
2009 年國際地球科學奧林匹亞 IESO-- ITFI 測量地形學應用於 921 集集地震震度 調查之野外考察活動講義

葉孟宛^{1*} 姜彥麟² 張俊彥³ 梁鳳儒⁴ 王希俊⁴ 黃進達⁵

¹ 國立臺灣師範大學 通識教育中心

² 行政院經濟部 地質調查所

³ 國立臺灣師範大學 科學教育中心

⁴ 國立臺灣師範大學 圖文傳播系

⁵ 國立臺灣師範大學 地球科學系

壹、導論

1999 年 9 月 21 日發生了 20 世紀亞洲最大的地震-芮氏規模高達 7.6 的集集地震。此地震重創了中台灣，不僅摧毀了幾千棟的建築物，還奪走超過 2000 人寶貴的生命。世界各地地球物理與地質等相關領域的科學家們(如 Kao et al., 2000, Rubin et. al., 2001, Chen et al., 2002, Angelier et al., 2003, Heermance & Evans, 2006, Ma et al., 2006, Chen et al., 2007, 及 Lee et al., 2007) 皆致力於研究這個事件，並已獲得了很多有關斷層活動的行為模式和地震災害之預測與預防等研究成果。如今，你和你的隊友們將追隨這些科學家們的足跡，藉由測量位於台灣中部車籠埔斷層的地貌特徵，來進行另一項跨國際研究小組之科學調查活動。藉由此次的國際團隊野外實察任務，我們希望你們這些來自世界各地，才華洋溢的年輕地球科學家們可以幫助我們瞭解並界定過去 10 年前所發生之 921 集集地震的規模、地表破裂的可能長度等相關資訊以助於未來防範類似地震災害的評估。

貳、斷層構造之簡介

一、斷層之定義與結構

(一) 斷層之定義

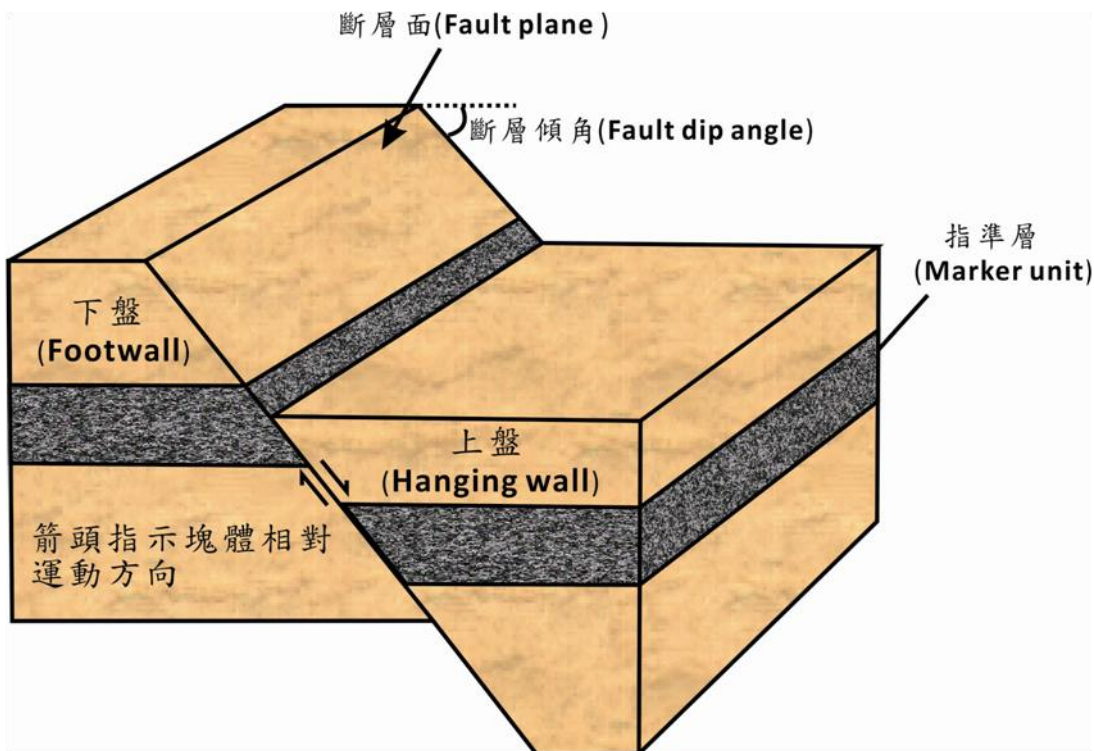
根據 Neuendorf 等人 (2005) 對斷層 (fault) 所下的定義為：「分開兩岩體之破裂面，且破裂面兩側的岩體有進行相對的運動」。但有時我們很難明確的指出需要具有多大尺度 (奈米、公釐、或公分) 之相對運動才夠明顯的能將破裂面稱為斷層，因為相

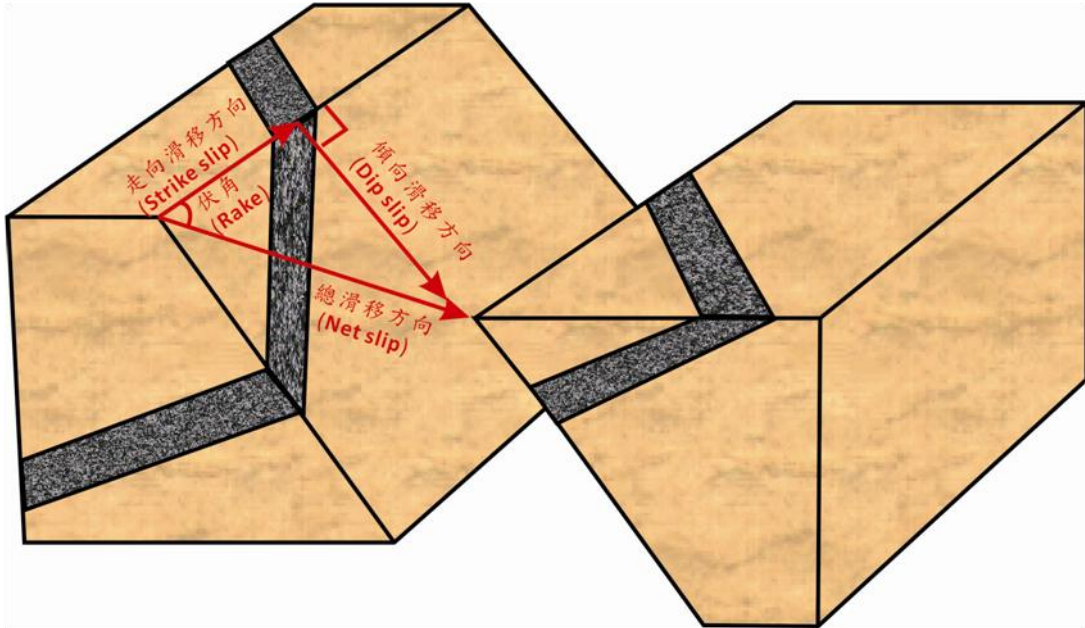
*為本文通訊作者

對運動的尺度大多是由個人判斷的 (Hatcher, 1990)。舉例來說，一個相對運動長達幾公里的斷層，如聖安德烈斯斷層 (San Andreas fault) 是不難定義的；但若一個斷層只有偏移幾厘米到幾毫米，可能會被認為是一個裂縫而不是斷層。因此，斷層也可被界定為「於岩石破裂面上，主要藉由脆性變形機制所產生的滑移。而斷層帶 (fault zone) 則是意指由脆性變形機制在一個可定義出寬度的區間中由多條斷層切穿過岩石而導致岩石的碎裂與相對滑移之構造區間 (Pluijm & Marshak, 2004)。而斷層活動之錯移量則是藉由沿著斷層面上的特定的方位線 (如斷層面之走向、傾向等) 來測量一個可於斷層兩側相對應之標記構造 (如：層面或岩脈等) 的位移距離 (如圖一和表一)。

(二) 斷層之結構

如圖一所示，斷層的結構包括：斷層面 (Fault plane)、斷層傾角 (Fault dip angle)、上盤 (Hanging wall)、下盤 (Footwall)、走向滑移方向 (Strike slip)、傾向滑移方向 (Dip slip)、總滑移方向與距離 (Net slip) 和伏角 (Rake)，其中各結構之定義詳列於表一。





