

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣地區雙主震誘發機制之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2116-M-041-004-
執行期間：97年08月01日至98年07月31日
執行單位：嘉南藥理科技大學休閒保健管理系

計畫主持人：王正誠

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 98年10月31日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

台灣地區雙主震誘發機制之研究

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2116-M-041-004-

執行期間：97年8月1日至98年7月31日

計畫主持人：王正誠

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：得立即公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學應用空間資訊系

中華民國 98 年 7 月 31 日

中文摘要

雙主震序列的成因，從時間與空間的觀點來看，可能是第一個主震的發生，使得區域應力的改變，在短時間內觸發了另一個鄰近且大小相近的斷層，發生第二次地震。因此，利用此觀點來探討地震發生後數秒至數分鐘後應力轉移的影響，就能找出雙主震的誘發機制，本研究將以屏東雙主震序列為例，計算由第一個主震發生後所造成的區域應力改變，造成在第二個主震的斷層面上的庫倫應力變化的分佈情況，將此結果與破裂形態比較，來解釋雙主震的誘發機制。由於雙主震序列的發生有前主震誘發後主震的特性，因此對於這二個地震，它們的斷層幾何形狀必定有對應的相關性。由於一般的地震報告(HARVARD 或 BATS 網)所發佈的是 2 個耦合的斷層面解，必須透過其他的研究方法來決定其中一個才是真正的斷層面解，本研究主要將利用雙主震中兩組斷層幾何形狀有對應相關性的特性，計算他們之間應力的轉換，來決定屏東雙主震序列的斷層面解。

關鍵字：雙主震序列，應力轉移，庫倫應力，誘發機制，斷層面解

英文摘要

This study utilizes the rupture processing of Chi-Chi earthquake, combine the computing of the Coulomb stress, to confer the analysis of dynamic triggering, in the course of fault breaking. In rupture processing, the fault is judged breaking when the slip is more than 0.1m. From the breaking time series, the breaking is in the most violent period from about 4 seconds to 25 seconds, but does not recur after 40 seconds. By the analysis of dynamic triggering, most part of the Coulomb stress on the breaking sub-faults is positive. But the negative of the Coulomb stress on the breaking sub-faults may be too small so still breaking. In the feature, it should calculate all of the change of the Coulomb stresses on sub-faults, and consider the analysis of temporal-spatial distribution, to prove the relationship of dynamic Coulomb stress change and the fault triggering rupture.

Keywords: Coulomb stress, fault rupturing, Chi-Chi earthquake, dynamic triggering

一、前言

雙主震地震序列的發生，提供了一個新的研究誘發地震的方法，從發生時間的先後與空間中斷層幾何分布形態的觀點來看，第一個主震的發生，使得區域應力的改變，在短時間內誘發了另一個鄰近且大小相近的斷層，發生第二次地震，此地震它的斷層幾何，是與斷層面上庫倫應力變化，有相當密切的關係；本研究以 2006 年屏東外海發生芮氏規模 7.0 的雙主震序列來探討。

二、研究目的

2006 年 12 月 26 日 12 時 26 分，屏東外海發生芮氏規模 7.0 的地震，8 分鐘後，12 時 34 分又發生規模 7.0 的地震，二個地震相當接近約 40 公里，這是台灣地震史上規模最大的雙主震(Huang et al., 2008)。構成「雙主震」的要件，通常地震的規模至少 5 以上，同時，兩個地震的規模大小要相近，且震央位置和地震深度要非常接近。至於「雙主震」形成的主要原因，很可能是第一次主震發生時，因破裂的速度緩慢，無法將地殼中所累積的能量釋放出來，但是這個第一個主震的發生，使得區域應力的改變，進而誘發另一個鄰近的斷層，把能量完全的釋放出來，造成所謂的雙主震。

基於區域應力的改變，進而誘發另一個鄰近的斷層的這個因素，本研究利用 BATS 即時網所發布的震源機制解，其中這項報告都同時包含著 2 個耦合的震源機制解，我們計算第一個地震所有可能的斷層面，其錯動產生的庫倫應力變化，與第二個地震可能的斷層面上所受的庫倫應力變化，來分析與推斷這雙主震可能的斷層面的組合。

