

張縮斷層之地震研究

歐國斌

中正大學地震研究所

摘要

一般地震研究，將斷層發生視為沿斷面滑移的模式。依據此斷層模式，利用地表收錄的地動探討斷層面上的滑移行為，或估計地震矩和地震能量。如果地層斷裂的過程，上下岩盤除了相互滑移外，斷層帶亦發生張裂或壓縮的現象，將稱之為張縮斷層(tensile-contractile fault)，對地球內部會造成一種異於純粹滑移斷層的地動函數。利用地表地動記錄，了解斷層帶張裂或壓縮的情況，對於地震的發生與擴展，除了應力的累積外，應該是一項被同時考慮的因素。

震矩張量(Moment Tensor)

斷層面某一面積上，岩盤錯動引起的地動，可以表示為 9 對相互垂直的力偶(couple)對介質造成的效應。這 9 對力偶的選擇並非唯一，但產生的地動效應是一樣。均向性介質的條件下，依據力偶方向的選定，9 對力偶強度的時間函數與斷層錯動時間函數的關係為

$$M_{lm}(t) = A\{\lambda\delta_{lm}u_i(t)n_i + \mu[u_l(t)n_m + u_m(t)n_l]\} \quad (1)$$

(Aki and Richards, 1980)，下標重覆為總和運算。 M_{lm} 為力偶強度， l 和 m 分別代表力和力臂的方向。9 項 M_{lm} 稱為震矩張量，形成一對稱矩陣。 A 為斷裂面積。 λ 和 μ 為拉梅常數(Lame constants)，其中 μ 為剪力模數(shear modulus)。 δ_{lm} 為克羅內克符號(Kronecker delta)，當 $l = m$ 時， $\delta_{lm} = 1$ ，否則為 0。 u_i 為斷層錯動於 i 方向的分量。 n_i 為斷層面之單位垂直向量於 i 方向的分量。將斷層錯動 $\vec{u}(t)$ 分解為平行斷層面和垂直斷層面兩分量，

$$\vec{u}(t) = s(t)(\hat{s} + \varepsilon(t)\hat{n}). \quad (2)$$

式(1)可改寫成

$$M_{lm}(t) = M(t)[\varepsilon(t)(\delta_{lm}\lambda/\mu + 2n_l n_m) + (s_l n_m + s_m n_l)], \quad (3)$$

其中 \hat{s} 為 \vec{u} 平行斷層面的單位滑移向量， $s(t)$ 為滑移時間函數。 $\varepsilon(t)$ 為時間上，垂直斷層面張縮量與平行斷層面滑移量之比率， $\varepsilon > 0$ 為張裂移動， $\varepsilon < 0$ 為壓縮移動。 $M(t) = \mu A s(t)$ 是純量，稱為震矩時間函數(moment time function)。 λ/μ 以帕鬆比 σ (Poisson's ratio)表示成

$$\lambda/\mu = 2\sigma/(1 - 2\sigma). \quad (4)$$

本文以北、東、下為三座標軸正方向，任何斷層的 \hat{s} 和 \hat{n} 均可表示成走向 ϕ_s (strike)、傾角 δ (dip)和滑移角 λ_s (rake)的函數(Aki and Richards, 1980)。應用上，

給予一斷層的走向、傾角、滑移角、張縮比率、帕鬆比和震矩時間函數，由式(3)計算以南北、東西和垂直為三方向的震矩張量 $A_{lm}(t)$ ，表示為

$$A_{lm}(t) = M(t)\{\varepsilon(t)[\delta_{lm}\lambda/\mu + 2n_l(\phi_s, \delta, \lambda_s)n_m(\phi_s, \delta, \lambda_s)] + [s_l(\phi_s, \delta, \lambda_s)n_m(\phi_s, \delta, \lambda_s) + s_m(\phi_s, \delta, \lambda_s)n_l(\phi_s, \delta, \lambda_s)]\}. \quad (5)$$

9 項震矩張量函數分別與對應力偶的格林函數(Green functions)摺積(convolution)後，再沿斷層面積分，即得地動函數。

幅射型態(Radiation Pattern)

