

期末完整報告

由多重破裂評估大地震的輻射能量(II)

計畫編號：NSC101-2116-M-034-002-MY2

主持人：黃瑞德 (hrd@faculty.pccu.edu.tw)
中國文化大學地質學系
Tel: (02) 28610511 ext.26122

1999 年集集地震的震源輻射能量與破裂速度分析

中文摘要

本研究利用順推模擬方法調查 1999 年台灣集集地震的多重破裂特徵，並藉此評估其震源輻射能量及破裂速度變化。在順推模擬之前，本研究首先利解迴旋初估子破裂的個數、歷時及各個子破裂間的相對發生時間，初步發現集集地震至少由 6 個子破裂所組成。接著，利用順推模擬分析各子破裂之歷時、大小及相對發生時間。結果顯示，集集地震是由一 $M_w=6.28$ 的錯動開始，之後，在第 3-4 子破裂的錯動 M_w 增加為 6.89-6.88，最後，達到最大的破裂， M_w 達 7.42。總地震矩(M_0)為 2.72×10^{20} Nm (相當 $M_w=7.55$)，整的震源歷時 29.2 秒。這樣的結果與有限源破裂模型相似。總震源輻射能量(E_s)約為 2.81×10^{16} Nm， E_s/M_0 比值為 1.03×10^{-4} ，比一般大地震的比值(5.0×10^{-5})為大。整體上，集集地震可粗分成三個破裂事件，首先是一開始由 $M_w=6.74$ 事件開始(1、2 子破裂)，接著是 $M_w=7.22$ 的破裂(3、4、5 子破裂)及最後 $M_w=7.42$ 的第 6 個子破裂。這樣的破裂特徵與先前的有限源破裂模型相似。若以強震站 TCU065 為分界將車籠埔斷層分成南北兩段，北段的 M_0 、 E_s 、及 E_s/M_0 比值皆高於南段，主要原因應是北段斷層破裂的淨應力降高於南段破裂所致。另外，破裂速度也是一個了解地震破裂物理的重要震源參數之一。將多重破裂的震源時間函數分布與與野外地表破裂比對，顯示集集地震的平均破裂速度在 1.9 km/sec 附近，若扣除震源上揚時間後，其平均破裂速度為 2.14 km/sec。再以強震站 TCU065 為分界，將車籠埔斷層分成南、北兩段，經再扣除震源上揚時間後，斷層南段的破裂速度高於斷層北段的破裂速度，又先前由近場強震資料分析顯示在斷層南段的靜應力降低於斷層北段，這似乎隱含破裂速度與靜應力降的反比關係。

關鍵詞：集集地震、多重破裂、震源輻射能量、破裂速度、淨應力降

Abstract

We used the forward modeling method to investigate the multiple-source of the 1999 Chi-Chi earthquake, which consisted of at least six sub-events during earthquake faulting. The sixth sub-event, located at ~35 km north of the epicenter, had the largest seismic moment (M_0) and radiated seismic energy (E_S). The total M_0 and E_S were 2.72×10^{20} Nm and 2.81×10^{16} Nm, respectively, and the ratio of E_S/M_0 was 1.03×10^{-4} , larger than ordinary earthquakes. On the whole, the Chi-Chi earthquake can be divided into three ruptures: the first one with $M_W=6.74$ was located near the epicenter, the second rupture had $M_W=7.22$ at ~20-40 km north of the epicenter, and the third rupture was the largest one with $M_W=7.42$ which occurred at the northernmost of the fault. We divided the fault into the northern and southern segments using the strong-motion station TCU065, located at ~25 km north of the epicenter. Results showed that the M_0 , E_S and E_S/M_0 at the northern fault were larger than those at southern one. The high E_S and E_S/M_0 at the northern fault was due to the high static stress drop. By comparing the source time function and surface ruptures, the average rupture velocity is ~2.14 km/sec when subtracting the rise time from the entire source duration. The rupture velocity at the northern fault was lower than that at southern one. In addition, the previous studies indicated that the static stress drop at the northern fault was higher than that at southern one. This implies that a reciprocal relationship between rupture velocity and static stress drop during the 1999 Chi-Chi earthquake.

Keywords: Chi-Chi earthquake, multiple source, radiated seismic energy, rupture velocity, static stress drop

前言

一般可描述地震的大小由地震矩(seismic moment)及震源輻射能量(radiated seismic energy)。地震矩是一種靜態的測量，而震源輻射能量是一種動態的測量，但這兩者的關係可以用來描述地震的動力破裂過程(例 Kanamori, 1994; Kanamori and Heaton, 2000)。輻射能量(E_S)與地震矩(M_0)比值稱為標度能量(scaled energy) (Kanamori and Heaton, 2000)，大的 E_S/M_0 指示在破裂過程中摩擦力快速的降低；小的 E_S/M_0 表示在破裂過程中摩擦力降低的很慢。由於 E_S 估的算有高的不確定性，因此，一些研究所得的 E_S/M_0 也不盡相同。如 Kikuchi and Fukao (1988)由一些大地震的結果得到 $E_S/M_0=5.0 \times 10^{-6}$ ；Choy and Boatwright (1995) 得到一個全球平均的 $E_S/M_0=1.6 \times 10^{-5}$ ；Vassiliou and Kanamori (1982) 和 Kanamori and Heaton (2000) 由一些大地震的結果得到 $E_S/M_0=5.0 \times 10^{-5}$ ；Pérea-Campos and Beroza (2001) 由逆斷層型態地震資料得到 $E_S/M_0=4.7 \times 10^{-6}$ ；Bilek et al. (2004) 得

