

國立臺灣大學地質學研究所

碩士論文

Department of Geosciences

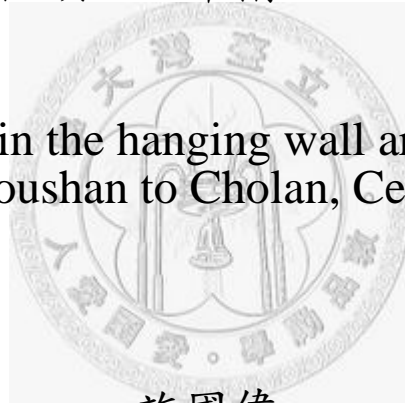
College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

三義斷層上盤區域活動構造之研究
以枕頭山—卓蘭地區為例

Active tectonics in the hanging wall area of Sanyi fault:
from Chentoushan to Cholan, Central Taiwan



施國偉

Kuo-Wei Shi

指導教授：陳于高 博士

Advisor: Yue-Gau Chen, Ph.D.

中華民國 97 年 7 月

July, 2008

國立台灣大學碩士學位論文考試

題目：

三義斷層上盤區域活動構造之研究
以枕頭山—卓蘭地區為例

Active tectonics in the hanging wall area of Sanyi fault:
from Chentoushan to Cholan, Central Taiwan

考試委員：

羅偉

洪如亭

柯建興

林裕文

陳于高

指導教授：陳于高 博士

研究生：施國偉

考試日期：中華民國九十七年七月

致謝

由大學到現今，首先要感謝羅偉老師對於學生提攜，在百忙之中還抽空當學生口試委員，讓我在大二那年，開始由野外工作中培養對於地質科學的熱誠；接下來要感謝吳樂群老師，在課暇之餘讓學生可以任意使用您你電腦來抒發情緒，對於課業上亦傾囊相授，令學生受益無窮，於大四那年承蒙您區域地質的授課，也學生得以一窺地質學真正的奧妙。在研究過程，感謝黃旭燦老師在中油熱心招待以及誠心的教誨，讓學生頓悟震測剖面解釋與其精隨，亦感謝楊耿明老師對於學生一路提攜、討論與肯定，讓學生重新找回自信心。亦感謝各口試委員洪日豪老師、林啓文老師撥控修改學生很多錯字的論文。最後感謝的是恩師-陳于高老師，在生活上他容忍學生兩年來發生為數不清的罪行，於學業上亦開起學生對於研究方面不同的視野，讓學生頓悟了『師傅引進門，修行在個人』這句話的真諦。

在來要感謝所有幫助過我的朋友以及文化、台大各學長以及學姊以及恬恬、顏色、sep、瑋廷、玉梅以及研究室成員小眼學長、阿何學長、林蔭學長、靜姿學姊、液晶、fish、以偉兩年的照顧；另外感謝破濃學長，對於地形圖判釋以及報告時應注意的小細節；感謝感謝黃鐘學長在2D Move精闢的解釋；感謝鳴哥對於我兩年的照顧，在心理上以及研究方法上無怨悔的教導；感謝玉儂學姊，在我剛進研究時給予我諸多鼓勵；感謝王昱學長對於研究上討論以及最後口試時論文的投影片修訂；感謝勺子學姊在我第一次與布萊恩出野時，耐心的教我入門，以及帶我一同體驗力行產業道路之旅；感謝小黑學姊八卦上的交手以及陪我出野外採樣；感謝鹹蛋學長耐心與我討論論文方向；感謝小p學姊與郭人偉學長一路情義相挺；感謝康康學長對於我長年的照顧。

在台大生活上感謝宜蓉，在我剛進入台大時，讓我能真正融入這個體系，謝謝您所有的幫忙與照顧，亦謝謝您的筆記讓我能順利考取功名。在研究上感謝ray，謝謝你一年半的教導與照顧，讓我明白如何論文要的方向在哪，也讓我真正進入狀況。

感謝我的家人，對於我從小到大無理取鬧的容忍。最後感謝我的女友，幀雯，無論刮風淋雨皆對我無微不至的照顧長伴左右，讓我能夠專心完成學業，謝謝您。

摘要

大安溪北岸枕頭山至卓蘭一帶河階地形發達，附近也有多條活動構造，可見此區域構造運動活躍。此區域位於三義斷層與車籠埔斷層（九二一地震斷層）兩條主要構造之間，此外，這兩條主要斷層之間仍存在有其他活動構造一如枕頭山斷層與內灣背斜。本研究分析地表地形方面主要利用 40 公尺 DEM（Digital Elevation Model）作為基礎，配合五千分之一航空照片與野外調查，根據地形面分析，大安溪北岸階地主要分為兩大群：群組一為紅土化階地；群組二為未紅土化階地。

在群組一階地群主要有枕頭山斷層線崖可被判釋出，而在過去研究將該斷層視為 1935 年屯子腳地震斷層往北延伸，本研究經由地形分析與野外觀察，認為枕頭山斷層是一條逆衝為主的斷層，與右移的屯子腳地震斷層有所差異；在地下震測剖面亦顯示屯子腳地震斷層源於三義斷層下盤深處之一條正斷層，斷層面向西北傾，反之，枕頭山斷層為三義斷層上盤一分支斷層，斷層面向東南傾，因此兩條斷層無論是斷層面幾合型貌、運動特性、以及構造層位皆大為不同，只是在平面上看似線性關係。

此外，本研究利用河流剖面與震測剖面結合，可以模擬地下構造與地形演育之間的動力學模型。研究顯示在群組一階地面形成之後，三義斷層與枕頭山斷層分別位移 300 公尺與 116 公尺。而群組二階地，由航照判釋可判釋出在 921 地震之前曾受構造活動而變形，但確切的初始活動年代則須進一步作定年研究才可釐清。

根據構造演化推演結果，此區域內西半部紅土階地演育與主要受三義斷層與枕頭山斷層所主導，東半部未紅土化階地則受內灣背斜及內灣向斜所影響。

Abstract

In the area between Chentoushan and Cholan, Central Taiwan, a series of river terraces have been developed along the northern bank of the Taan River. There are several previously proposed active structures in this area, including the Sanyi fault, Chelungpu fault i.e., (1999 Chi-Chi earthquake fault), and Chentoushan fault. By using DEM (Digital Elevation Model), aerial photographs, and field investigations, these terraces are remapped and then categorized into two groups: lateritic group and non-lateritic group to the west and east respectively. The result of detailed mapping suggests that the Chentoushan fault (CTSF) is thrust dominant rather than strike slip dominant with a fault line scarp of 70 m in height, entirely different from that of the 1935 Tuntzuchiaio fault (TTCF) which is dextral strike-slip fault with a fault scarp of only 3 m. From seismic profile, a pre-existing normal fault is considered as the subsurface extension of TTCF. On the other hand, the CTSF is a branch fault, generated from the deeper part of the Sanyi fault. Based on this three-dimensional relationship and kinematic analysis, the above-mentioned two faults are not the same fault as suggested before, but only similarly oriented on the ground surface.

Integrating geomorphic feature mapping and structural profile constructed from published seismic profiles, a kinematic model of the Sanyi fault and Chentoushan fault is presented in this study. From our modeling result, the slip of Sanyi fault has reached 300 m after the formation of the terrace Lt1. Based on the riser offset of the terraces, fault slip of 116 m can be derived along Chentoushan fault. According to aerial photo analysis, the non-lateritic terraces have been tilted by Neiwan anticline and Neiwan syncline prior to the Chi-Chi earthquake; however, age data are needed in the future study to define the ages of the terraces. On the other hand, the western lateritic terraces are deformed by Sanyi and Chentoushan faults.

摘要.....	III
Abstract.....	IV
第一章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究區域概況.....	3
1.4 大地構造架構.....	5
1.5 區域地質.....	5
1.6 地表地質相關研究.....	6
1.6.1 三義斷層.....	6
1.6.2 枕頭山斷層.....	8
1.6.3 1999 集集地震斷層（埤豐橋以東至卓蘭地區）.....	11
第二章 研究方法	13
2.1 研究架構.....	13
2.1 地表地形分析.....	14
2.1.1 構造地形判釋.....	14
2.1.2 數值高程模型與航空照片.....	16
2.1.3 階地投影.....	18
2.2 地下構造分析.....	18
2.2.1 震測剖面.....	18
2.2.2 構造回復.....	18
第三章 研究結果	20
3.1 地形面分析.....	20
3.2 構造地形判釋.....	21
3.2.1 枕頭山線型與野外調查結果.....	21
3.2.2 下太平到西坪沿線與野外調查.....	29
3.2.3 卓蘭至內灣階地群分析與野外調查.....	32
3.3 階地投影與震測剖面資料結合.....	34
3.3.1 剖面回覆.....	40
第四章 討論.....	44

4.1 枕頭山斷層.....	44
4.2 枕頭山斷層與屯子腳地震斷層之間的關聯性.....	45
4.3 枕頭山地區之地質製圖.....	47
4.4 主要構造演化過程.....	49
4.5 新構造活動與河階地形之發育.....	51
4.6 三義斷層長期滑移速率.....	55
第五章 結論.....	57
參考文獻.....	58



圖目錄

圖一：紅色方框為本研究區域位置圖。.....	2
圖二：研究區域主要構造線。.....	4
圖三：1935 年台中新竹強震圖（大塚彌之助，1936）。.....	9
圖四：大安溪流域地形特徵判釋圖（Qta et al., 2006 a；2006b）。.....	10
圖五：台中盆地北側地下構造 3D 圖（黃鐘，2007）。.....	12
圖六：研究流程圖。.....	13
圖七：斷層活動所造成地表變形特徵（Wesson et al.,1975）。.....	16
圖八：Arc GIS 所提供地表分析功能。.....	17
圖九：曲滑褶皺回復示意圖.....	19
圖十：研究區域階地分布圖。.....	20
圖十一：枕頭山線型航空照片。.....	22
圖十二：枕頭山地區地形分布圖。.....	23
圖十三：紅土化階地礫石層對比色卡。.....	24
圖十四：枕頭山斷層露頭。.....	25
圖十五：枕頭山斷層滑移距離估算圖。.....	26
圖十六：枕頭山斷層滑移距離估算（Dip slip）圖。.....	28
圖十七：枕頭山地區 1/5000 像片基本圖。.....	28
圖十八：階地不整合覆蓋於卓蘭層（CL）之上。.....	30
圖十九：階地不整合覆蓋於卓蘭層（CL）之上。.....	31
圖二十：卓蘭 - 內灣地區河階群與活動構造分布圖。.....	34
圖二十一：大安溪河流剖面投影圖。.....	36
圖二十二：原始震測資料圖（Hung & Wiltschko, 1993）。.....	37
圖二十三：震測解釋（Hung & Wiltschko, 1993）。.....	37
圖二十四：震測解釋（楊耿明等，2000，2003；Yang et al., 2007）。.....	38
圖二十五：原始構造平衡剖面圖.....	43
圖二十六：大安溪流域震測構造圖（修改自林玉濃，2005）。.....	46
圖二十七：枕頭山與其鄰近地區之地質圖。.....	48
圖二十八：枕頭山地區山崩事件圖。.....	48
圖二十九：區域構造演化圖。.....	51
圖三十：枕頭山地區階地演化圖。.....	52
圖三十一：枕頭山斷層上盤出露礫層。.....	53
圖三十二：大安溪流域階地與地下構造剖面圖。.....	55

表目錄

表一、活動斷層反映的地形構造與其特徵（石再添，1982）。.....	15
表二、枕頭山 - 卓蘭一帶河階分布表。.....	21

第一章 緒論

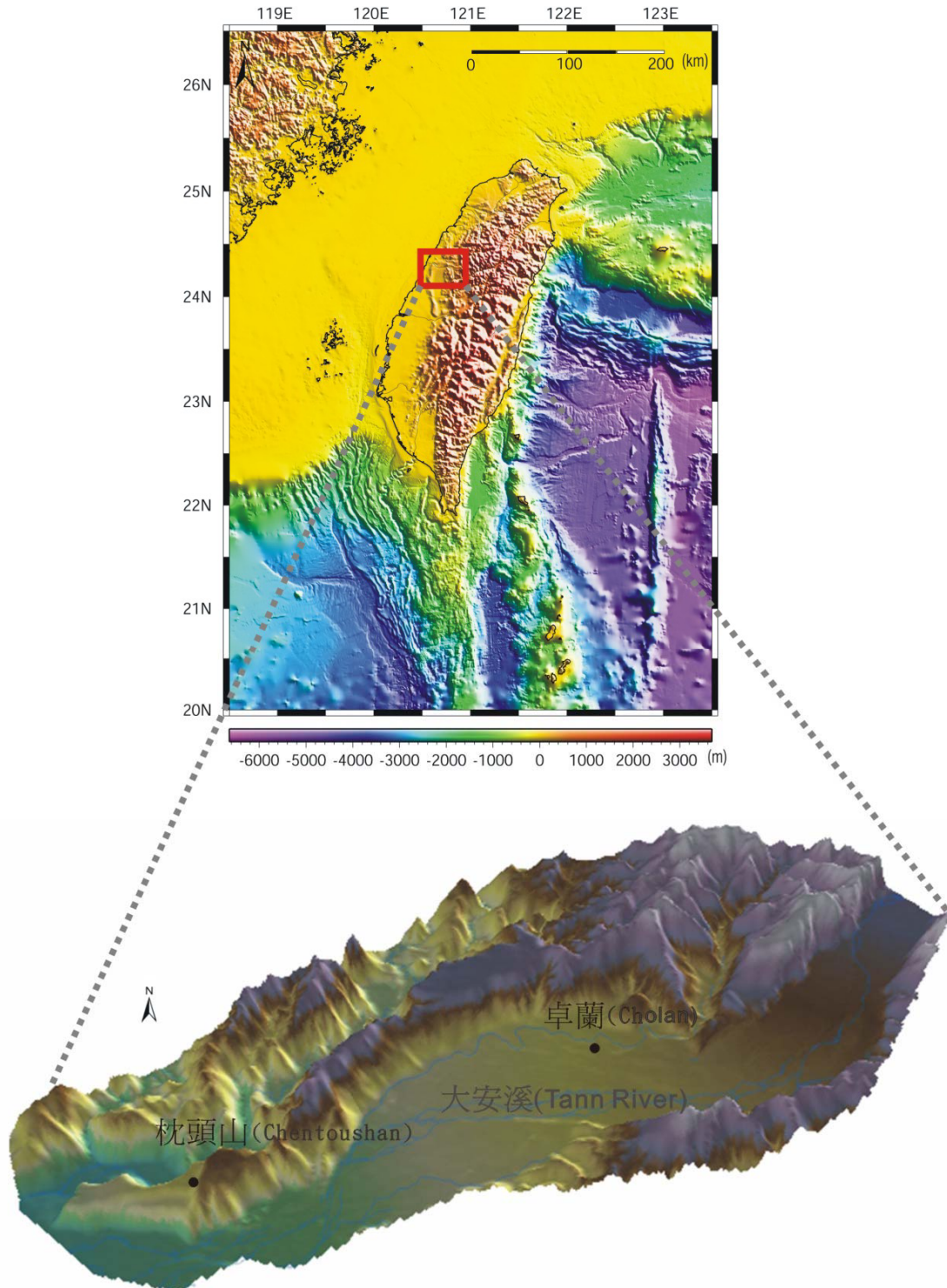
1.1 研究動機

台灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊的交界處，是一個新期構造運動非常活躍的地區。對於居住在這片土地上的居民而言，地震頻繁的發生與所引起的相關地質災害時而危害著其生命財產安全，也為經歷過這些災害的災民帶來許多身心上的衝擊。在所有的地震災害中，又以近地表斷層錯動以及地殼變形所造成的破壞最為嚴重，因此了解台灣陸上發震構造與評估地質災害的潛在影響甚為重要。在 1999 年集集地震發生之後，國內外地質學家紛紛投入相關之研究，也使得我們對於活動構造的研究與關注日益增加。

台灣的西部麓山帶為一褶皺－逆衝造山帶，在中部地區麓山帶前緣的主要斷層則為車籠埔斷層與三義斷層，以往的研究中認為車籠埔斷層位於麓山帶前緣呈現南北走向，往北連接三義斷層，而三義斷層北段在三義以北轉為近東西走向。然而在 1999 年集集地震，主要的地表破裂沿著車籠埔斷層呈南北走向，但在經過石岡附近之後卻轉為東北－西南走向，這與以前認知的往北連接三義斷層有所衝突。三義斷層從日據時代起便開始受到關注，車籠埔斷層亦在集集地震之後廣為學者所研究，然而這兩個構造之間的區域則未被詳細探討。此區域內有枕頭山斷層、東勢背斜與內灣向斜等構造通過，加上三義斷層、車籠埔斷層、西南邊的屯子腳等斷層分布，顯示此區域的新期構造運動模式深深受到這些活動構造的影響。故欲反演新期構造的作用歷程，有必要研究此區域的構造。此外在大安溪北岸枕頭山至卓蘭一帶的河階地形相當發達（圖一），這些河階至今並未被作有條理的分類，其成因也未被詳細的探討過。

由於此區域內有許多的河階分布，正好提供了新期構造運動研究的良好素材，加上這一區域也有已發表之震測剖面，亦給予良好的地下構造之控制。因此

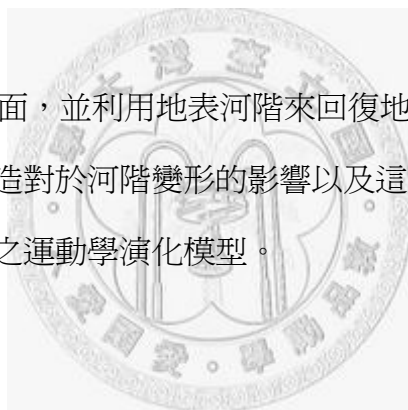
本研究希望藉由對河階之地形的解剖與地質的分析，配合震測剖面對此區域內各構造的活動方式與特性作進一步的釐清，並了解河階抬升與構造活動之間的相互關係。



圖一：紅色方框為本研究區域位置圖。下圖為研究區域 3D 立體地形圖。垂直放大倍率 5 倍倍率。

1.2 研究目的

- (1) 利用數值地形模型、航空照片與野外地質調查，來分析研究區域內的河階分布與變形程度，並進行河階對比。
- (2) 透過地形分析與野外調查來確認區域內之地質構造，如枕頭山斷層的活動方式與活動性。
- (3) 藉由地下震測剖面，將地下構造幾何型態和地表地形特徵相結合，釐清地下構造與地表地形之間的關係。
- (4) 重新檢視構造平衡剖面，並利用地表河階來回復地下幾何構造模型，以推測階地形成後，主要構造對於河階變形的影響以及這些構造的活動量，進而建立研究區的地質構造之運動學演化模型。

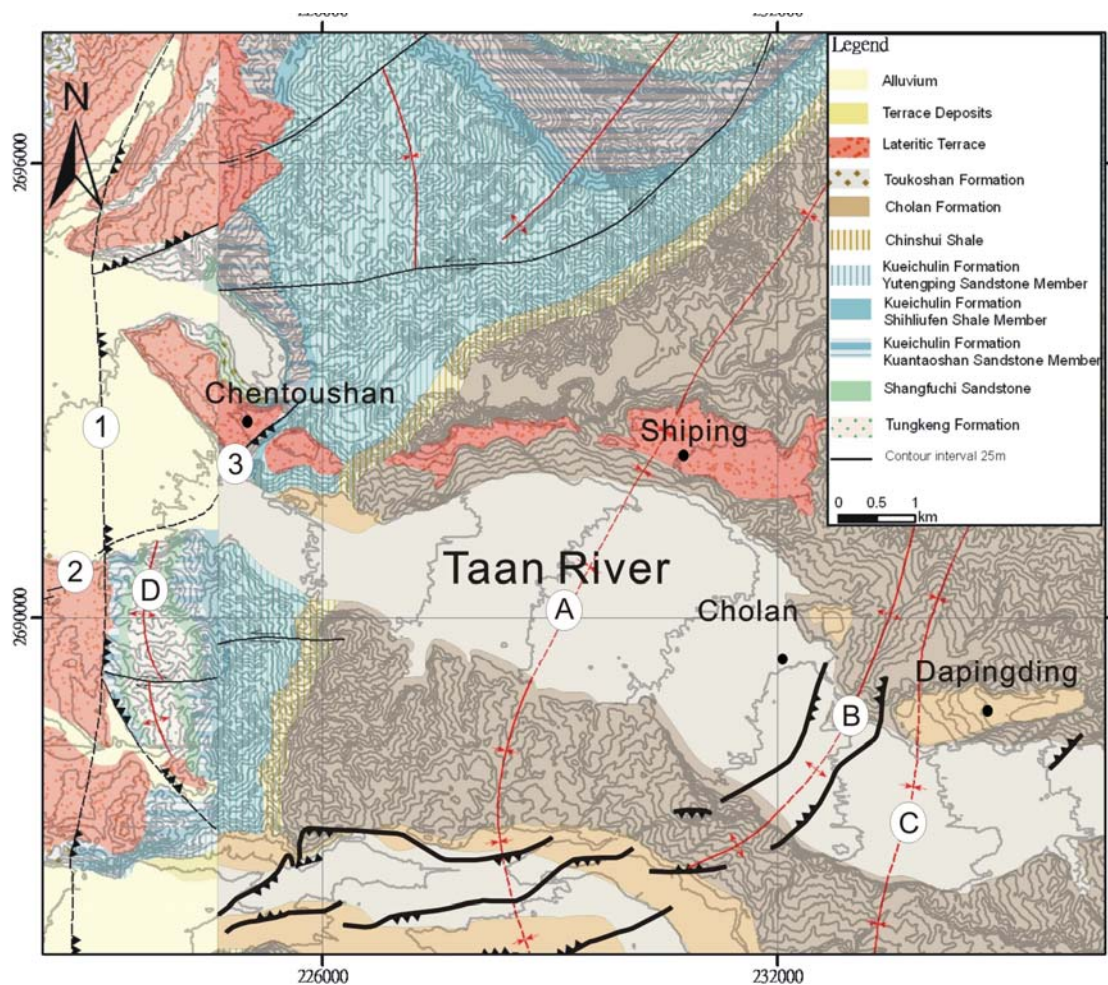


1.3 研究區域概況

本研究以三義斷層南段上盤區域為主要研究區，並針對大安溪北岸枕頭山至卓蘭之間的河階群進行主要的地表分析。本研究區位於苗栗縣三義鎮至卓蘭鎮，其範圍東西寬約為 14 公里，南北長約為 6 公里，南側緊鄰大安溪流域（圖二）。大安溪往西流經內灣之後流幅變寬，於卓蘭一帶形成廣大的現代沖積層與數階的

