

集集大地震之宏觀分析

呂佩玲 蕭文啓 辛在勤 張建興
中央氣象局地震測報中心

摘要

中央氣象局於一九九二年至一九九七年期間推動「強地動觀測計畫」，一九九八年起繼續推行「強地動觀測第二期計畫—建置強震速報系統」，截至八十八年度止，在全台灣共設置了六百三十七個自由場強地動觀測站，五十六座結構物（包括橋樑及建築物）強震監測系統。集集大地震發生後，立即至震央區收集強震資料進行分析，並提供學術界及工程界，從事防震工程及耐震規範的研究，俾供工程主管單位修訂建築物耐震設計規範的參考。

1. 本次九二一大地震，中央氣象局於地震發生後一分鐘左右即可得知各地震度資料，三分鐘完成地震規模及震央位置的研判作業，五分鐘內即可透過網際網路、呼叫器、傳真存轉等多重管道迅速對外發布完整的地震消息。分析所收集之主震強震資料發現，在主震發生後的一分鐘內，阿里山及其南方各發生一次規模大於 6.0 之誘發性淺層地震，隨後在新竹和苗栗間也觸發另一個規模約 6.0 的淺層地震，三個誘發性淺層地震說明了初步等震度圖的差異及大範圍餘震分布情形。
2. 在震源區所記錄的強震資料，有兩個測站分別測得約 1G 的最大加速度值，且由強震資料所推算之位移量充分顯示與地面破壞和建築物毀損有密切的關係，其在震源區內位移分布情形與由衛星影像處理之結果甚為吻合。目前此組資料已引起國際地震界及工程界之注目。另外，在 TCU068 和 TCU052 兩測站之位移資料顯示清楚的彈性回彈現象應可解釋豐原至東勢間之複雜地表破裂情形。

關鍵詞：集集大地震、誘發性淺層地震、等震度圖、彈性回跳

一、前言

一九九九年九月二十一日一時四十七分（世界標準時間為九月二十日十七時四十七分），在台灣的中部發生一次芮氏規模 7.3 的地震。由於震央位於南投縣集集鎮，故命名為集集大地震。該地震為台灣近百年來發生於島上規模最大的地震。經由交通部中央氣象局地震監測網自動作業初步定位為：震央位置為北緯 23.85° ，東經 120.82° ，震源深度為 1 公里，

後由所收錄之強震資料修正震源深度為 8 公里。截至一九九九年十月十三日官方的發布資料，該地震造成 2,333 人死亡，10,002 人受傷，超過 100,000 棟房屋全毀或半毀。此次地震引起車籠埔斷層之地表破裂長度約 80 公里，最大垂直位移達 5 公尺。

本研究主要是利用中央氣象局地震監測網及台灣地區自一九九二至一九九七年建置之密佈全島的強地動觀測網，所偵測集集大地震系列之強震資料，從地震學觀點探討該地震系

列之特性。

二、歷史地震活動度

台灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊互相撞擊區，花東縱谷即是兩板塊的交界。集集大地震恰位於台灣西部中段，該地區至少有三條第四紀南北向，且向東傾斜的斷層，由西向東，分別為彰化、車籠埔及雙冬斷層。

分析台灣東部地區地震活動及構造，主要因板塊互相撞擊及隱沒作用所造成的許多的地震，但從災害觀點而言，歷史資料卻顯示：發生於西部地區的較大地震，往往是震源深度較淺、且緊鄰人口密集區活斷層，以致造成嚴重的災害。集集大地震就是一個典型的案例。圖一所示中央氣象局地震季報蒐錄台灣地區自一九〇〇年至一九九九年規模大於 6.0 的地震震央分布圖。星形符號代表發生在九月二十一日後的地震震央；圓形符號則是集集大地震前的地震震央分布。分析集集大地震的震央位置，可發現該地震發生於全島地震活動度較低的區域，甚至還低於曾發生兩次規模 7.1 的西南部地區。

三、現代化地震監測

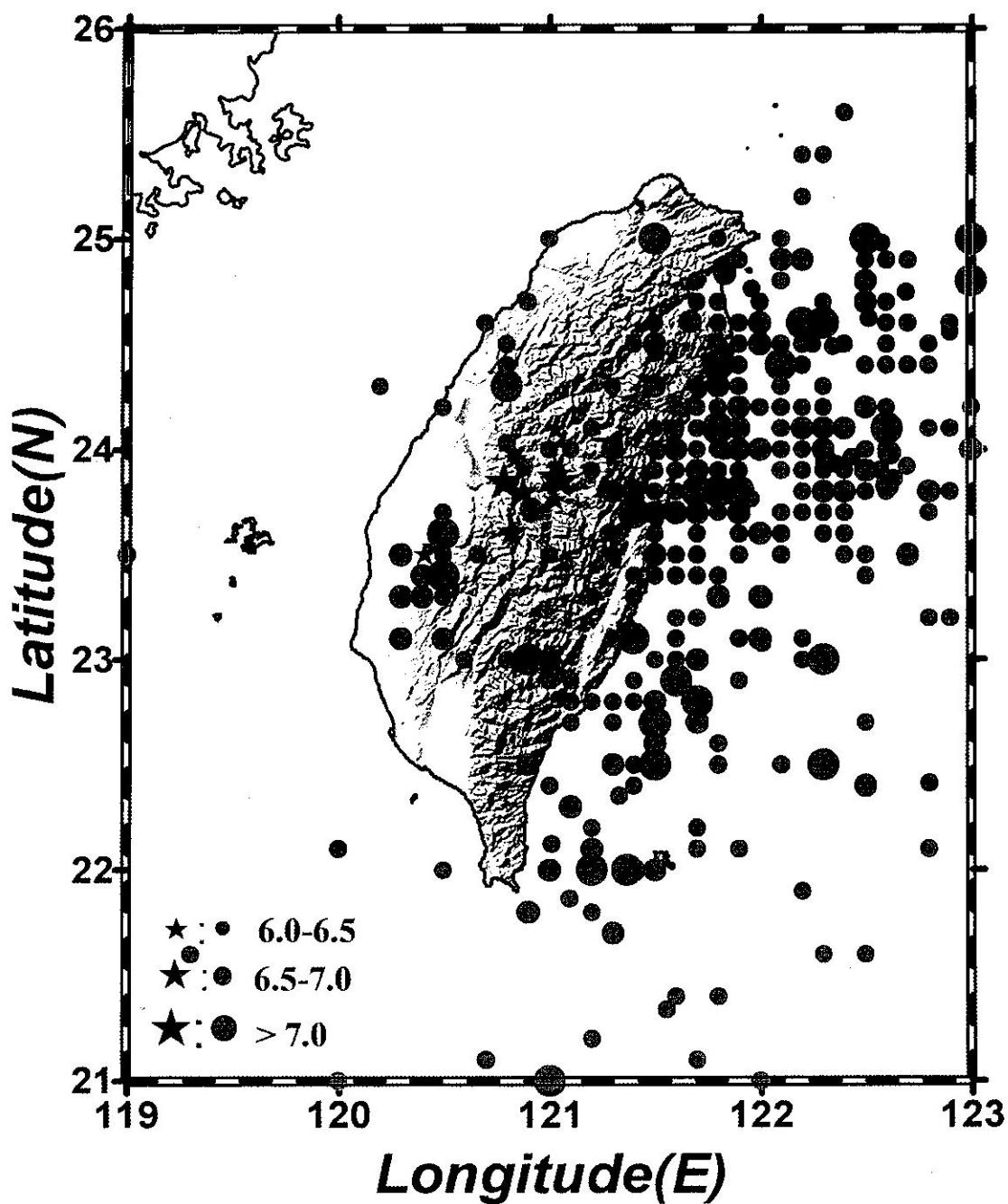
一九九〇年代初期，中央氣象局開始擴建地震監測網，達到 73 個測站。圖二所示為台灣地區地震網測站分布圖。依循地震監測標準作業，利用三分量、短週期的速度型地震感應器，並數位化傳遞及記錄地震的資料。一九九二年起，中央氣象局在原有地震網上各測站加設三分量、高品質的強震儀，如圖二中星號所示。強震訊號並隨同一條數據專線即時傳回台北中心站(李和辛, 1997)。此新系統命名為 RTD (強震即時數位傳輸系統)。每一強震儀具有 -2G 至 +2G 的動態記錄範圍，並兼具即時資料蒐集及作業處理之功能。此台灣地區之即時加速度型地震監測網已可作業形態就震央於島上之中、大型地震發生過後 60 秒左右(鄧等, 1997; 吳等, 1997)，順利的計算並發布該地震的震央、

