

臺灣中部濁水溪以南地區的集集地震斷層 與構造分析

林啟文¹ 盧詩丁¹ 黃文正¹ 石同生¹ 張徽正¹

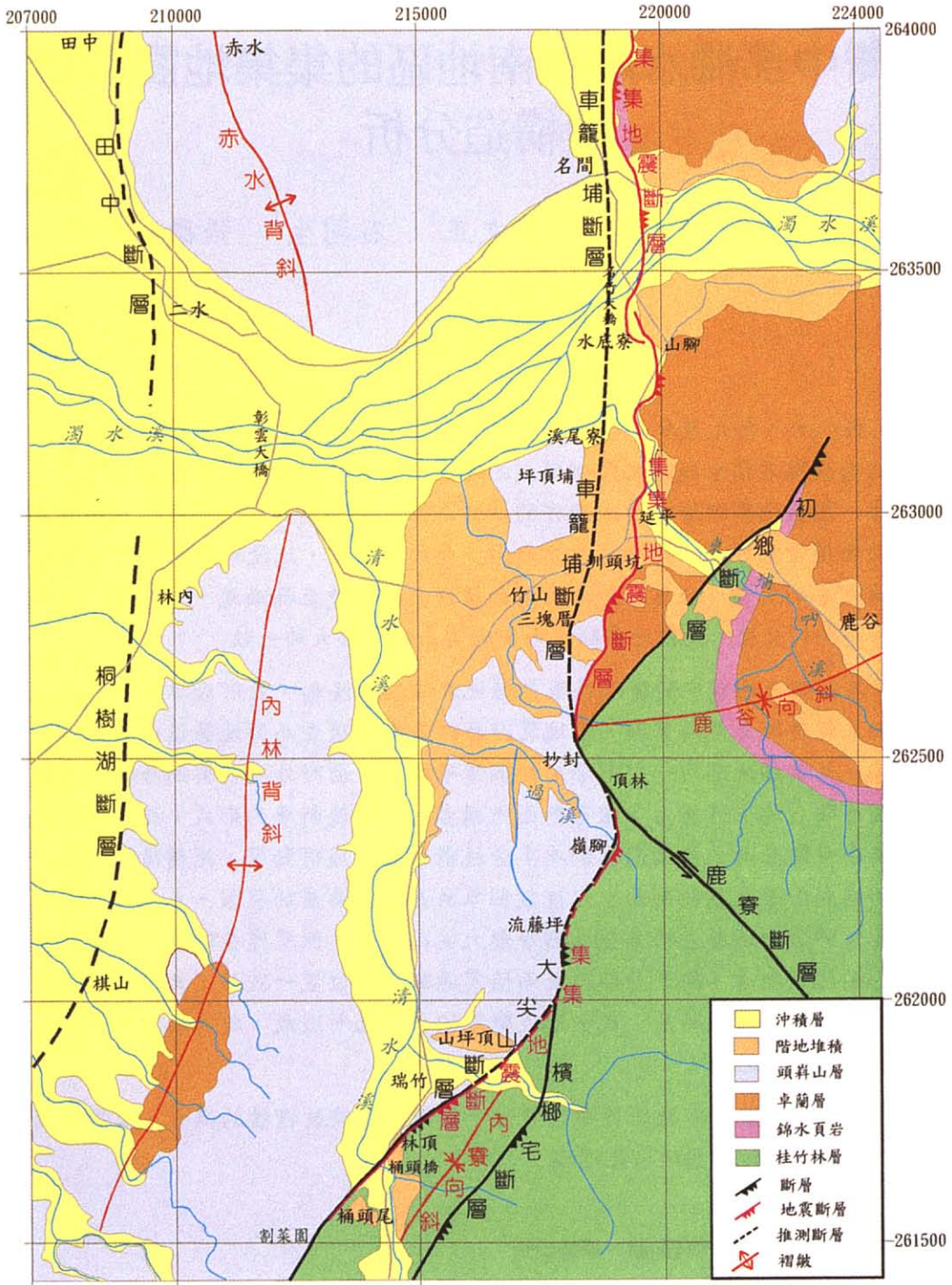
摘 要

民國八十八年九月廿一日凌晨臺灣中部發生強烈地震。此次地震在濁水溪以南的南投縣名間至桶頭之間所形成的地表破裂及變形帶，本文暫稱為集集地震斷層。集集地震斷層以竹山南方的抄封為界可以分為南、北兩段：北段由濁水溪向南延伸至抄封，約略呈南北走向，長約13公里，此段地震斷層大多位於車籠埔斷層的上盤；地震斷層南段則由嶺腳向南延伸至桶頭尾，呈東北—西南走向，長約11公里，此段地震斷層則與大尖山斷層跡大約一致。

本區在該次地震中的變形特徵包括地表破裂與隆起，並形成單斜崖或撓曲崖，而未發現斷層崖的露頭。沿地震斷層跡走向發現在局部地區這些崖並不一定相連，且某些地點同一變形帶由數個崖所構成。由野外資料與斷層模式來推斷，斷層帶在地下可能由多組剪動面所構成，為分枝斷層的形式；這些剪動面可能為由主斷層向上分叉而出的次生分枝斷層而構成剪動帶，此種破裂模式可以說明與變形帶垂直的剖面中出現數個單斜崖或撓曲崖的原因。本文認為誘發此次地震的震源斷層包括車籠埔斷層與大尖山斷層，但反應在地表及淺處破裂與變形的地震斷層，除了局部與此兩條震源斷層的位置一致外，大多數的地震斷層為新形成的分枝斷層，或由鄰近斷層的再活動所造成，所以地震斷層必須與地質斷層有所區別。

本文也由地層分布及地質構造特性，利用斷層擴展褶皺的模式，來推演濁水溪以南地區的地質構造演化過程。

關鍵詞：九二一地震、地震斷層、構造分析



圖一 濁水溪以南區域地質圖(修改自中國石油公司台探總處, 1982、1986; 劉桓吉與李錦發, 1998; 經濟部中央地質調查所, 1999a、b)。圖外框數字為二度分帶座標。

壹、前言

民國八十八年九月廿一日凌晨，臺灣中部發生芮氏地震規模7.3的強烈地震。此次地震推估是由車籠埔斷層所引起（經濟部中央地質調查所，1999b）。以往對車籠埔斷層的調查結果發現，斷層跡的位置由名間至濁水溪以南均位於沖積平原及低位階地（中油公司台探總處，1982；1986），而此次地震中顯示地表破裂及變形帶在濁水溪以南地區的位置大多位於山麓前緣（經濟部中央地質調查所，1999a），而此破裂帶向南延伸則連接以往所稱的大尖山斷層（劉桓吉與李錦發，1998）。這些地表破裂及斷層帶的位置（地震斷層）也與原有車籠埔斷層跡及大尖山斷層跡的位置有所差異。

本文主要調查此次地震在濁水溪及以南地區地表變形帶的特徵，來分析地震斷層的破裂與變形模式。再者，由於車籠埔斷層的南端似與大尖山斷層相連接，本研究也由地形、地層分布與地質構造特性，來探討兩條斷層的關係以及濁水溪以南地區的地質構造演化模式。