階地礫石層。奇特的是這些為數不少的階地礫石層僅保存於大安溪北岸，在南岸並不見任何可對比到北岸的河階。

這一群階地中，西半部階地大多數為廣大紅土化階地，東半部則有數階未紅土化階地，且東半部階地普遍較西半部來得狹小，高度上則以最東側大坪頂面為最高。各紅土階地的紅土化域程度皆在 3 至 5 公尺不等的厚度，根據 1935 年關刀山大地震的地震斷層調查（大塚彌之助，1936），這些紅土化階地的階地崖亦多發生山崩與地滑。



圖二：研究區域主要構造線。(1) 屯子腳地震斷層 (Tungtzuchaio fault) (TTCF)；(2) 三義斷層 (Sanyi fault)；(3) 枕頭山斷層 (Chentoushan fault)；(A) 石圍牆向斜 (Shihweichiang Syncline) (Sw Syn)；(B) 內灣背斜 (Neiwan Anticline) (Nw Anti)；(C) 內灣向斜 (Neiwan Syncline) (Nw Syn)；(D) 大安背斜 (Taan Anticline)；粗黑線為集集地震斷層地表破裂線。〔圖中枕頭山斷層線位置有修訂其餘參考東勢圖幅（李錦發，2000），大甲圖幅（張憲卿，1994）〕。

1.4 大地構造架構

台灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的交界，在東北邊菲律賓板塊隱沒至歐亞板塊之下形成琉球海溝，在西南邊則是歐亞板塊的南中國海部份隱沒於菲律賓海板塊之下形成馬尼拉海溝，相對來說，菲律賓板塊以每年約 82 mm/yr 的速率朝西北方往歐亞板塊移動 (Yu *et al.*, 1997)。由於兩板塊間快速地聚合，加上隱沒作用所形成之呂宋火山島弧與歐亞大陸邊緣相互碰撞，使得台灣島經歷了數百萬年的造山作用，並持續不斷隆起 (Teng, 1990)。從現今快速的地表變形與頻繁的地震活動，都可以看出台灣島的造山運動仍然十分活躍。

由於快速的板塊聚合與活躍的造山運動，使得台灣區域有許多的活動構造，百年以來也發生了十次以上的破壞性大地震。集集地震之後，有許多有關於活動構造的研究，並且有數個活動斷層圖已被發表 (林啓文等, 2000; 林啓文等, 2007; Shyu *et al.*, 2005)。根據 Shyu 等人 (2005) 的活動構造圖顯示，本研究區位於其分類的苗栗區塊與台中區塊交界，也正是完全碰撞 (full collision) 與成熟碰撞 (mature collision) 的交界轉型帶。

1.5 區域地質

現今台灣中部麓山帶地質構造為一典型覆瓦狀排列的褶皺-逆衝斷層帶，地層尚未受到變質作用，但已受到開放性褶皺作用而變形。整個麓山帶的褶皺-逆衝帶大致走向為北北東-南南西，平面外型呈現 S 型彎曲。本研究區在台灣中部麓山帶地質於屬於台中盆地範圍，海拔最高不超過 510 公尺，屬於林朝棨 (1957) 地形分區之中「西部衝上斷層山地」。晚中新世以來，弧陸碰撞造成山脈抬升，亦造成山脈的剝蝕速度，同時也在山脈前緣形成急速沉降的前陸盆地，這些盆地也同時記錄到各時期不同造山時期的沉積物 (林朝棨等, 1978)。陳振華等 (1992) 與陳振華 (1993) 利用岩象分析台灣中部造山帶構造與前陸盆地形成時間約為中

新世晚期至上新世早期。陳文山（2000b）再藉由分析盆地內砂岩岩相組合，分析台中盆地的演化過程，推估車籠埔斷層（三義斷層）約在 0.7 百萬年前形成。從地表位置的觀察會認為，三義斷層大致上與車籠埔斷層為同一條線性延伸，但就滑移面而言前者以東坑層為滑脫面，而後者則是沿錦水頁岩底部作滑動，顯示兩者的地下型貌截然不同。

1.6 地表地質相關研究

研究區域內岩石地層單位主要為東坑層、上福基砂岩、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層，依序由西往東整合出現，年代從中期中新世到早期更新世。而大安溪之紅土階地、階地礫石堆積層與現代沖積層分別以交角不整合的型態覆蓋在上述出現的岩石地層單位之上，其中大多數不整合於卓蘭層之上。至於西部麓山帶前緣常見之頭料山層則分布在三義斷層下盤區域，研究區域中的紅土階地堆積層皆不屬於頭料山層。

在地表斷層分布方面，在西半部有三義斷層、屯子腳斷層、枕頭山斷層經過，而在東半部有集集地震斷層通過，集集地震斷層到了卓蘭一帶，主要為單斜褶皺崖，且形成一狹窄的褶皺隆起，在此稱之為內灣背斜。其它構造另有西半部的大安背斜，東半部則有石圍牆向斜、內灣背斜、以及內灣向斜等褶皺。以下將個別論述三義斷層、枕頭山斷層、以及集集地震斷層。

1.6.1 三義斷層

三義斷層屬逆移斷層（張麗旭，1951；Meng, 1963），可以分為兩段：北段呈東西走向，東起苗栗縣大湖鄉大窩，西至三義；南段呈現南北走向，由三義向南延伸至大甲溪北岸。本研究以討論斷層南段為主軸。三義斷層最早在 1920 年代在苗栗地質圖中被提出，但當時並未對斷層性質多做解釋。大塚彌之助（1936）

在台灣中部地震災害調查之中提出銅鑼斷層（三義斷層南段）為一低角度衝上斷層，其走向約為北北西向南傾 6 度。張麗旭（1951）認為三叉斷層（三義斷層北段）截切南北走向的銅鑼斷層，並且在大湖截切出礮坑背斜呈現右移現象，斷層局部成高角度逆斷層與斜切正斷層。而林朝棨（1957）認為此區域為西部衝上斷層山地，岩性主要以中新世沉積岩為主上覆紅土台地堆積層，爾後受到三義斷層活動使得地層傾斜，且受到侵蝕作用影響而形成今日地形。邱華燈（1962）提出三義斷層斷層面為向東傾 20 度之低角度逆掩斷層。Meng（1963）則是整合了前人地質資訊，將北北東走向的銅鑼斷層與東西走向的三叉斷層相連接合稱為三義斷層，在三義地區層位落差最大為 4700 公尺往東至大湖地區層位落差遞減為 200 公尺，並且提出斷層走向改變的原因是往西北發育的過程中受到了北端出礮坑構造之阻力，以致斷層於北端轉折，造成斷層之跡線轉彎。

地形特徵：

湯振輝（1969）分析地表資訊，經由航空照片判釋三義斷層兩側水系型態極為不同，斷層南側為樹枝狀水系，北側則為格子狀為主，由河流幾何外型再推論三義斷層是在出礮坑構造生成後才形成。李錦發（1994）利用區域水系分佈再解釋三義斷層受力情況，銅鑼向斜西翼受斷層推擠抬升速率較周圍快，在三義以北產生向源侵蝕，東翼因南方地塊抬升使這些河谷從往東流漸漸往北偏移至往東北方向注入西湖溪，此外銅鑼向斜東翼的頭料山層因未受三義斷層影響，僅發育垂直河谷注入向斜軸部發育的西湖溪，到此了解三義斷層切過第四紀的頭料山層，屬第四紀斷層，同時期斷層活動性至少在三義地區之土觀音赫土地形面形成後仍持續作用，使得紅土台地受到傾動，並且影響其上河流發育與流向系統性的偏移。最近在大安溪南岸研究發現，三義斷層截切低位河階面（劉彥求，2006）。

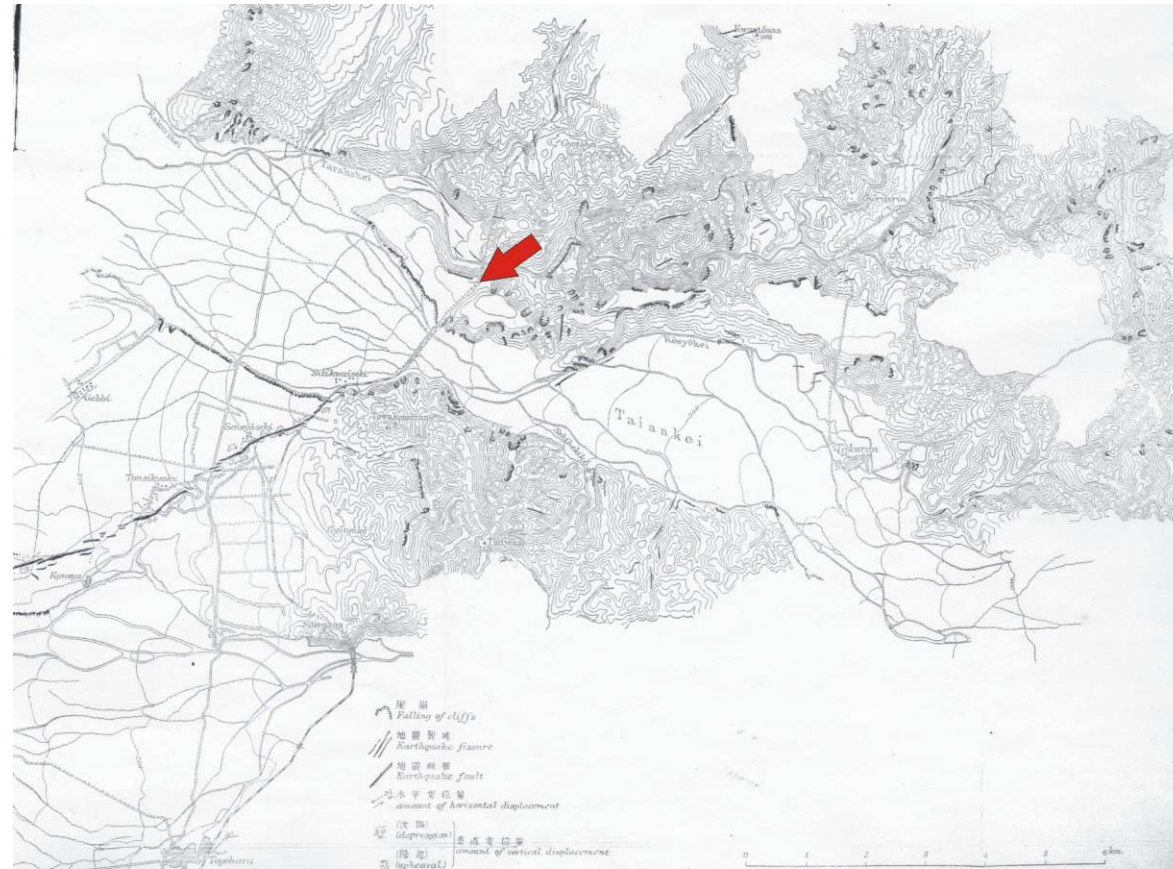
以上文獻皆認為三義斷層存在以及對於地形的影響性，但沒有證據顯示與支持三義斷層是否會再次活動。

活動性分類：

Bonilla (1975) 和 Hsu (1979) 將三義斷層歸類為第四紀斷層，其分類依據是來自中新世東坑層沿三義斷層滑脫到更新世頭料山層之上。楊貴三 (1986) 將三義斷層分為一級活動斷層，其分類依據是中新世河排層沿三義斷層滑脫到更新世頭料山層之上。林啓文等 (2000) 則是將三義斷層分類為第二類活動斷層。

1.6.2 枕頭山斷層

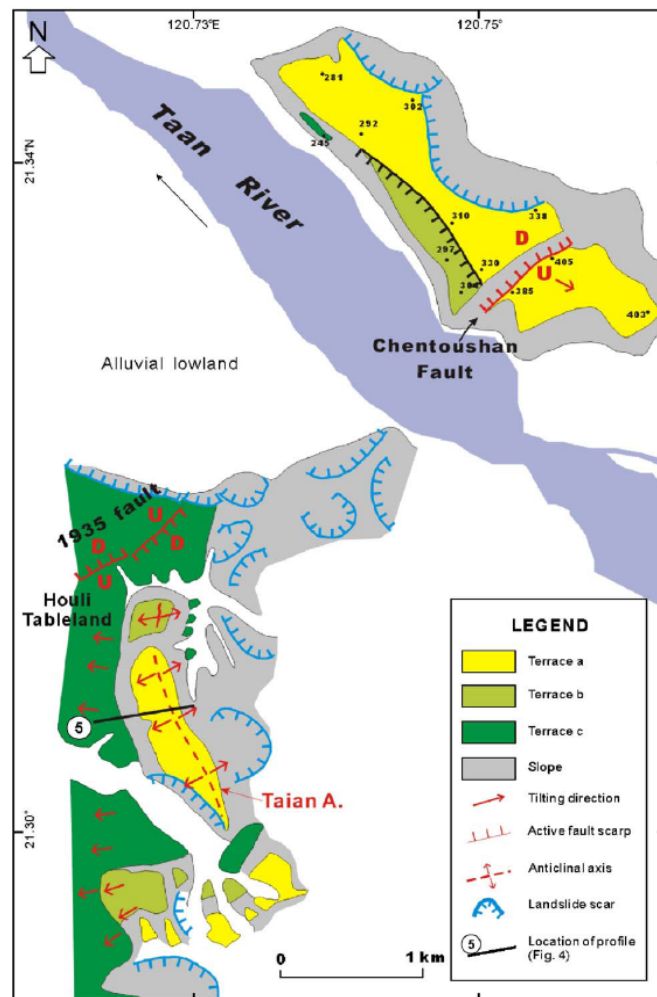
枕頭山線型位於大安溪北岸、三義斷層東側，鄰近三義鄉鯉魚潭村東邊的枕頭山 (標高 418 公尺)，地形上呈現筆直的線型崖，其走向為北偏東 55 度。枕頭山線型往西南方延伸，恰好可以與屯子腳斷層連接，所以有些前人研究中認為此線型階為屯子腳地震斷層往東北延伸的構造 (潘國樑，1983，1985；李錦發，1994)。根據 1935 年台中新竹大地震地表破裂研究報告 (大塚彌之助，1936)，屯子腳斷層線為一右移斷層，然而枕頭山線型沿線則在該次地震之中沒有任何錯動，只有在線型向北延伸地區以及線型兩側有發生大量山崩 (圖三)。



圖三：1935年台中新竹強震圖（大塚彌之助，1936）。此為當時發生地表破裂線與山崩地區在大安溪沿岸的地表災害調查圖。在枕頭山線型（紅色箭頭處）在當時並無破裂產生，僅在周圍發生大型山崩事件。

地形特徵：

關於枕頭山線型研究最早由湯振輝（1969）提出，其判釋枕頭山線型可能為右移斷層的遺跡。後來由潘國樑（1983，1985）研究認為此線型似乎為屯子腳地震斷層的向北延伸，線型可能為屯子腳斷層的一部份。李錦發（2000）認為此線型崖可能為斷層線，但該斷層活動性不明確，文中也認為此斷層可能為 1935 年屯子腳斷層往東北延伸，只是當時此處並無明顯地表破裂。沈淑敏（2005）認為枕頭山線型有崖，但在 1935 台中新竹地震時無活動性，其活動性不明。Ota *et al*（2006a；2006b）認為枕頭山斷層斷層崖高約 60~70 公尺，暗示著此斷層可能有重複活動，斷層跡長度約為 800 公尺（圖四）。



圖四：大安溪流域地形特徵判釋圖（Ota *et al.*, 2006a；2006b）。枕頭山斷層線型的崖高約 60~70 公尺，暗示著此斷層可能有重複活動。

地球物理特性與地下地質：

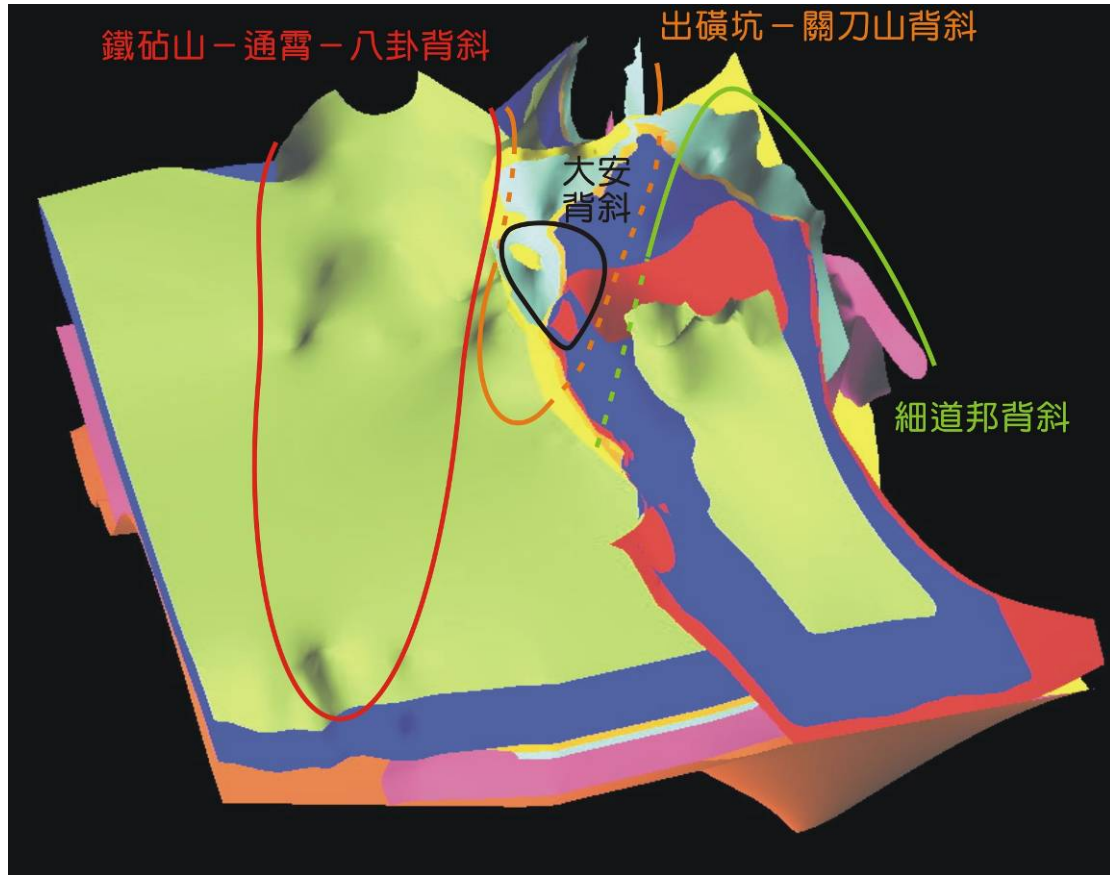
葉義雄（1983，1985），顏宏元（1983）以重力方法，推測三櫃坑附近可能有一正斷層通過，可能與 1935 年地震斷層有關，陳朝輝（1990）由 1973 年至 1989 年鯉魚潭水庫壩址周圍地震資料觀察推測該區域相當活躍。林玉農（2005）認為此枕頭山斷層為向東傾的層面滑移斷層，但並皆未解釋地表線性與地表地形關聯性。

1.6.3 1999 集集地震斷層（埤豐橋以東至卓蘭地區）

集集地震斷層係因車籠埔斷層再活動所造成，地震地表破裂南北延長約 92 公里（李錦發，2000），車籠埔斷層的滑脫面為錦水頁岩，並與三義斷層為同一滑脫面；然而在北段，車籠埔斷層的滑脫面往上抬昇接近地表，與三義斷層的滑脫面一分為二（Yue *et al.*, 2005）。李元希（2000）及 Lee *et al.*（2003；2005）認為自埤豐橋開始，向東變形帶變為 1 至 2 公里寬，且破裂方向轉為東西向，由校栗埔向東延伸至卓蘭再轉為東北走向，其認為這些破裂大部分為已存在東西向的斷層弱面，在校栗埔以東受控於內灣背斜。黃鐘（2007）利用地下構造模型推估，這些地表斷層與錦水頁岩有交互穿插現象發生；而內灣向斜形成是受控於車籠埔斷層之側斜坡影響，以至地層產生區域性的小背斜（圖五）。當車籠埔斷層向北運動至大甲溪附近受控於一南凹的 1/4 碗形構造所侷限（賴光胤, 2001; Lai *et al.*, 2006），Wang *et al.*（2007）與葛滿龍（2005）由震測資料分析認為受 TT-boundary 的阻擋，此 TT-boundary 即為車籠埔斷層之側斜坡。

李元希（2000）及 Lee *et al.*（2003；2005）說明在內灣背斜兩側生長破裂的地震斷層，於神桌山剖面之中，東翼內灣斷層皆為背斜軸部破裂上衝至地表的斷層型態，西翼為寬廣的撓曲崖。陳于高等（Chen *et al.*, 2007）認為位於內灣背斜兩側地震斷層應為褶皺崖的活動，而褶皺崖形成原因是因地下岩層轉折所造成的，在地震當時的變形因受控於地下褶皺的幾何型貌進而在地表產生破裂，因此

