# 嘉南藥理科技大學 99 年度教師專題研究計畫成果報告

集集地震同震應力轉換與餘震誘發機制分析



計畫類別: ■個別型計畫 □整合型計畫

計畫編號: CN9938

執行期間: 99 年 6 月 25 日至 99 年 11 月 30 日

計畫主持人:王正誠

執行單位:嘉南藥理科技大學應用空間資訊系

中華民國 100 年 2 月 28 日

摘要

大地震發生後,探討震後應力轉移誘發餘震,已經成為地震學中相當重要的問題,許 多地震學家已經做了相當多的研究。其中,描述應力轉移的物理量,通常是以震後庫倫應 力變化(ΔCFS)來表示。研究證明,許多餘震的誘發確實是與應力轉移有關。

關於應力轉移與餘震誘發的研究,以往大多是以統計的方式來分析,並未對餘震所在 的斷層面確實計算出斷層面上庫倫應力變化,因此本研究將以集集地震為例,確實計算餘 震所在之斷層面上庫倫應力變化,來檢視誘發的原因。

本研究選取集集地震後2個月內6個規模(M<sub>W</sub>)大於6.2的餘震來分析,計算集集地震後的應力轉移,結果發現6個目標餘震斷層面上的ΔCFS值都有分佈大於1bar(0.1MPa)的區域,由於要誘發地震必須大於1bar,因此證明本研究所選取之餘震皆由集集地震所誘發。

關鍵字:應力轉移,庫倫應力,餘震誘發,斷層面



# 一、前言

大地震發生後由於應力轉移,使得整個區域的應力發生重整,短時間觀測到的是餘震 的誘發,但從較長時間觀點來看,則是地震活動度的改變。其中餘震的誘發,以往在研究 應力轉移與餘震發生的相關性,皆以餘震在庫倫應力上升區分佈的情況,或是統計庫倫應 力上升區餘震的數量來分析,實際的研究中卻很少有針對各別較大的餘震,在考慮其斷層 型態下做分析,因此本研究將針對餘震的斷層型態,來探討大地震後應力轉移對此餘震的 影響。

## 二、研究目的

本研究的目的要驗證應力轉移與餘震誘發的相關性,將以集集地震為例,選取震後2 個月內規模大於 6.2 的餘震,做為我們的目標餘震,計算這些餘震斷層面上的庫倫應力變 化,來檢視餘震誘發是否與集集地震應力轉移有關。

# 三、文獻探討

在研究大地震後應力轉移,產生餘震的誘發這類問題時,所考慮的是同震應力的轉移, 而描述應力轉移的物理量,通常是以庫倫應力變化(ΔCFS)來表示。斷層面上庫倫應力增加 (ΔCFS>0),使得斷層面更容易發生錯動,而誘發餘震,反之,斷層面上庫倫應力下降 (ΔCFS<0),則因應力轉移抵消了初始的區域累積應力,使得該區域不易誘發餘震(Toda and Stein, 2003; Wang et al., 2003; Ma et al., 2005; Toda et al., 2005),因此,本研究將對大地震後 的幾個較大的餘震,先計算出這些餘震的斷層在空間中的幾何型態,再計算大地震的應力 轉移在這些斷層面上的庫倫應力變化(ΔCFS),來探討應力轉移與餘震誘發的關係。

#### 四、研究方法

本研究計算斷層錯動而產生庫倫應力ΔCFS(Coulomb failure stress changes)的方法,是採 用 Wang et al.(2006)所發展的程式 PSGRN/PSCMP,該程式的基本錯動理論也是源自 Okada(1992)的推導,但是整個斷層錯動模型已經改為可以計算層狀的地下構造模型,不僅 如此,對於地下構造的介質參數,可為彈性介質,亦可以是黏彈性介質,本研究所計算的 是同震應力的轉移,因此介質參數為彈性介質,考慮的地下構造則使用 Roecker et al.(1987) 所發表的台灣地區地下構造,如表一。

Depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
5	5.78	3.18	2.5
10	5.88	3.30	2.7
15	6.24	3.37	2.9
25	6.67	3.78	3.1
Half-space	7.03	3.94	3.5

表一 台灣地區地下構造(Roecker et al., 1987)

集集地震後車籠埔斷層面上的滑移量,則是採用 Lee et al.(2006)以強震資料逆推出來的結果(如圖一),其中車籠埔斷層是由 357 個 3km×3km 的子斷層所組成,子斷層最大的滑移 量為 12 公尺,每個子斷層的滑移方向如圖中箭頭方向所示。



Distance (km)

圖一 Lee et al.(2006)以集集地震強震資料逆推出來的車籠埔斷層滑移量

在計算庫倫應力過程中,為了與 Wang et al.的程式座標一致,對於空間的定義我們取  $(+X,+Y,+Z)=(向北,向東,向下),車籠埔斷層上每個子斷層的參數(strike,dip,rake)=(\phi_i, \delta_i, \lambda_i),為了計算整個斷層的總滑移量,本研究分別先計算 357 個 <math>3$ km×3km 的子斷層的 響應,再利用疊加原理來求得整個斷層的應力變化。