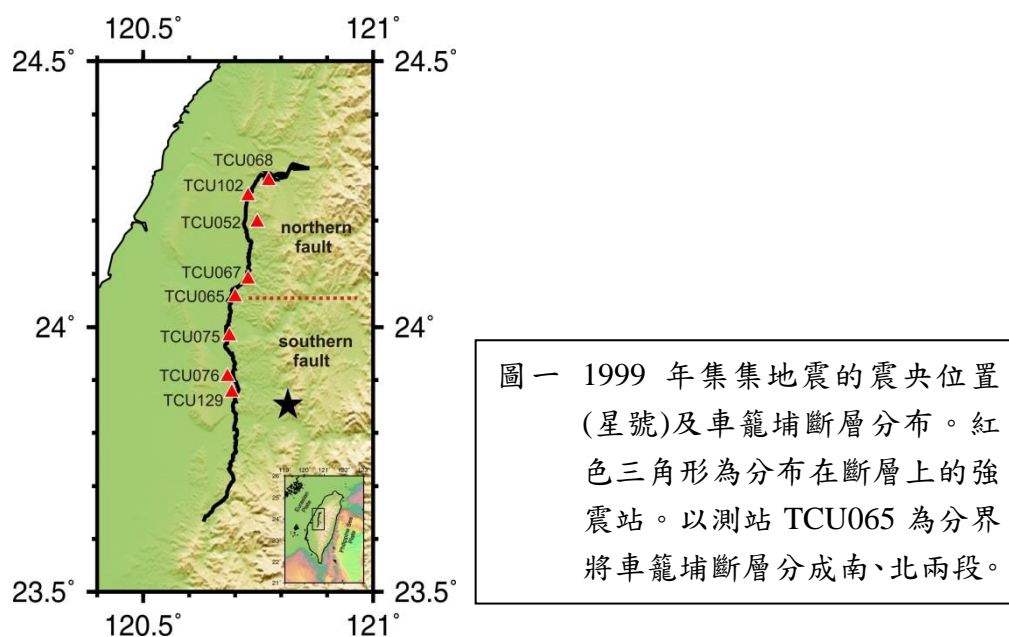
到 $E_S/M_0=5.6\times 10^{-6}$ ；Hwang et al. (2001) 由近場的強震資料得到 1999 年集集地震的得到 $E_S/M_0=1.0-3.0\times 10^{-4}$ ；對一些海嘯地震(tsunami earthquake)而言， E_S/M_0 更低了，約 10^{-7} (Newman and Okal, 1998; Bielk et al., 2004)，然而 2004 年蘇門答臘地震的 $E_S/M_0=4.6\times 10^{-6}$ 比所謂海嘯地震還要來的大，如同一般的隱沒帶地震 (Kanamori, 2006)。由 E_S/M_0 ，Wyss and Brune (1968) 定義視應力(apparent stress) 為 $\sigma_a=\mu(E_S/M_0)$ ，其中 μ 表示剛性係數(rigidity)，而視應力可描述斷層面上的平均應力。雖然 E_S 的計算有高的不確定性，但是仍可看出視應力與斷層錯動機制有關，正斷層型態地震與逆斷層型態地震的視應力有明顯不同(Choy and Boatwright, 1995; Pérea-Campos and Beroza, 2001)。