集集地震斷層在內灣地區並非典型斷層崖活動。

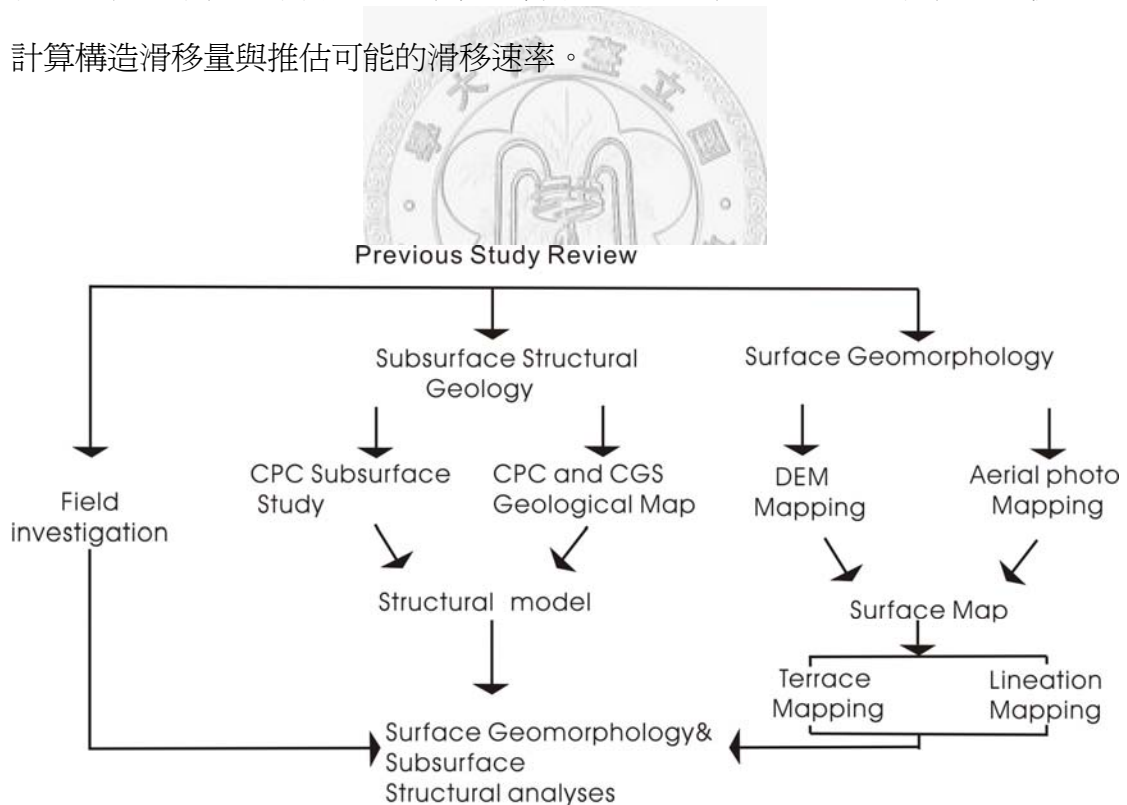


圖五：台中盆地北側地下構造 3D 圖（黃鐘，2007）。此圖之中卓蘭層（圖中綠色地層）由於受到三義 - 車籠埔基底滑脫面（圖中紅色地層）之側斜坡影響，以致地層產生區域性的小型背斜，此區域性背斜即為內灣背斜。

第二章 研究方法

2.1 研究架構

本研究的研究流程先從文獻回顧著手，之後再進行地表地形分析與地下構造分析，詳細的研究架構如（圖六）所示。地表地形分析是根據構造地形學原理，並利用航空照片與數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）來判釋研究區內的各種構造地形特徵與地形變形。除此之外，並配合野外地質調查，進而完成階地與構造地形的繪圖。而地下構造分析方面，利用已發表之震測剖面，重新檢視並繪製地下構造平衡剖面。最後結合階地繪圖與構造剖面，進行構造回復，並計算構造滑移量與推估可能的滑移速率。



圖六：研究流程圖。

2.1 地表地形分析

2.1.1 構造地形判釋

構造地形學 (tectonic geomorphology) 是研究構造活動造成的地形特徵、以及構造和地形之間相互作用的學問。由被構造活動影響的地形特徵，可以進一步判斷構造活動的方式與規模。

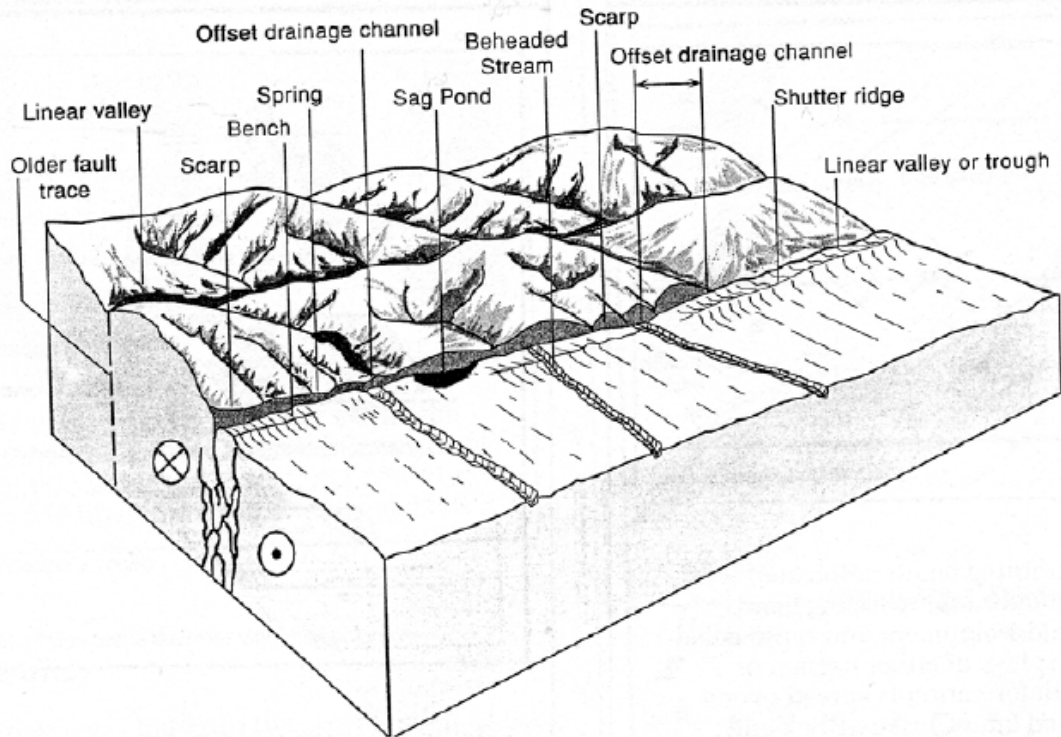
想要判斷與量測構造活動所造成的地表變形量，首先要先找尋基本的地形指標 (geomorphic marker)，再由這些地形指標的錯移與變形量來判斷構造活動量。若是這些地形指標有年代的控制，也可以藉此判斷構造的活動速率。一般來說，地形指標可分作面狀與線狀兩種，面狀的地形指標諸如河階、海階、沖積扇等；而線狀的地形指標則為河流、峻線、乃至於各種天然或人為的線狀物。在台灣地區，河階是最常見的一種地形指標，許多河流的沿岸都分布著廣泛的河階群。然而，因為河階面即為古河床面，所以原始階面應為輕微地向下游傾斜，而不是完全水平。因此使用河階做為地形指標藉以判斷是否有構造作用影響時，需要考慮原始的河床坡度與坡向，若舊有河階面的傾向與自然河流坡降不平行時，可由此判斷為構造影響的結果。此外，由於古河流的坡降難以得知，因此通常將現生河流坡降視為可能的古河流坡降，進而作為判斷構造作用影響的依據。

經由構造活動造成的地形面可稱為變位地形，其主要種類有：線性構造崖 (lineament)、構造崖 (tectonic scarp)、構造窪地 (tectonic depression)、構造隆起 (tectonic bulge)、和水平錯移地形 (laterally offset landform) 五種 (圖七)。走向滑移斷層在地形面上容易產生錯斷河系、斷頭河、斷塊脊、閉塞湖、直線谷、線性崖較為筆直、壓力脊等特徵。逆衝斷層則存在有斷層線崖、線性崖彎曲不平整、撓曲崖。正斷層則容易造成斷層崖、三角面。利用各種的地形資料與野外調查，來觀察各類地形指標是否遭受構造變形，且產生以上幾種變位地形，可以幫助我們了解構造活動與否，以及其位置，且可以進一步來判斷可能形成此地形的

斷層種類。

表一、活動斷層反映的地形構造與其特徵（石再添，1982）。

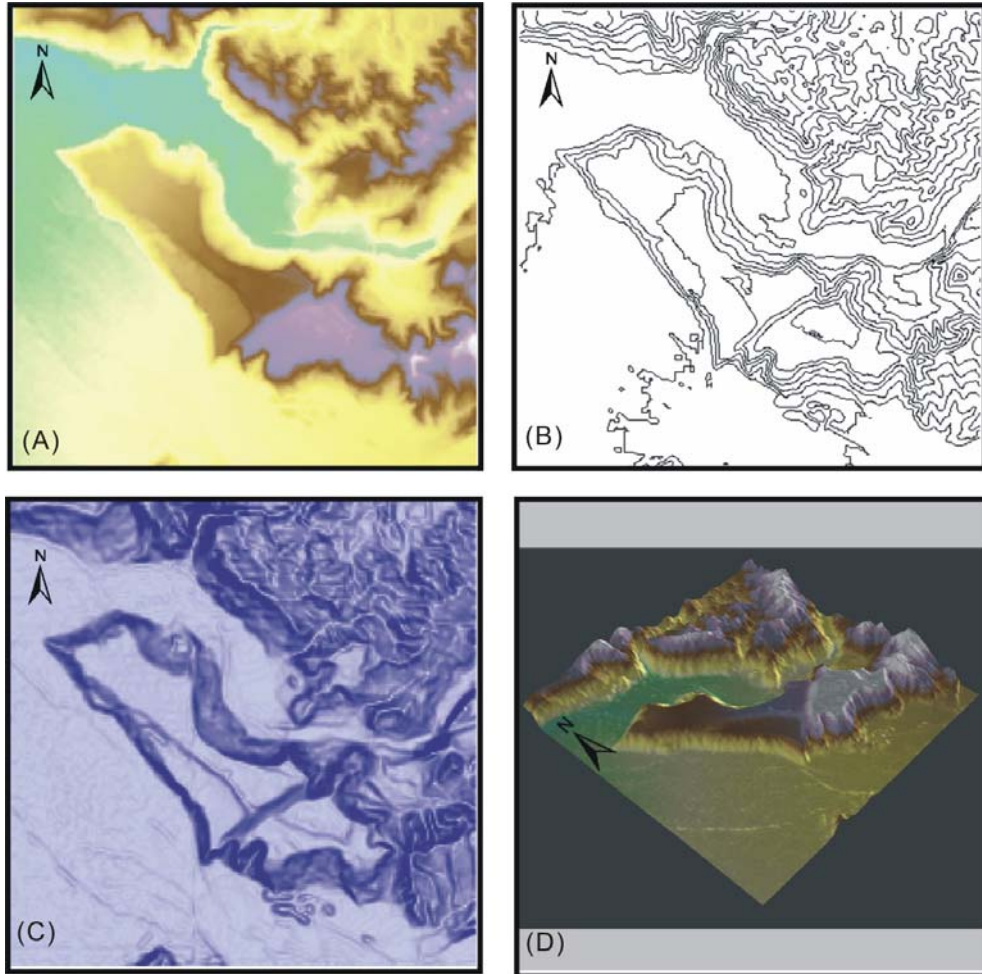
主要分類	地形特徵
線性構造崖（Lineament）	直線崖 Lineament
構造崖（Tectonic scarp）	斷層崖 Fault scarp 斷層小崖 Fault scarplet 逆斷層小崖 Reverse scarplet 三角切面 Triangular faces
構造窪地（Tectonic depression）	斷層谷 Fault valley 地塹 Graben 裂谷 Rift valley 斷層溝 Fault trench 斷層池 Fault sag 斷層鞍部 Fault saddle 斷層角盆地 Fault-angle basin
構造隆起（Tectonic bulge）	地壘 Horst 斷塊脊 Fault slice ridge 壓力脊 Pressure ridge 山丘 Mound 斷塊山地 Fault-block mountain 傾動斷塊山地 Tilt-block mountain
水平錯移地形（Laterally offset landform）	錯斷河 Offset stream 錯斷山腳 Offset spur 閉塞丘 Shutter ridge



圖七：斷層活動所造成地表變形特徵 (Wesson *et al.*, 1975)。

2.1.2 數值高程模型與航空照片

本研究用於地表地形分析的主要資料為數值高程模型與航空照片，這兩種資料是常用的地形分析資料，且各有其優缺點。使用數值高程模型的優點是可以快速進行繪圖工作，並快速得到地形分析結果，但由於台灣地區基本數值高程模型的資料為每隔四十公尺一個資料點，所以在小型的研究區域解析度稍嫌不足。而航空照片正可提供局部區域真實地形起伏的資訊，經過比對與判釋不同時間的航空照片也可看出地形的變化與人為的開發影響，然而其缺點為易受當時拍攝天氣影響，且需要進一步處理才能轉換成數值資料。因此為了互補其優缺點，近年來對於構造地形研究不外乎是整合兩種分析工具來進行討論。另外，地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 的軟體也提供了許多分析數值地形模型與資料的各種功能，如光影渲染圖、等高線圖、坡度圖、坡向圖、地形剖面圖、三維地形立體圖等的製作，這些都是輔助於室內進行地形分析判釋的有利工具。



圖八：Arc GIS 所提供地表分析功能。(A) 光影渲染圖，光源入射角北偏西 45 度。(B) 25 公尺等高線地形圖。(C) 坡度圖，由紫白漸層來表示坡度變化情形，顏色越白表示坡度愈緩。(D) 3D 地形立體圖，垂直放大倍率 5 倍。

本研究利用立體鏡可將兩張相鄰的航空照片產生立體像對，並且輔助地理資訊系統軟體所生產之等高線、坡度圖、三維地形立體圖等，來判釋構造線性特徵與地形面（圖八）。活動構造會造成各種的變位地形，我們可以藉由判釋這些地形特徵來推斷活動構造的位置與性質，還可以判釋出岩性上之差異、岩層位態的變化、河階地的範圍、土石流或崩場地範圍等情形。利用等高線與坡度圖可以容易判釋出可能的地形面或階面，於坡度圖之中坡度較為平緩區域有可能是階地面，而在坡度圖之中較為陡峭區域可能變為此階地面的邊界。利用等高線外型判釋階地時，一般階地面所呈現等高線外型會具有相同等高線間距且等高線密度也較寬。

2.1.3 階地投影

研究區域經由航空照片判釋分析之後，可以進一步利用地理資訊系統軟體從數值高程模型中萃取各階地的空間位置與高程資料，再配合繪圖軟體 GMT 產生階地與河流剖面圖。

研究區前緣之主斷層－三義斷層的走向為北偏東，而大安溪與已發表的震測剖面又近乎垂直於三義斷層的走向，所以本研究將各河階面沿著垂直構造走向的方向投影，繪製階地與河流剖面圖，以方便結合震測剖面估計斷層的滑移量。經過投影的階地剖面可以真實反應所有現生河床與階地在空間上之幾何型貌，故可利用現生河床與階地之間幾何型貌之差異，來分析河階形成之後是否有受到構造活動而變形。



2.2 地下構造分析

2.2.1 震測剖面

本文利用中國石油公司已發表之震測剖面 (Hung & Wiltschko, 1993; 楊耿明等, 2000; 楊耿明等, 2003; Yang *et al*, 2007), 重新繪製新的構造剖面, 以作為地下構造分析的依據。首先利用繪圖軟體數化原始震測剖面, 再利用 2D Move 軟體將各反射面進行時程轉換, 轉換之後的地層面依照中國石油公司資料, 將反射面對應至實際地層層位, 最後再予以重新解釋。

2.2.2 構造回復

在研究過程之中我們必須仰賴地下構造資料, 而本研究分析地下構造的軟體是Midland Valley Exploration 公司所研發的 2 D Move 軟體。2 D Move 為回復地下構造剖面的軟體, 提供的構造平衡剖面的回復, 其主要的平衡原則如下:

1. 岩體體積於變形同時保持不變。

2. 岩石最終體積僅會受侵蝕或成岩壓密作用改變。
3. 主要變形機制為脆性破壞。
4. 褶皺作用均與斷層作用有關。
5. 因為壓溶作用或是構造作用擠壓改變的體積會被忽略。

本文利用軟體內建的曲滑褶皺回復法（flexural slip unfolding）與斷層平行回復法（fault parallel flow）兩種方法來回復整體構造。本文僅將曲滑褶皺回復法作簡單介紹（圖九）。

曲滑褶皺回復法為一等面積回復方法，其原理為：

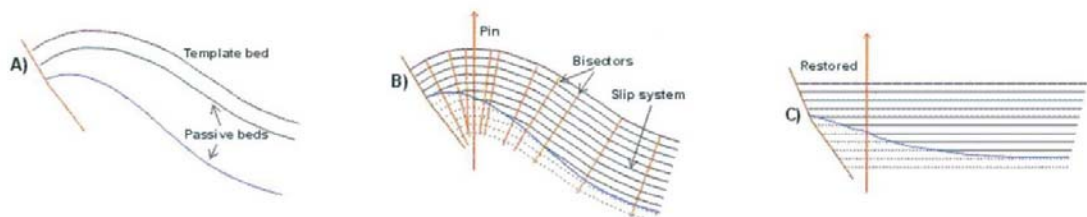
1. 地層長度在攤平褶皺前後不變。
2. 褶皺前後的面積不變。
3. 地層厚度保持不變。

基本的回復步驟如下：

A) 紅線表示為斷層線，template bed (TB) 為最後要被壓平的地層，其餘兩條地層線為配合 TB 變形而產生形變的地層。

B) 依照 TB 建立平行線，可以發現綠線與 TB 岩層幾乎平行，而藍線左段則有較大的差異。

C) 將 TB 壓平之後，所有線段形貌會與 TB 相同，而綠線因為形狀與 TB 相同因此也被壓至水平，而左段藍線形貌在回復後會有較大的向下量，右段藍線因為與 TB 平行，因此也可以回復至水平狀態。此外，進行上述步驟時，必須將所有地層厚度皆以地層線固定（紅色箭頭，pin line）為準，在岩層與固定線交會處的地層厚度與地層會在變形過程之中會維持不變。

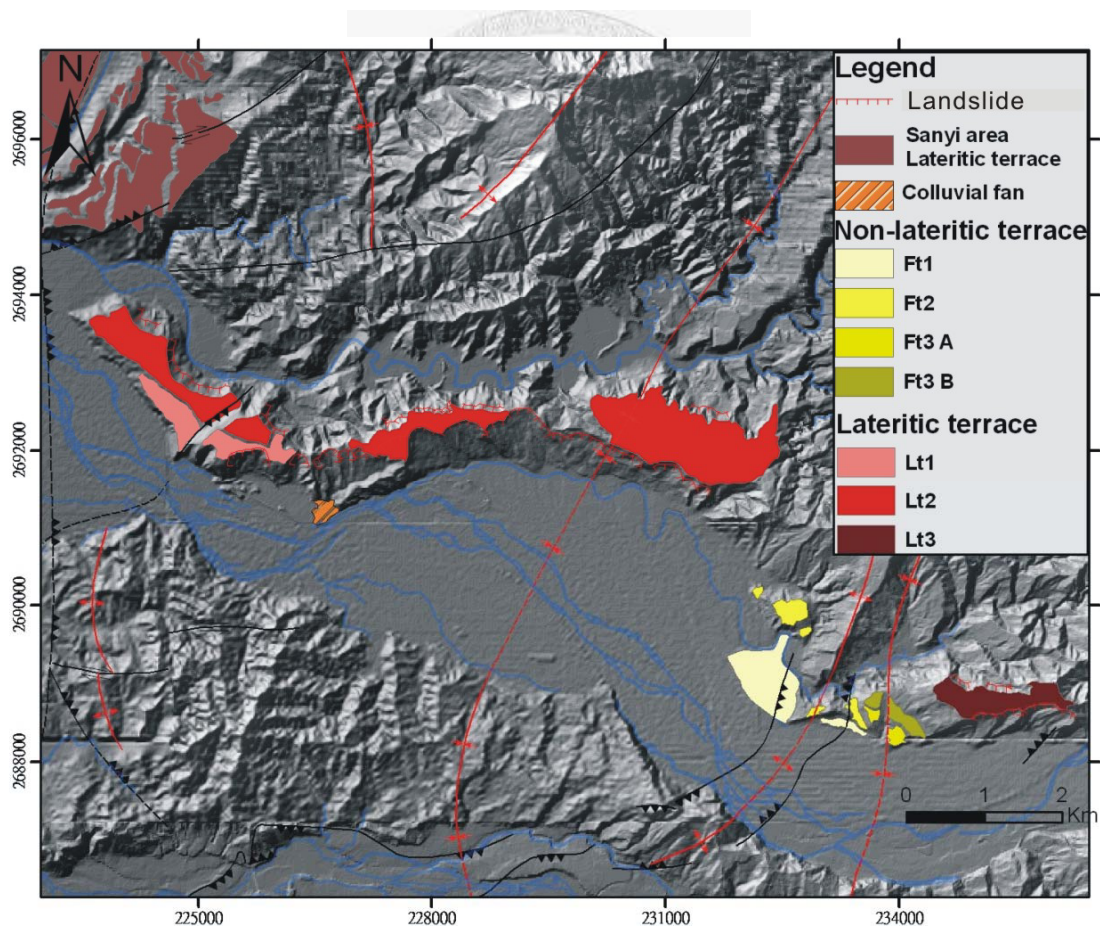


圖九：曲滑褶皺回復示意圖（摘節自 2DMove 使用手冊）。

第三章 研究結果

3.1 地形面分析

研究區域內的階地可以大致分為紅土化階地群與未紅土階地群（圖十），紅土化階地主要分布於研究區域西半部（靠大安溪下游側）；而未紅土化階地群則是分布於研究區域東半部（靠大安溪上游側）。從這兩群階地的分布情形，暗示著大安溪階地群自形成以來曾經歷不同構造抬升歷史。



