

從臺灣中部地區西部麓山帶的地質構造來看集集地震斷層的特性

陳文山¹、楊志成¹、黃柏壽²、陳于高¹、石瑞銓³、李元希⁴

張徽正⁴、黃能偉¹、林清正¹、宋時驊¹、李昆杰¹



1. 台灣大學地質科學系
2. 中央研究院地球科學所
3. 中正大學地球物理研究所
4. 中央地質調查所

節要

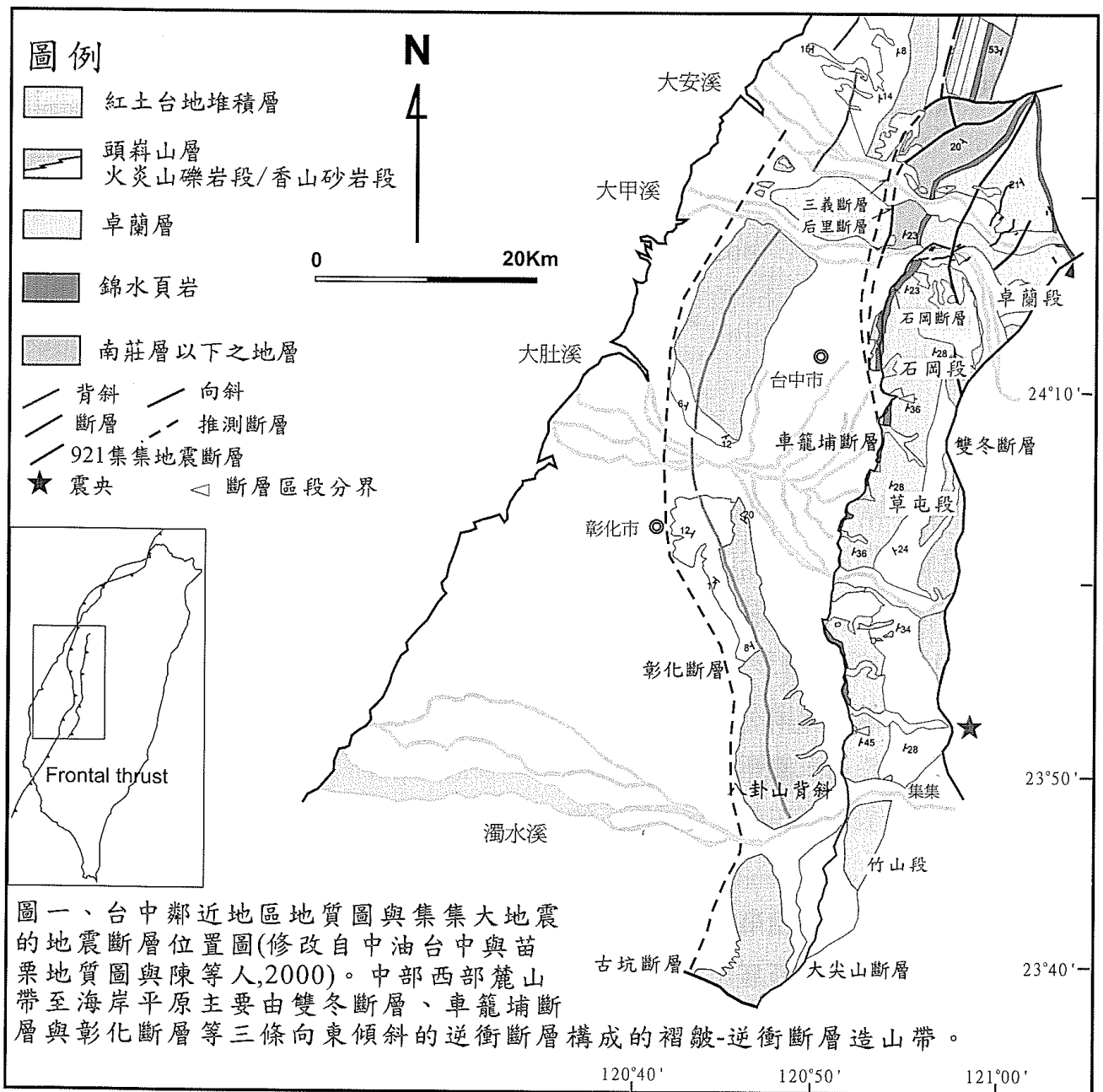
921集集地震所形成的地表斷裂，主要沿著車籠埔斷層（大尖山斷層）與石岡斷層跡分布，而在石岡—卓蘭地區形成地表淺處的褶皺變形與小區段的斷層。從地震模擬結果顯示，在卓蘭—石岡地區的地下沿著三義斷層可能有位移產生，但並未表現於三義斷層跡附近的地表。

震源區的構造環境屬於逆衝斷層構成的褶皺造山帶，從斷層面上具有巨大面積的凸起體的原因以及GPS的資料所呈現地表變形資料來看，本文作者推測地震的震源是發生在車籠埔—三義斷層的斷坡上。GPS資料顯示在斷層上盤寬約5—20公里的地帶呈現地表隆起的現

象，而在隆起區的東側則呈現下陷，下陷區應是位於脫底斷層之上的構造環境。從921集集地震的資料來看，逆衝斷層的斷坡構造是在造山帶地區醞釀大地震的主要震源區之一。

前言

921集集地震形成長約80公里的地表逆衝斷層，以及在卓蘭—石岡地區形成寬約20公里的地表變形帶（圖一）。陳等人（2000a）依照地表破裂的形態與地表地質的特性將地表破裂帶劃分為4個斷層區段（segment），由南至北為竹山段、草屯段、石岡段與卓蘭段。這些區段大都以一右移的平移斷層為分界。作者雖已針對上述的地震斷層區段對比至現今



