新地層到老地層再回到新地層，這種關係的褶皺就是背斜褶皺，如圖 43 之下，若由外側向中心再從另一外側出來，所經過的地層關係為由老地

層到新地層再回到老地層，這種關係的褶皺就是向斜褶皺。

受了褶皺的地層造成向斜或背斜構造，地層受了彎曲，所有最大彎曲度的點連成的線叫做褶皺軸，這些褶皺軸即構成褶皺軸面。褶皺軸面兩側的地層叫做翼部。如圖 44 所表示者，褶皺的軸(aa)有水平者如 A、D、E；有傾斜者如 B、F，有垂直者如 C。褶皺之軸面亦有水平者如 E，垂直者如 A、C，傾斜者如 B、D、F。如圖 45，背斜褶皺之最頂部叫峯部(Crest)最低的部分叫漕部(trough)。峯部構成峯部面(crest Plane)，漕部構成漕部面(trough Plane)。

(二)、褶皺的種類：

1、按褶皺軸狀態及兩翼關係可分為對稱褶皺(Symmetrical Fold)和不對稱褶皺(Asymmetrical Fold)，對稱者為軸垂直者(如圖 46-A)。不對稱者為軸呈傾斜者(如圖 46-B、C、D)。不對稱褶皺又分為一般之不對稱褶皺(如圖 46-B)，即軸傾斜，翼向二側傾斜者；倒轉褶皺(Overtured Fold)，即軸傾斜，兩翼向同一方向傾斜者(如圖 46-C)；橫臥褶皺，即軸水平者(如圖 46-D)。

2、褶皺又有其他的形狀：如等斜褶皺(Isocline Fold)，即兩翼地層等傾斜者，如圖 47 之 A、B、C 即分別為垂直等斜褶皺，傾斜等斜褶皺及水平等斜褶皺，又如人字形褶皺(chevron fold)，即兩翼成 \wedge 狀者(圖 47-D)；又如箱狀褶皺(box fold)即峯部寬平兩翼亦成平坦者(如圖 47-E)；又如扇狀褶皺(Fan fold)，其兩翼均倒轉(overtured)者(如圖 47-F)；又有單斜褶皺(monocline)。

3、又按褶皺的程度，可以分類成緊密褶皺(tight fold)和寬緩褶皺(open fold)，可如圖 48 所表示，A 即為寬緩褶皺，B 即為緊密褶皺。

4、按地層受褶皺作用之後的狀態又可將褶皺構造分為相似褶皺(similar fold)和平行褶皺(parallel fold)；相似褶皺即地層受褶皺的形狀保持不變(如圖 49-A)，往上往下無限延伸者，此種褶皺的結果軸部地層增厚，兩翼地層變薄；平行褶皺，即地層受褶皺後層面保持平行者(如圖 49-B)，此種褶皺若往上之向斜為變成尖銳之下凹，往下之背斜層變成尖銳的上凸狀，地層褶皺前後保持不變的厚度。

5、有些褶皺作用如圖 50 所表示者，僅上部份有受到褶皺作用，底盤保持不動，這種褶皺叫戴高帽褶皺(D'ecollement fold)。

6、有些褶皺軸為水平，有些為傾斜，傾斜者叫傾斜軸褶皺(plunging fold)，水平者叫無傾斜軸褶皺(nonplunging fold)，如圖 51 所表示，A、C 表示褶皺之立體圖，A 無傾斜，C 有傾斜，B、D 表示地質圖，B 為 A 型產生的地質圖，D 為 C 型產生的地質圖。無傾斜者地質圖上表示的岩層界線定平行不相交；傾斜者地質圖上表示的岩層界限定會相交。

傾斜軸褶皺有單方向的，也有如圖 52 之二方向或四方向者。如此地層之界限即可構成封閉的曲線，四方向傾斜之背斜容易造成穹起地形(Dome)，向四方傾斜之向斜即容易造成盆地(Basin)地形。

(三)、褶皺構造的研究法：

茲敘述褶皺的研究方法如下：

1、直接觀察：在野外崩坍的露頭、公路切割的剖面等若有褶皺，均可直接看到背斜或向斜褶皺構造。

2、由地質圖參考地層傾斜方向的變化，而推測，如圖 53 即表示由地質圖上測出的向斜和背斜褶皺。

3、其他亦可由空照圖判別，鑽井岩心的變化予以判別，礦坑坑邊內之地層資料及地球物理法如震測、電測以知地層之狀態而進一步予以判斷。

4、研究室內可內所謂 Pi 及 B 投影法，將一地區與各個地層垂直的線予以投影或直接將地層面的狀態予以投影，亦可直接看出這一群地層所表現出來的構造情形。此法亦可進一步用電腦予以分析。

(四)、引起褶皺構造的原因：

使地層產生褶皺的應力(stress)不外乎水平擠壓力，而產生水平壓力的原因有二大項，即由地球內部產生力量的地體構造來源(tectonic origin)和非由地球內部，而僅表面的作用，一般伴隨發生風化和侵蝕作用的非地體構造來源(nontectonic origin)。而一般所論及和所見到者以地體構造來源者為主，茲分述地體構造來源於下：

1、收縮學說(Contraction theory)，如橘子皮一般乾了即收縮，表面即引起皺紋，地球亦因漸漸地變冷而使其表面引起收縮現象，長的物質要變短而量不改，則祇有使其產生褶皺。

2、大陸漂移學說及板塊構造運動學說(continental drift and plate tectonics)：此二學說即認為地球上的各個陸塊有移動，若陸塊有運動，則就有互相撞擊的可能，陸塊與陸塊若互相碰撞，其前緣部份等於受了擠壓即可能發生褶皺作用。

3、對流作用，如圖 54 所示，因地殼內之物質有對流作用，熱之物質較輕即上升，冷之物質較重即下降，在下降的地區由於有一擠壓之應力，即使這一地區產生褶皺作用。

4、重力滑落之故(Gravitational gliding)：如圖 55 所表示，若表面堆積之地層尚未固結，則在某一傾斜度以上即因重力之故使其滑落，在此過程中前面東西受後來之推擠更易發生褶皺作用。

(五)、討論：

物質受到水平擠壓之應力(stress)，故可發生褶皺，但亦可發生斷裂，我們知道，發生褶皺時這個材料一定要在一種可塑性的狀態，才能使物質變形(Strain)。

要使物質在可塑性的狀態，其條件當然要在較高的限制壓力(Confining pressure)，若在高溫時則限制壓力下降，若在低溫時，限制壓力將增高。

由此若受褶皺之岩層所在之位置溫度低時，它一定要深埋地下受極大之地層

壓力，才能形成可塑性。若所在之位置為高溫地，則壓力不必很大即可能成為可塑性，即不必埋在深處。

因之我們可以斷定受褶皺的地層，當其發生褶皺作用時一定不是在地表，至於其深度如何，一方面看岩性，一方面依其受的溫度而定。地表上可見到褶皺，可以說因地殼之變動抬高再受地質作用之風化、侵蝕結果才可讓吾人見到。

(六)、結語：

本文僅就大學中構造地質學講授之教材的一部份節錄而已，希望由此內容協助各位地球科學的愛好者，使在授課方面更能得心應手，若想深入探討，則需閱讀更專門的書籍，亦盼能有些同好對這方面有興趣，則可更進一步予以研討。