評估震源輻射能量的方法主要是利用速度型震波平方的積分求得(Haskell, 1964)，其中 S 波反應了主要的輻射能量，約是由 P 波估算的 20-30 倍左右(Haskell, 1964; Venkataraman and Kanamori, 2004)。目前幾個計算震源輻射能量的方法為：(1)利用遠場 P 波評估輻射能量：雖然 S 波反應了主要的輻射能量，但在遠場下，其震波衰減的很快，而且對於 S 波衰減的修正不若 P 波清楚，因此，在遠場下採用 P 波來計算震源輻射能量是相對合適的，當然也要經過一些修正，包括幾何擴散、震源輻射模式、震波衰減等等的修正，特別是震波衰減與頻率有關，因此，仔細的修正才能真正反應由震源所產生的能量。目前採用此方式的技術及修正已非常成熟了(如 Boatwright and Choy, 1986; Choy and Boatwright, 1995; Newman and Okal, 1998; Pérea-Campos and Beroza, 2001; Venkataraman and Kanamori, 2004)；(2)利用近場的地震資料評估輻射能量：通常在震央距離小於 500 公里時，主要利用 S 波的部份來估算震源輻射能量(Kanamori et al., 1993; Singh and Ordaz, 1994; Hwang et al., 2001)，當然也是用速度紀錄平方的積分求得，適當的震波修正也是需要的，特別是幾何擴散修正，不僅與震央距離有關，也與頻率有關(Street et al., 1975; Boatwright et al., 2002)，一般由近場資料所評估的輻射能量較遠場的為大(如 Singh et al., 1991; Singh and Ordaz, 1994; Hwang et al., 2001)，然經過適當的修正，由遠場及近場資料所評估的的輻射能量會趨於一致(Pérea-Campos et al. 2003)；(3)由經驗格林函數(empirical Green's function)評估震源輻射能量：將大地震與小地震解迴旋(deconvolution)得到相對的震源時間函數(Relative source time function)，由其速度譜計算輻射能量(如 Venkataraman et al., 2001)，這個方法的限制是小地震的位置、深度與震源機制必須與大地震一致，且小地震的規模也不能太大，其優點是經過解迴旋後能去除震波傳遞過程中的衰減效應；(4)由有限斷層模型(finite fault model)評估震源輻射能量：有三種估算方式，一種是利用平均震源歷時來估算(如 Vassiliou and Kanamori, 1982)，一種是由震源破裂模型來估算(如 Kanamori, 2006)，另一種由多重破裂分析來估算(如 Kikuchi and Fukao, 1988; 黃瑞德等，2008)。由於大地震所產生的震波歷時很長，經常會受到一些後到的波相(later phase)干擾，致使無直接由震波速度紀錄積分求得震源輻射能量，此時利用震源有限斷層模型來估算震源輻射能量是較恰當的，例如，Kanamori (2006) 利用 Ammon et al. (2005) 所得到 2004 年蘇門答臘地震的震源破裂模型估算其

$E_S=3.0 \times 10^{17}$ Nm，但高於 Choy and Boatwright (2007) 直接由震波積分所得的結果 ($E_S=1.4 \times 10^{17}$ Nm)，但也都在同一量級。

研究動機與目的

雖然已有許多學者已利用進場強震資料決定 1999 集集地震的震源輻射能量 (如 Hwang et al., 2001; Wang, 2004; Huang et al., 2001, 2013)，但本研究希冀從遠場 P 波的分析來重新探討集集地震的震源輻射能量變化。另外，由先前的研究顯示 1999 年集集地震的平均破裂速度介於 2.0-2.8 km/sec 之間，也有研究指出在斷層北段的破裂速度高於斷層南段，但也有研究持完全相反的論點。本研究企圖由多重破裂分析並與野外地表破裂比對，重新評估 1999 年集集地震的破裂速度，並探討斷層南、北段破裂速度的可能差異 (圖一)。本研究以 1999 年集集地震為例，利用多重破裂分析重新評估其破裂速度。先前的研究顯示 1999 年集集地震的平均破裂速度介於 2.0-2.8 km/sec 之間，也有研究指出在斷層北段的破裂速度高於斷層南段，但也有研究持完全相反的論點。本研究假設集集地震有多個子破裂，且依序由南往北破裂，



資料

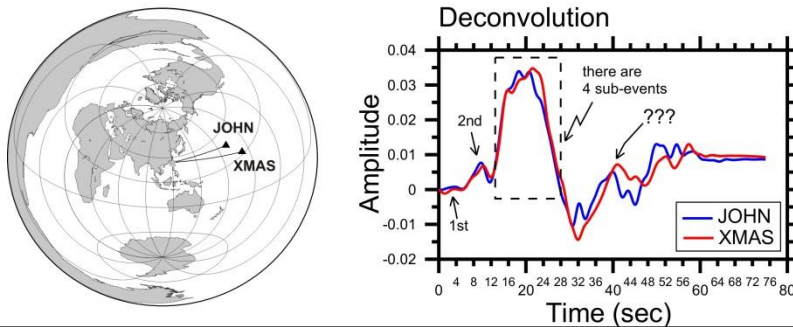
本研究所使用之震波資料來自 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 地震中心，為避免淺部構造、多重路徑 (如 PP 波) 及深部震波相位的影響 (如 PcP 波)，本研究挑選震央距離在 30°~90° 間的測站資料，並採用震波紀錄中的垂直分量震波波形，使能清楚觀測到 P 波波形。另為避免破裂方向性對震源時間函數的影響，本研究只採用方位角垂直於破裂方向的測站資料，所有資料皆經 0.01-0.5 Hz 的帶通濾波。圖二顯示兩個適合分析的測站及其解迴旋的結果。

