

利用淺層反射震測法探討公荖坪斷層^{*} Exploring the Gonlauping fault by reflection seismic method

葛滿龍^a

張瑞津^b

王乾盈^c

Mang-Long Ger

Jui-Chin Chang

Chien-Ying Wang

Abstract

After the 1999 Chi-Chi earthquake, the Chelungpu fault and its related structures have attracted much attention of researches. This paper discussed a fault on the Gonlauping terrace, which is close to the particular position of the Chelungpu fault where an abnormally large rupture (~9 m) occurred during the earthquake. Previous geographic and geologic studies have confirmed the existence of the Gonlauping fault, however, its underground feature has never been detected. This study used the aerial photograph annotating and the shallow reflection seismic method to examine the fault. The structure surrounding the fault has been carefully mapped to reveal its role in the structures of the major Chelungpu fault. The Gonlauping fault, though not long, was proved to be a significant fault.

Keywords : reflection seismic method, river terrace, Gonlauping fault

摘要

九二一大地震之後，車籠埔斷層及其相關構造引起學界熱烈的討論。本文探討豐原附近之公荖坪階地內的公荖坪斷層，該斷層鄰近車籠埔斷層北段轉彎處及地表破裂達九公尺的位置。過去的研究曾以航照判釋與野外調查指出該階地內有一明顯的斷層小崖，並推測公荖坪斷層存在，且為車籠埔斷層的副斷層，但其地下構造卻始終從未被偵測。本研究以地形資料及淺層反射震測法，仔細檢查公荖坪斷層及其週遭的地下構造形貌，結果證實該斷層確實存在，並推測其可能的形成機制是受車籠埔斷層向西及向北逆衝而上時所伴生的副斷層；同時亦受到北側 TT-boundary 之障礙阻擋，以致上盤地層因錯動擠壓而撓曲變形，甚至衍生一條小規模的背衝逆斷層與部分的地層陷落。

關鍵詞：淺層反射震測法、河階、公荖坪斷層

^{*} 本文曾發表於 2004 年 7 月 93 年度中國地理學會年會暨學術研討會口頭發表

^a 台北縣私立東海高中專任教師

^b 國立台灣師範大學地理系教授

^c 國立中央大學地球科學系教授

前 言

當岩層承受負荷過大的應力時會產生變形，發生褶皺、甚至斷層錯動，這種現象可以由構造活動時所遺留的一些地形特徵加以驗證，例如九二一大地震在地表所留下的斷層小崖、破裂及水平錯移等。但是有時地震所產生的斷層，並沒有到達地表，地表上並沒有地層錯動，只有變形，如撓曲(flexure)、傾動(tilting)、或是沒有任何形變，即是隱藏地下的盲斷層(blind fault)。這時，探討盲斷層及其伴隨而來的地表變形，就顯得格外重要，因為從其形變當中，可以找出潛藏的斷層及其相關的地質構造訊息(Burbank,2001)。

九二一大地震之後，車籠埔斷層及其副斷層頓時成為學界注目的焦點，尤其是位於斷層東轉附近的新社河階群之線性構造是否為斷層，向來就為學界所重視(李元希等，2000；陳文山，2003；王乾盈等，2002；Lee, 2002；Tsai and Sung,2003；Wang, 2003)。該河階群內之公荖坪階地(圖 1)因緊鄰於車籠埔斷層北段部分，且河階面變形現象非常顯著，很早就受到地學家的注意。早期有林朝榮(1957)指出豐原東方新社河階群的公荖坪面(LT2)，受銅鑼斷層(即三義斷層；Meng, 1963)的引曳而向西下撓曲(down-warping)，推測銅鑼斷層及台中盆地均形成於更新世晚期；雖然其並未加以闡述公荖坪斷層是否存在，但卻明白指出公荖坪階地受到撓曲作用，致使階地產生明顯的變形。其後石再添等(1986)以航照判釋與野外調查認為該階地的西部，有長 0.9 公里、走向南北、崖面向西及約 10 公尺高的線狀構造(斷層小崖)，並推測崖線以東的公荖坪面因受造構應力擠壓而呈背斜狀隆起，崖緣的礫石覆瓦方向與崖線直交，判釋其為車籠埔斷層的副斷層，就是一般所稱的公荖坪斷層(圖 1b)，因此，該斷層主要以地形特徵來推斷。

