

台灣西部斷層帶附近岩體同震變形行為之研究 (I) A Study on Coseismic Deformation near Fault Zone in Western Taiwan (I)

計畫編號：NSC 90-2211-E-002-095

執行期限：90/8/1-91/7/31

主持人：林銘郎 台灣大學土木工程學系 副教授

一、摘要

中文摘要(關鍵詞：集集地震、FLAC、同震變形、數值模擬)

本研究利用台灣中部區域長期 GPS 監測之地表變形資料及 921 集集地震所發生的同震變形，藉由數值模擬方法，配合地質調查所得之地質背景資料，解釋台灣中部活動構造的運動模式。本研究採用有限差分連續體分析軟體 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 作分析工具，使用界面元素模擬斷層，分別進行車籠埔斷層區域之剖面及平面模擬，並且進行參數敏感度分析，以瞭解各參數對活斷層錯動之影響。分析模式需考慮網格建立、重力平衡、初始條件、邊界條件、材料參數、界面元素及同震變形等主要分析條件。網格建立部分，剖面網格是參考 Suppe(1987) 建立之台灣中部構造剖面的簡化剖面，大小為 30 公里寬、15 公里深。平面網格範圍為一長 200 公里、寬 100 公里的矩形，長軸方向與板塊擠壓碰撞方向 N55W 相同。模擬結果顯示：剖面分析中，當水平應力大於垂直應力時，藉由釋放界面元素使網格自然回彈錯動，較接近同震變形的狀況；於網格受邊界位移擠壓且釋放界面元素後，網格內部達到地震變形後的初始狀態，此時再施加

相當於一個強震週期所累積板塊位移量之邊界位移，再釋放界面元素所模擬之地表變形，經分析證實相當接近真實地表同震變形位移量。平面分析中，加入界面元素分段錯動模擬，其結果較符合實際測量之同震變形水平位移向量。而由斷層錯動時應變能釋放情形，推論因界面錯動所造成之地殼能量釋放集中位置，為發生地震或餘震機率較高的區域。

英文摘要(Keyword: ChiChi earthquake, FLAC, coseismic deformation, numerical modeling)

Based on the geological background and the long-term and coseismic ground deformation data surveyed by GPS network, this research study the movement characterization of active structure in Western Taiwan by means of 2D numerical simulation. The fault is simulated by using interface element. The sensitivity of the related parameter related to the faulting process is also discussed.

The simulation of profile shows that the phenomenon of elastic rebound is observed with fault slip when maximum principle stress is in the horizontal direction. The coseismic vertical displacement of the site in the east side,

20 km away from Chelunpu fault, shows descending, which agrees with the GPS observation. From the simulation of plane section, the horizontal displacement vectors are conformable with the features of coseismic deformation when fault segmentation is taken into consideration. And the region with concentration of strain energy released is well compare to the focus area of earthquakes.

二、計劃緣由與目的

1999年9月21日，台灣中部發生規模7.3的強烈地震，震央位於南投縣集集鎮附近，地震深度約7公里。此次地震係由車籠埔斷層錯動所造成，由竹山至豐原形成約96公里長的地表破裂，大致呈南北向延伸，東側相對上升，地震斷層活動產生一東南向西北逆衝之逆衝斷片。

由全球衛星定位系統(GPS)觀測集集地震地體之同震變形結果，車籠埔斷層東側(上盤)的水平位移量達1.2~7.1m，呈西北至西北北方向，由南向北遞增；斷層西側(下盤)及豐原-東勢北側則有0.1-1.1m朝東南至東南東方向的水平位移。鄰近斷層的上、下盤間有2.2~4.5m的垂直錯移量，東側抬升，上盤抬升量向東急遽減小，距斷層線約15km以東的地區已轉為下陷；斷層下盤大都呈下陷現象，最大者位於斷層線附近，下陷量達0.3m。本研究藉由數值分析方法，配合地質背景資料，進行車籠埔斷層剖面及平面的活動機制模擬，利用比對同震變形觀察資料加以檢核，以了解地體伴隨著斷層錯動的變形模式，並由應變