方法

本研究所採用的地震資料為遠場 P 波，所以在模擬過程中必須先計算合成 P 波。對一淺源地震而言，除直達 P 波外，需加以考慮 pP 及 sP 兩個波相的影響，故其遠場合成 P 波， $u^P(t)$ ，可由下式求得(如 Lin et al., 2006)

$$u^P(t) = \frac{M_o}{4\pi\rho_h\alpha_h^3} \frac{g(\Delta)}{a} [R^P f(t-t_p) + R^{pP} V_{pP} f(t-t_{pP}) + R^{sP} \frac{\alpha_h \cos i_h}{\beta_h \cos j_h} V_{sP} f(t-t_{sP})] C^P(i_h) * Q(t) * I(t)$$

其中 M_o 為地震矩， α_h 、 ρ_h 及 β_h 分別為在震源處的 P 波速度、密度及 S 波速度， $g(\Delta)$ 為幾何擴散因子(geometrical spreading factor)， a 為地球半徑， R^P 、 R^{pP} 及 R^{sP} 分別為三波相 P 波、pP 波及 sP 波的震源輻射模式(radiation pattern)， V_p 、 V_{pP} 及 V_{sP} 分別為三波相 P 波、pP 波及 sP 波與地表反射的反射係數(coefficients of reflection)， i_h 及 j_h 分別為 P 波及 S 波的出射角(take-off angle)， $C^P(i_h)$ 為在接收站的地表反應， $f(t)$ 為震源時間函數， t_p 、 t_{pP} 及 t_{sP} 分別為三波相 P 波、pP 波及 sP 波的走時(travel time)， $Q(t)$ 為震波衰減項， $I(t)$ 為儀器反應項。其中關於擴散幾何因子、反射係數、震源輻射模式、接收站的地表反應等等的計算，可參考 Kanamori and Stewart (1976)、Aki and Richard (1980)、Bullen and Bolt (1985)、Okal (1992)、Stein and Wyssession (2003) 等等，與頻率相關之震波衰減項可參考 Yoshida (1988)。



圖二 (右)本研究所採用進行多重破裂分析的兩個測站(JOHN 和 XMAS)。(左)利用經驗格林函數法將主震與在主震位置的合成 P 波進行解迴旋(deconvolution)所得的相對時間函數(RSTF: Relative Source Time Function)。

本研究根據 Hwang (2013)所提的多重破裂順推分析方法，選用與地震破裂方向垂直的測站，此可避免因破裂方向性造成震源時間函數分析的不穩定，並假設集集地震各子破裂有相同的深度(8 公里)及斷層面解(strike/dip/slip 為

5°/34°/65°)，且是由南至北依序破裂(Chang et al., 2000)。分析過程如下所敘：

- (1)首先，先在震源處產生一無震源歷時的合成 P 波，當成是經驗格林函數(EGF: empirical Green's function)。之後，將主震與此 EGF 進行解迴旋(deconvolution)，得到相對震源時間函數(RSTF)(圖二)。
- (2)由 RSTF 先初步判斷主震可能由幾個子破裂所組成，每個子破裂的歷時長度，各子破裂間的時間間隔，此有助於多重破裂順推時一些震源參數的判斷。
- (3)利用嘗試錯誤法(trial and error method)一步一步調整各子破裂的歷時、大小及時間間隔，讓合成 P 波與觀測 P 波能趨於一致。在分析過程中，雖假設各個子破裂有相同的震源機制，若有需要，也會微調各子破裂的震源機制(圖三)。

Vassilliou and Kanamori (1982)提出利用平均震源歷時估算地震的輻射能量(E_s)如下：

$$E_s = \left[\frac{1}{15\pi\rho\alpha^5} + \frac{1}{10\pi\rho\beta^5} \right] \frac{2}{x(1-x)^2} \frac{M_0^2}{T_0^3}$$

上式中的 T_0 和 M_0 分別是平均震源歷時和地震矩， α 、 β 和 ρ 分別是震源區的 P 波速度、S 波速度和密度， x 是震源上揚時間(rise time)與平均震源歷時的比值。Vassilliou and Kanamori (1982)採用梯形的震源時間函數並令 $x=0.2$ (參考 Geller,

1976)，若使用三角形震源時間函數，則 $x=0.5$ 。當 $x=0.2$ ，則 $\frac{1}{x(1-x)^2} = \frac{1}{0.128}$ ；

當 $x=0.5$ ，則 $\frac{1}{x(1-x)^2} = \frac{1}{0.125}$ 。因此使用 $x=0.2$ 或 $x=0.5$ 並不影響計算的結果。

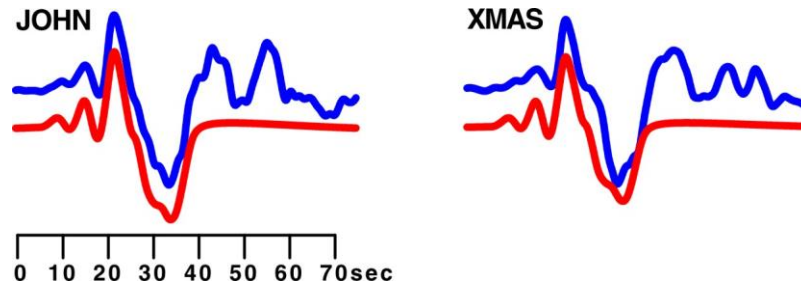
但式(2)中的 P 波速度、S 波速度和密度也會影響 E_s 的評估，因此，找到在震源區合適的 P 波速度、S 波速度和密度也是重要的(Kanamori, 2006)。