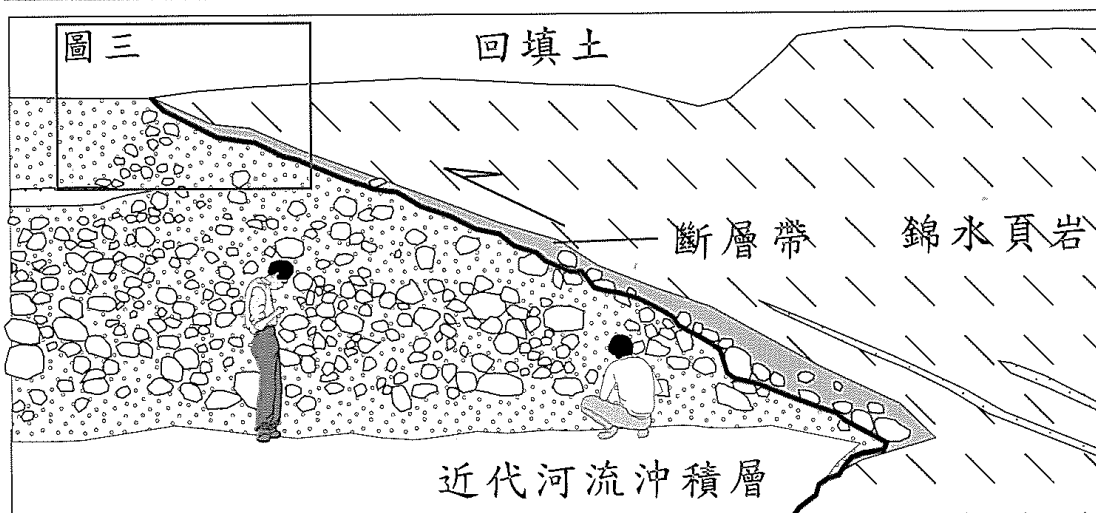
圖一 台中鄰近地區地質圖與集集大地震的地震斷層位置圖（修改自中油台中與苗栗地質圖與陳等人，2000）。中部西部麓山帶至海岸平原主要由雙冬斷層、車籠埔斷層與彰化斷層等三條向東傾斜的逆衝斷層構成的褶皺－逆衝斷層造山帶。

地表的斷層，竹山段為大尖山斷層，草屯段為車籠埔斷層，石岡段為石岡斷層（陳等人，2000b）。地震後一年來，已有許多相關集集地震論文相繼發表，絕大部份論文所敘述的地震斷層都是以車籠埔斷層稱之。作者認為集集地震所造成的地表斷層應不僅是車籠埔斷層而已（陳等人，2000b），而是涵蓋了上述其他的兩條斷層。假如無法釐清地震是與那些斷層的作用有關，未來將會造成在解決集集地震問題上的偏差與誤解。因此，本文將詳細描述上述斷層的特性，以及從目前已發表的各種地震、震測與全球衛星定位系統（GPS）的資料來探討各區段地震斷層的特性，並探討形成集集地震的構造環境。

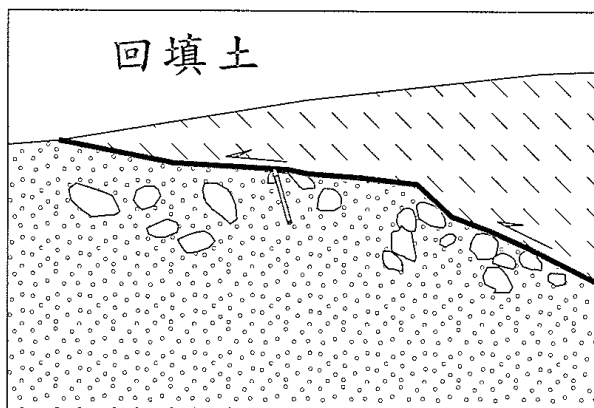
地質構造

台中鄰近區域沿麓山帶前緣的主要斷層，從南至北計有大尖山斷層、車籠埔斷層、三義斷層、后里斷層與石岡斷層。其中車籠埔斷層、大尖山斷層與三義斷層是與形成台中前陸盆地的主要斷層。此地區前陸盆地約形成於晚上新世（3Ma），此時構成台中前陸盆地的主要

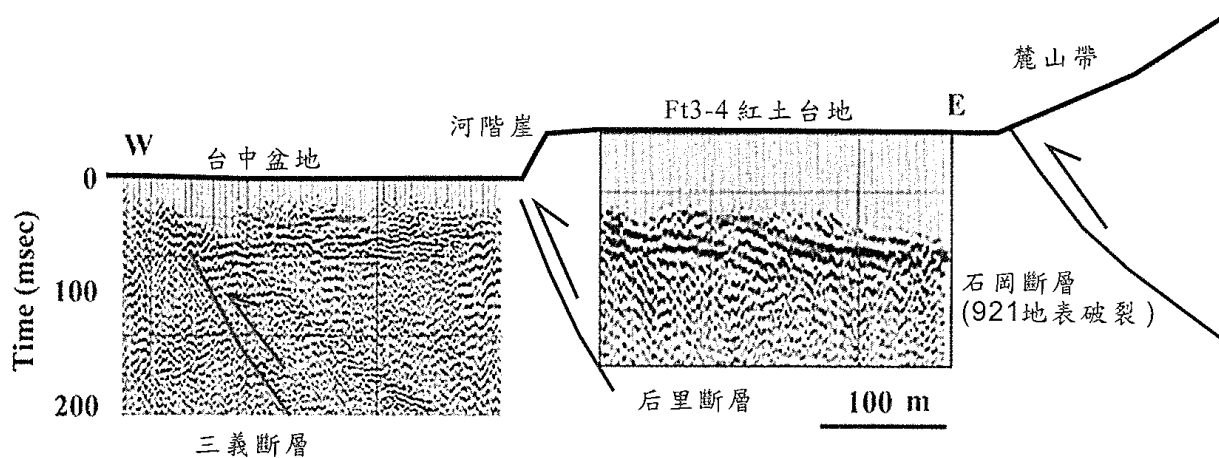
斷層是雙冬斷層（陳等人，2000a）。中期更新世之後（約0.7Ma），前陸盆地向西遷移，並於雙冬斷層的前緣（西側）形成另一新的逆衝斷層，即大尖山斷層、車籠埔斷層與三義斷層，並於斷層的前緣形成台中前陸盆地。之後（約0.5Ma），斷層再向西遷移產生彰化斷層，台中前陸盆地轉變為現今的背負盆地（piggyback basin；陳等人，2000a）。台中前陸盆地是一呈南北走向與造山帶平行的盆地，沈降中心主要位在太平—草屯地區。晚上新世以來，前陸盆地的沈積物厚度超過4000公尺（Chang，1971）。當造山帶前緣斷層（frontal thrust）向前躍進形成另一逆斷層時，後側（東側）前陸盆地的沈積層就被褶皺抬升形成山脈，部份的前陸盆地繼續形成前陸盆地。因而在前期的演化過程中，台中盆地南北兩側的前陸盆地逐漸的褶皺隆起。僅有位在台中地區的前陸盆地繼續發育並在彰化斷層形成之後轉變為背負盆地。因而，大尖山斷層與部份的三義斷層已經不是屬於盆地與山脈的邊界斷層，僅有車籠埔斷層與部份的三義斷層是位在現今背負盆地與褶皺山脈的邊界。而集集地震的地表破裂就是沿著大