能的釋放情形，推測可能造成應變能累積之區域特性。

三、研究區域概述

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界，在板塊持續聚合的情況下，台灣新期構造運動主要就是受此大地應力所影響。目前，菲律賓海板塊仍以每年7公分的速率往N55W的方向朝歐亞大陸板塊推擠(Seno, 1977)。由台灣地區長期GPS所觀測之位移資料指出，地殼變形位移量由東南部經中央山脈往西北部遞減，意味地殼持續地在累積應變能(Yu and Chen, 1998)。本研究數值模擬共分為剖面模擬及平面模擬兩部分，此二部分之研究範圍如下所述：

(1) 平面模擬範圍

集集地震是因車籠埔斷層錯動所引起，從GPS在地震前後所蒐集的位移資料可觀察出，在車籠埔斷層周圍出現較大的位移量。因此，在平面模擬網格範圍的建立時，除了考慮初始邊界位移條件(邊界位移方向與板塊聚合帶作用力方向相同)，還要包括車籠埔斷層錯動區域，因此模擬範圍乃採用200公里長、100公里寬之矩形，東西範圍西起台中外海，長軸方向為N55W，向東南延伸200公里至花東外海；南北範圍則是要包括整個車籠埔斷層錯動之區域，南起雲林斗六市桶頭橋，北至苗栗卓蘭，總共約100公里(圖1)。此矩形範圍四個端點之台灣二度分帶座標為(290000, 2533000)、(347358, 2614915)、(183528, 2729630)以及(126170, 2647715)。

(2) 剖面模擬範圍

在進行剖面標準網格建立時，需考慮

中部地區之地下構造。Suppe(1987)研究台灣造山運動，利用深井資料、地震震源資料以及詳細的地形判識，繪製台灣西部褶皺衝斷帶的剖面。主要構造西起八卦山背斜，東至水裡坑斷層，包含的地層有新生代第四紀更新世，以及第三紀上新世、中新世和古新世等。本研究之剖面網格則是參考此剖面所建立的，東西向寬 30 公里、深度達 15 公里，唯此次車籠埔斷層錯動影響範圍廣闊，此剖面範圍明顯東西向寬度不足，因而需考慮再將網格向東西兩側各延伸 30 公里，因此剖面總長度設為 90 公里，其詳細剖面位置如圖 2 所示，台灣二度分帶座標由西向東為(180400, 2663000)、(270400, 2663000)，車籠埔斷層於地表之位置在(219000, 2663000)。

四、研究方法及流程

(1) 同震變形資料處理

本研究所收集之 GPS 資料，來源包括內政部土地測量局、成大衛星研究中心、中研院地科所及經濟部中央地調所，經整理後將高程位移及水平位移資料分開處理，以利本研究分析結果之比對。高程位移資料共有 137 筆可用，經內差繪製同震變形地表高程位移等值圖，如圖 3 所示。水平位移資料共有 188 筆可用，利用地理資訊系統套疊水平位移向量，如圖 4 所示。

(2) 數值模擬參數搜集

本研究之數值模擬所需參數，來源包括現地斷層泥採樣(台中縣大里溪河床)所做的直接剪力試驗，以及蒐集前人研究進行數值模擬所使用的參數，整理後擷取本研究模擬所需材料參數之近似值範圍，如表 1 所示，並仍對材料參數進行敏感度分析，以求取最接

近真實的材料參數。

(3) 剖面模擬

剖面模擬共分五個步驟：

- (a) 建立網格：參考 Suppe(1987)所繪之剖面，採只有車籠埔斷層單一活動構造之簡單標準網格，寬 90 公里，深 15 公里，底部水平滑脫面之深度為 9 公里，斷層出露在地表角度約 45 度，以界面元素模擬斷層面的存在，如圖 5 所示。
- (b) 重力平衡：讓岩體達到自重平衡。
- (c) 以位移邊界施加初始應力：為了模擬剖面中地殼受到擠壓的狀態，在網格東翼邊界施加一向西之位移，使網格受到水平向的大地應力。此時界面元素需全面固定，以模擬斷層錯動前的狀態，此時網格內部已均佈類似因板塊擠壓所累積之應變能。
- (d) 讓界面滑動：將模擬之界面強度降低而能自由滑動，模擬斷層在受力達臨界狀況下發生錯動，滑動後並再次固定界面元素，為斷層錯動後癒合的狀態。
- (e) 同震變形位移模擬：再給予一個地震週期所累積之邊界位移量，界面元素再釋放時網格變形的趨勢非常類似同震變形位移。就本模擬而言，台灣中部地區自 1845 年 3 月 4 日之台中地震(Tsai, 1985)至今，相當於累積了近 150 年的地殼壓縮，若以所觀測之區域地殼變形速率 3 公分/年計算，則一個地震週期所累積之邊界位移量約為 4.5 公尺。