圖十：研究區域階地分布圖。

表二、枕頭山 - 卓蘭一帶河階分布表。

本研究	張瑞津 等 (1998)	陳文山 等 (2000a)
Lt3 (大坪頂面)	LH (大坪頂面)	LT4
Lt2 (下太平面)、(西坪面)、(坪頂)	LT1 (下太平面)、LT2 (西坪面)	LT5、LT4
Lt1 (上坪面)	LT3 (上坪面)	LT3、LT2、LT1
Ft3B (內灣國小面)	LT4	LT1
Ft3A (內灣國小面)	LT4	LT1
Ft2 (卓蘭中學面)		LT1
Ft1 (卓蘭面)	FT	

3.2 構造地形判釋

本文根據地形判釋結果將研究區域構造地形特徵分為三大類來討論：包括枕頭山線型、下太平到西坪沿線、內灣背斜到內灣向斜。

3.2.1 枕頭山線型與野外調查結果

由農航所航空照片判釋(圖十一)，在枕頭山線型一帶可以見到兩組線型崖，一組為前述的枕頭山線型崖，其走向為北偏東 55 度，與大安溪的河道近乎垂直；另一組則與大安溪呈現平行之線型崖。一般河流所形成的河階崖大體上會平行於主要河道，枕頭山線性崖卻垂直於河道，在一般河流營力作用之下較難形成和河道相互垂直的河階崖，因此本研究將枕頭山線性崖視為一構造崖，而非河流階地

的河階崖。而另外一組線型崖，因為其走向與河流平行，故將其視為河階崖，並將此河階崖上下兩階紅土化階地進一步細分為 Lt1 與 Lt2 兩階。

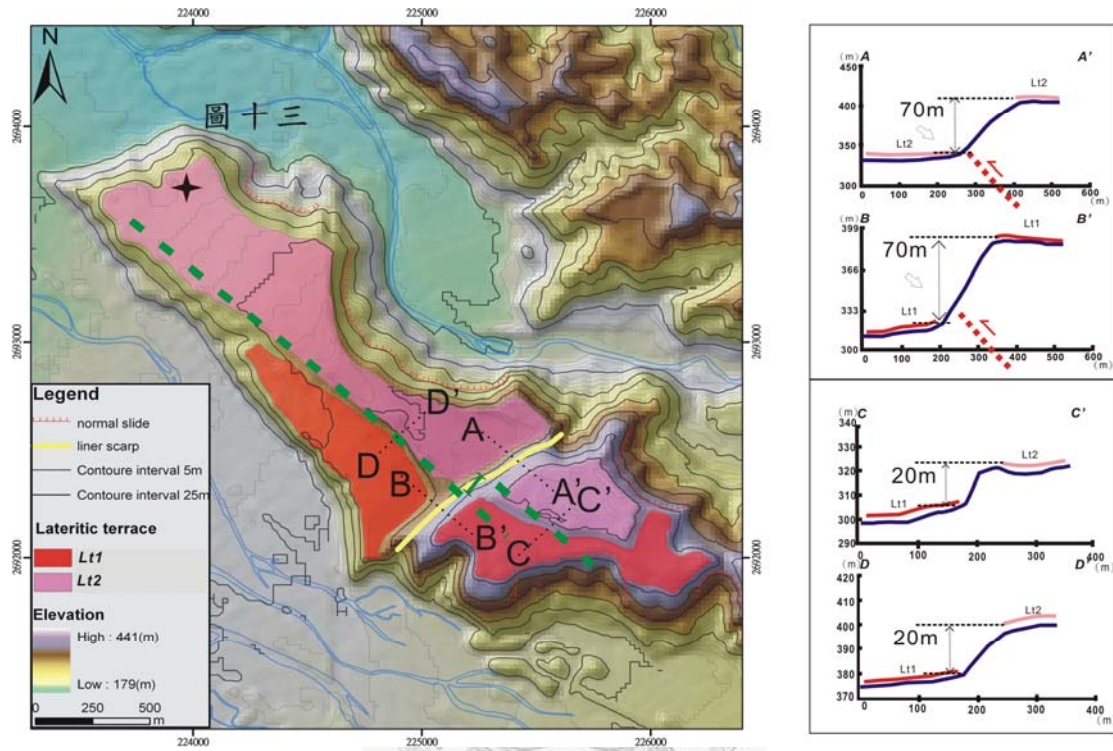


圖十一：枕頭山線型航空照片立體像對（從左至右）：67P76-179，67P75-420，67P75-423）。可以判釋出枕頭山線性崖截切（黃色線段）階地面（紅色線段），且發現於 Lt2 階地面邊緣有大型山崩事件。

針對這兩條線型崖分別各做兩條地形剖面 A-A' ~ D-D'（圖十二），可以發現枕頭山線型的崖高約為七十公尺，而另一河階線型崖的崖高約為二十公尺。在 Lt1 與 Lt2 兩階階地上跨過枕頭山線型崖的兩條剖面 A-A' 和 B-B' 中，皆顯示跨過枕頭山線型崖的高差為 70 公尺，由於枕頭山線性為一構造崖，由此可推測此構造至少在紅土化階地 Lt1 形成之後才開始有活動。而從橫跨河階崖的兩條剖面 C-C' 與 D-D' 來看，在枕頭山線型兩側的河階崖崖高皆為 20 公尺，證明這一組河階崖可以短距離相互對比，並可作為判斷構造活動與錯移量的構造地形指標與證據，也顯示，枕頭山線型的活動晚於這兩期河階地形成的年代。

在確定枕頭山線型兩側的河階崖可以短距離對比之後，由地形圖上可看出此河階崖在跨過枕頭山線型時呈現左移的活動特徵，且由 DEM 上來計算此河階崖大約視左移 28 公尺。

由於枕頭山線型非常筆直，的確符合平移構造的地表特徵，且由河階崖的錯移可以推估其左移滑移量，然而枕頭山構造崖的崖高達 70 公尺，是否真的為左移活動構造，還需要野外調查佐證。

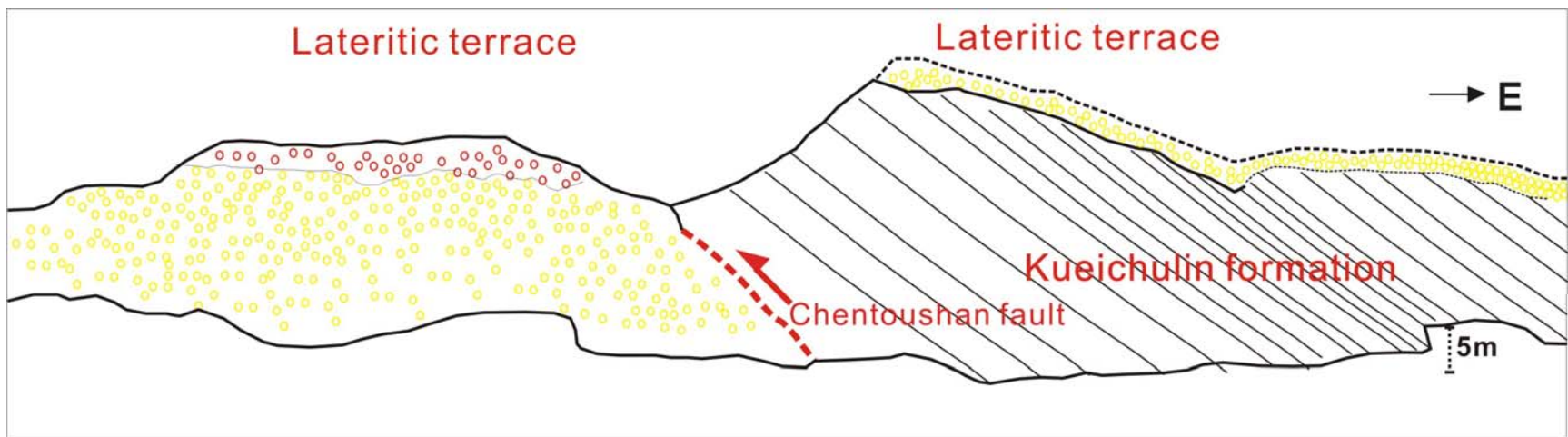


圖十二：枕頭山地區地形分布圖。黃色直線表示枕頭山線型所在位置；綠色虛線表示階地河階崖位置。A-A'~B-B'地形剖面，空心箭頭表示枕頭山線型可能之形貌，跨過線性崖 Lt1 和 Lt2 河階高度差約為 70 公尺。C-C'~D-D'地形剖面，顯示線性崖左右兩側階地，皆存在 20 公尺的河階崖。連接河階崖線時發現視左移 28 公尺。紅色星號為圖 13 樣本採集地點。



圖十三：紅土化階地礫石層對比色卡。此點位於上圖星號處，樣本由野外採樣，未經過烘乾處理程序，直接對比之後發現比色值為 **CHROMA** 為 6; **VALUE** 為 5。

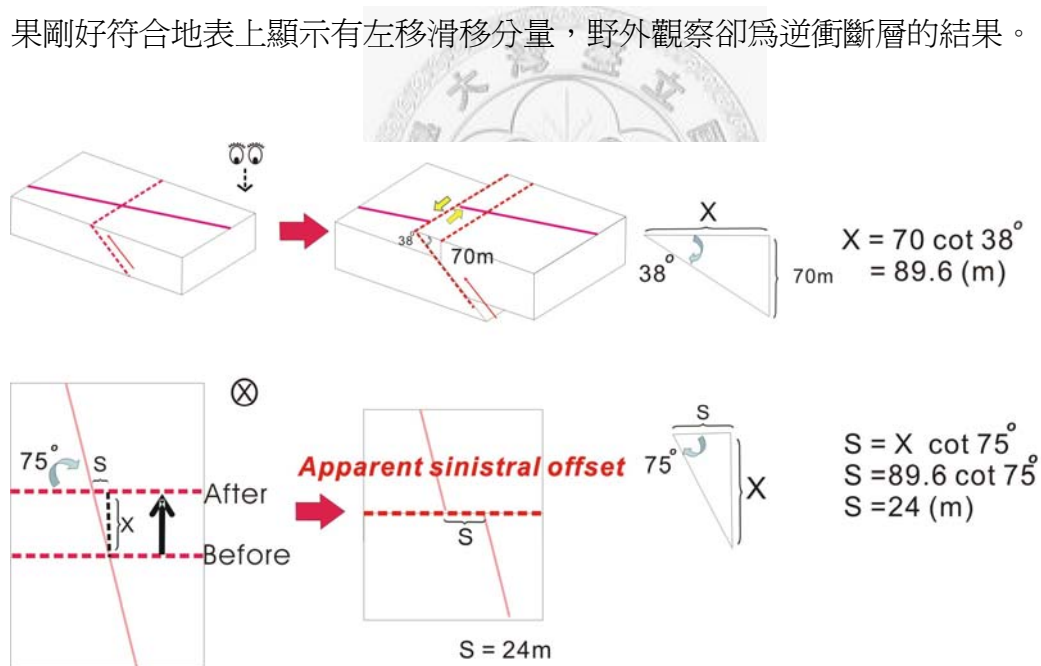
經過野外的調查，並沒有發現枕頭山線型具備明顯的左移活動特徵，反而在大安溪流域北側舊火車鐵道旁發現其露頭剖面，顯示枕頭山線型可能為逆衝斷層構造。此露頭剖面（位置見圖十）正好位於枕頭山構造崖的位置（圖十四），由野外觀察時可以發現在構造崖西側皆為河流階地沉積物，其厚度約為 110 公尺，在靠近地表紅土化土壤處的厚度約為 2-3 公尺，比色值為 **CHROMA** 為 6; **VALUE** 為 5（圖十三）；在構造崖的東側可發現岩盤上衝至地表，近地表處亦發現有階地沉積物以交角不整合形式覆蓋於岩盤之上。根據中油地質圖與地調所地質圖幅，此岩盤為桂竹林層，雖然在野外並未實際看到此一斷層露頭，但考慮枕頭山線型東側桂竹林層岩盤高於西側紅土礫石層，且在階面上的崖高為七十公尺，可由此推估造成枕頭山線型的構造為向東傾的逆衝斷層較為合理。此外，根據震測剖面解釋（Hung & Wiltschko, 1993; 楊耿明等，2000，2003；Yang *et al.*, 2007），枕頭山線型底下淺處為平行層面斷層（*bedding-parallel fault*），由此可推測枕頭山線型應為逆衝活動型態為主的枕頭山斷層。



圖十四：枕頭山斷層露頭。桂竹林層上衝至紅土礫石階地堆積層，且發現可以相互對比的階地面至少被抬升 70 公尺高。

由野外調查結果來看，枕頭山斷層主要為逆衝斷層，且河階崖的錯移也顯現出左移活動的特性，因此接下來探究之問題是枕頭山斷層是否為斜向滑移斷層（oblique fault）而同時兼具逆衝與左移分量？抑或只是逆衝斷層的活動使得地形特徵在圖視的角度上產生平移活動的錯覺？

為了解釋此現象，本文便先嘗試分析單純的逆衝運動在地表是否會產生看似平移的運動，可參見示意圖（圖十五）。圖中紅色虛線為斷層線，粉紅色為河階線型崖，在斷層開始活動前，該線型崖與斷層線的平面俯視夾角約為 75 度（圖十五 a）。之後逆衝斷層開始活動，此時可發現河階線型崖在逆衝斷層活動之後，從地表上觀察會發現有似左移方向的移動（圖十五），這樣模擬的結果剛好符合地表上顯示有左移滑移分量，野外觀察卻為逆衝斷層的結果。



圖十五：枕頭山斷層滑移距離估算圖。由野外資料求得斷層面傾角與斷層線崖高利用三角函數轉換，得到枕頭山斷層因為俯視角度在平面之上會產生的視偏移量，這數值與所觀察到的 DEM28 公尺左移量相差不大。

既然在地形特徵與斷層線斜交的條件下，單純的逆衝斷層活動可以產生看似平移活動的特徵，本文也嘗試估算枕頭山斷層若以單純逆衝的活動，可以在地表造成多少的視左移錯移量（*apparent sinistral offset*）。

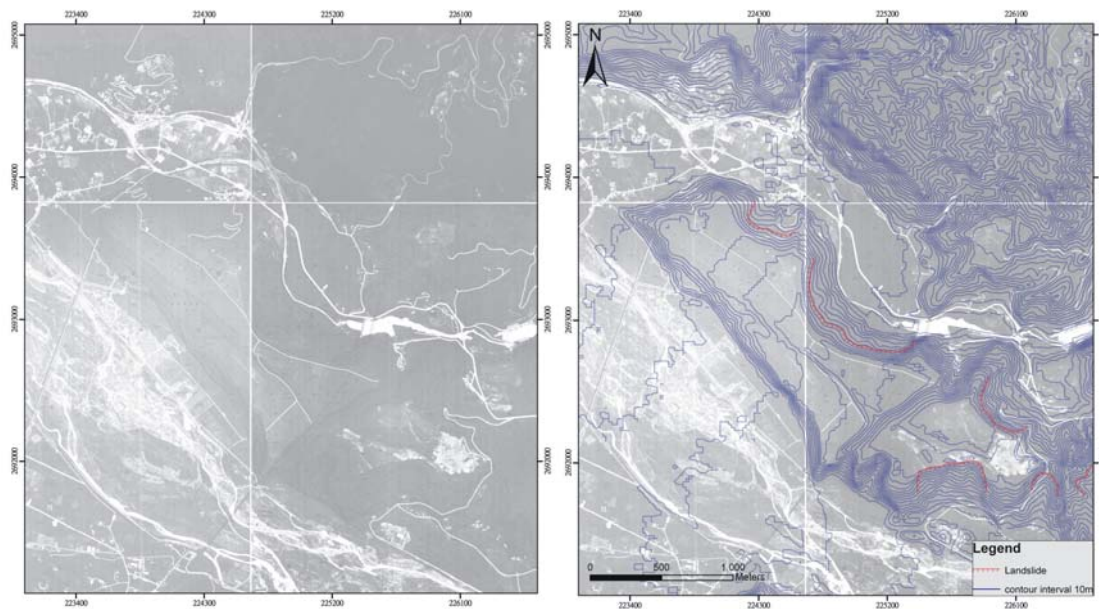
要計算此左移量可以透過斷層幾何與三角函數來求得，所需的參數為斷層面的傾角以及垂直抬升量。雖然在野外無法直接觀察與量測斷層面，但根據震測剖面（Hung & Wiltshko, 1993；楊耿明等，2000；楊耿明等，2003；Yang *et al.*, 2007）推斷此斷層在淺處為平行層面斷層，因此本研究利用野外測量斷層東側上礮的岩盤傾角來代替斷層面傾角，再把所測量的岩層位態取平均之後得到平均傾角為 38 度朝南，並假設此角度為斷層面傾角，而垂直抬升量可以由地形剖面得到斷層崖高差約為 70 公尺。在得到這兩個參數之後，加上河階崖與斷層崖的夾角為 75 度，經由三角函數公式計算出在平面上此斷層可以造成表面約 24 公尺的視左移（*apparent strike-slip*）分量（圖十五 b）。此數值與從 DEM 上直接量測出河階崖的 28 公尺位移相當接近，所以地表上可見的左移錯動量主要都是逆衝分量所造成；在計算地表的錯移量之後，也可以進一步計算斷層面上的滑移量。從三角函數的關係，可以得出枕頭山斷層滑移量在 Lt1 形成之後的沿斷層傾角（*Dip slip*）滑移量約為 113.7 公尺（圖十六）。綜合上述分析，枕頭山斷層為逆衝行為為主的斷層，在紅土化河階形成後，其垂直抬升量為 70 公尺，沿斷層傾角滑移約為 113.7 公尺，斷層淨滑移距離（*Net slip*）約為 116.2 公尺。

Dip slip of Chentoushan fault



圖十六：枕頭山斷層滑移距離估算（Dip slip）圖。利用野外測量岩層傾角推估此斷層面約為 38 度向南傾，輔助斷層線崖高（U）70 公尺，經由三角函數推導算出，在空間上造成 70 公尺的線型崖高，此斷層沿斷層傾角（Dip slip）至少必須位移（d）113.7 公尺。

在枕頭山區域除了判釋構造崖可能對居民傷害之外，本文亦藉由航空照片與數值地形分析此區域，發現在枕頭山區域於北面曾經有發生過大型山崩事件（圖十七），雖然在 1999 年集集地震時此區域並未有山崩事件發生，但是此區域在 1935 年屯子腳地震斷層發生時，即有報導過曾經發過大型山崩（圖十）。

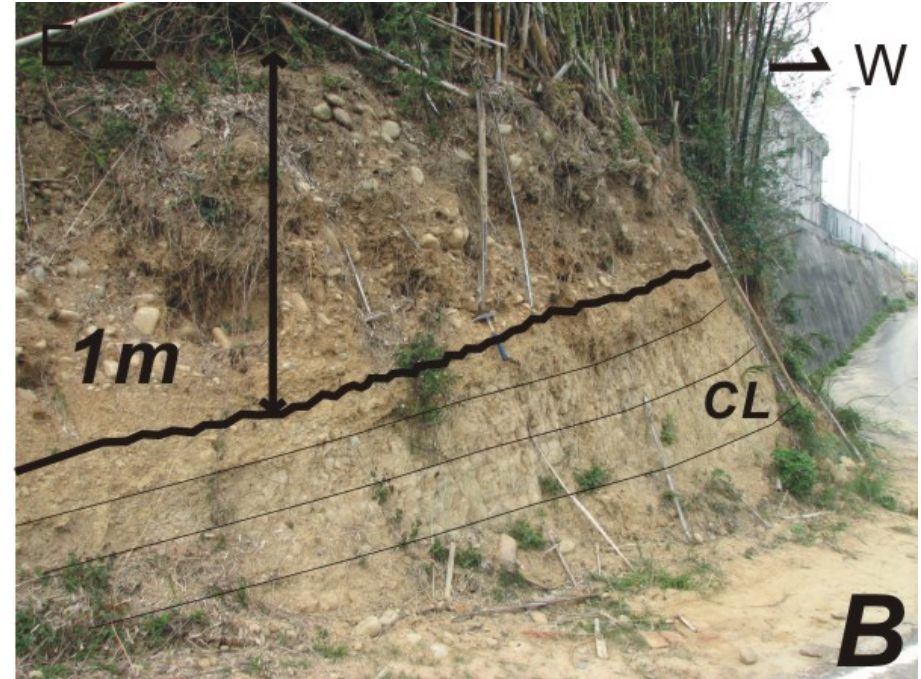
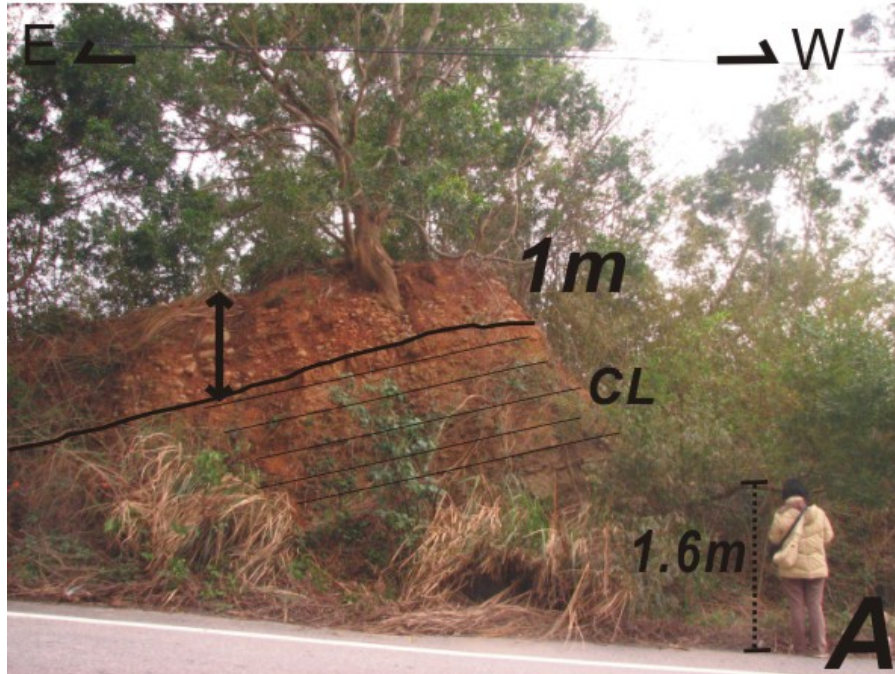