九二一大地震後，該斷層附近區域亦有明顯的地裂。李元希等(2000)曾利用車籠埔斷層的斷層崖變位測量、GPS 變位資料、水準測量資料與地質地形調查等，認為車籠埔斷層北段大部分的地表破裂面是受控於地下構造。王乾盈等(2000)及 Wang(2002)探討新社河階群地下構造與九二一大地震之關係時，利用反射震測法及地形學之研究發現：新社河階群是以錦水頁岩層為基底滑脫面的抬升構造，是車籠埔斷層向西及向北逆衝而上時，在車籠埔斷層的上盤淺部所形成的上衝構造(Pop-up structure)，並推論車籠埔斷層北段的活動與錦水頁岩的地下形貌，有相當程度的關連。Tsai and Sung(2003)利用對新社河階群之地形學研究，指出河階群分四次抬升，造成大甲溪在東勢附近向東北遷移，他們認為新社河階群之北段(公荖坪、七分等)因車籠埔斷層之逆衝成為上衝構造。蔡衡(2004)更視此斷層為新社河階群上衝構造的主要界線之一，可見公荖坪斷層在新社河階群的重要性。但可惜的是後續就少有學者繼續加以追蹤研究，以致於公荖坪斷層是否存在，僅停留在地表地形的資料階段而已，而無地下地質資料可以佐證。本研究是以地形資料及淺層反射震測法，直接測繪公荖坪斷層地表與地下地層的形貌，藉以對公荖坪階地地下構造做進一步地瞭解，以探討公荖坪斷層之形貌及其構造意義。

區域地質概況

本研究區位於新社河階群之公荖坪階地內以及車籠埔斷層北段的上盤，圖 1a 中國石油公司(1994)十萬分之一地質圖指出本研究區域主要構造包括：外圍有二條逆衝斷層：三義斷層及雙冬斷

層，內部則以頭嵛山向斜為主，此向斜往北過大甲溪，可與石圍牆向斜相連，成為石圍牆 - 頭嵛山向斜 (Wang et al., 2004)。該向斜為一基底向斜，西翼受到車籠埔斷層之逆衝作用而抬起，成為西翼較東翼為陡，近似單斜之構造；在石圍牆 - 頭嵛山向斜上方則發展出二個淺部的次要構造：東勢背斜及內灣向斜 (Lee et al., 2002)，此二褶皺係發生在錦水頁岩層以上之淺部滑脫構造(detachment bulge)，其中東勢背斜並向西南延伸至大甲溪南岸，成為引導九二一地震時，大甲溪兩岸地表錯動

(a)