規模、等震度分布圖。此地震測報的快速反應能力是居於全世界第一位，並已獲國際地震界的肯定。

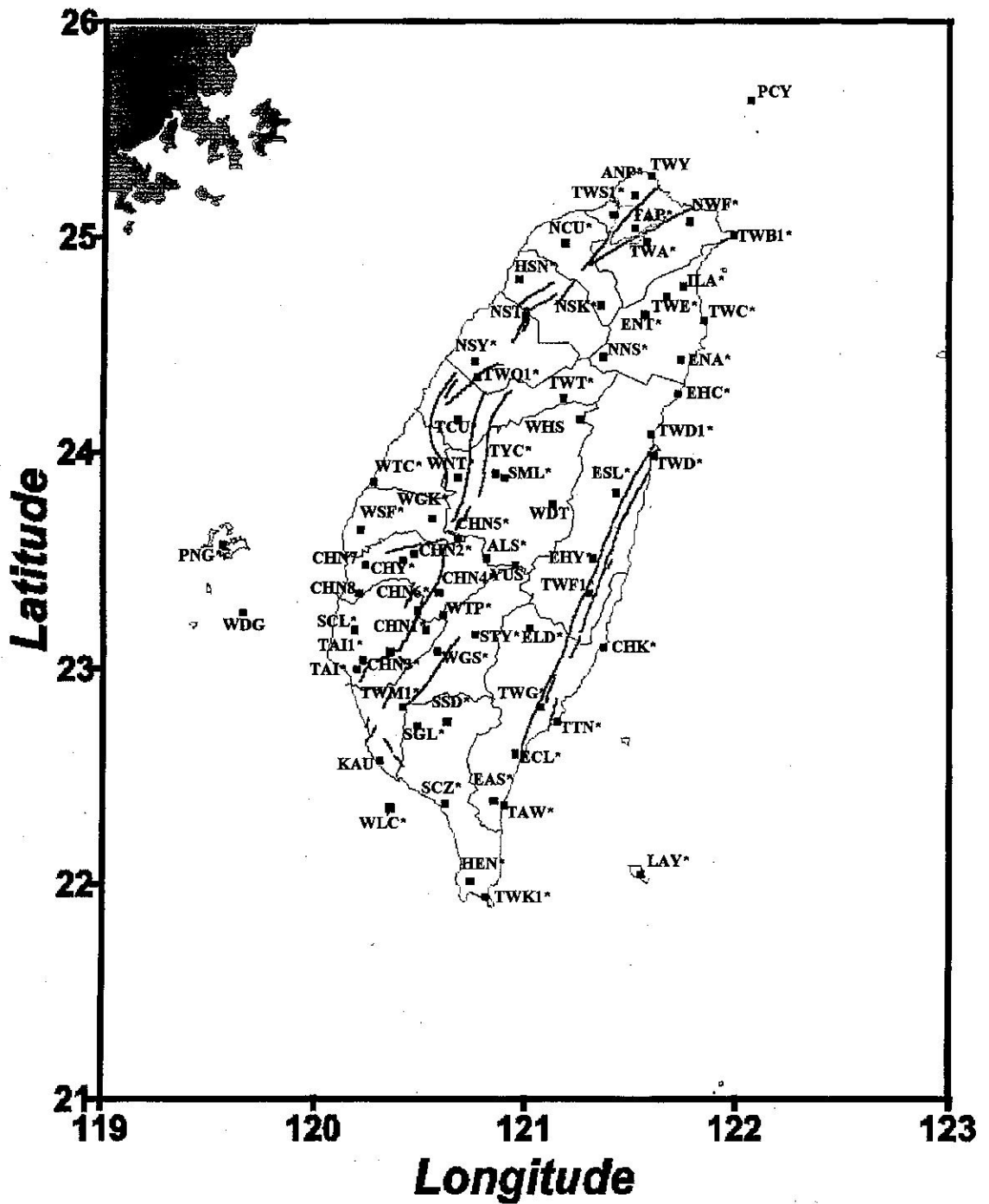
四、主震分析

集集大地震的相關資訊(包括發震時間、震央、規模)在地震發生後二分鐘內計算出(正確時間是 102 秒)，並立即經由台灣地震速報發布系統將資訊傳遞至相關防救災單位。另中央氣象局在地震後 3 分鐘內，利用近乎即時數位化加速度資料及辛(1998)所發展之 PGA 衰減曲線以台灣地區震度分級，畫出初步等震度分布圖，由此圖可快速就最大震度 VI 級區，涵蓋台中、彰化、南投、雲林、嘉義等地，研判可能發生嚴重災害的範圍。地震後的災害調查結果證實此圖正確的反應出地震災害情況。