圖一、3D 斷層結構示意圖（修改自 Hatcher, 1990）。(A)為一傾向滑移斷層，圖中標示出下盤、上盤、斷層面及其傾角；(B)為一個斜向滑移斷層，並標示出斷層面上的傾向滑移方向、走向滑移方向、總滑移方向與其距離及伏角。

表一、斷層構造相關專有名詞之定義列表（修改自 Hatcher, 1990; Pluijm & Marshak, 2004; Neuendorf et al., 2005）。

專有名詞	定義
斷層面 Fault plane	岩石破裂滑移之表面。
斷層傾角 Fault dip angle	斷層面與水平面相交的最大夾角。可於垂直斷層走向之想像的垂直面上測得。
上盤與下盤 Hanging wall and Footwall	若斷層面不是垂直面時，斷層面之上的岩塊稱為上盤；斷層面之下的岩塊則稱為下盤。
走向滑移 Strike slip	定義平行於斷層面走向或向左或向右的相對運動方向。
傾向滑移 Dip slip	定義平行於斷層面傾向或向上或向下的相對運動方向。
總滑移 Net slip	實際岩盤運動的方向。
伏角 Rake	任何線性構造（如擦痕）與其構造面（斷層）上水平線（走向）之夾角。

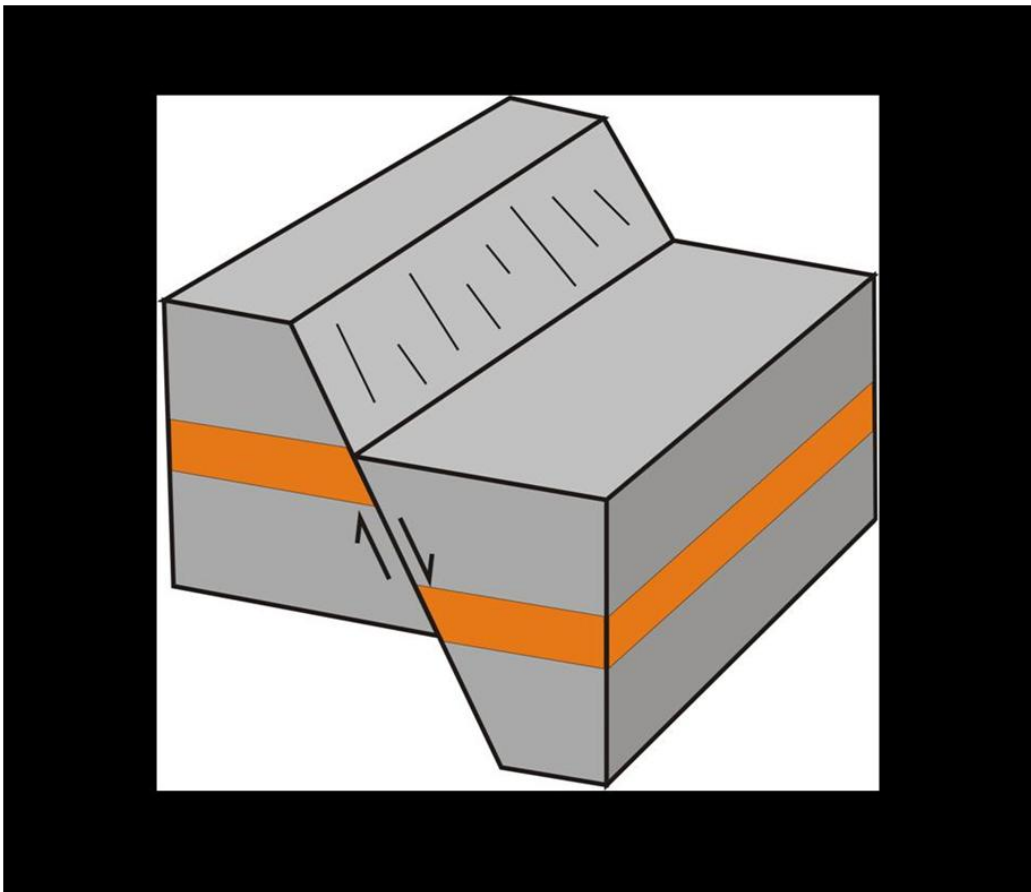
二、斷層的分類

既然斷層是藉由斷裂面兩側岩體的相對運動所定義的，斷層的分類則可藉由斷層面上的總滑移的方向來分辨不同的斷層類型。

(一) 傾向滑移斷層 (DIP-SLIP FAULT)

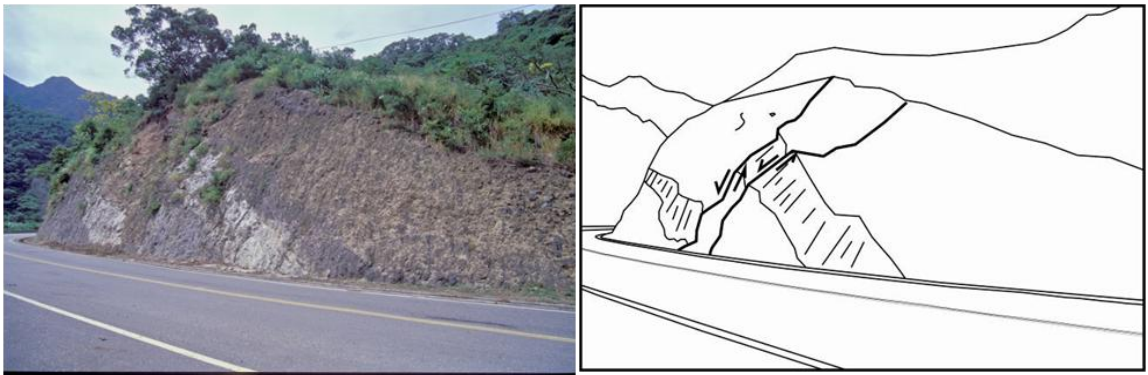
當總滑移方向平行或趨近平行於斷層面之傾向時，則稱之為傾向滑移斷層。換言之，上盤岩塊會沿著斷層面或向上或向下平行或近平行於斷層面的傾向滑移。可分為兩種基本型態：正斷層 (normal fault) 和逆斷層 (reverse fault)。

- 正斷層-上盤相對下盤向下滑移運動 (如圖二與圖三)



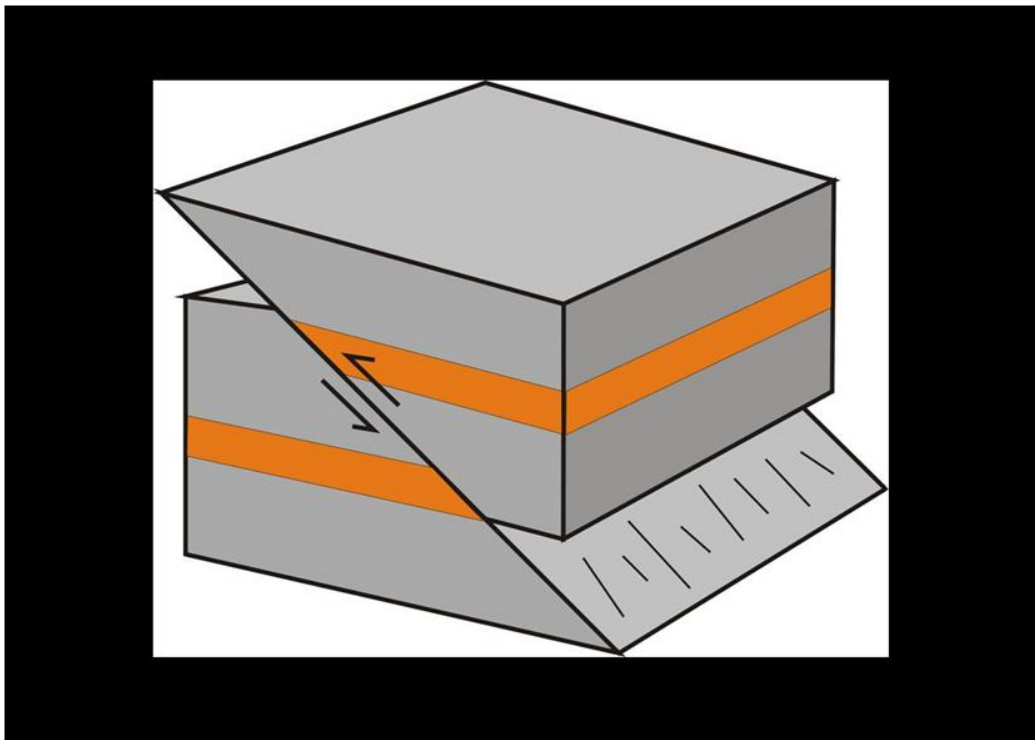
圖二、3D 動畫顯示動態之正斷層相對運動。請利用下列網址

http://www.ieso2009.tw/home/images/5d/3d_fault.exe 下載驅動程式與動畫檔案，並配合具有網路攝影機之電腦與本頁來觀看此動畫。當你將此頁平面的圖讓網路攝影機抓取到影像後則可於電腦螢幕上觀看到正斷層活動之 3D 動畫開始躍然紙上並不斷重複播放。您同時亦可以於網路攝影機前旋轉本頁，此時電腦螢幕上觀看到正斷層活動之 3D 動畫亦會跟著旋轉，以讓讀者們可以藉由不同的視角來觀看此斷層。