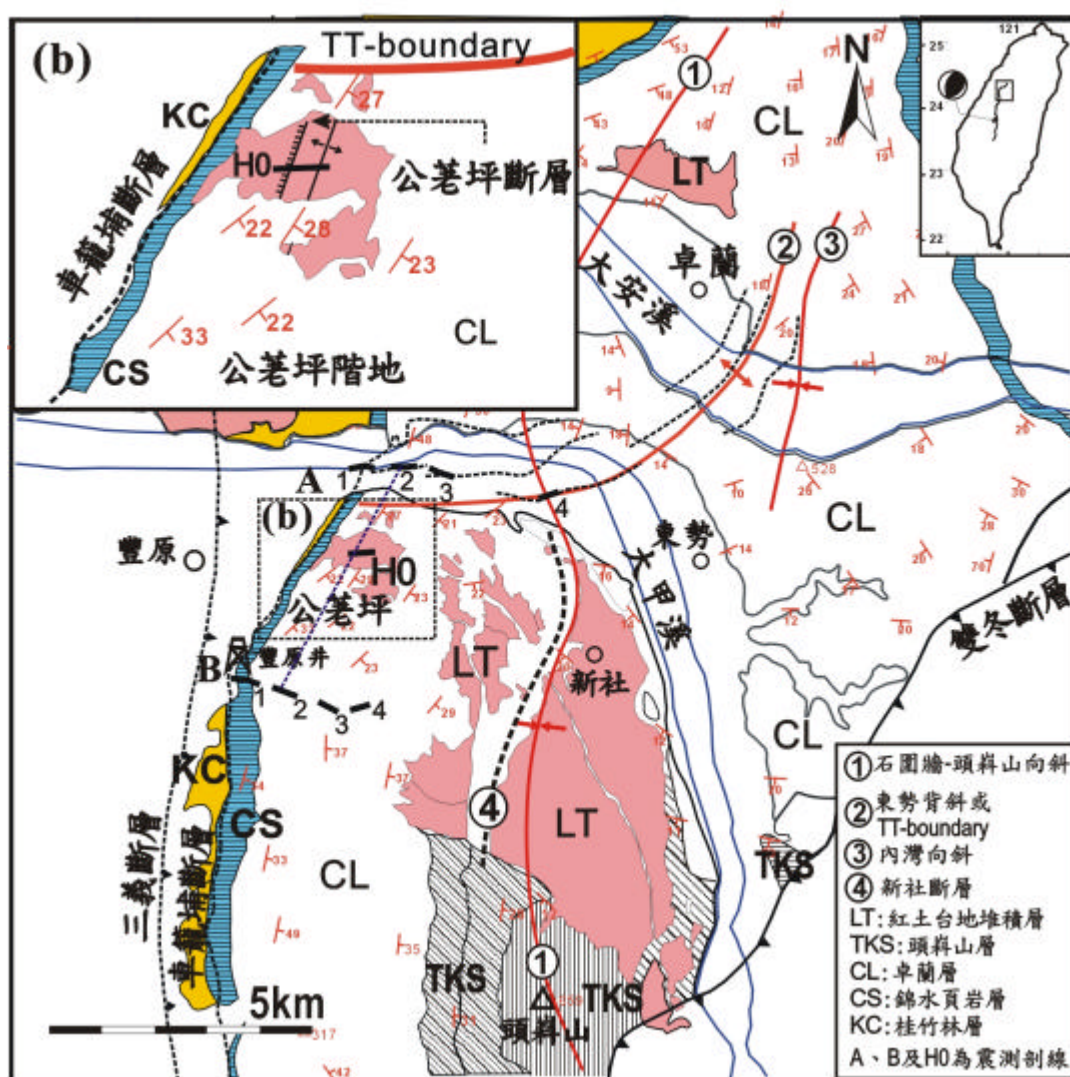


圖 1 (a) 新社河階群及附近區域十萬分之一地質圖 (修改自中國石油公司, 1994)。

(b) 本研究區域之地質圖放大。本文引用 Wang et al.(2002)之「廣域布線法」與其震測資料分別為 A 剖面 (大甲溪南岸四條震測線) 與 B 剖面 (烏牛欄溪四條震測線)，做為檢視公荖坪斷層的延伸範圍 (藍色虛線標示於 a 圖內)。

之地下控制構造(Wang et al., 2004 及 2006), 稱為大甲溪-東勢界線(TT-boundary)。圖 1b 為本研究區域之地質圖放大, 並將公荖坪斷層(石再添等, 1986)及 TT-boundary(Wang et al., 2004)標示於圖內。

綜觀全圖, 很明顯地研究區均被紅土台地堆積層所覆蓋, 少等地質露頭出露, 頭嵛山 - 石圍牆向斜軸則縱貫於新社河階群當中, 並且向斜軸西翼的地層傾角均大於向斜軸東翼的地層傾角。地層由老到新依序為: 桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭嵛山層及紅土台地堆積層等。其中桂竹林層分成上下兩部: 下部是由青灰色細粒砂岩、暗灰色頁岩、粉砂岩及砂、頁岩互層所組成; 上部則以細粒至中粒的泥質厚層砂岩為主。錦水頁岩層以頁岩為主, 富含各種海相生物化石, 屬於淺海附近環境的沉積。卓蘭層為上新世地層, 以砂、頁岩及泥岩的互層為主, 屬淺水沈積。頭嵛山層為更新世地層, 整合覆於卓蘭層之上, 主要存有以下之香山相及上部之火炎山相兩種相異的岩相: 即一為細砂岩及頁岩互層的香山相與以礫岩為主的火炎山相。兩種不同岩相常以犬牙交錯相接, 並無明顯界線可供區別。再覆其上則為紅土台地堆積層, 主要為未經膠結的礫石、砂、粉砂及粘土所組成。

方法與野外工作資料

本研究主要採取地形資料與淺層反射震測來探討公荖坪斷層是否存在。首先是地形資料, 係由航照判釋與自動水準儀測量所得。其中航照判釋的結果發現公荖坪階地內有疑似斷層小崖及背斜的存在, 這個觀點與石再添等(1986)相同。復以自動水準儀測繪出階地的地表形貌, 藉以了解其地表的變化情形。該施測是以每兩公尺為一個測點, 並跨越疑似斷層小崖及背斜, 施測長度計有 1000 公尺(位置見於圖 2)。結果發現公荖坪階地確有陡崖與不易察覺到的背斜存在; 至於圖 2a 未有明顯的背斜形態表露, 乃因其切過背斜南緣, 地形較平坦所致。圖 2b 剖線通過該階地較北的背斜處, 即可見到較明顯之背斜狀。特別耐人尋味的是, 陡崖內有兩處小崖, 分別為小崖 與小崖 , 其位置大約在自動水準儀測線的 200 公尺與 400 公尺左右處(如圖 2a)。其中小崖 經計測再度檢視確實有 10 公尺的高度; 即是石再添等(1986)所稱的線性構造(或 10 公尺斷層小崖), 是否為斷層, 則須待地下資料方能證實釐清。至於小崖 地形起伏不大, 經現地實察結果發現其未有傾動跡象, 應僅是單純的路面凹陷, 並非斷層小崖。

其次是使用近年來在偵測斷層頗具成效的淺層反射震測法(Miller, 1990; Wang, 2002)。該震測法是利用震波在地層界面反射之歷時記錄, 類似拍攝地下構造影像的照相技術; 最重要的是, 其以仿似相片方式呈現結果, 勿須太多人為解釋, 即可直接描繪出地下構造形貌, 故該法被視為最直接測繪地下構造的方法(王乾盈, 2003)。再者, 依此反射震測法可以獲得測線之地下地層的構造剖面、斷層位置、傾角及其形態(潘玉生, 1992)。不過, 該法由於施測儀器繁多, 費用昂貴, 且易受環境背景雜訊干擾, 因此, 需有相當經驗的工作團隊, 始可獲得可信的結果。表 1 為本工作團隊累積十多年的野外工作經驗, 認為探測淺層地下構造之最佳施測參數。另外, 為獲得最佳的震測資料與降低環境背景雜訊, 我們施測時間皆利用夜間施測, 以避免汽、機車等雜訊之干擾。同時在資料處理方面, 也特別針對壓制地面波與傾斜濾波等做了特別的處理, 其處理程序方法均與 Wang et al.(2004)相同, 詳如圖 3(修自胡玉燕, 2005)。

