

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

餘震誘發與斷層幾何型態相關性分析 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 99-2116-M-041-002-
執行期間：99年08月01日至100年07月31日
執行單位：嘉南藥理科技大學應用空間資訊系

計畫主持人：王正誠

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 100 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

餘震誘發與斷層幾何型態相關性分析

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 99-2116-M-041-002-

執行期間：99年8月1日至100年7月31日

執行機構及系所：嘉南藥理科技大學應用空間資訊系

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

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

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

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

中 華 民 國 100 年 7 月 31 日

一、前言

大地震發生後餘震的誘發，最主要因素為應力轉移，應力的轉移使得原本應力累積尚未達到最大靜摩擦力的斷層，剪應力大於最大靜摩擦力，因此發生斷層錯動而誘發餘震。影響應力轉移的因素有二項，一是主震的斷層型態，另一則是餘震的斷層幾何型態，以往對於這類問題的研究大多以實際案例的驗證研究為主，本研究則以模擬的方式來探究應力轉移的相關問題。

二、研究目的

地震發生後由於應力轉移，使得整個區域的應力發生重整，造成餘震的誘發，但是在主震鄰近的斷層中，並非是所有斷層都會被誘發破裂而發生餘震。其中，最主要因素為：這些斷層的幾何型態造成應力累積不利或是應力轉移不易。

在過去世界上許多大地震發生後，地震研究學者對於應力轉移發生餘震的問題已經有許多研究(Stein, 1999; Wang and Chen, 2001; Toda and Stein, 2003; Wang et al., 2003; Ma et al., 2005; Toda et al., 2005)。在這類問題研究時，描述應力轉移的物理量，通常是以庫倫應力變化(ΔCFS)來表示。結果證明，許多餘震的誘發確實是落在庫倫應力增加的區域，相對的，庫倫應力減少的區域，則少有餘震的發生。

在做應力轉移與餘震誘發的問題中，這類的研究大都以真實地震案例來分析，卻少有以模擬的方式來通盤考量，也就是對一些已經發生的地震實例來事後驗證，實難做到震前的預警分析。本研究將以理論模擬的方式，對地震發生後其鄰近斷層可能的型態來做分析，探討餘震誘發的可能性。

三、文獻探討

過去對於地震後產生應力轉移，導致區域應力改變的研究，通常以誘發餘震或是討論地震活動度變化來驗證(Wang et al., 2003; Toda et al., 2005; Ma et al., 2005)，這類的研究中，應力的轉移，也有對不同類型餘震來分類討論(Ma et al., 2005)，但是對於餘震的幾何型態中實際的斷層面長寬與在空間中的效應卻沒有詳盡的討論，因此為解決這問題，本研究不同於一般的實際案例討論，而是以理論的推導，來討論應力轉移與餘震誘發的問題。

四、研究方法

本研究為理論模擬的方式來探討餘震誘發與斷層幾何型態之間的關係，首先就是要建立主震與餘震的斷層模型，再利用斷層錯動造成區域應力改變的概念，來計算所預設可能發生餘震的斷層，其斷層面上庫倫應力 ΔCFS 的改變，進而判斷發生餘震的可能性，在整個模擬過程中，大部分參數設定與地質環境考量仍是以台灣地區為主，如此建立之模型未來將可對台灣地區已經發生的地震做分析與檢驗。

1. 斷層模型建立

為建立斷層模型，本研究主震的模擬，將以芮氏規模 6.0 的地震為例，地震能量的轉換參考 Chen et al.(2007)，

$$\log(M_0) = (1.27 \pm 0.06)M_L + (17.23 \pm 0.35) \quad (1)$$

其中式(1)是台灣地區芮氏規模地震與地震矩的關係。從地震矩計算出地震矩規模則參考 Hanks and Kanamori(1979)