假設震矩時間函數為一單位階梯函數(a unit step function)，地震波自斷層面破裂點向外幅射，振幅值於各方向的分佈，稱為幅射型態。圖 1 中，a 至 f 子圖顯示走向 0° ，傾角 90° ，滑移角 0° ，帕鬆比 0.25，張縮比率分別為 0、0.125、0.25、0.375、0.5、0.625 的左移張裂斷層之 P 波幅射型態。圓內各點為震源球(focal sphere)下半部之投影。粗虛線為斷層面。實線為振幅等值線，其中粗線代表壓波，次粗線代表鬆波，最細線的振幅為 0。粗線和次粗線的振幅分別由零值線以 0.25 等值遞增。 P 波幅射型態因斷層張裂現象而顯出差異。振幅為 0 的節面(nodal surfaces)已不再是圖 1a 之南北向和東西向的兩個垂直平面，而是分別朝西北和東南傾斜的兩個曲面，並隨著張裂增大而變成愈窄愈平。壓波隨著張裂增大，振幅值增加，區域變廣。當張縮比率為 0.125(b 子圖)時，壓波最大振幅值落在略東北和西南兩水平方向，其值為 1.25。當張縮比率增至 0.375(d 子圖)時，壓波最大振幅值則增為 2.0，但落在略東北東和西南西兩水平方向。而鬆波隨著張裂增大，振幅值減小，區域變窄，幅射最大振幅值的方向也會改變。張縮比率為 0.625(f 子圖)時，只幅射壓波，而無鬆波的產生。反之，如果張縮比率為負時，當斷層帶壓縮愈大，節面與壓波和鬆波的振幅和區域亦有類似變化的現象，但呈相反的趨勢。

震源機制(Focal Mechanism)

震矩張量的特徵值(eigenvalues)和特徵向量(eigenvectors)分別是發生斷層錯動的三個主偶極(dipole)強度和對應的方向。最大特徵值對應的特徵向量稱為張力軸 (T)，最小特徵值對應的特徵向量稱為壓力軸(P)。三個主偶極強度的總和為震矩張量的跡數(trace)，其值為

$$tr([M_{lm}(t)]) = M(t)\varepsilon(t)(3\lambda/\mu + 2). \quad (6)$$

因此，當張縮比率 $\varepsilon \neq 0$ 時，三個主偶極強度的總和不為零。

以垂直斷層面方向、平行斷層面滑移方向、另一垂直方向計算震矩張量 $B_{lm}(t)$ ，得

$$[B_{lm}(t)] = M(t) \begin{bmatrix} \varepsilon(t)(\lambda/\mu + 2) & \mu & 0 \\ \mu & \varepsilon(t)(\lambda/\mu) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon(t)(\lambda/\mu) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 B_{11} 和 B_{22} 分別為垂直斷層面方向和平行斷層面滑移方向的偶極強度。同一時間上， B_{lm} 之矩陣 \mathbf{B} 類似於北、東、下三方向震矩張量 A_{lm} 之矩陣 \mathbf{A} ，兩矩陣具有相同的特徵值和特徵向量。由 \mathbf{A} 至 \mathbf{B} 的類似轉換(similarity transformation)為

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{X}, \quad (8)$$

其中 \mathbf{X} 是以表示 B_{lm} 之三方向為行(column)的正交矩陣(orthogonal matrix)，第 1 行向量垂直斷層面，第 2 行向量平行斷層面滑移方向。應用上，如果 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 已知，式(8)經矩陣類似性質的運用，可得 \mathbf{X} 之解，為

$$\mathbf{X} = \mathbf{V}_A \mathbf{V}_B^T, \quad (9)$$

其中 \mathbf{V}_A 和 \mathbf{V}_B 是分別以 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的三個單位特徵向量為行的矩陣，兩矩陣相同行次的特徵向量必須對應相同的特徵值，上標 \mathbf{T} 代表轉置(transposition)。式(8)存在兩組獨立的 \mathbf{X} 解，這兩組 \mathbf{X} 就是震源機制的主要斷層面(primary fault plane)和輔助斷層面(auxiliary fault plane)解。由 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 得 \mathbf{V}_A 和 \mathbf{V}_B 時，將不受純量震矩 $M(t)$ 的影響。

以圖 1 為例，圖中 T 和 P 分別為張力軸和壓力軸的方向，細虛線為輔助面。雖然各子圖的斷層面和滑移角均相同，但隨著斷層帶張裂增大，T 軸在包含斷層面滑移方向和斷層面極點的平面上，由成 45° 的夾角漸漸偏向斷層面的極點，P 軸則漸遠離斷層面的極點，T 和 P 兩軸仍然維持垂直關係。輔助面則以 T 軸和 P 軸與斷層面形成對稱關係，但不再相互垂直，也與 P 波的節面不一致。反之，如果張縮比率為負時，當斷層帶壓縮愈大，P 軸會愈偏向斷層面的垂直方向，T 軸則愈遠離斷層面的垂直方向。

參考書目

Aki, K. and P. Richard, 1980. Quantitative seismology: theory and methods, W. H. Freeman and Company.

