

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

集集地震 17 年後地形崖與斷層地表破裂之

關係探討

**Insight from the relationship between 17-year-
evolved escarpment and the Chi-Chi earthquake
ground surface rupture**

研究生：邱奕維

指導教授：黃文正 博士

中華民國 一 百 零 六 年 一 月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(104年5月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註1說明),在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

- ()同意 (立即開放)
()同意 (請於西元 _____年____月____日開放)
()不同意,原因是: _____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

- ()同意 (立即開放)
()同意 (請於西元 _____年____月____日開放)
()不同意,原因是: _____

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館,基於推動「資源共享、互惠合作」之理念,於回饋社會與學術研究之目的,得不限地域、時間與次數,以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用,並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式,提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 邱奕維 學號: 103624013

論文名稱: 集集地震17年後地形崖與斷層地表破裂之關係探討

指導教授姓名: 黃文正

系所: 應用地質研究 所 博士班 碩士班

填單日期: 2017/01/12

備註:

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔,紙本論文部分依著作權法第15條第3款之規定,採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽,如您有申請專利或投稿等考量,不同意紙本上架陳列,須另行加填申請書,詳細說明與紙本申請書下載請至本館數位博碩論文網頁。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後,裝訂於各紙本論文封面後之次頁(全文電子檔內之授權書簽名,可用電腦打字代替)。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文,應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質 學系/研究所 邱奕維 研究生所提之論文
集集地震 17 年後地形崖與斷層地表破裂之關係探討
係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

2017 年 1 月 18 日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

應用地質 學系/研究所 邱奕維 研究生

所提之論文

集集地震 17 年後地形崖與斷層地表破裂之關係探討

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

李錫環

委

員

蕭文正

朱傲祖

李建成

陳柔圻

中華民國 106 年 1 月 6 日

集集地震 17 年後地形崖與斷層地表破裂之關係探討

邱奕維

中文摘要

致震斷層錯動所造成近地表面劇烈變形是造成嚴重地震災害的主因之一，且因地震的週期性發生其地表破裂跡沿線會重覆地遭受地變災害的威脅，因此精準地判定斷層地表跡的位置及得宜地規避建設，將有助於減緩未來的地震災情。致震逆斷層錯動後常形成連續性的地形崖，此地形崖位置及形貌等可能會隨時間而大有變化，集集地震發生至今已 17 年，其破裂跡沿線的斷層引致地形崖，將為檢核現行利用地形崖判定活動斷層地表跡位置之精確性的最佳例子。本研究利用野外調查及無人飛行載具攝影等方法，詳細追蹤、紀錄集集地震時引致的地形崖現今的延伸性及樣貌，再利用一米網格空載光達資料，比較集集地震引致地形崖與其破裂跡沿線附近地形崖之特徵。

依據集集地震引致地形崖的地理位置，將其分成河道、非河道兩大類，非河道類又細分成房屋建造區、平地農田、平坦野地類及既存坡地四類。調查結果顯示：河道中的地形崖明顯後退亦或被夷平；房屋建造區的地形崖修整較平緩或被剷除，地形崖腳變得斷斷續續；平地農田的地形崖被抹平或被築成圍牆；平坦野地類的地形崖坡度變緩，但其位置及高度差，則無可察覺的變化；既存坡地的例子，則甚難判別出集集地震引致的地形崖。

本研究認為至今 17 年的集集地震引致地形崖變化，主要來自於人為活動的因素，其中僅河道類，河水侵蝕因素也同等重要。因此歸結，人為活動不頻繁的地區地形崖不失為活動斷層地表跡判定的依據。然而必須留意部分地區集集地震破裂跡附近無法證實與活動斷層活動有關的地形線形，有比集集地震引致的地形崖線形明顯的現象。

關鍵字：集集地震、地形崖、地表破裂跡、斷層地表跡

Insight from the relationship between 17-year-evolved escarpment and the Chi-Chi earthquake ground surface rupture

Chiou, Yi-Wei

English abstract

The intense ground distortion induced by earthquake faulting is one of the major causes of earthquake disaster. Such ground distortion periodically occurs along active fault traces. Construction avoidance from such fault traces will mitigate the effects of earthquakes. Hence, a precise map of active fault traces becomes critical. Commonly, earthquake-induced reverse faulting results in typical escarpment within its resultant deformation zone. However, the position and the morphology of such escarpment can evolve with time at different rates. The 1999 Chi-Chi earthquake-induced escarpment can serve as a rare and good example for geologists to examine a presumption that the toe of escarpment is equivalent to active fault trace appearing at an area covered by unconsolidated sediments or vegetation. In this study, we document the change of position and morphology of escarpment induced during the Chi-Chi earthquake in detail by field investigation and UAV photography. In addition, we compare Chi-Chi earthquake-induced escarpment with its adjacent pre-existing escarpment by using 1m resolution LiDAR data.

The escarpments induced during the Chi-Chi earthquake can be divided into two main categories, i.e. riverbed type and non-riverbed type. The escarpments formed in the river either have retreated upstream or been wiped out. The non-riverbed escarpments can be further classified into 4 kinds, which formed in residential areas, farmlands, wild lands, and pre-existing slopes, respectively. The escarpments at the residential areas have been either smoothed or completely wiped out. The escarpments in the farmlands have been either flattened or turned

into a retaining wall. The escarpments in the wild lands have relatively gentle change in their profile shape and no observable change on their positions and height. The escarpment on a pre-existing slope no longer can be recognized.

This study suggests that human activity is the main cause of the change on the Chi-Chi earthquake-induced escarpments in terms of profile shape and position except that erosion may also play an important role for the escarpments formed on the riverbeds. In summary, the toe of escarpment may serve as a good counterpart of fault trace at an area with low human activity. Furthermore, be aware that some escarpments with unknown cause at a few places are more distinct than the adjacent the Chi-Chi earthquake-induced escarpments.

Key words : Chi-Chi earthquake, Escarpment, Ground surface rupture, Fault trace

誌謝

能順利的完成本碩士論文，首先感謝我的指導老師黃文正老師耐心的指導，包括研究上的指導、專業知識的領悟及一些人生態度，尤其在我迷失研究方向時，提供我想法，讓我得以順利的完成本篇論文。接著感謝朱傲祖老師、李錫堤老師、李建成老師及陳柔妃老師四位口試委員撥空蒞臨指導，給我肯定及論文實質建議，使得這篇論文可以更完美。另外，感謝江俞萱、黃意茹學姐及地調所梁勝雄、陳宏仁先生的協助，得以順利使用空載光達資料。

接著感謝地質力學研究室同屆的兩位同學小波及謝承恩，從大四開始一直到現在碩士畢業於各方面：不論是在專業科目的修習、野外工作支援、論文撰寫建議等等各方面，尤其是 UAV 野外規劃都給予很多的協助，讓我在論文實作及撰寫過程中更為順利，再來感謝研究室的兩位學長：大師兄及徐家祥以及另一位學長：莊翔富，在本論文製作的過程中，不吝嗇的給予我許多的想法及建議，也謝謝研究室兩位助理：阿根、Vicky，以及其他成員：Dwi、于鈞、彥如、宜廷等人給予野外支援或其他各種的協助，另外感謝應地所的夥伴們小綠、小葉、芷薇、沛恩等人，及揪吃飯的各位成員：murmur、奎模、吳函、厚平、餅乾、大木、居米等人在我攻讀研究所兩年半期間聽我抒發情緒並研究所生活中帶來歡樂。

最後感謝我的家人，特別是我的父母於我攻讀研究所期間給予我最大的支持，讓我於這兩年半可完全專注於研究，得已順利完成這篇碩士論文，雖然常常不在你們身邊，但我知道你們是我最大的精神後盾。

目錄

中文摘要.....	i
English abstract	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機及目的.....	2
第二章 集集地震相關研究.....	8
2-1 車籠埔斷層與集集地震地表破裂跡簡介.....	8
2-2 集集地震地質相關研究.....	12
2-2-1 破裂跡沿線斷層引致地形崖.....	12
2-2-2 槽溝研究.....	16
2-2-3 地震引致斷層與地形崖形貌.....	21
第三章 研究區域概述.....	24
3-1 地形概述.....	24
3-2 地質概況.....	26
第四章 前人研究.....	29
4-1 地形崖線形判釋.....	29
4-2 地形崖遷急點變遷之研究.....	34
4-3 其他斷層引致地表破裂跡的實例：汶川地震.....	38
第五章 資料蒐集及研究方法.....	41
5-1 集集地震剛發生後的資料蒐集.....	41

5-2 現今野外資料蒐集	45
5-2-1 野外調查	45
5-2-2 地表數值模型	48
5-2-3 空載光達(LiDAR)資料	60
第六章 研究結果	63
6-1 集集地震引致地形崖 17 年前後變化	63
6-1-1 豐原-大甲溪埤豐橋	65
6-1-2 豐原-國家教育院至豐原第二公墓	73
6-1-3 豐原-中正公園	79
6-1-4 霧峰-興大葡萄園	87
6-1-5 霧峰-車平營電塔	94
6-1-6 竹山-水底寮	94
6-2 河床露頭調查結果	101
6-2-1 豐原-大甲溪埤豐橋	101
6-2-2 太平-頭汴坑溪一江橋	106
第七章 討論	110
7-1 集集地震引致地形崖 17 年前後變化之探討	110
7-2 斷層引致地形崖與破裂跡沿線地形線形之探討	115
7-3 剪切帶、地形與活動斷層之關聯	120
第八章 結論與建議	122
參考文獻	124
附錄	133

圖目錄

圖 1 台中霧峰光復國中集集地震損毀校舍分布。.....	4
圖 2 台中霧峰光復國中集集地震同震地表變形帶。.....	5
圖 3 地形形貌與斷層關係立體示意圖。.....	6
圖 4 斷層滑移速率與自然風化、侵蝕速率關係圖。.....	7
圖 5 車籠埔斷層野外露頭照。.....	10
圖 6 集集地震的震度分布圖。.....	11
圖 7 烏溪以北集集地震時引致地形崖高度差分布圖。.....	14
圖 8 烏溪以南集集地震時引致地形崖高度差分布圖。.....	15
圖 9 集集地震地表破裂跡沿線開挖槽溝分布圖。.....	18
圖 10 釋迦園槽溝照片及構造素描圖。.....	19
圖 11 鳳梨園槽溝測繪立面圖。.....	19
圖 12 霧峰槽溝相片及構造素描圖。.....	20
圖 13 逆斷層錯動引致地形崖的形貌分類。.....	22
圖 14 集集地震地表破裂跡沿線斷層引致地形崖照片。.....	23
圖 15 斷層上緣深度、滑移量比值與斷層傾角關係圖。.....	23
圖 16 台灣西半部台中盆地及八卦台地一帶地形陰影圖。.....	25
圖 17 集集地震地表破裂跡沿線條帶地質圖。.....	27
圖 18 車籠埔斷層地質剖面。.....	28
圖 19 豐原地區 Ota 等人地形線形判定結果。.....	31
圖 20 豐原地區張瑞津等地形線形確實度判定結果.....	31
圖 21 沈淑敏等豐原地區地表線形確實度判定結果圖。.....	32
圖 22 各研究於竹山水底寮地區地形線形判定結果。.....	33
圖 23 西元 1999 年至 2009 年大甲溪河床空照圖。.....	35
圖 24 大甲溪埤豐橋下河道剖面逐年變化圖。.....	36

圖 25 西元 1999 年至 2010 年大甲溪河床遷急點變化圖。	36
圖 26 大安溪地形數值模型。	37
圖 27 大安溪河道遷急點 1999 至 2010 變化示意圖。	37
圖 28 汶川地震地表破裂位置圖。	39
圖 29 汶川地震在地表引致的地形崖。	39
圖 30 四川白沙河地形崖遷急點變遷比較圖。	40
圖 31 永承工程公司 1/1000 地表破裂跡測量資料。	43
圖 32 集集地震引致地形崖位置量測實況照片。	43
圖 33 前人於地震後量測地形崖剖面資料。	44
圖 34 被判定已看不出地形崖的實例照片。	47
圖 35 無人飛行載具(Phantom 3)野外操作實況。	52
圖 36 TCR307 經緯儀在野外使用狀況。	52
圖 37 經緯儀測量原理示意圖。	53
圖 38 野外布置控制點情況。	53
圖 39 焦點、像空間及物空間共線關係示意圖。	54
圖 40 共面關係示意圖。	54
圖 41 UAV 飛航軌跡圖。	55
圖 42 乾溪河堤附近正射影像。	55
圖 43 乾溪南岸河堤。	56
圖 44 航測方法製作的地表數值模型。	56
圖 45 空標卡示檢測意圖。	57
圖 46 標地物測量示意圖。	57
圖 47 空載光達野外施測作業示意圖。	61
圖 48 空載光達作業流程圖。	61
圖 49 豐原地區 1 米及 5 米網格數值地形模型陰影圖。	62

圖 50 大甲溪河床 17 年前後空照圖。.....	66
圖 51 大甲溪埤豐橋下河床同視角 17 年前後比較圖。.....	67
圖 52 埤豐橋河床斜看視野 17 年前後比較圖。.....	68
圖 53 大甲溪北岸菜園地形崖。.....	69
圖 54 埤豐橋東側下方的地形崖。.....	69
圖 55 石岡壩前緣大甲溪河床空照圖。.....	70
圖 56 大甲溪埤豐橋南側路面照。路面可發現隆起狀。.....	70
圖 57 大甲溪埤豐橋附近利用攝影測量製成的地表數值模型。.....	71
圖 58 大甲溪河床集集地時層引致地形崖位置變化圖。.....	72
圖 59 國家教育研究院西側農田 17 年前後空照比較圖。.....	74
圖 60 豐原第二公墓空照 17 年前後對比圖。.....	75
圖 61 國家教育研究院西側農田 17 年前後比較圖。.....	76
圖 62 豐原第二公墓 17 年前後直視角比較圖。.....	77
圖 63 豐原第二公墓 2016 年 11 月中旬後的樣貌。.....	77
圖 64 國家教育院至豐原第二公墓地表數值模型。.....	78
圖 65 中正公園及水源路附近住宅區 17 年前後比較圖。.....	80
圖 66 水源路巷弄住宅區 17 年前後空照比較圖。.....	81
圖 67 中正公園旁水源路 17 年前後比較圖。.....	82
圖 68 水源路 7 巷地形崖 17 年前後比較圖。.....	83
圖 69 水源路 5 巷 17 年前後比較圖。.....	84
圖 70 水源路面地形剖面比較圖。.....	85
圖 71 台中豐原中正公園地形崖崖腳位置變化圖。.....	86
圖 72 霧峰興大葡萄園空照比較圖。.....	88
圖 73 興大葡萄園園區小徑 17 年前後比較圖。.....	89
圖 74 園區內三久工廠旁 17 年前後比較圖。.....	90

圖 75 興大葡萄園地表數值模型。.....	91
圖 76 興大葡萄園區內 17 年前後地表形貌比較圖。.....	92
圖 77 興大葡萄園內地表隆起照。.....	92
圖 78 興大葡萄園北方北溝公園照。.....	93
圖 79 興大葡萄園南方民生路 364 巷路面照。.....	93
圖 80 霧峰車平營電塔附近 17 年前後空照比較圖。.....	95
圖 81 霧峰車平營電塔地形崖 16 年前後對照圖。.....	96
圖 82 車平營電塔空地 16 年前後地形剖面比較圖。.....	97
圖 83 水底寮地區田間小路地 17 年前後比較圖。.....	98
圖 84 水底寮農田 17 年前後比較圖。.....	99
圖 85 水底寮地區的地表數值模型。.....	100
圖 86 石岡壩至埤豐橋間河床正射影像圖及露頭剖面圖。.....	102
圖 87 石岡壩至埤豐橋間構造素描圖。.....	103
圖 88 埤豐橋與石岡壩間河床(A 點)露頭樣貌。.....	104
圖 89 埤豐橋下河床(B 點)露頭照。.....	104
圖 90 埤豐橋西側河床(C 點)露頭產狀。.....	105
圖 91 頭汴坑溪一江橋下河床正射影像及露頭剖面圖。.....	107
圖 92 一江橋下之剪切帶露頭。.....	108
圖 93 一江橋下頭汴坑溪河床出露的露頭。.....	109
圖 94 頭汴坑溪自行車道下之河床露頭。.....	109
圖 95 崖坡演化模型示意圖。.....	113
圖 96 台中北屯大里溪河床 17 年前後對比圖。.....	114
圖 97 豐原第二公墓及附近地形線形判釋比較圖。.....	117
圖 98 水底寮及附近地形線形判釋比較圖。.....	118
圖 99 豐原第二公墓空照圖(於 2016 年 9 月拍攝)。.....	119

圖 100 水底寮地區空照圖。.....	119
圖 101 大甲溪、頭汴坑溪及北溝溪河床地表破裂跡與剪切帶位置圖。 .	121

表目錄

表 1 集集地震死傷人數整理表。.....	10
表 2 霧峰乾溪河堤控制點量測原始資料。.....	58
表 3 霧峰乾溪河堤測量資料平差後的結果。.....	58
表 4 霧峰乾溪河堤控制點坐標計算結果。.....	58
表 5 空標卡測量結果比較表。.....	59
表 6 標地物測量結果比較表。.....	59

第一章 緒論

1-1 前言

台灣是個地震發生頻繁的島嶼，台灣自西元 1900 至今發生多起震矩規模大於 6.0 歷史災害地震，包括 1906 年的梅山地震、1935 年新竹台中地震、1941 年中埔地震、1964 年白河地震、1986 年瑞里地震、1999 年集集地震以及 2016 年美濃地震，平均每 15~20 年就會發生一次災害較嚴重的地震。其中，1935 年的新竹台中地震以及 1999 年的集集地震死傷尤其慘重，這兩次地震死傷人數破千人，倒塌的房屋高達上萬棟。地震發生引致的災害不但會造成人民生命及財產的威脅，更會造成國家經濟損失。經濟部中央地質調查所於 2010 年公布台灣活動斷層分布圖，活動斷層意指過去十萬年內斷層曾經有活動過，且未來還有可能再活動的斷層，台灣現今被判定活動斷層共 33 條，其中有 24 條活動斷層為逆移斷層，且這 24 斷層大部分都集中於台灣西半部地區，上述的歷史災害地震也多集中於此，台灣西半部地區人口稠密，多數重要的經濟建設也集中於此，若再次發生規模大於 6.0 的淺層地震，很可能會再次造成嚴重的人員傷亡及經濟損失，因此了解地震災害的原因，並投入研究是有效降低災害的重要關鍵。

造成地震的災害原因有很多種，有因強地動而地表強烈搖晃造成的災害，地表強烈晃動造成土壤液化、及地盤錯動於地表造成的地表破裂和地表永久變形。其中，地表永久變形的區域多集中於破裂跡兩側數十公尺的範圍內，因地表永久變形引致的地震災害：房屋傾斜、倒塌也集中於破裂跡兩側狹窄的區帶，此類地震災害常造成嚴重的傷亡。若能在地震發生之前，了解地表斷層跡確切的位置及斷層錯動地表變形的範圍，就能迴避建築物以便未來地震發生時得以減低災情，因此，精確判定斷層地表跡位置是十分重要的研究課題。

1-2 研究動機及目的

地震時引致地表變形最劇烈的區域集中在斷層兩側幾公尺的範圍內，集集地震發生後於台中霧峰光復國中校區內調查結果顯示，毀損的校舍分布於地表破裂跡兩側幾公尺的範圍內(圖 1)，地震同震地表變形帶範圍，也集中於斷層兩側數十公尺的範圍內(圖 2) (Kelson et al., 2001)，本實例上盤劇烈地表變形範圍比下盤地表變形範圍寬。由此可知，地震發生時地表破裂跡兩側是災情最慘重的地方，此範圍往往只有窄窄的幾十公尺，若斷層地表跡劃設的位置有幾公尺的偏差，活動斷層敏感區範圍會連帶判斷錯誤。因此如何精確的判定活動斷層地表跡的位置是個十分重要的議題。

要判斷地表斷層跡並不容易，第一，在野外很少可以尋找到出露良好的露頭，作為判定斷層位置的證據；第二，台灣的活動斷層多集中於平原或丘陵，這些地方往往都是人為高度開發過的地區，許多斷層的證據可能都會因開發而消失或被掩蓋住，此現象使得尋找活動斷層跡的位置的工作變得更加困難。斷層若曾經活動過，常會在地表上留下地表線形跡，(圖 3)示意了不同型態的斷層於地表面上會造成不同的地形表徵，但共同特徵是會在地表造成連續的地形高程差。尋找斷層地表跡位置地首要工作是利用遙測影像資料判釋地表線形跡的位置(McCalpin, 2009)。然而，地形的形貌不只受到構造運動的影響，自然風化、侵蝕、及人為活動也會影響到地表面形貌，斷層造成地形崖會因為侵蝕作用或人為活動，使得地表線形跡位置改變或是地形崖整個消失，而從航照上看到的地表線形跡也可能是侵蝕作用所造成的，並不完全是斷層作用造成的(圖 4)，上述的現象使得我們尋找斷層地表跡位置的第一步，就遇上了許多的問題。

1999 年集集地震是個很好的實例，讓我們探討利用地形線形作為判定活動斷層地表跡是否合理的問題。本次地震為逆斷層錯動引致地震的實例，

地震當時地表破裂跡附近產生了劇烈的地表變形，地震時在地表上形成相當明顯的地形高低差，地形崖的高度數十公分至十公尺，且地震剛發生完，地震引致的地形崖可在地表上連續的追蹤，地震發生後也留下了許多的影像及調查資料。然而，集集地震發生後至今已經過了 17 年，地震時引致的地形崖無論是形貌或地表線形跡的位置，在這段時間可能都改變了。因此，我們再次回到了集集地震引致地形崖的舊址，藉此機會觀察並記錄此次地震事件發生後至今地形崖差異。本研究將聚焦探討集集地震時引致地形崖，觀察、整理地形崖於這 17 年來的變化，再探討集集地震時引致的地形崖與附近地形形貌的關係。本研究的目的是有以下幾點：

1. 實際到訪集集地震地表破裂跡的舊址，記錄地形崖現今的樣貌及延伸性，並依照土地使用性質及地形崖變化狀況加以整理分類。
2. 利用無人飛行載具等工具拍攝航空照片，利用航空測量技術生成高解析度的地表數值模型，詳細描述地形崖、地表線形跡 17 年前後的變化。
3. 結合一米網格的空載光達資料，探討集集地震引致地形崖與附近地形線形之關係，並探討若不知集集地震曾經發生的狀況下，如何初步判定斷層地表跡的位置。
4. 調查河床出露露頭，探討地形崖、剪切帶與地震斷層間的關係。

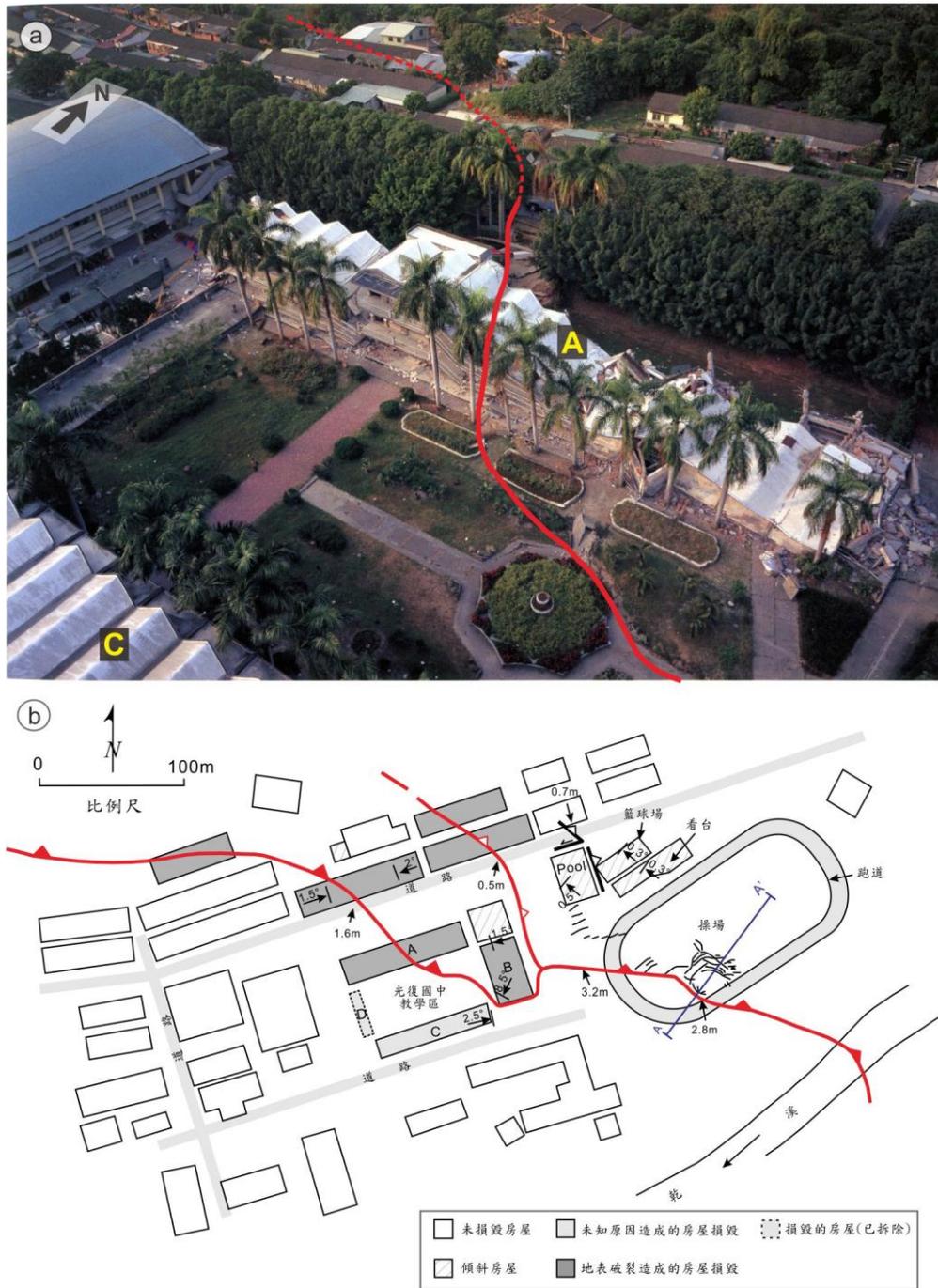


圖 1 台中霧峰光復國中集集地震損毀校舍分布。(a) 光復國中地震剛發生後的空照，破裂跡(紅色線)兩側校舍損毀嚴重(改自 連永旺，1999)；(b)紅色線段為集集地震破裂跡的位置，損毀的校舍集中於破裂跡兩側數十公尺範圍內(改自 Kelson et al., 2001)。

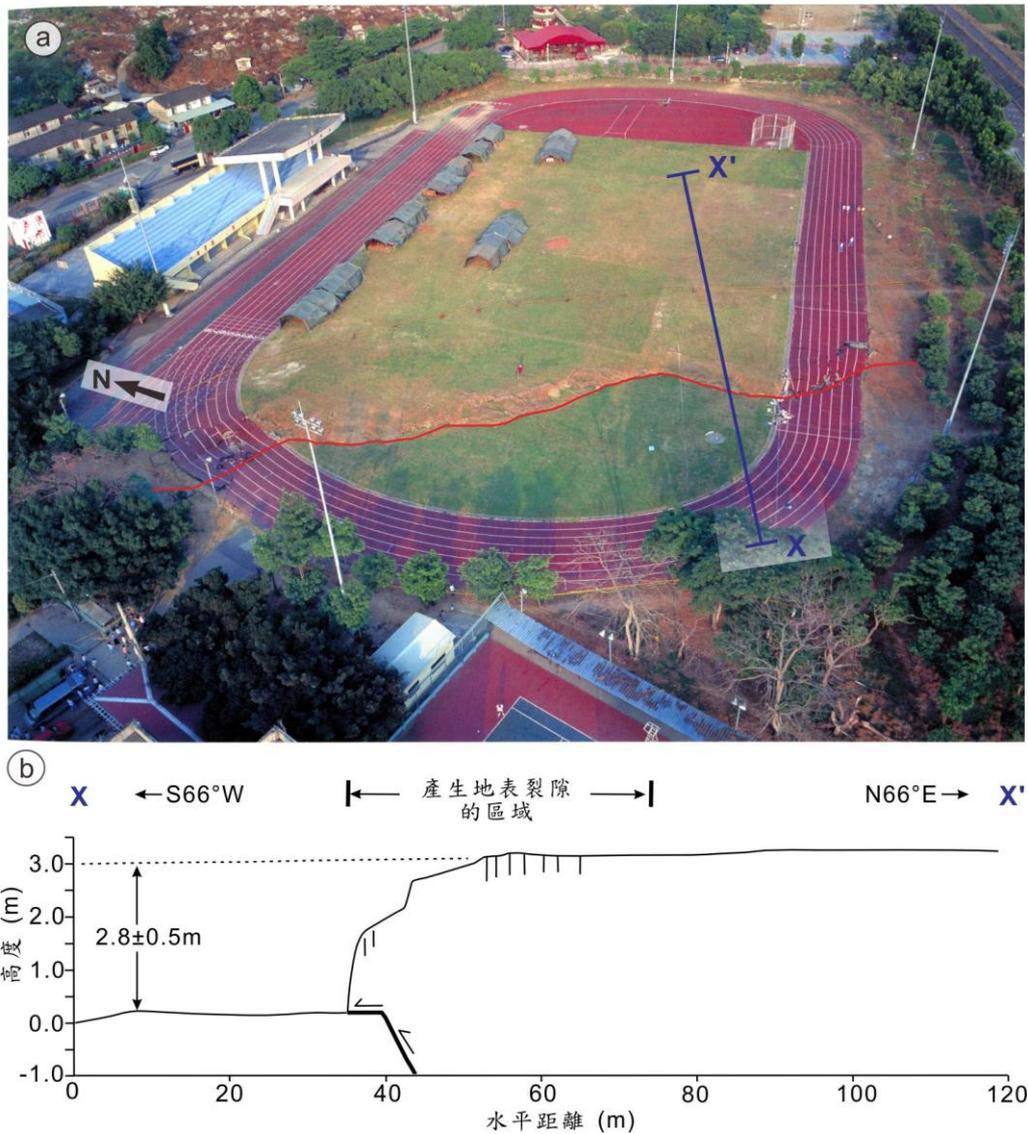


圖 2 台中霧峰光復國中集集地震同震地表變形帶。(a) 光復國中操場空照可觀察到地表裂隙集中於破裂跡附近(改自 連永旺，1999)；(b) 變形帶範圍集中於破裂跡兩側幾十公尺範圍內，本實例變形帶範圍上盤比下盤寬(改自 Kelson et al., 2001)。