貳、地形與地質概述

一、地形

本研究區位於臺灣中部濁水溪中下游流域。濁水溪自集集向西流，至名間後流向轉向西南，至林內鄉後再轉西流。濁水溪在本區的主要支流包括東埔蚋溪及清水溪（圖一）。

本區包含西部麓山帶及其西側的丘陵區。八卦台地位於濁水溪北側，台地之東為麓山帶，兩者之間為南投平原，南投市與名間鄉均位於此平原上；斗六丘陵位於濁水溪南側的西部平原與清水溪之間，清水溪以東的丘陵稱為竹山丘陵，竹山丘陵以東則為麓山帶。根據富田芳郎的研究（林朝棨，1957），八卦台地、斗六丘陵與竹山丘陵原本相互連結，八卦台地與斗六丘陵為濁水溪所切穿，斗六丘陵與竹山丘陵為清水溪所分隔。竹山鎮北方向東呈緩傾斜的坪頂埔台地，就比高、岩性等特徵作比較，其原先可能與八卦台地、斗六丘陵相連接。除了丘陵之外，在清水溪及東埔蚋溪兩岸均有高位河階，而竹山鎮則位於一低位河階之上。

二、地層概述

本區位於臺灣西部麓山帶地質區（何春蓀，1975），主要出露地層由老而新包括桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭料山層、階地堆積與沖積層，各主要地層分布如圖一。桂竹林層可分為三段，下段關刀山砂岩以淡青灰色細至中粒塊狀泥質砂岩為主；中段十六份頁岩由深灰色頁岩所組成；上段大窩砂岩由厚層灰色至淡灰色砂岩為主，夾薄層頁岩；本層分布於大尖山斷層及初鄉斷層以東。錦水頁岩以深灰色頁岩為主，夾暗灰色凸鏡狀砂岩及薄層頁岩，本層分布於車籠埔斷層以東及初鄉斷層以東。卓蘭層以淡灰至灰色細粒泥質砂岩為主，偶夾砂岩與頁岩的薄互層，本層分布於車籠埔斷層以東。頭料山層分為兩段，下段主要為厚層砂岩及砂岩與泥岩的互層，上段以礫岩為主，夾透鏡狀砂岩，本層分布於八卦台地、斗六丘陵、竹山丘陵及坪頂埔台地。階地堆積以礫石層為主，局部含透鏡狀砂層，主要分布於濁水溪及其支流兩岸。沖積層以礫石、砂及泥為主，分布於濁水溪及其支流的河床。

三、地質構造

本區位於西部褶皺衝斷帶，褶皺與斷層等地質構造廣泛發育（圖一）。主要斷層中，田中斷層位於八卦台地西緣，桐樹湖斷層位於斗六丘陵的西緣，這兩條斷層均大致呈南北走向（劉桓吉與李錦發，1998），二者均為依地下地質所推定的逆移斷層（reverse-separation fault），可能屬於低角度盲斷層。車籠埔斷層為本區重要的逆移斷層，約略呈南北走向，斷面向東傾斜，上盤出露錦水頁岩及卓蘭層，下盤出露頭料山層、階地堆積及沖積層。大尖山斷層亦為逆移斷層，約略呈東北轉北北東走向，斷面向東傾斜，上盤出露桂竹林層，下盤出露頭料山層。檳榔宅斷層（中油公司台探總處，1986）位於大尖山斷層的上盤，約呈東北走向，斷面向東傾斜，斷層上盤出露桂竹林層下段及中段，下盤出露桂竹林層上段。鹿寮斷層（中油公司台探總處，1986）位於本區東側，約呈西北—東南走向，斷層兩側均出露桂竹林層，可能為一左移斷層，依據劉桓吉與李錦發（1998）的調查結果，本斷層的層位落差約300公尺。初鄉斷層（劉桓吉與李錦發，1998）位於車籠埔斷層的上盤，約呈東北—西南走向，為一逆移斷層，層位落差由西南向東北逐漸減少。

本區主要的褶皺構造中，赤水背斜位於八卦台地，褶皺軸約呈北北西走向，西翼較陡而東翼較緩，兩翼均出露頭料山層。內林背斜位於斗六丘陵，西翼較陡而東翼較緩，褶皺軸約呈南北轉南南西走向而向北傾伏；軸部出露卓蘭層，兩翼出露頭

料山層。內寮向斜為位於清水溪東岸、大尖山斷層與檳榔宅斷層間，兩翼均出露桂竹林層上段，為一緊密型褶皺。鹿谷向斜位於鹿寮斷層以東，約呈東北東走向，向西延伸後為初鄉斷層所截切，為一寬緩的向斜。

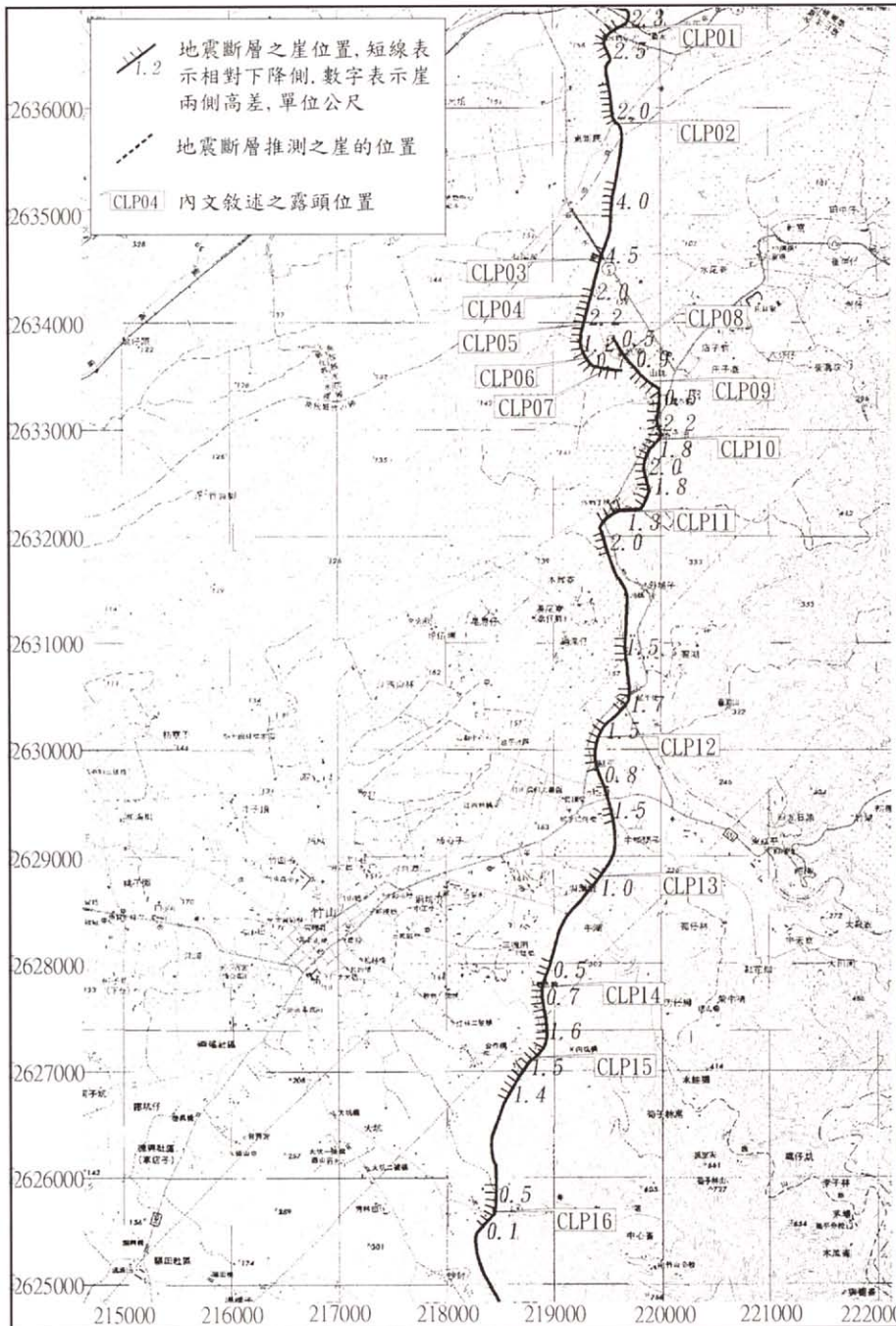
參、集集地震斷層的地表變形特徵

九二一地震在濁水溪以南地區呈現明顯的地表破裂及變形等特徵，而這些變形帶的位置與以往所稱的車籠埔斷層及大尖山斷層的斷層跡位置並非一致，本文中暫時將此次地震所造成的地表變形帶稱為集集地震斷層。集集地震斷層由名間鄉濁水向南延伸至桶頭安溪橋附近，延展約24公里，以竹山鎮南方的抄封為界可分成南北兩段。