圖二 集集地震之前的車籠埔斷層露頭，位在太平北溝河床。錦水頁岩逆衝在近代河床沖積層之上，斷層帶寬約10公分的泥，夾有下盤的礫石，斷層面角度約向東傾30度。



圖三 集集地震時斷層再次沿著錦水頁岩與沈積層的界面移動。上盤的錦水頁岩向前位移約2公尺。

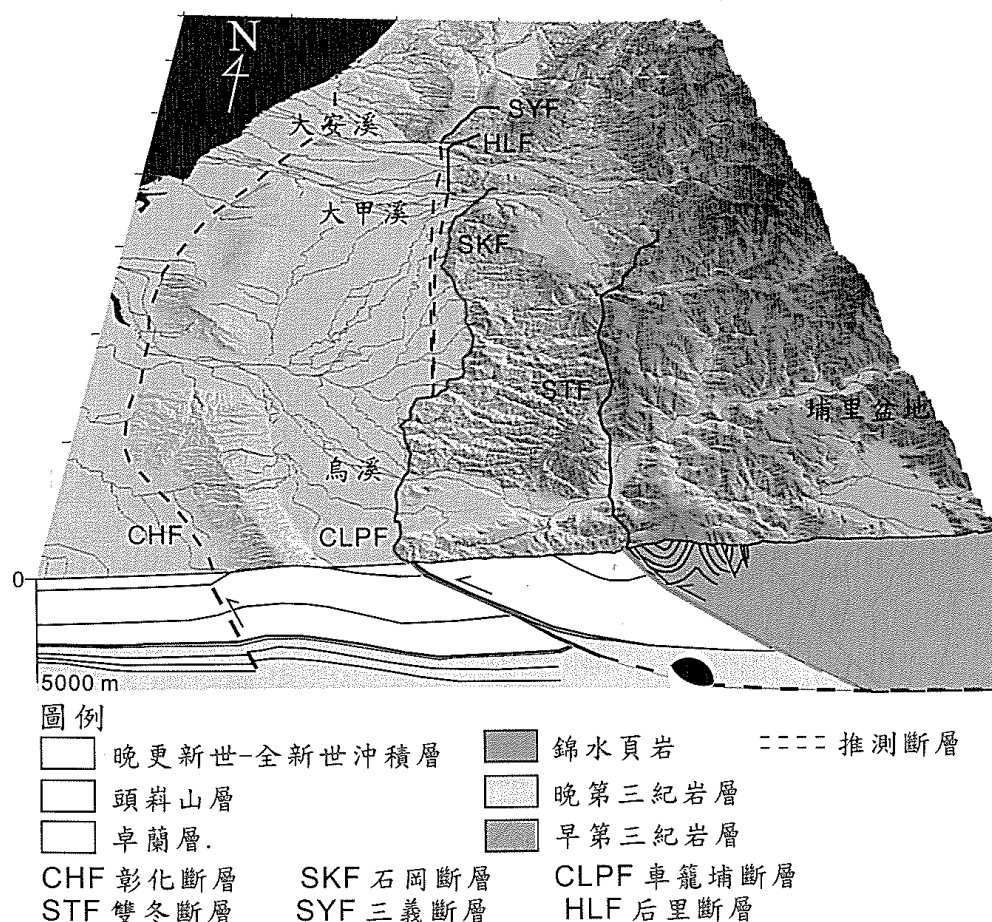


圖四 淺層震測剖面位在台中大坑北側的日月山莊，有依震測的結果顯示台中盆地之下（接近台3甲公路）有一斷層構造，東側的紅土階地崖下有另一斷層，表示階崖是屬於斷層崖的地形。921地震斷層則位在現今麓山帶與紅土階地的交接處。這兩條斷層似乎可對比至大安溪與大甲溪出露的三義與后里斷層。