本研究選了五項參數分析因子進行參數敏感度分析，包括斷層出露在地表角度、底部滑脫面之深度、地層材料參數、界面材料參數及地層層間滑動

的可能性，觀察其對整個分析結果的影響性。

(4) 平面模擬

平面模擬共分為四個步驟：

- (a) 建立網格：平面模擬範圍自台中外海之台灣海峽，向東南延伸至花東外海之太平洋，包含整個車籠埔斷層地表破裂之區域。網格中只包含車籠埔斷層一條活動構造線，如圖 6 所示。
- (b) 以位移邊界施加初始應力：給予邊界位移，模擬地殼受到自東南東方向之板塊擠壓，此時界面元素同樣需全部固定，網格中之主應力方向應當與實際構造之位移速度場類似。
- (c) 讓界面滑動：降低界面元素之強度而讓其自由滑動，模擬斷層在受力達臨界狀況下發生錯動，後將界面再度鎖上，為斷層錯動後癒合的狀態。
- (d) 同震變形位移模擬：於邊界施加一個地震週期之邊界位移量，再度釋放界面元素使其錯動，並檢核同震變形水平位移向量。唯平面模擬並不能代表真實三維的地殼變形，在平面模擬時，於斷層界面附近網格位移向量不能重疊，位移向量因而受到影響，因此需要降低界面參數之正向勁度值，才能使斷層帶上之位移向量較符合實際同震變形資料所得之位移向量。而平面模擬主要在觀察斷層帶以外兩側網格位移向量，以比對同震變形之地表水平位移向量。

平面模擬中挑選五項因子進行參數敏感度分析，包括界面元素錯動順序、北港基盤高區的存在、界面參數、邊

界效應及斷層分段等，觀察其對整個分析結果的影響性。

五、數值模擬結果

(1) 剖面分析結果

地震後所監測之地表高程同震變形如圖 7 所示，可發現斷層下盤區域向下位移，上盤為向上逆衝，且距離斷層東側 30 公里以東地區，高程位移量開始有下降的趨勢。本研究剖面模擬之結果，就以此同震變形地表高程位移量剖面與模擬之地表高程變形進行比對。

模擬過程中將地層視為彈性且均質，模擬結果與 GPS 觀測值疊加比較如圖 8 所示，有類似之位移特徵。由於在界面元素釋放前，網格內部之水平向主應力大於垂直向主應力，因此在界面元素釋放之後，斷層上盤網格因界面元素釋放，有向上逆衝之現象，距斷層帶東側 20 至 50 公里處亦有下降之位移分量產生，且下盤亦有微量下降回彈的分量，即與此次地震所造成之地表同震變形類似。

檢視界面元素發生錯動區域(圖 9)，發現斷層面上確實有發生滑動，滑動位置(亦即斷層發生錯動區域)，恰巧與此次地震之主震震源位置相當。因此，可以證明此剖面分析流程是正確的，未來可利用此步驟模擬活動構造之運動模式。

由參數影響分析結果，顯示：斷層傾角為 45 度時，地表將會出現最大之垂直位移量；底部滑脫面深度越深，其模擬結果之地表高程位移量也就越大。上盤之材料參數要比下盤強，其地表位移向量才能符合同震變形的位移現象；而界面摩擦角於錯動時確實要比非錯動時的值要來的小，界面元

素於錯動時之摩擦角為 10 度是最小且最適當的值。當有地層層間滑動相較無層間滑動，其地表位移量較大且較容易形成背衝斷層。

(2) 平面分析結果

由大地測量同震變形資料顯示，上盤水平位移量比下盤大許多。在進行平面模擬時，網格材料參數上盤要比下盤小，才得以模擬出相近於真實的變形情況。界面材料參數則需於錯動時要比未錯動時小，且二維模擬的缺點是兩不同塊體網格不能重疊，因此乃將界面元素之正向勁度比切向勁度至少小兩階，界面元素兩側網格節點才會有明顯之位移向量交錯的現象發生。分析結果之地表位移向量經地理資訊系統比對同震變形位移向量，如圖 10 所示，整體之位移向量已經大致與同震變形之水平位移向量雷同，但於斷層破裂帶上盤附近仍有部分地區吻合度不高。