地震斷層北段由濁水（台16線省道附近）跨濁水溪河床（圖版一A）後，經水底寮（圖版一B、C）、他里溫、外埔子橋、延平、圳頭坑、三塊厝、內坑橋至抄封（圖版二A），大致呈南北走向，長約13公里（圖二）。本段變形帶並非沿著山麓前緣，而是大多通過河階及平原區，僅在外埔子橋附近及圳頭坑一帶貼近山麓前緣，並於雙冬橋附近向南轉入山區。北段變形帶近乎為東高西低的單斜（monocline）崖，變形帶的高側常見數公尺至十數公尺長的伸張裂縫。崖之落差在濁水溪河床約為3.5公尺、水底寮為3公尺、延平附近約為2公尺、圳頭坑約為1公尺、內坑橋附近小於2.5公尺，至中心崙林道附近僅約為0.5公尺，再往南僅見破裂。由水底寮附近田埂與馬路錯動情形，顯示變形帶東側岩盤除相對於西側岩盤有向西擠壓抬升外，並具約1~2公尺的右移分量。再者，主崖落差在短距離內變化相當快，地表變形帶亦有縮短現象發生，由崖高和縮短量計算得出此區的斷層逆衝角約在40~50度左右；在水底寮南側變形帶分為兩道，二者並未相連。本段主要地表變形特徵如表一。

地震斷層南段由嶺腳北方（圖版二B），經嶺腳（圖版二C）、流藤坪、山坪頂、瑞竹、林頂（圖版三A）、桶頭橋（圖版三B）至桶頭尾（圖版三C），大致呈東北—西南走向，長度約11公里（圖三）。變形帶在北側位於山區內，往西南延伸通過山坪頂台地，在瑞竹以南通過坪頂階地後跨清水溪直至安溪橋以南。崖兩側高差在嶺腳三號橋約1.5公尺，往西南延伸至山坪頂間主要為山崩現象，未見明顯的崖，在瑞竹崖之落差約40公分，林頂台地約25~30公分，桶頭地區約40公分，安溪

橋約30公分，至安溪橋以南地表隆升現象則較不明顯。本段的地表隆升多數伴隨有視右移，且右移量明顯大於抬升量，視左移現象則較少。本段主要地表變形特徵如表二。



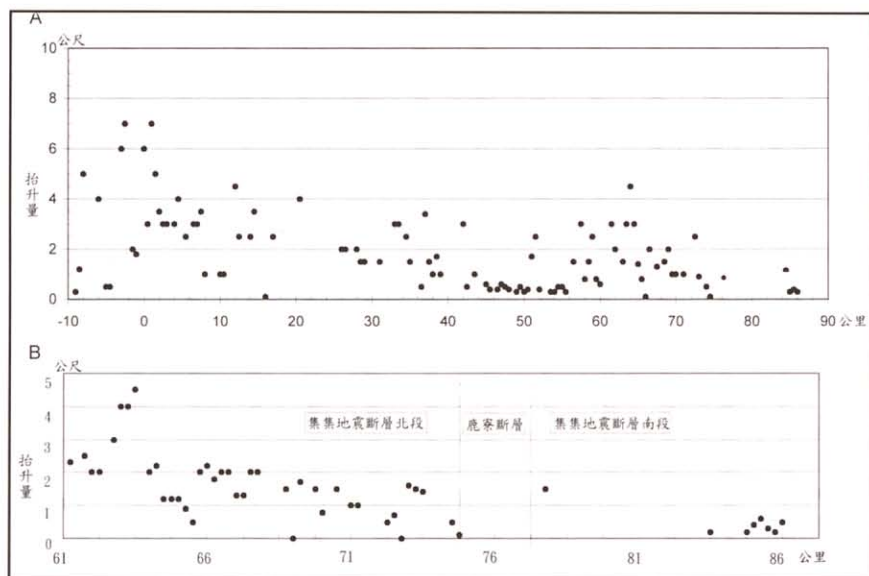
圖二 集集地震斷層北段沿線露頭位置與各地點崖兩側高差圖。圖外框數字為二度分帶座標。

表一 濁水溪以南地區集集地震斷層北段的地表變形特徵

露頭位置點	露頭編號	崖走向	崖垂直高差 (公尺)	水平視位移 (公尺)	變形特徵
濁水(省道 16 線)	CLP01	N45oE	2.3		路面隆起
濁水溪北岸稻田	CLP02	N30oE	2.0		水稻田撓曲崖
濁水溪河床北側		N10oE	3.5		河床沈積物抬升
濁水溪河床南側		N10oE	4.0		河床沈積物抬升
名竹大橋南端	CLP03	N10oE	4.5	右移 5.0	崖線轉向南後再轉東南
濁水溪南岸砂石場	CLP04	N40oW	2.3		錯移排水廊道
砂石場南方水稻田		N40oW	3.0	右移 5.0	水稻田隆起、田埂錯移
水稻田南方茶園		NS	1.2	右移 1.3	茶園隆起
水底寮西方	CLP05	N10oE	1.4	右移 1.5	路面錯移破裂
往南－菸葉田		N45oE	1.2	右移 2.3	菸葉田隆起
水底寮西南方		N60oW	1.4	左移 1.7	路面錯移，菸葉田隆起
向東南－田埂	CLP06	N55oW	0.7	左移 1.2	田埂錯移
田埂南方茶園		N80oW	0.9	左移 0.2	茶園隆起錯移
水底寮南方		EW	0.85	左移 0.4	路面隆起破裂
往東－茶園	CLP07	EW	0.6	左移 0.1	茶園隆起錯移
水底寮		EW	0.4		路面有數個小崖及裂隙
水底寮南方	CLP08	N30oW	0.7		路面隆起
山腳	CLP09	N55oW	1.0		路面隆起
溫水巷		N30oW	1.0		變形帶沿原地形崖延伸
他里溫		N20oW	3.1	左移 3.2	路面隆起
他里溫南方	CLP10	N10oE	2.0		路面隆起
竹山汽車旅社		EW	0.5		數個撓曲小崖
外埔子橋	CLP11	N50oE	1.3		路面隆起
外埔子橋南方		NS	1.5		路面隆起
至湖橋西側		NS	1.5		河床隆升阻斷河道
延平橋南方	CLP12	N30oE	2.0		路面隆起錯移
沙東宮後方		NS	1.0		沿原地形崖向南延伸
延平國小東南		N20oE	1.3		沿原地形崖向南延伸
圳頭坑	CLP13	N35oE	1.0		沿山麓前緣向南延伸
雙冬橋	CLP14	N20oE	0.7		沿山麓前緣向南延伸
內坑橋		N20oE	1.6		路面隆起
內坑橋南側	CLP15	N35oE	1.5		路面隆起
大坑山區		NS	1.0		撓曲崖與數條平行裂隙
中心崙林道北方	CLP16	N30oE	0.5		路面隆起
大坑東南方		NS	0.1		往南地表破裂不明顯