對於本研究用來驗證與探討的目標餘震,選取規模大於 6.2 的餘震來做計算,參考 Ma et al.(2005)中所討論的 10 個規模大於 6 的餘震,其分布位置如圖二左上角的次圖,從餘震 與主震的相對位置,以及震源機制型態的代表性,本研究選擇編號 1、2、5、6、7、8 餘震 來探討(Chi and Dreger, 2004),這些餘震的參數如表二所示。



圖二 Ma et al.(2005)集集地震的餘震分布, 左上角的次圖為規模大於 6 的餘震

Event	Date	Time	Reference	Mag. Mw	Depth (km)	Lon. (°)	Lat. (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Chi-Chi ∆CFF (bar)	Cumulative ∆CFF (bar)
1	1999/9/20	17:57:15	Chi and Dreger (2004)	6.4	8	121.01	23.94	200	41	78	-1.9	<mark>-1</mark> .9
2	1000/0/20	10.02.44	Chi and Dreger (2004)	6.2	8	120.86	23.81	0	10	80	57.9	57.9
2	1999/9/20 18:03:41		Yen (2002)	6.2	18	120.88	23.79	23	33	95	3.1	3.2
3	1999/9/20	18:11:53	Yen (2002)	6.1	24	121.06	23.85	209	85	139	7.3	-5.7
4	1999/9/20	18:16:16	Yen (2002)	<mark>6.1</mark>	21	121.04	23.84	336	38	63	14.8	14.6
-	1000/0/20	24.46.20	Chi and Dreger (2004)	6.6	18	120.82	23.60	330	89	15	2.6	2.5
Э	5 1999/9/20 21:4	21:40:38	Yen (2002)	6.3	12	120.82	23.60	75	67	186	7.8	7.8
	1000/0/00	00.44.44	Chi and Dreger (2004)	6.2	10	121.08	23.81	165	70	100	6.9	7.1
0	1999/9/22 00:14:41	Yen (2002)	6.2	29	121.05	23.83	314	26	43	3.0	2.9	
7	1000/0/25	00.50.40	Chi and Dreger (2004)	6.8	16	121.01	23.87	5	30	100	11.5	11.3
'	1999/9/20	23:52:49	Yen (2002)	6.4	15	121.01	23.86	32	32	102	13.2	11.9
0	1000/10/22	02.10.50	Chi and Dreger (2004)	6.4	16	120.45	23.53	20	75	90	0.3	0.3
0	8 1999/10/22	02:18:56	Ma and Wu (2001)	6.4	17	120.43	23.52	180	42	56	0.0	0.0
9	1999/10/22	03:10:17	Ma and Wu (2001)	6.0	17	120.43	23.53	60	90	170	0.3	-1.7
10	2000/6/10	18:23:00	DHO IFO	C-IES 6.1	.1 27	121.11	1.11 23.9	296	24	-8	5.7	6.0
10	2000/6/10		DIVIC-IES					33	87	- <mark>11</mark> 4	2.2	2.3
				•					Me	dian	4.4	3.0
									Ave	erage	8.4	7.4

表二 Ma et al.(2005)集集地震的餘震中,規模大於 6 的餘震參數

對於這些目標的餘震,必須要定出斷層的幾何型態與在空間中的相對位置,從表二的 參數可以得到餘震震源的位置(經度,緯度,深度)與規模 M<sub>W</sub>,假設發生餘震的斷層為一個 L×W 的長方形,且震源在斷層面的中心,依據 Well and Coppersmith (1994)中的 Table 2A, 可以得到以下二個的關係式

$log(RLD) = a + b*M_W$	(1	I)	)
------------------------	----	----	---

$$\log(RW) = c + d*M_W$$

(1) (2)

其中,式(1)、(2)中a、b、c、d為常數,四個常數的值必須依斷層型態而定,如表三。 RLD:地表下的破裂長度,則L=RLD; RW:傾角方向的破裂寬度,則W=RW。因此,由 表二的參數可以定出餘震斷層面的幾何形狀。

斷層種類	a	b	с	d
走向-滑移斷層	-2.57	0.62	-0.76	0.27
逆斷層	-2.42	0.58	-1.61	0.41
正斷層	-1.88	0.5	-1.14	0.35

表三 斷層型態與斷層係數的關係

餘震斷層面上的 $\Delta CFS$ 計算,首先必須把前述所得到的斷層面離散化,成為數個子斷層,每個子斷層的參數(strike,dip,rake)=( $\phi_j$ , $\delta_j$ , $\lambda_j$ ),再計算主震破裂對每個子斷層面上的庫倫應力變化,此應力變化則定義為