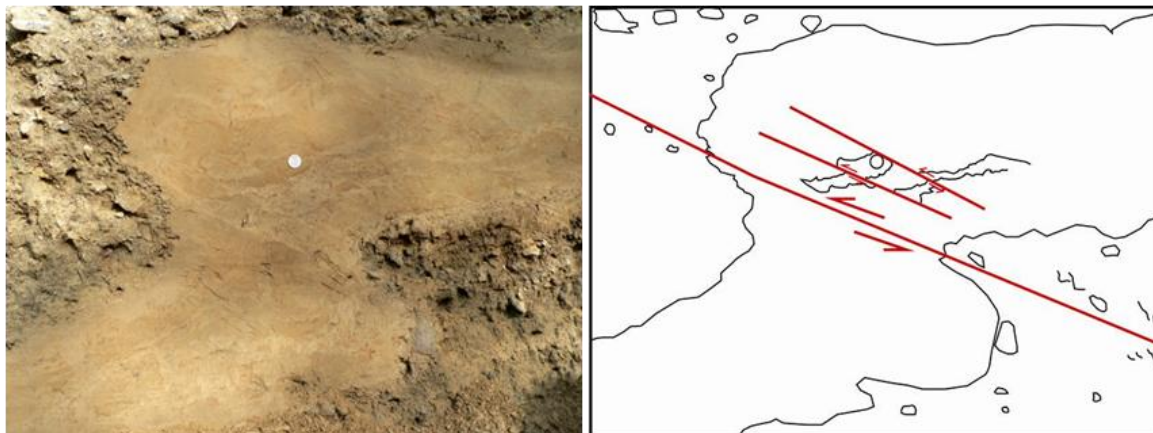
圖三、台灣台東縣東河鄉之正斷層露頭照片與其簡易素描示意圖。

- 逆/逆衝斷層-上盤相對於下盤向上運動（圖四與圖五）。部分地質學家將斷層面傾角小於等於 30 度者定義為逆衝斷層，而大於等於 45 度者則定義為逆斷層，但它們皆具有相同的相對運動模式（Hatcher, 1990）。



圖四、3D 動畫顯示動態之逆斷層的相對運動。其操作模式請見圖二之圖例說明，連結一個網路攝影機和一個電腦，配合所提供之 CD 來觀看此動畫。你同時可以旋轉小冊子以轉換不同視角來觀看此斷層。

(http://www.ieso2009.tw/home/images/5d/3d_fault.exe)

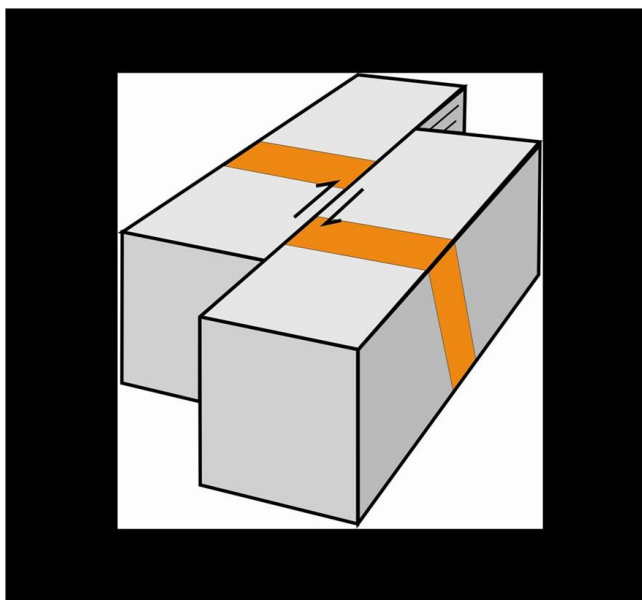


圖五、台灣台東縣東河鄉之逆斷層系統露頭照片與其簡易素描示意圖。

(二) 走向滑移斷層 (STRIKE-SLIP FAULT)

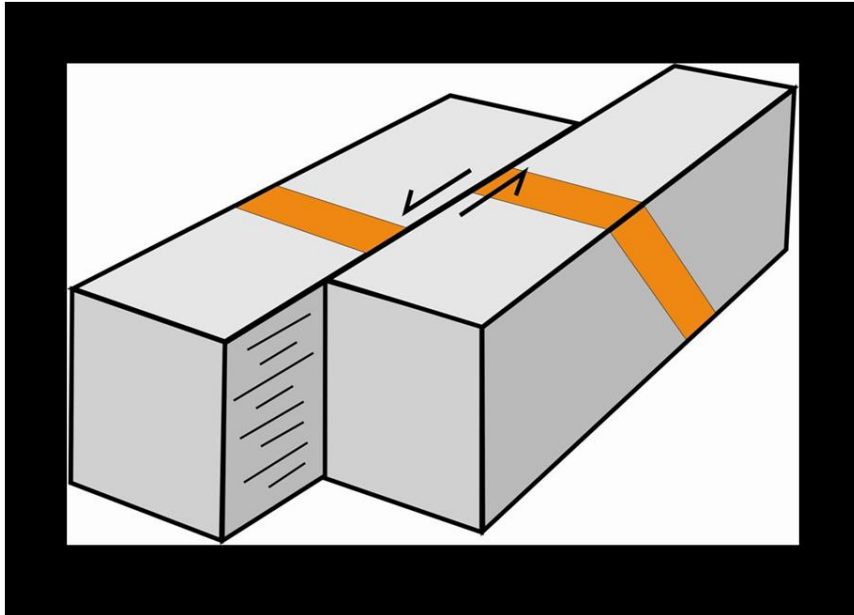
如果總滑移的方向平行於或近平行於斷層面的走向，則稱為走向滑移斷層。在這個情形下，則沒有明顯的上盤與下盤之分，斷層兩邊的兩個岩體均沿著斷層面以近水平的方向滑移運動。可分為兩個基本的型態：右移斷層（圖六與圖八）和左移斷層（圖七與圖八）。

- 右移斷層-跨越斷層兩邊之岩塊相對於斷層，向觀察者的右側移動。

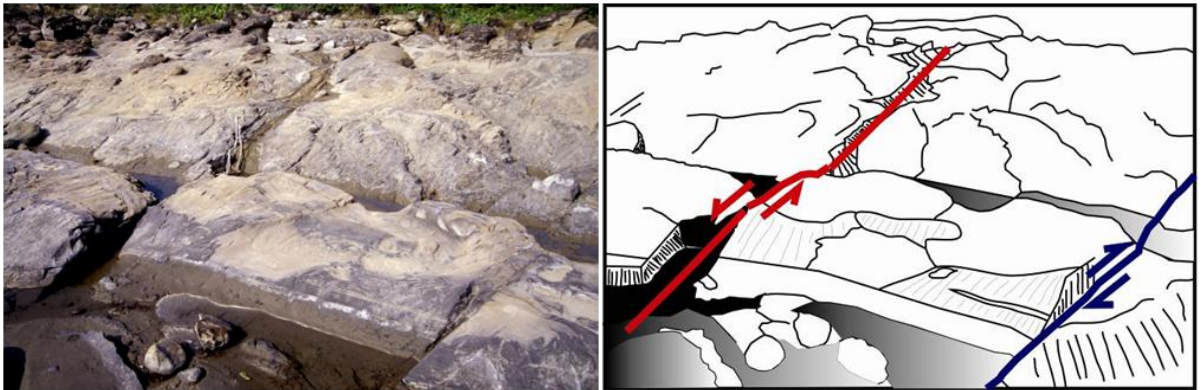


圖六、3D 動畫顯示動態之右移斷層的相對運動。其操作模式請見圖二之圖例說明，連結一個網路攝影機和一個電腦，配合所提供之 CD 來觀看此動畫。你同時可以旋轉小冊子以轉換不同視角來觀看此斷層。
(http://www.ieso2009.tw/home/images/5d/3d_fault.exe)