由參數影響分析結果，顯示：

- (a) 斷層分段錯動位移向量較接近真實。模擬設定之分段地點在南投，先錯動南段之界面，再錯動北段，發現南段之位移向量有明顯偏向西逆衝的現象，越往北邊偏向北逆衝的分量越多，水平位移向量由南往北呈扇形分佈。斷層由南向北錯動與利用強震資料所觀測之結果相同。
- (b) 界面錯動時降低界面摩擦角所造成之位移量較大，且位移向量也較符合實際觀測資料。
- (c) 邊界影響位移向量之範圍只在邊界網格接合處，若是要觀察斷層南北兩端因斷層錯動導致位移向量之變化，加大邊界網格分析為一方

法。

- (d) 斷層分段：根據現地調查，車籠埔斷層在台中縣太平市一江橋，地表破裂有不連續的現象，且此地區之斷層破裂方向並不是南北向，而有轉移的情形。本研究模擬之過程，將此地區網格之界面元素鎖住，觀察周遭網格的位移變化，結果周圍的網格的確有轉動的現象發生，網格位移向量隨著被固定點呈現逆時鐘旋轉，此特徵與地表破裂延伸方向相同，證明斷層有可能在此區域發生不連續的現象，因而造成地表破裂方向變化。
- (e) 考慮北港基盤高區的影響，將北港高區地層材料參數之 E 值增加，則模擬結果其位移速度場會沿著其周圍成扇型分佈，加上北港基盤構造高區作分析比較接近真實地質構造情形。

(3) 應變能釋放情形

於剖面模擬中，以撰寫副程式的方式，利用網格內部之應力值推求應變能，以模擬同震變形前後網格內部應變能之差值，得到斷層錯動時網格內部應變能釋放之情形。分析結果發現，應變能釋放集中的區域相當於震源所在之深度位置，大約是在斷層下盤接近斷層面上、深度約 7.8 公里處；而在底部滑脫面之應變能釋放最大的區域恰巧與主餘震分佈位置大致接近(圖 11)。可推論因斷層錯動所造成之地殼能量釋放集中位置，為發生地震或餘震機率較高的區域。

六、結論

根據本研究模擬結果，可歸納出以下四點結論：

- (1) 剖面模擬分析中，當水平應力大於垂直應力時，藉由釋放界面元素使網格自然回彈錯動，其回彈量橫向變形大於縱向變形，造成網格由東向西逆衝，可以模擬同震變形的狀況。此外，於網格受邊界位移擠壓且釋放界面元素後，網格內部已累積壓縮應變能，此時再施加相當於一個強震週期所累積板塊位移量之邊界位移，再釋放界面元素所模擬之地表變形，經分析證實相當接近真實地表同震變形位移量。
- (2) 平面模擬分析中，加入界面元素分段錯動模擬，且至少分兩次錯動，其結果較符合實際測量之同震變形水平位移向量，且與實際強震資料顯示車籠埔斷層之地表破裂過程為由南向北延伸相同。至於台中一江橋地區，有斷層不連續的現象，車籠埔斷層於此處未造成地表破裂，且其南北側地表破裂面有轉向的情形；當假設斷層於此分段時，數值模擬結果可觀察到相似的旋轉特徵，但最後仍需進行現場勘查加以佐證。
- (3) 數值模擬於材料參數之取捨，是相當重要的一環，需考慮模擬物質材料參數之合理範圍，且經過試誤之後方可求得最接近真實之參數。集集地震給予本研究相當多的驗證資料，因此本研究所使用之參數，其模擬結果皆與真實資料比對之

後加以修正，因此可信度提高，對於往後利用數值分析模擬活動構造之運動，可利用本研究所整理之材料參數帶入分析。

- (4) 本研究以界面元素模擬斷層，經模擬證實，斷層在錯動與不錯動時，其參數有很大的差異。斷層在錯動時，界面強度明顯的要比在非錯動時低，以錯動時摩擦角為 10 度、非錯動時摩擦角為 30 度分析，其模擬結果最為恰當。

參考文獻

- 1.Seno, T., 1977, The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea Plate relative to the Eurasian Plate, *Tectonophysics*, No. 42, pp. 209-226.
- 2.Suppe, J., 1987, The active Taiwan mountain belt, *The anatomy of mountain ranges*, Ch15.
- 3.Tsai, Y. B., 1985, A study of disastrous earthquakes in Taiwan, 1683-1895, *Bulletin of the institute of earth sciences, academia sinica*, Vol. 5, pp. 1-44.
- 4.Yu, S. B. and Chen, H. Y., 1998, *Strain Accumulation in southwestern Taiwan*, TAO, Vol. 9, No. 1, pp. 31-50.