表二 濁水溪以南地區集集地震斷層南段的地表變形特徵

露頭位置點	露頭編號	崖走向	崖垂直高差	水平視位移	變形特徵
嶺腳三號橋	TCS01	N10°E	1.5 公尺		路面隆起
山坪頂	TCS02				路面塌陷、山崩
瑞竹	TCS03	N40°E	20 公分	右移 1.4 公尺	路面隆起錯移
乾芹崙溪		N30°E	40 公分	右移 2.0 公尺	水泥河堤錯移
小河溝北岸		NS	13 公分	右移 8 公分	裂隙方位 N45°E
瑞竹林業合作社		N65°E	40 公分		路面隆起
合作社西南方		N65°E	20 公分	右移 1.0 公尺	數道平行裂隙
向西南	TCS04	N60°E	5 公分	左移 20 公分	路面隆起錯移
林頂台地		N35°E	25 公分		數道 N60°E 平行裂隙
投 45 號道往林頂		N35°E	30 公分	右移 2.3 公尺	路面隆起錯移
台地方茶園	TCS05	N35°E	30 公分	右移 1.7 公尺	檳榔樹錯移
桶頭		N55°E	40 公分	右移 2.0 公尺	桶頭橋錯斷
清水溪南岸	TCS06	N60°E	40 公分	右移 1.1 公尺	路面隆起錯移
桶頭尾安溪橋北方		N45°E	30 公分	右移 10 公分	數道 N50°E 平行裂隙
河堤路面		N50°E	40 公分		路面隆起
安溪橋西側	TCS07	N55°E	30 公分	右移 10 公分	路面隆起
安溪橋西南方雜林		N55°E	15 公分		再往南延已無變形跡象



圖四 八十八年九月廿一日發生之地震其地震斷層所形成崖線兩側高差圖。圖A為全線（由卓蘭至桶頭尾）分布圖；縱座標為抬升量，橫座標為與石岡壩之距離，負軸為石岡以東的部分；圖B為濁水溪以南（濁水至桶頭尾）分布圖。

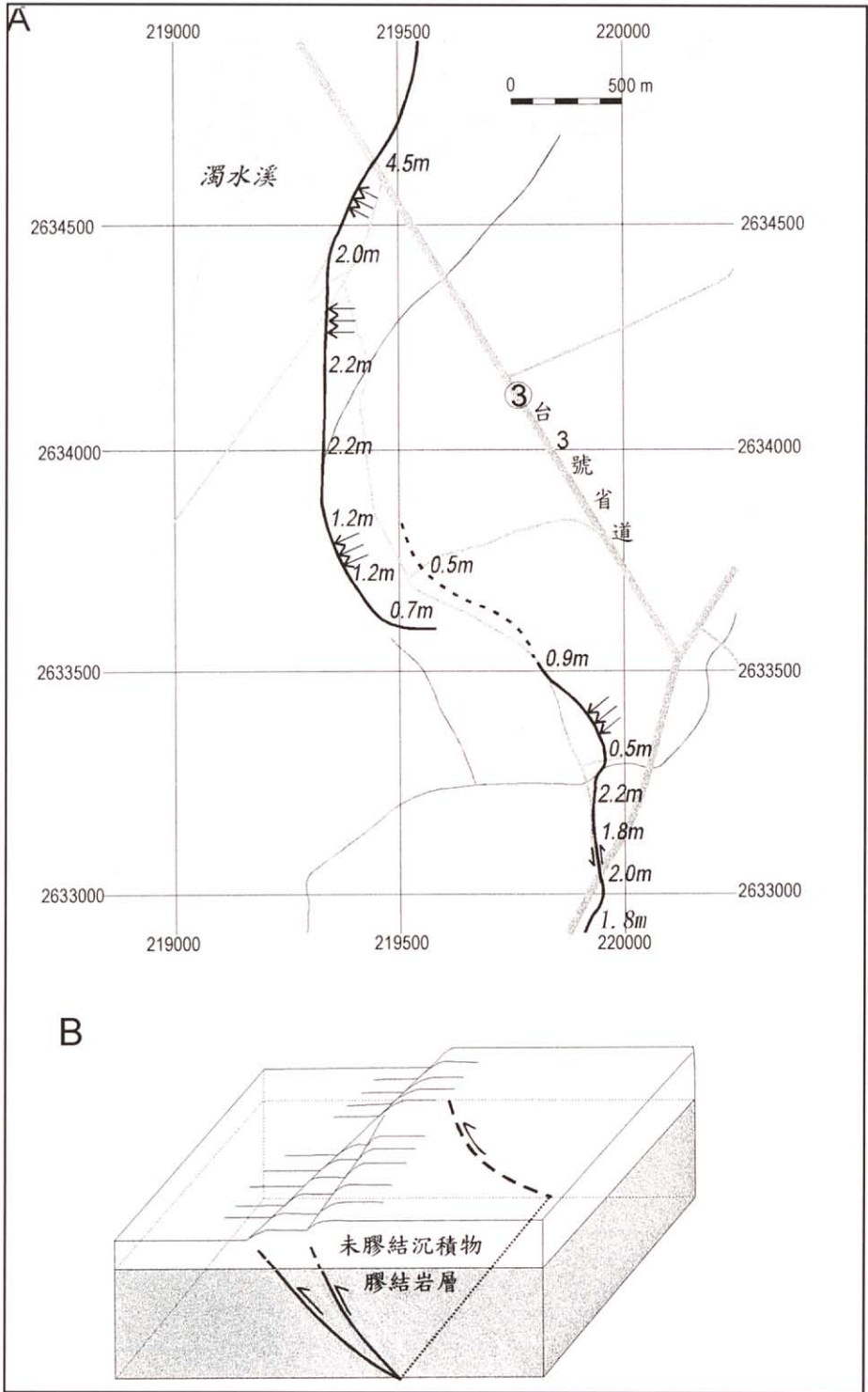
肆、集集地震斷層的破裂模式

由野外調查發現，集集地震斷層在本次地震中的變形特徵包括地表破裂及隆起，形成單斜崖或撓曲崖（flexure scarp），但未發現斷層崖（fault scarp）的露頭。這些單斜崖與撓曲崖均位處沖積層、階地或礫岩層（頭崙山層），若把這些地層當作地層的頂部，則此次在濁水溪以南的地震斷層是以盲斷層的形式展露。