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

為了探討所有可能的主震型態，因此主震的斷層型態將分為：走向-滑移斷層、逆斷層與正斷層三類。斷層的幾何形狀的計算，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 ，因此可以由地震矩規模得到以下三個關係式

$$\log(RLD) = a + b * M \quad (3)$$

$$\log(RW) = c + d * M \quad (4)$$

$$\log(AD) = e + f * M \quad (5)$$

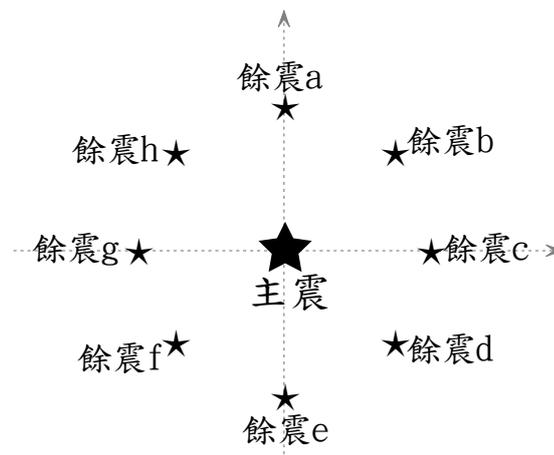
其中，式(3)~(5)中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 為常數與斷層種類有關，如表一。RLD：斷層走向的長度(未破裂至地表)，則 $L=RLD$ ，RW：傾角方向的破裂寬度，則 $W=RW$ ，AD：平均位移，即斷層的平均滑移量， M ：地震矩規模。

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

為簡化主震三種斷層型態，將走向-滑移斷層設為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=90^\circ$ 與 $\text{rake}=0^\circ$ ；逆斷層設為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=30^\circ$ 與 $\text{rake}=90^\circ$ ；正斷層則為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=60^\circ$ 與 $\text{rake}=-90^\circ$ ；長方形斷層面上緣皆離地表 5 公里。

對於餘震的斷層模型，由於主震為芮氏規模 6.0，因此將餘震規模設為 5.0，餘震的斷層形態也假設為走向-滑移斷層、逆斷層與正斷層三類；但考慮台灣西部斷層大多與台灣南北走向平行，因此本研究餘震的斷層模擬僅討論平行主震斷層走向的例子。另外，主震與餘震的相關位置，則是以主震為中心，以正北方開始順時針每隔 45° 的方位來設定餘震斷層可能的位置，如圖一，餘震斷層的幾何形狀也是考慮一個 $L \times W$ 的長方形斷層面，因此計算方式亦是參考式(1)~式(5)來模擬。



圖一 本研究中主震與餘震相對位置

為簡化餘震三種斷層型態，餘震的長方形斷層面中，走向-滑移斷層設為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=90^\circ$ ；逆斷層設為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=30^\circ$ ；正斷層則為 $\text{strike}=0^\circ$ 、 $\text{dip}=60^\circ$ 。長方形斷層面上緣亦皆離地表 5 公里。

2. 庫倫應力變化

本研究計算主震發生後產生庫倫應力 Δ CFS(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，本研究雖然以理論模擬的方式來計算，但所採用的地下構造為彈性介質，且採用台灣地區地下構造，如表二。

表二 台灣地區地下構造(Roecker et al., 1987)

Depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Density (g/cm ³)
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

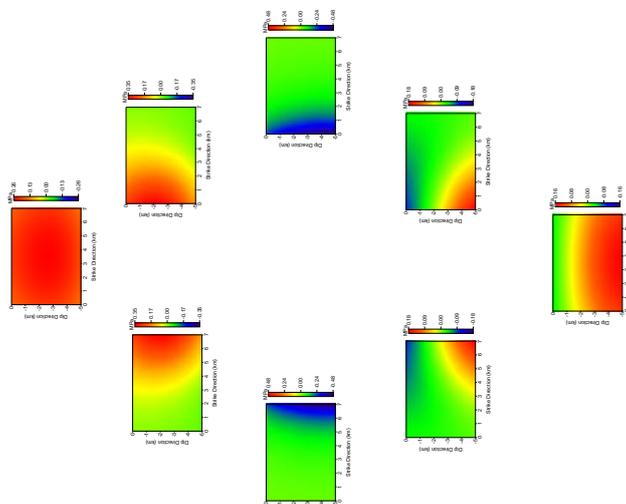
本研究判斷餘震是否發生，主要是計算鄰近斷層面上庫倫應力的轉移，因此由主震計算出來的庫倫應力變化 Δ CFS，皆必須作座標轉換到鄰近的斷層面上。最後再由庫倫應力分佈狀況與在斷層面上的 Δ CFS 值來判斷餘震是否可能發生。