經上述之地形資料分析後, 本研究選擇在疑似斷層小崖的地方(小崖)進行淺層反射震測, 並

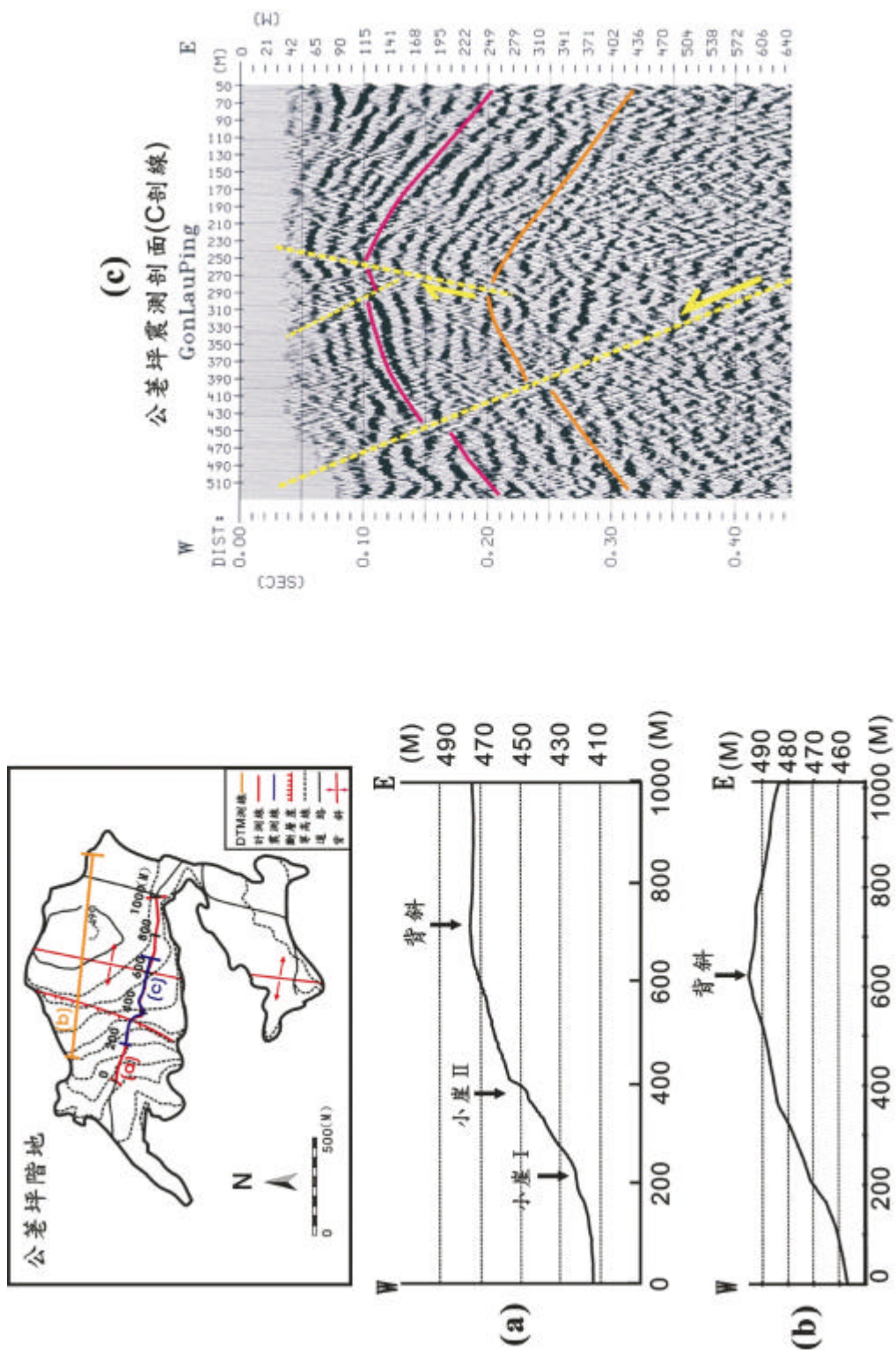


圖2 自動水準儀測線、DTM測線與震測線相關位置。(a)利用自動水準儀測繪出公老坪階地的地表形貌。(b)利用DTM測繪出公老坪階地的背斜狀形貌。(c)公老坪階地震測剖面C剖線之解釋。