- 左移斷層-跨越斷層兩邊之岩塊相對於斷層，向觀察者的左側移動。



圖七、3D 動畫顯示動態之左移斷層的相對運動。其操作模式請見圖二之圖例說明，連結一個網路攝影機和一個電腦，配合所提供之 CD 來觀看此動畫。你同時可以旋轉小冊子以轉換不同視角來觀看此斷層。
(http://www.ieso2009.tw/home/images/5d/3d_fault.exe)

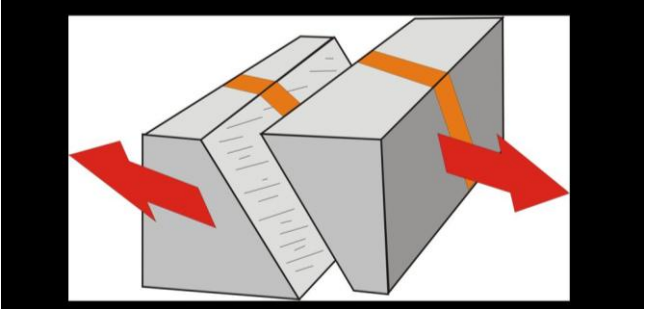
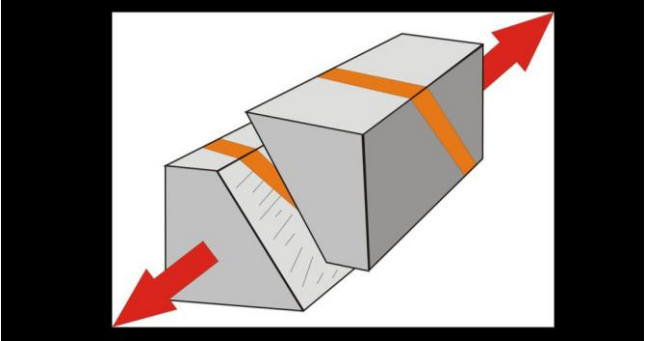
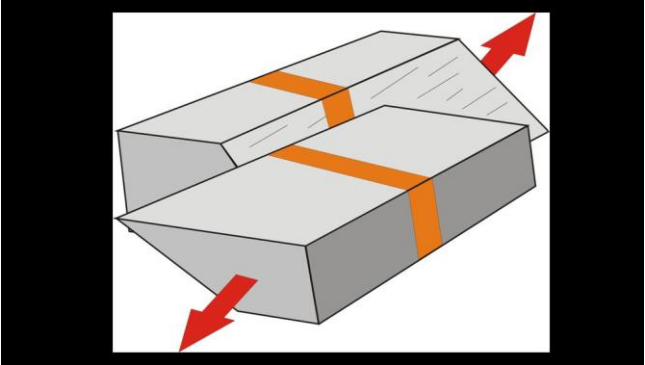
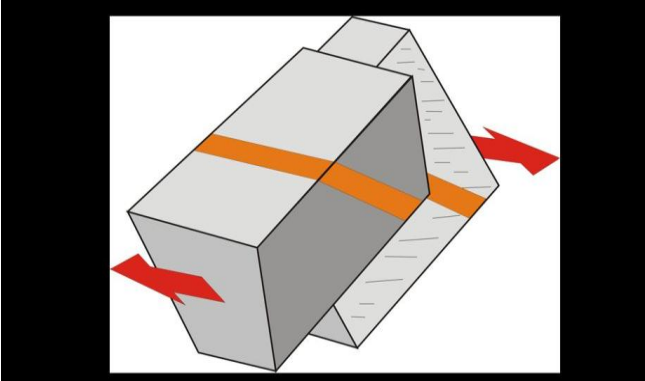


圖八、台灣台東縣富岡之左移斷層（紅線）與右移斷層（藍線）露頭照片與其簡易素描示意圖。

(三) 斜移斷層 (OBLIQUE-SLIP FAULT)

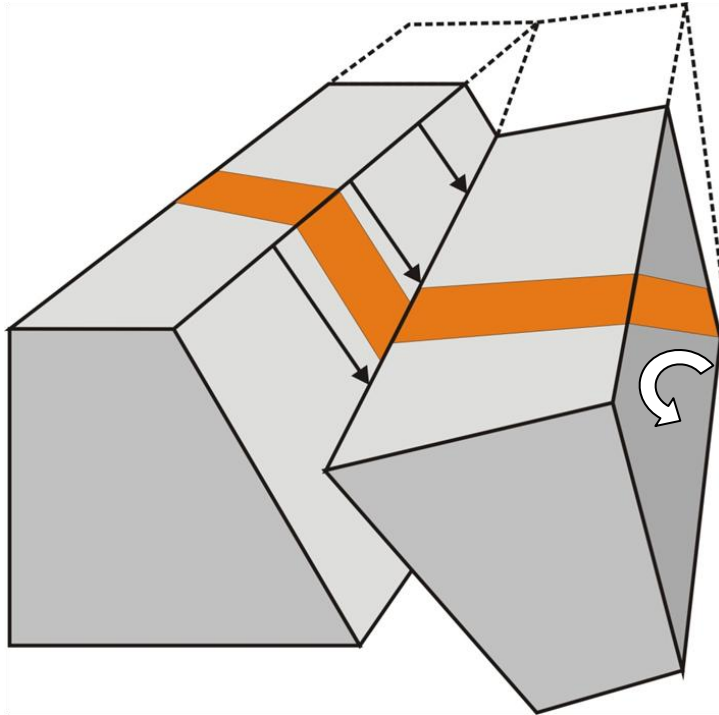
斜移斷層-當總滑移方向介於斷層面傾向與走向之間者稱為斜移斷層。不同型態之斜移斷層的定義是根據結合走向滑移（左移或右移）與傾向滑移（正或逆）兩個方向組成所定義出之剪切方向來分辨（表二）。

表一、不同型態之斜移斷層的分類與其範例（圖修改自 Pluijm and Marshak, 2004）。
（http://www.ieso2009.tw/home/images/5d/3d_fault.exe）

類型	3D 動畫範例
左移伸張斷層 （ Left-lateral transtensional fault ）： 含有正斷層/伸張要素之 左移斷層	
左移壓縮斷層 （ Left-lateral transpressional fault ）： 含有逆斷層/壓縮要素之 左移斷層	
右移伸張斷層 （ Right-lateral transtensional fault ）： 含有正斷層/伸張要素之 右移斷層	
右移壓縮斷層 （ Left-lateral transpressional fault ）： 含有逆斷層/壓縮要素之 右移斷層	

(四) 剪刀斷層 (SCISSORFAULT)

斷層面兩邊之岩體相對旋轉，而其滑移量不均一，由岩體旋轉之中心區域沿著斷層面的走向遞增其位移量 (圖九；Pluijm and Marshak, 2004)。



圖九、剪刀斷層的 3D 塊體示意圖 (修改自 Pluijm and Marshak, 2004)。

三、斷層活動與地形之關係

斷層活動所造成的地貌特徵包括：地表破裂 (surface rupture)，斷層崖 (fault scarp)，斷層線崖 (fault-line scarp)，三角面 (triangular facet)，面的走向 (alignment of facet)，斷層線上河流坡度的增加，懸谷 (hanging valley)，成列的噴沙、土壤液化、山崩以及河流襲奪。這些地貌特徵是地球科學家藉以了解研究區域中，古地震發生的頻率與重建過去構造演化史非常重要的研究材料。

(一) 地表破裂 (SURFACE RUPTURE)