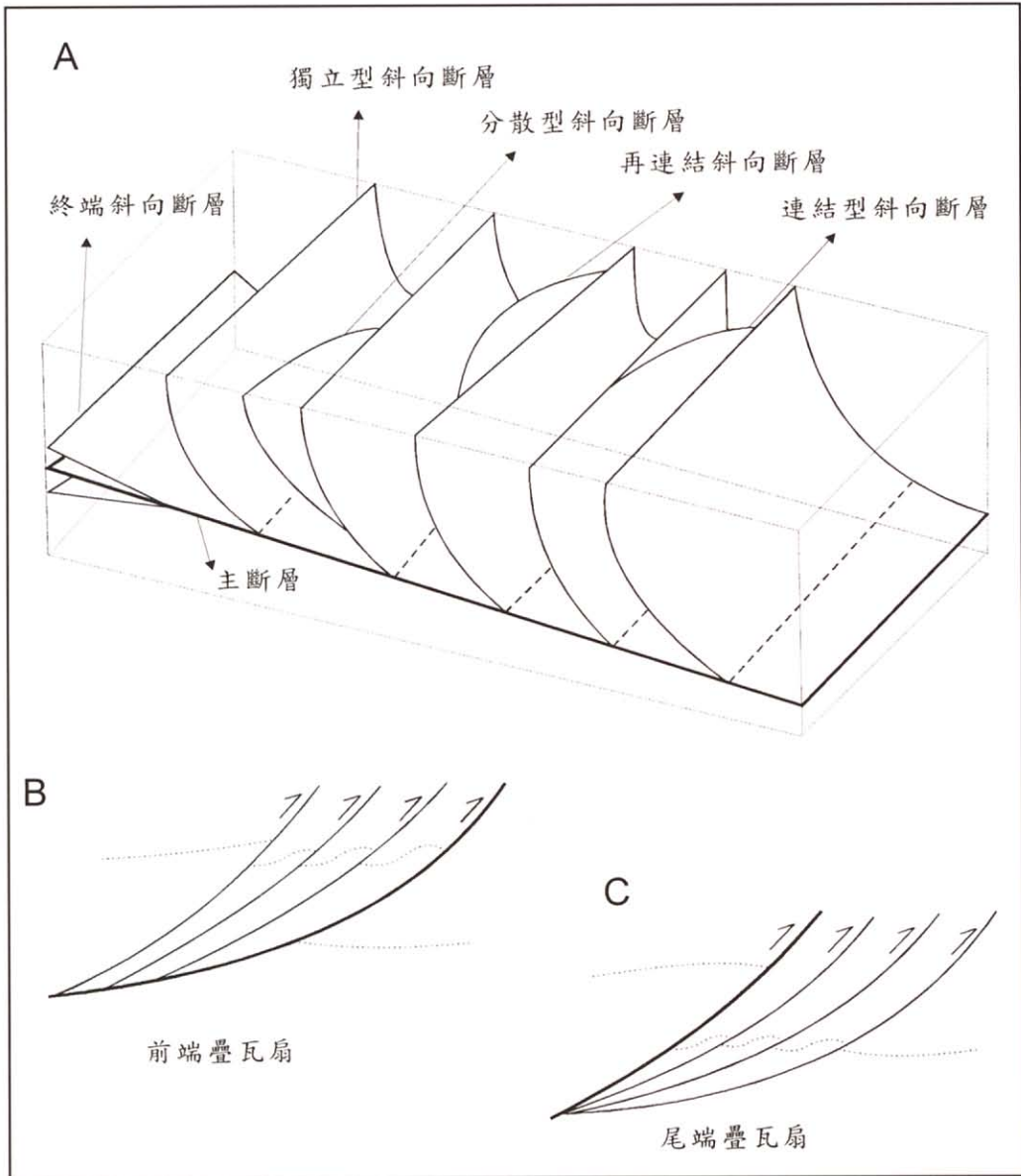
在本區明顯看出自濁水溪以南斷層錯斷名竹大橋後，單斜崖轉為南北走向，至水底寮南方已不見單斜崖（圖五）；而由他里溫往北，單斜崖向北延伸，山腳轉為西北走向，崖高逐漸減小終至不明顯；此兩條單斜崖在水底寮地區並未連接，而是各自獨立消失。此外，在此次地震中本區以北的區域，也在數個地點發現沿與地震斷層走向垂直方向常見數個平行的單斜崖的情形（如豐原市中正公園，台中市大坑南方等地），這些現象顯示此次地震斷層並非僅有一個剪動面，在很多地區是由多組滑動面所構成的剪動帶。

此種剪動帶在逆衝斷層系統（thrust system，圖六）中則包括前端疊瓦扇（leading imbricate fan）與尾端疊瓦扇（trailing imbricate fan）等兩種型態（Ramsay and Huber, 1987），前者為最前端的滑距最大，後者則是尾端的斷層滑距最大。但當斷層帶內的滑動面並非平行時，次要斷層從基底斷層分叉而分枝上方滑移時，則稱為分枝斷層（splay faults）（Ramsay and Huber, 1987），這些分枝斷層的形式包括簡單型、分散型、連結型與再連結型等多種形式（圖六）。以本區水底寮的例子來分析，由於崖線所在為地表未膠結的階地礫石層，其地下膠結岩層的破裂方式應屬前述分枝斷層中的分散型；而以隆升量作比較，兩線崖交會處附近的崖差減少，至他里溫以南未見分為兩道線崖，在地下分枝斷層應已再連結。斷層分叉作用以及分枝斷層再連結的斷層破裂模式，可以說明何以有數條單斜崖的原因。

此次地震斷層北從臺中縣豐原往南，一直延伸至本區，地表破裂及變形帶所在位置大多位丘陵區的前緣（西緣），而車籠埔斷層跡（中油公司台探總處，1986）則大多位於丘陵區西側的沖積平原（如圖一），顯示兩者的位置並不一致。再者，依照中油公司台探總處（1986）的資料，車籠埔斷層的上盤所出露的地層為桂竹林層，下盤為頭崙山層；此次地震斷層的位置大多出露錦水頁岩或卓蘭層（經濟部中央地質調查所，1999b），局部地區可見地震斷層兩側出露相同地層（例如在大甲溪河床埤豐橋附近以及台中市中台醫校西側河床，地震斷層兩側均出露錦水頁岩），顯見車籠埔斷層與集集地震斷層除了位置不同外，層位落差也不同。



圖五 竹山鎮水底寮地區破裂分析圖。圖A顯示水底寮地區的地表隆起分為兩段,各區隆升量亦不同;圖B顯示地表下斷層分叉為分枝斷層,造成兩階段隆升。斷層上盤數字為崖的相對抬升量。圖外框數字為二度分帶座標。



圖六 逆衝斷層系統斷層分叉 (fault branching) 形態 (修改自Ramsay and Huber, 1987)。
 A: 由地下主斷層分叉出的多種分枝斷層 (splay faults) 形態, 包括終端分枝斷層, 獨立型, 分散型, 連結型與再連結型。B: 終端分枝斷層中的前端疊瓦型 (leading imbricate fan), 最前端斷層的斷距最大。C: 終端分枝斷層中的後端疊瓦型 (trailing imbricate fan), 最後端斷層的斷距最大。