3.計算與分析

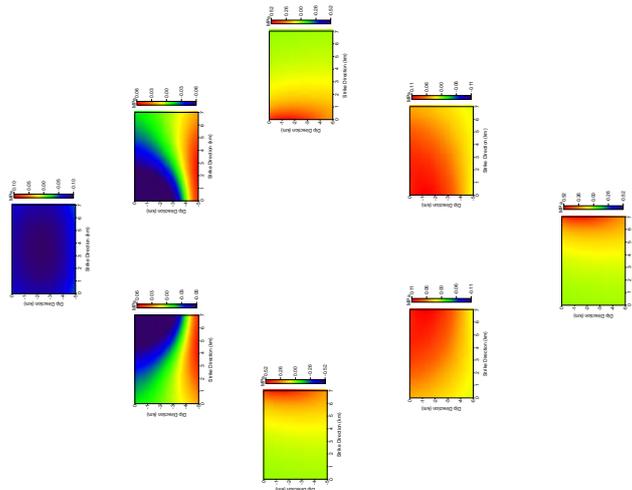
從斷層模型的建立可以得知，主震將有三種類型(走向-滑移斷層、逆斷層與正斷層)，而從圖一餘震可能的位置與餘震的類型，總共有 24 個組合，因此對應的斷層面上的庫倫應力分布圖將有 72 種組合。本研究將對這 72 組結果來分析及研判斷層幾何形狀對餘震發生的相關性。

五、結果與討論

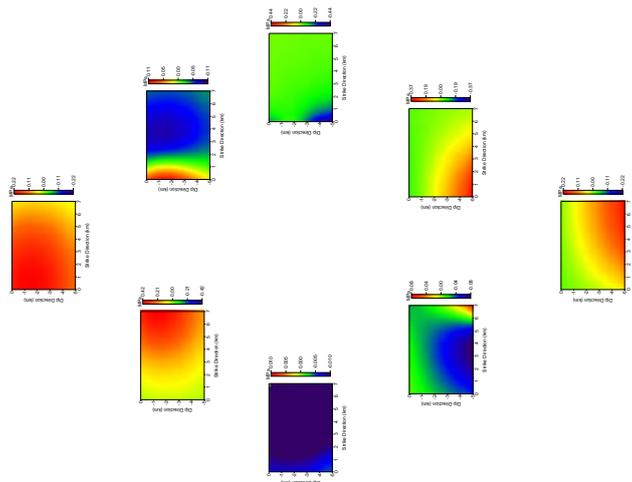
本研究將主震分為正、逆與走向-滑移斷層，分別對正、逆與走向-滑移斷層的可能誘發的餘震，來計算斷層面上的應力轉移，其中主震為正斷層，餘震為正、逆與走向-滑移斷層，斷層面上的應力轉移，如圖二~四所示。



圖二 正斷層主震破裂，餘震為正斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示



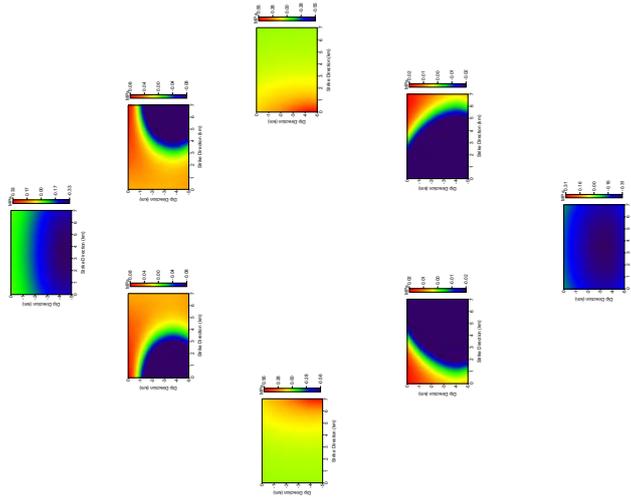
圖三 正斷層主震破裂，餘震為逆斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示