圖三為比較初步等震度分布圖與利用近一個月時間蒐錄強地動資料繪製等震度分布圖。值得注意的是，強地動資料繪製的等震度分布圖六級震度區在南北有延伸的現象。仔細檢視該南北二個較大震度異常區的強震資料，發現在主震後一分鐘內至少發生三次誘發地震。由於陸續發生的誘發性地震時間間隔甚短，導致主震與三次誘發地震的訊號紀錄皆混合一起，無法清楚辨識，所以誘發地震的詳細位置與大小是很難以一般的測報作業模式計算出。圖四左下角的地震紀錄是主震南邊 32 公里的測站 CHY080 所記錄的強震垂直分量，可清楚判讀出兩組 P、S 波到時。圖四右下角的地震紀錄則是在測站 CHY080 西北方，震央距離同為 32 公里的測站 CHY028 所記錄，所有主震與誘發地震的地震紀錄都混雜在一起，無法清楚判讀兩組 P、S 波到時。圖中左上則是主震北邊 94 公里的測站 TCU095 的地震紀錄，箭頭所指即由 t_s 與 t_p 很短的時間差(約 2 秒)來判斷有一極靠近該測站的地震。同時測站 TCU045、NST 和 TCU047 等皆可找到類似的資料。利用 t_s 與 t_p 的時間差並佐以區域 PGA 分布，研判在南端發生二次誘發地震，分別位於東經

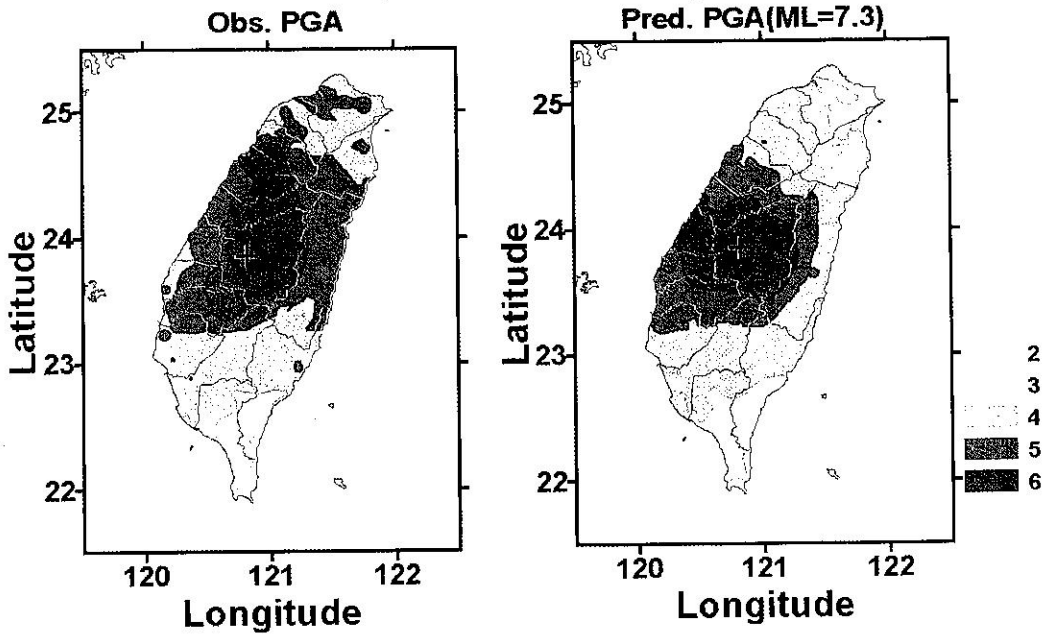


圖一：台灣地區自1900至1999年間地震規模大於6的震央分布。實心圓代表1999年9月21日之前發生的地震震央。星形符號代表該日之後發生的地震震央。



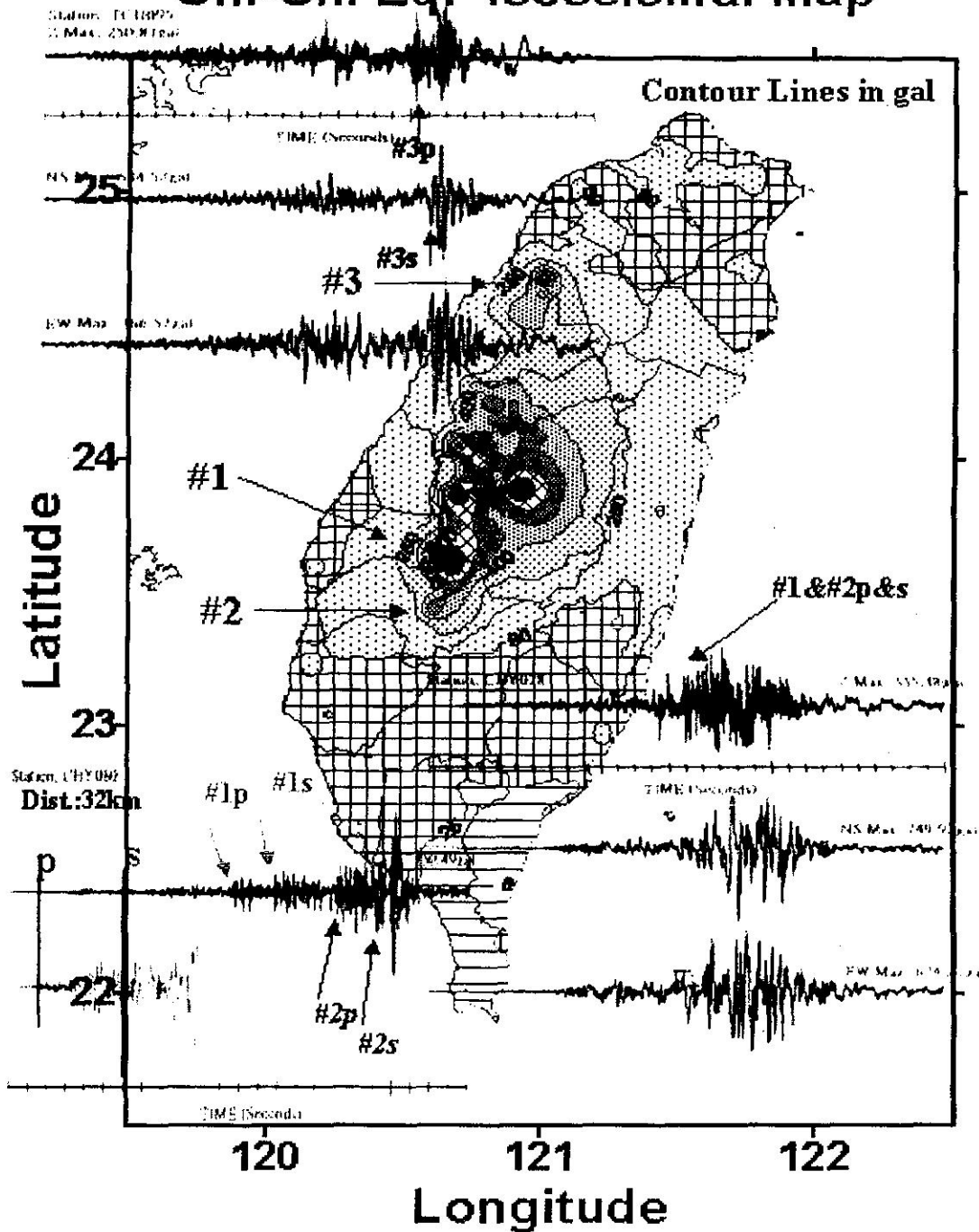
圖二：中央氣象局地震觀測網 73 個測站分布圖。每一個測站備有 3 分量的速度型地震感應器，其中 63 個附有星號的測站，具備即時加速度數位化輸出以作為地震監測作業用。