三、文獻探討

在討論雙主震的問題中，第一個主震發生後使得區域應力的改變，是使的第二個主震被誘發的關鍵，在過去的研究中對地震後產生的應力轉換導致區域應力的改變，使得發生誘發餘震或是改變地震活動度，這類的研究已經在許多大地震發生後被研究(Wang et al., 2003; Toda et al., 2005; Ma et al., 2005)，在這類的研究中，往往討論的是震後改變的區域庫倫應力，對數日到數年間餘震或是地震活動度的改變。

由於雙主震效應很明顯的是第一個主震誘發第二個主震的而發生，因此在這二個地震間它們的幾何形狀應該有一定的相關性，使致容易產生誘發。因此在台灣地區地震發生後，規模 3 以上的地震，我們常可以從 USGS、HARVARD 與 BATS 網立即得到震源機制解的報告，但是這項報告都同時含有 2 個耦合的斷層面解，對於一般單獨發生的地震必須再利用波形的逆推的方法，來確定正確的斷層面解，但是對於雙主震的地震來說，第二個地震斷層面上應該會有大的 ΔCFS 正值，因此，本研究將利用這個想法，來決定雙主震破裂的斷層面。

四、研究方法

1. 斷層面解的決定

在本研究中，從已經知道的地震資料(經度，緯度，深度，地震規模與 2 個可能的斷層面解)，我們要估計發生此地震的斷層在空間中的位置與幾何形狀，因此，為了方便討論與分析，本研究假設震源位置皆在斷層面的中心。

依據 Well and Coppersmith (1994) 中的 Table 2A 與 2B，考慮一個 $L \times W$ 的長方形斷層面且平均滑移量為 AD ，可以得到以下三個的關係式

$$\log(RLD) = a + b * M \quad (1)$$

$$\log(RW) = c + d * M \quad (2)$$

$$\log(AD) = e + f * M \quad (3)$$

其中，式(1)~(3)中 a、b、c、d、e、f 為常數與斷層種類有關，如表一。RLD：斷層走向的長度(未破裂至地表)，則 L=RLD，RW：傾角方向的破裂寬度，則 W=RW，AD：平均位移，即斷層的平均滑移量，M：地震矩規模。

表一

斷層種類	a	b	c	d	e	F
走向-滑移斷層	-2.57	0.62	-0.76	0.27	-6.32	0.9
逆斷層	-2.42	0.58	-1.61	0.41	-0.74	0.08
正斷層	-1.88	0.5	-1.14	0.35	-4.45	0.63

關於地震斷層種類的判定，依據 Well and Coppersmith (1994)中敘述，走向-滑移斷層為水平滑移與垂直滑移的比率大於 1；水平滑移與垂直滑移的比率小於 1，則為逆斷層或正斷層，然而要確定是逆斷層或是正斷層，則依據垂直滑移方向。因此，綜合上述結論與斷層面解中的 rake 角的定義，可以訂出：

走向-滑移斷層： $-45^\circ < \text{rake} < 45^\circ$ 或 $\text{rake} > 135^\circ$ 或 $\text{rake} < -135^\circ$

逆斷層： $45^\circ \leq \text{rake} \leq 135^\circ$

正斷層： $-135^\circ \leq \text{rake} \leq -45^\circ$

地震能量的轉換則參考 Chen et al.(2007)

$$\log(M_0) = (1.27 \pm 0.06)M_L + (17.23 \pm 0.35) \quad (4)$$

與 Hanks and Kanamori(1979)