伴隨地震的斷層活動通常會沿著斷層面滑移的走向製造出一系列地表破裂 (圖十；Neuendorf et al., 2005)。



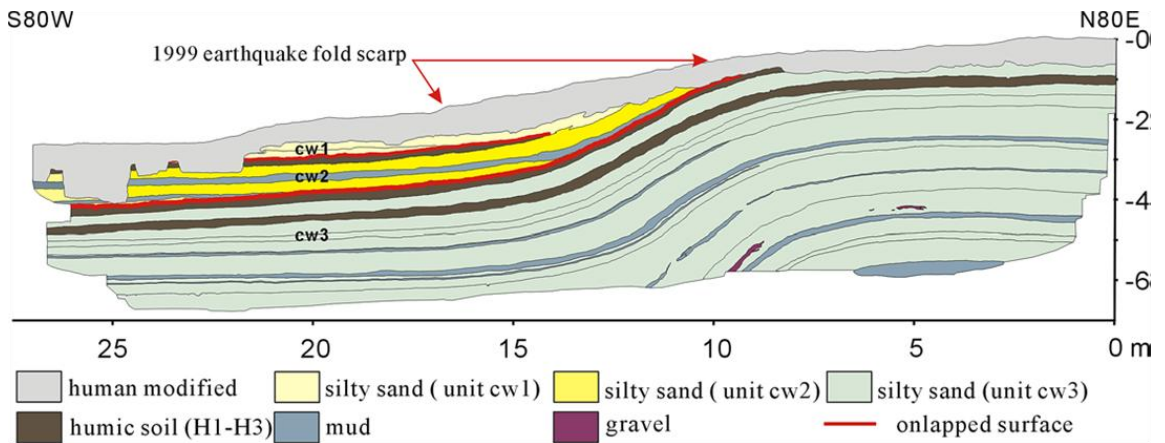
圖十、2003 年芮氏規模 6.5 的成功地震在東台灣電光泥火山所造成的地表破裂。

(二) 斷層崖 (FAULT SCARP)

斷層崖是藉由斷層活動導致地表位移後，未經過風化與侵蝕作用之前，所形成的陡坡或懸崖，為斷層活動後的初始地形。(圖十一；Neuendorf et al., 2005)。但不是所有斷層崖都是由出露至地表破裂的斷層所造成，盲斷層（斷層沒有出露至地表者則稱為盲斷層）亦可以在地表上形成褶皺崖（圖十二；Neuendorf et al., 2005）。



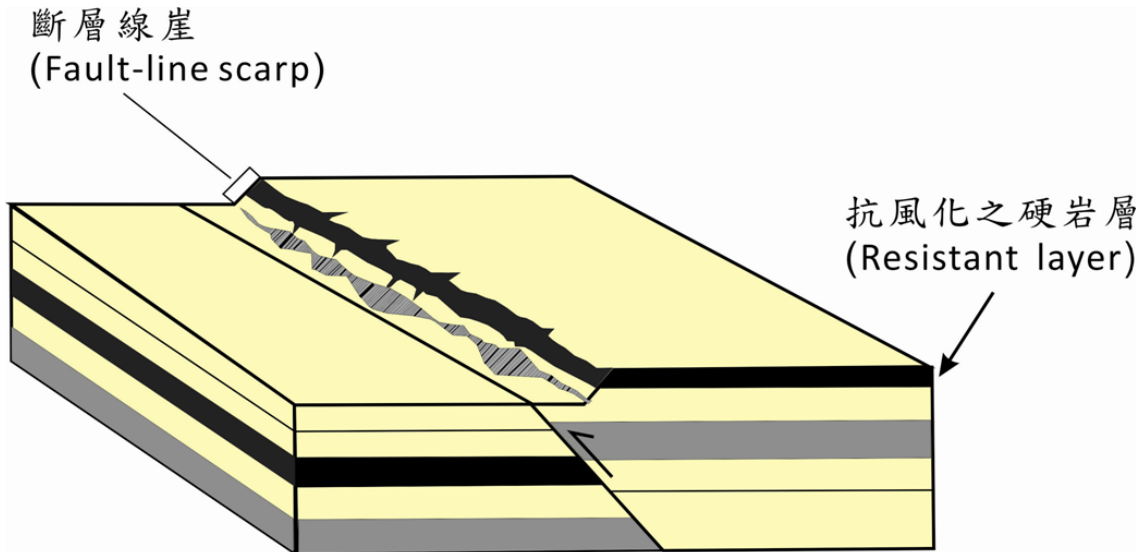
圖十一、921 集集地震期間，車籠埔斷層在台灣中西部埤豐橋造成地表破裂後所形成的斷層崖（紅色箭頭）。



圖十二、921 集集地震期間，車籠埔斷層在台灣中西部獅甲造成的單斜褶皺素描示意圖。此剖面沒有形成地表破裂，但有形成大約 0.8 公尺高的地形高差(Chen et al., 2007)。

(三) 斷層線崖 (FAULT LINE SCARP)

與斷層崖相似，斷層線崖也是因斷層活動所造成的陡坡或斷崖。然而，斷層線崖主要是經由沿著斷層上的差異侵蝕作用所造成的次生地地表構造(圖十三、Neuendorf et al., 2005)。



圖十三、斷層線崖的立體示意圖。圖中懸崖被定義為斷層線崖，他的形成是由於斷層上較易被風化的軟岩層(灰色)相對較難被風化的硬岩層(黑色)間差異侵蝕作用所致。

四、斷層位移量、地表破裂長度與地震規模的關聯性

過去十多年來，科學界有相當多的研究著重於震度與斷層系統大小、不同尺度的斷層於斷成系統中的組成狀況、與斷層活動類型的關連性（如 Yielding et al., 1996）。科學界常使用經由比對大量斷層與地震數據所觀測到的特徵是：地震的震度與伴隨地震活動的斷層長度間的關係成正相關。也就是說地震的震度與由斷層的長度與位移量所定義的斷層規模（fault magnitude）成正相關連結（圖十三與圖十四）。就拿聖安德烈斯斷層（San Andreas fault）作為例子，此斷層系統是由無數段不規則的斷層錯動所連結。而每段斷層之長度與位移量皆不相同，有時差異相當大，因此我們必須將每段斷層之長度與位移量加總之後才是此斷層的總長度及總位移量。而當斷層長度越長時，由於其斷層系統中每段斷層大小的組成狀況不一樣，有的由許多段小斷層所組成，而有的則是由幾條大斷層所組成，雖然其總斷層長度是一樣的。但由於其中的組成不同時，其地震活動所釋放出的力量大小卻可相差超過八個數量級（ 10^{-3}m 到 10^5m ）的差異。一般來說，斷層尺度的大小（以 S 為標記，代表斷層長度或最大位移）和斷層的數量（ N ），如下列方程式所示具有正比的特性：