Comparison of Observed and Predicted Isoseismal Map 1999,0921 Chi-Chi Earthquake



圖三：比較觀測與預估的等震度分布圖。預估等震度分布圖是利用即時加速度資料及 1998 辛所發展衰減曲線於主震發生 3 分鐘內繪出。觀測值等震度分布圖則是由蒐錄所有強震站的資料所繪製，這二者間之差異將於文章中討論。

Chi-Chi Eq. Iseismal Map



圖四：檢視三次誘發地震發生之證據。其分別以#1、#2、#3表示，三組P、S的到時則以箭頭表示。有關三次誘發地震的詳細資訊將於文章中討論。

120.66°、北緯 23.61° 和東經 120.78°、北緯 23.45°，其規模大約 6.0-6.5。這二次誘發地震或可用來解釋在該地區附近所發生山崩及土壤液化的現象。另外一次誘發地震則發生於東經 121.01°、北緯 24.69°，其規模約為 6.0 左右。有關規模則是比較過去相似震央距離且類似淺層地震所記錄地表振動最大值之分布來估算。一次誘發地震所造成區域性最大地動加速度可解釋此地震初步等震度分布圖與餘震分布之間的差異。另外值得注意的是，三次誘發地震的最大強震加速度值都是在強震紀錄的南北分量，有別於主震的最大強震加速度值大部分發生在強震紀錄的東西分量。由此亦可判斷集集大地震與三次誘發地震的震源機制是不同的。進一步利用短週期地震紀錄及強震紀錄的初動來探討主震之震源機制為兩個近乎南北走向，向東傾斜約為 35 度的斷層面 (Dip:35° ; Strike:5° ; Rake:65°)，該組機制與地震後在震源區所作地質勘察破裂露頭及餘震之分布相當吻合。

五、餘震分析

集集大地震之餘震中較大有感、且經強震即時數位傳輸系統 (RTD) 定位之分布如圖五，其餘震分布範圍大約為 30× 100 平方公里。截至二〇〇〇年二月中央氣象局地震測報中心所分析該地震之餘震計超過九千 (其中一九九九年九、十、十一月之資料尚未完成)。將這些餘震及數個較大餘震之斷層面解同時繪於沿北緯 23.8° 之速度剖面如圖六 (上圖以 3D 之 P 波速度構造為底，下圖以 3D 之 S 波速度構造為底)。由於車籠埔斷層是向東傾斜，故大部分餘震都偏於斷層東邊發生。仔細檢視所有餘震分布狀況，車籠埔斷層西側有一群淺層餘震其斷層面解都是正斷層型態，主震之震源區則為逆斷層型態，並可發現一特殊現象，即餘震群分布向東延伸至台灣中央山脈即消失，但在中央山脈東側亦有明顯的餘震群發生，這些餘震的斷層面解都是正斷層型態。相對而言，餘震大

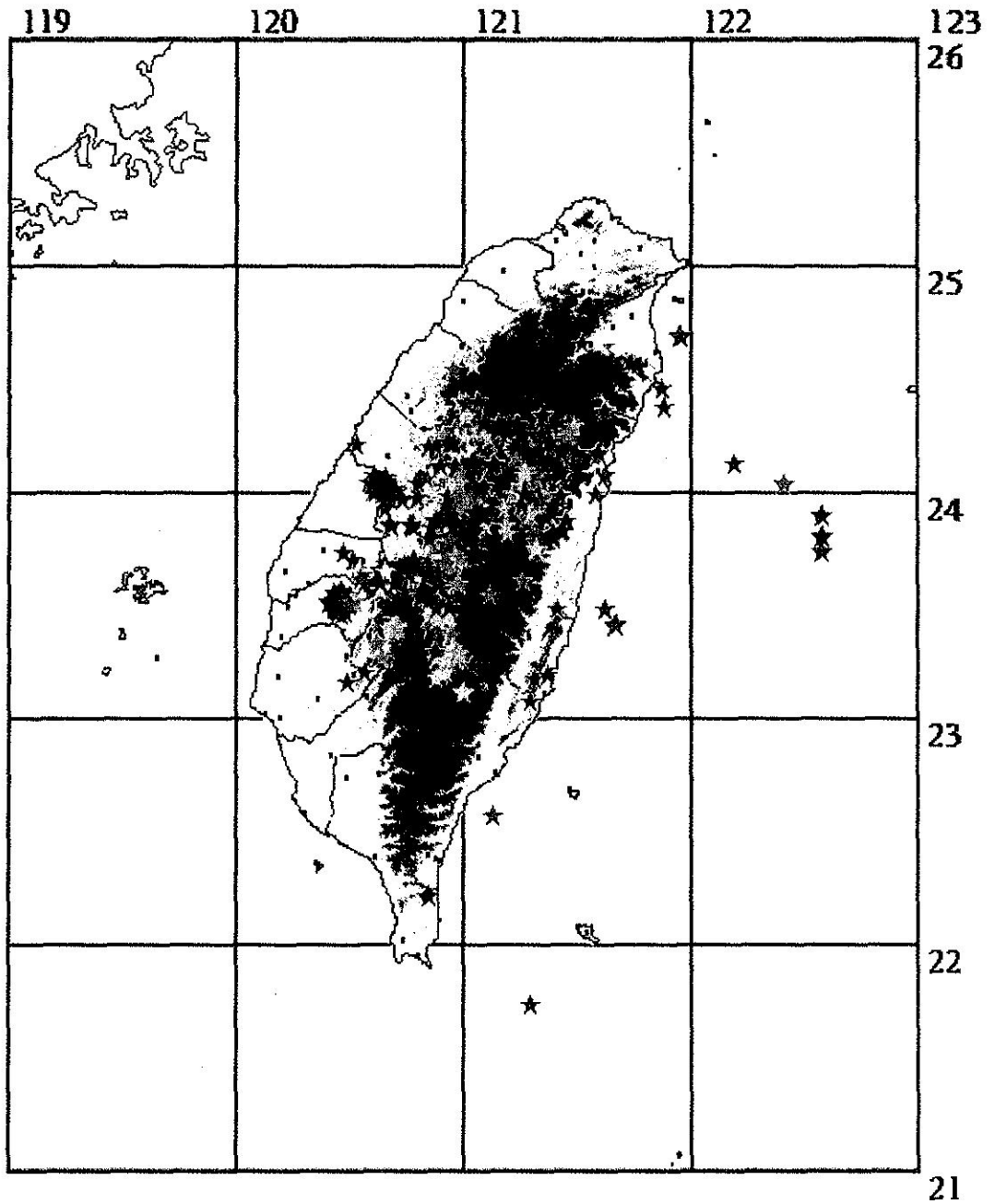
多位於中央山脈西側。其中還發生 3 次規模大於 6 的餘震，而中央山脈東側之餘震規模則較小。此現象可能因中央山脈下部係由相對較柔軟性物質組成，地震能量不易累積，但卻能將能量由中央山脈西側傳遞到東側，形成中央山脈兩側皆有餘震發生。至於發生在中央山脈西側之餘震分布，顯示出非常重要有關破裂與台灣主要構造 (中央山脈) 間之關係，有待累積更多該地區之斷層面解作更進一步之探討。