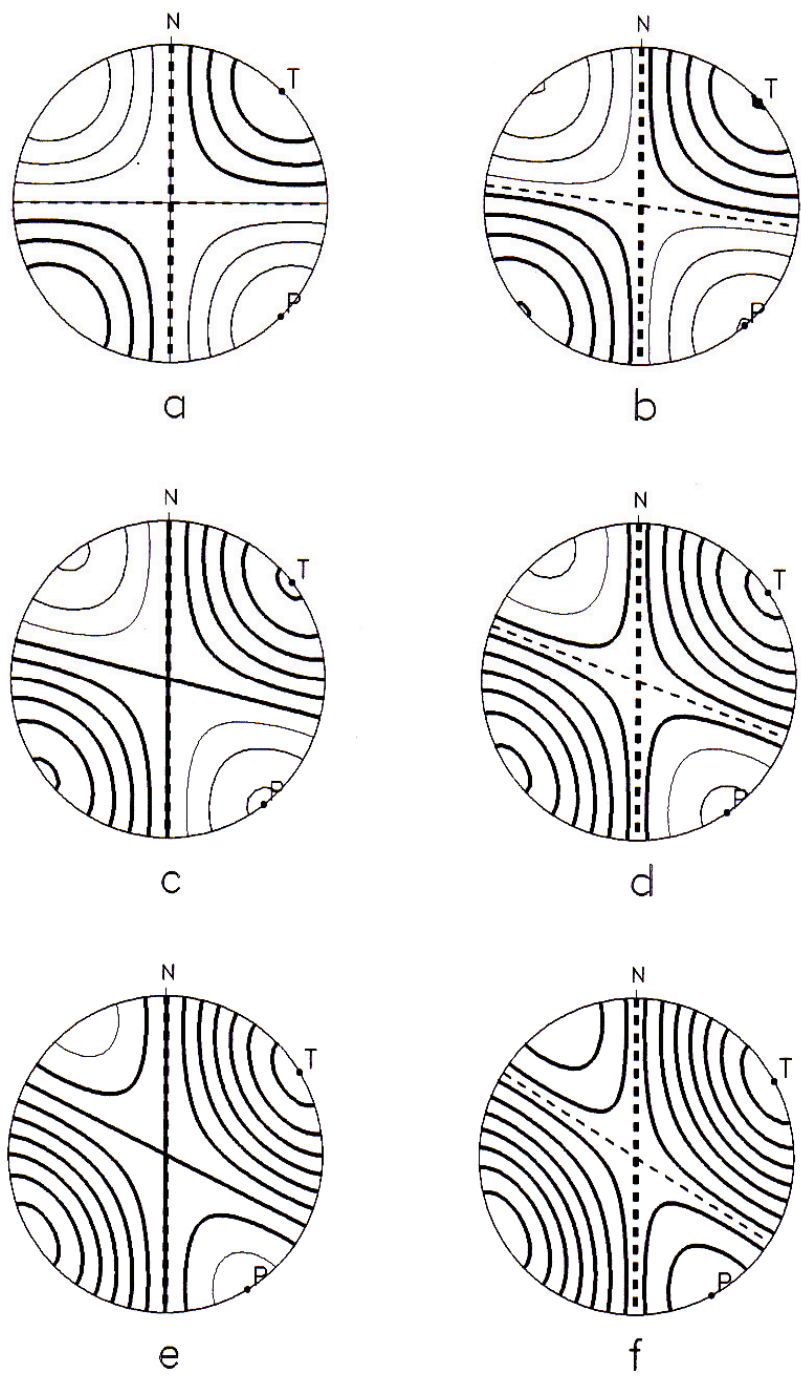


圖 1 左移張裂斷層之 P 波幅射型態。走向 0° ，傾角 90° ，滑移角 0° ，帕鬆比 0.25，子圖 a 至 f 之張縮比率為 0、0.125、0.25、0.375、0.5、0.625。