尖山斷層、車籠埔斷層與石岡斷層活動。以下先就針對鄰近區域的斷層作一描述，再與地震斷層比對討論。

大尖山斷層－車籠埔斷層：大尖山斷層為一逆斷層，向南延伸與觸口斷層相連，並在竹山地區截穿紅土台地與未

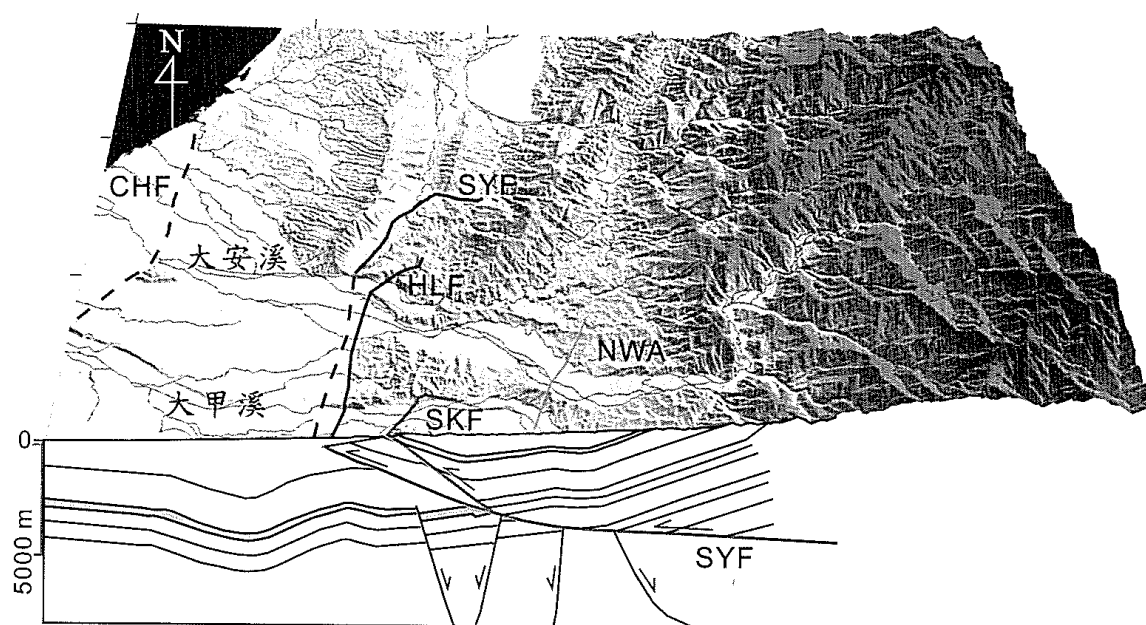
紅土化階地（Bonilla，1975；Hsu and Chang，1979；楊，1986）。斷層的上下盤岩層屬於頭嵙山層，向北延伸經濁水溪則稱為車籠埔斷層，從名間至南投市以東的坪林溪（霧霜），斷層上盤為晚上新統的錦水頁岩，下盤為出露於八卦台



圖五 地下剖面引用邱（1971），此剖面原位在烏溪的東西向震測剖面。埔里盆地以西的車籠埔斷層應位在逆衝斷層的斷坡構造，以東地區屬於斷構造（脫底斷層）。集集地震可能發生在車籠埔斷層的斷坡之上，主要的地震斷層就是斷坡之上的岩體向前逆衝移動時造成的地表破裂。

地的頭嵙山層火炎山相礫岩（時代為中期更新世；陳等人，2000a）。作者將霧霜以南的地震斷層稱為竹山段（陳等人，2000b）。車籠埔斷層從霧霜以北至太平市的草湖溪，上盤亦為錦水頁岩，下盤為現代沈積層與第四紀岩層（何，

1959；Meng，1963）。太平市東側的北溝溪河床中可以發現錦水頁岩逆衝到全新世的河階之上（圖二，楊，1997），地震斷層當時亦沿著此斷層面再次的向上逆衝（圖三）。作者將此區段的地震斷層畫為草屯段（陳等人，2000b）。



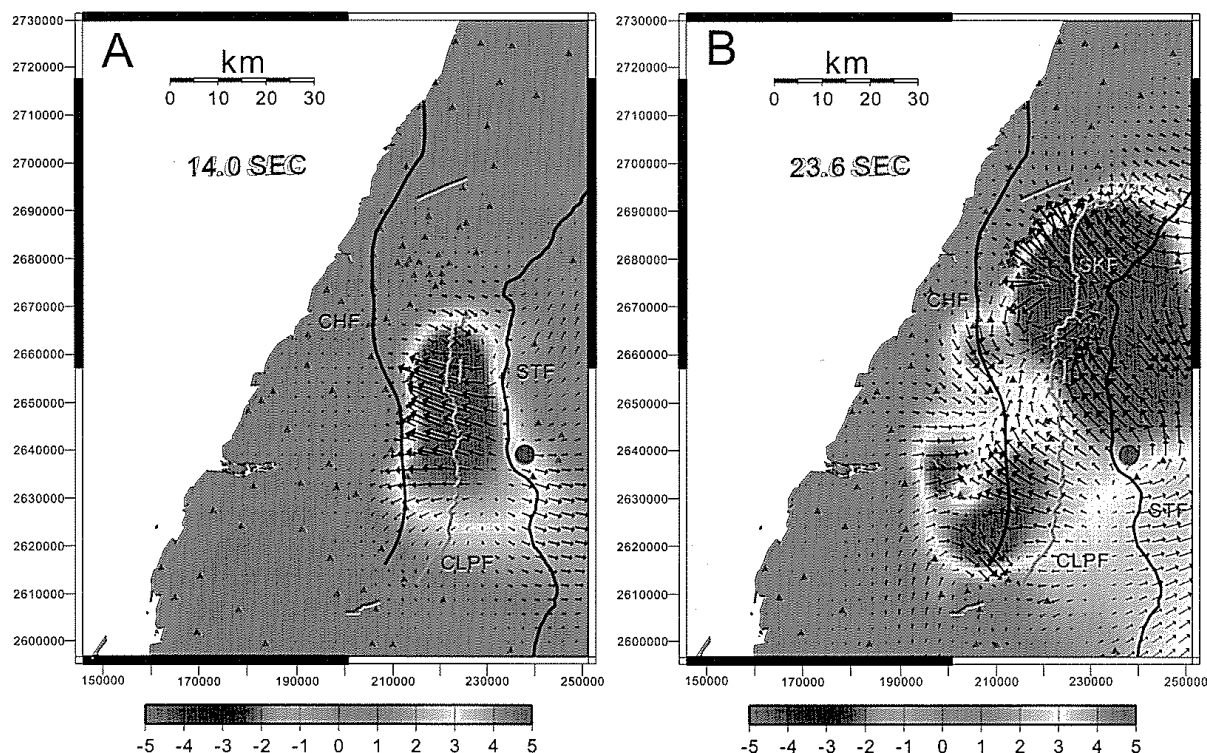
圖例

□ 頭嵙山層 □ 卓蘭層 ■ 錦水頁岩 □ 晚第三紀岩層

=== 推測斷層

CHF 彰化斷層 SYF 三義斷層 HLF 后里斷層 SKF 石岡斷層
NWA 內灣背斜

圖六 地下剖面引用洪等人（1993），此剖面原位在大安溪的東西向震測剖面，若延伸至大甲溪時，其構造大致相符。921地表破裂帶就沿著石岡斷層，斷層下盤皆屬於錦水頁岩，此地區的前陸與前緣的背負盆地的接觸是三義斷層。本文認為石岡斷層僅是三義斷層上盤之中的分枝斷層，石岡斷層向下延即可與三義斷層相接。