餘震分布最南及最北兩端是屬於三次誘發地震所造成，由於其震源機制似乎不同於主震源區或相對應之破裂機制，應可歸類為各自不同的獨立地震系列。另外，餘震分布中，密集發生於嘉義地區的餘震應屬於一九九九年十月二十二日，規模 6.4 的嘉義地震所造成。

六、自由場強震資料分析

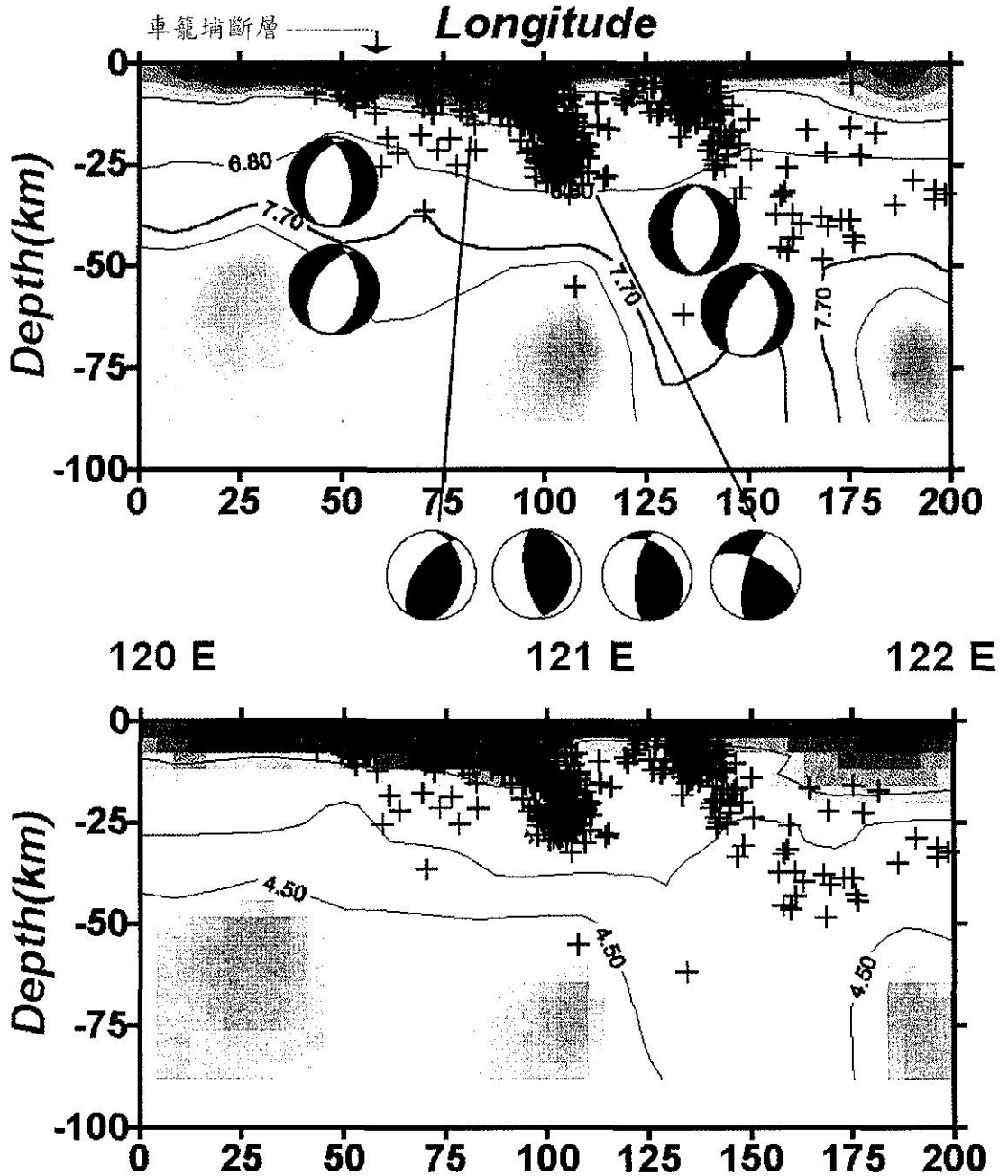
集集大地震發生之後的兩週內，許多震央附近的自由場強震資料都被快速的蒐集，其中兩個測站：TCU129 及 TCU089 所蒐集的東西向最大加速度值皆超過 1G，見圖七。測站 TCU089 水平地震紀錄中有較低頻的訊號，推測可能是因該站位於小丘陵的斜坡上所引起之地質效應。由自由場強震資料所繪製的強震等震度圖中 (圖三)，可看到地表振動沿著斷層線有明顯放大，且斷層上盤的地表振動比下盤更為強烈，資料所顯示，除與地表較嚴重破壞的範圍是一致，並與由初動所解得的震源機制及實際的野外勘查車籠埔斷層區域等都是相符。地表振動之位移可由加速度的記錄，移除全波跡的趨勢項兩次積分而得。圖八是車籠埔斷層最北測站 TCU068 所記錄的強震資料，由上而下分別為加速度、速度、位移的波跡，速度及位移記錄分別由強震資料一次及二次積分所得 (鍾和辛, 1999)。蒐集震央附近的斷層線上的強震資料，即可描繪出斷層附近永久位移的分布圖，如圖九所示。其結果與人造衛星影像所拍攝得之災區的位移分布相當一致。