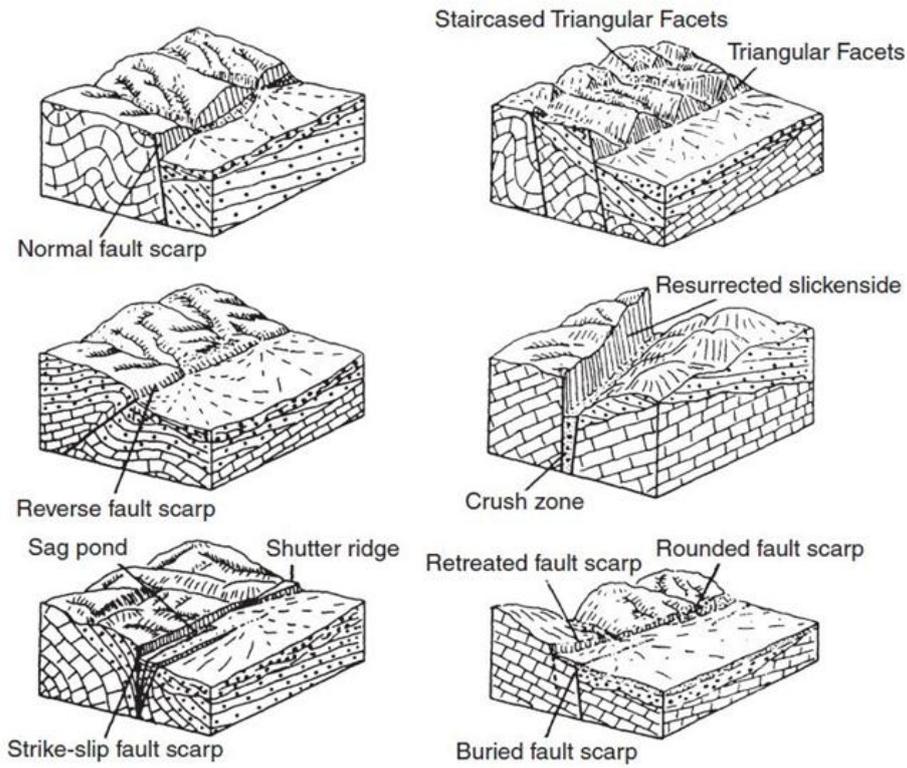


圖 3 地形形貌與斷層關係立體示意圖。斷層活動常於地表上留下明顯的地表線形。(引自 McCalpin, 2009)

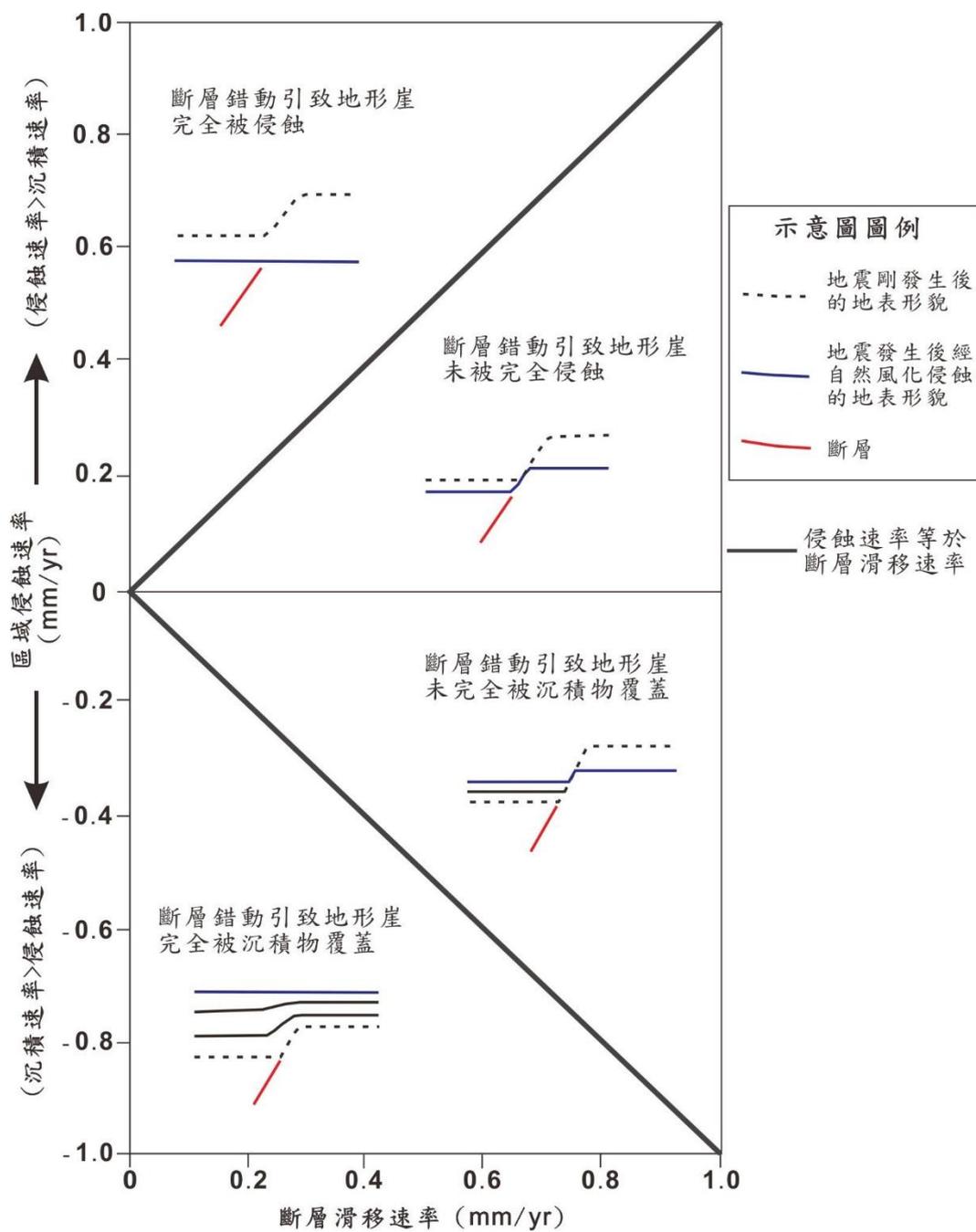


圖 4 斷層滑移速率與自然風化、侵蝕速率關係圖。(改自 McCalpin, 2009)

第二章 集集地震相關研究

西元 1999 年 9 月 21 日凌晨 0 點 47 分，台灣中部發生震矩規模 7.6 的地震，震央位於南投縣集集鎮，震源深度位於地表面以下 8.0 公里，主震後，接連兩個月，又發生了 14600 起規模大小不等的餘震，集集地震主震全台各地的震度皆達到 4 級或 4 級以上，鄰近斷層線的城市：台中、南投於主震發生時觀測到的最大震度甚至高達 7 級（圖 6），此次地震傷亡人是台灣自有歷史紀錄地震以來，死傷人數第二高（僅次於 1935 年新竹-台中地震）、房屋倒塌數最多的地震，共計 2415 名人員傷亡、29 名人員失蹤及 11305 人受傷，也造成 10 萬餘棟房屋全倒、半倒，不僅如此，許多電力設備、為生管線也在此次地震中損毀，台灣的交通系統更因此癱瘓，中南部近 30 座橋梁在此事件中嚴重損毀，客運一度暫停營運，台鐵西部幹線也曾在地震後一度全面停駛。以下小節將先介紹車籠埔斷層與集集地震地表破裂跡，再回顧集集地震後相關地震地質的研究。

2-1 車籠埔斷層與集集地震地表破裂跡簡介

車籠埔斷層此一名稱最早源自於孟昭羿 1963 年的文獻，張錫齡先生定義車籠埔斷層為桂竹林層上覆至錦水頁岩或卓蘭層下緣，並認為車籠埔為一逆斷層，傾角約 40 度向東，斷層沿著台中盆地東緣延伸，北端至大安溪、南端延伸至烏溪(Chang, 1971)。1983 年徐鐵良先生明確定義為卓蘭層或錦水頁岩，上衝至頭嵙山層或現代沖積層上(徐鐵良 等，1983)，地調所台灣五萬分之一地質圖台中圖幅說明書中，記載車籠埔斷層的露頭位於台中市大里區竹仔坑西南方一公里的草湖溪河畔及北溝溪河畔(何信昌、陳勉銘，2000) (圖 5)，這也是文獻中最早於野外發現車籠埔斷層露頭。

集集地震在地表上造成明顯且連續的地表破裂跡，現今車籠埔斷層地表跡劃設的位置也多使用集集地震時在地表上形成破裂跡的位置。然而，地

震當時很少有地方可看見岩層錯動的證據，地表破裂跡無法真正代表車籠埔斷層從地底下投影至地表的位置，且地震當時並非整段破裂跡都沿著車籠埔斷層活動(何信昌、陳勉銘，2000)。因此，本研究仍統一稱作為集集地震地表破裂跡。集集地震地表破裂跡整段延伸長度近 100 公里，經過的城鎮包括台中市的東勢、石崗、豐原、北屯、太平、大里、霧峰以及南投的草屯、南投市、名間、竹山，這些城市也正好是災情較為嚴重的幾個城鎮，傷亡人數與房屋倒塌戶近半數集中於上述的 11 個城鎮 (表 1)。

集集地震地表破裂跡分布位置如(圖 7 及圖 8)紅色線段所示，依照地表破裂跡走向可分成兩個部分，分別為大安溪至大甲溪之間走向以東西向為主，及大甲溪至竹山地區走向以南北向為主。大安溪至大甲溪之間的破裂跡分岔成共 11 條，破裂跡延伸長度都在 10 公里內。大甲溪埤豐橋以南至濁水溪分流清水溪，集集地震地表破裂跡走向以南北向為主。另外，烏溪橋東方 2 公里烏溪至草屯市區處，集集地震時地表產生延續 5 公里南北向的地表破裂跡。

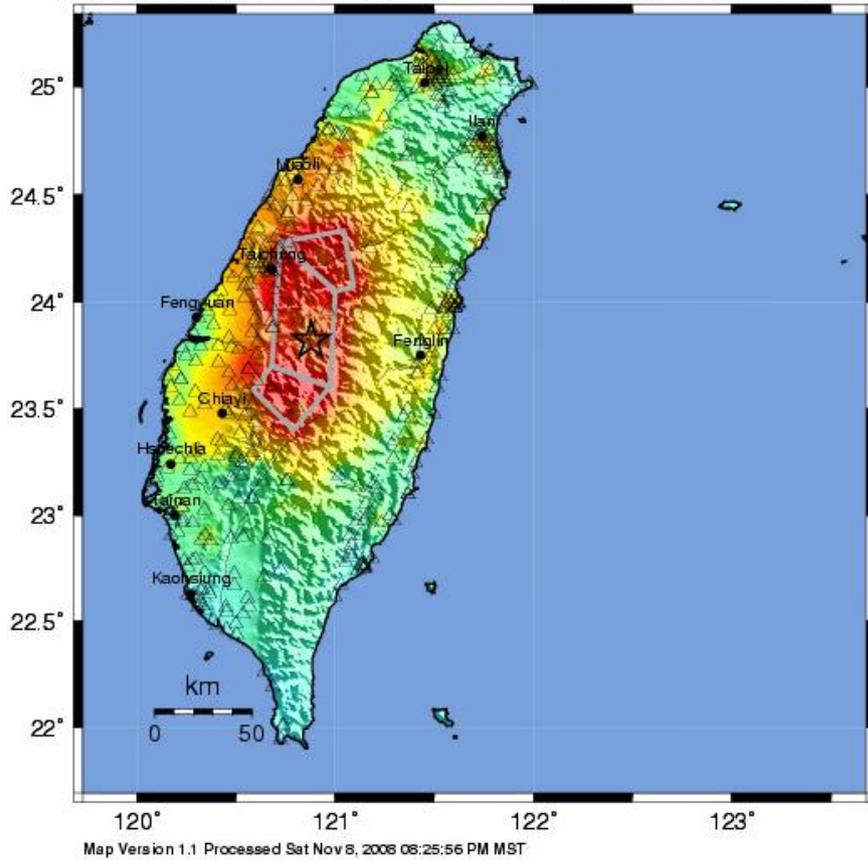


圖 5 車籠埔斷層野外露頭照 (陳勉銘、何信昌，2000)。

表 1 集集地震死傷人數整理表 (數據摘自國家發展委員會)。

縣市	地區	死亡失蹤 人數	重傷人數	全倒戶數	半倒戶數	全、半倒 戶數
台中縣	石岡鄉	174	44	1,848	1,170	3,018
台中縣	東勢鎮	358	99	5,139	5,441	10,580
台中縣	豐原市	160	54	1,748	573	2,321
台中縣	潭子鄉	7	2	28	10	38
台中市	北屯區	96	17	696	395	1,091
台中縣	太平市	86	23	2,208	2,098	4,306
台中縣	大里市	162	55	2,917	4,518	7,435
台中縣	霧峰鄉	87	12	2,872	2,486	5,268
南投縣	草屯鎮	88	19	2,557	4,003	6,560
南投縣	南投市	93	25	5,213	6,318	11,531
南投縣	名間鄉	35	9	359	443	802
南投縣	竹山鎮	115	27	2,828	3,229	6,057
斷層經過之行政區 災情統計		1,461	386	28,413	30,684	59,007
全台災情統計		2,494	715	52,270	54,380	106,650
百分比		58.58%	53.99%	54.36%	56.43%	55.33%

USGS ShakeMap : Chi-Chi, Taiwan
 Mon Sep 20, 1999 17:47:18 GMT M 7.7 N23.82 E120.88 Depth: 21.0km ID:199909201747



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL. (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

圖 6 集集地震的震度分布圖 (引自 USGS)。

2-2 集集地震地質相關研究

集集地震發生後至今，有許多相關的地震地質研究，研究內容包含地表破裂的研究、地形崖的調查，槽溝開挖構造測繪、及地震再現週期的研究，除了野外調查的相關研究之外，也有利用數值模擬探討地震引致斷層與地形崖之間的關係。以下的小節將整理地震時引致地形崖的調查資料，以及列舉三個槽溝開挖的研究，再介紹以野外觀察及半空間錯位理論模擬歸納出斷層與地形崖的關係。

2-2-1 破裂跡沿線斷層引致地形崖

逆斷層錯動常於地表形成高度落差的地形崖，斷層崖明確的定義為斷層錯動切穿至地表於地表面形成陡崖，且陡崖未經風化、侵蝕才能算是斷層崖，地形崖的定義為一連續朝著同一方向的相對較陡坡，地形崖可以由自然風化、侵蝕或構造運動造成(Glossary of Geology)。為了方便敘述，以下對於集集地震時引致的崖，無論當時在野外地表破裂跡附近有無發現斷層錯動的證據(這裡斷層證據係指斷層擦痕(slickenside)、斷層槽(groove)等證據，並非指斷層錯動造成的崖)，只要集集地震時在地表上造成明顯的地形高度差，以下描述皆統稱為地形崖。

集集地震剛發生後，近 100 公里的集集地震地表破裂跡沿線，只有三個地點發現斷層擦痕，分別為埤豐橋下大甲溪河床、烏牛欄溪及台中大坑大里溪河床三處(黃文正等, 2000)。大部分的地區都只有看見上覆地層隆起的撓曲崖。本研究將《九二一地震地質調查報告》於野外調查資料整理至(圖 7)及(圖 8)，以下將由北到南依次敘述各地地形崖調查結果。

埤豐橋以南至整個豐原地區，集集地震時引致的地形崖高程差約在 3.0~6.0 公尺之間，由北至南，地形崖的高度漸漸變低。集集地震地表破裂跡於潭子地區通過的位置大部分位於山區，地震引致的地形高程差為

2.0~3.5 公尺，潭子部分地區沒有明顯的地形崖。北屯地區地震引致的地形崖高程差為 1.0~2.5 公尺。太平地區及大里地區的地形崖，部子坑至一江橋間，集集地震地表破裂跡約為南北走向，地形崖高程差約為 2.0~2.5 公尺，一江橋下斷層出現分岔的現象，一江橋至草湖溪一帶，並無文獻記載地形崖高程資料，草湖溪以南，斷層轉為東北-西南走向，地形崖高程約為 2.0 公尺左右。霧峰地區的興大葡萄園至電影文化城，集集地震引致的地形崖高程約 2.0~2.5 公尺，霧峰第一變電所至霧峰第一公墓間，斷層轉為南北向，地形崖高度由北至南漸漸消失，台灣省議會至車平營地區，地形崖高差約為 2.0~2.5 公尺，斷層於車平營地區有分岔的現象。草屯地區，地形崖高程約為 1.5~3.0 公尺，斷層於草屯市區有分岔的現象，烏溪東邊 2 公里處的地表破裂跡(或稱隘寮斷層)，地形崖高程平均約 1.0 公尺，地形崖西高東低，不同於其他地區。南投市中興新村的地形崖高程並不明顯，高程差約為 0.3~0.7 公尺，中興新村以南至千秋斗，地形崖高程差在 0.3~0.5 公尺，向南地形崖高程差完全消失。名間地區千秋斗以南，地表破裂跡切過山區，地形崖高程並不明顯，濁水地區地形崖高程差明顯，高度為 1.5~3.0 公尺。濁水河流域至竹山地區，濁水溪河床及水底寮農田集集地震時引致的地形崖高程差約為 1.5~3.5 公尺，往南地形崖的高程差漸漸變小，地表破裂跡的最南段瑞竹-桶頭之間，地形崖高程差並不顯，高度約約 0.1~0.4 公尺。

由地震剛發生時的調查結果可以得知，集集地震地表破裂跡沿線各地的垂直抬升量並不一樣，斷層沿線的地形崖高程差也因地而異。

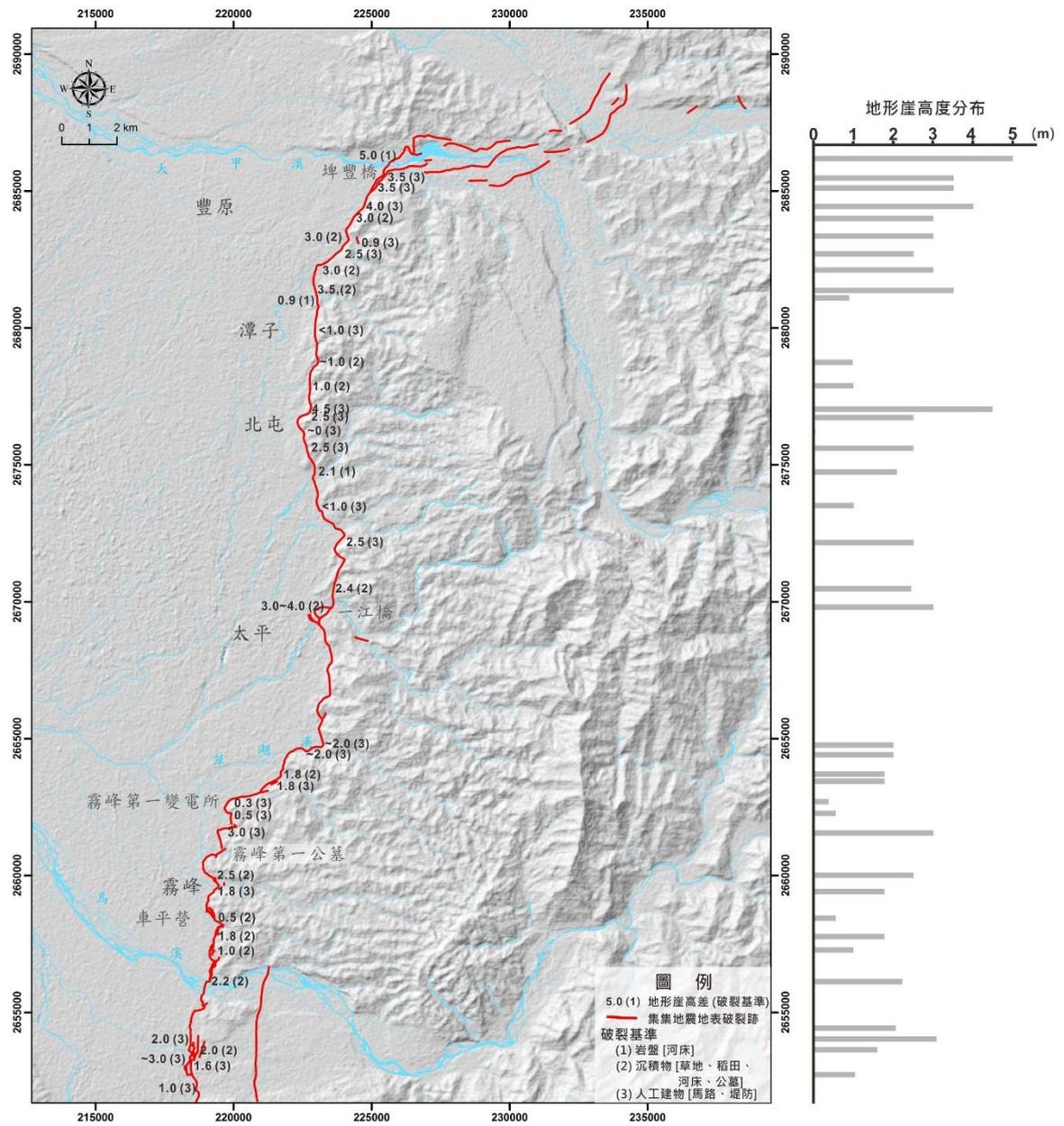


圖 7 烏溪以北集集地震時引致地形崖高度差分布圖。(資料摘自九二一地震地質調查報告)

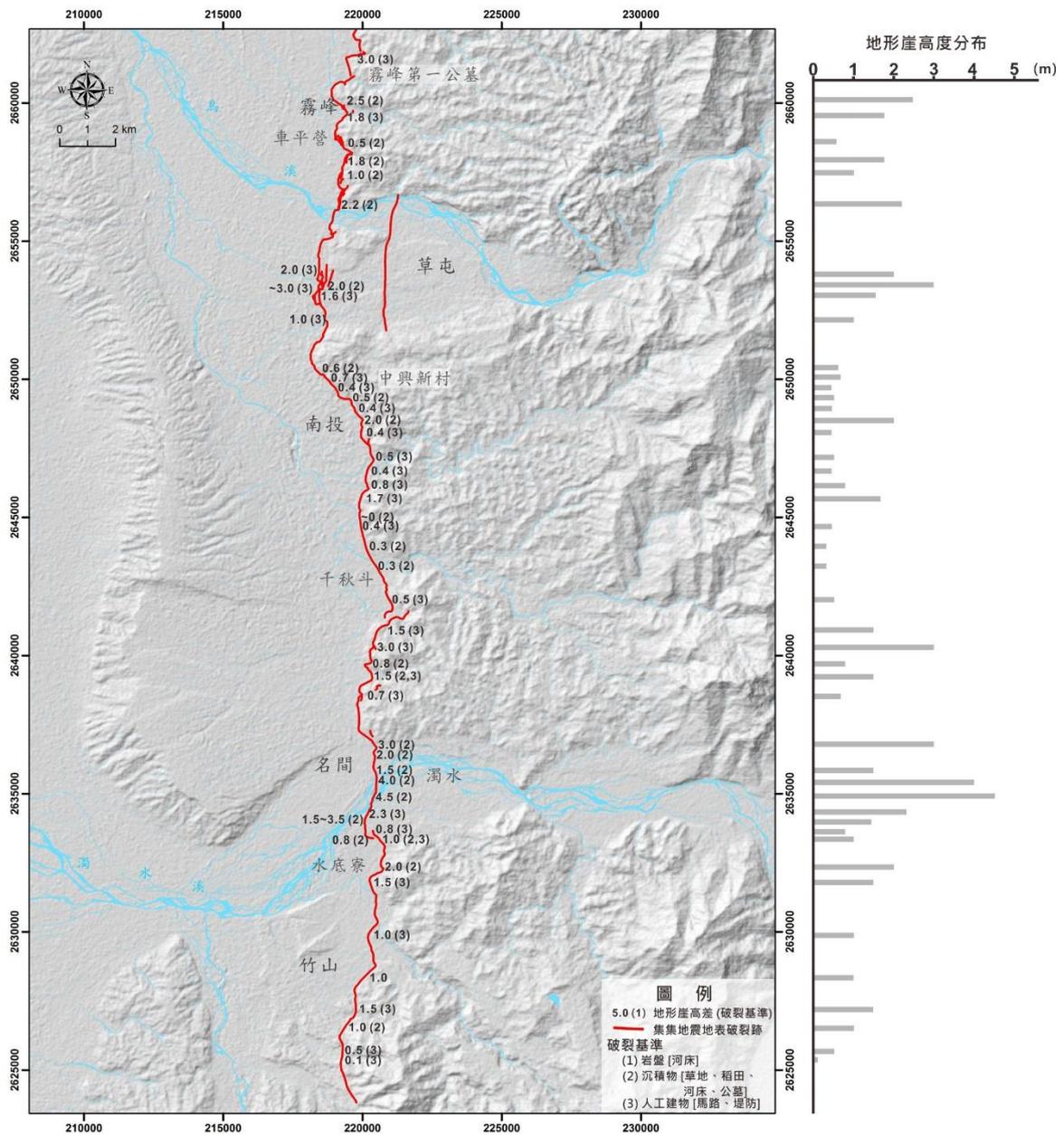


圖 8 烏溪以南集集地震時引致地形崖高度差分布圖。(資料摘自九二一地震地質調查報告)

2-2-2 槽溝研究

2-1-1 節可得知，集集地震地表破裂跡沿線引致地形崖的高度差因地點而異。為了從野外觀察更清楚知曉地表面下斷層如何分布，集集地震過後，便有許多槽溝相關的研究，自集集地震發生至今，集集地震地表破裂跡沿線共開挖了 13 個槽溝 (Ota et al., 2005)，槽溝開挖的位置分布如(圖 9)所示。本篇研究列舉了三個槽溝，分別為釋迦園槽溝、鳳梨園槽溝及霧峰車平營槽溝，以下分別敘述列舉槽溝地表地形崖的特徵以及槽溝開挖剖面的構造特徵，並且敘述其地震週期之研究。

- 釋迦園槽溝

釋迦園槽溝位於南投縣南投市附近，槽溝場址上覆蓋的地層為沖積層沉積物，地表面微微的向西傾斜 3 度，集集地震造成地形崖的高程差約 1 公尺，地形崖西高東低，坡度只有 9 度，十分的平緩。釋迦園槽溝沿北偏東 80 度的方向開挖，槽溝長度為 27 公尺，開挖深度為 7 公尺。陳文山先生於 2007 年發表此槽溝的立面圖(圖 10)，此槽溝並未發現上覆土層被錯移的證據，也沒有發現任何於地震時產生的裂隙，只發現單斜褶皺。本槽溝相關研究並未提及地震週期的部分。

- 鳳梨園槽溝

鳳梨園槽溝位於台中市霧峰區第一變電所附近的鳳梨園，集集地震地表破裂跡於此場址為東北東-西南西走向，引致地形崖南高北低，期高差約為 2 公尺，釋迦園槽溝共開挖兩個剖面，兩條槽溝剖面接沿著北北西-南南東的方向開挖，開挖槽溝長度為 25 公尺，深度為 8 公尺。陳文山先生於 2004 年發表了槽溝的立面圖(圖 11)，兩道剖面皆面向西方，A 剖面可看見斷層從槽溝中間切過，斷層傾角約 26 度，斷層都集中於一個狹長的區帶，B 剖面仍可見到斷層切過，然而，斷層並非集中於一個狹窄的區間，而是散發成

4 條分支斷層。此槽溝的定年資料顯示，過去 1900 年內斷層曾經活動過 4 次(Chen et al., 2004)。

- 霧峰車平營槽溝

車平營槽溝位於台中市霧峰區東南方的萬豐里，萬豐國小附近的稻田。槽溝場址上覆層為全新世或晚更新世的沉積物(Lee et al.,2001)，集集地震時槽溝場址處引致的地形崖為一前緣凸起單斜狀，地形崖東高西低，高低差約 2.5 公尺。本槽溝沿著東西向開挖，開挖長度約 70 公尺，開挖深度約 5 公尺，李建成先生於 2001 年發表了此槽溝立面圖(圖 12)，槽溝剖面面南，由槽溝剖面可知，主要的變形都集中於地形崖前緣至前緣向西 10 公尺的區間，地形崖前緣有些伸張裂隙，槽溝剖面中有一條向東傾 30~35 度的逆移斷層，剖面觀察到的錯距約 2 公尺，斷層愈往地表面觀察到的錯距愈小。斷層上盤可觀察到類似箱型褶皺的構造，地層受劇烈變形，斷層下盤地層幾乎沒有變形，只在斷層附近看見地層被拖曳的現象。