以跨過該線性構造(疑似斷層小崖)為主要考量，測線長度大約 500 公尺(b 剖線之一段；位置見於圖 2)。圖 2c 所示為該區震測剖面，其顯現出 0.4 秒，約 600 公尺深的高解析之淺部地層構造：公荖坪階地地下地層(即是紅土台地堆積層以下地層)已有錯動的跡象，斷層傾角約為 70 度左右，斷層面向東傾，斷層並未出露地表。另外，剖面中主要有三個反射地層，該反射層均屬卓蘭層，不過，很有趣的是，在公荖坪斷層的上盤，孕育衍生成一條與該斷層面相反之背衝逆斷層與小規模地層陷落，值得深究。

表 1 本研究野外施測幾何及參數

震源	EWG- 彈簧式震源	波道數	96
接收器	40 Hz geophone	重合數	16
震測儀	DAS-1	低切濾波	40 Hz
測站間距	2 公尺	高切濾波	500 Hz
震源間距	6 公尺	窄通濾波	60 Hz
近站支距	100 公尺	取樣率	0.5 msec
展開方式	端點展開	記錄時間	512 msec

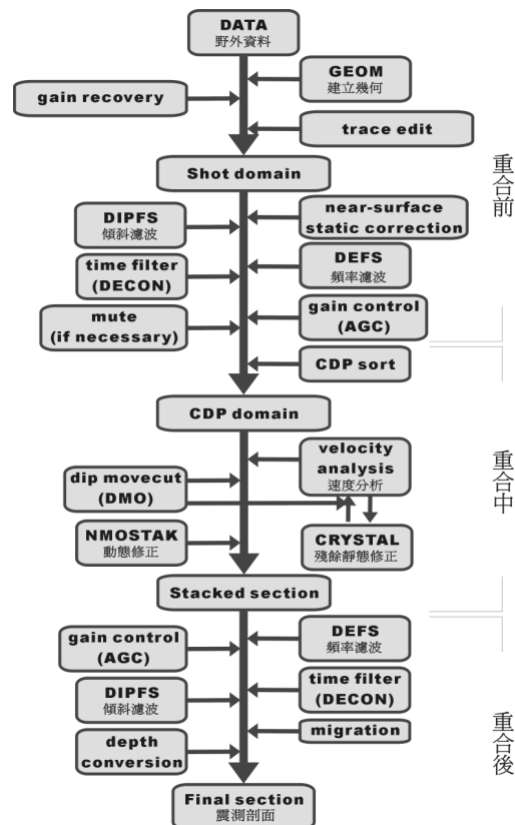


圖 3 反射震測資料處理流程圖

方法與野外工作資料

綜合上述的地形與震測資料，我們確認公荖坪斷層是存在的，但它到底是多長的斷層？其型態與構造意義又為何呢？以下為本文之探討：

石再添等(1986)曾以航照判釋與野外實察認為該斷層約有 0.9 公里長，且走向南北。本文引用 Wang et al.(2002)之「廣域布線法」與其震測資料，做為輔助與相互討論。所謂的「廣域布線法」是利用淺層反射震測測線短、可靈活伸展及散佈於廣大區域的特性，故用以追蹤研究區域構造變化極為方便有效，且由於該法可以求得區域構造各方向及其變化，因此可清楚地測繪出研究區內測線的地下形貌。更重要的是，研究區附近測線有國科會的斜井(豐原井)做為比對與控制。圖 4 所示是將跨公荖坪斷層之震測剖線(H0)與其向南、北兩端延伸的二條 A(A1-A4)、B(B1-B4)震測剖線解釋(Wang et al.,2002)加以討論與對比，相信涵蓋的範圍應該包含了公荖坪斷層可能向南或向北發展的延線。

震測 A 剖面要是沿著大甲溪南岸與台 3 線舊鐵道佈線(位置詳如圖 1a 及圖 4)，其中 A1 剖面則為大地震時，因地震斷層所形成埤豐橋瀑布附近位置剖面(車籠埔斷層出露處)。震測 B 剖面主要是沿著烏牛欄溪河岸佈線(位置詳如圖 1a 及圖 4)；B1 係在東陽橋剖面，即是豐原井(Tanaka, 2002)附近所獲得之剖面。這些剖面經井資料和各震測剖面的相互比對結果，不但可以確定地層(指示層)反射界面間的頻率、振幅、連續性與起伏等震測特性變化外，還可將公荖坪斷層可能經過的震測資料收錄在一起，進而與公荖坪斷層(H0)剖面進行比對，如圖 4 所示。由圖 4 發現公荖坪階地的震測剖面(H0)顯示該階地地下地層如前所述：已有錯動的跡象，斷層傾角約為 70 度左右，斷層面向東傾，斷層並未出露地表。值得注意的是，其反射界面間的頻率、振幅與反射相之起伏等震測特性與其他(如圖 4 之 A、B 震測連線剖面)由車籠埔斷層所引起地層破裂之反射特性並不相同，並且現地實查結果發現：A1 剖面有錦水頁岩出露、B4 剖面有卓蘭層錯動出露，但 H0 剖面並未見任何地層錯動出露，僅有一些因地震所引起的地裂而已。