圖十七：枕頭山地區 1/5000 像片基本圖。經由航照以及等高線外形判釋，紅線表示崩積位置。

3.2.2 下太平到西坪沿線與野外調查

下太平至西坪區域經由航空照片與地形判釋，並未發現任何線性崖存在（圖十），另外可以觀察到有大範圍、側向延伸性很好的紅土化礫石層可供對比，此分布連續性極佳的紅土化礫石層大致上以交角不整合的形式覆蓋於上新世晚期至更新世早期的卓蘭層之上（圖十八、十九）。此階地群厚度平均最厚約30公尺，大致上分布於西坪一帶（圖十九A），由台三線由大湖往卓蘭方向便可清楚看見此露頭出露，在西坪階地一帶邊緣由公路往上走皆可以發現此階地不整合覆蓋於卓蘭層之上。而在下太平一帶此階地平均厚度約20公尺，於下太平此階面最後估計可達30公尺。





圖十八：階地不整合覆蓋於卓蘭層（CL）之上，且紅土化礫石層沉積後有傾動現象，礫石排列大致上與岩層平行。A、B 圖皆位於下太平階面之上；粗線為紅土礫石層與卓蘭層不整合的岩層邊界；細線為卓蘭層岩層層面。



圖十九：階地不整合覆蓋於卓蘭層（CL）之上，且紅土化礫石層沉積後有傾動現象，礫石排列大致上與岩層平行。上圖 A、B 皆位於下西坪階面之上，階地厚度最厚約 30 公尺；粗線為紅土礫石層與卓蘭層不整合的岩層邊界；細線為卓蘭層岩層層面。

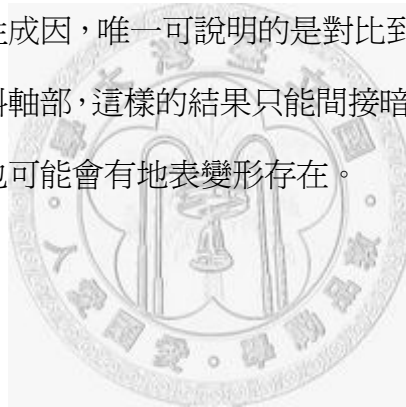
3.2.3 卓蘭至內灣階地群分析與野外調查

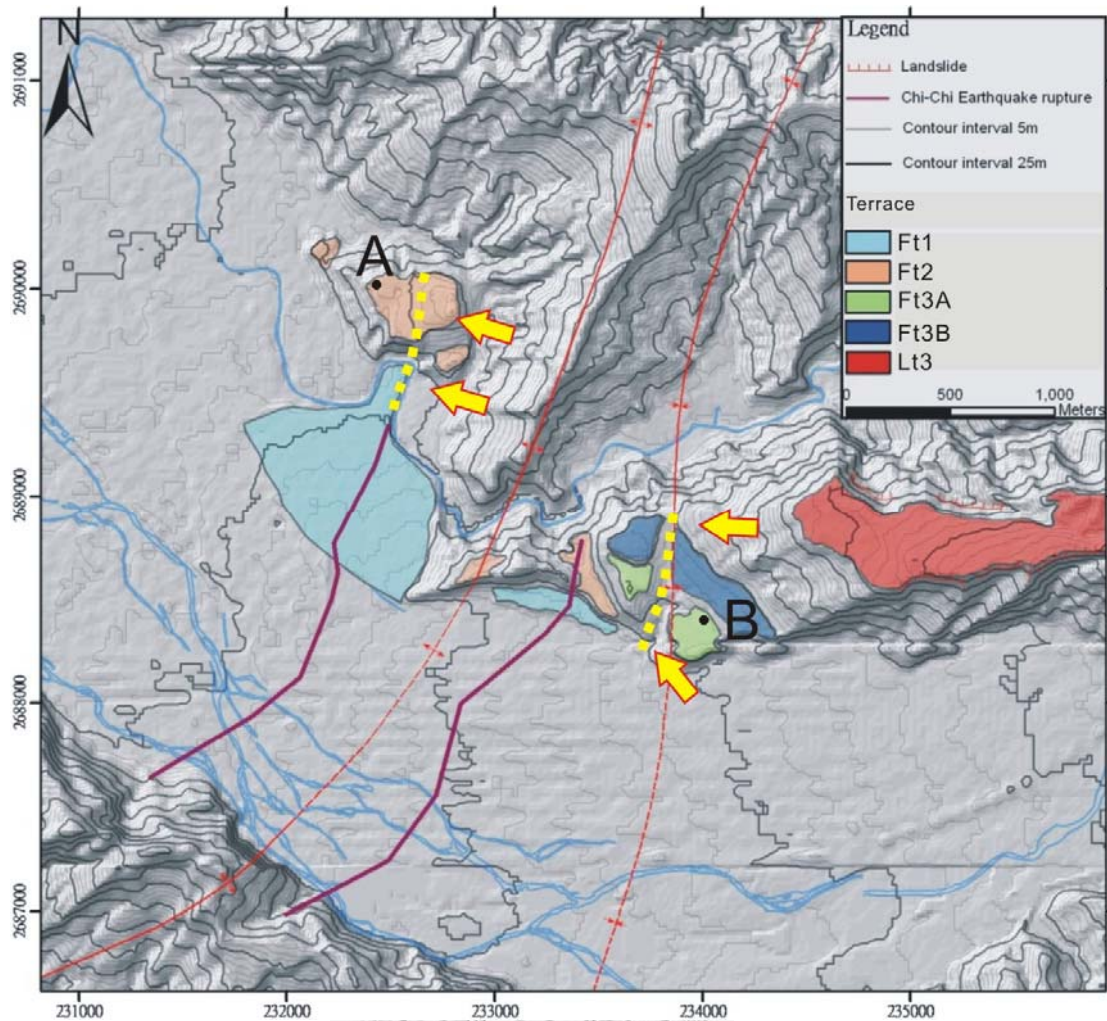
本文在此區域細分為四個階地群（圖二十），在這四個階地群之中於1999年集集地震時，斷層曾經切穿Ft1與Ft2階地，但在東勢背斜西翼上亦可看見卓蘭中學階地面朝西傾與Ft1階面傾動大致相同，如果將1999年地震破裂線往北延伸，剛好位於卓蘭中學向西傾動的階地面上，此可能暗示此破裂線可能早已向北延伸至卓蘭中學階地面之上。換句話說不同時期階地面皆朝相同方向傾動，也間接顯示出在較老的階地群，受到構造活動時，會紀錄較多的變形歷史（圖二十）。

另外在此破裂線北岸恰巧有一小支流流經，在支流與破裂線交會處也可以明顯觀察到支流只在此段呈現180度大轉彎（圖二十），如果仔細觀察此河流的幾何型態時在破裂面交會處的型態似乎非常不合乎常理。此現象可能形成的原因是支流在此所產生的下蝕力量遠小於構造崖抬升量，因此河道在此呈現大轉彎。這樣的地形現象也可再次佐證此構造崖應該可以向北延伸至卓蘭中學階地面之上（圖二十），因此在圖中虛線位置兩側以後應禁止建設公共活動設施避免造成巨大傷亡。關於1999年地震破裂在卓蘭區域的研究顯示，卓蘭地區的地表破裂起因是屬於下伏地層因同震變形而在地表產生褶皺的撓曲變形（Chen *et al.*, 2007），這類的變形機制在地下岩層角度所控制，在相同區域受到相同應變時岩層傾角低的地方水平方向位移量會大於垂直抬升。反之，在岩層傾角高的地方水平方向位移量會遠小於垂直抬升，於是在岩層傾角改變的地方容易產生不同的垂直位移，這樣的結果也就是今日造成1999地表破裂線的因素，因此在活動斷層的研究之中又發現到不僅僅在主要斷層沿線上造成居民重大傷亡，在岩層轉折造成地表的大型褶皺也可能造成巨大傷害地區。關於這類變形的活動性可以藉由量測地下岩層傾角對比上覆的礫石階地面的傾角來推估此構造崖的活動性。假若岩層改變的傾角大過於上覆階地平均角度時，則此構造崖將在以後持續活動直到上覆階地面角度與下伏岩層改變的傾角相當時，此構造崖才會達到成熟階段，方能停止較大規模的

地表變形 (Chen *et al*, 2007)。由上述例子來檢視卓蘭地區時，發現卓蘭地區在1999集集地震所產生地表破裂面，亦屬於岩層轉折造成地表的大型褶皺的案例，其地表階地面與岩層改變角度仍有9度的落差，因此在卓蘭地區的褶皺崖在以後仍會持續活動。

除此之外，本文亦發現在內灣國小階地面上有兩階可以對比的階地面(圖二十)，此兩階階地面由航空照片判釋可以清楚勾勒出線性位置大概位於往大坪頂的小路之上，此線型崖兩側階面高差約為13公尺，而彼此可以相互對比的階地面約為8公尺。此線型構造雖然在1999集集地震時並未有任何破裂產生，但此線型崖的確存在，現今對於此線性構造崖的解釋仍然不明，於野外觀察時也未能確切找到清楚可以解釋此線性成因，唯一可說明的是對比到地下構造剖面時，此線性崖位置剛好位於內灣向斜軸部，這樣的結果只能間接暗示著此內灣向斜一直以來都有活動性存在，之後也可能會有地表變形存在。





圖二十：卓蘭－內灣地區河階群與活動構造分布圖。A 點為卓蘭中學，B 點為內灣小學。黃色虛線表示有線型存在，於 1999 年集集地震並未發生活動現象。

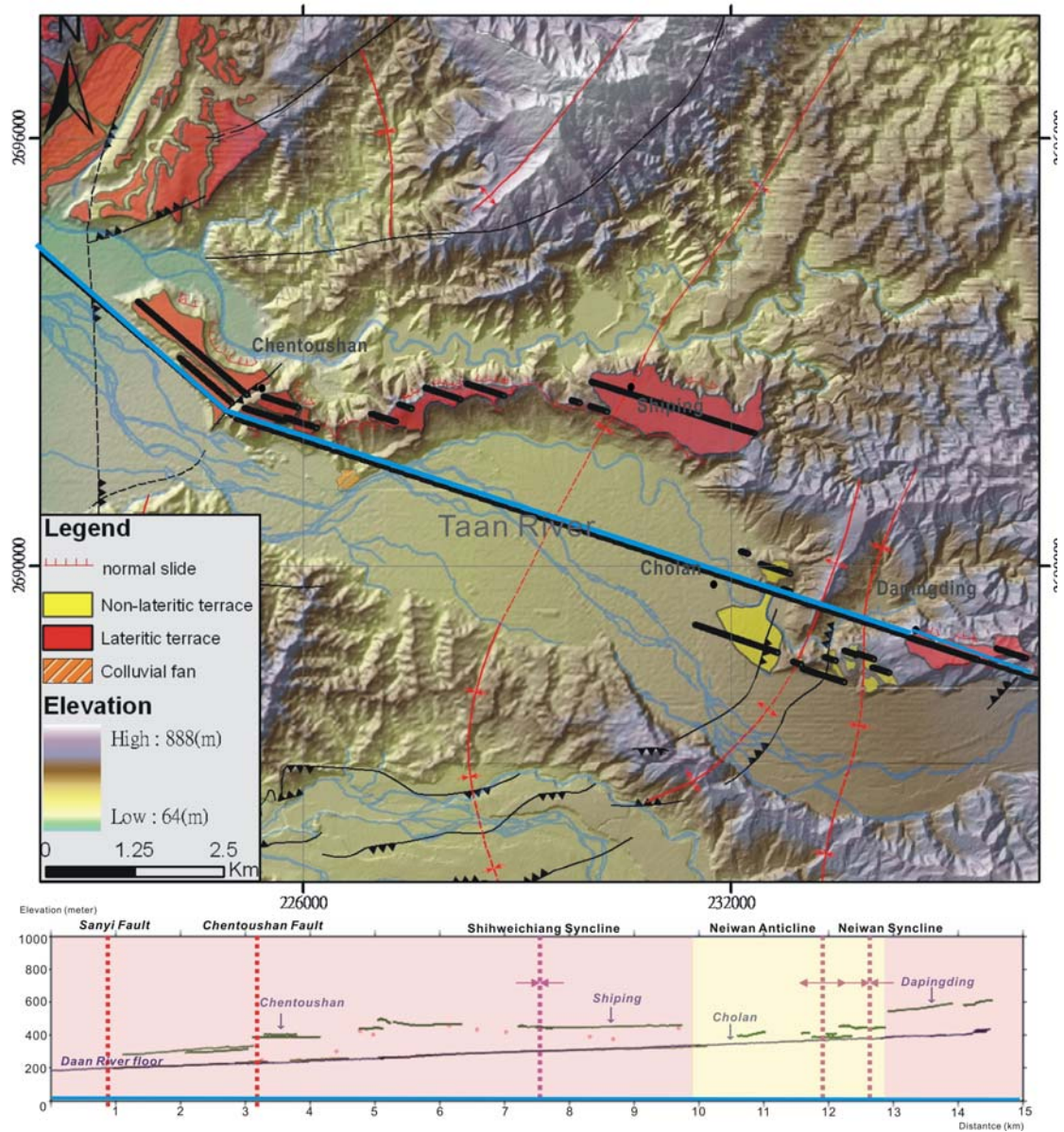
3.3 階地投影與震測剖面資料結合

近年研究新期構造多半仰賴 GIS 軟體，此軟體可以快速分析地表資訊。而利用地形剖面與地下震測作結合，也可以運用地下構造演化模式來推估現今地形和地下構造演化順序（王昱，2003），這樣的研究方法似乎是現今研究新期構造趨勢，但此方法僅利用地形剖面來推估地下構造幾何的運動形貌，並不能完全給予地形受到地下構造影響之定量數值，這是當時研究缺乏深入探討之部分。而這些和地下構造對比過後的地形面也不能完全視為構造成因，因為任何現今地表所

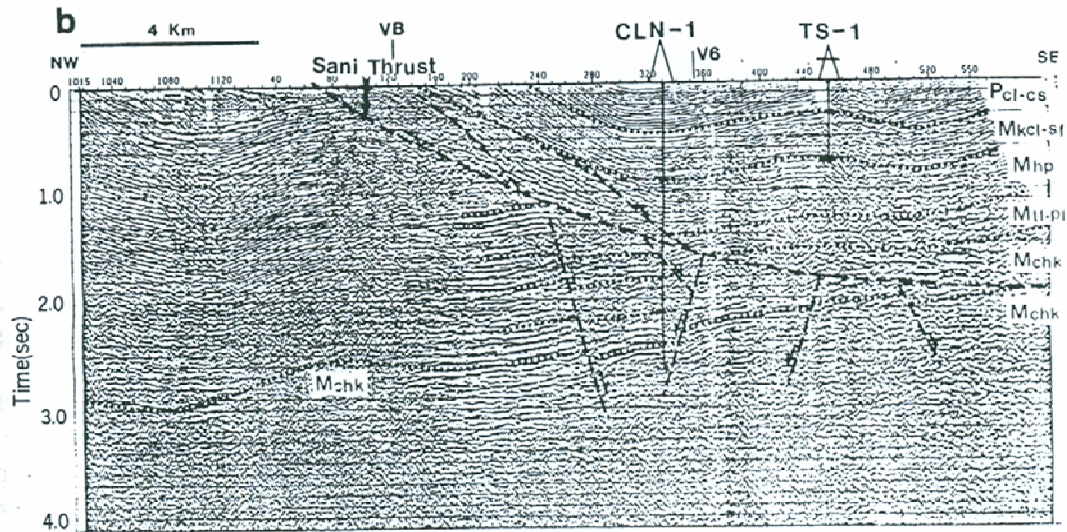
見之地形，皆有可能在形成之後受到不同的侵蝕作用影響，因此不能忽略此效應，所以利用地表地形剖面 and 地下構造結合是否可以完全解釋地表地形是有待探討的，有鑑於此，本研究改用河流階面來代替地形剖面，利用階地面可確保在形成後，可以分析所呈現的地形面資序訊是否完全因地下構造影響而變形。

此外本文利用在研究區域已經發表的震測剖面線 (Hung & Wiltschko, 1993; 楊耿明等, 2000, 2003; Yang *et al.*, 2007)，與河流階地剖面做相同尺度結合，假使製作剖面過程中投影線和測剖面斜交時，會導致地表出現空間資料發生重疊而無法完全和地下資料重合，因此本研究在製作剖面時讓地表河流剖面線與震測剖面線平行 (圖二十一)，這樣目的是確保所劃出階地面必定可以完全和地下構造做結合且不會發生空間上點重合之情形。

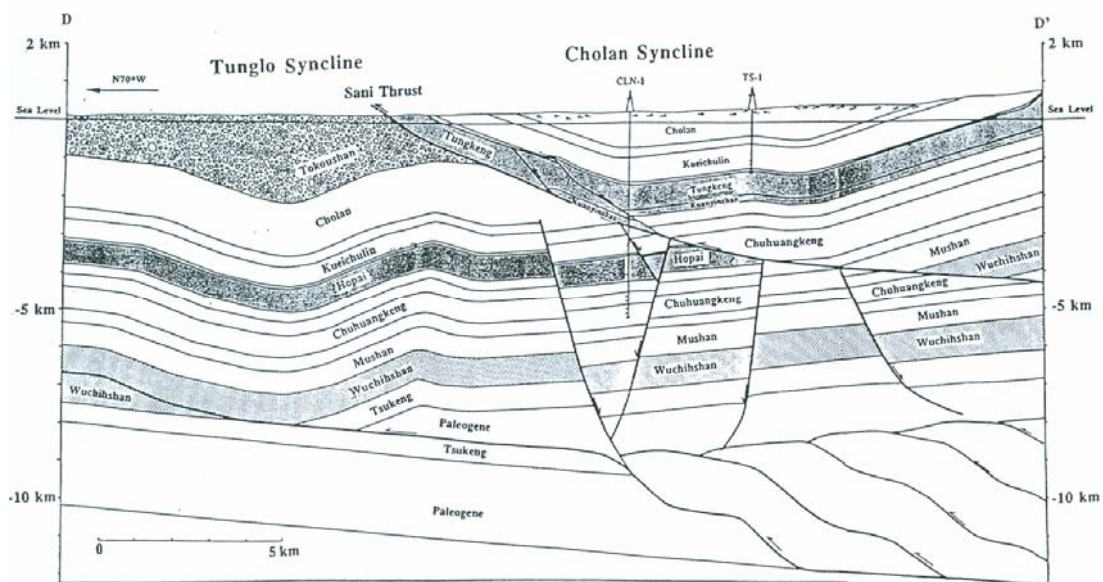
除了利用階地面和地下構造結合是最有可能反映真實地形面受到下伏構造之外，我們最主要是目的要量化出地下構造活動量，以補充前人之研究資訊。爲了要量化地下構造的活動性，必須要仰賴地表地形所給予的訊息，在河流階地剖面之中，所有現今被抬升的階地面在形成當時必定爲當時河床基準面，假設現今河床基準面在研究區域階地面形成之後沒有太大改變，再利用地下構造幾何型態爲回覆基準，經移動地下斷層面來將現今已抬升到河床面之上的階地面回復到現今河床基準線，如此一來便可模擬量化此斷層在階地面形成之後所滑移的距離。



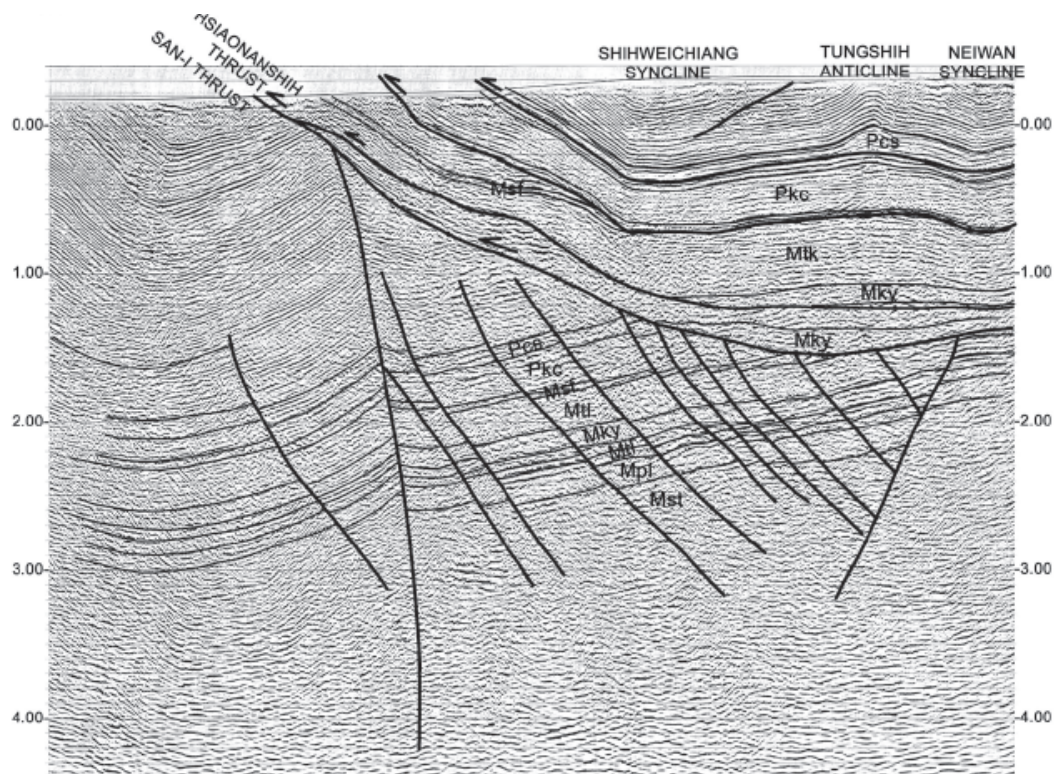
圖二十一：大安溪（Taan River）河流剖面投影圖。河流剖面線與震測剖面線平行，確保所劃出階地面必定可以完全和地下構造做結合且不會發生空間上點重合。