由上述三個槽溝剖面，可歸納出地形崖的形貌、高程差不同，是因地表面下構造分布不同所致。並從鳳梨園槽溝定年資料的研究資料顯示，斷層曾經多次活動過。

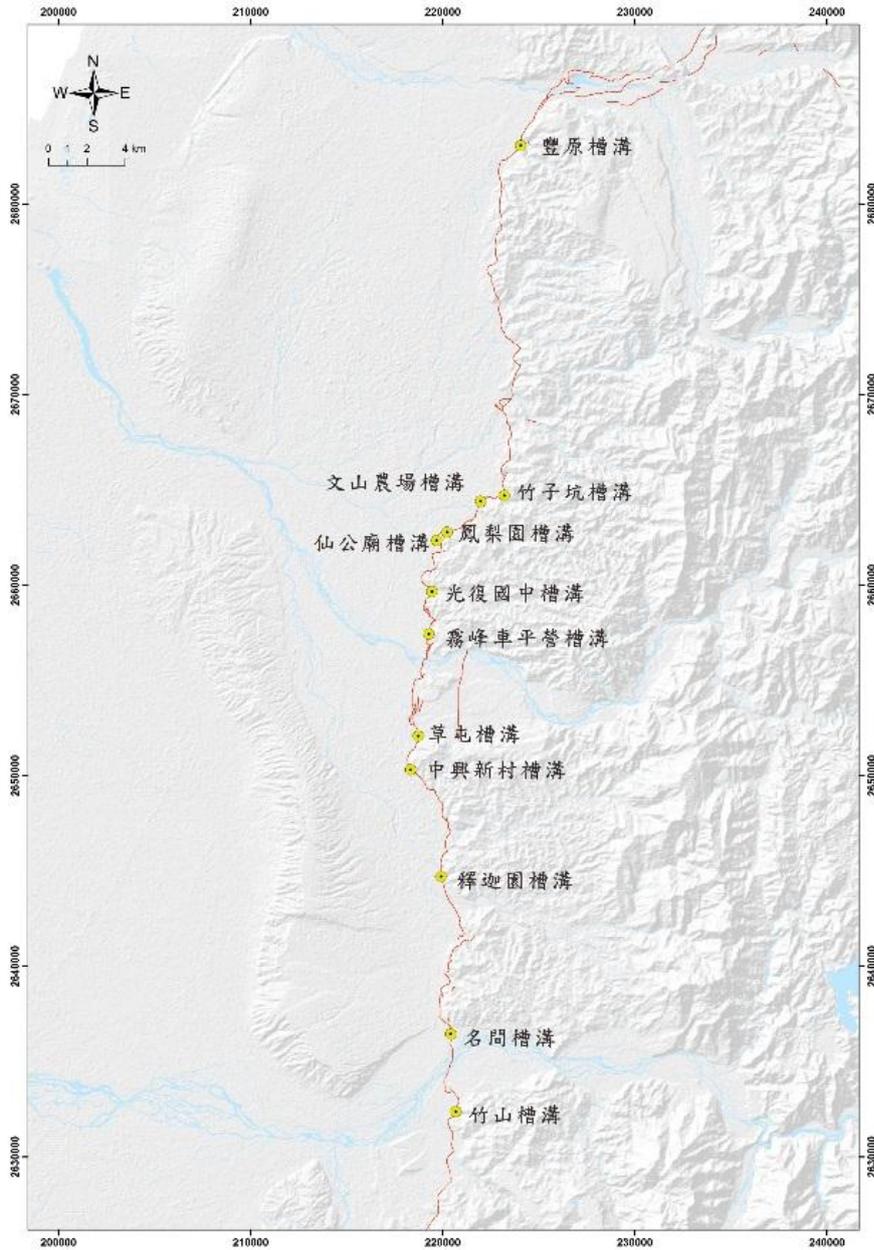


圖 9 集集地震地表破裂跡沿線開挖槽溝分布圖。

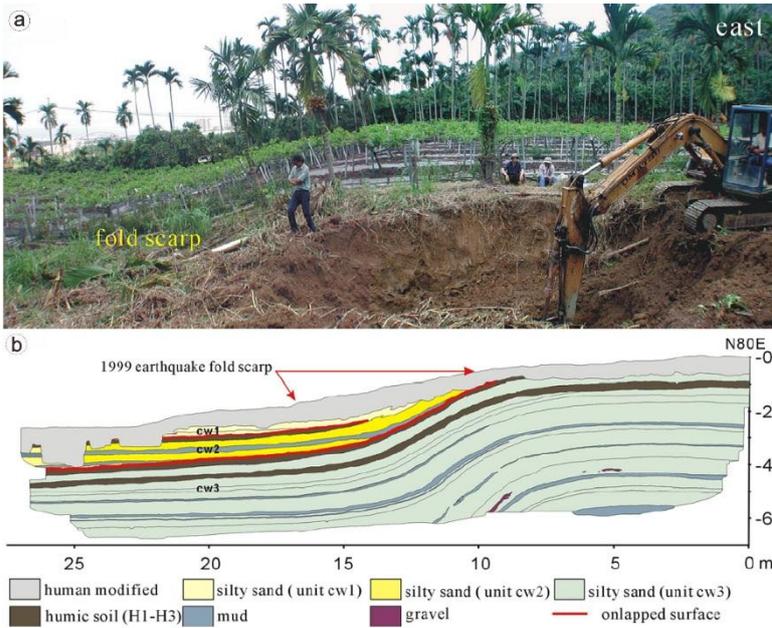


圖 10 釋迦園槽溝照片及構造素描圖。(a)槽溝野外照片；(b)測繪立面圖。
(改自 Chen et al., 2007)

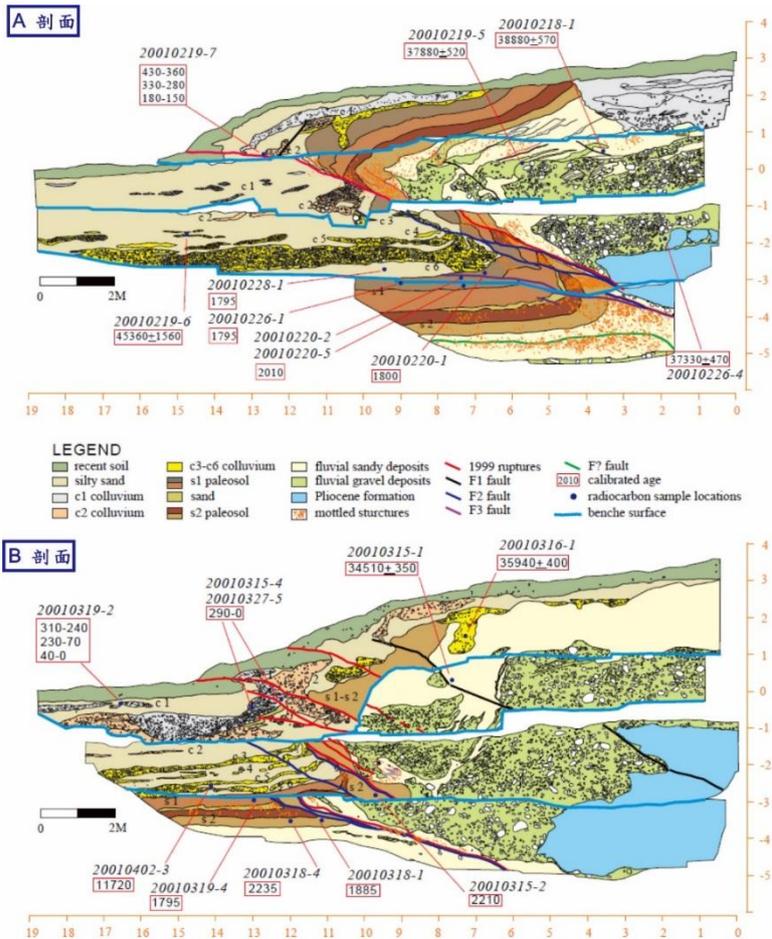


圖 11 鳳梨園槽溝測繪立面圖。(取自 Chen et al., 2004)

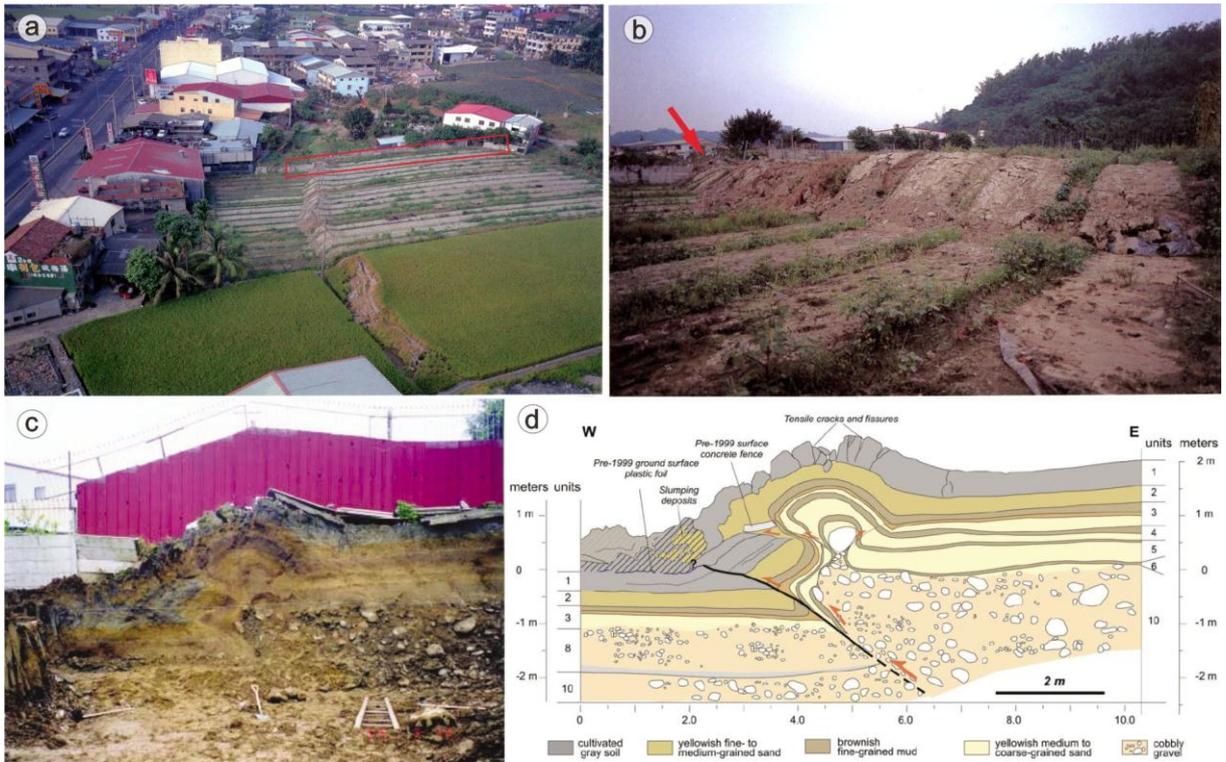


圖 12 霧峰槽溝相片及構造素描圖。(a)槽溝附近空照圖(連永旺 攝, 1999); (b)霧峰槽溝位置示意圖(連永旺 攝, 1999); (c)野外開挖面相片(取自 Lee et al., 2001); (d)測繪立面圖。(取自 Lee et al., 2001)

2-2-3 地震引致斷層與地形崖形貌

地震引致斷層於地下的分布不僅會影響引致地形崖的高程差，也會影響地形崖的地表形貌。3-1-2 節介紹了 3 個斷層在地下的分布及地形崖形貌截然不同的槽溝，本節將整理前人歸納斷層與地形崖形貌關係，在敘述利用半空間理論的模擬結果。

野外觀察到地形崖的形貌及斷層上緣位置，將其分成對稱凸起狀(Pucker fold)、凸起拋物線形狀(Bumped parabola-like thrust escarpment)、拋物線形狀(Parabola-like thrust escarpment)、單斜狀(Monoclonal fold-escarpment) 4 類(Huang, 2006) (圖 13)。對稱凸起狀(Pucker fold) 兩翼地形面無高低差，兩翼的中間為一對稱的凸起狀，集集地震時，斷層於南投市中興新村旁的省訓團高爾夫球場引致的地形崖便為此例 (圖 14 a)。凸起拋物線形狀地形崖(Bumped parabola-like thrust escarpment)由兩個長翼中間夾著斜度較陡的地形面，地形崖頂前緣有凸起的現象，霧峰槽溝的地形崖形貌為此類的實例(圖 14 b)。拋物線形狀地形崖(Parabola-like thrust escarpment)，崖腳處的轉折會比較突然，從崖坡到崖頂的地形曲線會比較平滑，就像拋物線的曲線一樣，典型此類的例子為濁水溪南岸水底寮農田(圖 14 c)。單斜狀的地形崖(Monoclonal fold-escarpment)地表由較緩的兩翼、中間夾著較陡的一翼組成，地表面斜率轉換處曲線較為平滑，集集地震引致地形崖的例子中，釋迦園槽溝的地形表面為此類的實例(圖 14 d)。

彈性半空間理論的方式，模擬出逆斷層於不同傾角及不同滑移量對於上緣深度比值，會產生不同的地表形貌(Huang, 2006)，(圖 15)為模擬的結果，圖片的橫軸為斷層的傾角，縱軸為地表下斷層上緣深度與斷層滑移量的比值(以下簡稱 D/Fs 值)，斷層傾角在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之間，無論 D/Fs 值為何，地表容易形成對稱凸起狀(Pucker fold)的地形崖；斷層傾角在 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之間，且 D/Fs 的比值大於 0.6，地表容易出現凸起拋物線形狀地形崖(Bumped

parabola-like thrust escarpment), 斷層傾角若大於 40° , 無論 D/F_s 值為何, 地表容易形成拋物線形狀地形崖(Parabola-like thrust escarpment)。

綜合本小節的敘述, 無論透過野外觀察或數值模擬方法, 都可得知地震斷層引致地形崖的形貌及地形崖崖腳前緣位置, 會與斷層在地表下的傾角、滑移量及上緣深度有關。

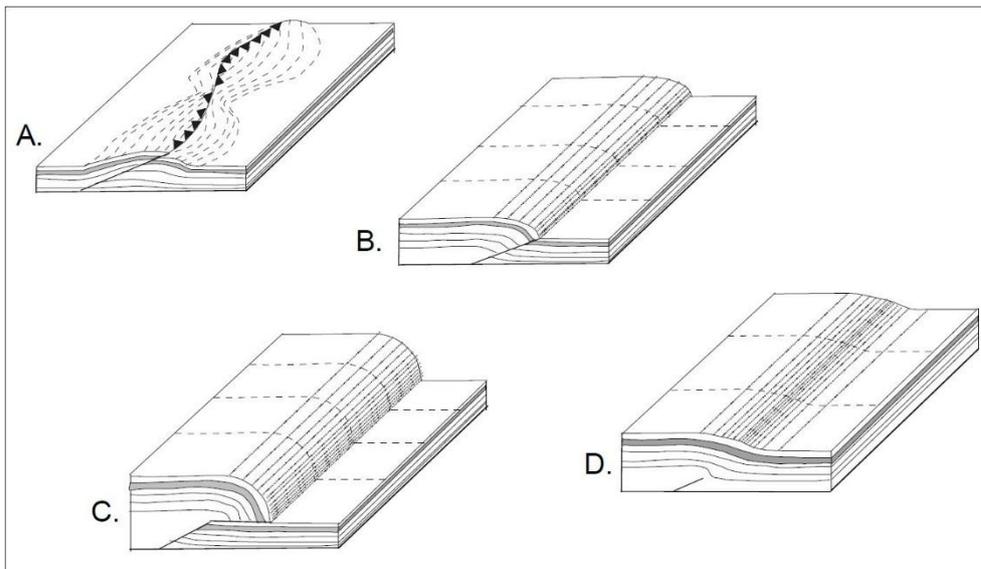


圖 13 逆斷層錯動引致地形崖的形貌分類(取自 Huang, 2006)。(A) 對稱凸起狀地形崖 pucker fold (B) 凸起拋物線形狀地形崖 Bumped parabola-like escarpment (C) 拋物線形狀地形崖 Parabola-like escarpment (D) 單斜狀地形崖 monoclonal-like escarpment。



圖 14 集集地震地表破裂跡沿線斷層引致地形崖照片。(a)省訓團高爾夫球場的對稱凸起狀地形崖；(b)霧峰槽溝的凸起拋物線形狀地形崖；(c)水底寮稻田的拋物線形狀地形崖 Parabola-like escarpment；(d)釋迦園槽溝的單斜狀的地形崖 monoclonal-like escarpment。

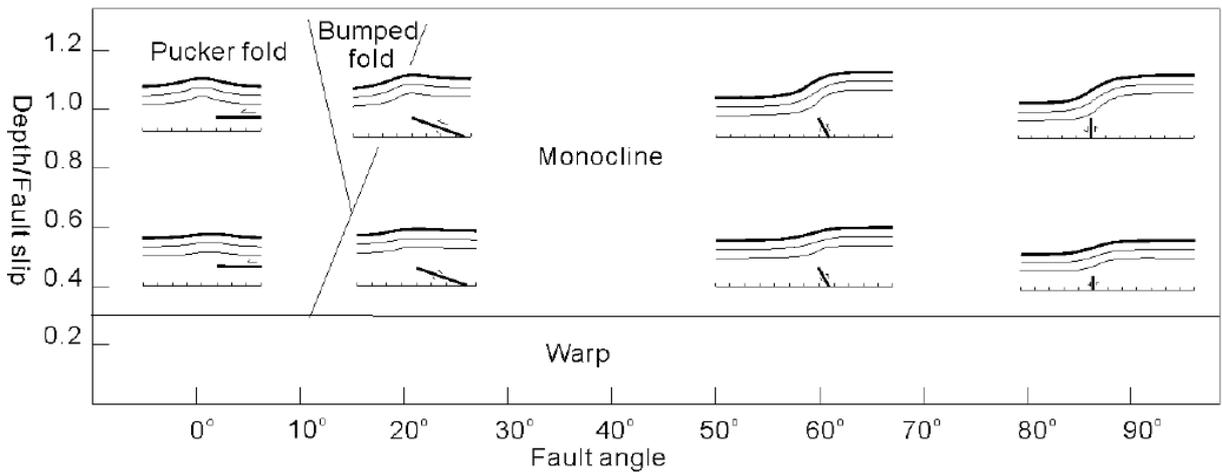


圖 15 斷層上緣深度、滑移量比值與斷層傾角關係圖(Huang, 2006)。

第三章 研究區域概述

台灣島於 600 萬年前開始造山作用，菲律賓板塊及歐亞大陸板塊的碰撞，使得台灣島上呈現複雜的地形景觀及地體構造。台灣本島依照地體構造分界及岩性分布可分為五區，由西向東分別為海岸平原、西部麓山帶、雪山山脈帶、脊梁山脈帶及海岸山脈帶，集集地震時產生的地表破裂跡，位於西部麓山帶前緣，本章節將介紹集集地震地表破裂跡沿線的地形、地質概況。

3-1 地形概述

集集地震地表破裂跡位於西部麓山帶前緣，平地及中央山脈前緣丘陵地的交界處，斷層東側的地形為西部衝上斷層山地：加里山山脈；斷層以西地形分布由南至北分別為台中盆地、八卦台地及竹山丘陵(圖 16)(林朝棨，1957)。

集集地震地表破裂跡東側為西部衝上斷層山地，衝上斷層山地北至東北角南至高雄鳳山的山地，以濁水溪為界，北段稱作加里山山脈；南段稱作阿里山山脈。本研究區東側加里山山脈，北側以大甲溪、烏溪及濁水溪為界，由北向南的山地又分別為豐原山地、南投山地及竹山山地，這三段山地的地形特徵相似，都是向東傾斜南北向延伸的覆瓦狀斷片構成(林朝棨，1957)。

斷層西側台中盆地從地形圖上觀察期形狀為一南北向細長的盆地，夾於大肚台地、八卦台地與西部衝上斷層山地之間，北端為豐原地區，南端至南投市區東西向的寬度向南漸漸的尖滅，南北向延伸距離近 40 公里，東西向最寬的地帶約 12 公里。八卦台地從地形陰影圖上看為一北北西-南南東走向狹長狀的台地，南北段較寬，中間段較窄，北至烏溪南至濁水溪延伸約 32 公里，北段的東邊鄰近台中盆地西緣，南段東側鄰近西部衝上斷層山地。竹山丘陵位於濁水溪南方至濁水溪支流清水溪之間，南北長約 10 公里，寬約 3 公里。

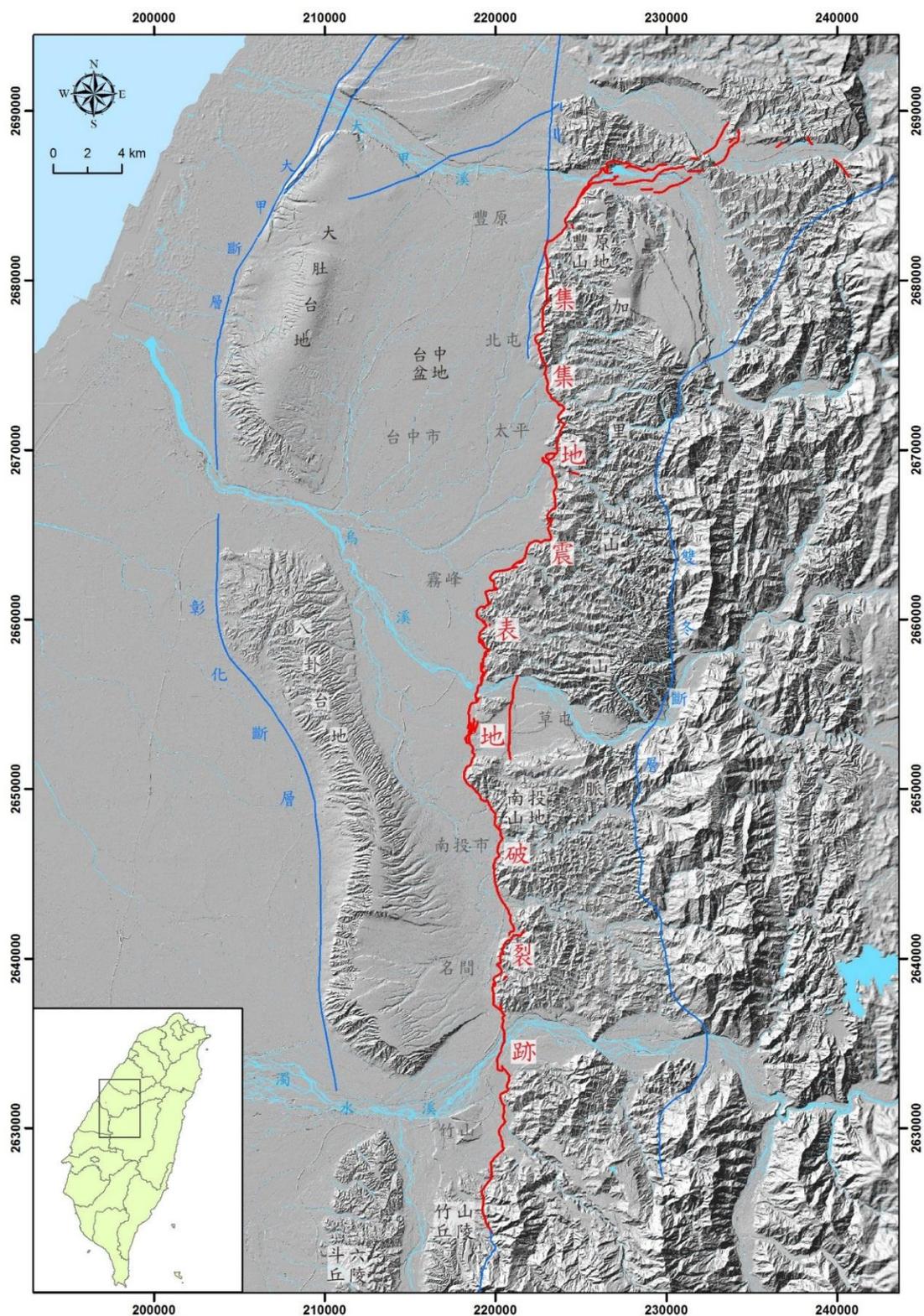


圖 16 台灣西半部台中盆地及八卦台地一帶地形陰影圖。圖中紅線為集集地震地表破裂跡位置，藍線標示研究區附近地調所公布的活動斷層分布位置。

3-2 地質概況

本研究參考經濟部地質調查所公布二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖，及五萬分之一地質圖台中、南投及雲林圖幅，繪製集集地震地表破裂跡兩側的條帶地質圖(圖 17)，集集地震地表破裂跡東側出露於地表的地層以上新世晚期至更新世地層：錦水頁岩及卓蘭層；斷層西側出露現代沖積層。

錦水頁岩以深灰色厚層泥岩及薄層砂頁岩互層為主。厚層泥岩中，通常夾有灰色透鏡狀砂岩薄層，厚度約 1 公分左右，延伸性極差。卓蘭層以砂岩頁岩互層為主，砂頁岩比例及砂岩層單層厚度隨地層層序向上增加，砂岩主要以青灰色或淡灰色中粒至粗粒混濁砂岩為主。頭嵙山層下部為香山相，上部為火炎山相，下部香山相以厚層砂岩及砂頁互層為主，愈往上薄層礫石出現的頻率就會愈頻繁。上部火炎山相主要以厚層礫石及砂礫互層。為了更了解集集地震地表破裂跡地底下車籠埔斷層及地層分布，筆者沿著東西向，分別在集集地震地表破裂跡南北繪製了四條地質剖面，剖面的位置如(圖 18)所示，剖面顯示車籠埔斷層北段上盤為卓蘭層，車籠埔斷層南段上盤錦水頁岩；北段豐原地區因較西側存在三義斷層，下盤接觸岩性為桂竹林層，其餘三條剖面下盤接觸岩性為頭嵙山層。

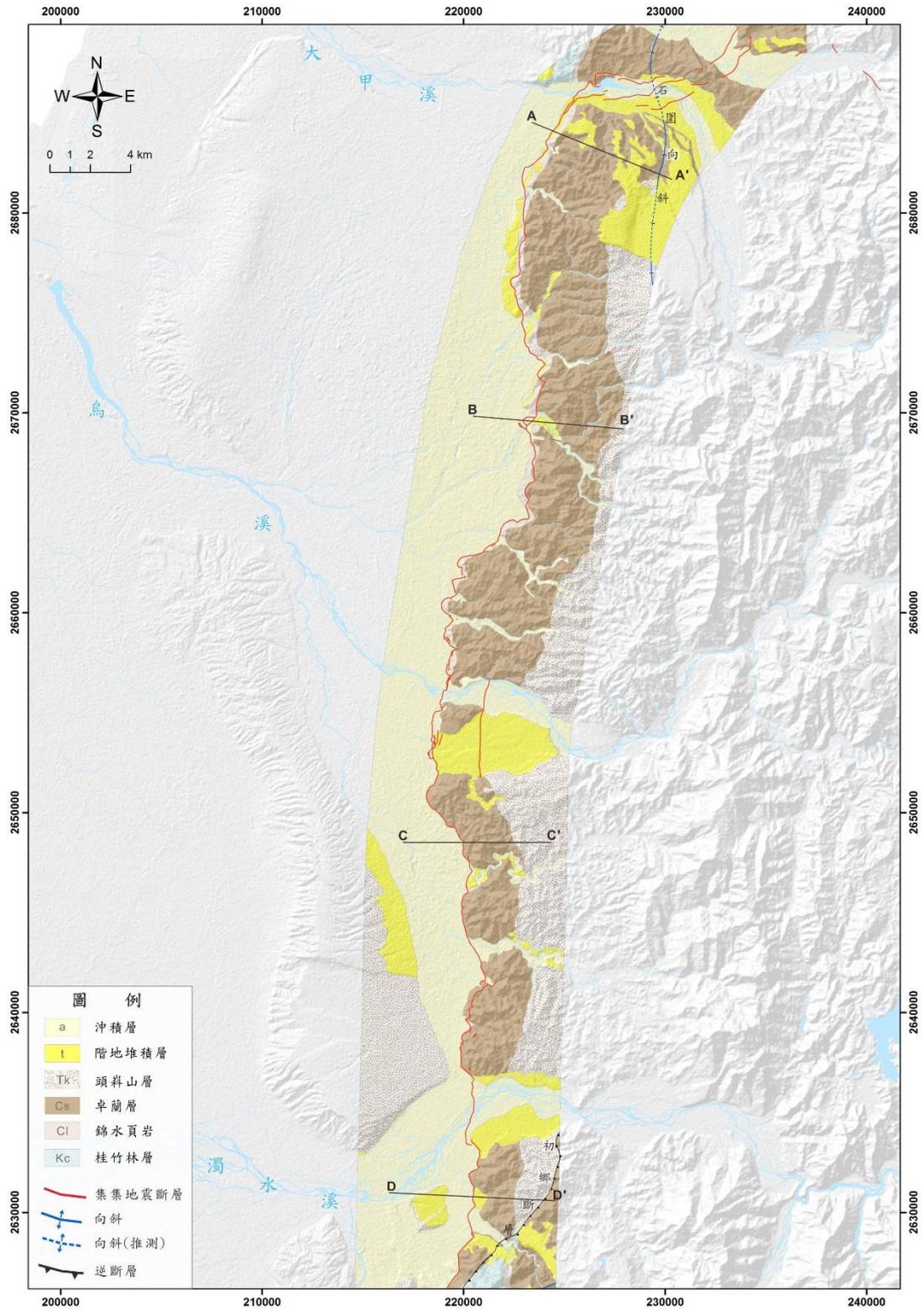


圖 17 集集地震地表破裂跡沿線條帶地質圖。

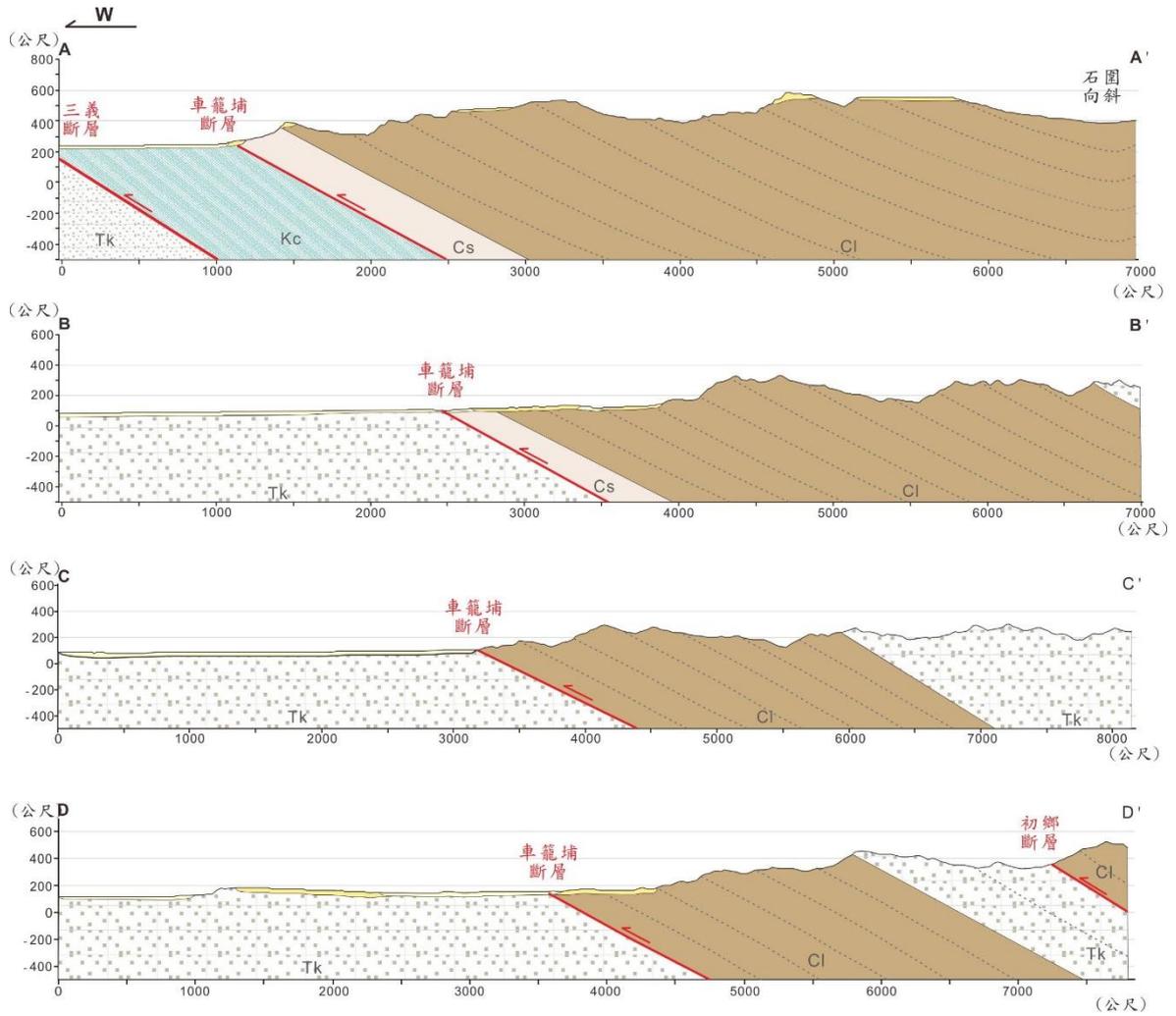


圖 18 車籠埔斷層地質剖面。(a)台中豐原地質剖面；(b)台中太平地質剖面；
 (c)南投市附近地質剖面；(d)濁水溪附近地質剖面。車籠埔斷層北段上盤接觸為錦水頁岩，車籠埔斷層南段上盤接觸為卓蘭層。