綜上所述，顯見公荖坪斷層最多只是個介於 A 與 B 剖面之間的斷層而已；換言之，它僅是一個長度不長的小斷層，且由斷層面東傾來看，推測應是屬於車籠埔斷層的副斷層，這點可由石再添等(1986)的地形觀測結果得到相互的呼應。圖 2c 所見與公荖坪斷層面相反的背衝逆斷層及小規模的地層陷落可能是因車籠埔斷層逆衝時，連帶導致公荖坪斷層錯動，以致地表上覆階地堆積層形成撓曲構造，並在該撓曲構造的頂部孕育而生一條小規模的背衝斷層與地層陷落，類似上衝構造(Pop-up structure)模式，這與 Tsai and Sung(2003)、王乾盈等(2000)及 Wang(2002)的論點不謀而合。

因此，我們提出圖 5 公荖坪階地構造可能的形成機制：公荖坪階地淺部之撓曲構造，可能是公荖坪斷層伴隨車籠埔斷層活動後，礙於北側 TT-boundary 之阻擋，使得該階地抬升(Wang et al., 2004 及 2006)，而其上盤地層則因抬升擠壓以致產生撓曲變形，並衍生一條小規模的背衝逆斷層，甚至在撓曲構造的頂部有部分的地層陷落，這點可由九二一大地震時，在撓曲構造頂部(即是公荖坪高爾夫球場附近)產生地裂得到驗證，故公荖坪斷層確實存在，並且應是一個盲斷層。