圖二十二：原始震測資料圖 (Hung & Wiltschko, 1993)。



圖二十三：震測解釋 (Hung & Wiltschko, 1993)。主要說明區域構造演化已經由早期正斷層系統轉化成為逆斷層系統。



圖二十四：震測解釋（楊耿明等，2000，2003；Yang et al., 2007）。發現除了三義斷層與小南勢斷層之外，上盤的上福基砂岩底部及錦水頁岩底部尚存在層間滑移斷層。

由洪日豪（Hung & Wiltschko, 1993）所發表的震測剖面之中可以看出三義斷層為主要基底滑移面，在三義斷層上盤分別存在兩條分支斷層（圖二十二~二十三），一條於地底走時差 1 秒時切穿中新世東坑層再沿上福基砂岩底部出露至地表，另一條則在更深部地方約在走時差 1.6 秒時切穿觀音山層與東坑層再沿上福基砂岩頂部與桂林層的層界出露至地表。將此剖面與地表地形資料對比之後，發現沿上福基砂岩頂部與桂竹林層層界的斷層應為野外所見的枕頭山斷層；而沿上福基砂岩頂部的斷層野外則不復見。該研究主要說明區域構造已經由早期正斷層系統轉化成為逆斷層系統。

在本區域內所選取的地下構造剖面之中，發現洪日豪（Hung & Wiltschko, 1993）所發表的震測剖面與楊耿明等（2000，2003；Yang et al., 2007）所發表的震測剖面為相同一條，這兩者解釋上有些許差異：洪日豪與楊耿明此兩位學者所發表剖面中都畫有三義基底滑脫面存在，不同的是洪日豪對於震測資料面解釋是

屬於三義基底滑脫面上的分支斷層，反觀楊耿明對於在枕頭山斷層的解釋上是屬於沿層面滑脫的斷層，另外還在三義基底滑脫面上多畫一條小東勢基底滑脫面。洪日豪在基底滑脫面的斷層之上並沒有多做任何解釋，楊耿明則是多畫兩條沿層面滑移的斷層 (bedding-slip fault) (圖二十四)。此外他們兩者皆未對內灣背斜成因多做解釋，但此區域恰巧是集集地震斷層所發生位置，因此本文想要討論近期構造演化，於是將剖面之中東勢背斜的部份，拿出已發表震測資料 (Hung & Wiltschko, 1993；楊耿明等，2000，2003；Yang *et al.*, 2007) 重新做解釋。

本文參考上述兩者震測剖面之後，重新數化震測資料重新解釋，本研究剖面之中與前者最大不同是：(1) 本文重新檢試楊耿明等 (2000，2003；Yang *et al.*, 2007) 發表震測剖面之中，是否有兩條主要基底滑脫面存在？所以本文參閱過原始剖面之後，發現無論此測線北側皆有小南勢斷層存在，地表也有此斷層存在，但本剖面之中於深部震測反射線並不清楚，且剖面回覆過程之中僅可以平衡一條基底滑脫面，如果要回復構造，三義斷層基底滑脫面與小南勢基底滑脫面可能還需要進一步修改斷層面幾何型態，為了整段剖面的平衡，所以本文重新數化剖面中僅劃一條三義基底滑脫面，並未將小南勢斷層勾勒出。(2) 於兩者剖面中對於枕頭山斷層解釋上，洪日豪 (Hung & Wiltschko, 1993) 將枕頭山斷層視為三義斷層上盤分支斷層，楊耿明等學者 (2000，2003；Yang *et al.*, 2007) 則將枕頭山斷層視為三義斷層上盤的層間滑移斷層，本研究重新回復檢視後認為枕頭山斷層應為三義斷層上盤分支斷層，原因是在原始剖面之中也確實有地層傾斜產生，剖面回復過程中也屬於三義滑脫面上的分支斷層，在接近地表處大致則沿上福基砂岩頂部滑移，並非完全在地下沿著上福基砂岩滑移，並且野外也觀察到此斷層出露，因此認為枕頭山斷層為三義斷層的分支斷層。(3) 楊耿明等 (2000，2003；Yang *et al.*, 2007) 剖面之中有判釋出在內灣背斜下方錦水頁岩厚度大致上為其他區域兩倍厚，這岩層增厚效應可能是造成地表內灣背斜的結果。

3.3.1 剖面回復

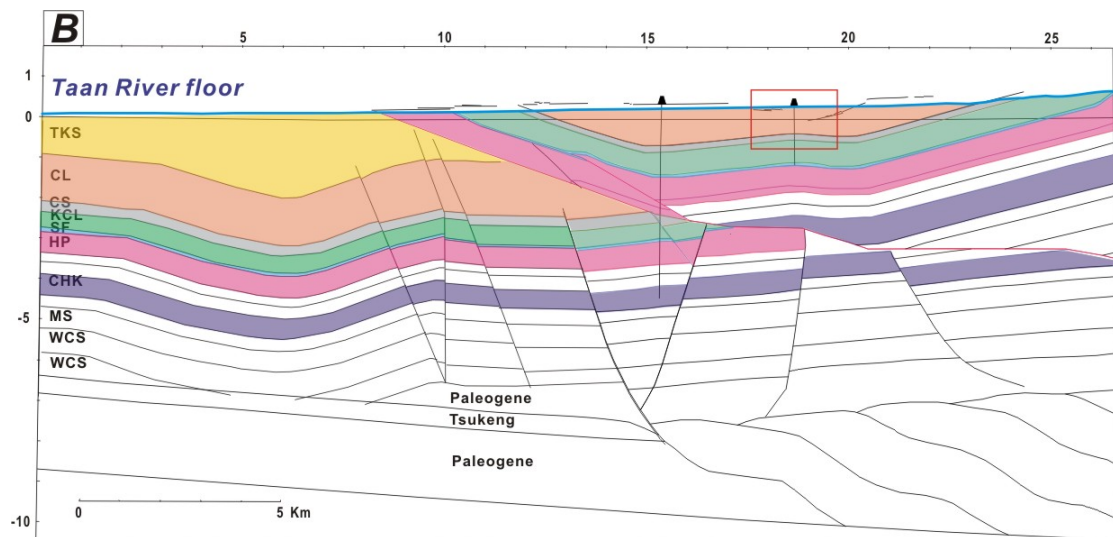
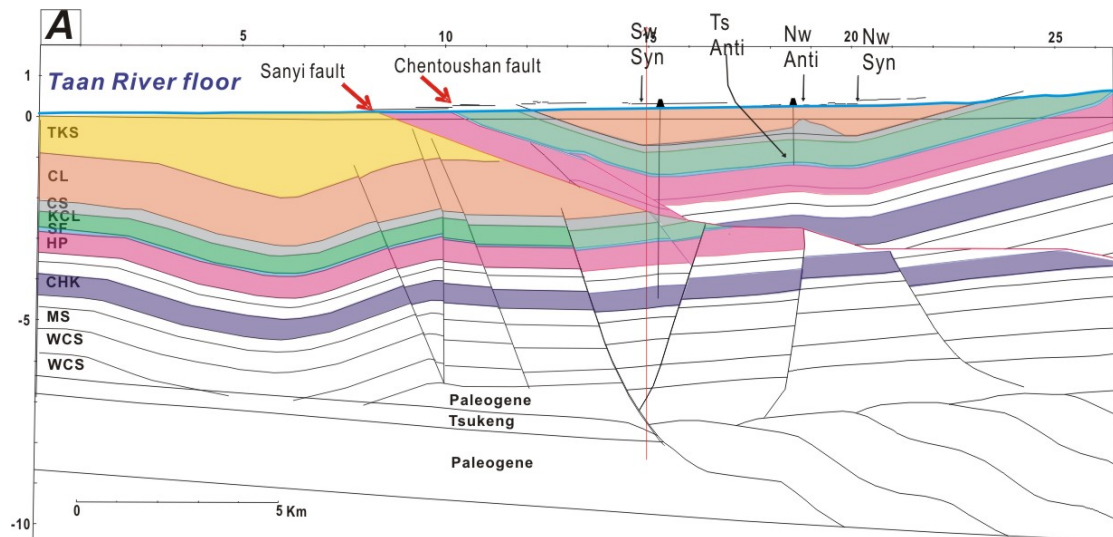
爲了檢查該剖面是否具合理性，本研究將此剖面依序進行回復，以重新檢視基底滑脫面的滑移量與斷層面的幾何型態之合理性。首先回復造成錦水頁岩增厚的內灣背斜，但我們了解到錦水頁岩變厚事實，如果受到來自東邊應力推擠時，原位於錦水頁岩之上下地層因岩性屬於塑性之岩層，因此受到相同方向應力時便容易在錦水頁岩內部產生體積變形而使同一層岩層變厚，可能的生成模式有疊置構造（duplex）或滑脫褶皺（detachment fold）可以造成這樣岩層變厚的結果，本文不考慮上述兩者可能性，只單純將錦水頁岩岩層增厚區域效應去除，此時可以分別找尋錦水頁岩中任何一層未受到地表內灣背斜以及未受變形一層來做回構造恢復。依據使用 2D Move 軟體之曲滑褶皺回覆法（flexural slip unfolding），將未變形的錦水頁岩視爲 TB，把變形之後的錦水頁岩頂部恢復到 TB 幾何外型，便可以將錦水頁岩局部增厚效應給去除且造成錦水頁岩在此剖面有 60 公尺的壓縮量存在（圖二十五 B）。

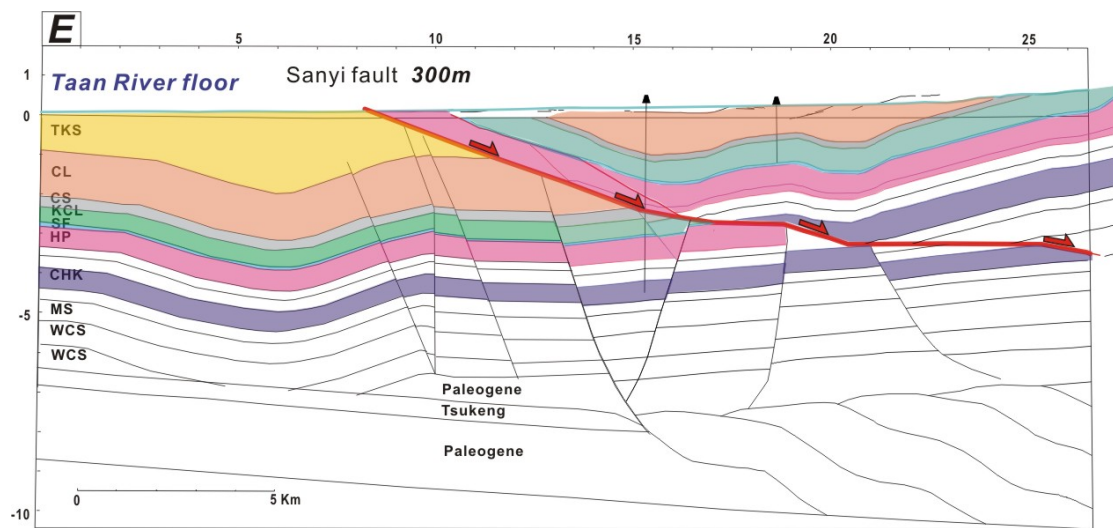
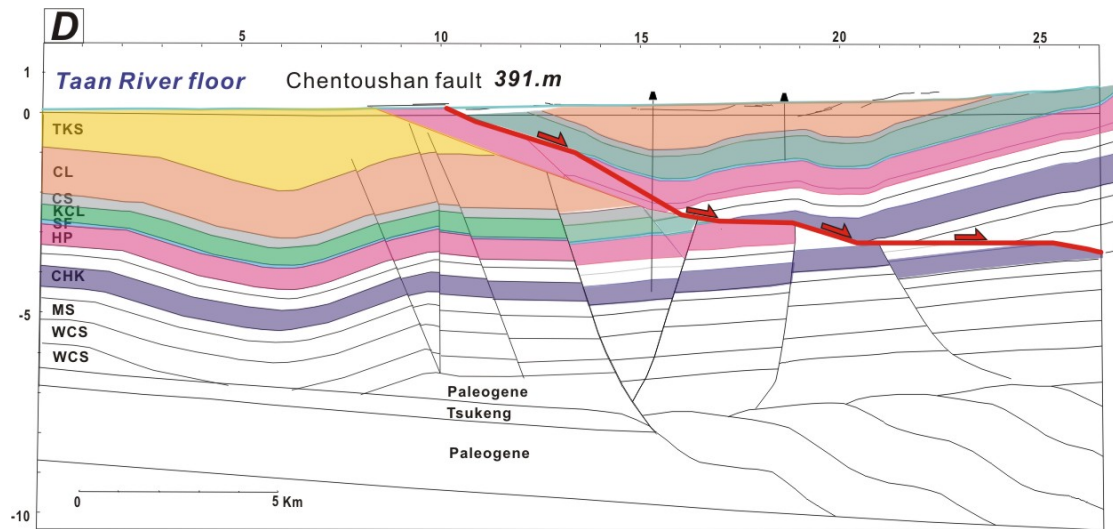
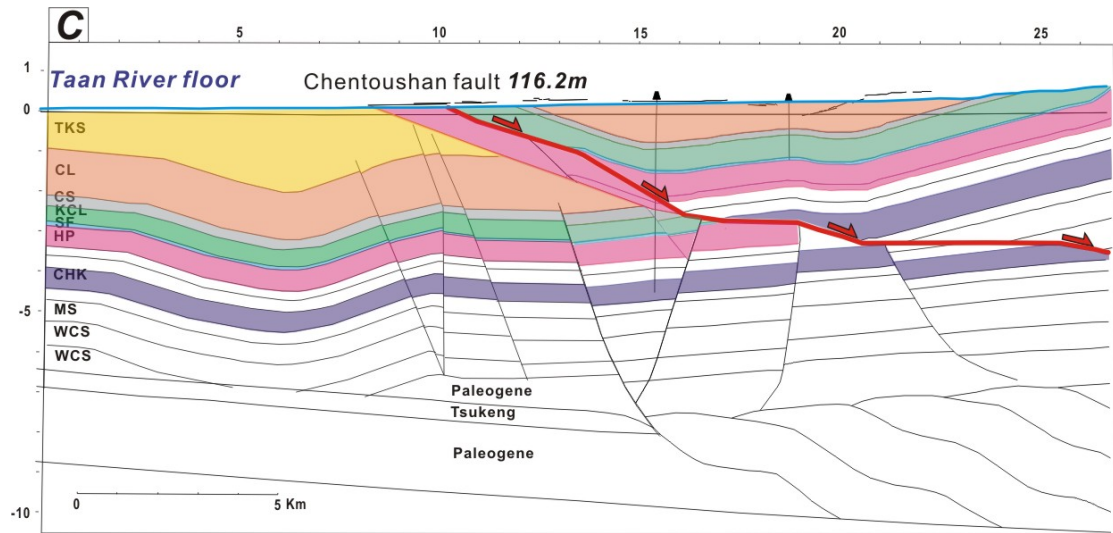
此時再把地表階地面回覆，發現未紅土化階地群已經完全降低到現生河床面之下，這暗示著鄰近卓蘭兩側未紅土階地群可能形成年代是在錦水頁岩岩層增厚以後才形成。接著回復區域內紅土階地群，首先我們先去除枕頭山斷層，作爲回復構造恢復基準，依據斷層平行回覆法（fault parallel flow），利用地形資訊將枕頭山斷層回覆 116.2 公尺，斷層上下盤發現紅土化階地群頂面成一條線性（圖二十五 C）。

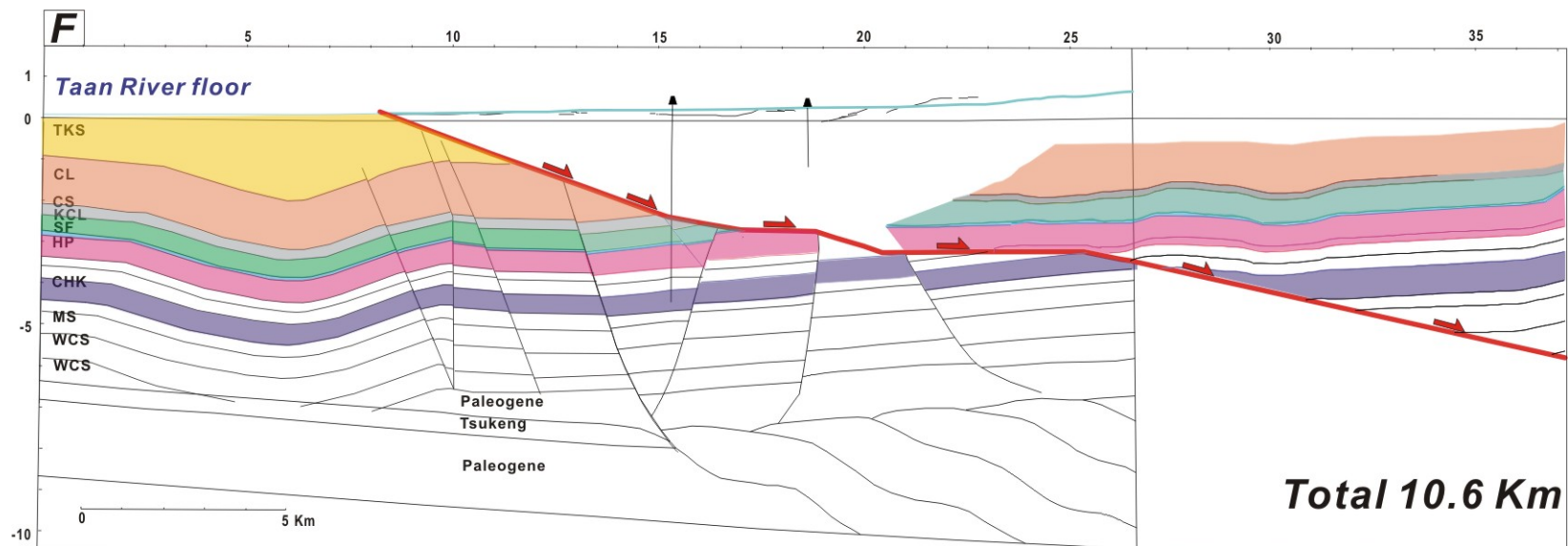
此外，枕頭山斷層在剖面中於深部東坑層有錯移，因此嘗試以東坑底部作爲斷層錯移前的原始面，在整體剖面移動約爲 500 公尺左右，如果與地表階地抬升所估算的移動 116.2 公尺相互比較，大約還有 400 公尺的差距（圖二十五 D），這可能間接暗示著在紅土化階地 Lt1 形成之前此斷層已經存在已久，並且在 Lt1

形成之後仍持續活動，而紅土化階地只記錄了近期沿斷層面滑移 116.2 公尺。

接著回覆存在枕頭山斷層下盤的階地，此時再輔助河流坡度，將紅土化階地面形視為受到三義斷層活動而產生的垂直抬升動，利用斷層平行回復法（*fault parallel flow*），推斷三義斷層在紅土階地群形成之後還曾經有活動至少 300 公尺位移量存在（圖二十五 E），但是下盤礫石抬升亦有可能為河流下蝕力所造成，關於這部份兩個不同論點於後續會進行說明。最後我們回覆深部的東勢背斜，將河排層（HP）底部視為斷層滑移前的基準面，而整體剖面此時大約有 10.6 公里水平壓縮量存在（圖二十五 F）。







圖二十五：(A)原始構造平衡剖面圖。本剖面中將討論三義斷層(Sanyi fault)、枕頭山斷層(Chentoushan fault)、石圍牆向斜(Shihweichiang Syncline)(Sw Syn)、東勢背斜(Tungshih Anticline)內灣背斜(Neiwan Anticline)(Nw Anti)以及內灣向斜(Neiwan Syncline)(Nw Syn)之間生長先後關係。(B)回覆錦水頁岩局部增厚，此增厚是因為車籠埔斷層側斜坡影響。利用 **Flexure-slip method** 回覆錦水頁岩厚度，估算此剖面中大約有 60 公尺左右壓縮量存在 (C) 回覆枕頭山斷層位移，利用地表資料將河流階地面，利用 **Parallel fault-bend Fault method** 順地下斷層滑移 116.2 公尺，如此一來便可以將上下盤受斷層錯移階地回覆到相同水平面之上(D)回覆地下河排層，利用 **Parallel fault-bend Fault method** 順地下斷層滑移約 390 公尺 (E) 回覆三義斷層在紅土礫石形成之後可能的壓縮量，但這也有可能為大安溪流域在礫石形成之後的侵蝕量，利用 **Parallel fault-bend Fault method** 順地下斷層滑移約 300 公尺 (F) 以河排層(HP)底部為基準面來回覆三義斷層整體滑移量，利用 **Parallel fault-bend Fault method** 回覆剖面，總壓縮量約為 10.6 公里。

第四章 討論

4.1 枕頭山斷層

枕頭山斷層位於大安溪北岸，斷層東側出露桂竹林層，西側出露紅土礫石層（潘國樑，1983），其斷層線崖方位約北偏東 45 度，可追蹤斷層線長度約為 800 公尺，此斷層線往南受大安溪侵蝕作用影響而不明，往北亦無明顯可對比之線型，根據以往地表觀察一般認為枕頭山斷層為右移斷層（湯振輝，1969；潘國樑，1983，1985；李錦發，1994）；但根據重力資料則推斷為正斷層（葉義雄，1983，1984；顏宏元，1983）；過去地形面分析，曾報導斷層崖高約 60~70 公尺，暗示此斷層可能有重複活動的情形（Ota *et al.*, 2006a；2006b）；本研究利用航空照片、輔助地形分析，將枕頭山階地群細分為 Lt1 及 Lt2 兩河階群（圖十二），除去 70 公尺斷層崖高，發現在枕頭山斷層兩側各有一組可對比之 Lt1 及 Lt2 階地，斷層兩側河階崖的視錯移似為左移活動，不過配合野外調查結果來看，枕頭山斷層主要仍為逆衝斷層。