圖七 (A)強地動震波模擬結果表示在14秒時地表的變形位在南側（車籠埔斷層），地表的變形位移方向為北偏西約70~90°。(B)23.6秒（16秒之後）地表變形逐漸轉移至北側（石岡斷層），地表變形位移方向為北偏西約30~45°。

三義斷層：此斷層主要出露於苗栗三義，斷層上盤為晚中新統東坑層，下盤為頭嵙山層。依據中油台中圖幅，三義斷層向南伸展至大安溪以南就掩埋在現代沖積層之下，延伸至后里台地時被紅土階地礫石層所覆蓋。張（1994）將出露在大甲溪北岸，鐵路隧道東側出露的逆斷層劃為三義斷層。陳等人（2000b）則認為三義斷層應位在鐵路隧道的西

側，大致如同中油台中圖幅所推測的位置；並認為隧道東側的斷層非為三義斷層，僅為三義斷層的支斷層，並命名為后里斷層（陳等人，2000b）。此斷層的上下盤的岩層皆為晚中新統的東坑層，后里斷層只是屬於層間滑移的逆斷層，並從河階地形的比對顯示此斷層的垂直位移量僅有170公尺，並非如同三義斷層有巨大的層位位移量。三義斷層向南延

伸至大甲溪以南則被台中盆地的沖積層所覆蓋，出露位置不明。從豐原至太平市的山麓最西緣所出露岩層為錦水頁岩顯示三義斷層尚位在平原之下。地震時沿三義斷層的位置並未產生地表的破裂或變形。其活動性可以從被紅土台地覆蓋且未形成錯移的現象來看，顯示三義斷層早在晚更新世已沒有活動（陳等人，2000b）。此外三義斷層被掩埋在台中盆地東側的沖積層之下，其地表地形特徵也沒有任何顯見的突起地形，表示三義斷層長期以來已經沒有活動的跡象。

后里斷層：此斷層僅出露於大甲溪的北岸，后里台地的最東側，上下盤的岩層皆為東坑層。此斷層為一逆衝斷層，將后里台地的東側隆起，形成一向西傾斜的紅土台地，高度從河床比高為20公尺抬升至床比高為190公尺。此斷層向南延伸同樣被沖積層覆蓋，位置不明，但依地形特徵判斷可能位在豐原至太平之間山麓前緣紅土化階地的西緣台地崖之下。

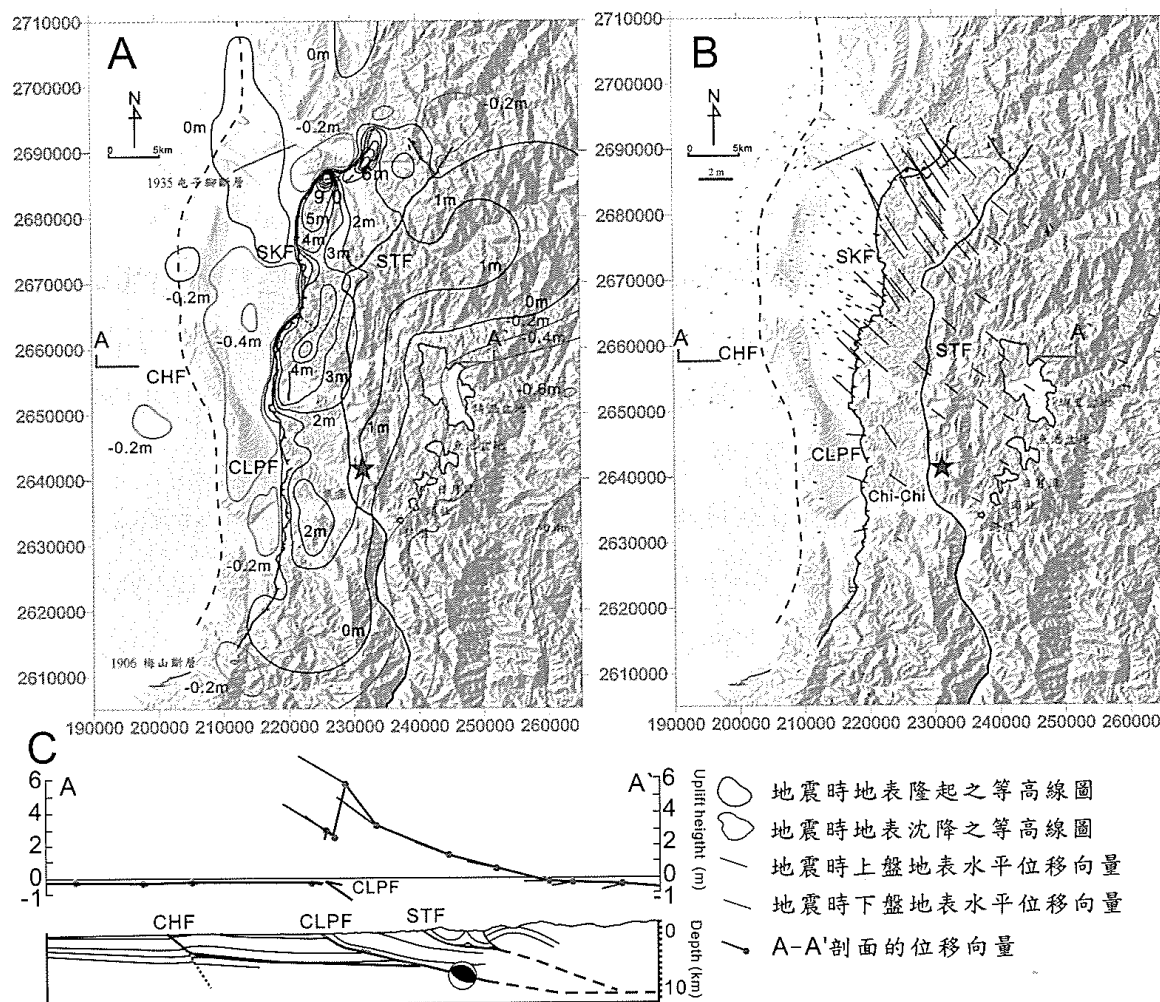
石等人（Shih *et al.*, 2000）於台中潭子地區從平原至山麓做淺層震測研究，發現位在山麓前緣的紅土台地西側之下