表 1 材料參數整理

人名	年份	剪力模數GPa	體積模數GPa	土層密度kg/m ³	包生比	楊氏係數GPa	正向勁度GPa/m	切向勁度GPa/m
蕭銘豐	1996	2&24	3.33&40	2700	0.25	5&60		
胡植慶	1997	2&24	3.33&40	2700	0.25	5&60	200-220	198-220
張國楨	1998	0.4	0.67	2700	0.25	1		
楊適修	1999	0.01	0.0195	2500	0.28	0.0257	0.02	0.02
張正宜	2000						0.002-0.2	0.002-0.2
FLAC	模擬	0.01-2,24	0.02-3.33,40	2500-2700			0.002-220	0.002-220

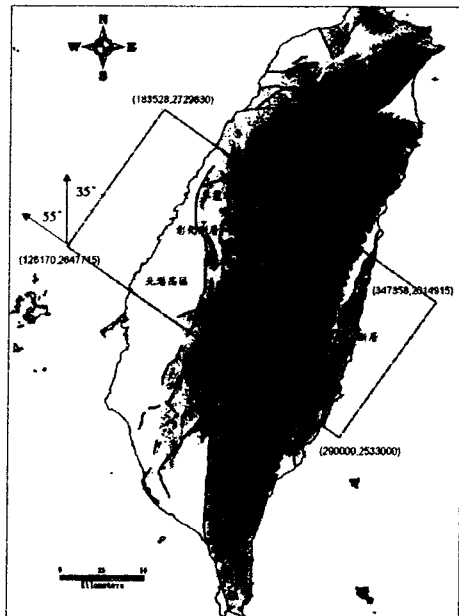


圖 1 平面模擬研究區域範圍

黑色矩形長 200 公里、寬 100 公里，長軸方向為北 55 度西，與板塊擠壓碰撞

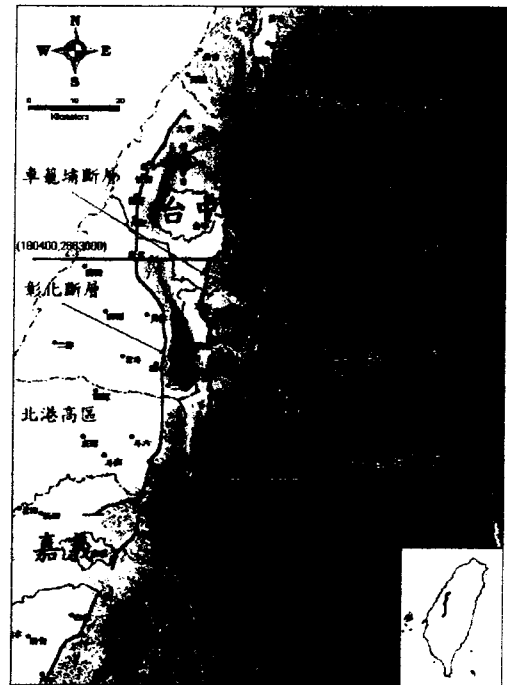


圖 2 中部剖面位置(A-A'剖面)