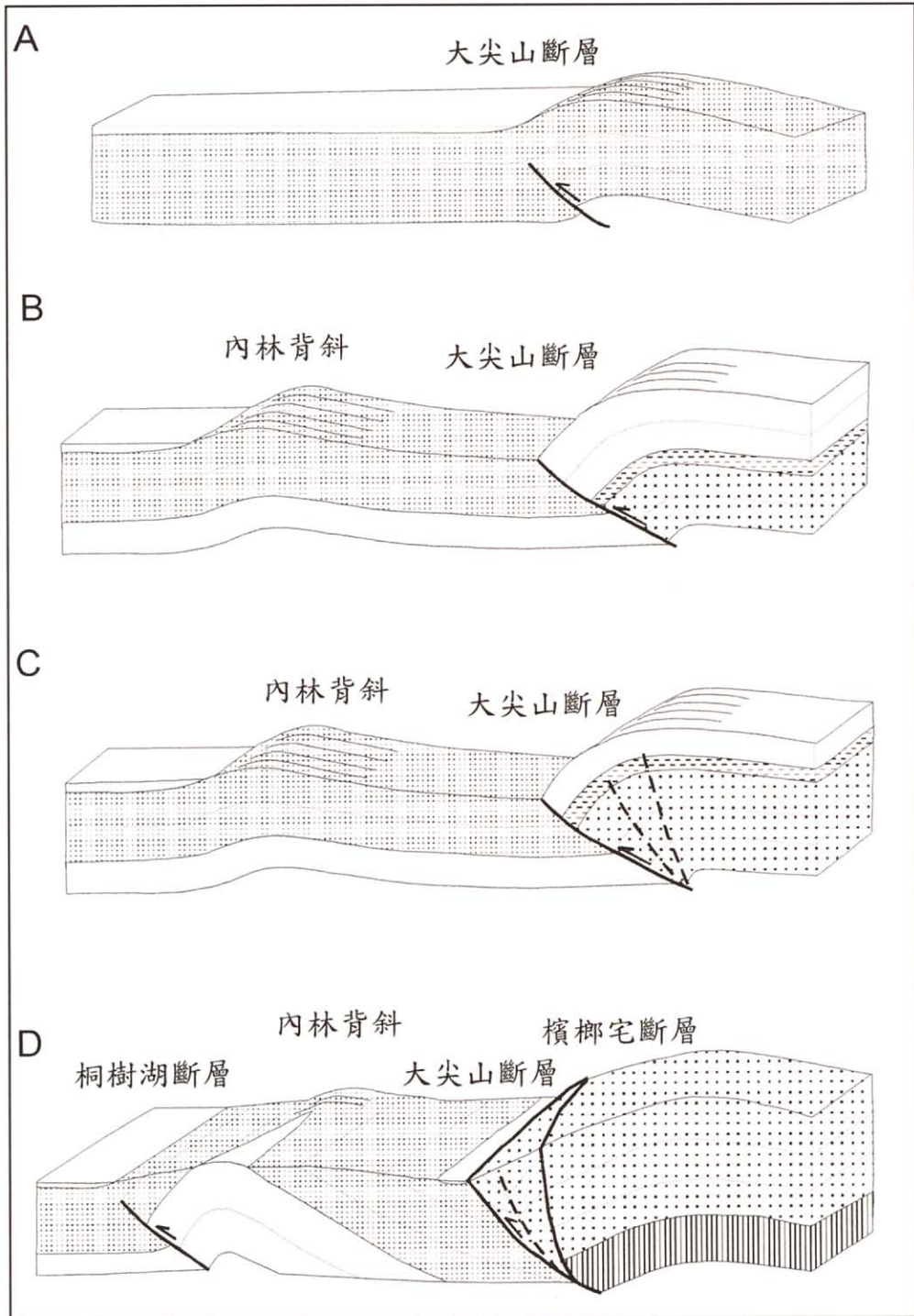
伍、討 論

車籠埔斷層與大尖山斷層

依據以往的地質調查資料，車籠埔斷層北由大甲溪南岸，約略呈南北走向，向南延伸至抄封附近（中油公司台探總處，1986；劉桓吉與李錦發，1998）；大尖山斷層則由南投縣竹山至嘉義縣觸口以南（黃鑑水等，1994；黃國聰，1996；張徽正等，1998；劉桓吉與李錦發，1998）。在這些調查資料中，中油公司台探總處（1986）及劉桓吉與李錦發（1998）認為車籠埔斷層的南端與大尖山斷層的北端，同時與一橫移斷層—鹿寮斷層連接（圖一），但未說明鹿寮斷層與兩斷層的關係、或是車籠埔斷層直接連結大尖山斷層。此兩斷層是否連接，或是不同的兩斷層，以下為作者根據地質與地震後變形特徵的討論。

就地層分布與斷層特性而言，車籠埔斷層的上盤出露桂竹林層，下盤為頭料山層（中油公司台探總處，1986），斷層兩側層位落差約2,300公尺，但斷層前緣的兩側均為沖積層、階地等未膠結之第四紀沉積物所掩覆；而此次地表的變形特徵包括斷層崖、單斜崖與撓曲崖等由北而南均相當連續，所處的位置均出露錦水頁岩及卓蘭層，顯示車籠埔斷層的主斷層並未有變形特徵。本研究亦在太平鄉頭汙坑溪—江橋附近的剖面發現此次地震斷層位置，發現一位於錦水頁岩的舊斷層帶的寬度超過500公尺，另外，在南投市南方大埤地區也發現一舊有斷層帶約500公尺寬。歸納這些結果，作者認為有兩種可能，第一種情形是車籠埔斷層的前緣可能已經沒有活動跡象，而變形作用向上盤後方遷移至錦水頁岩頂部或與卓蘭層的交界處；第二種情形則是車籠埔斷層的斷層帶逐漸擴大，由桂竹林層直至卓蘭層底部。大尖山斷層上盤出露桂竹林層，下盤為頭料山層（中油公司台探總處，1986），斷層兩側層位落差約2,400公尺，與車籠埔斷層的斷距相當；此次地震中除局部地點外，集集地震斷層的南段大致沿大尖山斷層跡的位置發生，而地震斷層僅局限於嶺腳、瑞竹至桶頭尾間有明顯的地表變形，且其隆生升量與集集地震斷層北段有明顯差異（圖四），而地表破裂帶也以視右移為主，與車籠埔斷層的逆移兼具左移現象有所不同。

由上述資料兩斷層雖有相同的斷距，但變形特徵有顯著的差異；兩斷層的交接帶—抄封至嶺腳間在此次地震中未有明顯的隆升現象，僅見平行排列的裂縫，這些裂縫的走向與鹿寮斷層平行，可以說明車籠埔斷層在抄封附近即已終止，而大尖山



圖七 濁水溪以南地區褶皺與斷層發展示意圖。A：受水平壓縮應力形成盲斷層（大尖山斷層）；B：斷層（大尖山斷層）擴展至地表，較老的地層抬升；C：軸部發育軸向破裂；D：沿軸向破裂形成次生斷層（檳榔宅斷層），變形前緣發育另一盲斷層（桐樹湖斷層）。