第四章 前人研究

本章 4-1 節將介紹前人如何運用遙測影像做地形判釋，4-2 節及 4-3 節將分別介紹集集地震與 2008 年於四川發生的汶川地震發生過後，河川遷急點的研究。

4-1 地形崖線形判釋

集集地震之前就有出現台中盆地及豐原山區交界處，地形面與活動斷層關係之研究，車籠埔地區及草屯地區的地形線形為活動斷層，頭汴坑溪一江橋附近的河階群及草屯的河階群均在車籠埔斷層活動，台中盆地開始陷落後形成(石再添，1985)，因此集集地震斷附近的地形線形，可能都跟車籠埔斷層的活動有關。有學者利用航空照片判讀、野外調查、地形計測等方法判定地形線形，並根據判釋地證據，將地形線形分類，以下詳細介紹各學者判釋的準則及成果。

Ota 教授利用航空照片集集地震地表破裂跡沿測繪，將地形線形分成四類，分類的方式如下：

- 第一類：可在同一階地面上觀察到明顯變形現象，例如：斷層崖、撓曲崖等，並且可確切的知曉斷層的位置。
- 第二類：此類為已知活動斷層存在，但其位置不確定的狀況。斷層崖或撓曲崖的下盤被更年輕的覆蓋，或因撓曲崖或斷層崖因生成於較陡峭的地面而已侵蝕。
- 第三類：已知地底下有斷層存在，但斷層的位置只能大略估計。
- 第四類：可觀察到明顯地地表線形，但斷層存在與否或滑移方向不確定。

張瑞津、楊貴三與沈淑敏等人利用航空相片及野外調查的方式，判定地形線形的位置，並參考日本活斷層研究協會 1980 年建立的確實度作為辨認活動斷層存在的準則，以下為確實度分類標準：

- 確實度 1：具有明確的斷層變位性質及位置者。
 - (1) 數條山稜及河谷呈系統性的橫移。
 - (2) 一個延續且確定為同年代的地形面為一斷層崖截切。
 - (3) 數個不同年代的地形面為一斷層崖截切，並顯示變位的累積性。
 - (4) 同一地形面有明顯的撓曲、反斜等。
 - (5) 有截切第四紀地層的斷層露頭。
- 確實度 2：可推測斷層變位性質及位置，但缺乏做為確實度 1 的證據。
 - (1) 僅 2~3 條的山稜及河谷有橫移現象。
 - (2) 疑為斷層地形之兩側地形面年代不同。
 - (3) 無明顯地形基準面(如山坡地)。
- 確實度 3：斷層變位性質不明，可能沿著斷層發生河蝕、海蝕或差別侵蝕而造成線形者。

大甲溪埤豐橋至台中豐原中正公園一帶有兩條明顯南北走向的線形，集集地震地表破裂跡為西側的線形，埤豐橋至中正公園之間較西側的線形，被判定為第二類(Ota et al., 2004)；東側的地形線形因沒有找尋到可佐證為活動斷層的證據，被判定為第四類(圖 19)。張瑞津將埤豐橋下至中正公園較西側的地形線形判定為確實度 2，較東側的線形被判定為確實度 2(張瑞津、楊貴三，2001)(圖 20)。沈淑敏將埤豐橋下至中正公園較西側的地形線形判定為確實度 1，較東側的線形被判定為確實度 2(沈淑敏 等，2005)(圖 21)。

水底寮地區集集地震地表破裂跡分岔成兩段，然而破裂跡上的地形線形均未被前人分類，破裂跡間存在的地形線形，本研究蒐集的前文文獻中均有被判釋出，Ota 將其分類為第二類與第三類(Ota et al., 2004)(圖 22 a)，張瑞津其歸類為確實度 1(張瑞津和楊貴三，2001) (圖 22 b)，沈淑敏其歸類為確實度 2(沈淑敏 等，2005)(圖 22 c)。

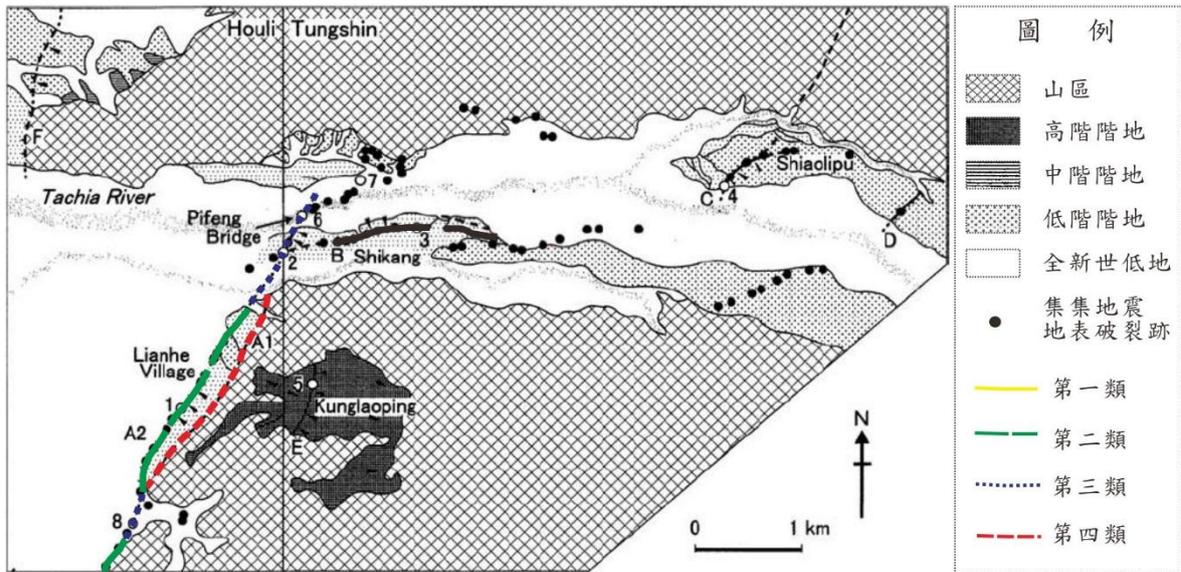


圖 19 豐原地區 Ota 等人地形線形判定結果 (改自 Ota et al., 2004)。

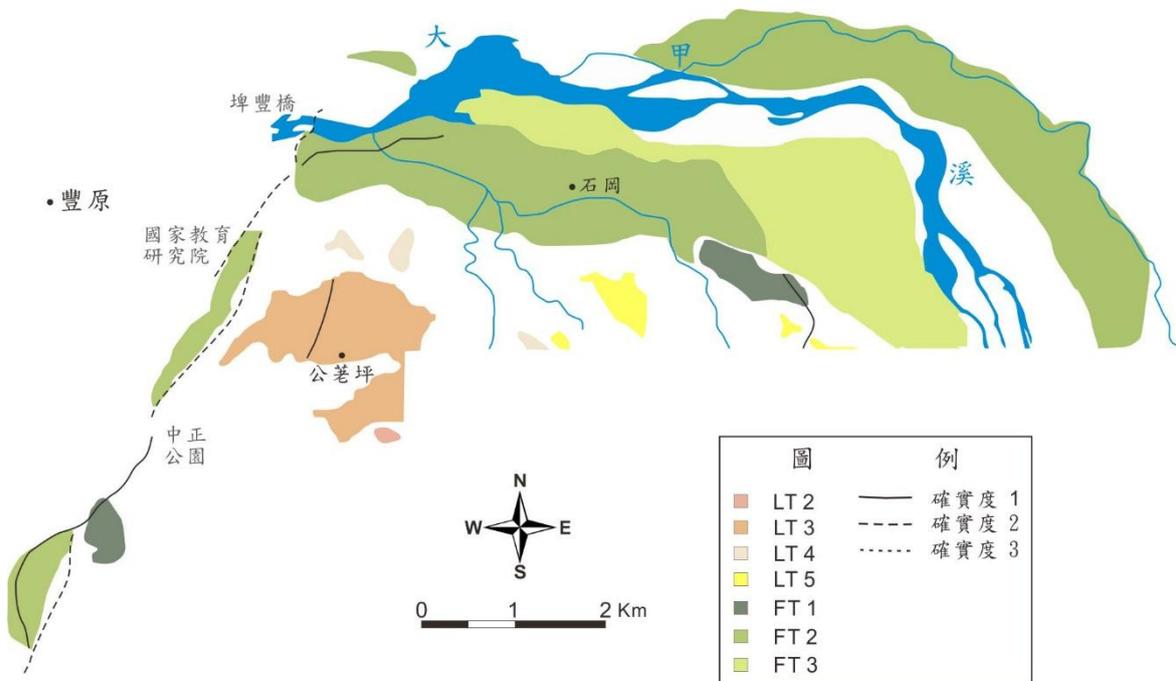


圖 20 豐原地區張瑞津等地形線形確實度判定結果(改自張瑞津與楊貴三，2001)。

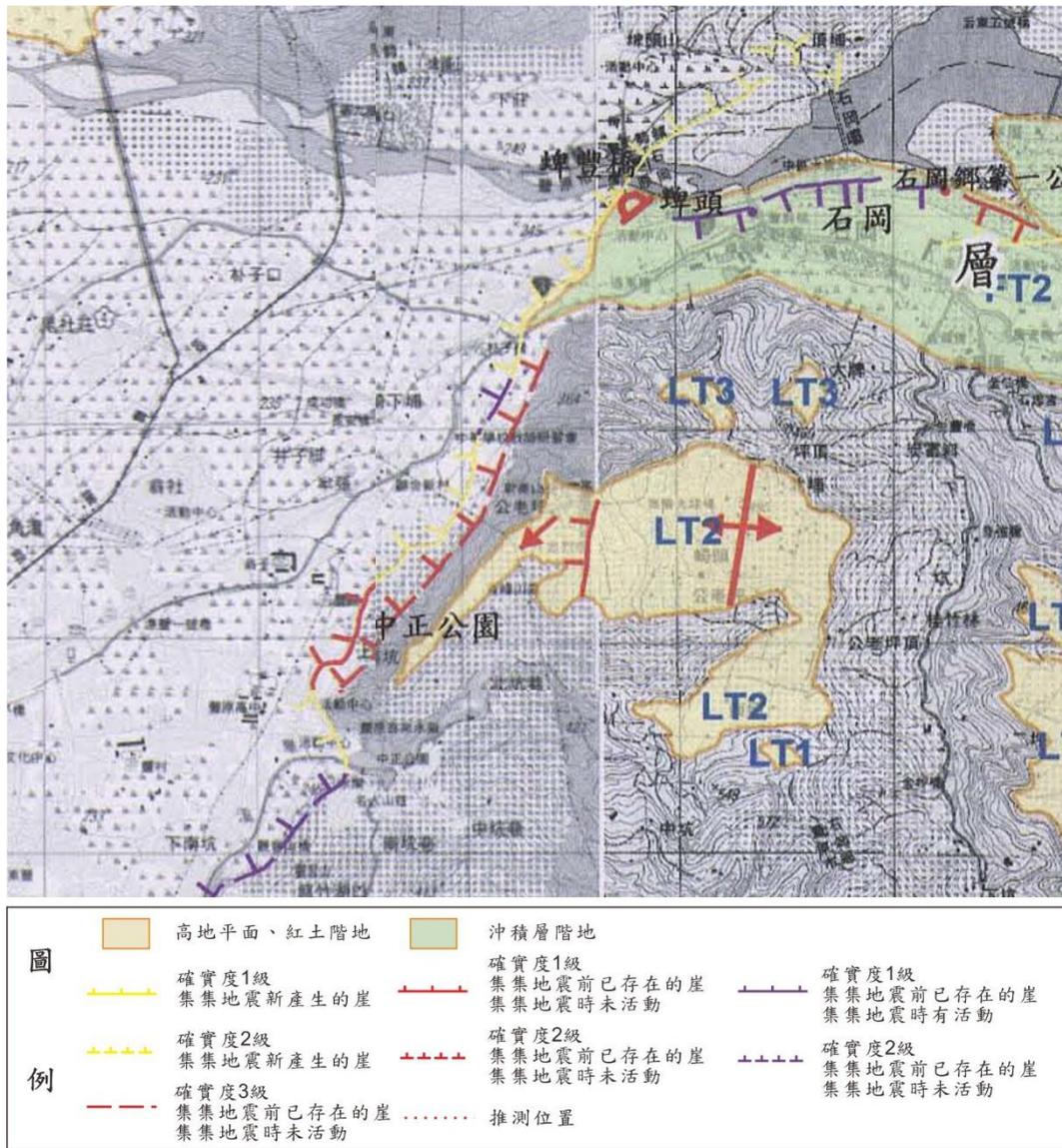


圖 21 沈淑敏等豐原地區地表線形確實度判定結果圖(改自沈淑敏 等，2005)。

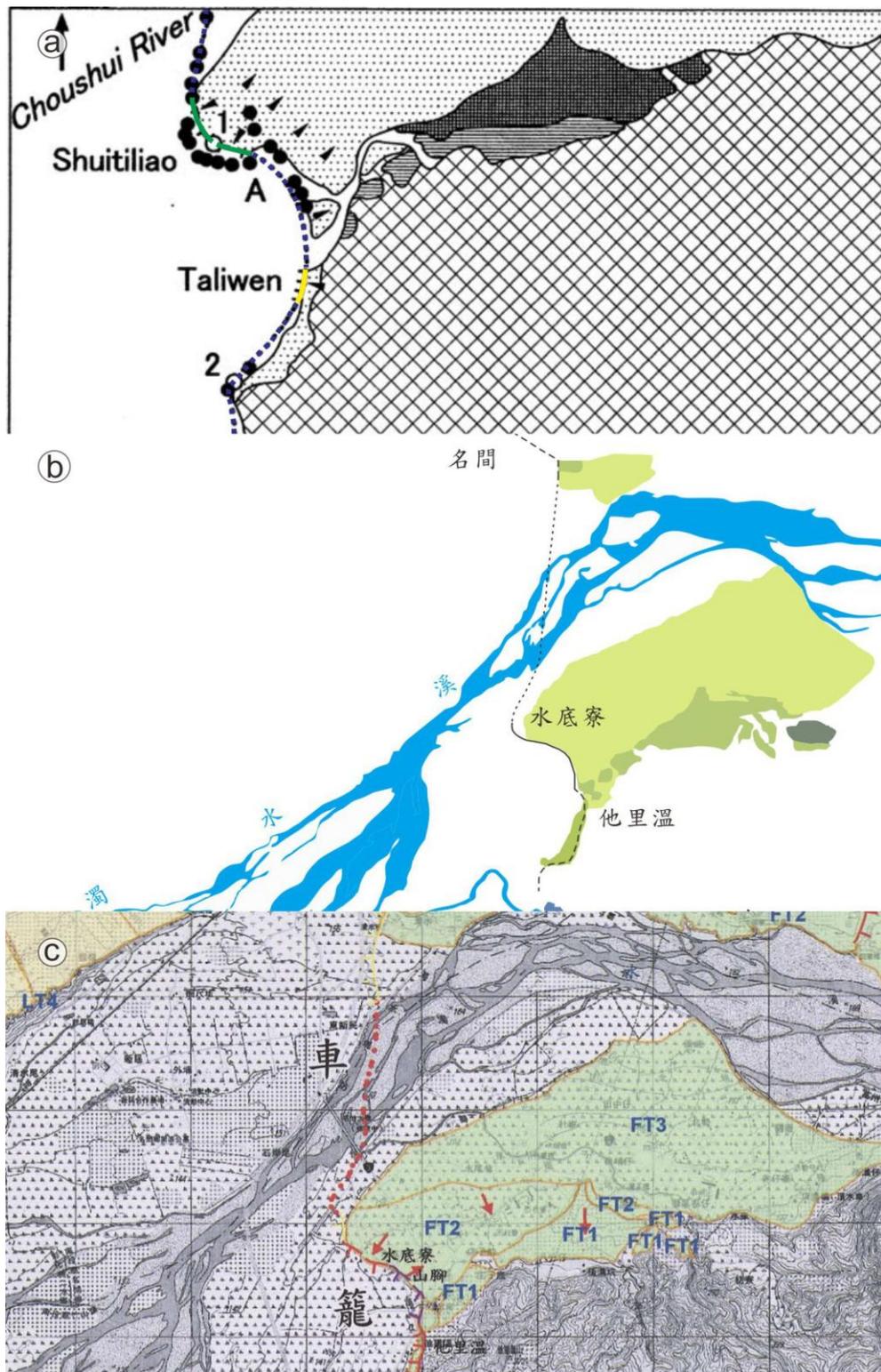


圖 22 各研究於竹山水底寮地區地形線形判定結果。圖(a)至(c)分別為 Ota、張瑞津等及沈淑敏等的判定結果。((a)至(c)分別改自 Ota et al., 2004、張瑞津與楊貴三，2001、沈淑敏 等，2005)

4-2 地形崖遷急點變遷之研究

集集地震後不少研究投入河流中地形崖遷急點位置變化，遷急點(kinckpoint)是指地面坡度上突然的不連續，本篇的遷急點指在河道地形縱向剖面上，地形崖頂端斜率由緩突然變陡的位置。集集地震時破裂跡沿線各條河流河床面抬升 2~5 公尺，河床面可觀察到明顯的遷急點，因河床面在地震時抬升，河流的侵蝕基準面在突然改變，河床中的地形崖在地震後至今 17 年間快速的被侵蝕。

圖 23 為徐婉容於 2013 年製作大甲溪埤豐橋下 1999 年至 2009 年間一系列的射影影像，從西元 1999 年至 2009 年地形崖遷急點的位置明顯的倒退，1999 年 9 月 22 日至 2005 年 11 月 20 日，地形崖高度差變為 4 公尺，地形崖的遷急點退後約 30 公尺，但地形崖的坡度與 1999 年相比並沒有太大的變化，2005 年 11 月 20 日至 2006 年 10 月 25 日，地形崖高度差變為約 2.5 公尺，地形崖的坡度開始變緩，2006 年 10 月 25 日至 2009 年 10 月 21 日，大甲溪左岸沖刷出一條小條的河道，左岸河道上遷急點的位置快速的後退(徐婉容，2013)，到了 2010 年左岸河道地形崖的遷急點，已經退後到了石崗壩的壩體前緣(圖 25) (Hayakawa et al., 2013)，大甲溪埤豐橋下河道遷急點，1999 年至 2005 年的平均倒退速率為 3.3m/yr，2005 年至 2009 年的平均倒退速率則大於 220 m/yr。

大安溪河床中地震引致的地形崖在 1999 年至 2010 年期間快速的沖蝕出一條河道(圖 26)，這期間的變化可分為四個階段(Huang et al., 2013)，1999 年至 2001 年河床上附的沖積物被沖走，2001 年至 2004 年有強烈的下切作用，2004 年至 2007 年河道的岩層快速的被侵蝕，2007 年至 2010 河道面斜率漸漸回復成地震發生前的樣子(圖 27)，形成今日所見的大安溪峽谷。

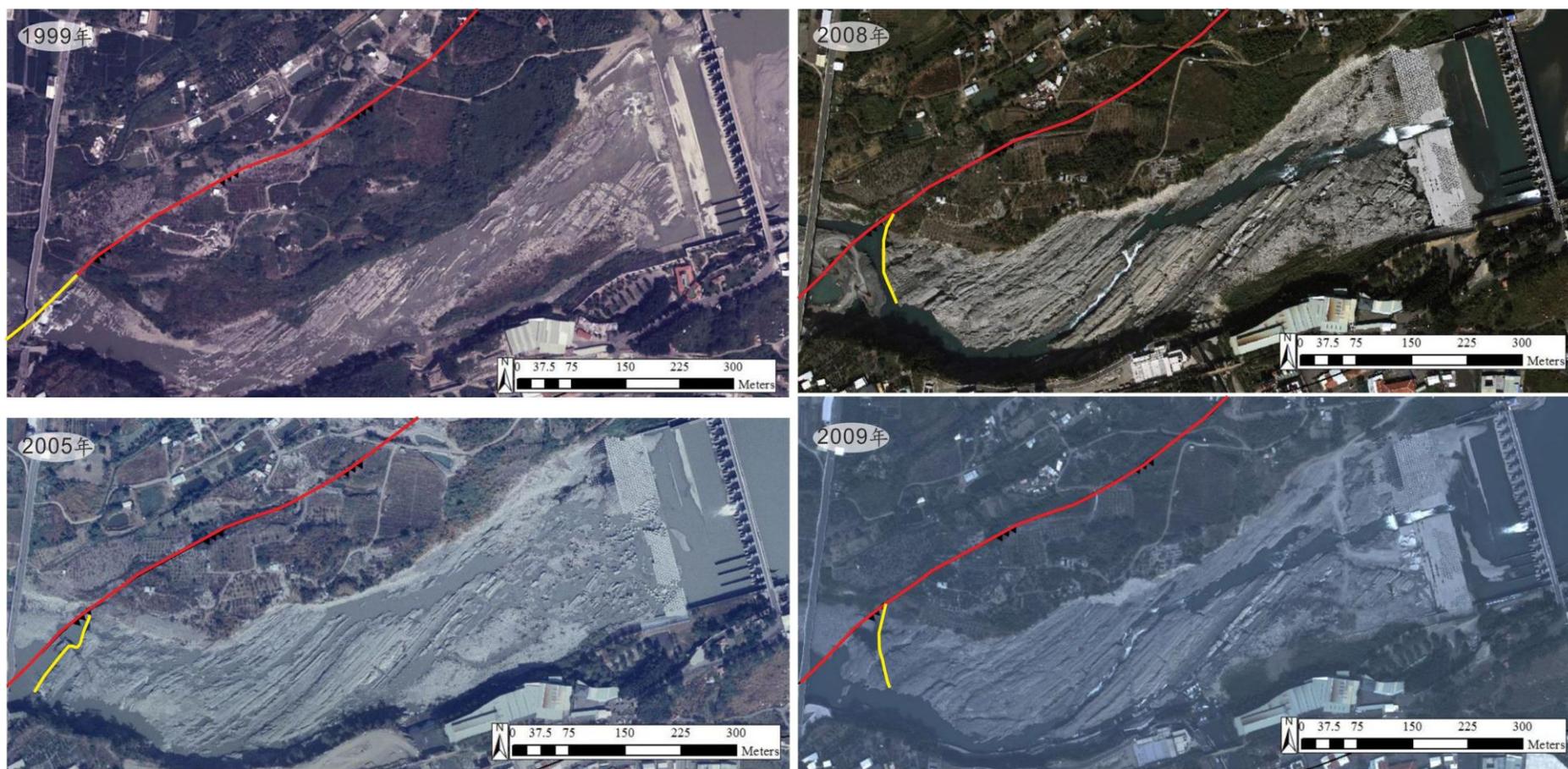


圖 23 西元 1999 年至 2009 年大甲溪河床空照圖 (改自徐婉容, 2013)。紅色線皆為河道中集集地震地表破裂跡位置, 黃色線為河床上地形崖各年的位置。

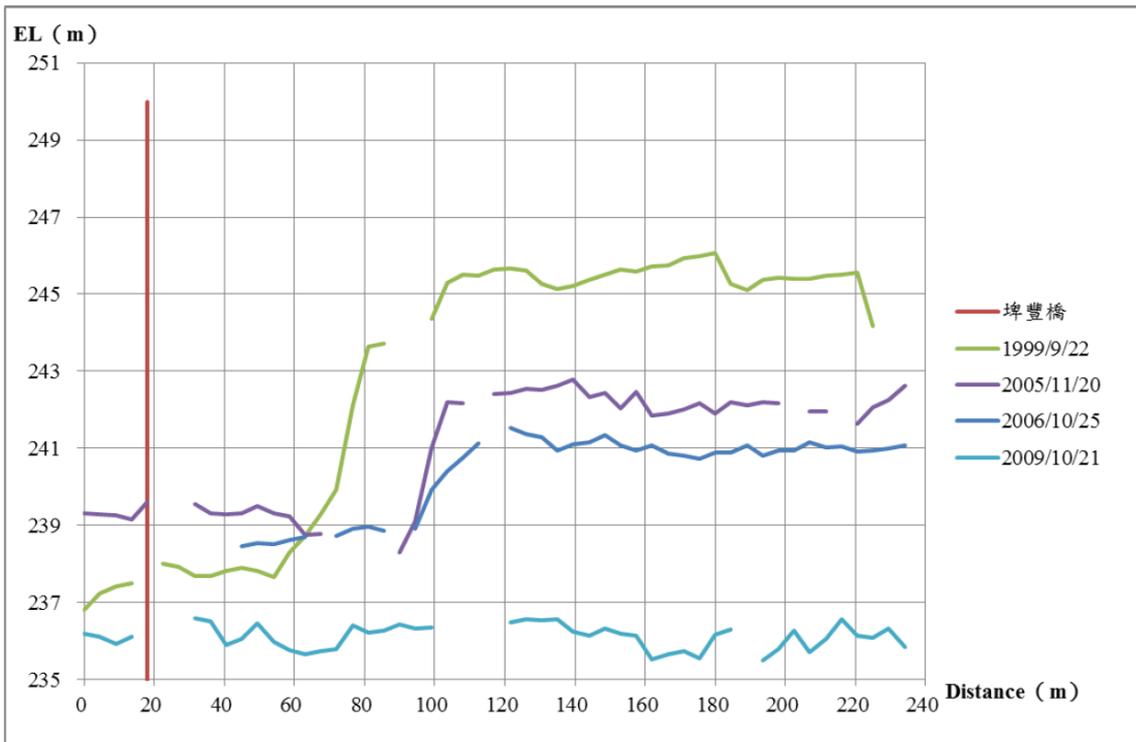


圖 24 大甲溪埤豐橋下河道剖面逐年變化圖。(取自徐婉容, 2013)

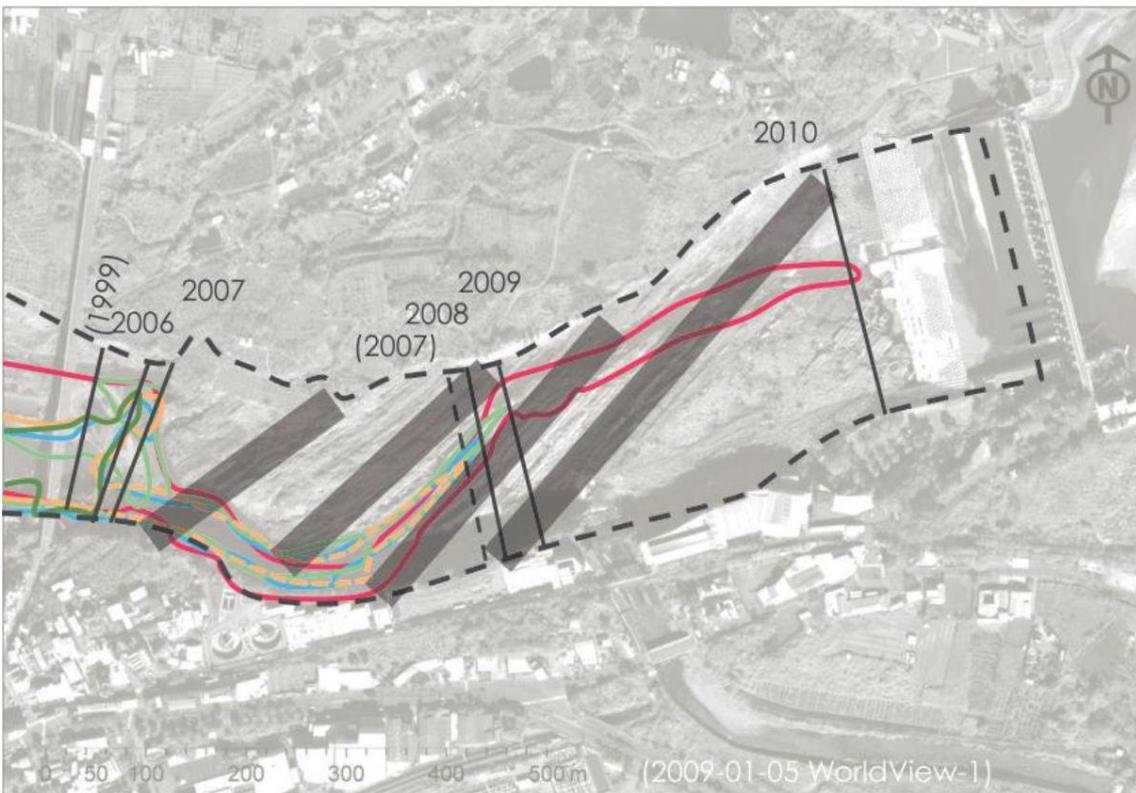


圖 25 西元 1999 年至 2010 年大甲溪河床遷急點變化圖。(取自 徐婉容，2013)