結果與討論

在順推模擬之前，本研究首先利解迴旋初估子破裂的個數、歷時及各個子破裂間的相對發生時間，初步發現集集地震至少由 6 個子破裂所組成。接著，利用順推模擬分析各子破裂之歷時、大小及相對發生時間(圖二、圖三及表一)。

表一顯示集集地震是由一 $M_w=6.28$ 的錯動開始，之後，在第 3-4 子破裂的錯動 M_w 增加為 6.89-6.88，最後，達到最大的破裂， M_w 達 7.42。總地震矩(M_0)為 2.72×10^{20} Nm (相當 $M_w=7.55$)，整的震源歷時 29.2 秒。這樣的結果與有限源破裂模型相似。總震源輻射能量(E_s)約為 2.81×10^{16} Nm， E_s/M_0 比值為 1.03×10^{-4} ，比一般大地震的比值(5.0×10^{-5})為大。整體上，集集地震可粗分成三個破裂事件，首先是一開始由 $M_w=6.74$ 事件開始(1、2 子破裂)，接著是 $M_w=7.22$ 的破裂(3、4、5 子破裂)及最後 $M_w=7.42$ 的第 6 個子破裂。這樣的破裂特徵與先前的有限源破裂模型相似。若以強震站 TCU065 為分界將車籠埔斷層分成南北兩段，北段的 M_0 、 E_s 、及 E_s/M_0 比值皆高於南段，主要原因應是北段斷層破裂的淨應力降高於

南段破裂所致。



圖三 測站 JOHN 和 XMAS 觀測 P 波(藍線)與合成 P 波(紅線)的比較。

由圖二的 RSTF 可發現集集地震一開始由兩個較小的破裂開始，之後有一個大的破裂發生，持續至近 30 秒。仔細檢查此大的破裂，似乎由 4 個子破裂所組成，每個子破裂約 8-10 秒，各子破裂之間的時間間隔約 2-3 秒，顯示在短時間內的連續破裂造成這個大破裂。經過逐步調整各子破裂的歷時、大小及其之間的時間間隔，最後的結果如表一及圖三所示。

表一顯示第 6 個子破裂有最大的地震矩，總震源歷時 29.2 秒，總地震矩 2.72×10^{20} Nm(相當 $M_w=7.55$)。將震源時間函數與地表破裂變形比較(圖四)，當平均視破裂速度約 1.9 km/sec 時，最大的地表變形與最大破裂事件才能吻合，而前兩個破裂正好落在測站 TCU065 南邊，屬於南段破裂，其餘四個子破裂為北段破裂。

表一 1999 年集集地震多重破裂的震源參數。

No.	Focal mechanism (strike/dip/slip)	Source duration (sec)	Time to the first sub-event (sec)	M_0 ($\times 10^{20}$ Nm)	E_S ($\times 10^{16}$ Nm)	E_S/M_0	M_w
1	5°/34°/65°	6.2	0.0	0.0338	0.0039	1.17×10^{-5}	6.28
2	5°/34°/65°	7.2	5.5	0.1352	0.0402	2.98×10^{-5}	6.68
3	5°/34°/90°	8.0	11.5	0.3718	0.2219	5.97×10^{-5}	6.98
4	5°/34°/90°	8.0	15.0	0.2704	0.1174	4.37×10^{-5}	6.88
5	5°/34°/90°	8.0	16.5	0.2197	0.0775	3.53×10^{-5}	6.82
6	5°/34°/90°	10.0	19.2	1.6900	2.3470	13.89×10^{-5}	7.42

*total seismic moment (M_0) = 2.7209×10^{20} Nm ($M_w=7.55$)

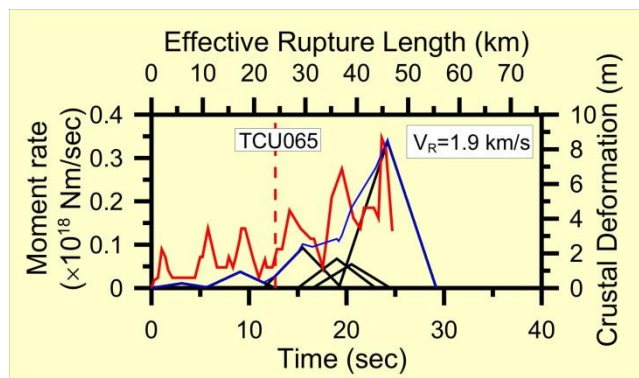
*total radiated seismic energy (E_S) = 2.8074×10^{16} Nm