有一逆斷層存在，以及位在台地西側的平原之下另有一條斷層存在（圖四）。淺層震測結果與作者原所推測（陳等人，2000b）三義與后里斷層的位置相當吻合。本文認為位在最西側的是三義斷層，位於紅土台地之下的是后里斷層，地震斷層（石岡斷層）則位於台地東側與山麓相接處。

石岡斷層：作者將此次位在北段的地震斷層命名為石岡斷層（陳等人，2000b）。石岡斷層在地震斷層的分段是屬於石岡段，斷層從太平市草湖溪至石岡壩西側，斷層位置是沿著三義斷層上盤的錦水頁岩之中向西北逆衝。從石岡斷層兩側的河階地形來看，上盤發育有3階的未紅土化階地，下盤地區則未發育階地；上盤地區形成5階的紅土階地都比下盤的紅土階地高出50公尺，顯示石岡斷層早已形成，且形成於未紅土化階地Ft3沈積之後，至今上盤的地塊約抬升50公尺（陳等人，2000b）。

地震斷層的特性 $\geq 7-8.0$

從上述斷層的特性了解，此次地震斷層的活動是沿著台中背負盆地東緣的



圖八 (A) 地震時斷層上盤地表升降高度變化之等高線圖。(B) 上下盤地表水平位移向量圖。(C) A-A'震測剖面來上盤地表抬升地區正是位於車籠埔斷層的斷坡之上。

主要斷層－車籠埔斷層，以及三義斷層上盤之中的石岡斷層以及南側的大尖山斷層活動。從地震斷層的地表構造特性來看，大尖山斷層（竹山段）移動方向大致為北偏西 80° － 90° ，傾角約 40° 向

東，南側的大尖山斷層則呈現右向的平移斷層作用。車籠埔斷層（草屯段）的斷層移動方向大致為北偏西 70° － 90° ，傾角約 30° － 40° 向東。石岡斷層（石岡段）的斷層移動方向為北偏西 35° － 40° ，傾角

約 30° 向東；卓蘭段以背斜軸的軸向來看主應力方向約為北偏西 40° （陳等人，2000b）。卓蘭段地區是以地表褶皺變形為主，形成一個主要的背斜構造，以及背斜兩翼形成逆斷層與背向的逆斷層。

從斷層的性質來看，大尖山斷層與車籠埔斷層的斷層面是沿著錦水頁岩作為逆衝的滑動面，車籠埔斷層下盤的岩層主要為近千公尺厚的晚更新世至全新世的疏鬆砂礫層，之下為頭嵙山層與卓蘭層（圖五）。從台中盆地的井下資料來看第四紀岩層厚度約4000公尺以上（Chang，1971）。但台中盆地的北側（太平市以北）位於背負盆地之上的主斷層是三義斷層；地震時三義與后里斷層並未發生地表破裂。地震斷層的地表破裂是沿著上盤的錦水頁岩滑動，即沿著石岡斷層活動（圖六）。三義斷層與車籠埔斷層大致在草湖溪口由一條西北走向的右向斜移斷層所截切。從構造與地層關係來看，斜移斷層可能是位在斷坡（ramp structure）斜面之上的一個西北走向的右向斜移斷層。

地震時卓蘭段是形成大區域的地表褶皺變形，沿著內灣背斜構造再次產生褶皺並於背斜的兩翼形成逆斷層與背衝

的逆斷層構造。這些逆斷層構造應只限於地表淺處的破裂，但在地表深處可能沿著某一斷層滑移。從遠震逆推的模擬（inversion of teleseismic data）結果亦認為於地下約10公里之上的斷層面有位移的現象（Lee and Ma，2000）。因此，位在卓蘭段的地下可能有斷層活動的現象。本文認為此地下斷層可能是位於三義斷層，因為內灣背斜兩翼的逆斷層皆是褶皺作用造成地表淺處的斷層現象，從震測剖面可以發現此地表斷層沒有延伸至地下深處（Hung and Suppe，2000）。因此，地下約數公里至10公里處的斷層活動，推論可能是沿著三義斷層的斷層面活動。因為，當地表地殼壓縮變形時，深處岩層也會隨著產生變形，而變形作用可能造成上方的岩層沿著某一逆斷層面滑移，只是當斷層在地下滑移時破裂面未延伸至地表罷了！至於三義斷層為何沒有產生地表斷層活動，此乃另一延伸的問題，有待更多的資料來探討。從紅土階地與三義斷層的關係可以清楚的看出三義斷層在L t 5紅土階地形成之後已不再活動（陳等人，2000b）。因此，從斷層與階地的關係來看，顯示於晚更新世以來，形成台中盆地東側

的山脈前緣斷層，三義、后里與石岡斷層的形成與活動有逐漸向後側（東側）退移的現象（out-of-sequence）。

討論 30-32

本文從地震斷層的地表特性與地層的關係，將地震斷層的各區段歸納對比至數條斷層，其中以車籠埔斷層與石岡斷層的地表破裂特性差異較大。以下就從地質與地球物理的特性來討論它們的差異性。從地表的破裂性質來看，車籠埔斷層與大尖山斷層呈現向西逆衝的作用，石岡斷層是一朝西北向的左向斜移逆斷層。石岡斷層是沿著錦水頁岩層間滑移的逆斷層，其活動時間可能是在全新世。

強地動震波模擬（seismic wavefield from strong motion）結果顯示地表的破裂形式，地震初動前16秒的地表破裂主要從南側開始，是沿著車籠埔斷層與大尖山斷層破裂。之後，地表破裂才延伸至北側，即石岡斷層與卓蘭地區的地表變形（圖七）。高與陳（Kao and Chen，2000）分析主震時將主震分為5個次地震事件（earthquake subevent），依次順時針