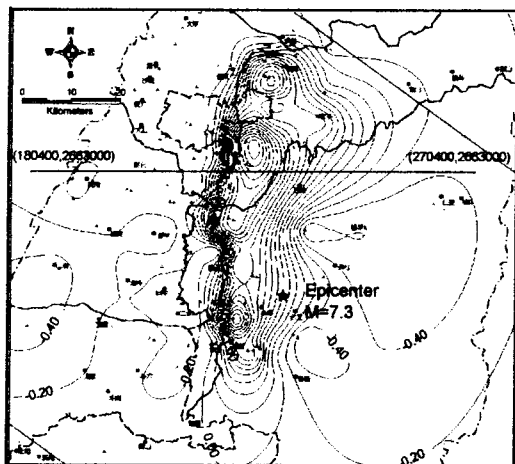


圖 3 地表同震變形高程位移等值圖

圖中之三角點為觀測站之位置。

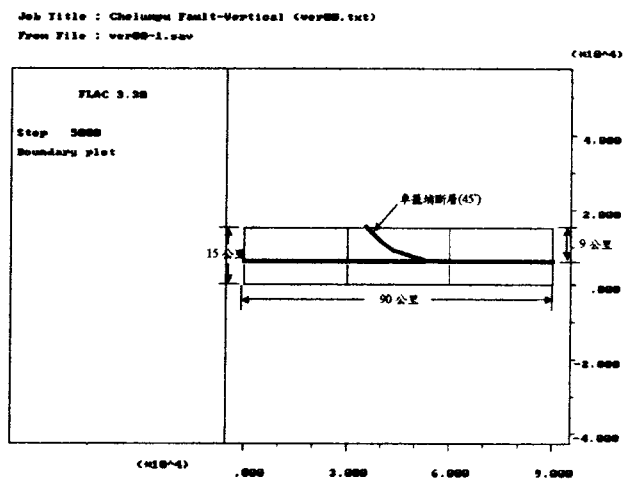


圖 5 模擬用之剖面圖

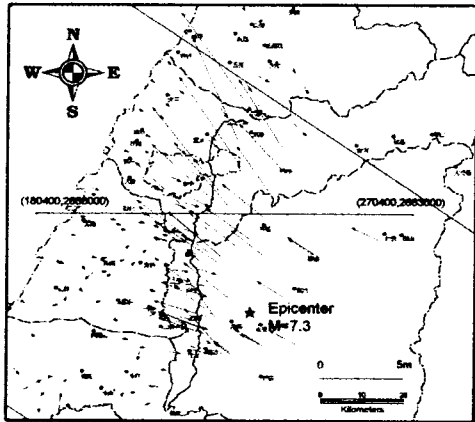


圖 4 同震變形之水平位移向量

上盤位移量往西北逆衝，下盤則往東南回彈

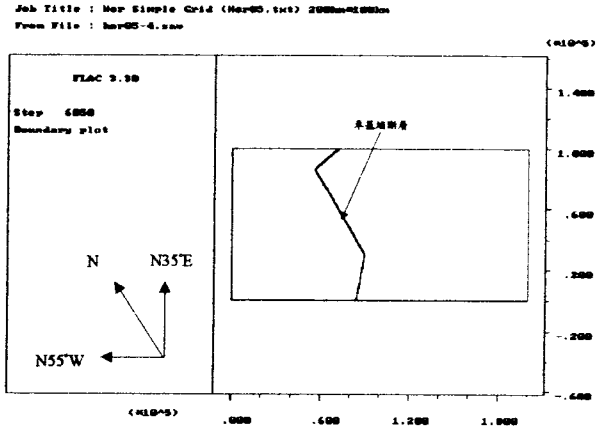


圖 6 模擬用之水平面圖

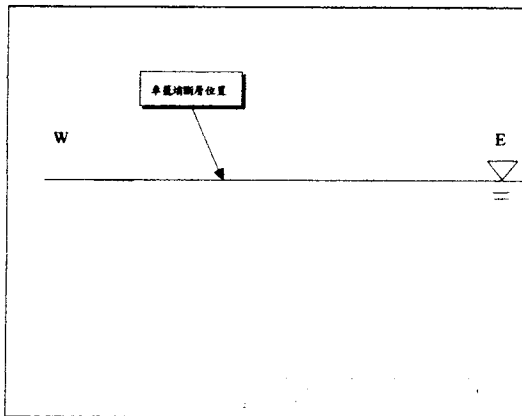


圖 7 圖 2 中 A-A'剖面之地表垂直位移分量
同震變形

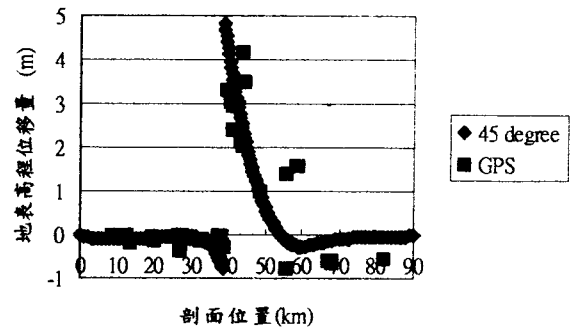


圖 8 模擬結果與監測之同震變形地表高程