分析集集大地震沿著車籠埔斷層之永久

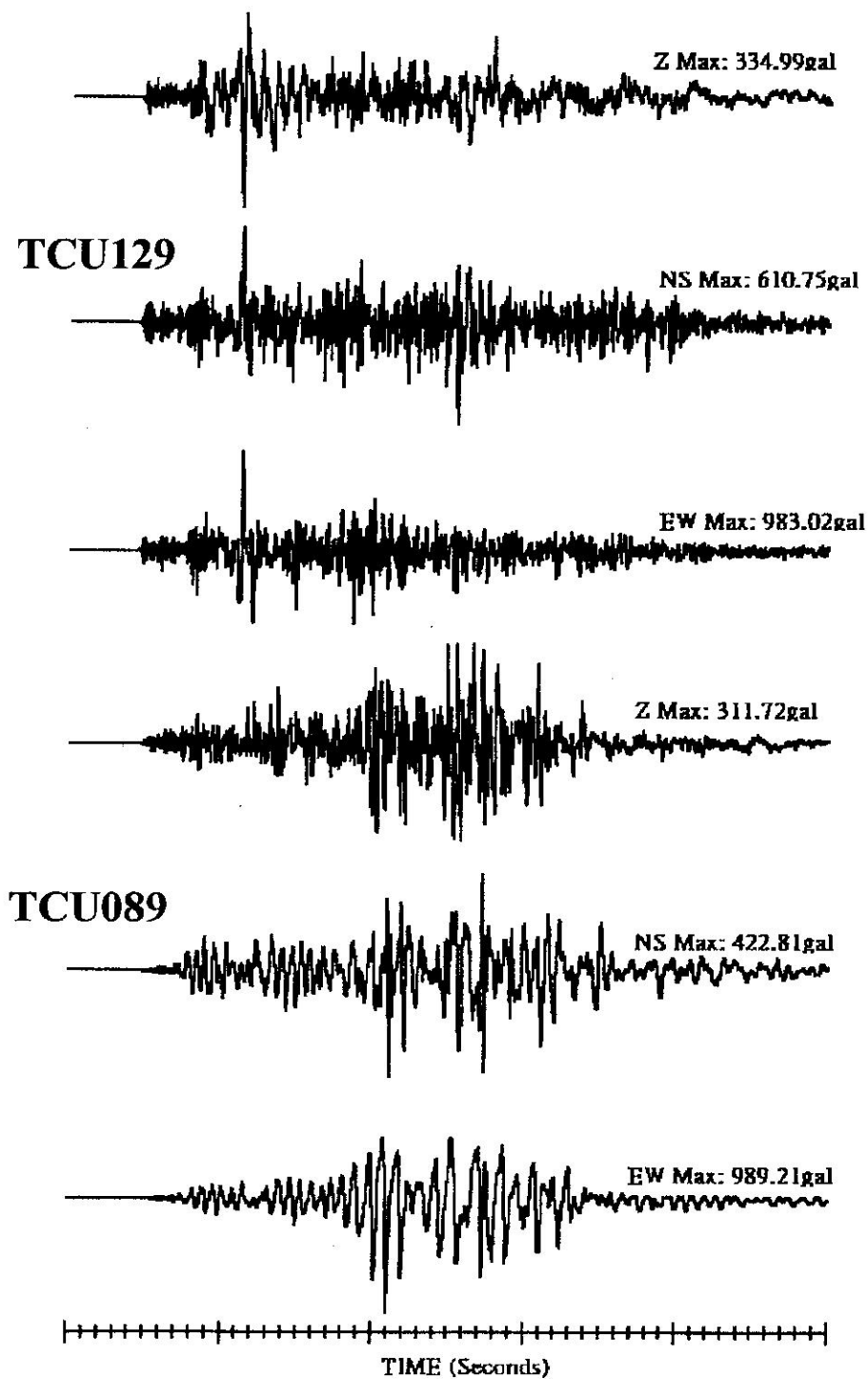


圖五：集集大地震後所發生的有感餘震分布圖。這些地震都是經由強震即時數位傳輸（RTD）系統觸發定位。嘉義地區附近較密集的地震分布是 1999 年 10 月 22 日嘉義地震的餘震。

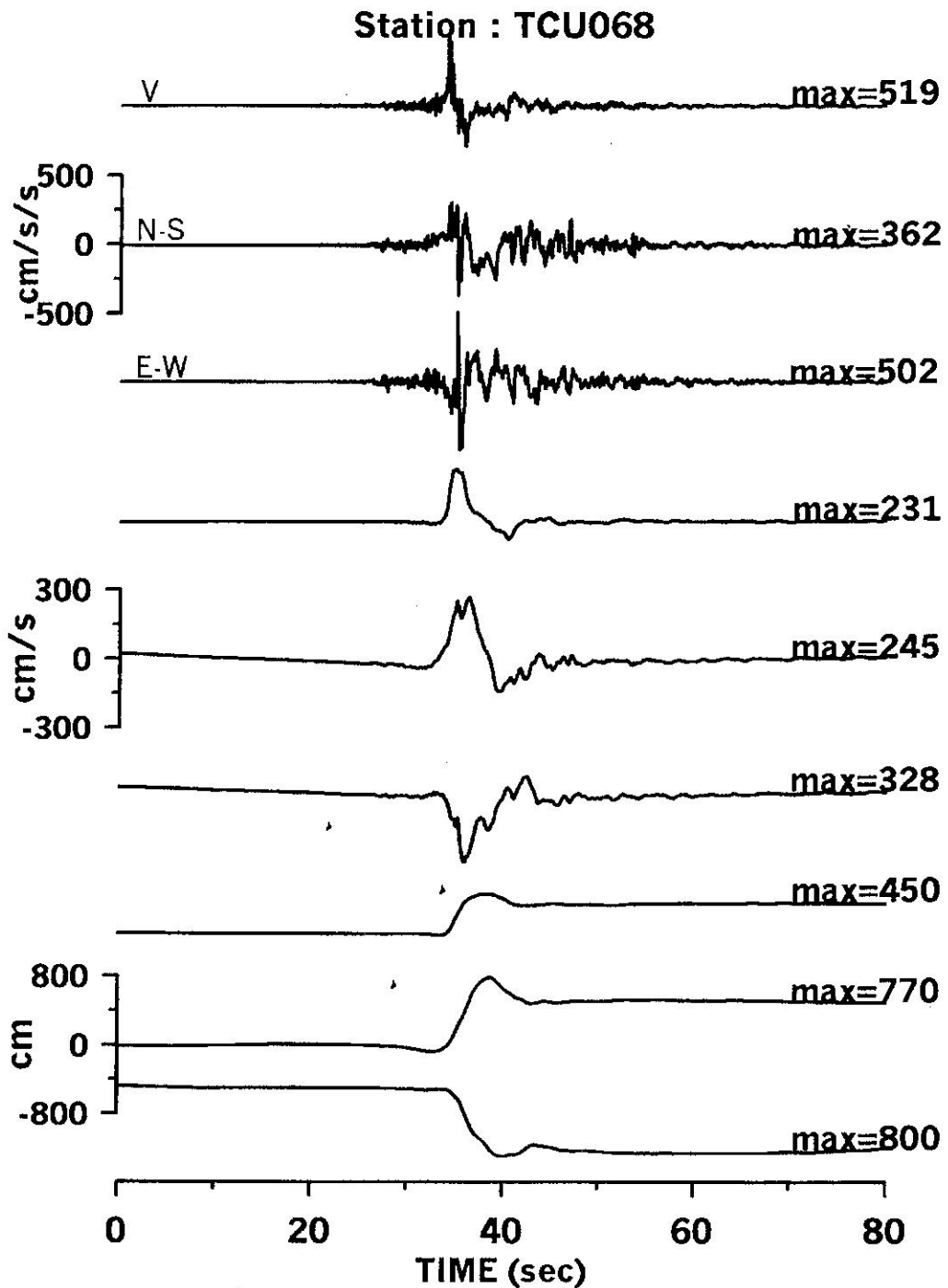
Chi-Chi Earthquake Sequence Along 23.8 N