$$M = 2/3 * \log(M_0) - 10.7 \quad (5)$$

2.庫倫應力變化

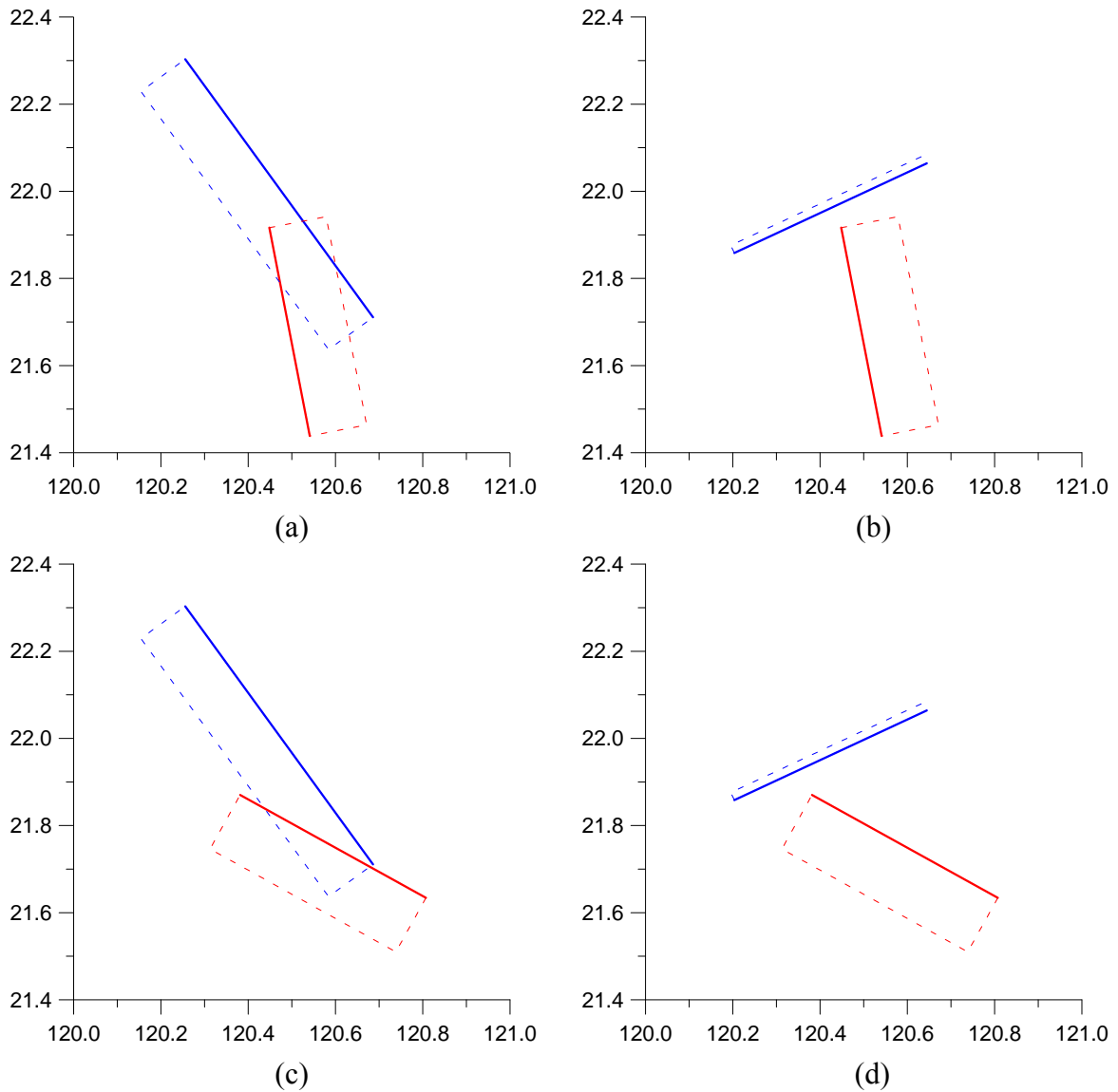
本研究對於研究雙主震誘發機制的問題，就是要計算第一個主震破裂後產生的區域應力變化，此項計算庫倫應力的方法，是採用 Wang et al.(2006)所發展的程式，此程式主要是計算地震發生後，斷層滑移所造成的庫倫應力變化。庫倫應力變化 ΔCFS (Coulomb failure stress changes)則定義為

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma_n \quad (6)$$

其中 $\Delta\tau$ ：斷層面上剪應力改變， $\Delta\sigma_n$ ：斷層面上有效正應力改變， μ ：靜摩擦係數，因此，為了討論第二個主震斷層面上的應力轉移，必須將第一個主震計算出來的庫倫應力變化 ΔCFS 做座標轉換到第二個主震的斷層面上。