位移量比較圖

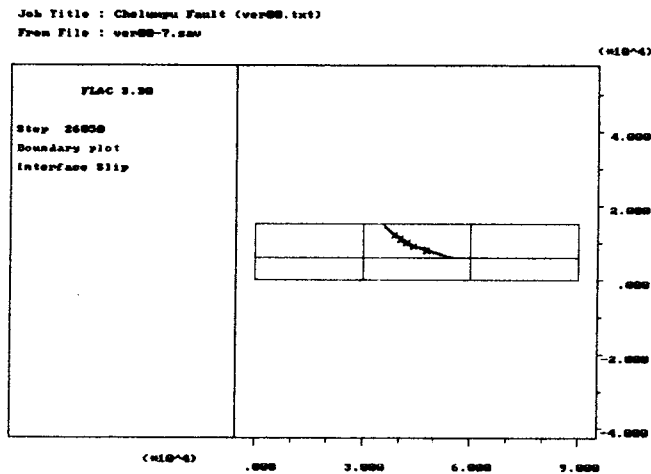


圖 9 界面元素發生錯動區域

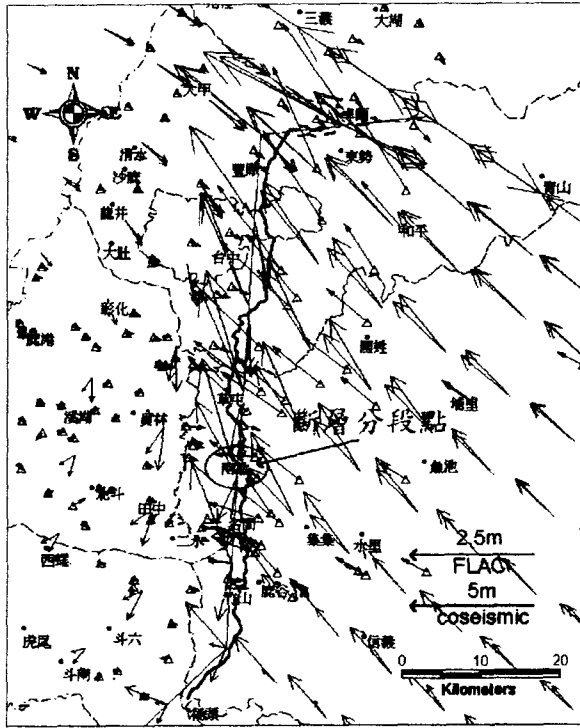
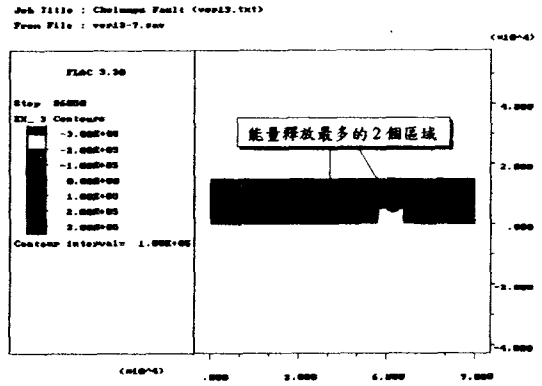


圖 10 斷層分段與不分段錯動之位移向量比較

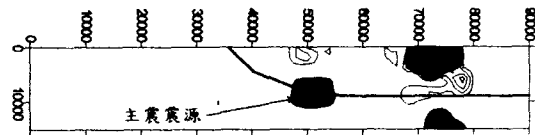
藍色箭頭為分段錯動，黑色箭頭為不分段錯動，紅色箭頭為同震變形位移向量，紅色三角形為測站位置。斷層分段錯動點大約設在南投附近，模擬結果比對顯示分段錯動更趨近於真實位移向量，且靠近斷層帶上之位移向量亦接近真實位移向量。



(a) 模擬同震變形網格所釋放之應變能等值圖



(b) 集集地震主震及餘震之震源分佈位置



(c) 地震能量等高線圖

圖 11 同震變形釋放之應變能分析結果