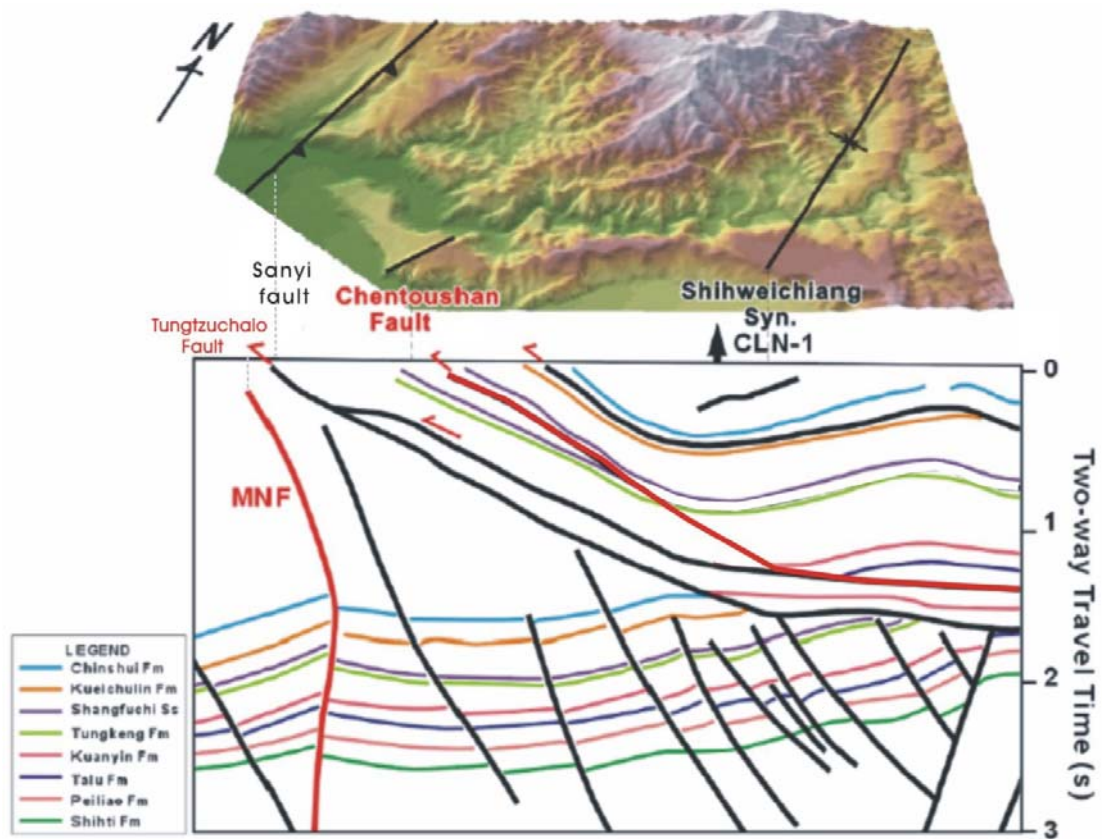
本研究整合震測剖面後，發現枕頭山斷層為三義斷層上盤的分支斷層（Hung & Wiltschko, 1993），且主要是順層面滑移，斷層面向東南傾（楊耿明等，2000，2003；Yang *et al.*, 2007），但於野外調查時並未能發現斷層露頭（圖十四），因此利用岩層層面位態（N20E, S38°）來代替斷層面位態，故使用 38° 為斷層面傾角，再以斷層線崖高 70 公尺為垂直錯移量，經三角函數轉換，推算出枕頭山斷層在紅土階地面 Lt1 形成後，至少沿斷層傾角滑移（Dip slip）114 公尺（圖十六），再利用平面幾何回推河階崖，得知於逆衝過程中大約左移了 24 公尺的走向滑移量（Strike slip）（圖十五），所以沿斷層面淨滑移（Net slip）約為 116 公尺。綜合上述分析，枕頭山斷層走向與傾向的滑移分量比例約為 1: 4.8。

4.2 枕頭山斷層與屯子腳地震斷層之間的關聯性

本段分別以地表資料與地下構造剖面，來討論枕頭山與屯子腳地震斷層之間關連性。依據 1935 年震後調查報告，了解屯子腳地震斷層往北產生一北偏東 30° 之地表破裂線其終止於大安溪南岸，而枕頭山斷層位置恰巧位於大安溪北岸，其線性崖方位約北偏東 45° 度，在平面空間之上兩條斷層似為共線，因此過去之研究常認為枕頭山斷層可能為屯子腳地震斷層的向北延伸（潘國樑，1985，1985；李錦發，1994；沈淑敏等，2005）。然而，利用地形資訊探討此兩條斷層崖時，發現跨過屯子腳斷層地震斷層構造崖高差約為 3~5 公尺，而枕頭山斷層線崖高差約為 70 公尺，且兩岸皆為紅土階地，為何跨構造崖高差時兩條斷層有 10 倍以上差距？屯子腳斷層是 1935 年的地震斷層，為一右移斷層，走向北偏東 60° 度（大塚彌之助，1936），雖然過去利用河階崖視位移認為枕頭山斷層也是一右移斷層（湯振輝，1969），如前小結討論，我們利用兩小群間的河階崖錯動行為，可以證實其應該為一以逆衝為主的斷層微帶點左移分量（圖十四~十六），因此可知兩斷層近期的行為完全不同。

另外由地下構造剖面研究，顯示屯子腳地震斷層為源於三義斷層下盤地殼較深處之一條正斷層（MNF），因受近期地殼東西向壓縮，轉而活化形成一右移為主的平移斷層，其斷層面為高角度向西北傾（林玉農，2005）（圖二十六）；反之，枕頭山斷為三義斷層上盤的分支斷層（Hung & Wiltschko, 1993），且主要順層面滑移，斷層面向東南傾（楊耿明等，2000，2003；Yang *et al.*, 2007）。

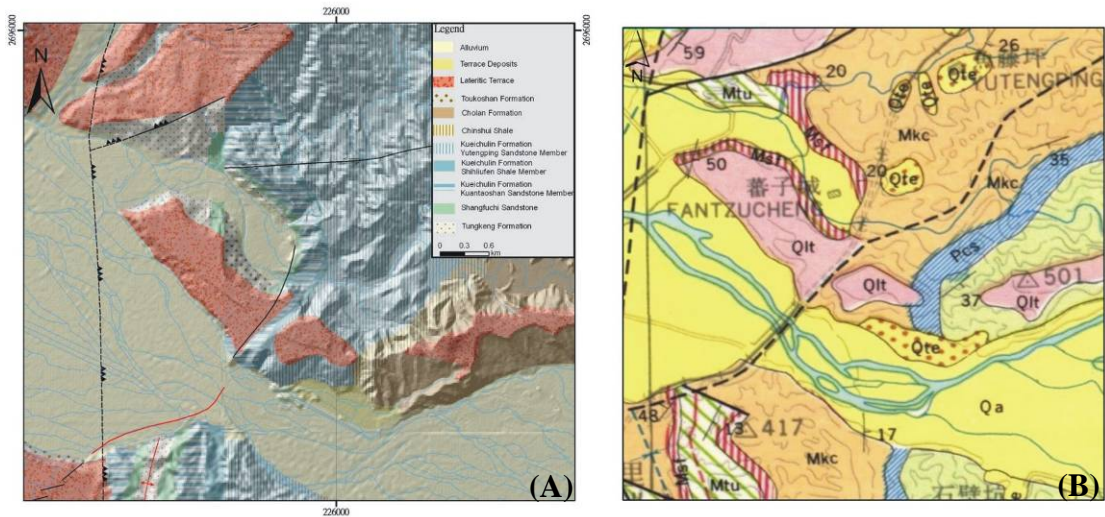
由上述討論總結，兩條斷層不但在運動行為上有很大的差異，而且在三度空間上基本上不相接，故認為此兩條斷層不是同一條斷層，只是在平面空間上看似為線性相關。



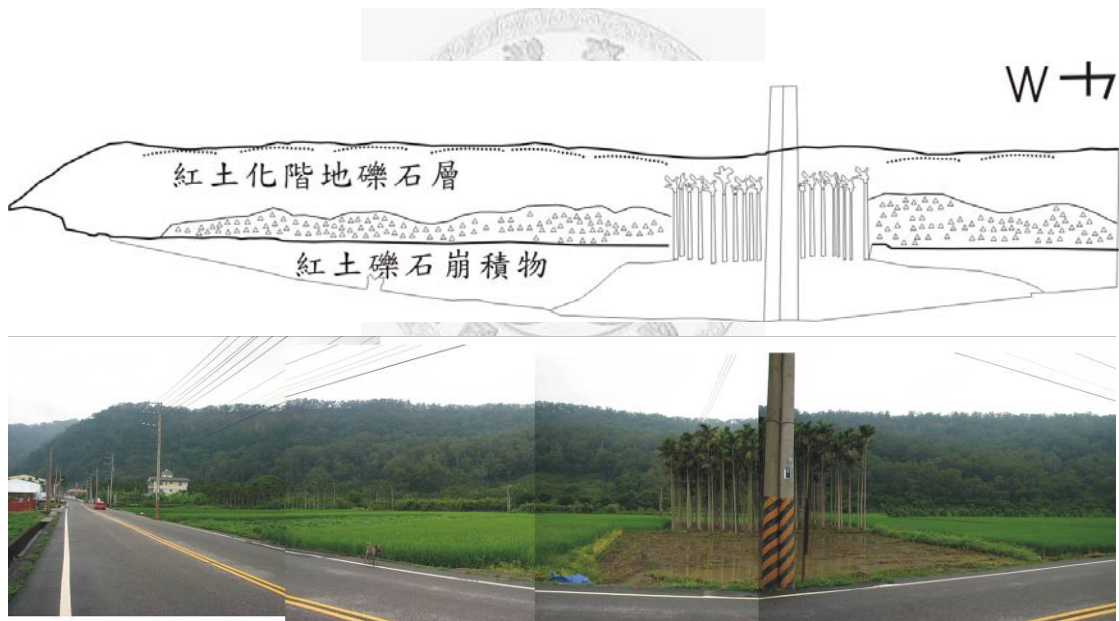
圖二十六：大安河流域震測構造圖（修改自林玉儂，2005）。在此剖面之中，屯子腳地震斷層源於三義斷層下盤地殼較深處之一條正斷層（MNF）；而枕頭山斷層（Chentoushan fault）則位於基底滑脫面之上（楊耿明等，2000；林玉儂，2005 Lin, *et al.*, 2007），兩條斷層無論是斷層面幾合型貌、運動特性、以及構造層位皆大為不同。

4.3 枕頭山地區之地質製圖

本研究在枕頭山地區的地質調查，參考了地質調查所的東勢圖幅（李錦發，2000）與大甲圖幅（張憲卿，1994）與中國石油公司苗栗圖幅（1984）之後，發現一個地質圖在製圖上的小缺陷（圖二十七），由中央地質調查所製圖中將鯉魚一號橋南側露頭認定為頭料山層出露，但是本研究僅在三義斷層下盤發現有頭料山層連續出露，並未發現在三義斷層上盤有其他任何頭料山層出露，而中油地質圖之中也未畫出頭料山層出露，而在相同區域中油地質圖認定為晚中新上福基砂岩，兩者有著極大上岩性判釋差異，此區域如果真為頭料山層出露，那麼本區域地質構造演化將更顯複雜，此填圖上的差異可以大致在野外上看出發生的原因，因此本研究加入了航照判釋、文獻回顧與野外調查之後，認為此區域應該是上福基砂岩之上由紅土礫石崩積物不整合覆蓋，而非中央地質調查所認定的頭料山層，其錯置起因可能是本區域頭料山層為火炎山相，故其岩相組合上是以礫岩為主，野外觀察時也的確發現有礫石不整合覆蓋於上福基砂岩之上（圖二十八），但是如果再查訪四周地形時會發現，露頭出露位置剛好位於山崩的堆積區，而在周圍地形高區則為紅土化階地堆積層，加上航照判釋與文獻報導皆顯示此區域曾經發生過多次山崩事件，因此本文認為地質調查所所認為的頭料山層火炎山相，其實應該為紅土礫石因山崩作用堆積到現在位置，一般而言頭料山層中之礫石常見破碎者，而後期河階積層中的礫石則很少破裂情形，因此以往常以其中礫石有無破碎證據以區別頭料山層與現生河階堆積層（李錦發，1994），本研究依據此判釋原則，以及地形特徵與構造發育之時空關係，建議填成紅土化礫石崩積物較為恰當。



圖二十七：枕頭山與其鄰近地區之地質圖。(A)地質調查所將枕頭山地區繪為頭料山層出露〔東勢圖幅(李錦發, 2000)與大甲圖幅(張憲卿, 1994)〕;(B)中油地質圖則表示,此區域以上福基砂岩為主(中國石油公司苗栗圖幅, 1984)。



圖二十八：枕頭山地區山崩事件圖。此區域經由野外地質調查之後,發現主要為大型山崩事件的堆積區,因此比較有可能的堆積關係為,紅土礫石崩積物不整合覆蓋於上福基砂岩之上。

4.4 主要構造演化過程

由地質與地形的過去研究得知，本研究區域主要構造有三義斷層、枕頭山斷層、車籠埔斷層、1999 集集地震斷層、石圍牆向斜、深部東勢背斜、內灣背斜、內灣向斜，本研究利用構造平衡回覆之後，提出此地區可能之構造演化過程：

1 地殼伸張期正斷層發育：

在南莊運動時期造成區域內地殼抬升，此時產生許多正斷層的半地塹，這也造成區域深部存在許多早期正斷層系統（如 MNF）（圖二十六）。

2 三義斷層發育期（圖二十九 A）：

蓬萊造山運動於晚中新世開始在台灣地區持續作用之下，大約在 70 萬年前三義斷層（車籠埔斷層）開始活動，在三義基底滑脫面滑移過程之中遇到早期正斷層系統時，以這些正斷層為斷坡向上發展滑脫面，並且最後出露至地表，因應滑脫面幾何型態之轉變，在其上盤同時也產生了石圍牆向斜、深部東勢背斜、內灣向斜。

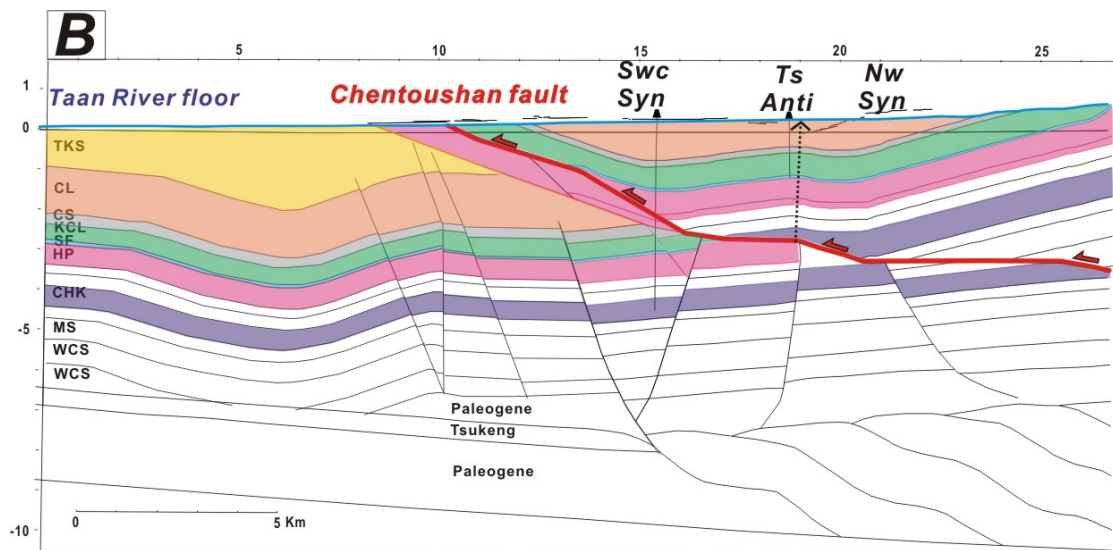
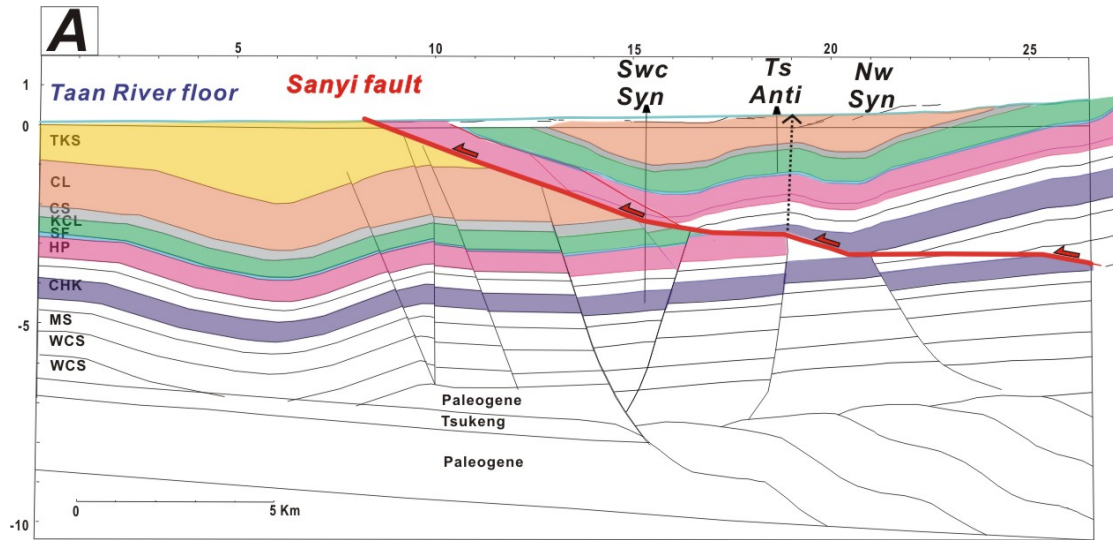
3 枕頭山斷層發育期（圖二十九 B）：

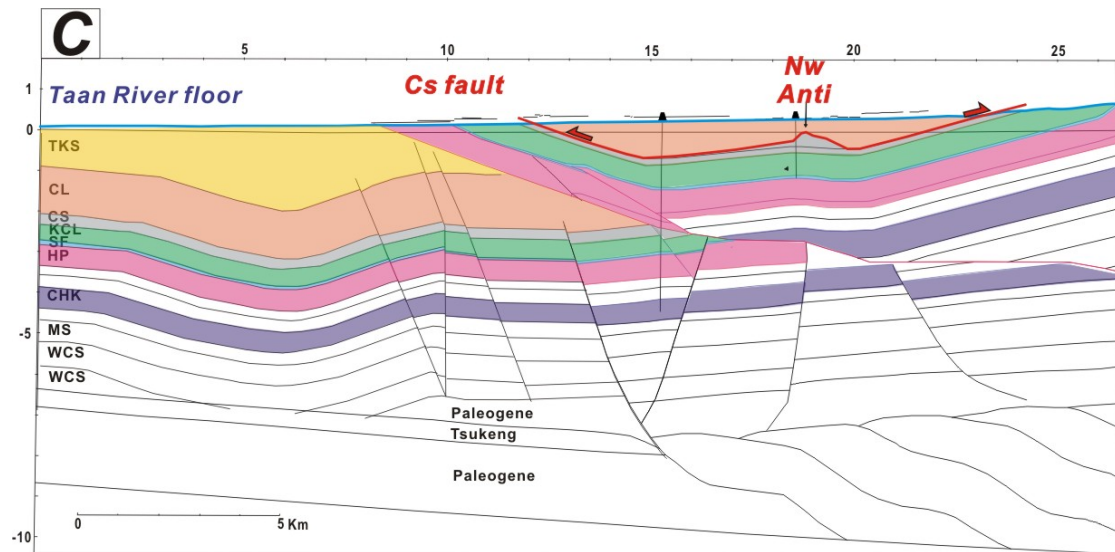
深部基底滑脫面發育至本區域，其所帶來之應力，活化了三義斷層下盤既有之正斷層系統，使得其上方之三義斷層受阻，開始往層位較高處之弱面產生分支斷層，即枕頭山斷層。在枕頭山斷層滑移過程之中，東勢背斜與內灣向斜亦持續生長。

4 內灣背斜發育期（圖二十九 C）：

中部地區車籠埔斷層向西發展的過程中，同時也向北深入了三義斷層上盤相對較軟的錦水頁岩內，導致錦水頁岩在東勢背斜之上，岩層局部增厚並在淺部地

殼中發育內灣背斜，而在此背斜發育同時，也沿錦水頁岩發育了其他沿層面滑移的斷層，1999 集集地震發生時，此區域產生的地表變形證明了內灣背斜至今仍在持續發展。



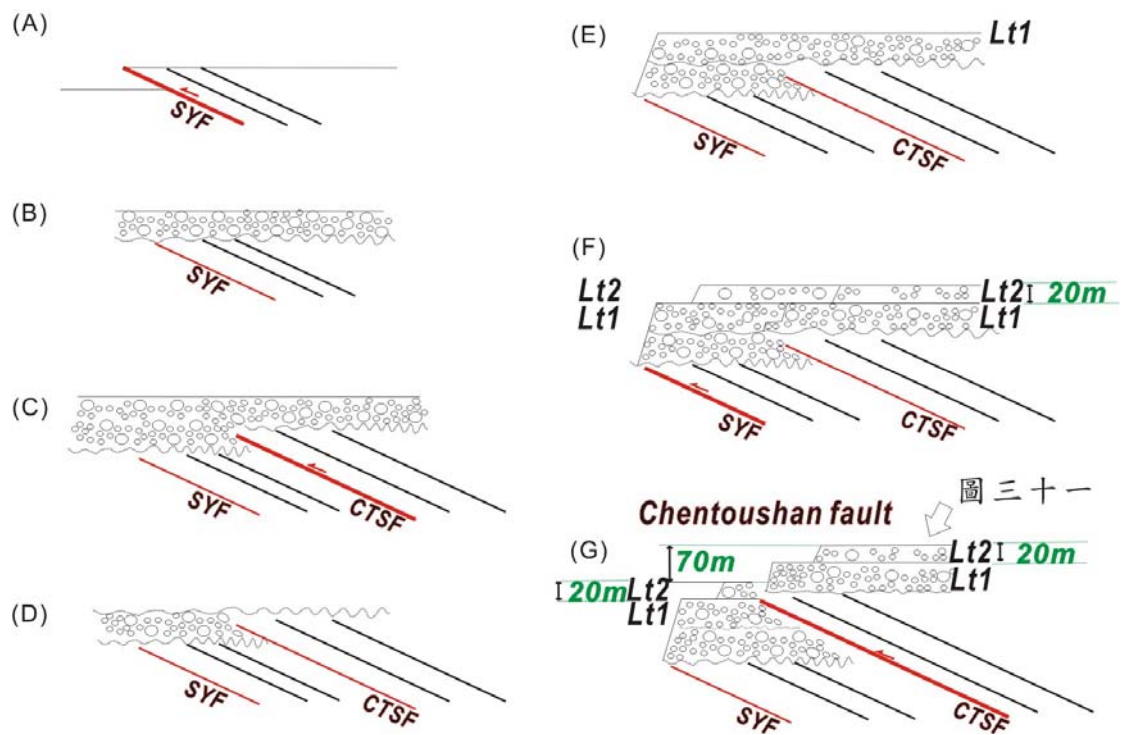


圖二十九：區域構造演化圖。(A) 三義斷層 (Sanyi fault) 開始活動造成區域內石圍牆向斜 (Sw Syn)、東勢背斜 (Ts Anti)、內灣向斜 (Nw Syn)；(B) 三義斷層轉為不活躍，而轉向層位較高處發育分支枕頭山斷層 (Chentoushan fault)；(C) 受到三義-車籠埔側斜坡影響，使得錦水頁岩局部增厚在地表產生內灣背斜 (Nw Syn)，於錦水頁岩層間產生沿層面滑移斷層 (楊耿明等，2000，2003；Yang *et al.*, 2007)。