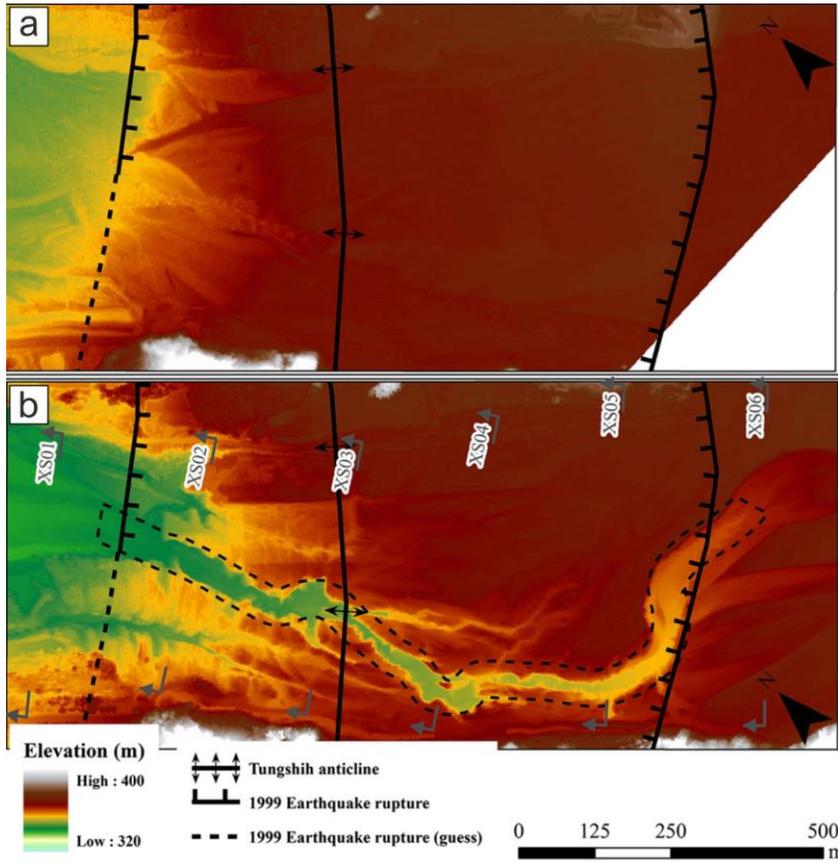


圖 26 大安溪地形數值模型(引自 Huang et al., 2013)。(a)1999 年破裂跡前緣引致連續地形崖；(b)2010 年河床上沖蝕出一條河道。

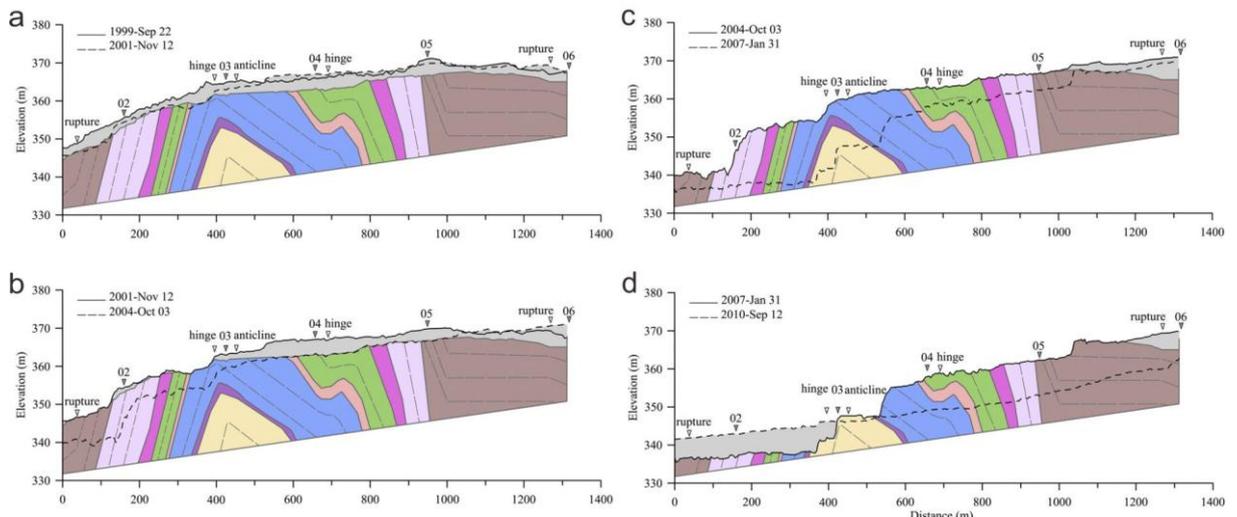


圖 27 大安溪河道遷急點 1999 至 2010 變化示意圖 (引自 Huang et al., 2013)。(a)河床上沖積物被移除；(b)河床開始行成下切作用；(c)河道內快速的被侵蝕；(d)河道面完全被沖蝕平整。

4-3 其他斷層引致地表破裂跡的實例：汶川地震

除了集集地震的例子之外，國外也不乏有逆斷層引致地表破裂及地表隆起的實例，西元 2008 年 5 月 12 日 14 時 27 分中國四川發生震矩規模為 7.9 的汶川大地震，此次地震造成近 7 萬人喪生，37 萬多人受傷，1 萬 8 千多人失蹤，許多住宅倒塌、當地的交通也因此受到影響。

汶川地震與集集地震同為逆斷層錯動引致的地震，此次地震於青藏高原與四川盆地的交界處，形成 285 公里東北-西南向的破裂跡(圖 28)，破裂跡沿線產生 1~6 公尺的地形崖，(圖 29)列舉了兩張汶川地震剛生時的野外相片，汶川地震發生後，地表產生了斷裂或單斜狀的地形崖。

汶川地震後若干年，也有關於地形崖河床內遷急點變化的研究，由 Quickbird 0.6 米網格的影像及野外調查的方法，觀察白沙河河道中因地震引致的地形崖於 2008 年至 2012 年的變化，結果顯示白沙河河床地形崖遷急點於 4 年間倒退約 50 公尺(Lui & Yang, 2015)(圖 30)，遷急點於地震後迅速的改變。地震發生後若干年，河道上局部的沖積扇是不會留下因地震而造成的河階地，河道旁的陸地仍會保留著地形崖(Lui & Yang, 2015)。

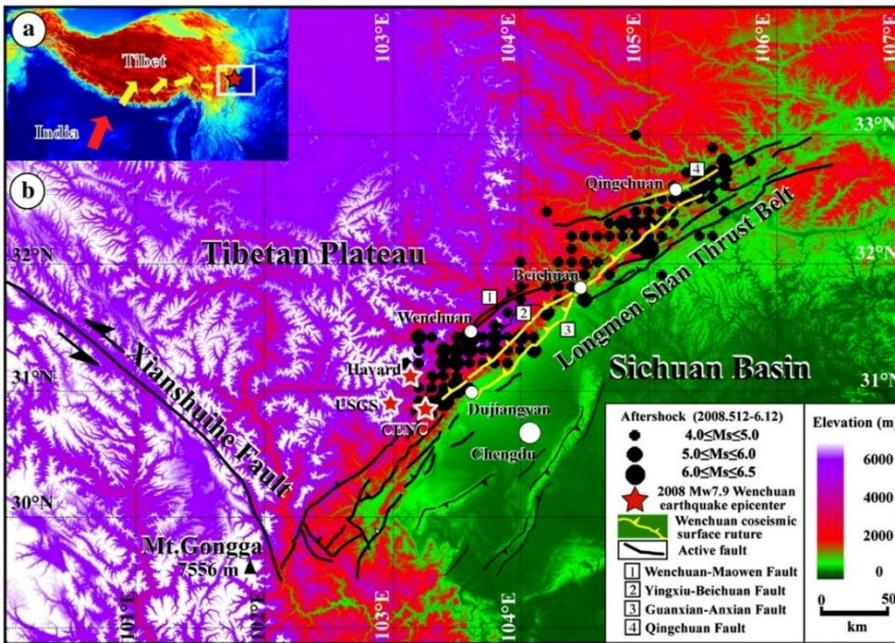


圖 28 汶川地震地表破裂位置圖。2008 年汶川地震，龍門山斷層活動在青藏高原和四川盆地交界形成 285 公里的破裂跡。(取自 Lin et al., 2009)

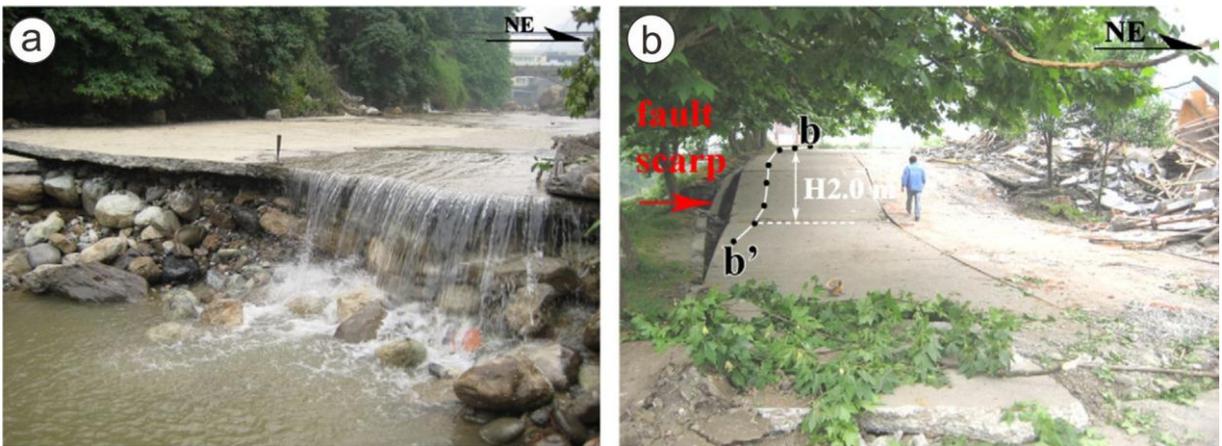


圖 29 汶川地震在地表引致的地形崖(改自 Lin et al., 2009)。

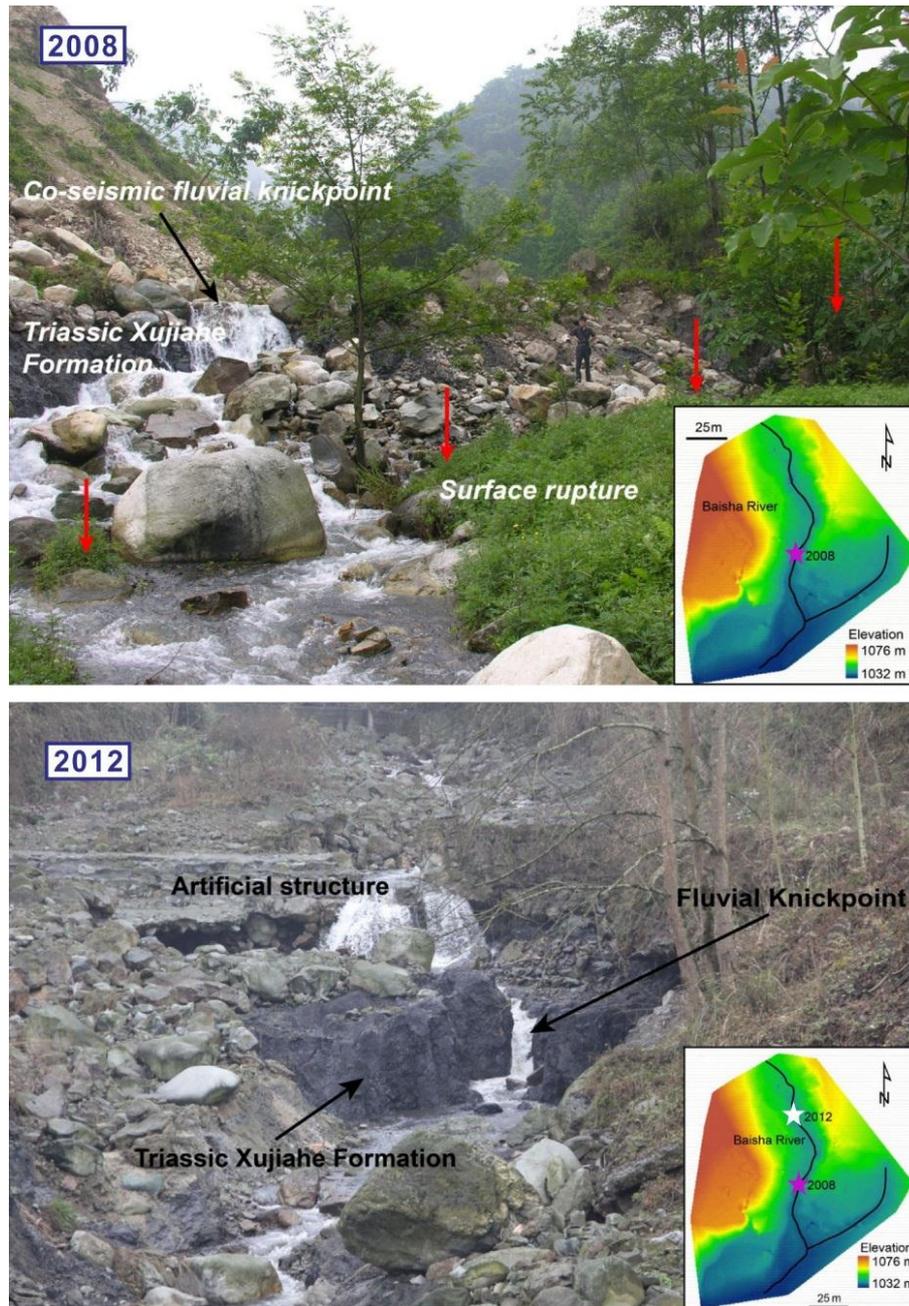


圖 30 四川白沙河地形崖遷急點變遷比較圖。(改自 Liu & Yang, 2015)

第五章 資料蒐集及研究方法

本研究的目的是為探討集集地震時引致地形崖今昔之間的變化，以及探討地形崖與引致斷層之間的關係，因此，地震剛發生的資料及現今的資料來源為此篇論文重要的部分，本章節將介紹地震剛發生時資料及現今資料取得方式(或量測方式)、資料屬性及使用方式。

5-1 集集地震剛發生後的資料蒐集

為了更精確得知地震剛發生之初地形崖的狀況，本研究蒐集地震發生後，前人立即前往野外調查的資料，蒐集的資料內容包含地震引致地形崖坡頂、坡腳位置及地形崖形貌。資料來源包含 1/1000 地表斷層數值地形圖、經濟部中央地質調查所出版的《九二一地震地質調查報告》及各篇論文提及地形剖面測量資料，以下依照資料來源詳細介紹其資料屬性。

- 空拍相片

連永旺先生於 1999 年出版的《大地裂痕》一書中，蒐集了一系列集集地震剛發生時，地表破裂跡沿線的航空相片，這些相片有助於了解地震剛發生後地形崖的延伸性、及斷層沿線附近房屋損毀分布。

- 1/1000 比例尺地表破裂跡測量資料

此筆地表破裂跡測量資料是由永承顧問公司製作，於 2000 年 4 月出圖，製圖採用比例尺為 1/1000，採用的坐標系統格式為 1997 台灣大地基準 (TWD97)(圖 31)，集集地震地表破裂跡沿線的製圖總數共計 259 幅。資料內的資訊包含道路分布、建築物分布、地表破裂跡位置及參考等高線。此筆資料地表破裂跡劃定方式是於破裂跡沿線密集的量測坐標值，再將量測的點位連結在一起。以上列舉的資訊有助於了解地震剛發生時，道路、建築物的分布及地表破裂跡位置。

- 《九二一地震地質調查報告》

《九二一地震地質調查報告》一書由經濟部中央地質調查所於 1999 年 11 月出版，報告書內包含地震引致地形崖的位置、照片及露頭描述。當時地形崖的位置是採用 Trimble 4000 SSI 衛星接收儀，以快速靜態測量法(fast Static Survey)測量，其測量精度均在 10 公分以內，其提供的坐標系統格式為 1997 台灣大地基準(TWD97)，報告內將地形崖量測前是否經過整修過進行分類，量測時，則選擇崖頂及崖腳的位置各測量一個坐標值(圖 32)，大部分的測點都有兩個坐標值，少部分測量點因地表隆起不明顯或地形崖超過兩階而只有一個或有多個坐標值。報告書內亦附有地形崖沿線各測點的位置描述、現場狀況描述及照片。可更容易掌握地震剛過集集地震地表破裂跡沿線的狀況。

- 地形崖剖面測量資料

地震發生後，一部分的學者投入於地震斷層引致地形崖的研究，這類資料內容利用經緯儀量測地形崖，沿垂直破裂跡的方向繪製地形剖面，(圖 33)為 Ota 於 2007 年的文獻發表台中霧峰光復國中操場，及學校南側乾溪河堤繪製的地形剖面，這些剖面可提供地震剛發生後，地形崖的形貌以及較精確的地形崖高度差。

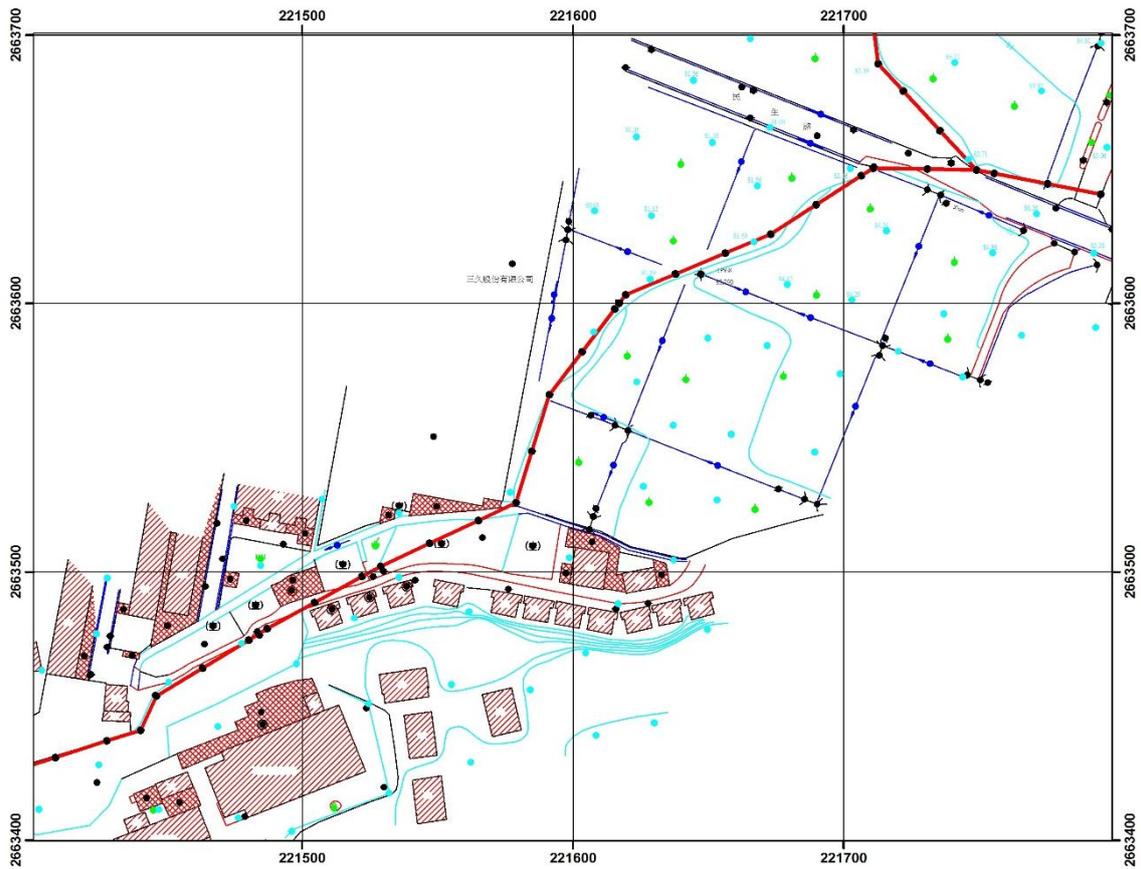


圖 31 永承工程公司 1/1000 地表破裂跡測量資料。粗體紅色線為地表破裂經過的位置，方塊狀為建物分布。

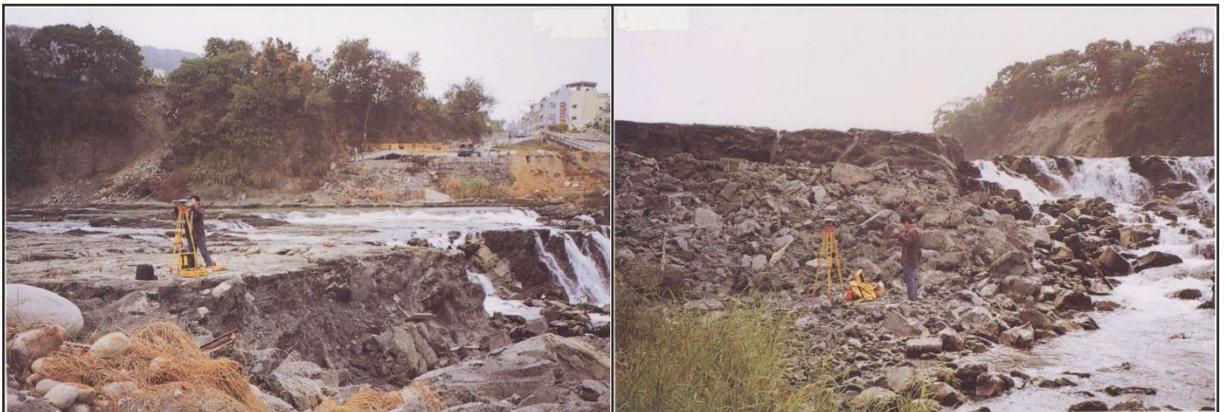


圖 32 集集地震引致地形崖位置量測實況照片。本相片拍攝於大甲溪埤豐橋下，左圖為量測地形崖頂上緣坐標值；右圖為量測地形崖崖角地坐標值(摘自 九二一地震地質調查報告)。

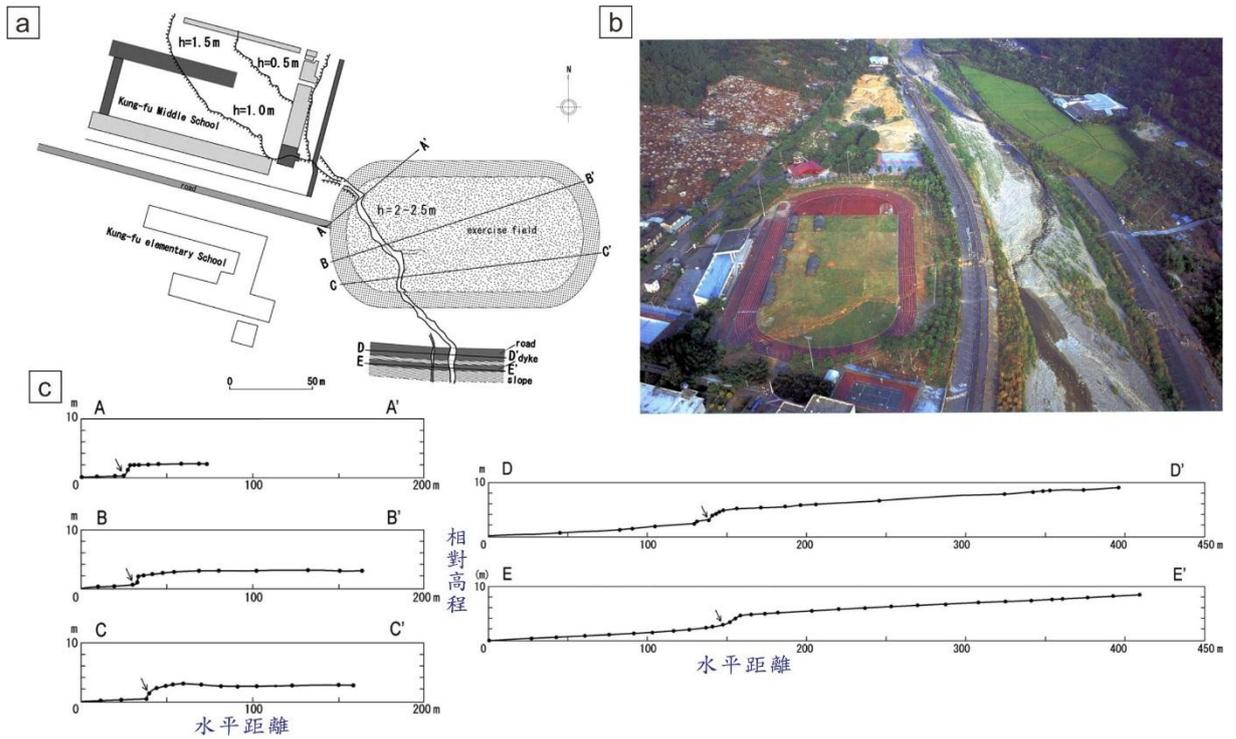


圖 33 前人於地震後量測地形崖剖面資料。此為台中霧峰光復國中操場及乾溪河堤量測資料，a 圖為剖面分布圖(引自 Ota et al., 2007)，b 圖為光復國中操場及乾溪河堤空拍(連永旺 攝，1999)，c 圖為水平距離與高程剖面(引自 Ota et al., 2007)。

5-2 現今野外資料蒐集

集集地震剛發生後，前人野外調查的資料及文獻中的描述方式，多半是以點的形式為主，很少找到有資料的形式，是紀錄連續一條線或漫延一整面。隨著科技的進步，無人飛行載具(UAV)價格變得越來越便宜、機體越來越方便攜帶，操作方式愈來愈容易，取得航空相片的成本隨之降低，因此本研究善加使用此工具，紀錄地形崖在地表面延伸狀況。

本研究筆者先造訪集集地震地表破裂跡的舊址，調查集集地震時引致地形崖現今在野外的狀況，接著挑選適合的地點，使用無人飛行載具、經緯儀、空載光達資料等工具搭配使用，製作高解析度地表數值模型。上述的資料將用來與集集地震發生不久後的資料比較，判釋集集地震時引致地形崖於這 17 年來的變化。

5-2-1 野外調查

航空相片、空載光達等等遙測的資料，只能大約知曉野外狀況，對於本研究想更進一步了解集集地震時引致地形崖現今的狀況，野外調查是不可或缺的步驟。

本研究調查的範圍包括大甲溪埤豐橋至南投竹山的中新崙林道，南北距離 70 公里，而大甲溪埤豐橋以東的 9 條以東西走向為主的斷層、烏溪橋東方 2 公里處於草屯市區南北向延伸 5 公里的斷層，以及最南邊桶頭則不在本研究的調查範圍內。筆者蒐集了前人野外調查資料，竭盡所能造訪前人調查過的每一個點，觀察並紀錄地形崖現今的狀況。野外調查紀錄的重點包含以下幾點：

1. 地形崖的位置：利用手持式的 GPS 紀錄地形崖的大略位置。
2. 地形崖的周邊環境及樣貌：描述地形崖所在的地形條件、人文景觀，及地形崖大致坡度，風化或重建後的樣貌。

3. 地形崖的延伸性：利用野外踏勘及 UAV 拍攝航空相片的方式，紀錄調查地點兩側的環境及是否能繼續看出高程差。

在野外紀錄地形崖同時，筆者另外也拋開集集地震的背景知識，假設用後人若不知道曾經發集集地震的觀點，來判定是否看得出地形崖，以下說明判定準則：

在野外若觀察到以下狀況，判定為看得出地形崖：

1. 地形崖仍存在且可連續的追蹤。
2. 地面上仍可看出單斜狀，如：道路、河堤。

在野外若觀察到以下狀況，則判定為看不出地形崖(圖 34)：

1. 地形崖明顯被侵蝕、夷平。
2. 在植被茂密的地方，只見到樹幹呈 S 形，但地表卻看不出起伏。
3. 地形崖被整修成梯田。
4. 地形崖前緣被人工建造物阻擋，如：水泥牆。

依照以上的在野外紀錄地形崖環境、樣貌及延伸性的資料，本研究將其分成河道、房屋建造區、平地農田、平地野地、既存坡地等五個類別，並從各例子中挑選地點，仔細的追蹤集集地震時引致的地形線形現今狀況。



圖 34 被判定已看不出地形崖的實例照片。(a)地形崖完全消失(圖 a1 摘自九二一地震地質調查報告)；(b)地形崖變成梯田(圖 b1 黃文正 攝)；(c)地形崖前建築圍牆，原地損毀的建築物原地重建 (圖 c1 黃文正 攝)。

5-2-2 地表數值模型

本研究利用無人飛行載具(UAV)與經緯儀，拍攝航空相片及量測地面控制點(Ground control points)，再利用航空攝影測量的原理製作地表數值模型(Digital surface model, DSM)。以下將介紹製作地表數值模型流程的細節，先簡介野外量測工作流程，再分別航空攝影測量原理、及地面控制點計算方法。

➤ 野外量測工作流程

野外量測的工作主要有兩個部分，分別為利用 UAV 拍攝航空相片及利用經緯儀製作地面控制點，以下介紹在野外的 workflows。

本研究使用 UAV 型號 Phantom 3 拍攝航空相片，Phantom 3 為四軸的旋翼型無人飛機，此款無人飛機配備只有飛機本體及一台遙控器，飛機本體的長寬只有約 40 公分，體積小、重量輕容易攜帶，且操作起來簡單方便，(圖 35)為野外操作狀況。空拍前需訂定測區大小，並規劃航線及設定飛航高度，飛航的航帶內各影像的重疊率須達 60% 以上，航帶間的得重疊率須達 30%，飛行前須注意場址附近是否有遮蔽物及天氣狀況，確認飛機起落點為空曠的。

本研究使用 Leica 型號 TCR307 經緯儀量測地面控制點(圖 36)，將經緯儀架設在已知點上，量測基站與地面控制點間的相對位置(圖 37)，再參考農航所正射影像中與測區出現相同標定物的點，將模型套疊於大地坐標系統上，筆者採用為平面三角測量及導線測量兩種測量方法。平面三角測量用於通視良好的測區，此類測區量測程序較為簡便，可將已知點引致測區中央，不須移動經緯儀就可一次量測到所有控制點；導線測量用植被或建築物較多，通視較差的測區，測區中沒有任何一個點可看見所有的控制點，量測時須移動基站才能完成測量。

➤ 室內資料處理

本研究使用以空中三角測量理論為基礎設計 Pix4Dmapper pro 軟體，處理在野外拍攝的航空相片，計算出地表數值模型，再輸入地面控制點坐標值，使地表數值模型內誤差降低，以下說明航空攝影測量原理及地面控制點測量原理的計算方式：

- 航空攝影測量原理

本研究將在野外用 UAV 拍攝的航空相片，利用 Pix4Dmapper pro 軟體計算生成地表數值模型，軟體內部運作方式以航空攝影測量的概念為基礎設計，將相片上像空間的資訊轉換成密集的点雲，再利用生成的點雲產生三角網格，最後步驟，輸入控制點的坐標位置，經軟體平差後生成數值地表模型。軟體運作模式是利用前方交會法的概念計算空間中點雲的坐標值，點雲是物空間計算之坐標值得集合，就一張相片而言，焦點(L)、像空間上的像點(a)與物空間中的觀測點(A)會形成共線的關係(圖 38)，然而，單張相片無法計算出高程，兩張有照到重疊區域的相片，兩張相片各自的焦點(L1, L2)、兩張相片的像點(a1, a2)、以及觀測點(A)會形成共面的關係(圖 39)，藉此計算出空間中各點的坐標值。