# $\Delta CFS = \Delta \tau + \mu \Delta \sigma_n$

(3)

其中Δτ:子斷層面上剪應力改變,取餘震斷層面的滑移方向為正,Δσn:子斷層面上有效正 應力改變,μ:靜摩擦係數,因此,從主斷層破裂計算出來的應力必須先做座標轉換到每個 子斷層面上。由於計算出的應力是一組包含六個分量的應力張量,所以第一步驟必須將這 組應力以 Z 軸為對稱軸,逆時針轉φj度,將應力轉到子斷層的走向方向上,第二步驟再以 X 軸為對稱軸,逆時針轉δj度,則此時的正應力σn 為壓應力,Δσn=-σn,方向朝旋轉後的+Z 方向上,且與子斷層面的法向量平行,第三步驟再將斷層面上的二個垂直剪應力,旋轉至λj 方向,則正的τλ即為Δτ。將所有子斷層上的ΔCFS 值求出,即可得到餘震斷層面上庫倫應力 分佈情形。

# 五、結果與討論

經過計算本研究所選取的 6 個目標餘震斷層面上的庫倫應力分佈如圖三(a)~(f)所示, (a)~(f)依次對應編號1、2、5、6、7、8 餘震。



圖三 本研究所討論的 6 個目標餘震斷層面上庫倫應力的分佈,其中(a)M<sub>W</sub>=6.4、最大庫倫 應力 6.3MPa;(b)M<sub>W</sub>=6.2、最大庫倫應力 55.7MPa;(c)M<sub>W</sub>=6.6、最大庫倫應力 0.6MPa; (d)M<sub>W</sub>=6.2、最大庫倫應力 7.6MPa;(e)M<sub>W</sub>=6.8、最大庫倫應力 3.3MPa;(f)M<sub>W</sub>=6.4、 最大庫倫應力 0.11MPa

從圖三的結果可以得知,斷層面的大小與餘震規模成正比,斷層面上最大庫倫應力

的大小,則與餘震至主震的距離有關,其中圖三(b)餘震最接近主震,斷層面上最大庫倫 應力可達 55.7MPa 而圖三(f)餘震離主震最遠,斷層面上最大庫倫應力僅 0.11MPa,但這 些庫倫應力皆已達到誘發瀕臨破裂的斷層,而誘發產生餘震。另外,對於庫倫應力在斷 層面上的分佈情形可以看出,接近主震的餘震斷層面庫倫應力分佈較複雜,這是因為本 研究主斷層的破裂模型是由 357 個子斷層所組成,因此在較靠近主震的餘震斷層面上的 各別震源子斷層效應較大,對於離主震較遠的餘震斷層面,震源子斷層效應較小,因此 可以得到幾何較完整的庫倫應力分佈。

在本研究中所推估的餘震斷層面,皆是預設震源位於斷層面的中心,但從結果可以 看出僅有圖三(c)(編號5)的餘震,最大的庫倫應力分佈在中間的位置,因此可以得知最初 破裂的位置未必是最大庫倫應力所在的地方,因為斷層面上的背景應力與斷層面上的摩 擦力的不均勻分佈,仍是斷層能否誘發破裂的關鍵。

從 6 個目標餘震的結果可以得知,在斷層面的範圍內皆有由應力轉移產生庫倫應力 上升的區域,也就是因為這些區域庫倫應力上升,而誘發整個斷層面破裂而發生餘震, 因此餘震的誘發來自於鄰近斷層的應力轉移,也因此得到驗證。

# 參考文獻

- Lee, S. J., K. F. Ma, and H. W. Chen (2006), Three-dimensional dense strong motion waveform inversion forthe rupture process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, J. Geophys. Res., 111, B11308, doi:10.1029/2005JB004097.
- Ma, K. F., C. H. Chan, and R. S. Stein (2005), Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 Mw = 7.6 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, J. Geophys. Res., 110, B05S19, doi:10.1029/2004JB003389.
- Okada, Y.(1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Amer., 82 (2), 1018-1040.
- Roecker, S.W., Y. H. Yeh, Y. B. Tsai (1987), Three-dimensional P and S wave velocity structures beneath Taiwan: deep structure beneath an arc-continent collision. J. Geophys. Res. 92, 10547–10570.
- Toda, S., and R. S. Stein (2003), Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, J. Geophys. Res., 108, B12, 2567, doi: 10.1029/2003JB002527.
- 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.
- 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., F. Lorenzo-Martin and F. Roth (2006), PSGRN/PSCMP A new code for calculating coand post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, Computers & Geosciences, 32, 527-541.
- Wang, W. H., and C. H. Chen (2001), Static stress transfer by the 1999 Chi-Chi, Taiwan,

earthquake: effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault-slip model, Bull. Seism. Soc. Am., 91, 1041-1052.

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.