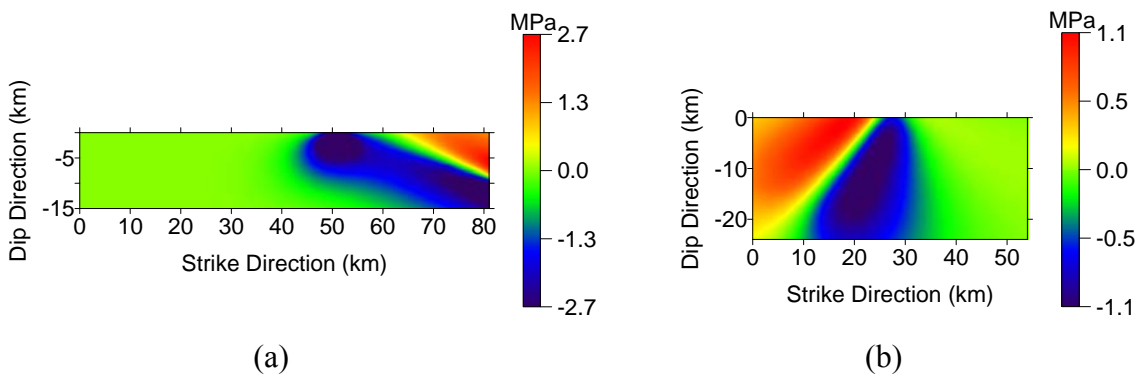
五、結果與討論

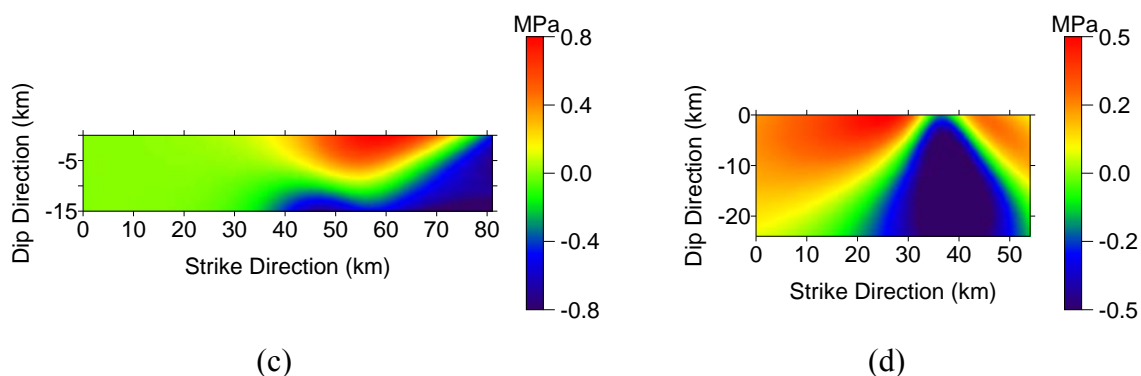
屏東雙主震序列由氣象局定出第一個地震的位置為 $120.56^\circ E$ ， $21.69^\circ N$ ，深度為 44.1 公里，第二個地震的位置為 $120.42^\circ E$ ， $21.97^\circ N$ ，深度則為 50.2 公里，二個地震規模則皆為芮氏規模 7.0。從中研院 BATS 網的地震定位報告中，第一個地震的震源機制解為 (strike,dip,rake)=(349,53,-54) 與 (119,50,-128)，第二個地震的震源機制解為 (strike,dip,rake)=(144,26,-12)與(245,85,-115)，因此考慮雙主震的相互關係，斷層面解可能有以下的四種組合 $E_1(A_{11}, A_{21})$ 、 $E_2(A_{11}, A_{22})$ 、 $E_3(A_{12}, A_{21})$ 、 $E_4(A_{12}, A_{22})$ ，如圖一(a)~(d)，其中 A_{ij} ：代表斷層面解，i：第 i 個地震，j：第 j 個斷層面，所以可以得到： $A_{11}=(349,53,-54)$ ， $A_{12}=(119,50,-128)$ ， $A_{21}=(144,26,-12)$ ， $A_{22}=(245,85,-115)$ 。