- 地面控制點計算

本研究使用的 UAV 拍攝的航空像片可紀錄拍照點的坐標值，因此未輸入控制點的狀況下，製作出的地表數值模型仍可套疊於大地坐標系統，並仍可判釋地形高低起伏，於製作地表數值模型時，輸入控制點，可使數值地表模型內的誤差降低。量測控制點的誤差來源為自然誤差及人為誤差，坐標計算時，平差的步驟可有效降低誤差的產生，野外施測時將控制點與控制點間的測量都重複兩次，室內計算距離將其平均，可減少人為誤差的產生。

以下舉例台中霧峰鄉光復國中南邊乾溪的數值地表模型製作成果，此模型包含光復國中的部分操場、乾溪南北岸河堤及乾溪河道，本測區飛航高

度的設定為 65 公尺，飛行軌跡分為 8 道，測區內總共拍攝了 46 張航空相片，並製作 4 個地面控制點，UAV 飛行軌跡分布、航空相片拍攝位置與控制點分布皆於圖 41 所示。本測區視野良好，採用三角測量方法量測地面控制點的相對位置，量測的原始資料如(表 2)所示，量測結果經平差計算後，各個控制點與經緯儀擺放位置之間的，方位角、高程差及方位角如(表 3)所示，藉由經由原點及其他控制點之間的關係，算出其他控制點的坐標值(表 4)。

經 Pix4Dmapper pro 軟體解算的乾溪河堤模型，總共匹配出 160226 個點雲，地面取樣距離(GSD)為 3.03 cm/pixel，正射影像結果如(圖 42)所示。關於本研究製作的模型精度，本研究檢視有製作控制點及未製作控制點的地表數值模型，首先量測模型內空標卡長與寬(圖 45)，測量結果如表 5 所示，空標卡實際的長與寬分別為 49.7 公分及 29.8 公分，有加入控制點的模型，空標卡的長與寬量測值與實際標卡相比分別為 0.487 公分及 0.47 公分，未加入控制點的模型，空標卡的長與寬量測值與實際標卡相比分別為 0.445 公分及 0.868 公分。接著，將地表數值模型內的特定標地物與農林航測所於 2011 年的正射影像比較，比較的項目為操場的跑道寬度及遮雨棚邊角的距離(圖 46)，比較的結果如表 6 所示，根據中華民國田徑協會國家級 400 公尺標準跑道劃線規範，PU 跑道標準寬度為 1.22 公尺，跑道間標線寬度為 0.05 公尺，因此 8 跑道的操場跑道寬應為 10.11 公尺，本研究乾溪有控制點與無控制點的 DSM 其跑道測量值為 10.109 公尺及 10.124 公尺，與田徑協會公布的標準值差異量為 0.002 公尺及 0.014 公尺，而光復國中操場上遮雨棚較明顯兩端點間距，本研究製作之有控制點之 DSM、無控制點之 DSM 與農航所正射影像量測之差異量為 0.032 公尺及 0.042 公尺。

接著，本研究利用不同方式量測的乾溪南岸河堤的地形剖面，檢視地表數值模型的相對高程。集集地震後乾溪河堤上產生約 2 公尺的高低差(圖 43)，河堤經修整後至今地表形貌變化不大，因此筆者選擇乾溪南岸河堤的

地形剖面對模型進行檢視，確認航空攝影測量製作出地表數值模型的可靠性。筆者使用經緯儀實際量測資料、空載光達資料，疊合有控制點及無控制點攝影測量資料四到剖面一比較(圖 44)。經緯儀的量測資料、空載光達資料的剖面及有控制點的攝影測量資料 3 筆可近乎完全吻合，在地形面斜度的轉折處，無控制點攝影測量資料的剖面可近乎的吻合其他 3 筆資料，地形面較陡的區段，無控制點攝影測量的資料也吻合其他兩筆資料，但較緩的區段攝影測量資料卻無法與其他兩筆資料貼齊。說明無控制點之攝影資料雖存在誤差，但若用此資料判斷地形線形位置及大概估算地形崖的高度仍是可行的。

有鑑於本研究目的希望的是從地表數值模型判釋出集集地震引致的地形崖，經上述分析，未施打控制點的地表數值模型，仍可達成目的，因此本研究挑選的地點中，豐原第二公墓的地表數值模型有製作地面控制點；大甲溪埤豐橋、豐原中正公園、霧峰興大葡萄園、竹山水底寮等地區地表數值模型並未製作地面控制點。



圖 35 無人飛行載具(Phantom 3)野外操作實況。



圖 36 TCR307 經緯儀在野外使用狀況。

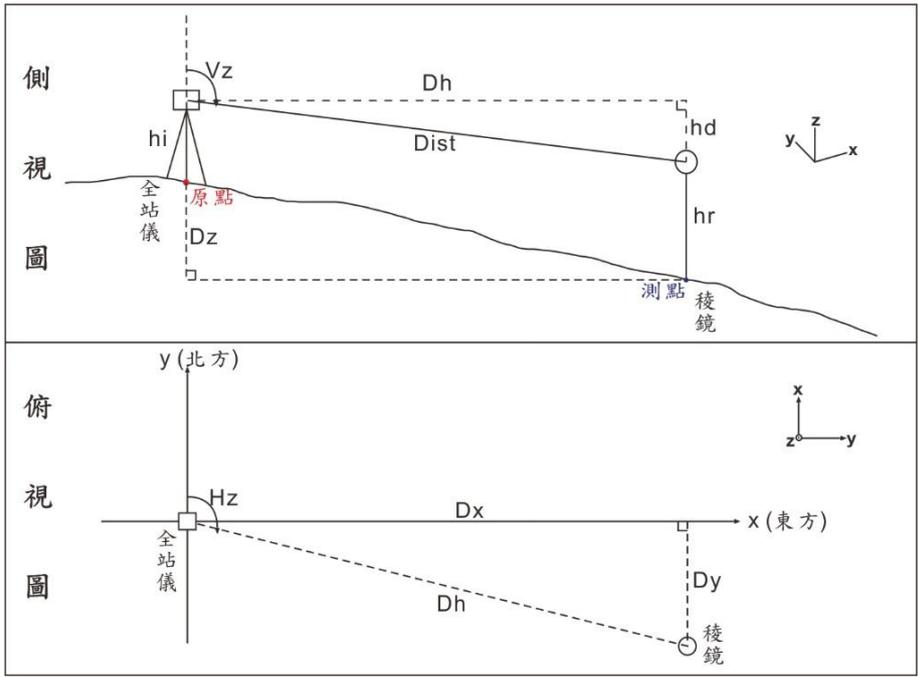


圖 37 經緯儀測量原理示意圖。



圖 38 野外布置控制點情況。若有人為設施邊界(如水溝蓋邊角)可直接使用，若無可用的邊角，則於地面上噴漆示意。

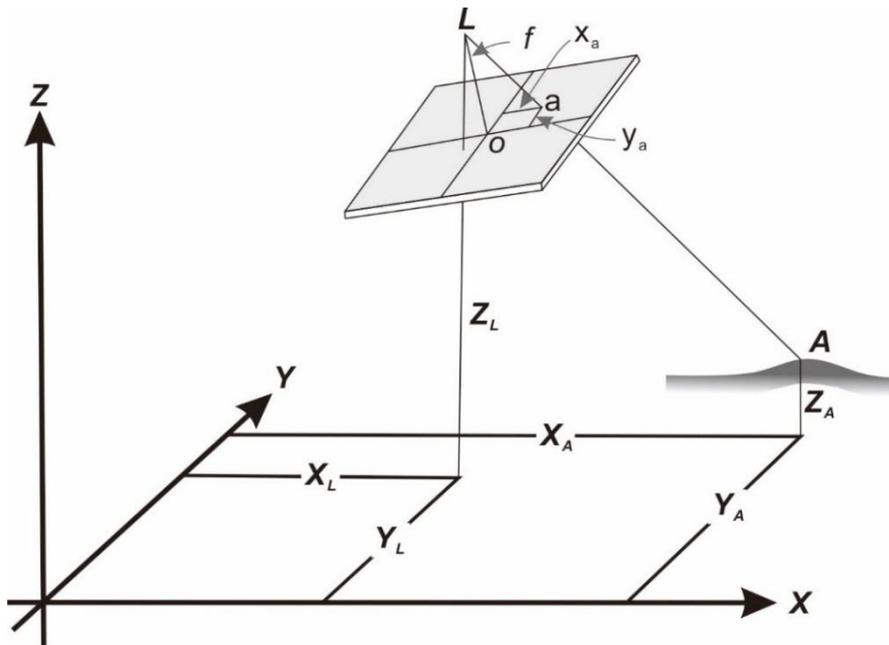


圖 39 焦點、像空間及物空間共線關係示意圖。焦點(L)、像空間的像點(a)及物空間的觀測點(A)三點在同一條直線上。

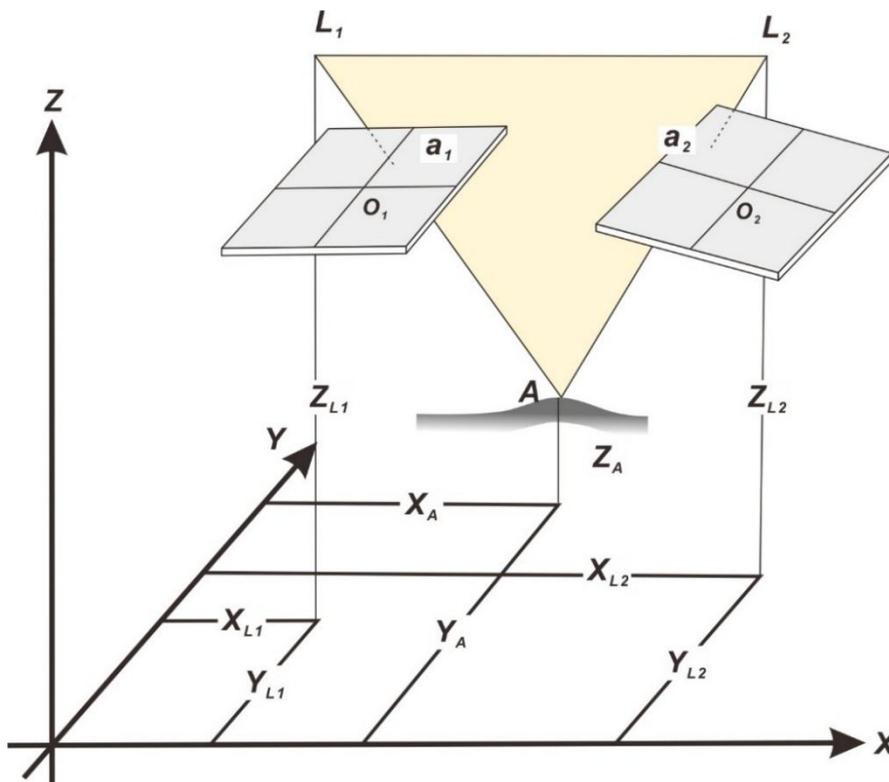


圖 40 共面關係示意圖。兩張相片的焦點(L1, L2)、像空間對應的像點(a1, a2)及物空間的觀測點(A)在同一平面上。



圖 41 UAV 飛航軌跡圖。本模型使用一次飛行航次，航跡有 8 個軌道。



圖 42 乾溪河堤附近正射影像。



圖 43 乾溪南岸河堤。黃色線顯示野外使用經緯儀量測地形剖面的測線。

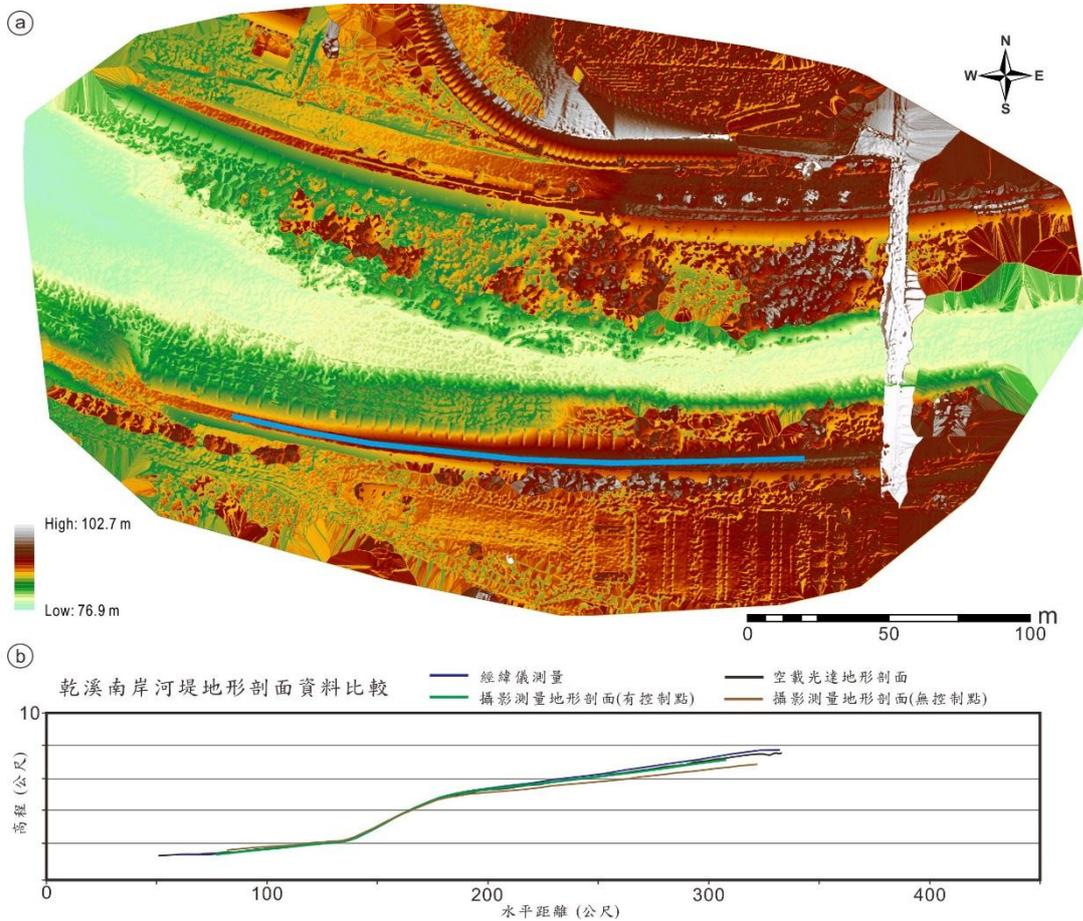


圖 44 航測方法製作的地表數值模型。(a)數值地表模型分層設色圖；(b)不同方法測量乾溪南岸河堤地形剖面比較。a 圖淺藍線為剖面位置。

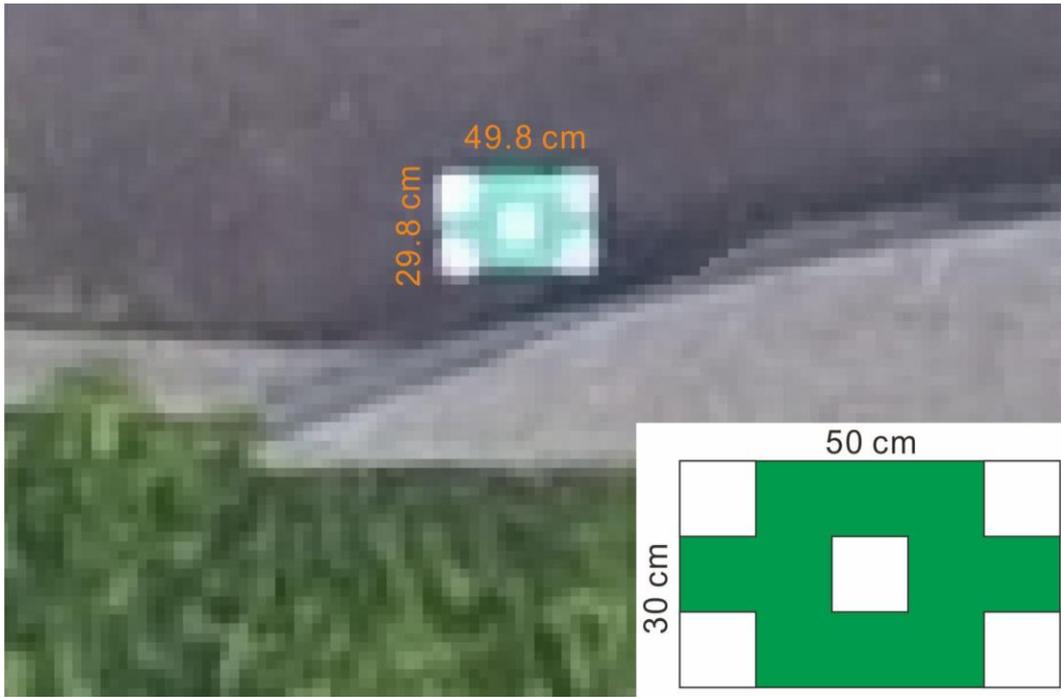


圖 45 空標卡示檢測意圖。本研究設計的空標卡規格為長 50 公分、寬 30 公分；實際空標卡大小為長 49.8 公分、寬 29.8 公分。



圖 46 標地物測量示意圖。本研究比較製作正射影像與農航所正射影像中遮雨棚端點距離與跑道寬。

表 2 霧峰乾溪河堤控制點量測原始資料。控制點編號請參照圖 41。

編號	方位角(°)	俯仰角(°)	直線距離(m)	夾角(°)	水平距離(m)	高程差(m)
1	96.5872	87.0494	81.905	-168.5353	81.7964	3.921
2	288.0519	90.6072	99.173		99.1674	-1.346
2	288.0472	90.6103	99.171	168.5361	99.1654	-1.3513
1	96.5833	87.0672	81.907		81.7997	3.8957
2	288.0511	90.6025	99.163	-102.8411	99.1575	-1.3377
3	185.21	88.3889	91.411		91.3749	2.2751
3	185.1358	88.4	91.41	102.9061	91.3744	2.2573
2	288.0419	90.6081	99.164		99.1584	-1.3474
3	185.2192	88.4033	91.39	-88.6436	91.3545	2.2514
2	96.5756	87.0611	81.904		81.7963	3.9043
2	96.5525	87.0456	81.903	88.6372	81.7941	3.9264
3	185.1897	88.3922	91.399		91.363	2.2694

表 3 霧峰乾溪河堤測量資料平差後的結果。

編號	水平距離(m)	高程差(m)	方位角(°)	夾角(°)
0	0	0		
1	81.7966	3.912		96.587
2	99.1622	-1.346	185.207	168.526
3	91.3667	2.264	287.747	102.854
1				88.62

表 4 霧峰乾溪河堤控制點坐標計算結果。

編號	X 坐標	Y 坐標	Z 坐標
0	219406	2659645	78.1
1	219487.764	2659647.320	82.012
2	219308.299	2659661.962	76.754
3	219410.790	2659553.759	80.364

表 5 空標卡測量結果比較表。

測量項目	無控制點 DSM	有控制點 DSM	實際長度
空標卡(長)	0.4921	0.5015	0.497
空標卡(寬)	0.3027	0.3067	0.298

單位:公尺

表 6 標地物測量結果比較表。

測量項目	無控制點 DSM	有控制點 DSM	農航所正射 影像
雨棚端點間距	25.905	25.895	25.863
操場跑道寬	10.124	10.109	10.054

單位:公尺

5-2-3 空載光達(LiDAR)資料

前一小節敘述無人飛行載具搭配航空測量的技術製作地表數值模型雖然可製作高解析度地表數值模型，但測區若太多遮蔽物，也無法得知真實的地表形貌，光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一種主動式測量距離方式，不需在測區擺設接收儀器，是利用雷射進行遠距掃描的技術，可短時間取得高精度、高解析度的三維空間資料(侯進雄 等，2014)(圖 47)，空載光達量測精度可達到 15 公分，空載光達受天氣影響較小，雷射光可穿透霧、霾等較薄的雲層，且夜間仍可進行量測，且雷射可穿透植被樹葉之間的空隙，能解決植被茂密而測不到真實地表面的問題。利用空載光達製作地表數值模型的步驟如(圖 48)所示，分別為：(1)掃描空間、航線規劃。(2)地面 GPS 基地站測量。(3)雷射掃描資料獲取。(4)點雲資料處理。(5)人工編修。(6)生成數值地表模型及數值高程模型。(7)正射影像製作。

本研究使用一米網格空載光達數值地形資料，此資料是由經濟部中央地質調查所提供使用，資料製做年份為 2012 年。一米網格的意義為，資料處理時一米取樣一點進行解算，將一米網格空載光達資料及 5 米網格的地表數值模型，同時製做成地形陰影圖一起比較(圖 49)，可觀察到一米網格空載光達資料作出的地形陰影圖，可看出較為清晰地形邊界，且有比較多的細節。

本研究利用一米網格空載光達資料製作出的地形數值模型(DEM)，製作了分層設色圖、地形陰影圖等，並繪製與集集地震地表破裂跡走向垂直的地形剖面，疊合集集地震剛發生時的剖面資料，進行進一步的探討。

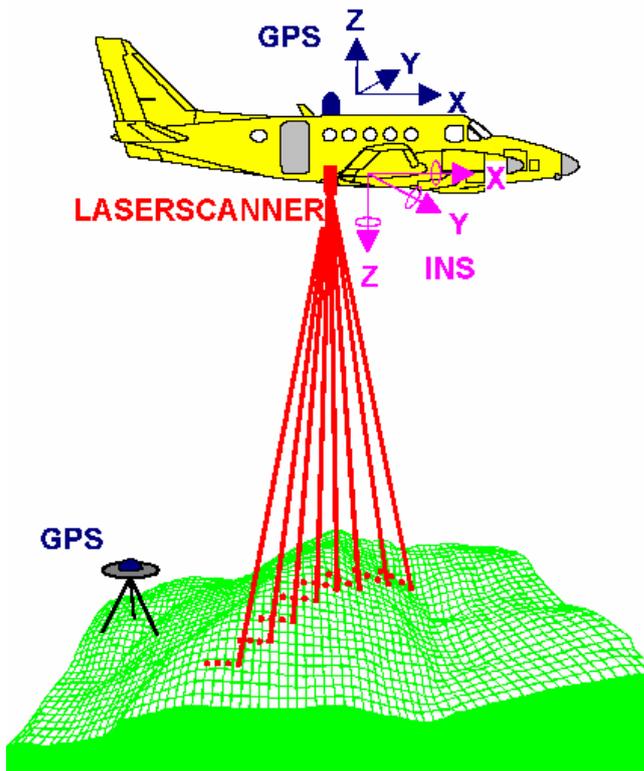


圖 47 空載光達野外施測作業示意圖。空載光達施測是將雷射感應原件置於飛機上掃描整個地面(引自 史天元，2004)。

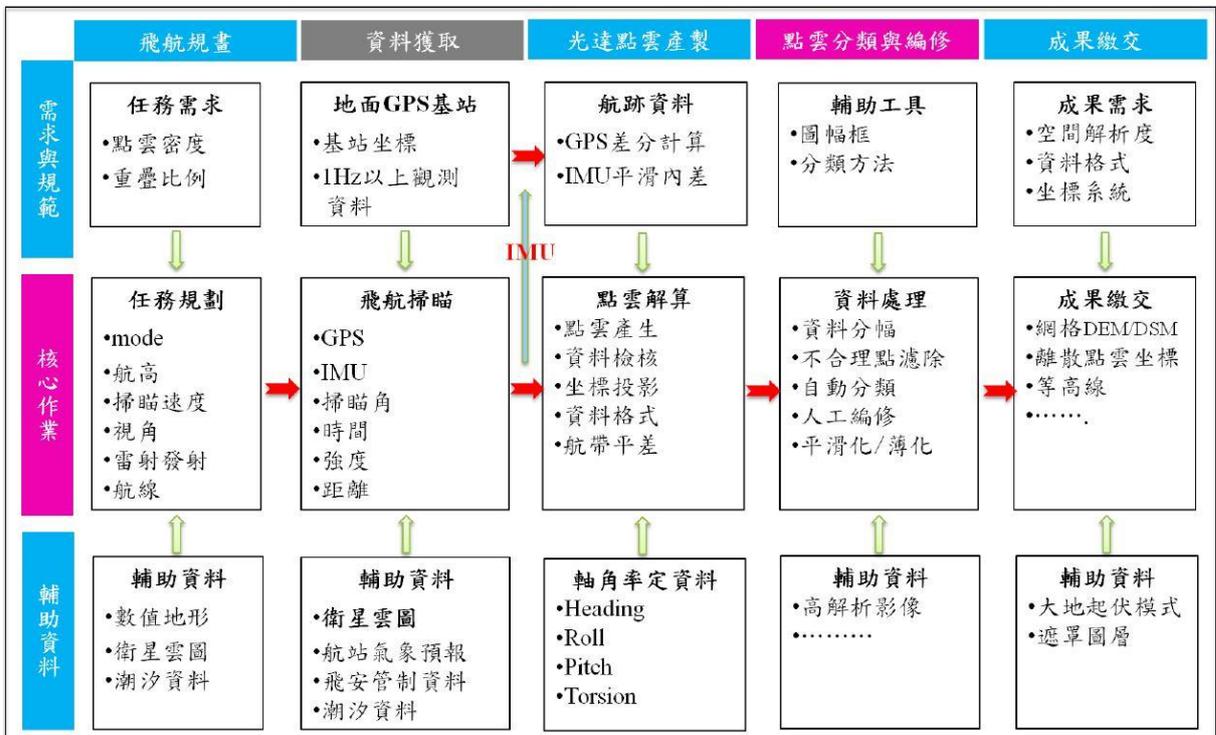


圖 48 空載光達作業流程圖 (引自 侯文雄 等，2014)。

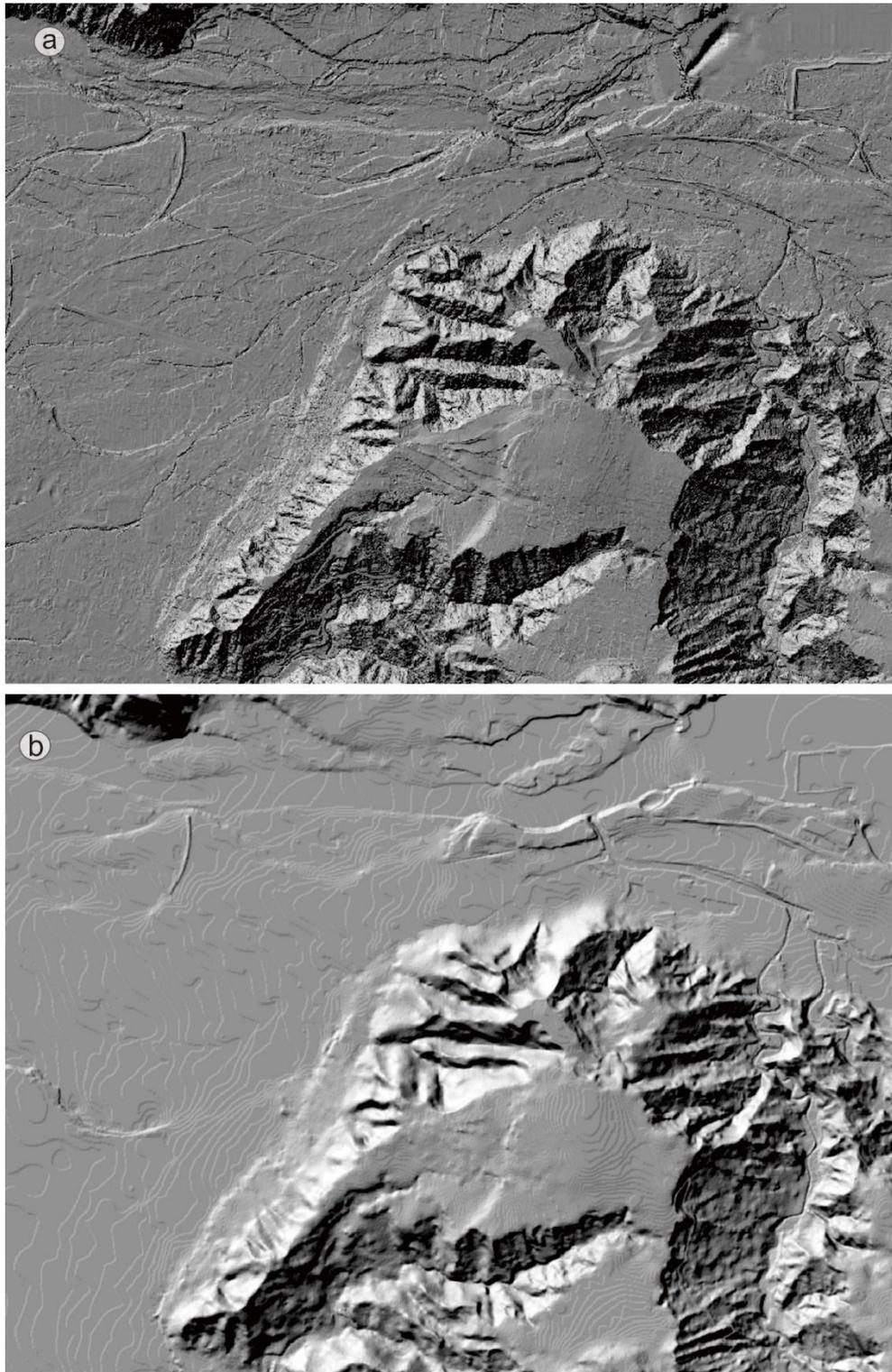


圖 49 豐原地區 1 米及 5 米網格數值地形模型陰影圖。(a) 1 米網格光達製作的地形陰影圖與(地調所提供)；(b) 5 米網格地形數值模型製成的陰影圖。1 米網格資料可觀察到更多細節。

第六章 研究結果

6-1 集集地震引致地形崖 17 年前後變化

本研究紀錄並整理集集地震地表破裂跡沿線現今地形崖的樣貌，並與前人在地震剛發生後量測的資料及拍攝的相片進行比對。筆者依據調查點地理位置將地形崖分成河道及非河道兩大類，非河道的例子又依土地利用性質細分成 4 類，分別為房屋建造區、平地農田、平坦野地類及既存坡地，以下先概略性的描述各種類集集地震地表破裂跡沿線調查結果。