由南向北發生地震；亦顯示地震的活動的序列似乎是由南向北。初動前16秒的地表破裂主要沿著車籠埔斷層作用，斷層位移大致朝正西的移動與地震斷層帶量測的結果相似。16秒之後，地震震央移至北側發生造成石岡斷層的地表破裂，其上盤的地塊朝向西北移動與地表量測結果相似為北偏西 $35^{\circ}-40^{\circ}$ （圖七）。但是南段的位移方位無論是地表量測或是強地動的震波模擬結果都顯示與地震之後GPS資料（土地測量局，2000）所量測結果有所差異，GPS的結果為北偏西約 $60^{\circ}-70^{\circ}$ ，與斷層帶上所量測為 $70^{\circ}-90^{\circ}$ ，相差約 $10^{\circ}-30^{\circ}$ 。本文認為從地表破裂的時序，可以解釋為何車籠埔斷層破裂帶上所量測的斷層位移向量結果與GPS量測結果有所不同（圖八）。地震發生的初期（約16秒之內）車籠埔斷層朝西逆衝，因此在地震斷層帶量測的結果大致為朝正西的移動。16秒之後，地震活動移至北段，上盤地塊向西北逆衝。此時可能造成南側車籠埔斷層上盤地塊也同時被拖移朝向西北移動，而使原本朝西的移動向量再加上朝西北移動向量，造成地震之後的GPS量測的結果為北偏西 $60^{\circ}-70^{\circ}$ 。

地震斷層是否為兩條不同的斷層，從遠震逆推模擬結果顯示，南北兩側斷層面之上所形成的凸起體（asperity；亦可能在斷層面上形成摩擦阻力較大的區域）的特性極為不同，南側形成小區域的凸起體現象，北側在斷層面上則形成一個大面積的凸起體（Lee and Ma, 2000）。其分界大致位於車籠埔斷層與石岡斷層的交接處。從上述分析的各種主震特性來看，顯示南北兩側的斷層活動與斷層面性質似乎有極大的不同。斷層面形成凸起體的原因是在地震發生之前，因某些因素造成在斷層面形成摩擦阻力較大的區域，因此形成應力集中現象。此種因素如不平整斷層面的凸起處、斷層面岩性（摩擦係數較大）或斷層帶的孔隙水壓等等皆可以造成凸起體的現象（Ruff, 1992）。從集集地震斷層來看，目前尚無法了解斷層面的孔隙水壓以及摩擦係數等各種問題。若單純從構造觀點來看，或許可以推論形成凸起體的可能解釋。西部麓山帶是薄皮的逆衝斷層（thin-skinned thrust）作用形成的構造帶，經由多次逆衝斷層作用形成覆瓦狀的褶皺山脈（Suppe, 1981）。震測剖面可以發現在車籠埔斷層以東地區，

地下形成一向東傾斜約 30° – 40° 的斷坡構造（ramp structure）（Chiu, 1971；Suppe, 1986）。逆衝斷層構造系統中斷坡是較陡的斷層面，因而在擠壓過程中欲使斷層產生移動時必須形成較大的正應力才能克服斷坡上的摩擦力（剪應力）。在地震發生之前，斷坡面上就會形成較大的應力集中現象，因而斷坡面上也就會形成凸起體的現象。所以，在褶皺逆衝帶的構造環境中，斷坡面都會引發較大規模的地震（Shaw and Suppe, 1994）。本文認為集集地震中形成的凸起體的區域，大致就是位在車籠埔斷層與三義斷層的斷坡構造。

從GPS資料（資料來自土地測量局網站）也可以探討斷坡構造存在的位置。GPS資料顯示地震斷層的下盤主要呈現下陷的現象，斷層上盤寬約5–20公里的區域呈現地表抬升的現象，抬升最大的區域大致在較接近地震斷層的區域，愈向東則抬升量愈小。抬升區以東則呈現沈降的現象，大致位於雪山山脈（埔里盆地地區）（圖八）。地震當時地表呈現升降的現象是與地殼的變形有關，震央區是位在褶皺逆衝帶的構造環境，且集集地震是屬於逆斷層形態，因此地

震之後地表的變形可能與逆衝斷層活動有密切關係。逆衝斷層的結構可以分為斷坪—斷坡 (flat-ramp) 以及斷坡以下的脫底斷層 (detachment)。斷層作用時，上盤岩層沿著斷層面向前移動，斷坡以上的岩層除了向前移位之外還沿著斷坡向上有抬升現象。因此，斷坡以上的岩層在地震當時除了產生側向移動之外，還在近斷層的地塊產生向上極大的位移。從阿爾卑斯山 (Jouanne *et al.*, 1995) 與喜馬拉雅山 (Jackson and Biham, 1994) 地區GPS的長期測量結果來看，在逆衝斷層的斷坡構造之上的地塊都顯示有快速隆起現象，而位在脫底斷層之上以及在逆斷層之前的前陸盆地都呈現下陷現象 (圖八)。因此，從集集地震當時所顯現瞬間的地表升降結果，本文認為在上盤的隆升區是位在逆衝斷層的斷坡構造之上的地塊，東側的沈降區則是位在脫底斷層之上的地塊。此結果與震測剖面的斷坡位置非常吻合。東側沈降區的構造可能呈現張裂形態的活動，從高與陳 (Kao and Chen, 2000) 的主震層序解析結果亦可以發現其中S5地震是呈現張裂形態的作用。集集地震之前在此地區所發生的淺層地震也有相似的現

象，震源機制大都呈現張裂型態的地震 (Kao *et al.*, 1998)。於中部雪山山脈地區地殼呈現張裂構造的現象可能是斷坪在發生地震時，將斷坪的地塊快速向前產生逆衝滑移，但位在其之後的脫滑斷層之上的地塊則無法隨之向前快速移動，因而在斷坪之後形成張裂的現象。從地形來看，此沈陷區僅限埔里至水里 (北港溪至濁水溪)，此區域地表都形成紅土化現象，表示地表的侵蝕速率相當緩慢，地表坡度也較東西兩側為平緩。顯示地表沈陷區可能僅限於雙冬斷層的東側一帶。此一現象可能與一般造山帶在同造山時期，因重力形成大區域張裂現象的機制較為不同。集集地震所呈現的地震特徵與地表的變形特徵更足以印證此一現象。現今沈陷區呈現數個山間的沈降盆地如埔里盆地、魚池盆地、日月潭、頭社與統櫃 (圖八)，也印證此地區的張裂作用是長期就已存在的事實。