圖一 屏東雙主震地震斷層分布圖俯視圖，紅色表示第一個地震的斷層，藍色表示第二個地震的斷層，實線為斷層上緣。(a)為 E₁ 組合，紅色：A₁₁，藍色：A₂₁(b)為 E₂ 組合，紅色：A₁₁，藍色：A₂₂(c)為 E₃ 組合，紅色：A₁₂，藍色：A₂₁(d) 為 E₄ 組合，紅色：A₁₂，藍色：A₂₂。

由圖一中所示斷層可能的四種組合形態，我們分別去計算第二個斷層面上的 ΔCFS 的分佈，如圖二(a)~(d)。





圖二 屏東雙主震地震，第二個地震斷層面上的 ΔCFS 分布圖。(a)為 A_{11} 斷層錯動的地震，在 A_{21} 斷層面上的 ΔCFS 分布(b)為 A_{11} 斷層錯動的地震，在 A_{22} 斷層面上的 ΔCFS 分布(c)為 A_{12} 斷層錯動的地震，在 A_{21} 斷層面上的 ΔCFS 分布(d)為 A_{12} 斷層錯動的地震，在 A_{22} 斷層面上的 ΔCFS 分布。

從圖二中可見 A_{21} 與 A_{22} 為二個大小不同的斷層面，其原因為 A_{21} 的 $\text{rake}=-12^\circ$ ，由前述斷層種類的定義為走向-滑移斷層，而 A_{22} 的 $\text{rake}=-115^\circ$ ，則為正斷層，因此由式(1)~(3)參考表一計算出來的斷層長與寬將會有差異。

在本研究中，我們皆假設震源在斷層的中心，因此，在斷層的面上 ΔCFS 正值部分皆會影響到破裂的發生，其中 ΔCFS 正值越大，越能造成斷層的誘發，在圖二(a)~(d)的結果中，圖二(a)的結果會產生最大的 ΔCFS 正值為 2.7MPa，所以可以得到屏東雙主震的第一個主震的震源機制解為(349,53,-54)，第二個主震的震源機制解為(144,26,-12)

從以上的結果，我們比對 Lee et al.(2008)從波形逆推的結果：第一個主震的震源機制解為(349,53,-54)，第二個主震的震源機制解為(151,55,4)，其中他們認為第二個地震應該跟 Harvard 所訂出來的震源機制解結果比較接近，從上述的比較可以得到我們的結果與他們一致，因此我們對雙主震應力交互作用的假設有一定的可信度，同時也證明了這個方法的可行。

對於這研究未來的工作，我們可以把 Harvard 所訂出來的震源機制解，放進研究中的可能的斷面解，再利用雙主震應力交互作用的性質來定出真正的斷層面解。

參考文獻

- Huang, B. S., Y. L. Huang, S. J. Lee, Y. G. Chen, and J. S. Jiang, 2008. Initial rupture processes of the 2006 Pingtung earthquake from near source strong-motion records. *TAO.*, 19, 547-554, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.547.
- Lee, S. J., W. T. Liang, and B. S. Huang, 2008. Source mechanisms and rupture processes of the 26 December 2006 Pingtung earthquake doublet as determined from the regional seismic records. *TAO.*, 19, 555-565, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.555.
- Ma, K. F., C. H. Chan, and R. S. Stein, 2005. Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 $M_w = 7.6$ Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S19, doi:10.1029/2004JB003389.
- Wang, J. C., C. F. Shieh, and T. M. Chang, 2003. Static stress changes as a triggering mechanism of a shallow earthquake: case study of the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 135, 17-25.

- Wang, R., Lorenzo-Martin, F., and Roth, F., 2006. PSGRN/PSCMP[~] A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers & Geosciences*, 32, 527-541.
- Wells, D. L., and K. J. Coppersmith, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Toda, S., R. S. Stein, K. Richards-Dinger, and S. Bozkurt, 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.

計畫成果自評

本研究內容與原計畫約有 80%相符程度，已經大約達成預期目標情況，研究方法目前尚無相似的文獻，因此本成果應有些許的學術價值，未來將對整個研究做更完備的整理與分析，於相關學術期刊發表。