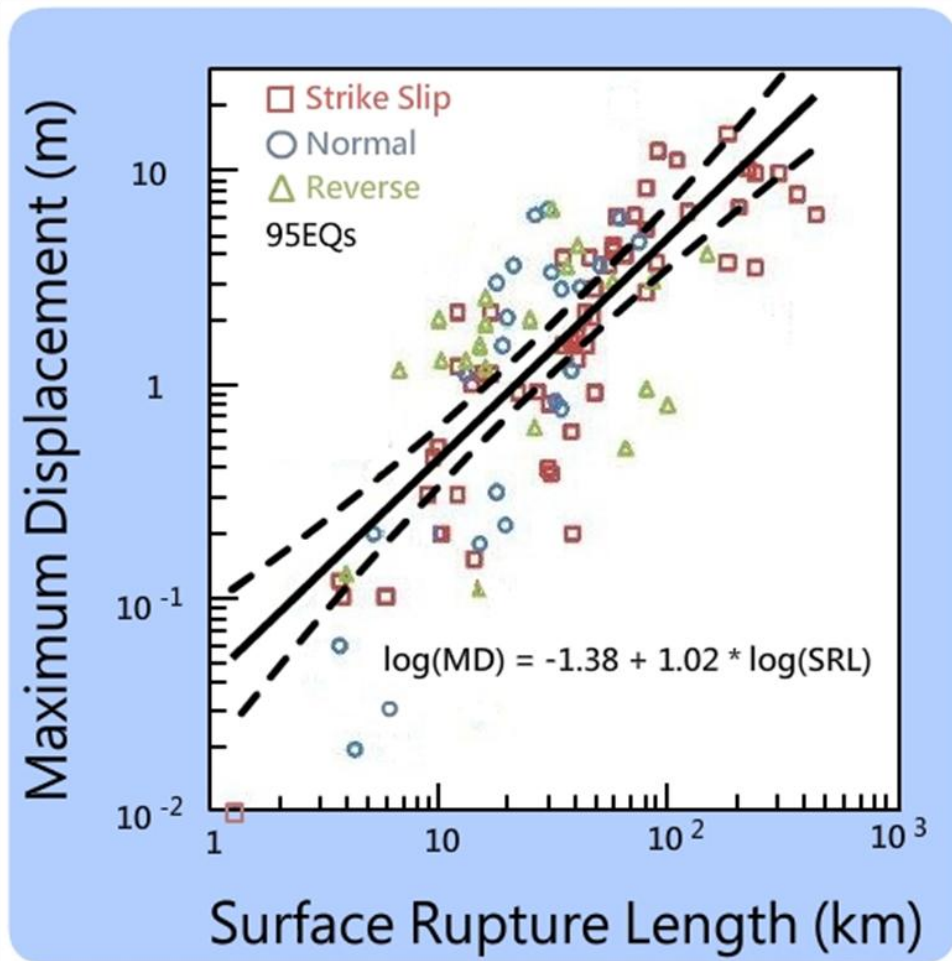
$$N = aS^{-D} \quad (\text{方程式一})$$

變數 a 是樣本的大小的計算，指數 D 的幕次現象（power-law）通常被當成斷層群體的分形維數（fractal dimension）。較大的 D 值代表其總斷層的長度組成是由較多短的斷層片段所致。而較小的 D 值代表其總斷層的長度主要是由較多長的斷層片段所致。這項研究的成果已應用在許多不同但相關的領域（Yielding et al., 1996）。而斷層群中段落幕次現象（power-law）亦被利用於測試與推估斷層的生長模式（如 Walsh & Watterson 1987, 1992, Cowie & Scholz 1992a,b）。總體斷層的性質也被用於整體區域脆性應變量的相關預測（如 Scholz & Cowie 1990, Walsh et al. 1991, Jackson & Sanderson 1992, Marrett & Allmendinger 1992）。

圖十四為不同形式之斷層系統之最大位移量之幕次現象（power-law）與地表破裂長度的分布圖。根據範圍從公分到數百公里且發生在不同岩性條件下的 95 個地震事件的數據顯示：斷層之錯動位移量和其斷層之地表破裂長度大致上呈現出不同斜率的線性關係。你可能已經注意到，這關聯性並不完美，然而，可以大致得出一個方程式：

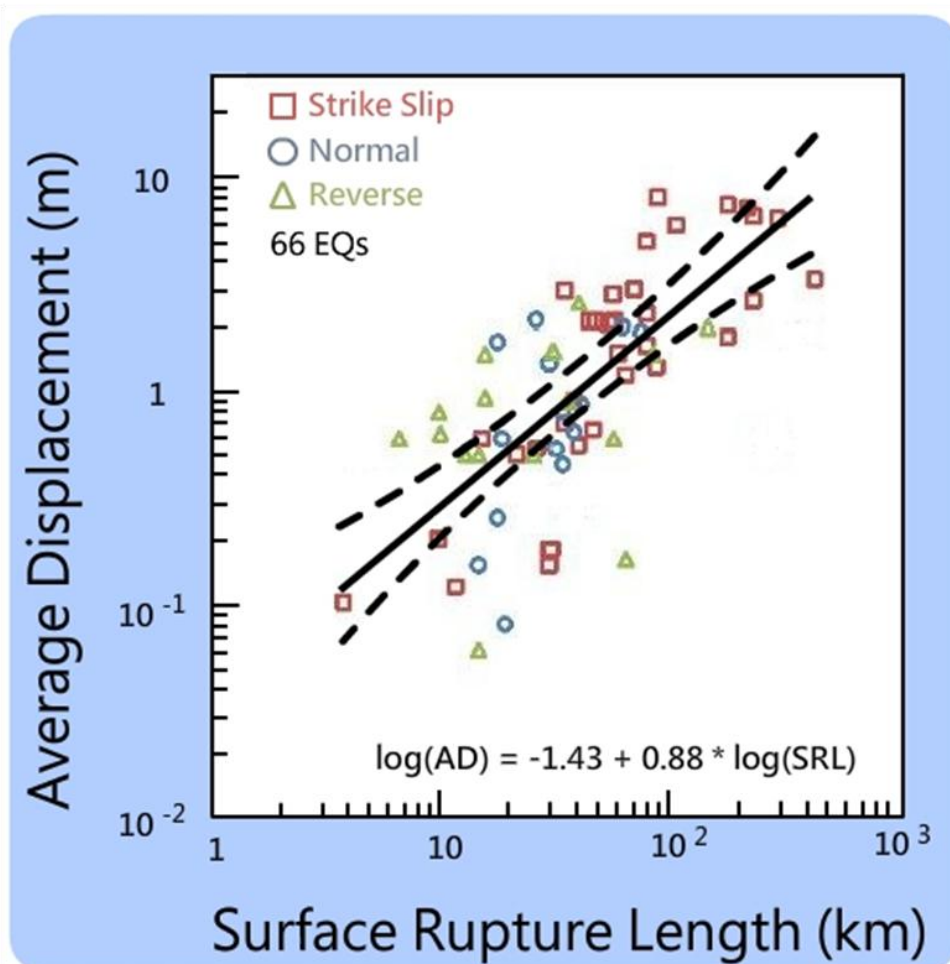
$$\text{Log}(\text{MD}) = -1.38 + 1.02 \text{Log}(L)$$

MD 代表斷層最大之垂直位移量， L 則代表此斷層地表破裂長度（Wells and Coppersmith, 1994）。



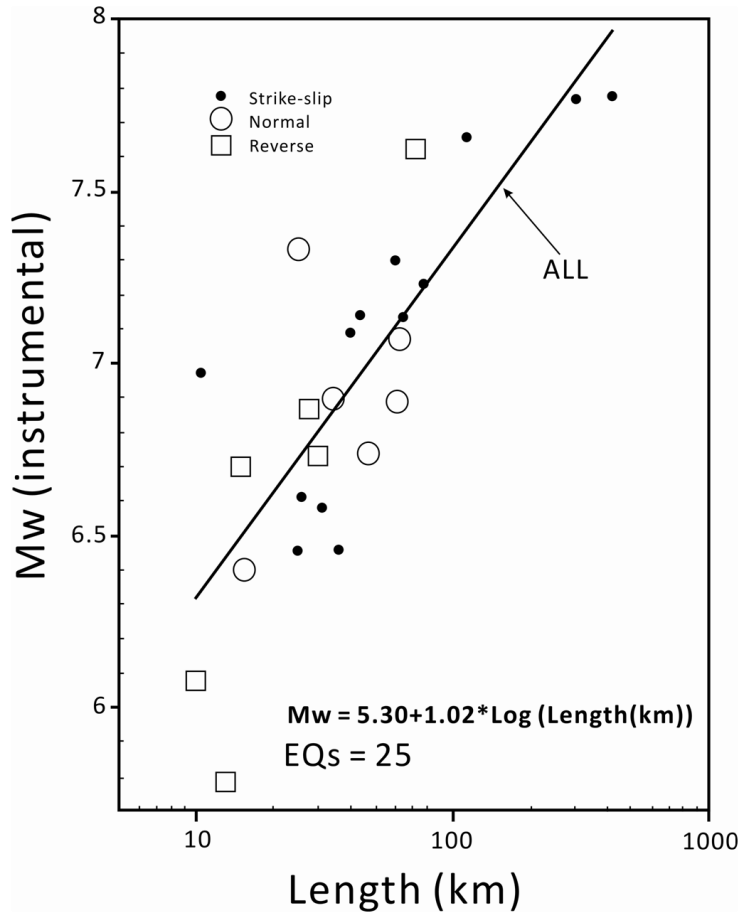
圖十四、斷層地表破裂長度 (surface rapture length -- L) 與斷層最大位移量 (Maximum Displacement -- MD) 關聯性之對數圖。黑色實線之迴歸線顯示出所有平移斷層型態的相關聯性，短虛線表示此關聯性 95% 的可信區間 (修改自 Wells and Coppersmith, 1994)。EQs 代表地震事件 (Earthquake events)