4.5 新構造活動與河階地形之發育

本段討論大安河流域枕頭斷層山上下盤階地的形成與地下構造關連性。枕頭山斷層下盤階地堆積約為 116 公尺厚左右，而上盤階地堆積約為 90 公尺厚左右，有約 30 公尺的厚度差別，因此必須重考慮上下盤階地面是否為等時面。假若上下盤不為等時面，枕頭山斷層在階地形成之後若持續活動，上盤因受斷層抬升遠離河床面而河流帶來的礫石則不易堆積於其上；相反地，下盤階地面未受斷層抬升，相較而言仍可以沉積新的礫石沉積，當斷層再抬升河流再沉積過程之中，上下盤階地也會形成不同厚度的上覆堆積，但由枕頭山上下盤的階地面上，Lt1 與 Lt2 存在有 20 公尺高的河階崖，故判斷上下盤階地面應均為等時面。不過，本研究經由震測資料解釋與回覆斷層先後關係之後，認為此階地面形成可以分成幾個步驟，最初階段三義斷層的活動使其上盤抬升後 (圖三十 A)，三義斷層因河流侵蝕速率大過地殼抬生速率，斷層線崖被河流侵蝕 (圖三十 B)，爾後階地礫石覆蓋於三義斷層上盤，且枕頭山斷層開始於三義斷層上盤滑脫面分之發育出

來，若由平衡剖面回覆地下東坑層錯移層位，了解此斷層至少先滑移 380 尺左右（圖三十 C），後枕頭山斷層受到河流侵蝕作用（圖三十 D），而未能保留初期的斷層崖，不過此時三義斷層持續活動形成 Lt1 和 Lt2 階地面，並最後將 Lt1 和 Lt2 階地抬升，由平衡剖面回覆推估三義斷層大概滑移 300 公尺（圖三十 E、F），之後枕頭山斷層才開始活躍，造成 Lt1 和 Lt2 階地面同時錯移而產生 70 公尺的斷層線崖（圖三十 G），並且造成平面上視覺錯移的左移分量存在，這樣的發育過程可解釋地表階地面不等厚，但階地上下盤可以相互對比的現象，同時也符合地下構造合理回覆的過程。



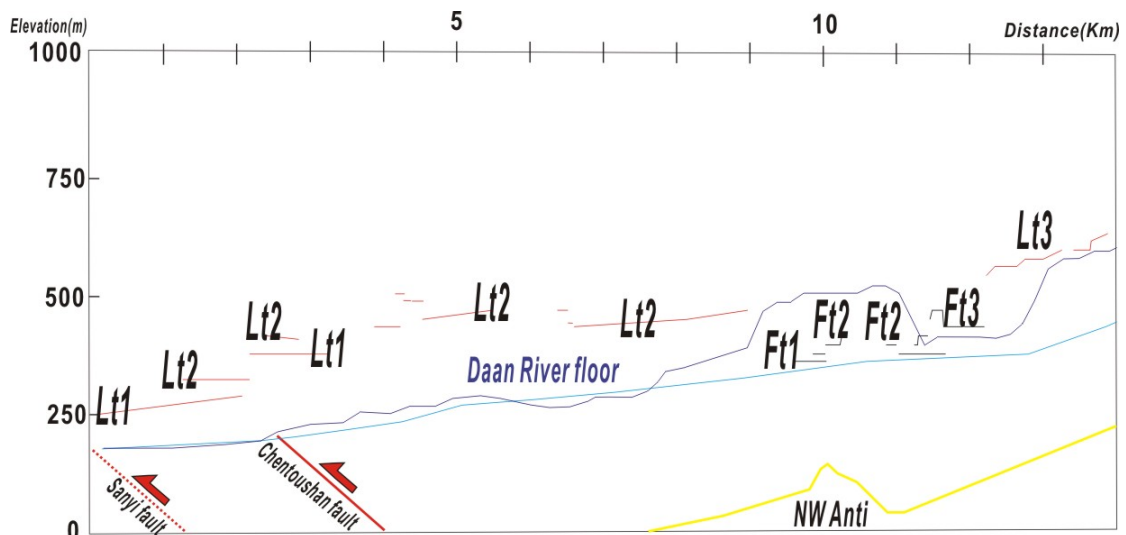
圖三十：枕頭山地區階地演化圖。(A)三義斷層活動造成東坑層上衝至地表；(B)河流侵蝕上盤並於上方覆蓋河流礫石層；(C)枕頭山斷層從三義斷層滑脫面分支出來，開始活動錯移上覆礫石層；(D)枕頭山斷層，受到河流侵蝕作用；(E)三義斷層活動產生 Lt1 階地；(F)產生 Lt2 階地，三義斷層活動，由平衡剖面回覆得知這個時期三義斷層大概滑移 300 公尺；(G)之後枕頭山斷層轉趨活躍造成上下盤階地錯移 70 公尺。



圖三十一：枕頭山斷層上盤出露礫層。由此剖面中可以清楚發現，上盤礫石 Lt2 已經明顯受到斷層抬升而傾斜，層面約略向上游方向傾斜。

接著討論大安溪流域階地形成與地下構造關聯性，本研究以現生河床面來模擬受地下構造變形後的河床面，是假設現今河床基準面在研究區域階地面形成之後沒有太大改變，再利用地下構造幾何型態為回覆基準，經移動地下斷層面來將現今已抬升到河床面之上的階地面回復到現今河床基準線，如此一來便可模擬階地與河床面受到地下構造的影響，模擬過程與圖二十五相同。再將模擬結果與河流階地剖面作為比較，並將高程垂直放大 10 倍。由西往東來討論時紅土化階地群，發現受地下構造變形後的河床面於前段符合階地與河流幾何型態，而在錦水頁岩上出露斷層位置，受變形後河流剖面略高於現生河床面，因此階地面上 (Lt 2) 也反映出變形，於階地面最上方面向上游傾動，在 Lt 3 階地面上，就無明顯變形產生，此外，內灣背斜兩翼，顯示受變形河床面明顯高於現生河床面，這也暗示著近期內灣背斜仍在持續生長，而且現生未紅土化階群 (Ft) 僅記錄了近期一部份的抬升歷史。

整合上述討論 (圖三十) 與前面研究結果顯示 (圖三十二)，在大安溪流域可以區分為紅土群以及未紅土化階地群，紅土化階地群則受到枕頭山斷層活動而錯移，此外在車籠埔斷層向西發展的過程中，向北深入了三義斷層上盤相對較軟的錦水頁岩內使得岩層局部增厚，也形成其他沿層面滑移的斷層，導致有部份變形量發生在在斷層出露處 (Lt 2)，而未紅土化階地群 (Ft) 係因於內灣背斜開始 (Nw Anti) 發育之後才形成。



圖三十二：大安溪流域階地與地下構造剖面圖。Lt 代表紅土化階地群，Ft 代表未紅土化階地群，淡藍色線段表示現生河床面，深藍色線段表示模擬現生河床受地下構造變形結果（高程垂直放大 10 倍）。

4.6 三義斷層長期滑移速率

本研究藉由數化的剖面回復三義斷層，所得到滑移量大約為 10.6 公里（圖二十五），與楊耿明等（2003）所估算之滑移量 9.8 公里相差不大，從西部麓山帶沉積岩岩相推估三義斷層（車籠埔斷層）大約在 70 萬年以前開始活躍（陳文山等，2000a），可以由此估算出三義斷層長期滑移速率約為每年 15.1 公釐。另外，於濁水溪流域，利用階地受斷層活動抬升高度，以及階地所採 ^{14}C 樣本 (Simoes *et al.*, 2007b)，來估算車籠埔斷層長期滑移速率約為 15.8 ± 5.1 公釐。而俞立凡等 (Yue *et al.*, 2007) 則是利用 classic fault-bend fold 模型，配合階地上所採之光螢光定年樣本，來估算車籠埔斷層北段的長期滑移速率約為 14.5 ± 4.3 公釐。

此外，台灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的交界，相對來說菲律賓板塊以每年約 82 公釐的速率朝西北方往歐亞板塊移動 (Yu *et al.*, 1997)，由於兩板塊間快速地聚合，研究發現導致了花東縱谷吸收了大約每年 30~40 公釐的縮短速率 (Yu *et al.*, 1997；Hsu *et al.*, 2003；Shyu *et al.*, 2005)，在近期研究曾報導台灣西部麓山帶之縮短速率為每年 42 公釐 (Simoes & Avouac, 2006)，其中西部麓山帶

近期研究彰化斷層滑移速率每年 16.3 公釐 (Simoes *et al.*, 2007a) 若與本研究所算出三義斷層滑移速率每年 15.1 公釐疊加時，發現兩條主要前緣斷層整體滑移速率約為每年 31.4 公釐。這也間接暗示著，前緣斷層吸收了西部麓山帶 75% 的縮短量，日後對於這兩條斷層應將投入更多研究。



第五章 結論

1. 本研究發現利用河流階地投影與地下構造剖面做等尺度結合時，就可以量化及反衍河階演育與地下構造變化的關聯性。
2. 屯子腳地震斷層與枕頭山斷層，不但在運動行為上有很大的差異，且在三度空間分布型態截然不同，只是在高空俯視下的平面空間裡，兩斷層跡看似為線性連接。
3. 紅土階地 Lt1 形成之後枕頭山斷層至少沿斷層面滑移 116 公尺；配合剖面回復得知在三義斷層在紅土階地 Lt1 形成後曾經滑移 300 公尺。
4. 經由地下震測剖面重新解釋，中部地區車籠埔斷層向西發展的過程中，同時也向北深入了三義斷層上盤相對較軟的錦水頁岩內，導致錦水頁岩在東勢背斜之上，岩層局部增厚並在淺部地殼中發育內灣背斜。
5. 研究區域內紅土化階地群的演育主要受枕頭山斷層與三義斷層所主導；此外，未紅土化階地群則受內灣背斜抬生所影響。
6. 本研究區域東起卓蘭西至枕頭山地區，經本文野外調查後發現，本區域淺在地質災害包含斷層線出露、崩積作用、以及褶皺變形行為。斷層災害主要分布於頭山斷層線形崖兩側，崩積所造成地質災害主要分布於研究區域所有高位紅土階地面邊緣，另外在地表褶皺崖影響評估上主要分布於卓蘭至內灣一帶。

參考文獻

地質圖

- 中國石油公司台灣油礦探勘總處（1986） 十萬分之一地質圖苗栗圖幅。
- 李錦發（2000） 五萬分之一台灣地質圖及說明書-東勢圖幅。經濟部中央地質調查所。
- 張憲卿（1994） 五萬分之一台灣地質圖及說明書-大甲圖幅。經濟部中央地質調查所。

論文

- 王昱（2003） 桃園-新竹台地地區構造活動與地形特徵。國立台灣大學碩士論文，共 105 頁。
- 林玉儂（2005） 1935 年新竹台中烈震（ $M_{GR}=7.1$ ）之地表變形與發震構造。國立台灣大學碩士論文，共 77 頁。
- 陳振華（1992） 由晚期新生帶沉積物之岩象學與構造地層學研究探討台灣中西部褶皺逆衝帶之演化。國立台灣大學博士論文，共 147 頁。
- 黃鐘（2007） 台中盆地北側斷層與同震地表變形研究。國立台灣大學碩士論文，共 106 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，共 178 頁。
- 葛滿龍（2005） 新社地區河階地形與地下構造關係之研究。國立師範大學博士論文，共 185 頁。
- 賴光胤（2002） 新社與后里之地形與活動構造之研究。國立台灣大學碩士論文，共 79 頁。
- 顏宏元（1983） 利用重力異常值推求三義-卓蘭之淺部地質構造。國立台灣大學碩士論文，共 70 頁。

中文期刊

- 大塚彌之助（1936） 昭和十年四月二十一日台灣中部地方發生之地震所伴生之地震斷層，附地震斷層之諸特徵。東京大學地震研究所彙報別冊，第三號，22~74 頁。（日文）
- 石在添、張瑞津（1982） 活斷層研究的簡介。國立台灣師範大學地理教育，第八期 11~18 頁。
- 李元希、吳維疏、石同生、盧詩丁（2000） 九二一集集地震地表變形特性-埤豐橋以東。經濟部中央地質調查所特刊，12 號，19~40 頁。
- 李錦發（1994） 三義斷層及其在新構造上的意義。地質，14 卷，第 1 期，73~96 頁。

- 沈淑敏、張瑞津、楊貴三（2005） 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-活動構造地形判釋及資料建置分析（1/2）。經濟部中央地質調查所報告，第 93-13 號，共 127 頁。
- 林啓文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000） 台灣活動斷層概論第二版五十萬分一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。
- 林啓文、陳文山、饒瑞鈞（2007） 台灣活動斷層調查的近期發展。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，85~110 頁。
- 林朝棨（1957） 台灣地形。台灣省通志稿，卷一，土地志，地理篇，第一冊，台灣文獻委員會，共 424 頁。
- 林朝棨、周瑞燉（1974） 台灣地質。台灣文獻委員會，共 450 頁。
- 邱華燈（1962） 台中縣大安背斜震波測勘之結果與解釋。中國地質學會專刊，第一號，187~188 頁。
- 張瑞津、楊貴三（2001） 台灣中部活動斷層分布與地形特徵。國立師範大學地理研究報告，85~120 頁。
- 張瑞津、鄧國雄、劉明錡（1998） 苗栗丘陵河階之地形學研究。師大地理研究報告，第 29 期，97~112 頁。
- 張徽正、林啓文、陳勉銘、盧詩丁（1998） 台灣活動斷層概論，經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，103 頁。
- 張麗旭（1951） 「三叉衝上斷層」及其附近之地質構造。台灣省地質調查所會刊，第 3 號，23~34 頁。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2000a） 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，第十二號，139~154 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（2000b） 上-更新世台灣西部前陸盆地的演化：沉積層序與沉積物組成的研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第十三號，137~156 頁。
- 陳振華、陳文山、王源、陳勉銘（1992） 由台灣中部前陸盆地之岩像研究看褶皺逆衝帶之剝蝕歷史。地質，12 卷，2 期，147~165 頁。
- 陳朝輝、劉文相、葉永田（1990） 鯉魚潭水庫地震及斷層研究調查。中央研究院地球科學研究所籌備處。
- 湯振輝（1969） 台灣省苗栗區航照地質解釋。中國地質學會會刊，第十二號，11~19 頁。
- 楊耿明、吳榮章、黃富文、黃旭燦、周定芳、丁信修、莊恭周、蔡錦椿、梅文威、

- 徐祥宏 (2000) 石油地質新技術研發。經濟部八十九年度研究發展專題，編號第 89021 號，共 38 頁。
- 楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏 (2003) 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究-台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究 (4/5) - 台灣中部麓山帶地區。經濟部中央地質調查所報告，第92-11號，共51頁。
- 葉義雄、蔡義本 (1983) 鯉魚潭水庫壩址地區地震及活動斷層調查研究。台灣省水利局，ASIES-CR8303，共 77 頁。
- 葉義雄、顏宏元、蔡義本 (1985) 利用地震與重力資料分析 1935 年地震斷層。一九三五年大地震研討會論文集，68~82 頁。
- 劉彥求 (2006) 三義斷層的露頭觀察及其活動性研究。第十一屆「台灣之第四紀」研討會論文集，共187頁。
- 潘國樑 (1985) 利用遙測、地質與地震資料分析一九三五年地震斷層。一九三五年新竹 - 台中大地震五十週年紀念研討會論文集，83~92頁。
- 潘國樑、王文能、胡國興、顏滄波 (1983) 台灣中部1935地震斷層之航照地質研究。工業技術研究院能源與礦業研究所，國家科學委員會補助研究第 NSC-72-0414-076a-01，共48頁。

英文期刊

- 2DMove V4.1 Manual 2004. Midland Valley Exploration Ltd, 2004, 445 pp.
- Bonilla, M.G. (1975) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, No2, 43-55.
- Chen, Y.G. , Lai, K.Y., Lee, Y.H., Suppe, J., Chen, W.S., Lin, Y.N.N., Wang, Y., Hung, J.H. & Kuo ,Y.T (2007) Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 112: doi: 10.1029/2006JB0042388.
- Hung, J.H., and Wiltschko, D. V. (1993) Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 28, 59-96.
- Hsu, T.L. and Chang, H.C. (1979) Quaternary faulting in Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China*, No.7, 17-45.
- Hsu, Y.J., Simons M., Yu S. B., Kuo, L.C., and Chen H. Y. (2003) A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation for the Taiwan mountain belt, *Earth planet. Sci. Lett.*, 211, 287-294
- Meng, C.Y. (1963) San-I overthrust, *Petroleum Geology of Taiwan*, 2, 1-20.

- Lai, K.Y., Chen, Y.G., Hung, J.H., Suppe, J., Yue, L.F., Chen, Y.W. (2006) Surface deformation related to kink – folding above an active fault : Evidence from geomorphic features and co – seismic slips. *Quaternary International*, 147, 44-54.
- Lee, Y.S., Hsieh, M.L., Lua, S.D., Shiha, T.S., Wua, W.Y. (2003) Slip vector of the surface rupture of the 1999 Chi – Chi earthquake, western Taiwan. *Journal of structural Geology*, 25, 1917-1931.
- Lee, Y.S., Lu S.T., Shih,T.S., Hsieh, M.L., Wu, M.Y. (2005) Structures Associate with the Northern End of the 1999 Chi – Chi earthquake Rupture, Central Taiwan : Implications for Seismic – Hazard Assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, No.2, 471-485.
- Lin, Y.N., Chen, Y.G., Wu, Y.M., Yang, K.M., Ota, Y., Hou, C.S. and Wang, Y. (2007) A seismogenic structure-complex revealed by the 1935 Hsinchu-Taichung Earthquake, Taiwan. Submitted to *Journal of Geophysical Research*
- Ota, Y. Lin, Y.N.N., Chen, Y.G., Chang H.C., Hung, J.H. (2006a) Newly found Tunglo Active Fault System in the fold and thrust belt in northwestern Taiwan deduced from deformed terraces and its tectonic significance. *Tectonophysics*, 417, 305-323.
- Ota, Y. (2006b) The Chentoushan Fault in the collision domain of the northwestern Taiwan – An example of “short and fat” fault. *Annual Report on Active Fault and Paleoseismic Researches*, No.6, 163-170.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., Chen Y.G. and Liu, C.S. (2005) Neotectonic architecture of Taiwan and its implication for future large earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 110, B08402: doi:10.1029/2004JB003251.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., Avouac, J.P., Chen W.S., Chen, Y.G. (2006) Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces : Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan. *Journal of Geophysical research*, 111, B08403:doi: 10.1029/2005JB003971.
- Simoes, M., and J. P. Avouac (2006) Investigating the kinematics of mountain building in Taiwan from the spatiotemporal evolution of the foreland basin and western foothills, *Journal of Geophysical research*, 111, B10401, doi:10.1029/2005JB004209.
- Simoes, M., J. P. Avouac, Y.-G. Chen, A. K. Singhvi, C. Y. Wang, J. M., Y.-C. Chan,

- and S. Bernard (2007a) Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: Shortening rate and age of folding inception, *Journal of Geophysical research*, 112, B03S14: doi:10.1029/2005JB004149.
- Simoes, M., Avouac, J.P., Chen, Y.G. (2007b) Slip rates on the Chelungpu and Chushiang thrust faults inferred from a deformed strath terrace along the Dungpuna river, west central Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03S10: doi: 10.1029/2005JB004200.
- Teng, L. S. (1990) Late Cenozoic arc–continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 183, 57-76.
- Wang, C. Y., Lee C. L., Wu, M. C., Ger, M.L. (2007) Investigating the TCDP Drill Site Using Deep and Shallow Reflection Seismics. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18, No.2, 129-141.
- Wesson, R. L., Helley, E. J., Lajoie, K. R., and Wentworth, C. M. (1975) Fault and Future earthquake, in Borchardt, R.D., ed., Studies for seismic zonation of the San Francisco Bay region, USGS Professional Paper, 941A, 5-30.
- Yang, K.M., Huang, S.T., Wu, J.C., Ting, H.H., Mei, W.W., Lee, M., Hsu, H.H., and Lee, C.J. (2007) 3D Geometry of the Chelungpu Thrust System In Central Taiwan : Its Implications for Active Tectonics. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18, No.2, 143-181.
- Yue, L.F., Suppe, J., Hung, J.H. (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (MW=7.6) . *Journal Structural Geology*, 27, 2058-2083.
- Yu, S.B., Chen, H.Y. & Kuo, L.C (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics* , 274, 41-59.