圖六：集集大地震後餘震剖面分布圖。

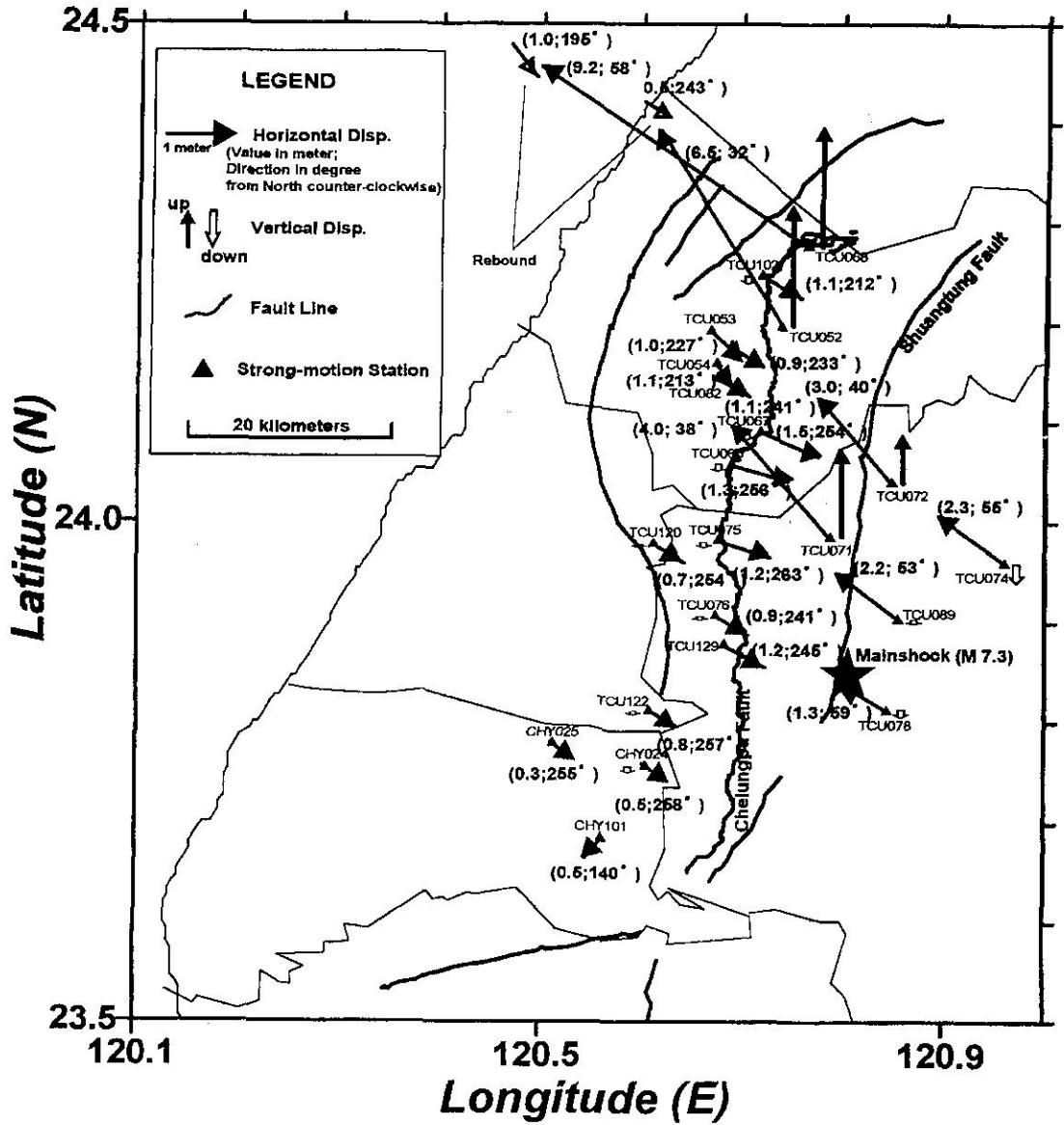


圖七：九二一地震中兩組有最高加速度值（超過 1G）的強震紀錄，其中測站 TCU089 水平成分加速度紀錄有較低頻的現象，應源於測站地質效應。



圖八：強震資料處理的例子。由上而下為測站 TCU068 加速度紀錄再經由積分所得之速度、位移紀錄。

Final Displacement Distribution 21 Sep. 1999 Chi-Chi Earthquake



圖九：向量化永久位移分布圖。整體而言，永久位移分布與衛星影像及野外調查是一致的。括弧裡的兩個數字分別代表水平位移及方向（由北順時鐘方向計算）。另車籠埔斷層的最北端的兩個測站(TCU068 和 TCU052)，用箭頭顯示出彈性回跳的位移與方向。

位移之分布，在斷層最南端向西逆衝，沿著斷層向北移，逆衝量愈來愈大，直至斷層最北端開始轉彎，以致形成平移斷層。亦即斷層錯動方向是由原來的東西向，漸漸變為南北向。進一步發現，其上盤上升量沿斷層線向東遞減，特別是向東至埔里區域時，變成下陷現象。相對地在斷層的下盤也觀察到有向東南下陷運動並呈現遞減。而上盤比下盤有明顯較大的運動量。測站 TCU068 的加速度紀錄經由二次直接積分所得之永久位移量顯示，先有西北方向 9.2 公尺位移運動，然後退回 1 公尺，即達到最後的平衡狀態。類似的位移情形中斷層北端的測站皆可發現（圖八），並以箭頭表示該回彈跳結果。

七、結論

1. 中央氣象局所發展之「台灣地區地震速報系統」，對於台灣島上的地震，有一至三分鐘內即可發布地震消息的能力。其所發布的資訊包括：地震的發震時間、震央、震源深度及等震度分布圖。此等快速發布地震消息能力，在當今世界地震測報工作而言是處於領先地位。此項成果奠定發展強震即時警報系統良好的基礎。中央氣象局發展強震即時警報系統之目標是當台灣東部發生大地震時，在強烈振動未抵達台灣北部及西部都會區以前，藉由該警報系統可提供約 5-10 秒的預警，供重大公共工程進行應變措施。