圖十五為為不同形式之斷層系統之平均位移量之幂次現象 (power-law) 與地表破裂長度的分布圖。根據範圍從公分到數百公里且發生在不同岩性條件下的 66 個地震事件的數據顯示：斷層位移和地表破裂長度的關聯性大致上呈現出不同斜率的線性關係。此關係可由下列方程式所定義 $\text{Log}(\text{AD}) = -1.43 + 0.88 \text{Log}(\text{L})$ 的關聯性，此處的 AD 代表斷層之平均垂直位移，L 代表地表破裂長度 (Wells and Coppersmith, 1994)。



圖十五、地表破裂長度 (surface rapture length-- L) 與斷層平均位移 (average displacement -- AD) 的關聯性之對數圖。黑色實線之迴歸線顯示出所有平移斷層型態的相關聯性，短虛線表示此關聯性 95% 的可信區間 (修改自 Wells and Coppersmith, 1994)。EQs 代表地震事件 (Earthquake events)。

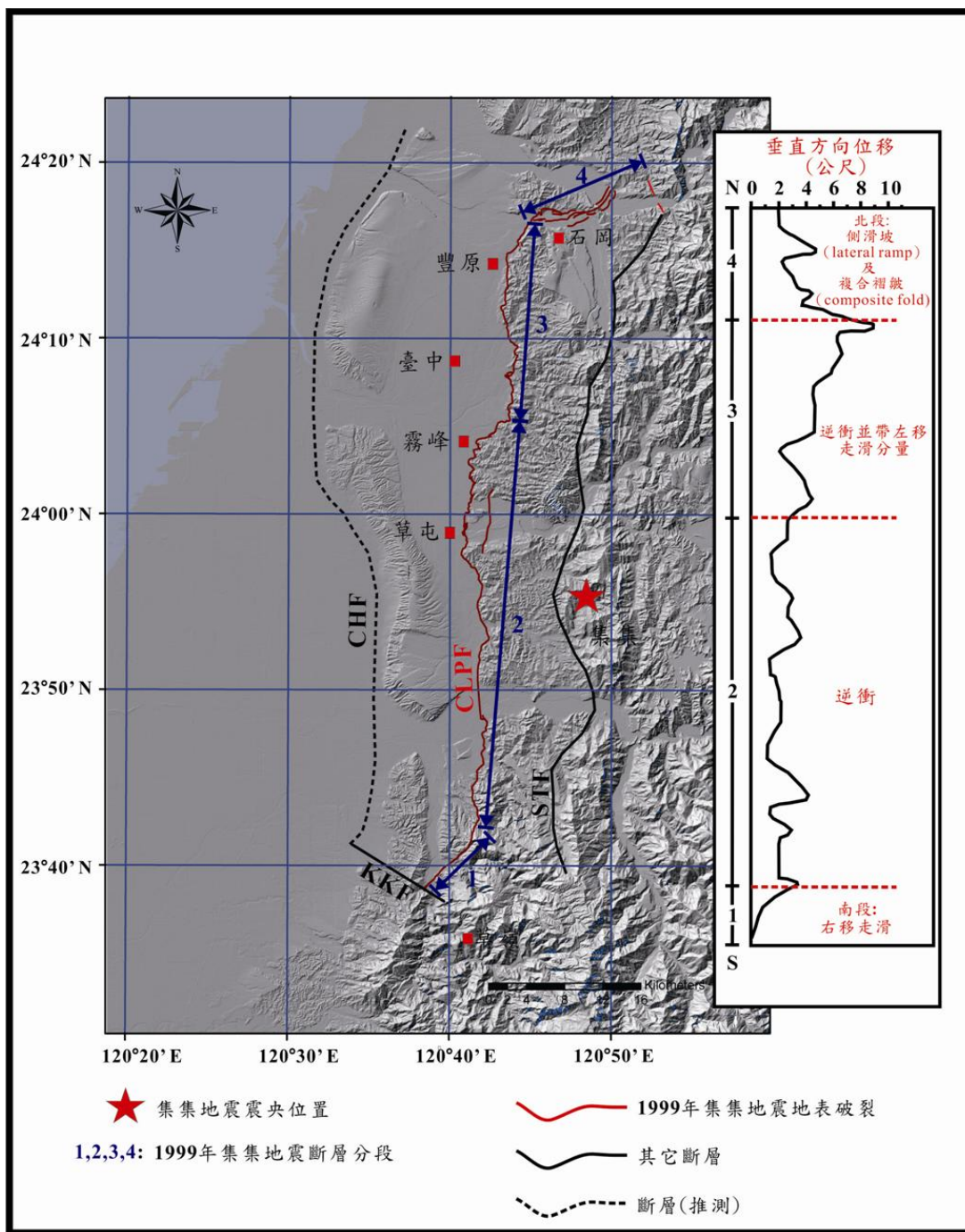
根據從芮氏規模 5.9 至 7.8 的 25 個地震事件中之斷層長度和地震級數的數據指出斷層長度與震度大致上呈現出可由下列公式： $M = 5.30 + 1.02 \text{ Log}(L)$ 所定義出之線性關係 (圖十六)。此處的 M 代表地震級數，L 則代表斷層長度 (Wesnousky, 2008)。



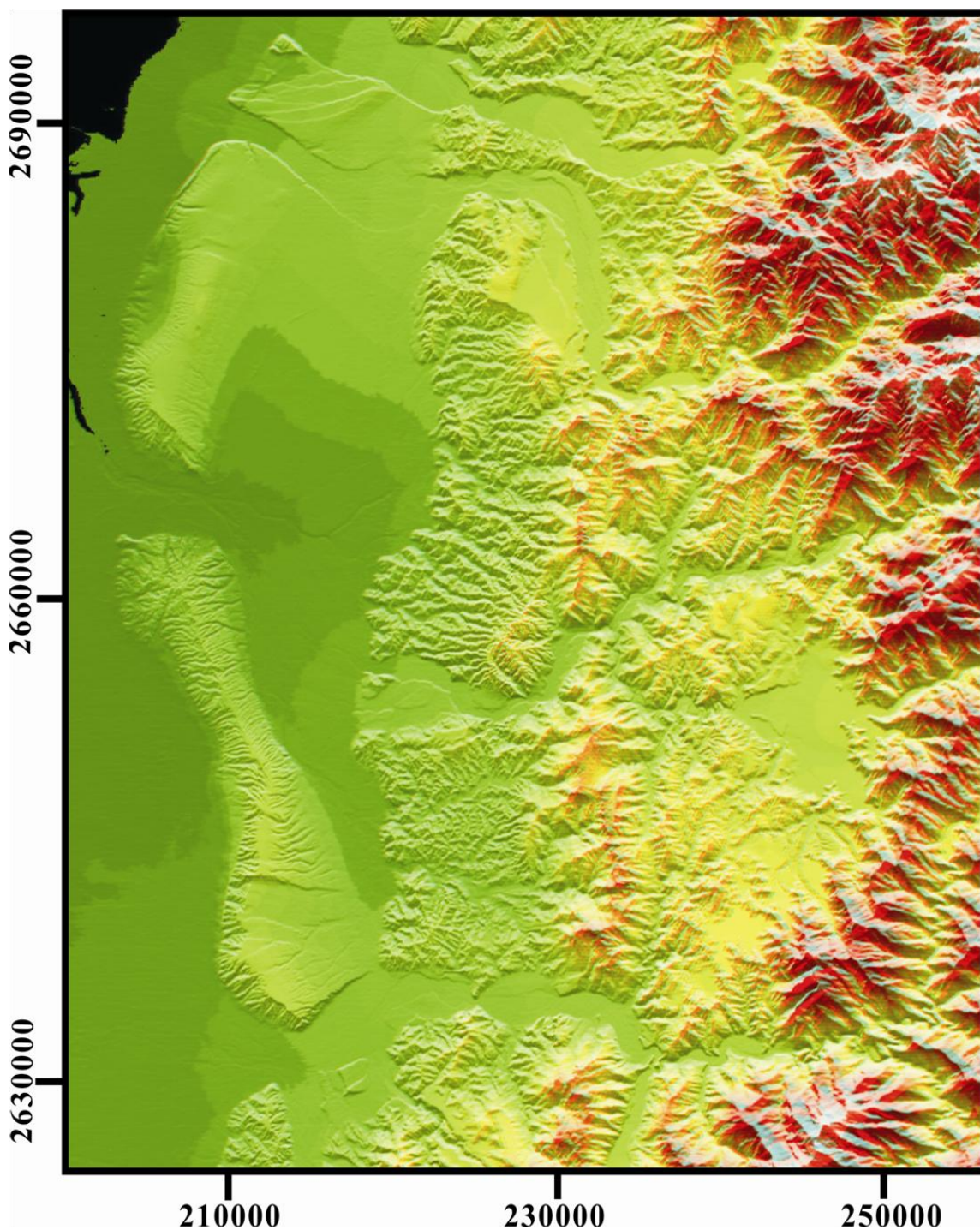
圖十六、地表破裂長度 (L) 與地震規模 (Mw) 之關係示意圖。EQs-地震事件 (Earthquake events)。