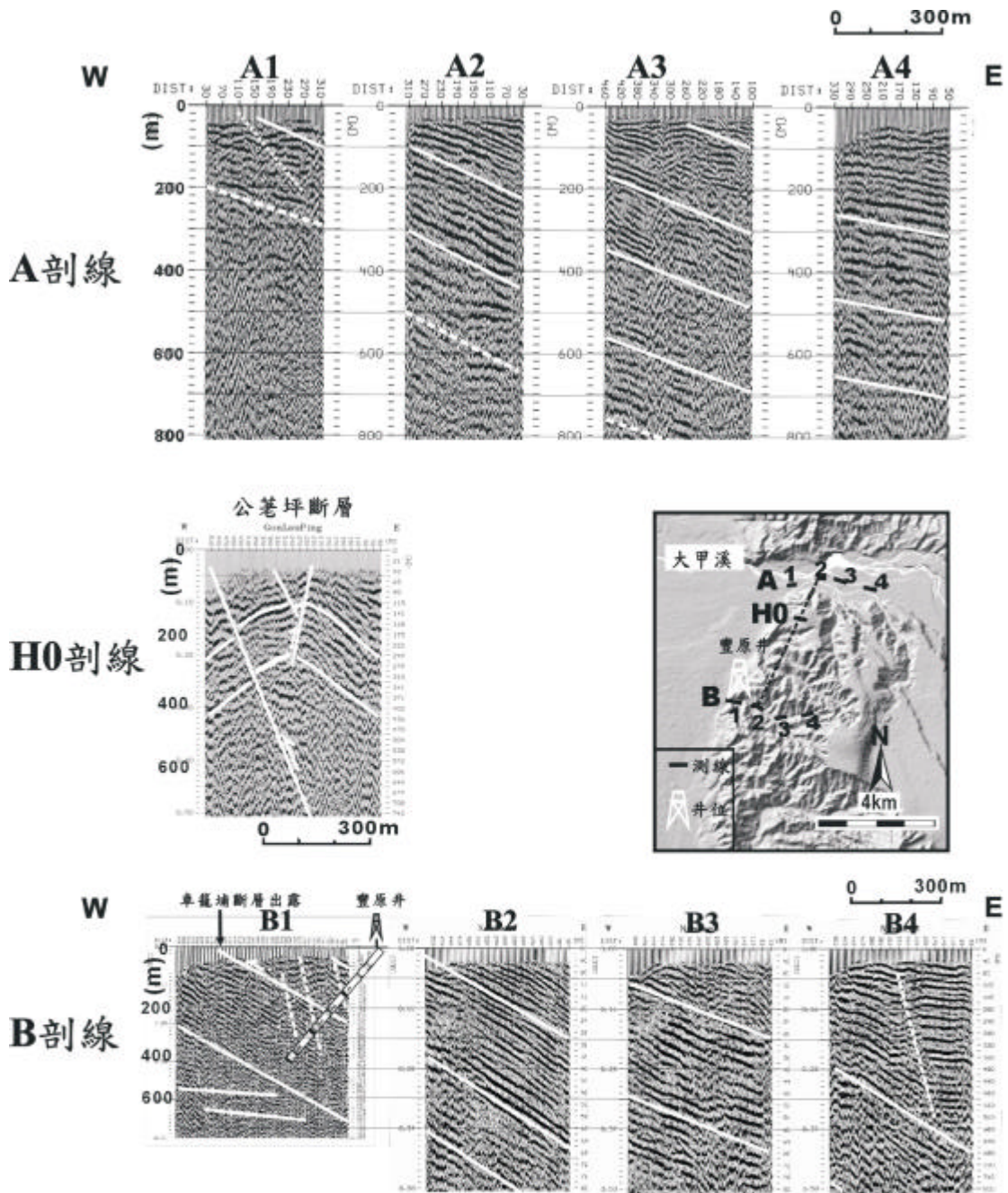


圖4 本研究H0剖線震測解釋與A剖線(大甲溪南岸)、B剖線(烏牛欄溪剖面)之(Wang et al., 2002)震測解釋相互比對。

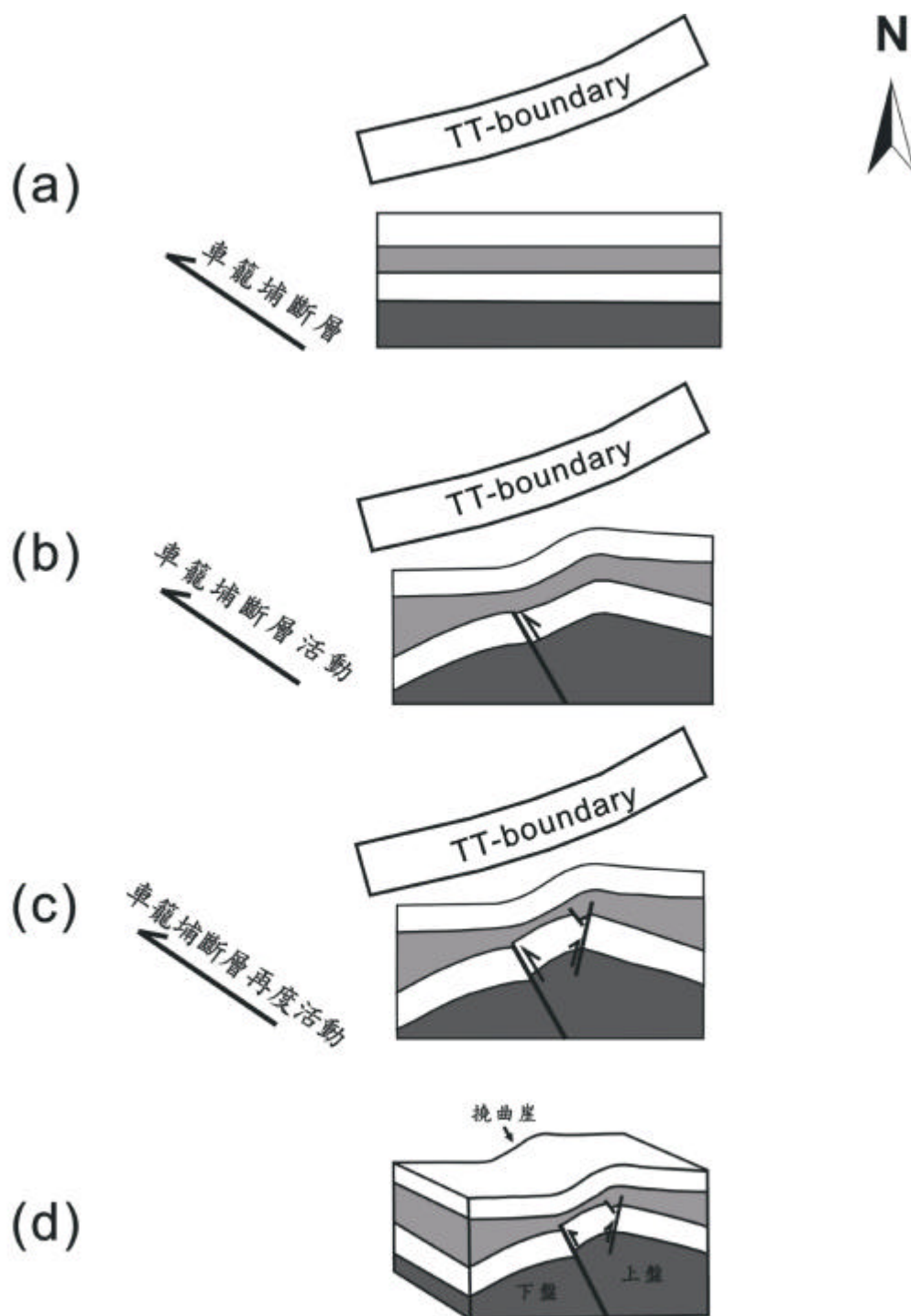


圖5 (a) (b) (c) 公荖坪斷層可能之形成機制，(d) 本研究所推測之公荖坪階地地下構造示意圖。認為公荖坪階地淺部之撓曲構造，應是車籠埔斷層向西及向北逆衝時所半生的副斷層，因受到北側TT-boundary之阻擋作用，以致將階地擠壓而撓曲變形。