*total E_S/M_0 = 10.3×10^{-5}

Hwang et al. (2001)和 Ji et al. (2003)推算集集地震的震源上揚時間分別為 6.7 秒及 7.2 秒，本研究取其平均約 7 秒，Huang et al. (2000)調查車籠埔斷層北邊最大破裂的震源上揚時間約 5 秒。綜合上述，本研究令斷層南段的上揚時間為 2 秒，北段為 5 秒。經扣除上揚時間後，平均破裂速度約 2.14 km/sec，與 Ji et al. (2003)的 2.0 km/sec 和 Hwang et al. (2001)的 2.27 km/sec 相近。

以測站 TCU065 為分界，分別估算斷層南、北兩段的破裂速度分別為 2.37 km/sec 和 1.97 km/sec，也就是南段破裂速度高於北段，此現象最早亦由 Huang et al. (2001)所提出。Huang et al. (2001)和 Hwang et al. (2001)利用近場強震資料估算

沿車籠埔斷層的淨應力降變化，顯示斷層南段淨應力降小於斷層北段。當比對淨應力降與破裂速度，似乎也顯示了淨應力降與破裂速度的反比關係(Kanamori and Rivera, 2004)，此也反映了車籠埔斷層南、北兩段斷層面強度的差異。



圖四 從震央開始起算的震源時間函數與地表破裂(Chen et al., 2001)比較。黑色線表各子破裂的震源時間函數、藍色線是總和的震源時間函數、紅色線是地表變形破裂。紅色虛線是測站 TCU065 的位置。

計劃成果自評

本計畫是一兩年期計畫，主要是延續前次計畫(由多重破裂評估大地震的輻射能量(I)；計畫編號：NSC100-2116-M-034-004)的研究工作。研究內容是利用 P 波的多重破裂來了解大地震的複雜破裂特徵，同時並估算各個子破裂的震源輻射能量，此較傳統震波積分作法較能獲得較高頻的輻射能量，也可進一步了解地震的動態破裂過程。在分析的過程中，先利用震波解迴旋初步調查子破裂的個數、歷時及相對發生時間，之後，採取兩種多重破裂做法，對於多個子破的地震，由於受限於逆推時間，因此採用順推震波模擬來分析其多重破裂特徵，如 2008 年中國大陸汶川地震(至少 7 個子破裂)、1999 年台灣集集地震(至少 6 個子破裂)；對於較少子破裂個數的地震，則採用逆推法分析其多重破裂，如 2010 年台灣甲仙地震(至少 2 個子破裂)。目前本計畫一系列的研究工作已完成 2010 年台灣甲仙地震及 2008 年中國大陸汶川地震的多重破裂研究，成果已發表在 TAO 期刊上；而今年度完成 1999 年台灣集集地震的多重破裂分析，已有完整的結果，正在撰寫文章中。雖然，總計三年的計劃已結束，但仍會開發新的多重破裂分析技術，也將分析 2011 年日本東北地震、2005 年日本 Miyagi-Oki 地震、2006 年台灣屏東地震、2002 年阿拉斯加地震進行分析、2004 年蘇門答臘地震的震源輻射能量。本次計畫是兩年期的第二年，茲將與此計畫有關的研究簡列如下：

Hwang, R.-D.* (2012). Estimating the radiated seismic energy of the 2010 M_L 6.4 JiaSian, Taiwan, earthquake using multiple-event analysis, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 459-465, doi: 10.3319/TAO.2012.03.30.01(T). (NSC100-2116-M-034-004)

Hwang, R.-D.* (2013). Multiple event analysis of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake: Implications for variations in radiated seismic energy during faulting,

Terr. Atmos. Ocean. Sci., 24, 709-719, doi: 10.3319/TAO.2013.04.08.01(T).
(NSC101-2116-M-034-002-MY2)

Hwang, R.-D.* (2015). Variations in radiated seismic energy during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. (in preparation)

Hwang, R.-D.* and J.-P. (2015). Variations in radiated seismic energy during the December 26, 2004, Sumatra-Andaman earthquake. (in preparation)

Hwang, R.-D.*, S.-J. Lee, and Y.-C. Lai (2015). Radiated seismic energy of the 2011 M_w 9.0 Tohoku earthquake estimated from multiple-events analysis. (in preparation)

參考文獻

Aki, K. and P. G. Richards (1980), *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W. H. Freeman, San Francisco, 932pp.

Ammon, C. J. et al. (2005), Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. *Science*, 308, 1133-1139.

Bielk, S. L., T. Lay, and L. J. Ruff (2004), Radiation seismic energy and earthquake source duration variations from teleseismic source time functions for shallow subduction zone thrust earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 109, B09308, doi:10.1029/2004JB003039.

Boatwright, J. L. and G. L. Choy (1986), Teleseismic estimates of the energy radiated by shallow earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 91, 2095-2112.

Bull, K. E. and B. A. Bolt (1985), *An Introduction to the Theory of Seismology*, 4th edn, Cambridge University Press, Cambridge.

Chang, C.-H., Y.-M., T.-C. Shin and C.-Y. Wang (2000). Relocation of the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 11, 581-590.