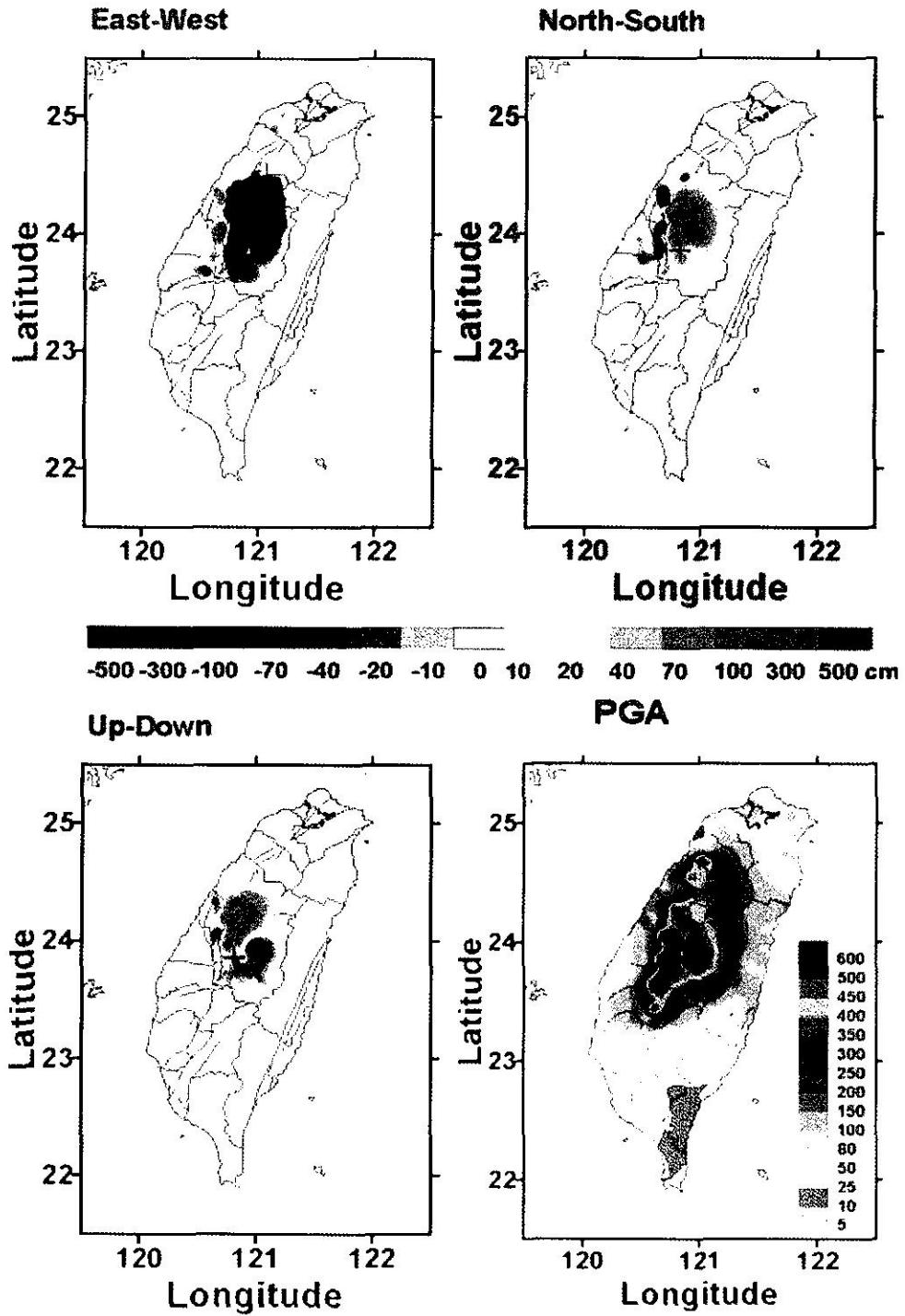
2. 九二一集集大地震的破裂過程比由一般地震測報結果所得複雜，利用台灣地區強震觀測網（TSMIP）所記錄地震資料分析，在主震發生後一分鐘內至少發生三次誘發地震，此結果說明了該地震之等震度圖有南北延伸的現象。而主震其餘震的分布如此廣，與其誘發地震有關。

3. 從自由場強震資料分析所得永久位移，與野外實地調查及衛星遙測的斷層破裂結果是一致的。圖十為集集大地震所造成三向永

久位移分布圖，紅色顯示正向位移即分別向東、北、上，藍色顯示負向位移即分別向西、南、下。主震東南地區雖與車籠埔斷層東邊地區皆有相同西北方向之永久位移，但卻是向下坍塌有別於主震西北地區之舉升，此亦說明集集大地震之宏觀破裂與震源區地殼應變情形。另外，檢視由豐原與東勢間強震測站所推算之永久位移皆存在彈性回跳現象，可解釋該地區複雜的地表破裂。

八、參考資料

- Chung, J.K. and T.C. Shin (1999). Implications of rupture processes from the displacement distribution of strong ground motions recorded during the 21 September Chi-Chi, Taiwan earthquake. Accepted by TAO.
- Lee, W.H.K. and T.C. Shin (1997). Realtime seismic monitoring of buildings and bridges in Taiwan, in "Structural Health Monitoring: edited by F.K. Chang, p. 777-787, Technomic Pub. Co, Lancaster, PA.
- Shin, T.C. (1998). A preliminary study of the earthquake early warning system in the Taiwan area. Meteor. Bull. Vol.42, p. 118-134. (in Chinese).
- Teng, T.L., Y.M. Wu, T.C. Shin, Y.B. Tsai, and W.H.K. Lee (1997). One minute after: strong motion map, effective epicenter, and effective magnitude, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 87, p. 1209-1219.
- Wu, Y.M., T.C. Shin, C.C. Chen, Y.B. Tsai, W.H.K. Lee, and T.L. Teng (1997). Taiwan rapid earthquake information release system, Seism. Res. Letters, Vol. 68, p. 931-943.



圖十：集集大地震所造成三向永久位移分布圖。紅色顯示正向位移即分別向東、北、上，藍色顯示負向位移即分別向西、南、下。右下小圖為 PGA 等值圖，相關標示如圖所示。

SOME SEISMOLOGICAL ASPECTS OF THE CHI-CHI EARTHQUAKE

Peih-Lin Leu, Wen-Chi Hsiao, Tzay-Chyn Shin and Chien-hsin Chang
Seismology Center, Central Weather Bureau

ABSTRACT

The Chi-Chi earthquake is the largest inland earthquake in Taiwan in the 20th century. It caused severe damage in central Taiwan. Three possible induced earthquakes triggered by mainshock are being examined from strong ground motion data. The occurrence of these three triggered events can be used to explain the difference of preliminary isoseismal map issued basing on real-time data and the final one. They can also explain why a wide area of aftershock distribution was observed. On the other hand, the overshoot of ground motion at those stations located near the northern end of ChelungPu fault is probably the reason of complex surface ruptures observed between FengYuan and TungShih.

Keywords: Chi-Chi earthquake, Induced earthquake, Isoseismal map, Overshot