- 河道：

集集地震地表破裂跡幾乎經過豐原至竹山鎮之間所有東西向河流，本研究調查的溪流包含：大甲溪、大里溪、部子坑溪、頭汴坑溪、草湖溪、北溝溪、乾溪、烏溪、樟平溪及濁水溪，以上提及溪流的河床於集集地震當時，皆形成 1 公尺以上的地形崖。然而現今上述列舉的河床集集地震發生而引致的地形崖皆已被河水侵蝕，都看不到當初集集地震時引致的地形崖。

- 房屋建造區：

房屋建造區包含所有的房屋及其附近的道路，地震剛發生時，地表面產生劇烈的變形，地表面明顯隆起，許多建造在集集地震地表破裂跡附近的建築倒塌或傾斜，道路也因此變形或斷裂。現今房屋建造區，路面上可看出地表隆起，高差不變崖坡斜度變緩，房屋建造區的地形崖被剷除或整修，很難追蹤到連續的地形線形。

- 平地農田類：

集集地震時在許多農田產生地表破裂，並使地表抬升約 1~5 公尺，現今的野外調查結果，可將農田中集集地震時引致的地形崖在這 17 年間的變化，歸納出兩種現象，第一：地形崖被修整成階梯狀；第二：農田內的地形崖完全被抹平，看不出地表面曾經隆起。

- 平坦野地類：

平坦地面類是指地震引致地形崖的地方，沒有建築物、道路通過，也沒有農物在進行，換而言之，此種類的區域較不受人類活動影響，霧峰車平營電塔前的空地、一江橋西南側太堤西路等都屬於此例。現今，集集地震時引致的地形崖位置仍可看出高程差，地形崖坡度變緩，坡角與坡頂的距離拉長。

- 既存坡地類：

此類例子是指集集地震產生的地表破裂跡或地形崖，從地震前就已存在的坡地坡角或坡地中央切過，集集地震地表破裂跡沿線草屯第二公墓、豐原第二公墓、台中大坑地震公園(地震前為北屯軍功國小)、及南投中興新村的長春公園都屬於此類的實例。現今，集集地震時引致的地形崖與地震前既存的斜坡地幾乎無法分辨。

以下的小節將從上述的類別中，各挑選 1 至 2 個例子，詳細描述集集地震時引致的地形線形延伸性。本研究共挑選了 6 個地點，河道的例子為大甲溪埤豐橋至石岡壩之間的河床，非河道的例子為：房屋建造區實例豐原中正公園、既存斜坡實例豐原第二公墓、平坦農田實例霧峰興大葡萄園及竹山水底寮地區、平坦野地實例霧峰車平營電塔。這 6 個地點地震剛生時的資料比較完整，現今的可蒐集到的照片也比較多，且可找到 17 年前後明顯可對照的建築物，因此從這 6 個地點著手詳細追蹤，以下小節敘述這 6 個地點的現今地形崖樣貌。

6-1-1 豐原-大甲溪埤豐橋

大甲溪埤豐橋位於台中豐原區與東勢區的交界，集集地震地表破裂跡切過大甲溪石岡壩，斷層往西北切經過大甲溪北岸的農田，斷層在農田中轉成西南走向，從埤豐橋下切過大甲溪河床，往南至豐原區，地震剛發生之後，石岡壩附近造成約 10 公尺的地形崖，大甲溪北岸的菜園及大甲溪河床上形成高差 4~5 公尺的地形崖(陳文政 等，1999)，河床內形成瀑布，地形崖線跡可連續追蹤。

本研究調查的範圍為大甲溪河道及大甲溪北岸的菜園，如今大甲溪北岸的農田，仍可追蹤到集集地震引致的地形崖，地形崖陡坡段堆疊礫石牆保護(圖 53)。大甲溪埤豐橋下的河床的地形崖已被河水侵蝕，北岸河床岩層出露處地形崖前緣現今高度約 2.5 公尺(圖 54)，明顯比集集地震剛發生後的地形崖還低，(圖 57)為利用航空攝影測量計算的地表數值模型，本模型未製作地面控制點。模型中河岸北側菜園中地形線形與集集地震剛發生後地表破裂跡位置吻合，河床中，集集地震剛發生後瀑布的位置找不到地形線形。地形崖崖腳的位置像石岡壩的方向倒退了約 90 公尺(圖 58)，靠近南岸的河床為現今主河道的位置，原地表破裂跡的位置斷層引致的地形崖已消失，石岡壩至埤豐橋之間沖蝕出一條水流(圖 55)，大甲溪埤豐橋南岸的道路面，仍可看見路面隆起(圖 56)。

由徐婉容製作各年正射影像圖(圖 23)及 2016 年的空照(圖 86)比對，大甲溪河床地形崖 1999 年至 2005 年退後 30 公尺。2005 年至 2008 年河床南側沖蝕出一條河道，河道內地形崖完全消失；河床內地形崖退後 90 公尺。2008 年至 2016 年，河床上的地形崖無明顯退後，河道在這 8 年間持續增寬。



圖 50 大甲溪河床 17 年前後空照圖。a 圖及 b 圖分別為 1999 年及 2016 年的照片，紅色線表示地形崖的崖腳位置，問號代表地形崖已消失，藍色箭頭為 17 年前後相同的點，以下圖片皆以此原則表示。(a)集集地震大甲溪北側農田及大甲溪河床產生連續的地形崖(連永旺 攝，1999)；(b)現今河床上的瀑布已消失，地形崖明顯後退，河水集中於河道南邊。



圖 51 大甲溪埤豐橋下河床同視角 17 年前後比較圖。(a)集集地震於大甲溪埤豐橋下的河床形成高差約 5 公尺的連續地形崖(黃文正 攝)；(b)現今已不見地形崖已後退，同一視角無法連續追蹤到地形崖。



圖 52 埤豐橋河床斜看視野 17 年前後比較圖。(a)地震剛發生後橋體斷裂，河床上產生連續的地形崖，形成瀑布(連永旺 攝，1999)；(b)現今橋面修復，河床的瀑布已消失，地形崖明顯後退。



圖 53 大甲溪北岸菜園地形崖。菜園內仍可看見地表面隆起約 4 公尺的地形崖，斜坡面以礫石保護。



圖 54 埤豐橋東側下方的地形崖。地形崖高度約 2.5 公尺，明顯比集集地震剛發生後低。



圖 55 石岡壩前緣大甲溪河床空照圖。石岡壩前沖蝕出一條河道(黃色箭頭處)。



圖 56 大甲溪埤豐橋南側路面照。路面可發現隆起狀。

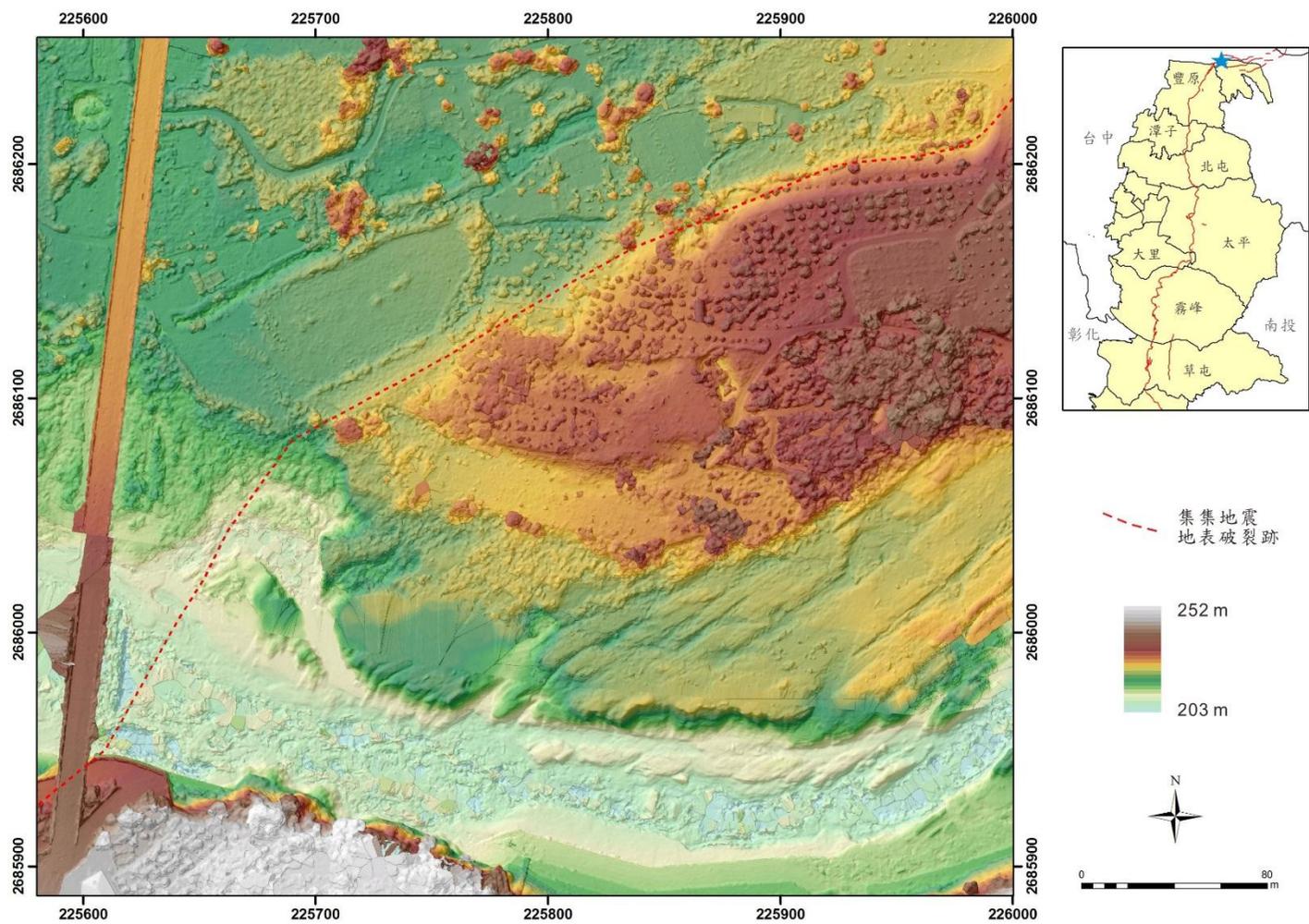


圖 57 大甲溪埤豐橋附近利用攝影測量製成的地表數值模型。

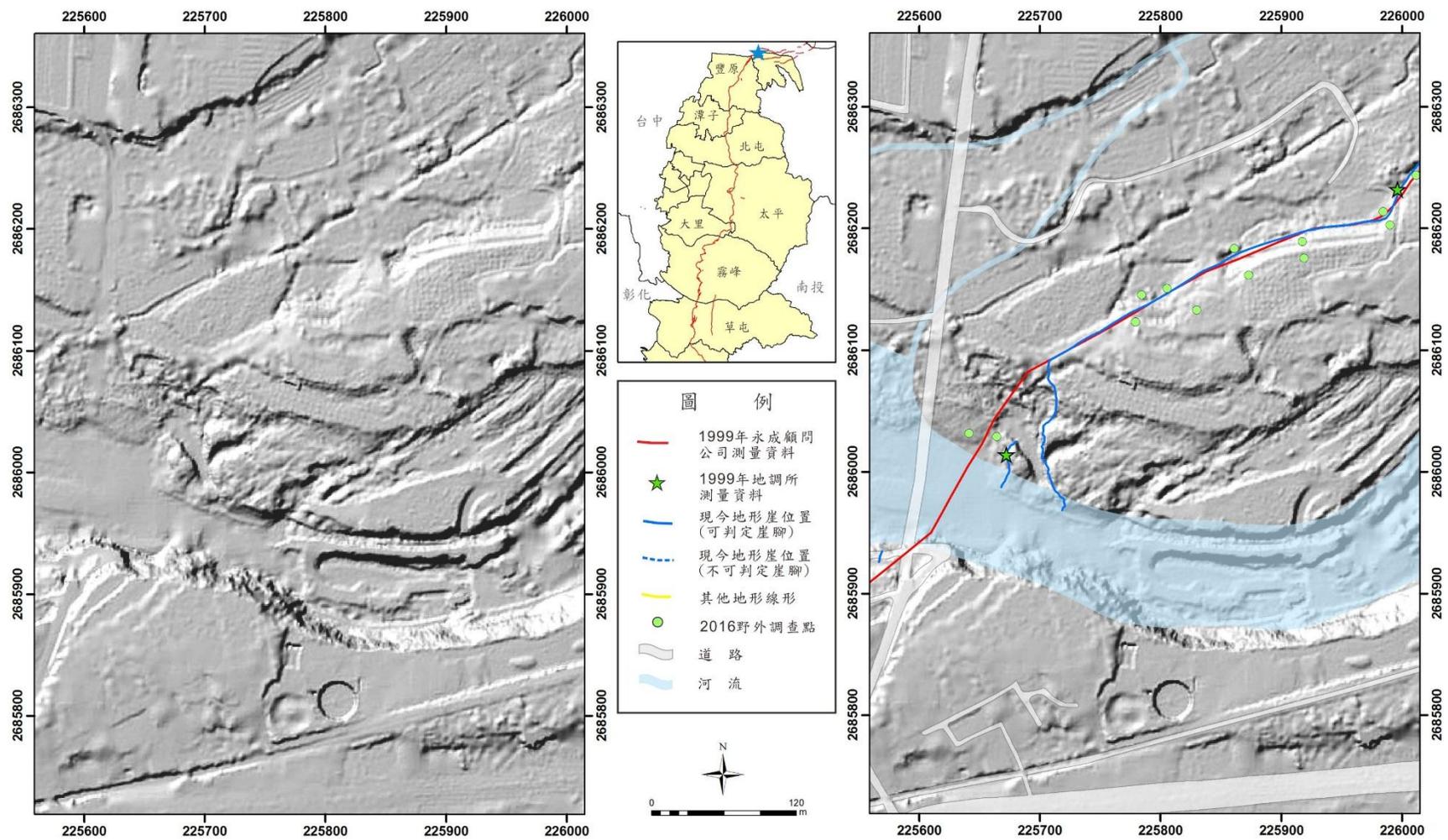


圖 58 大甲溪河床集集地時層引致地形崖位置變化圖(底圖由地調所提供)。

6-1-2 豐原-國家教育院至豐原第二公墓

本區研究調查的範圍包含國家教育研究院西側的農田至豐原第二公墓，(圖 59 及圖 60)為國家教育院及豐原第二公墓地震剛發生後與現今 17 年前後空照對比，集集地震地表破裂跡從國家教育研究院西側的農田切過，斷層沿著田間小路往西南方沿伸切穿過豐原第二公墓，根據《九二一地震地質調查報告》的敘述，國家教育研究院旁農田的地表面抬升約 3.5 公尺，地形崖的線形十分明顯，地表抬升側還可發現張裂隙，豐原第二公墓的地面，地震前就是個斜坡地，集集地震地表破裂跡切穿公墓的中央，在坡地面上形成地表破裂，地表抬升約 4 公尺。

2016 年 9 月前，國家教育研究院的農田已變成了草地(圖 61)，地面已無法見到因集集地震發生造成單斜狀的地表隆起，原地表隆起側已被修整平坦，單斜狀的隆起已然消失，(圖 59)17 年前後空照比對可看出農田裡地震發生後地表隆起的位置，變得十分平坦。豐原第二公墓現今雜草叢生，從空照不易察覺集集地震時引致的地形線形(圖 60)，然而，從公墓前的小徑往東側看仍可追跡到連續的地形線形(圖 62)。此調查區使用攝影測量製作的地表數值模型有製作地面控制點，從地表數值模型中仍可明顯看出集集地震引致的地形崖線形(圖 64)。2016 年 11 月中旬過後，此公墓進行遷葬作業，原先的墳墓已遷移，坡地現今正在進行工程(圖 63)。

從此例子可知，農田內地震時引致的地形崖，可完全被整平。而斜坡面中央地震時引致的地表隆起，未經人為翻修前，地形崖的位置沒有改變。



圖 59 國家教育研究院西側農田 17 年前後空照比較圖。黃線表示地震前就存在的地形線形。(a) 集集地震於國家教育研究院西側農田產生明顯的地形崖(連永旺 攝，1999)；(b) 現今地形隆起處長滿雜草、植被。



圖 60 豐原第二公墓空照 17 年前後對比圖。(a) 集集地震地形崖切穿過公墓(連永旺 攝，1999)；(b)空照不容易看出公墓中央有一階地形線形。



圖 61 國家教育研究院西側農田 17 年前後比較圖。(a)集集地震造成農田隆起，地形崖前緣幾乎沿著小徑的邊緣(黃文正 攝)；(b)農田已無農作耕種，地形崖已被整平，植被茂密，地形崖已剷除。



圖 62 豐原第二公墓 17 年前後直視角比較圖。(a)地震後可明顯看出公墓斜坡中央凸起一階地形崖(地調所，1999)；(b)現今在坡腳地位置往斜坡面看仍可發現公墓中間明顯有一階地形崖。



圖 63 豐原第二公墓 2016 年 11 月中旬後的樣貌。

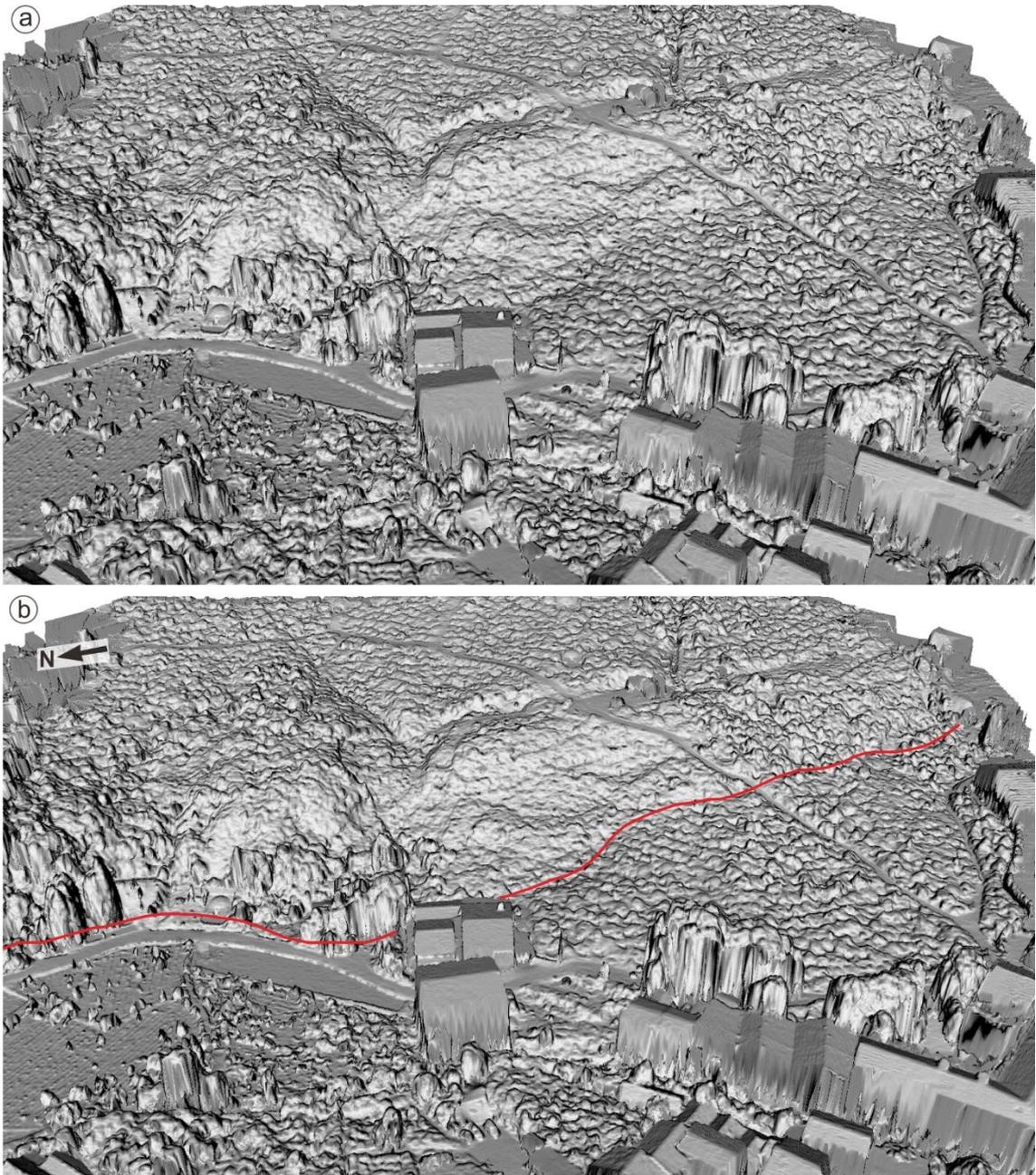


圖 64 國家教育院至豐原第二公墓地表數值模型（製作時間:2016 年 5 月）。(a) 地表數值模型原始資料；(b)紅線標示集集地震時引致地形崖的位置。

6-1-3 豐原-中正公園

豐原中正公園位於水源路旁，本研究調查範圍包含豐原中正公園及公園南側水源巷的住宅，(圖 65 及圖 66)為中正公園及水源路巷子地震剛發生時與現今的空照圖對比，集集地震地表破裂跡水源路 2 巷延伸至豐原獅子會建築前緣，再經過水源路切穿旱溪，經過水源路 7 巷，沿著水源路 5 巷一路向南延伸，沿線皆可觀察到明顯的地形崖，地形崖線形可連續追蹤約 350 公尺，水源路的路面當時抬升約 4 公尺(Lee et al., 2000)。

現今，水源路 2 巷及水源路的交叉口，柏油路面仍可看出地震時造成的高程差，然而，路面與地震剛發生時相比，已變得平滑許多，然而，地面高度差仍於地震剛發時相同(圖 70)，道路交叉處地震當時產生的地形崖已被剷除，原地傾斜房屋拆除並在原地重建(圖 67)，水源路 5 巷與 7 巷的交叉口處，原地形隆起的位置，現今已剷除且建造新房屋(圖 68)，水源路 5 巷原本因地形隆起而傾斜的房屋，有的已扶正，有的則是拆除，當時隆起的路面也已經被抹平，看不出路面隆起(圖 69)。因此，在這南北約 300 公尺的範圍內，集集地震後皆被修整過，地形線形變得斷斷續續的(圖 71)。

由中正公園及水源路巷子的例子可得知，在房屋建造區內，地震過後人類對於地表隆起的處理方式有以下幾種，第一：將地形隆起嚴重變形部分剷除，房屋於地形崖舊址處直接重建；第二：將地形崖稍為修整，以圍牆隔開地形高度差的位置，房屋在地形崖前緣重建；第三：房屋不重建，原址另做其他用途。道路面上地震時地表變形較劇烈有形成單斜狀的區段，現今也已整修較為平緩，大部分的路面都還可見到地表隆起，雖地形崖變的較緩，但地表高度差仍與地震引致的地形崖高度差相同，少部分地區則修整至看不出曾經地表隆起。



圖 65 中正公園及水源路附近住宅區 17 年前後比較圖。(a)地震發生後，路面明顯隆起，地形崖可連續的追跡(連永旺 攝，1999)；(b)現今附近民宅皆已重建，在野外無法追蹤到連續的地形線形。

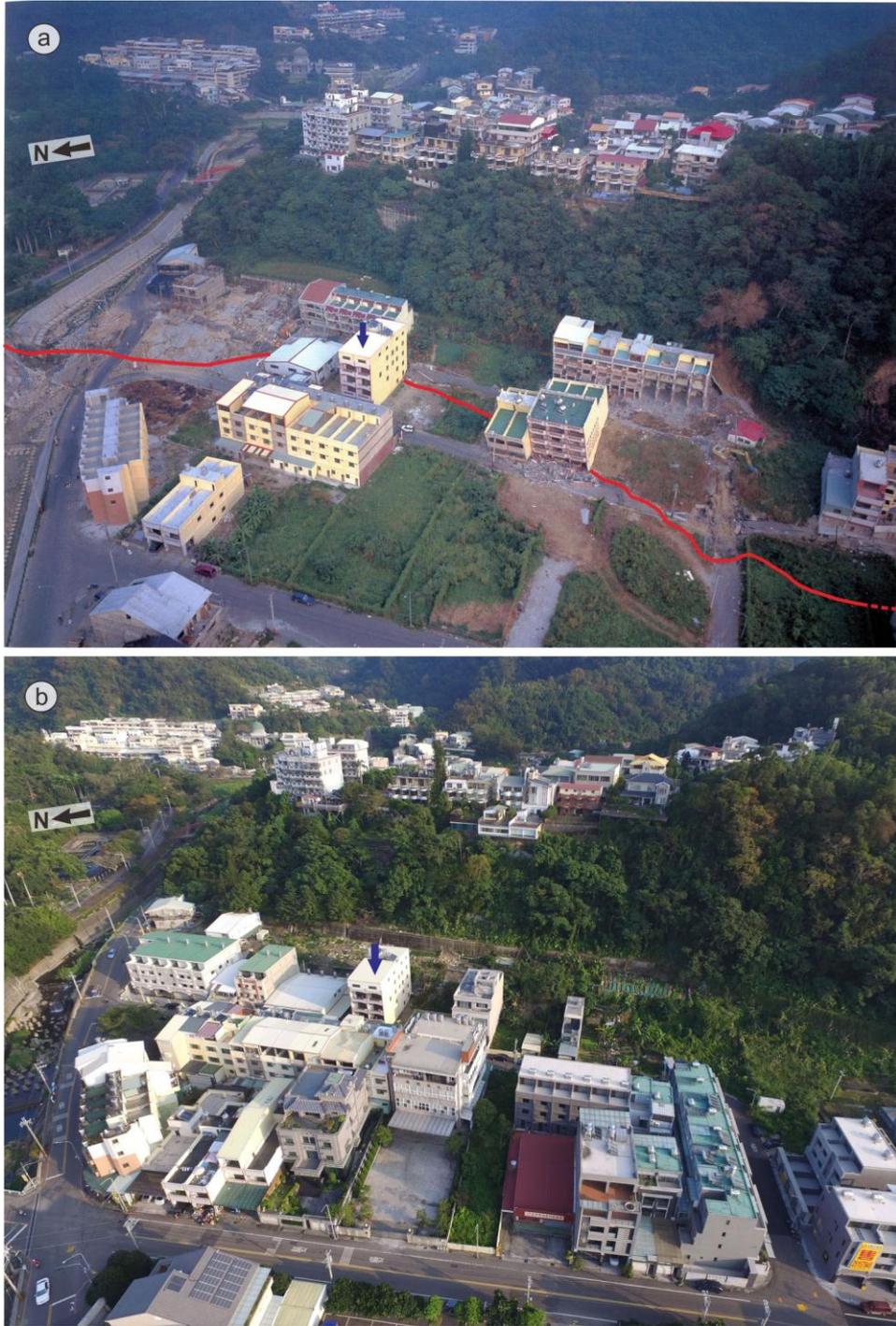


圖 66 水源路巷弄住宅區 17 年前後空照比較圖。(a)地震剛發生後，可追蹤到連續的地形崖，許多建築傾斜、倒塌(連永旺 攝，1999)；(b)現今此區建築物比地震發生時多，已無法追蹤集集地震時引致地形崖。



圖 67 中正公園旁水源路 17 年前後比較圖。(a)地震剛發生後，水源路地面隆起，房屋明顯傾斜(黃文正 攝)。(b)現今水源路地面的高程差仍存在，路面坡度變緩，一旁的建築重新整修。



圖 68 水源路 7 巷地形崖 17 年前後比較圖。(a) 早溪南側的路面可以連續追跡地形崖(黃文正 攝) (b) 水源路 7 巷還可看見地形高程差，更南側地形崖崖腳被切除，蓋上新房子。



圖 69 水源路 5 巷 17 年前後比較圖。(a)集集地震剛發生後水源路巷子可觀察到地表面隆起(黃文正 攝)；(b)現今巷子路面變得平坦，集集地震時地面隆起處被整平。

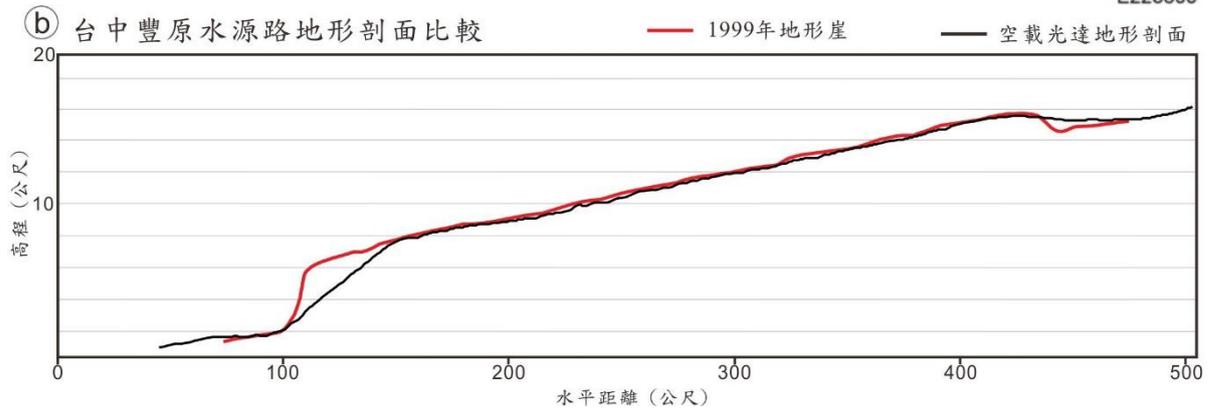
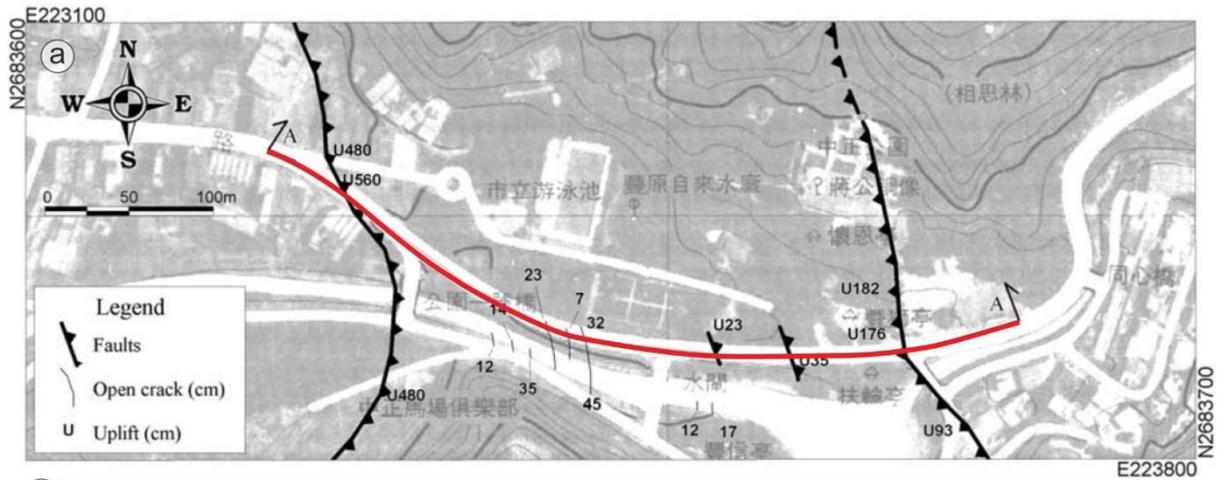