Chang, J.-P., R.-D. Hwang, C.-Y. Wang, G.-K. Yu, W.-Y. Chang and T.-W. Lin (2010), Analysis of rupture directivity for the 2004 Sumatra earthquake from the Rayleigh-wave phase velocity, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 21, 243-251, doi:10.3319/TAO.2009.03.27.01(T).

Chen, W.-S., B.-S. Huang, Y.-G. Chen, Y.-H. Lee, C.-N. Yang, C.-H. Lo, H.-C. Chang, Q.-C. Sung, N.-W. Huang, C.-C. Lin, S.-H. Sung, and K.-J. Lee (2001). 1999 Chi-Chi earthquake: A case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 986-994.

- Choy, G. L., and J. Boatwright (2007), The energy radiated by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake estimated for 10-minute *P*-wave windows, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, S18-S24, doi:10.1785/0120050623.
- Choy, G. L., and J. L. Boatwright (1995), Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *J. Geophys. Res.*, 100, 18205-18228.
- Geller, R. J. (1976), Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523.
- Haskell, N. (1964), Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 56, 1181-1842.
- Huang, B.-S., K.-C. Chen, W.-G. Huang, J.-H. Wang, T.-M. Chang, R.-D. Hwang, H.-C. Chiu, and C.-C. P. Tsai (2000). Characteristics of strong ground motion across a thrust fault tip from the September 21, 1999, Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2729-2732.
- Huang, W.-G., J.-H. Wang, B.-S. Huang, K.-C. Chen, T.-M. Chang, R.-D. Hwang, H.-C. Chiu and C.-C. P. Tsai (2001). Estimates of source parameters for the Chi-Chi, Taiwan, earthquake, based on Brune's source model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1190-1198.
- Hwang, R.-D. (2013). Multiple event analysis of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake: Implications for variations in radiated seismic energy during faulting, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 24, 709-719.
- Hwang, R.-D., G.-K. Yu and J.-H. Wang (2001b), Rupture directivity and source-process time of the September 20, 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake estimated from Rayleigh-wave phase velocity, *Earth Planets Space*, 53, 1171-1176.
- Hwang, R.-D., J.-H. Wang, B.-S. Huang, K.-C. Chen, W.-G. Huang, T.-M. Chang, H.-C. Chiu and C.-C. P. Tsai (2001). Estimates of stress drop of the Chi-Chi, Taiwan, earthquake of September 20 1999 from near-field seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1158-1166.
- Hwang, R.-D., J.-H. Wang, B.-S. Huang, K.-C. Chen, W.-G. Huang, T.-M. Chang, H.-C. Chiu, and C.-C. P. Tsai (2001a), Estimates of stress drop of the Chi-Chi, Taiwan, earthquake of September 20 1999 from near-field seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1158-1166.
- Hwang, R.-D., J.-P. Chang, C.-Y. Wang, C.-C. Wu, G.-K. Yu, C.-H. Kuo, Y.-W. Tsai and W.-Y. Chang (2011). Rise time and source duration of the 2008 Mw 7.9

- Wenchuan (China) earthquake as revealed by Rayleigh-waves, *Earth Planets Space*, 63, 427-434.
- Hwang, R.-D., T.-W. Lin, C.-C. Wu, W.-Y. Chang and J.-P. Chang (2012). Reexamining the source parameters of the 2010 M_L 6.4 JiaSian (Taiwan) earthquake using the inversion of teleseismic P -waves, *J. Asian Earth Sci.*, 48, 24-30.
- Huang, W.-G., J.-H. Wang, B.-S. Huang, K.-C. Chen, T.-M. Chang, R.-D. Hwang, H.-C. Chiu and C.-C. P. Tsai (2001). Estimates of source parameters for the Chi-Chi, Taiwan, earthquake, based on Brune's source model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1190-1198.
- Huang, W.-G., B.-S. Huang, and C.-P. Lee (2013). Static stress drop inferred from near-fault parameters for the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan, *J. Asian Earth Sci.*, 64, 151-157.
- Ide, S., and G. C. Beroza (2001), Does apparent stress vary with earthquake size?. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3349-3352.
- Kanamori, H. (1994), Mechanics of earthquake, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 22, 207-237.
- Kanamori, H. (2006), The radiated energy of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, in Radiated Energy and the Physics of Earthquake faulting, R. Abercrombie, A. McGarr, H. Kanamori, and G. Di Toro (Editors), American Geophysical Monograph.
- Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975), Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- Kanamori, H. and L. Rivera (2004). Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 314-319.
- Kanamori, H., and L. Rivera (2006), Energy partitioning during an earthquake, in *Earthquake: Radiated Energy and the Physics of Earthquake faulting*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 170, edited by R. Abercrombie et al., pp. 3-13, AGU, Washington, D. C.
- Kanamori, H., and T. H. Heaton (2000), Microscopic and macroscopic physics of earthquakes. In: Rundle, J. B., et al. (Eds.), *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*, Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, D.C., 147-163.