結 論

綜合地形與震測資料，我們可推斷公荖坪斷層是存在的；並推測其可能的形成機制是受到西側的車籠埔斷層向西及向北逆衝而上時所伴隨產生的副斷層(公荖坪斷層)；同時該斷層亦受到北側 TT-boundary 之障礙阻擋，以致斷層上盤地層因錯動擠壓而撓曲變形，甚至在地下衍生一條小規模的背衝逆斷層與部分的地層陷落。

謝 辭

本研究為國科會贊助，計畫編號：NSC93-2119-M008-012。感謝國立新社高級中學董文章老師野外實察工作的協助及國立中央大學地球物理研究所地震研究室設備、儀器的提供與其助理郭炫佑的協助。也感謝國立台灣師範大學地理系同學林園益、田應平、蔡芳祺、李文忠、黃靖婷等同學在野外震測探勘工作的參與協助執行，特此申謝。

參考文獻

- 中國石油有限公司(1994)：台灣中部苗栗地區十萬分之一地質圖。
- 中央地質調查所(2000)：《九二一地震地質調查報告》，經濟部中央地質調查所，二刷。
- 王乾盈、宋國城、蔡衡、李千里(2002)：探討新社河階地下構造與九二一地震之關係，中國地質學會91年年會暨學術研討會，6-8。
- 王乾盈、郭炫佑(2003)：《活動斷層調查研究》，14：69-78。
- 王乾盈(2005)：拯救淺層反射震測：困境與突破，中國地質學會九十四年年會暨學術研討會。
- 石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三(1986)：臺灣活斷層的地形學研究，《師大地理研究報告》，12：1-44。
- 何春蓀(1986)：《台灣地質概論 - 台灣地質圖說明書》(增訂第二版)。經濟部中央地質調查所。
- 李元希、吳維璇、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正(2000)：九二一集集地震地表變形特性—埤豐橋以東，《中央地質調查所特刊》，12：19-40。
- 林朝榮(1957)：《臺灣地形》。台灣省文獻會。
- 胡玉燕(2005)以淺層反射震測探測新城斷層地下構造，國立中央大學，地球物理研究所，碩士論文，第36頁。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時業、李昆杰(2003)：九二一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》，12：139-154。
- 潘玉生，陳讚煌，鍾火盛，游銘銳(1992)：《震測資料之認識與解釋》。中國地球物理學會印製。
- 蔡衡(2004)：台灣地區河階地形複合對比，《國立成功大學地球科學研究所博士論文》。
- Burbank, D.W. & Anderson R.S.(2001): *Tectonic Geomorphology*, England : Blackwell Science.
- Lee, J.C., Chu, H.T. Angelier, J., Chan, Y.C., Hu, J.C., Lu, C.Y. & Rau, R.J.(2002): *Geometry and*

- structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw = 7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures. *J. Stru. Geol.*, 24, 173-192.
- Meng, C.Y.(1963):The San-I overthrust, *Petro. Geol. Taiwan*, 2, 1-20.
- Miller,R.D.,Steeple,D.W. & Myers,P.D.(1990): Shallow seismic reflection survey across the Meers fault,Oklahoma. *Geological Society of America Bulletin*, Vol.102,18-25
- Tanaka, H., Wang, C.Y., Chen, W.M., Sakaguchi, K. Ujiie, Ito H. & Ando, M. (2002): Initial science report of shallow drilling penetrating into the Chelungpu fault zone, Taiwan. *TAO*, 13, 227-252.
- Tsai, H. and Sung, Q.C. (2003): Geomorphologic evidence for an active pop-up zone associated with the Chelungpu fault in central Taiwan. *Geomorphology*, 56, 31-47.
- Wang, C.Y.(2002):The detection of a recent earthquake fault by the shallow reflection seismic method. *Geophysics*, 67, 1345-1352.
- Wang, C. Y., Li, C. L. & Yen, H. Y. (2002): Mapping the northern portion of the Chelungpu fault, Taiwan by shallow reflection seismics, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 37-1,
- Wang, C.Y., Li, C.L. & Lee, H.C. (2003): Constructing subsurface structures of the Chelungpu fault to investigate mechanisms leading to abnormally large ruptures during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, 4.
- Wang, C. Y., Li, C. L. & Lee, H. C. (2004): Constructing subsurface structures of the Chelungpu fault to investigate mechanisms leading to abnormally large ruptures during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geophysical Research Letters*, 31, 10. 1029/2003 GL018323.
- Wang, C. Y., Lee C. L., Ger, M.L. & Wu, M.S. (2006): An investigation of the TCDP drill Site using a combination of deep and shallow reflection seismics, *Terr. Atmos. Ocean.*, TCDP Special Issue. (in process)

收稿日期：94年12月6日

修正日期：95年2月22日

接受日期：95年3月20日