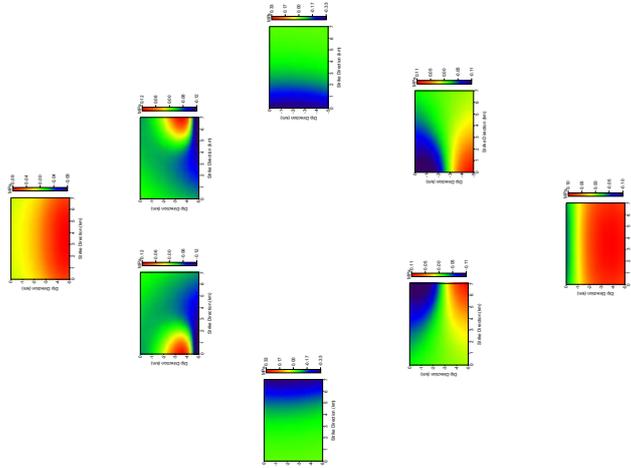
圖四 正斷層主震破裂，餘震為走向-滑移斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示

從圖二~四中，8 個方位斷層面上庫倫應力的分布情況可以得知，當主震為正斷層時，周遭斷層的應力轉移分布區域以正斷層>逆斷層>走向-滑移斷層。

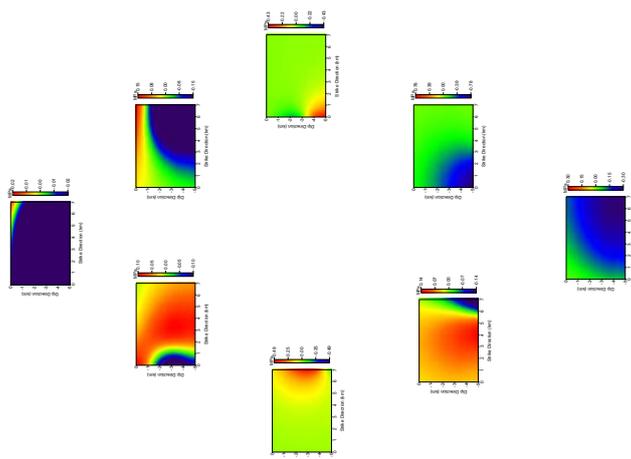
主震為逆斷層，餘震為正、逆與走向-滑移斷層，斷層面上的應力轉移，如圖五~七所示。



圖五 逆斷層主震破裂，餘震為正斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示



圖六 逆斷層主震破裂，餘震為逆斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示

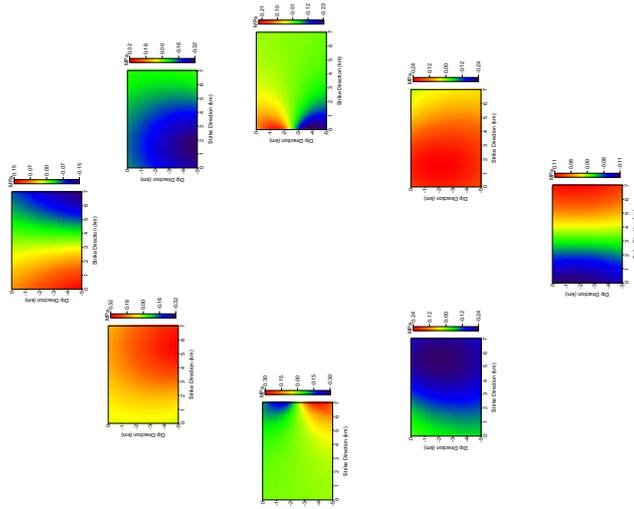


圖七 逆斷層主震破裂，餘震為走向-滑移斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示

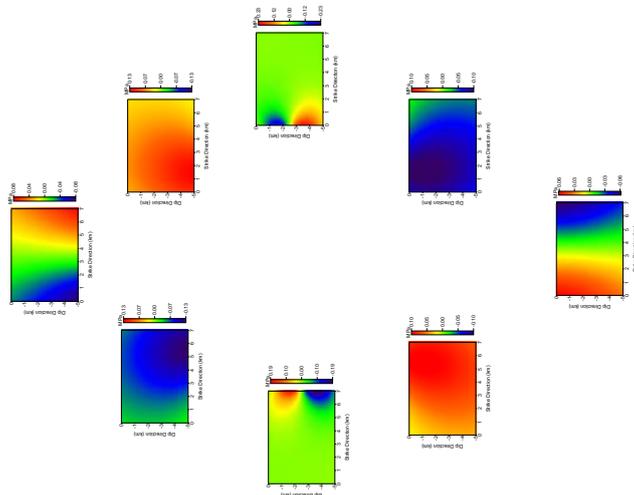
從圖五~七中，8 個方位斷層面上庫倫應力的分布情況可以得知，當主震為逆斷層時，周遭斷層的應力轉移分布區域以逆斷層>正斷層>走向-滑移斷層。