- Kanamori, H., E. Hauksson, L. K. Hutton and L. M. Jones, 1993, Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 330-346.
- Kananori, H. and E. E. Brodsky (2004), The physics of earthquakes, *Rep. Prog. Phys.*, 67, 1429–1496.
- Kananori, H. and G. Stewart (1976), Mode of the strain release along the Gibbs fracture zone, Mid-Atlantic ridge, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 11, 312-332.
- Kennett, B. L. N., and E. R. Engdahl (1991), Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.
- Kikuchi, M. (1992), Strain drop and apparent strain for large earthquakes, *Tectonophysics*, 211, 107-113.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori (1982), Inversion of complex body waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 491-506.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori (1986), Inversion of complex body waves-II, *Phys. Earth Planet. Interiors*43, 205-222.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori (1991), Inversion of complex body waves-III, *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, 2335-2350.
- Kikuchi, M. and Y. Fukao (1988), Seismic wave energy inferred from long-period body wave inversion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 78, 1707-1724.
- Lee, S.-J., B.-S. Huang, M. Ando, H.-C. Chiu and J.-H. Wang (2011), Evidence of large scale repeating slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L19306, doi:10.1029/2011GL049580.
- Lin, T.-W., R.-D. Hwang, K.-F. Ma and Y.-B. Tsai (2006), Simultaneous determination of source parameters using far-field P waves: Focal mechanism, seismic moment, rupture length and rupture velocity, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 17, 463-487.
- Ma, K. F., et al. (2006), Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, *Nature*, 444, 473-476.
- Ma, K.-F., J. Mori, S.-J. Lee and S. B. Yu (2001), Spatial and temporal distribution of slip for the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1069-1087.

- McGarr, A. (1999), On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip, *J. Geophys. Res.*, 104(B2), 3003– 3011.
- Newman, A. V., and E. A. Okal (1998), Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The E_s/M_o discriminant for tsunami earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 103, 26885-26898.
- Okal, E. A. (1992). A student's guide to teleseismic body wave amplitude, *Seism. Resl. Lett.*, 63, 169-180.
- Pérez-Campos, X., and G. C. Beroza (2001), An apparent mechanism dependence of radiated seismic energy. *J. Geophys. Res.*, 106, 11127-11136.
- Pérez-Campos, X., S. K. Singh and G. C. Beroza (2003), Reconciling Teleseismic and Regional Estimates of Seismic Energy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2123-2130.
- Romanowicz, B. and J. B. Rundle (1993), On scaling relations for large earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1294-1297, 65-70.
- Scholz, C. H. (1982), Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1-14.
- Scholz, C. H. (1997), Size distributions for large and small earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 1074-1077.
- Scholz, C. H., C. Aviles and S. Wesnousky (1986), Scaling differences between large intraplate and interplate earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 65-70.
- Singh, S. K., and M. Ordaz (1994), Seismic energy release in Mexican subduction zone earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1533–1550.
- Smith, K. D., J. N. Brune and K. F. Priestley (1991), The seismic spectrum, radiated energy, and the Savage and Wood inequality for complex earthquakes, *Tectonophysics*, 188, 303-320.
- Stein, S. and M. Wyssession (2003), *An Introduction to Seismology, Earthquake, and Earth Structure*, Blackwell Publishing, UK, 498pp.
- Tsai, V. C., M. Nettles, G. Ekström, and A. M. Dziewonski (2005), Multiple CMT source analysis of the 2004 Sumatra earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17304, doi:10.1029/2005GL023813.
- Vassiliou, M. S. and H. Kanamori (1982), The energy release in earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 371-387.

- Venkataraman, A., and H. Kanamori (2004a), Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 109, B05302, doi:10.1029/2003JB002549.
- Venkataraman, A., and H. Kanamori (2004b), Effect of directivity on estimates of radiated seismic energy, *J. Geophys. Res.*, 109, B04301, doi:10.1029/2003JB002548.
- Venkataraman, A., L. Rivera, and H. Kanamori (2001), Radiated energy from the 16 October 1999 Hector Mine earthquake: Regional and teleseismic estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1256-1266.
- Wang, J.-H. (2004), The seismic efficiency of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L10613, doi:10.1029/2004GL019417.
- Wang, J.-H. (2006), Energy release and heat generation during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 111, [B11312](#), doi:10.1029/2005JB004018.
- Wang, J.-H. (2006). A review of the source parameters of the 1999 Ms7.6 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 17, 179-202.
- Wang, J.-H. and S.-S. Ou (1998), On scaling of earthquake faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 758-766.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture length, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 974-1002.
- Wyss, M., and J. N. Brune (1968), Seismic moment, stress, and source dimension for earthquakes in the California-Nevada region, *J. Geophys. Res.*, 73, 4681-4694.
- Yoshida, S. (1988), Waveform inversion for rupture processes of two deep earthquakes in the Izu-Bonin region, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 52, 85-101.