參、車籠埔斷層的地質背景

自上新世早期以來，位於菲律賓海板塊與歐亞板塊的聚合板塊邊界的台灣隨著的構造演化開始構造增厚 (Chi et al., 1981, Hsieh, 1990)。位於中央山脈西翼之西部麓山帶主要由從歐亞大陸邊緣加積之中新世至第四紀的沉積岩所組成，為一活動褶皺-逆衝斷層帶 (Ho, 1986 and Chen et al., 2001)。地質學家歸納出 1999 年所發生之 921 集集地震 (芮氏規模 7.6) 是由於座落在西部麓山帶的地質分區上的車籠埔斷層的活動所造成的 (圖十七和圖十八)。車籠埔斷層沿著西部麓山帶邊緣大約延展了 100 公里，大致呈南北走向，為一向西傾斜之逆斷層。其北段將中新世-上新世之岩層逆衝於第四紀沉積物之上，而南段則將上新世錦水頁岩層逆衝於第四紀礫岩層之上 (Tanaka et al., 2002)。車籠埔斷層的形成主要是因為台灣的增積楔前緣因菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的斜向碰撞而持續向西傳遞所致 (Davis et al., 1983 and Ho, 1986)。



圖十七、車籠埔斷層於 1999 年 921 集集地震後於台灣中部地表破裂之區域地形圖，及不同段落於野外測得之垂直位移量 (Rubin et. al., 2001)。紅線標示 921 集集地震所產生之地表破裂，藍色雙箭頭標示不同區域之分段。每段之間的區分是藉由不同的破裂線走向或不連貫的地表破裂。CHF 代表彰化斷層；KKF 代表古坑斷層；CLPF 代表車籠埔斷層。



圖十八、5 公尺解析度之數值地形模擬 (DTM, Digital Terrain Model) 所製作出的台灣中部立體 3D 地形圖。請使用 3D 眼鏡 (紅-藍鏡) 觀看以達到立體 3D 效果。此圖由中央科學研究院地球科學研究所詹瑜璋所提供。

參考資料

- Angelier, J., Lee, J.C., Chu, H.C., Hu, J.C., 2003. Reconstruction of fault slip of the September 21ST, 1999, Taiwan earthquake in the asphalted surface of a car park and co-seismic slip partitioning. *Journal of Structure Geology* 25, 345–350.
- Chen, W.S., Ridgeway, K.D., Horng, C.S., Chen, Y.G., Shea, K.S., Yeh, M.G., 2001. Stratigraphic architecture, magnetostratigraphy, and incised-valley systems of the Pliocene–Pleistocene collisional margin foreland basin of Taiwan. *Geological Society of America Bulletin* 113, 1249–1271.
- Chen, W.S., Lee, K.J., Lee, L.S., Ashley, R.S., Charles, M.R., Chen, Y.G., Yang, H.C., Chang H. C. and Lin C.W., 2007. Paleoseismic evidence for coseismic growth-fold in the 1999 Chichi earthquake and earlier earthquakes, central Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences* 31, 294–213.
- Chen, Y.G., Chen, W.S., Wang, Y., Lo, P.W., Liu, T.K., Lee, J.C., 2002. Geomorphic evidence for prior earthquakes: lessons from the 1999 Chichi earthquake in central Taiwan. *Geology* 30, 171–174.
- Chi, W.R., Namson, J., Suppe, J., 1981. Stratigraphic record of plate interactions in the Coastal Range of Eastern Taiwan. *Geological Society of China Memoir* 4, 155–194.
- Cowie, P.A., Scholz, C.H., 1992a. Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model. *Journal of Structure Geology* 14, 1149–1156.
- Cowie, P.A., Scholz, C.H., 1992b. Growth of faults by accumulation of seismic slip. *Journal of Geophysical Research* 97, 11,085–11,095.
- Davis, D.J., Suppe, J., Dahlen, F.A., 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research* 88, 1153–1172.
- Hatcher, R.D., 1990. *Structural Geology Principles, Concepts, and Problems*. London: Merrill Publishing Company. 161–175.
- Heermance, R. V., Evans, J. P., 2006. Geometric evolution of the Chelungpu fault, Taiwan: the mechanics of shallow frontal ramps and fault imbrication. *Journal of Structure Geology* 28, 929–238.
- Hsieh, S.L., 1990. *Fission-track dating of zircons from several east–west sections of Taiwan Island*. M.S. thesis, National Taiwan University, Taipei, 134pp. (in Chinese) .
- Ho, C.S., 1986. A synthesis of the geologic evolution of Taiwan. *Tectonophysics* 125, 1–16.
- Jackson, P., Sanderson, D.J., 1992. Scaling of fault displacements from the Badajoz-Cordoba shear zone, SW Spain. *Tectonophysics* 210, 179–190.
- Kao, H., Chen, W.-P., 2000. The Chi-Chi earthquake sequence; active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan. *Science* 288, 2346–2349.
- Lee, J.C., Chan, Y.C., 2007. Structure of the 1999 Chi-Chi Earthquake Rupture and Interaction of Thrusts in Active Fold Belt of Western Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences* 31, 226–239.
- Ma, K.F., Tanaka, H., Song, S.R., Wang, C.Y., Hung, J.H., Tsai, Y.B., Mori, J., Song, Y.F., Yeh, E.C., Soh, W., Sone, H., Kuo, L.W., Wu, H.Y., 2006. Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project. *Nature* 444, 473–476.
- Marrett, R., Allmendinger, R.W., 1992. Amount of extension on “small” faults: an example from the Viking graben. *Geology* 20, 47–50.
- Neuendorf, K., Mehl, J. and Jackson, J., 2005. *Glossary of Geology*. 5th ed. Virginia: American Geological Institute. 73; 230–231 and 535.
- Pluijm, Ben A. V. D. and Marshak, S., 2004. *Earth Structure*. 2nd ed. New York and London: W. W. Norton & Company. 166–201.
- Scholz, C.H., Cowie, P.A., 1990. Determination of total strain from faulting using slip measurements. *Nature* 346, 837–839.

- Rubin, C.M., Sieh, K., Chen, Y.G., Lee, J.C., Chu, H.T., Yeats, R., Mueller, K., Chan, Y.C., 2001. **Surface rupture and behavior of thrust faults probed in Taiwan**, *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 82 (47) , 565-567.
- Tanaka, H., Wang, C.Y., Chen, W.M., Sakaguchi, S., Ujiie, K., Ito, H., Masataka, A., 2002. Initial science report of shallow drilling penetrating into the Chelungpu fault zone, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 13, 227-251.
- Walsh, J.J., Watterson, J., 1987. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structure Geology* 9, 1039-1046.
- Walsh, J., Watterson, J., Yielding, G., 1991. The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature* 351, 391-393.
- Walsh, J.J., Watterson, J., 1992. Populations of faults and fault displacements and their effects on estimates of fault-related regional extension. *Journal of Structure Geology* 14, 701-712.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture Length, rupture Width, rupture Area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (4) , 974-1002.
- Wesnousky, S.G., 2008. Displacement and geometrical characteristics of earth ruptures: Issue and Implications for Seismic-Hazard analysis and the Process of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98 (4) , 1609-1632.
- Yielding, G., Needham, T., Jones, H., 1996. Sample of fault populations using sub-surface data: a review. *Journal of Structure Geology* 18, 135-146.