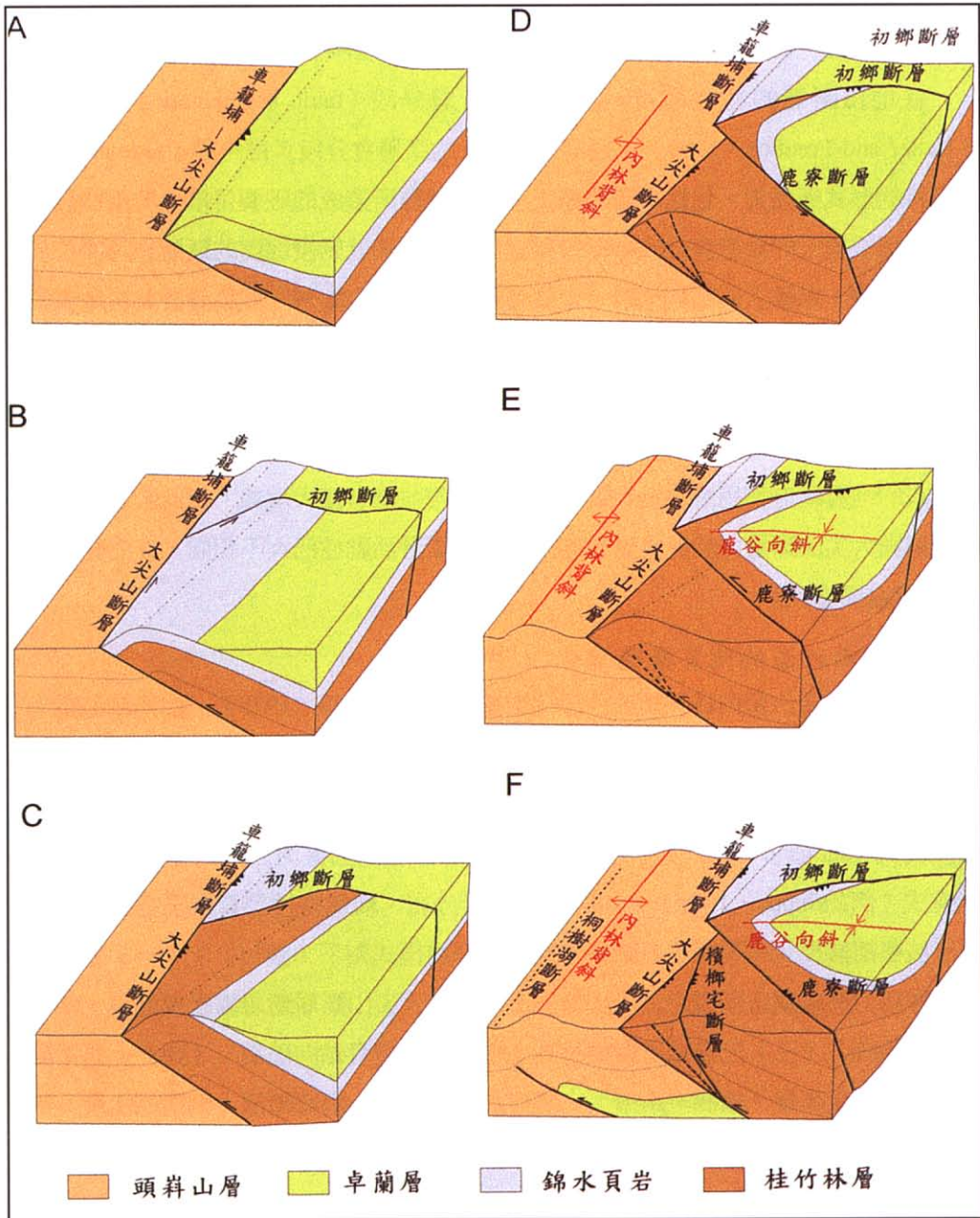
斷層在嶺腳以北亦已消失。因此，就幾何的觀點來看，兩者均與鹿寮斷層連接；而就運動學的觀點，兩者並未有相同的變形特性，而是中間有一過渡帶，這個過渡帶即為橫移斷層—鹿寮斷層，此將在下節的地質構造演化中再加以討論。

就地震斷層的特性而言，以往即有斷層分段（*fault segmentation*）的現象（*Keller and Prentice, 1996*）。通常一長度大的斷層會分段，每一段（*segment*）有其獨特的形式與歷史，包括地震的歷史。雖然地震所造成的破裂帶常止於兩個段的交界，但規模大的地震會分成多個段獨立活動，亦即就誘發地震的斷層也可能位於不同的斷層。以較大的區域來看，車籠埔斷層與大尖山斷層可能為誘發此次地震的震源斷層，由地表破裂與變形帶所代表的地震斷層來判斷，車籠埔斷層應是本次地震斷層作用的主角，其斷層作用影響範圍逐漸擴大，斷層可能為逐漸發育新的分枝斷層，或連結舊的鄰近斷層，而使斷層帶或變形帶的寬度逐漸擴大；而大尖山斷層所造成的地震斷層作用應屬於次要角色，斷層帶並未有擴大現象。以此觀之，車籠埔斷層與大尖山斷層由於鹿寮斷層的分隔，其斷層活動性已大不相同，在運動學上並非相連結的斷層。

濁水溪以南地區的地質構造演化

本區位於造山帶前緣，屬於西部褶皺衝斷帶（*何春蓀, 1975*）。由構造地質學最近的研究中，褶皺與斷層的發展情形，大致可以分為斷層擴展褶皺（*fault-propagation fold*）、斷層彎曲褶皺（*fault-bend fold*）與基底滑動（*decollement*）等三種模式（*Jamison, 1987*）。近來許多地質工作者提出臺灣西部的褶皺與斷層發展模式（例如 *Suppe, 1983*），本研究以地層分布、構造特性等資料為基礎，利用斷層擴展褶皺模式來說明本區斷層與褶皺的發展模式如下（圖七）：（一）受水平壓縮作用力形成屬盲斷層之大尖山斷層；（二）大尖山斷層斷層擴展至地表，較老的地層抬升；（三）上盤地層繼續抬升，褶皺軸部發育軸向破裂；（四）上盤褶皺軸部發育次生斷層（檳榔宅斷層），變形前緣發育另一組盲斷層（桐樹湖斷層）與擴展褶皺（內林背斜）。

利用上述的斷層與褶皺發展模式，加上區域性的地層厚度及分布、地質構造特性與斷層間的截切關係加以分析，可以下列過程來說明濁水溪以南地區的地質構造演化模式（圖八）。



圖八 車籠埔斷層與大尖山斷層的構造演化示意圖。A：車籠埔—大尖山斷層形成，並續向北擴展；B：次生左移斷層—初鄉斷層，分隔車籠埔斷層與大尖山斷層；C：大尖山斷層再次為逆滑運動；D：鹿寮斷層分隔初鄉斷層與大尖山斷層，內林背斜發育；E：發育鹿谷向斜；F：形成檳榔宅斷層與桐樹湖斷層。

- 一、當板塊作用力傳遞至本區時，首先形成逆滑的車籠埔－大尖山斷層，此時兩斷層仍未分隔，主要露出地表的滑動面位於桂竹林層內（圖八A），斷層並持續向北方擴展。當作用力持續時，原先以逆滑作用為主的車籠埔－大尖山斷層轉為帶左移分量，並形成分叉斷層（branch fault），新形成的次級斷層（second-order fault）為初鄉斷層（圖八B），其主要為左移運動，並分隔車籠埔斷層與大尖山斷層。
- 二、當左移分量減少時，再度轉為逆滑斷層作用，初鄉斷層南側的大尖山斷層上盤持續抬升，大尖山斷層的上盤出露桂竹林層（圖八C）。由於來自東南方的構造作用力持續，此時形成以左移運動為主的鹿寮斷層，並分隔大尖山斷層與初鄉斷層（圖八D），而初鄉斷層則轉為逆滑作用為主，此時大尖山斷層下盤（西側）開始發育內林背斜。
- 三、鹿寮斷層的持續作用，使其與初鄉斷層間形成寬緩的鹿谷向斜，內林背斜的振幅與規模則逐漸加大（圖八E）。當鹿寮斷層的左移作用逐漸減弱時，本區再度以橫向壓縮作用為主，大尖山斷層的上盤發育檳榔宅斷層（圖八F），內林背斜的持續發育其西緣則有盲斷層－桐樹湖斷層發育。

由震測與地下鑽井資料（中油公司坪頂一號井與梅林一號井）結果，證實低角度、伸向西方的盲斷層－桐樹湖斷層位於大尖山斷層的西方，此說明本區可能進入另一斷層擴展褶皺的階段，亦即代表臺灣西部的變形前緣（deformation front）正向西遷移。

陸、結 論

九二一地震在濁水溪至南投縣竹山鎮桶頭所形成的的地表破裂與變形帶，由於與車籠埔斷層的位置有所差異，本文暫稱此變形帶為集集地震斷層。地震斷層以竹山鎮南方之抄封為界可分為南、北兩段，北段由濁水溪的名竹大橋經水底寮、他里溫、外埔子橋、延平、圳頭坑、三塊厝至抄封，大致上呈南北向，長約13公里。地震斷層南段由嶺腳經流藤坪、山坪頂、瑞竹、林頂、桶頭至桶頭尾，呈東北西南走向，約11公里長。北段地震斷層位於車籠埔斷層斷層的上盤，南段地震斷層與則與大尖山斷層北段密切相關，然而集集地震斷層與這兩條斷層的斷層跡位置並非一致。