結 論

921集集地震是台灣地區百年來最大的地震，同時也造成地表極大面積的變形並於地表形成長約80公里的逆衝斷

層。以地表地震斷層及地震的特性來看，地表地震斷層分別屬於南段的車籠埔斷層—大尖山斷層，北段為石岡斷層，而卓蘭地區可能也形成三義斷層的活動，只是未造成地表的破裂。震源發生的構造環境、斷層面形成巨大面積的凸起體的原因以及GPS的資料所呈現地表變形，推測地震是發生在車籠埔與三義斷層的斷坡之上。從GPS資料顯示地震當時斷坡地塊向西的移動速度較快，斷坡後側脫底斷層之上地塊向西移動的速度較慢，因此造成在斷坡與脫底斷層交會處呈現拉張的現象，所以造成此區域GPS資料呈現下陷現象。

參考文獻

- 中國石油公司台灣油礦探勘總處編印 (1974) 苗栗圖幅。
- 中國石油公司台灣油礦探勘處地質組編印 (1971) 台灣西部地質圖南幅。
- 土地測量局網站 (2000)。
- 何春蓀 (1959) 台灣中部台中與南投間之逆衝斷層構造。台灣省地質調查所彙刊，11號，13-20頁。
- 陳文山、鄂忠信、陳勉銘、楊志成、張益生、劉聰桂、洪崇勝、謝凱旋、葉明官、吳榮章、柯炯德、林清正、黃能偉 (2000a) 上一更新世台灣西部前陸盆地的演化：沈積層序與沈積物組成的研究：經濟部中央地質調查所彙刊，13，137-156。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰 (2000b) 921集集大地震的地震斷層特性與構造意義：經濟部中央地質調查所特刊，第12期，139-154頁。
- 楊志成 (1997) 台灣中部地區錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層的沈積環境研究：國立台灣大學地質學研究所碩士論文，120頁。
- 楊貴三 (1986) 台灣活斷層的地形學研究—特論活斷層與地形面的關係。私立中國文化大學地學研究所博士論文，178頁。
- 張憲卿 (1994) 大甲圖幅，經濟部中央地質調查所，103頁。
- Bonilla M.G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan: U.S.G.S. Open-File Report, 75-41, 58p.
- Chang, S.S.L. (1971) Subsurface geologic study of the Taichung basin, Taiwan:

Petroleum Geology of Taiwan, 8, p.21-45.

Hung, J.H., and Wiltshko, D.V. (1993)
"Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, 28, 59-96.

Hung, J.H., and Suppe, J. (2000)
Subsurface geometry of the Chelungpu fault and surface deformation style: International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake September 18-20, 2000, Taipei, p.133-138.

Jackson, M., and Biham, R. (1994)
Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet: Jour. Geophysical Research, 99, p.13, 897-13,912.

Jouanne, F., Menard, G., and Darmendrail, X. (1995) Present-day vertical displacements in the north-western Alps and southern Jura Mountains: Data leveling comparisons: Tectonics, 14, 3, p.606-616.

Kao, H., Shen, S. J., and Ma, K. F. (1998)

Transition from oblique subduction to collision: Earthquakes in the southernmost Ryukyu arc-Taiwan region: Journal of Geophysical Research, v.103, p.72117229.

Kao, H., and Chen, W.P. (2000) The Chi-Chi Earthquake sequence: Active, Out-of-Sequence Thrust Faulting in Taiwan, Sciences, 288, p.2, 346-2,349.

Lee, S.J., and Ma, K.F. (2000) Rupture Process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake from the Inversion of Teleseismic Data: TAO, 11, 3, p.591-608.

Meng, C.Y. (1963) San-I overthrust : Petrol. Geol. Taiwan, 2, p.1-20.

Ruff, L.J. (1992) Asperity distributions and large earthquake occurrence in subduction zones: Tectonophysics, 211, 61-83.

Shaw, J.H., and Suppe, J. (1994) Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel, California: Geol. Soc. America Bulletin, 106, p.607-626.

Shih, R.C., Ho, S.J., Chang, H.C., and Lin, C.W. (2000) Preliminary subsurface images of the Chelungpu fault by using

shallow seismic reflection: International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake September 18-20, 2000, Taipei, p.123-132.

Suppe, J. (1981) Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan: Geological Society China Memoir 4, p.67-89.

Suppe, J. (1986) Reactivated normal faults in the western Taiwan fold—thrust belt: Geological Society China Memoir 7, p.187-200.

Characteristics of Thrust System in Relation With the 1999 Chi-chi Earthquake Ruptures in the Western Foothills, Central Taiwan

Wen-Shan Chen¹, Chih-Cheng Yang¹, Bor-Shouh Huang², Yue-Gau Chen¹,
Ruey-Chyuan Shih³, Yuan-Hsi Lee⁴, Hui-Cheng Chang⁴, Neng-Wei Huang¹,
Chin-Cheng Lin¹, Shih-Hua Sung¹, Kun-Jie Lee¹

1. Department of Earth Science, National Taiwan University

2. Institute of Earth Science, Academia Sinica.

3. Institute of Applied Geophysics, National Chung Cheng University.

4. Central Geological Survey, MOEA

Abstract

The earthquake occurred as two distinct subevents and triggered two different faults forming the surface ruptures of the Shihkang, Chelungpu, and Tajianshan faults. The Shihkang fault occurs in the Chinshui Shale and is interpreted as bedding-plane slip fault. The Chelungpu, and Tajianshan faults separates the hinterland covered with Late Pliocene sediments from the Taichung piggyback basin with recent alluvium. Our synthesis of geological, geodetic, and seismological

analyses show the importance of ramp structures associated with thrust faults for generating large earthquakes and provides a general framework for understanding earthquakes in fold-and-thrust belts, central Taiwan. Large surficial coseismic uplift and strong asperities appears to be a function of fault ramp geometry. Our analysis indicates that ramp structures in fold and thrust belts have a high potential for producing large but in frequent earthquakes.