主震為走向-滑移斷層，餘震為正、逆與走向-滑移斷層，斷層面上的應力轉移，如圖八

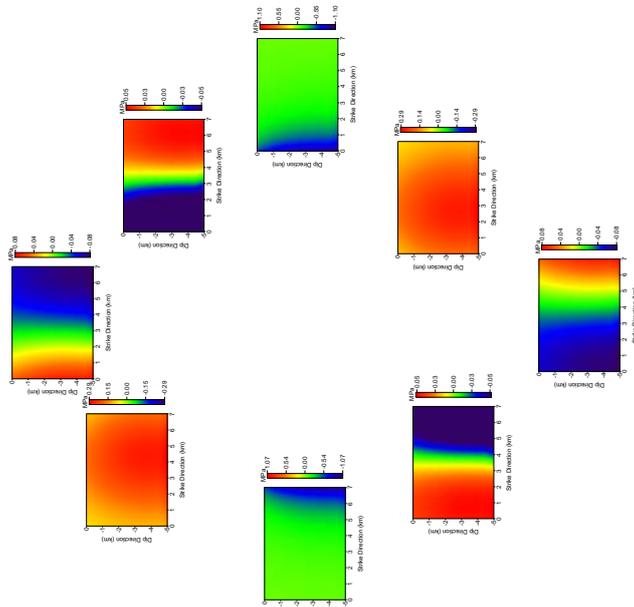
~十所示。



圖八 走向-滑移斷層主震破裂，餘震為正斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示



圖九 走向-滑移斷層主震破裂，餘震為逆斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示



圖十 走向-滑移斷層主震破裂，餘震為走向-滑移斷層面上應力轉移情形，其中 8 個餘震相對方位與位置如圖一所示

從圖八~十中，8 個方位斷層面上庫倫應力的分布情況可以得知，當主震為走向-滑移斷層時，周遭斷層的應力轉移分布區域以走向-滑移斷層>正斷層 \equiv 逆斷層。

從以上的分析結果得知，應力轉移不但對不同型態的斷層有差異，而且也與斷層所在的相對位置有關，所以由本研究的初步分析可以得知主震為正斷層時的庫倫應力轉移分布最大，而走向-滑移斷層轉移分布最小。

本研究的結果也提供一項非常重要的資訊，那就是當地震發生後，主震周遭不同型態斷層其所在的相對位置的斷層，其誘發可能性的分析。也就是結合主震當地的斷層資料與本研究中的圖二~十，可以推求主震發生後餘震誘發的可能性，這對主震發生後餘震位置的預估與判斷提供相當重要的依據。這也可以應用在防災中，餘震傷害的預防。

參考文獻

- Chen, K.C., W.G. Huang, and J. H. Wang (2007), Relationships among magnitudes and seismic moment of earthquakes in the Taiwan region, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 18, 951-973.
- Hanks, T. C. and H. Kanamori (1979), A moment-magnitude scale, *J. Geophys. Res.* 84, 2348-2350.
- 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.
- Stein, R. S. (1999), The role of stress transfer in earthquake occurrence, *Nature*, 402, pp. 605-609.
- Toda, S., 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 co- and 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.

計畫成果自評

本研究內容與原計畫所規劃的內容相符，研究結果也得到重要結論，可以提供未來學術相關研究的參考。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/27

國科會補助計畫	計畫名稱: 餘震誘發與斷層幾何型態相關性分析
	計畫主持人: 王正誠
	計畫編號: 99-2116-M-041-002- 學門領域: 地震學
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：王正誠		計畫編號：99-2116-M-041-002-					
計畫名稱：餘震誘發與斷層幾何型態相關性分析							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	1	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）