本區地震的變形特徵包括地表破裂與隆起，形成單斜崖或撓曲崖（flexure scarp），但未發現斷層崖露頭，也就是斷層面均未出露地表。由野外資料與斷層模式推斷，地底下由多組剪動面構成剪動帶，這些剪動面則為分枝斷層的形式。由於線崖所在為地表未膠結的階地礫石層，其地下膠結岩層的破裂方式應屬前述分枝斷層中的分散型，而以隆升量作比較，兩線崖交會處附近的崖差減少，至他里溫以南未見分為兩道線崖，在地下分枝斷層應已再連結。分叉斷層與斜開斷層的再連結的斷層破裂模式，可以說明何以單斜崖有數道的原因。

由斷層擴展褶皺的模式，濁水溪以南地區可能的地質構造演化為：

- 一、首先形成逆滑的車籠埔—大尖山斷層，此時兩斷層仍未分隔。其後，車籠埔—大尖山斷層轉為帶左移分量，並形成次級斷層之初鄉斷層並分隔車籠埔斷層與大尖山斷層。
- 二、以左移運動為主的鹿寮斷層，並分隔大尖山斷層與初鄉斷層，大尖山斷層下盤開始發育內林背斜。
- 三、鹿寮斷層的持續作用，形成鹿谷向斜。之後，大尖山斷層的上盤發育檳榔宅斷層，內林背斜西緣發育桐樹湖斷層。當低角度、伸向西方的盲斷層—桐樹湖斷層在震測與地下鑽井資料被證實時，此即進入另一斷層擴展褶皺的循環，也就代表臺灣西部的變形前緣正向西遷移。

誌 謝

本研究調查期間蒙本所區域地質組陳致言、李元希、吳維毓、謝孟龍等先生協助野外地質調查，作者敬致謝忱。

參考文獻

- 中國石油公司臺探總處（1982）。台中地質圖，比例尺十萬分之一，中國石油公司出版。
- 中國石油公司臺探總處（1986）。嘉義地質圖，比例尺十萬分之一，中國石油公司出版。
- 何春蓀（1959）。臺灣中部台中與南投間之逆衝斷層構造。臺灣省地質調查所彙刊，第 11 號，13-20 頁。
- 何春蓀（1975）。臺灣地質概論，臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，共 118 頁。
- 何春蓀（1982）。臺灣地體構造的演變，臺灣地體構造圖說明書。經濟部，共 110 頁。

- 林朝榮（1957）。臺灣地形。臺灣省文獻委員會，共 424 頁。
- 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）。台灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊第十號，共 103 頁。
- 黃國聰（1996）。台灣西南部麓山帶構造地形之初步研究。中央大學碩士論文，共 114 頁。
- 黃鑑水、張憲卿、劉桓吉（1994）。台灣南部觸口斷層地質調查與探勘。經濟部中央地質調查所彙刊，第九號，29-50 頁。
- 楊貴三（1986）。臺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，共 178 頁。
- 經濟部中央地質調查所（1999a）。車籠埔斷層沿線地表破裂分布圖，比例尺二萬五千分之一。經濟部中央地質調查所出版。
- 經濟部中央地質調查所（1999b）。九二一地震地質調查報告。經濟部中央地質調查所出版。
- 劉桓吉、李錦發（1998）。雲林圖幅及說明書，五萬分之一臺灣地質圖，第三十八號。經濟部中央地質調查所出版。
- Chang, S. L. (1971). Subsurface geologic study of the Taichung basin. *Petrol. Geol. Taiwan*, no.8, 21-45.
- Ho, C. S. (1976). Foothill tectonics of Taiwan. *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, no. 25, 9-28.
- Keller, E. A. and Prentice, N. (1996). *Active tectonics: Earthquake, Uplift and Landscarp*. Prentice Hall, 338pp.
- Jamison, W. R. (1987). Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *J. Structural Geology* 9, 207-219.
- Lee, T. S. (1949). The topographic reflection of subsurface structures as shown by the gravity anomaly in the western plain of Taiwan. *Chinese Geophys. Soc. Jour.*, vol. 1, no. 2, 205-212.
- Pan, Y. S. (1967). Interpretation and seismic coordination of the Bouguer gravity anomalies over west-central Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, no.5, 99-115.
- Ramsay, J. G. and Huber, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology, Vol.2: Folds and Fractures*. Academic Press, London, 700pp.
- Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Am. J. Sci.* 283, 684-721.

圖版一 集集地震斷層北段在此次地震所形成的崖。



A. 濁水溪河床（圖二，名竹大橋東北方）地震斷層所形成的崖，崖兩側高差約2.0~4.5公尺。



B. 水底寮西方茶園（圖二，CLP04）地震斷層所形成的崖，崖兩側高差約1.7~2.2公尺。



C. 水底寮西方菸葉田（圖二，CLP06）地震斷層所形成的崖，崖兩側高差約0.7~1.2公尺。

圖版二



A. 集集地震斷層北段在抄封東北方因地震所形成的崖，崖兩側高差約0.4公尺。



B. 集集地震斷層南段在嶺腳北方因地震所形成的崖，崖兩側高差約0.2公尺。



C. 集集地震斷層南段在嶺腳（圖三，TCS01）因地震所形成的崖，崖兩側高差約1.5公尺。

圖版三 集集地震斷層南段此次地震所形成的崖。



A. 坪頂台地上（圖三，TCS05）地震斷層所形成的崖，崖兩側高差約0.4~0.6公尺。



B. 桶頭附近（圖三，TCS06）地震斷層穿越清水溪錯斷桶頭橋與河堤。



C. 地震斷層錯斷安溪橋（圖三，TCS07），崖兩側高差約0.5公尺。

THE CHI-CHI EARTHQUAKE FAULT AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE AREA SOUTH OF CHOSHUIHSI, CENTRAL TAIWAN

Chii-Wen Lin¹, Shih-Ting Lu¹, Wen-Jen Huang¹, Tung-Sheng Shih¹,
and Hui-Cheng Chang¹

ABSTRACT

The Chi-Chi earthquake struck central Taiwan at 01:47 am local time on September 21, 1999. The surface ruptures and deformation in the area south of Choshuihsi, from Choushui to Tongtuo, were temporarily called the Chi-Chi earthquake fault in this event. It can be divided into two segments with the boundary between them at Chowfong, Chushan. The northern segment of the fault trace strikes in the north-south direction extending about 13 km, and is located on the hanging wall of the so-called Chelungpu fault where the Pliocene Chinshui Shale and Cholan Formation are exposed. The southern segment of the fault trace strikes in the northeast direction and has an extension of about 11 km in length. This segment of the fault trace is located more or less along the so-called Tachienshan fault where the Miocene to Pliocene Kuechulin Formation is exposed on its hanging wall and the Pleistocene Tokoshan Formation is exposed on its footwall.

The structural characteristics of the Chi-Chi earthquake fault in this earthquake event include surface ruptures, monoclines and flexure scarps but not fault scarps. Though these monoclines and flexure scarps are not interconnected in some locations, some step-like scarps make up the wide deformation zone. Based on field data, the authors present a fracture model which shows that the Chi-Chi earthquake fault may consist of imbricate shear planes beneath these scarps. Splay faults, i.e. small secondary faults branching from the underground main Chelungpu fault under the ground, reasonably account for the phenomena of several step-like scarps at various locations as well as the Chi-Chi earthquake fault's location on the hanging wall of the main fault. Therefore, it is suggested that the location of the geologic fault is not the same as that of the earthquake fault in this earthquake event.

Based on stratigraphy and structural association, one possible explanation for the structural evolution of the area south of Choshuihsi is also presented.

Key words: Chichi earthquake, Earthquake fault, Structural analysis

1. Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan ROC