圖 70 水源路面地形剖面比較圖。(a)紅線位置指示剖面的位置 (改自 Lee et al., 2001); (b)現今路面的坡度相較於地震剛發生時變緩，路面高度差仍沒有改變。

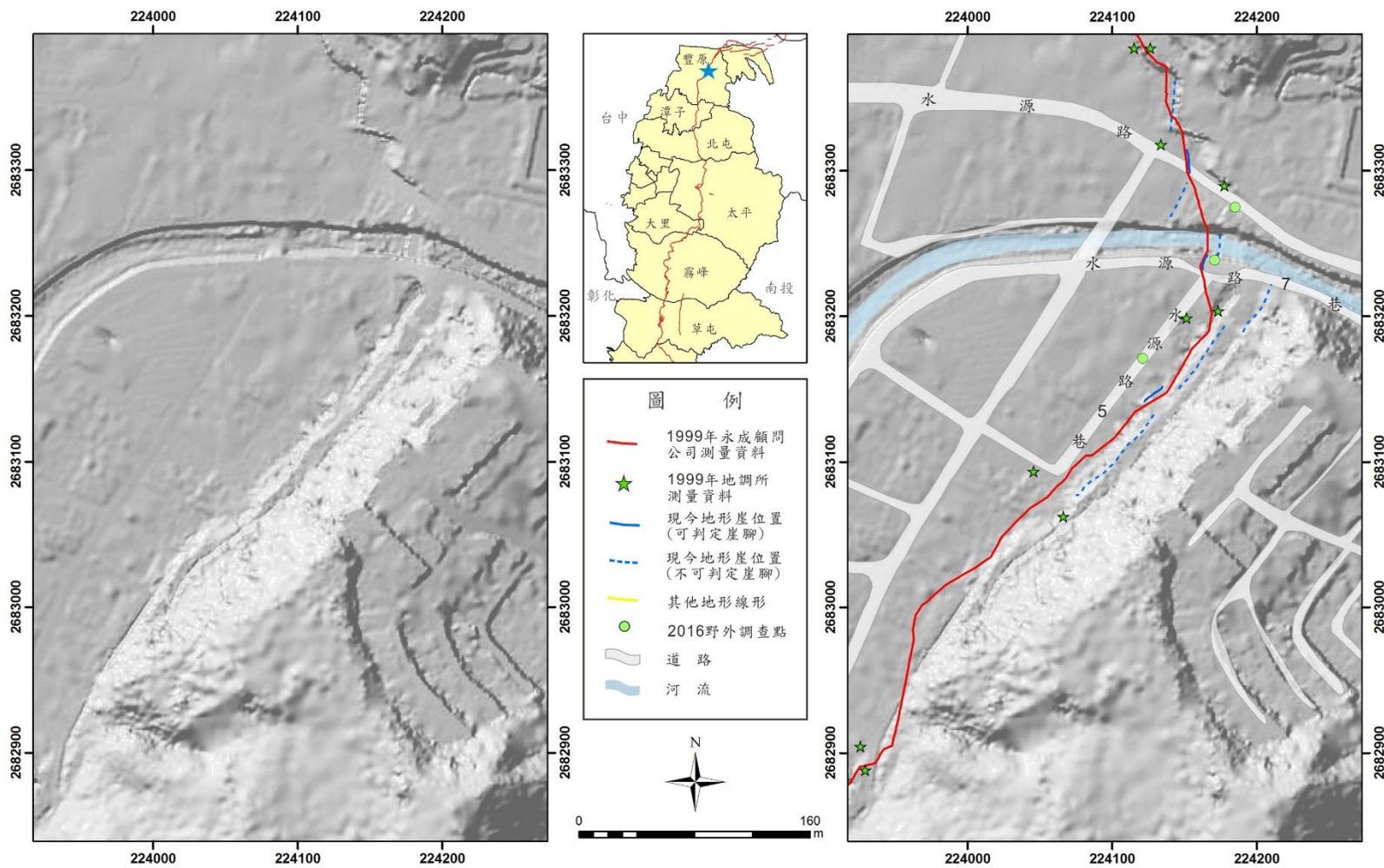


圖 71 台中豐原中正公園地形崖崖腳位置變化圖(底圖由地調所提供)。

6-1-4 霧峰-興大葡萄園

興大葡萄園位於霧峰鄉民生路，園區內於集集地震時，產生可連續追蹤的地形崖，地表隆起約 2.2 公尺(Kelson et al., 2001)，地形線形從興大葡萄園園區北邊的北溝公園以東南向切入園區內，切過民生路，地形崖在民生路轉為西南延伸切入園區，繞過園區西南方的三久工廠，在切出園區外，園區內可追跡明顯且連續的地表隆起，地形崖延伸的長度約 350 公尺。

地震過後至今 17 年間，園區內集集地震時引致的地形崖約 50% 區段修平，另外一半地形崖被保留下來，沒有特別修復，因此園區內仍可追跡到連續的地形線形，(圖 72)為葡萄園園區集集地震剛發生後及現今的空照對比，地震發生後 17 年，紅色線處集集地震引致的地形崖仍在原地，地形線形十分明顯，民生路北側農田及三久工廠旁得農作區因整過地，地形崖變得高差變得較低，地形崖與地震剛發生時相比較為不明顯(圖 74)，空照難已辨識地形崖的位置。(圖 75)本測區的地表數值模型中，可看見葡萄園園區內可看見明顯的地形線形，且與地震剛發生後的測量資料大致吻合。本研究繪製未整修及整修過的地形崖剖面各一條，(圖 76)地震剛發生後剖面資料取自(Kelson et al., 2001)，現今地形剖面圖取自 1 米網格光達資料，A 剖面位置集集地震過後至今未特別整頓，現今地形崖形貌與地震剛發生後的形貌相比沒有太大的變化；B 剖面位置地震後有整地過，地形崖高度變低約 0.7~1 公尺。

興大葡萄園北方的北溝公園，集集地震時引致的地形崖已被剷平(圖 78)，葡萄園南方：民生路 364 巷的路面可尋找到集集地震時地表隆起 (圖 79)。

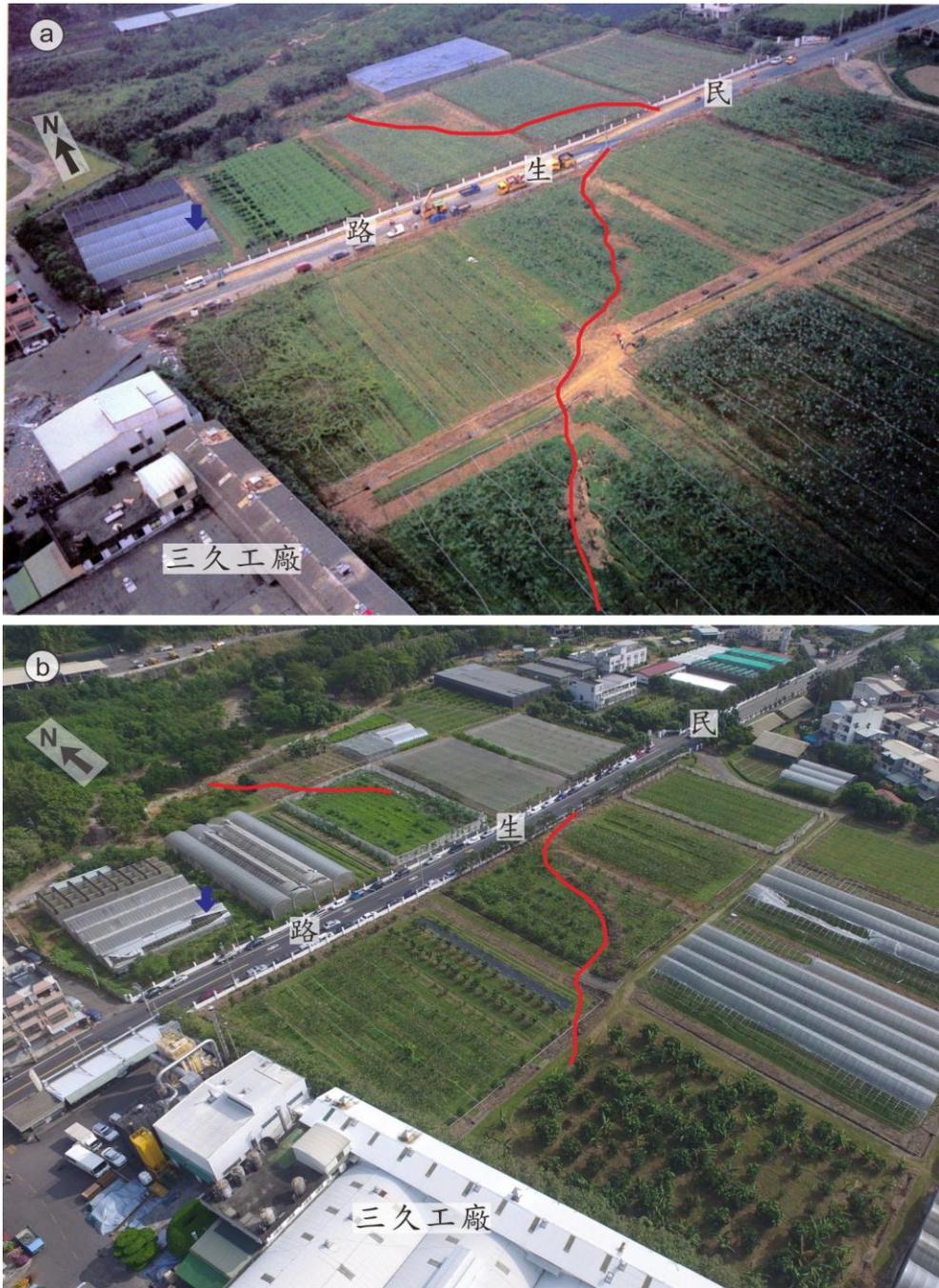


圖 72 霧峰興大葡萄園空照比較圖。(a) 1999 年葡萄園內可追蹤到連續的地形崖(連永旺 攝, 1999); (b) 2016 年興大葡萄園內部分區段仍可追蹤到明顯且連續的地形崖。

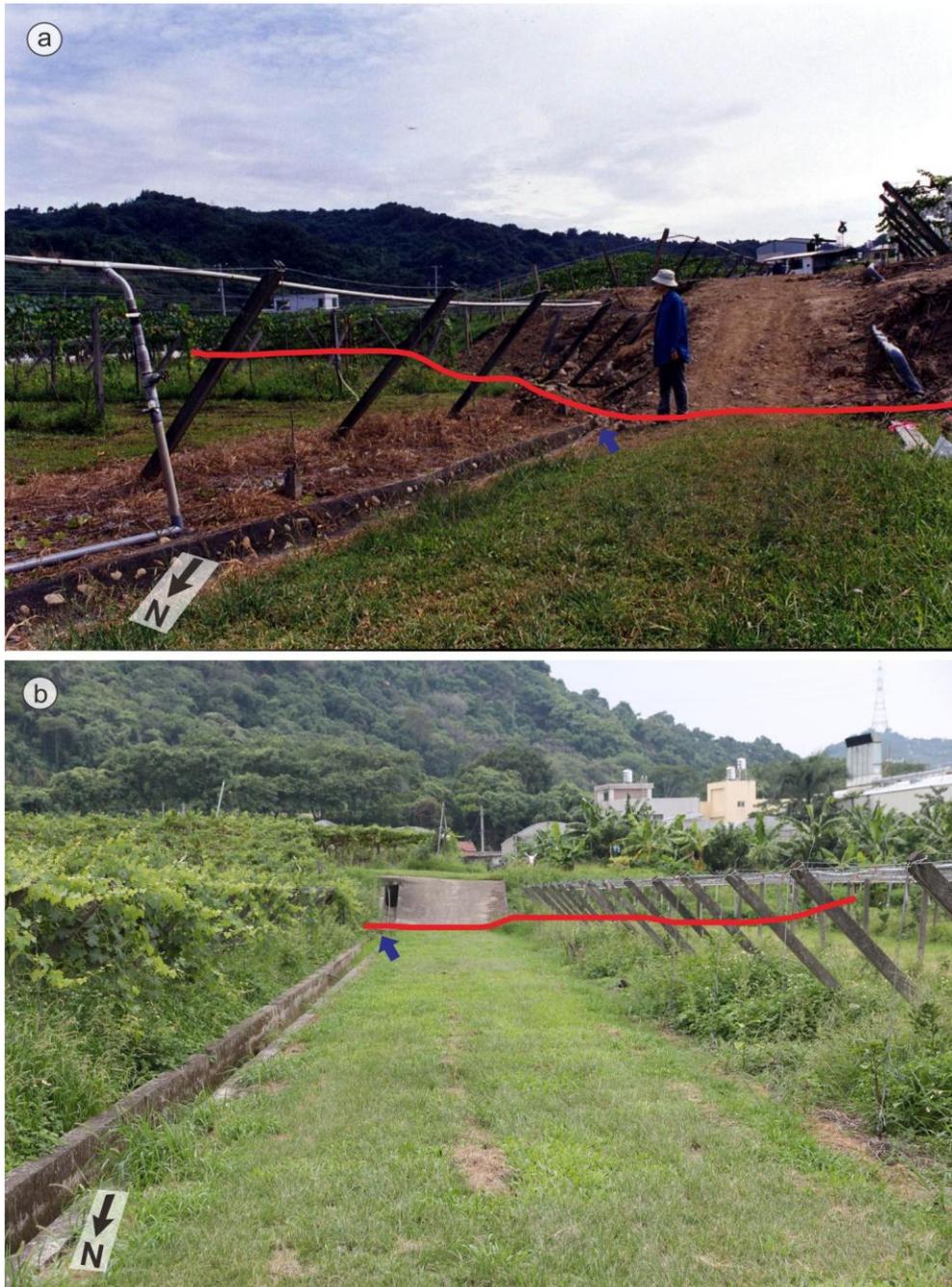


圖 73 興大葡萄園園區小徑 17 年前後比較圖。(a)園區小徑的地表面於地震發生時隆起約 2.2 公尺(黃文正 攝)；(b)園區小徑只有蓋一塊水泥地磚，並沒有將地形崖整平。



圖 74 園區內三久工廠旁 17 年前後比較圖。(a)集集地震時，三久工廠旁的地表面隆起 2.5 公尺(黃文正 攝)；(b)工廠旁的地面稍微修被修平，地面仍可看出高度差。

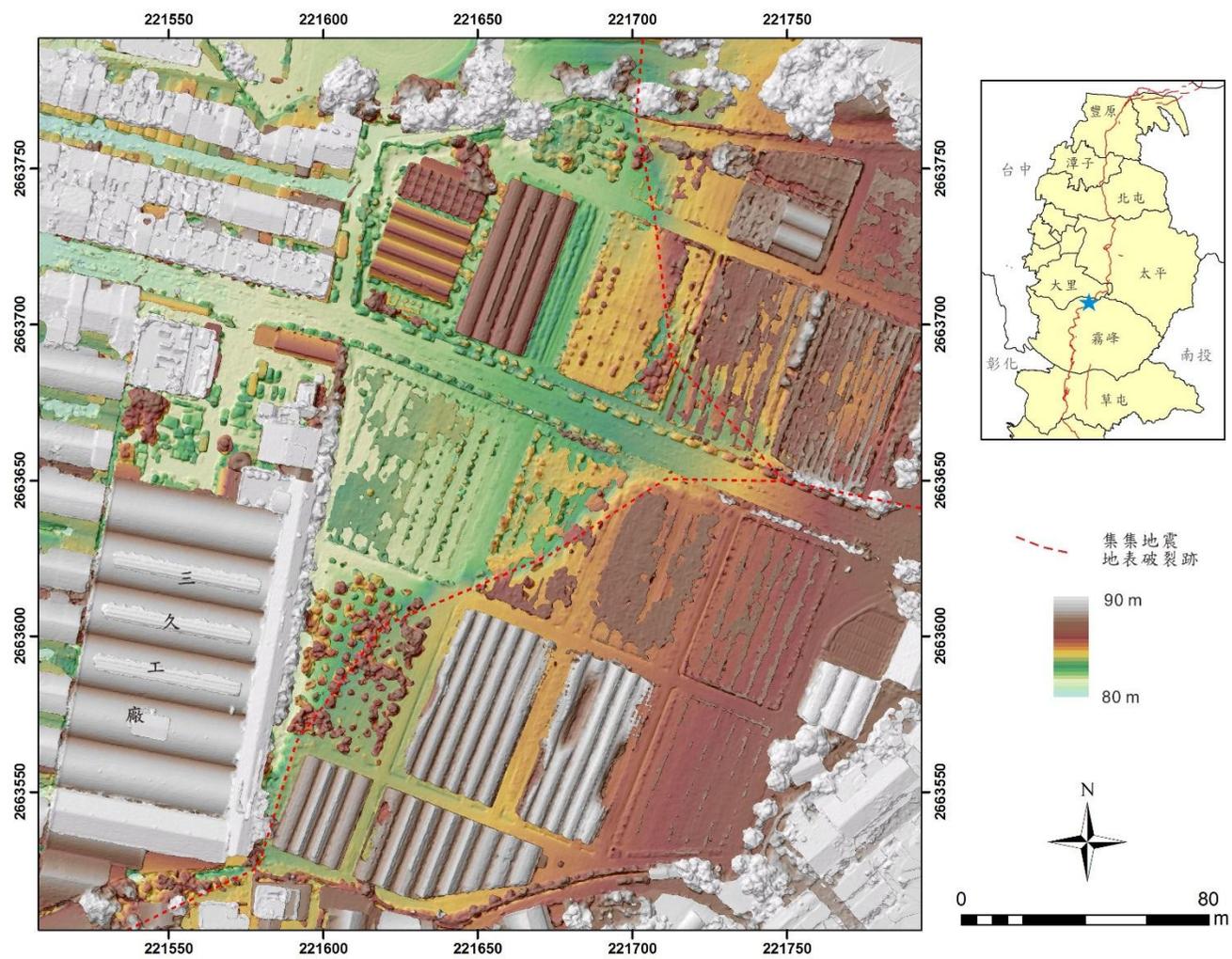


圖 75 興大葡萄園地表數值模型。

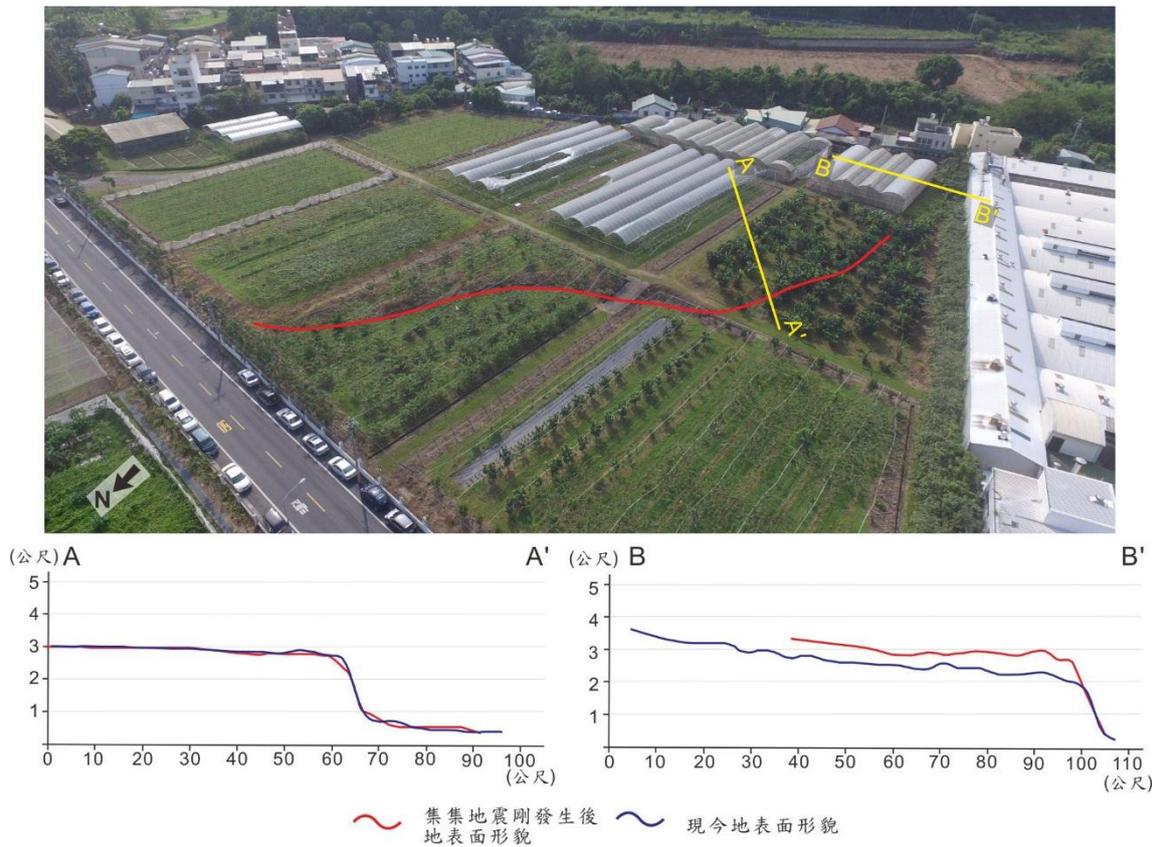


圖 76 興大葡萄園區內 17 年前後地表形貌比較圖。A 剖面的位置地震發生後至今無特別整頓，B 剖面的位置地震發生後有園區有整地過。



圖 77 興大葡萄園內地表隆起照。集集地震後葡萄園區內部分未整地的區段還可追蹤到連續線形。



圖 78 興大葡萄園北方北溝公園照。照片右方圍牆的高度差是集集地震時造成的，園區往北無法連續追蹤到集集地震時引致的地形崖。



圖 79 興大葡萄園南方民生路 364 巷路面照。巷子陸面仍可看出地表隆起。

6-1-5 霧峰-車平營電塔

霧峰車平營電塔屬平坦野地類，電塔前的空地地震剛發生後時為一空曠草地，凸起狀形貌之地形崖從電塔前通過，地形崖可從空地旁的停車場連續追蹤至空地(圖 80)，電塔所在的一側地面隆起約 2 公尺，電塔在地震時有稍為傾斜但未倒塌，電塔仍能正常運作(連永旺，1999)(圖 81)；現今，此空地變成長滿果樹的果園，一旁的停車場變為空地，果園可追跡到地形線形的長度約 50 公尺，由現今地形剖面測量結果可知，地形崖已變成單斜狀，若將本研究的資料與 Kelson 於 2001 年測量知地形剖面比較，地形崖些微變緩，地表隆起地高差仍與地震剛發生時相同(圖 82)。

6-1-6 竹山-水底寮

本調查區位於南投竹山水底寮，濁水溪南岸的河階地，集集地震時此測區形成兩道地形崖，其中一道地形崖從濁水溪河床往南延伸切過溫水巷西側的茶園，另一道則從溫水巷東側的住宅區切過，往南延伸至竹山市區，本研究調查經過水底寮溫水巷西方茶園的地形崖。根據《九二一地震地質調查報告》內文描述，地震剛發生後，茶園內地形崖高程差約 3 公尺，地形崖形貌呈拋物線狀，地形崖的崖腳可明顯的辨識，並可連續被追蹤至少 100 公尺。

現今水底寮農田區裡，集集地震時造成的地形高程差仍存在，然而地形崖已被整修，有些地形崖的前緣蓋了一道牆(圖 83)，地形線形兩側的仍現今仍繼續耕種，田地高程落差約 2.5 公尺。有一部分地形崖，未隆起一側地震過後至今仍持續耕種，隆起側則長滿植被，地形崖的位置仍可辨識，部分區段植被覆蓋面積太廣，難以辨識地形崖位置(圖 84)。未製作地面控制點的地表數值模型(圖 85)可看出地形線形與集集地震引致地形崖的位置大致重合。



圖 80 霧峰車平營電塔附近 17 年前後空照比較圖。(a)電塔前的空地及一旁的停車場可追蹤到連續的地形崖(連永旺 攝)；(b)現今空地已變成果園，停車場變成空地，從空照無法辨識出地形崖。

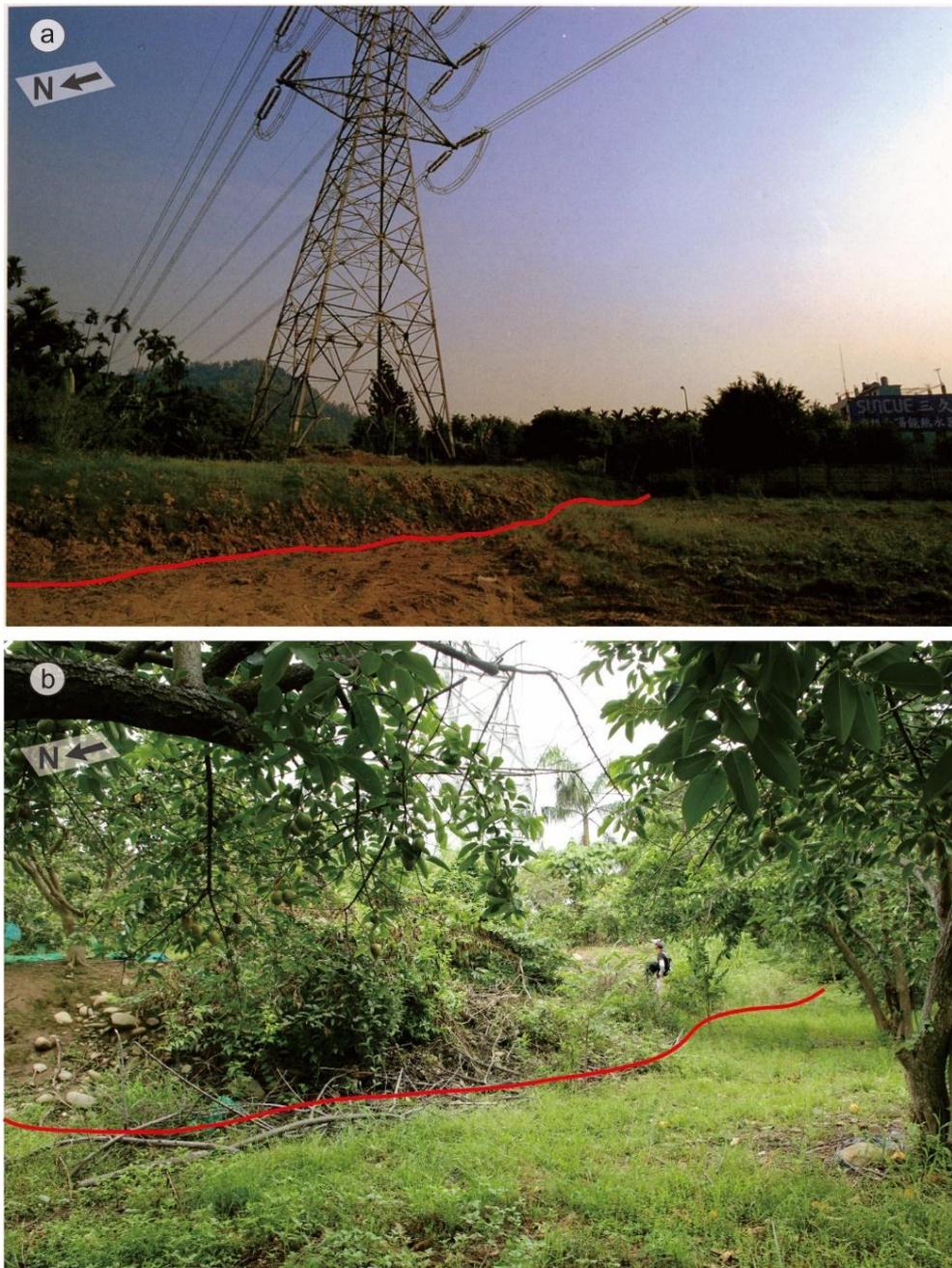


圖 81 霧峰車平營電塔地形崖 16 年前後對照圖。(a)集集地震車平營此電塔前的空地產生約 2 公尺，地形崖可連續追蹤 (連永旺 攝)；(b)現今，此空地種滿果樹，仍可看出地形高度差，地形崖坡度變緩。

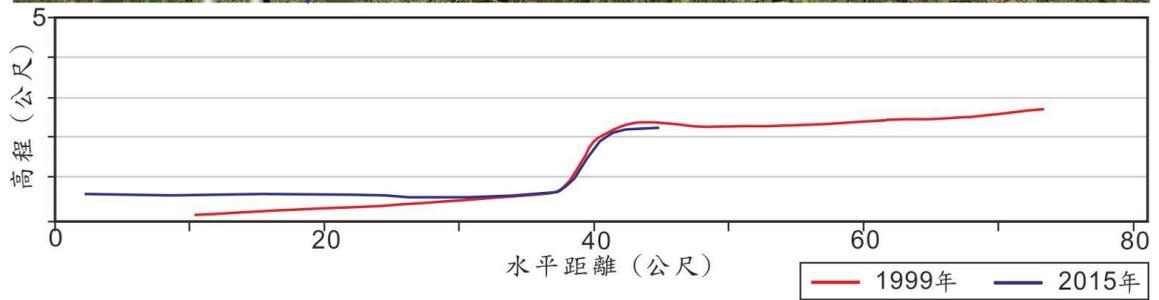


圖 82 車平營電塔空地 16 年前後地形剖面比較圖。照片藍線標示剖面的位置，16 年前後地形剖面疊合結果顯示，現今地形崖前緣的凸起狀已消失，地形崖高度差與 1999 年一樣。



圖 83 水底寮地區田間小路地 17 年前後比較圖。(a) 集集地震於水底寮田間小路隆起 1.5 公尺(黃文正 攝)；(b)田間小路坡度變緩，兩側地形崖的前緣築起牆，兩側農地繼續耕種。

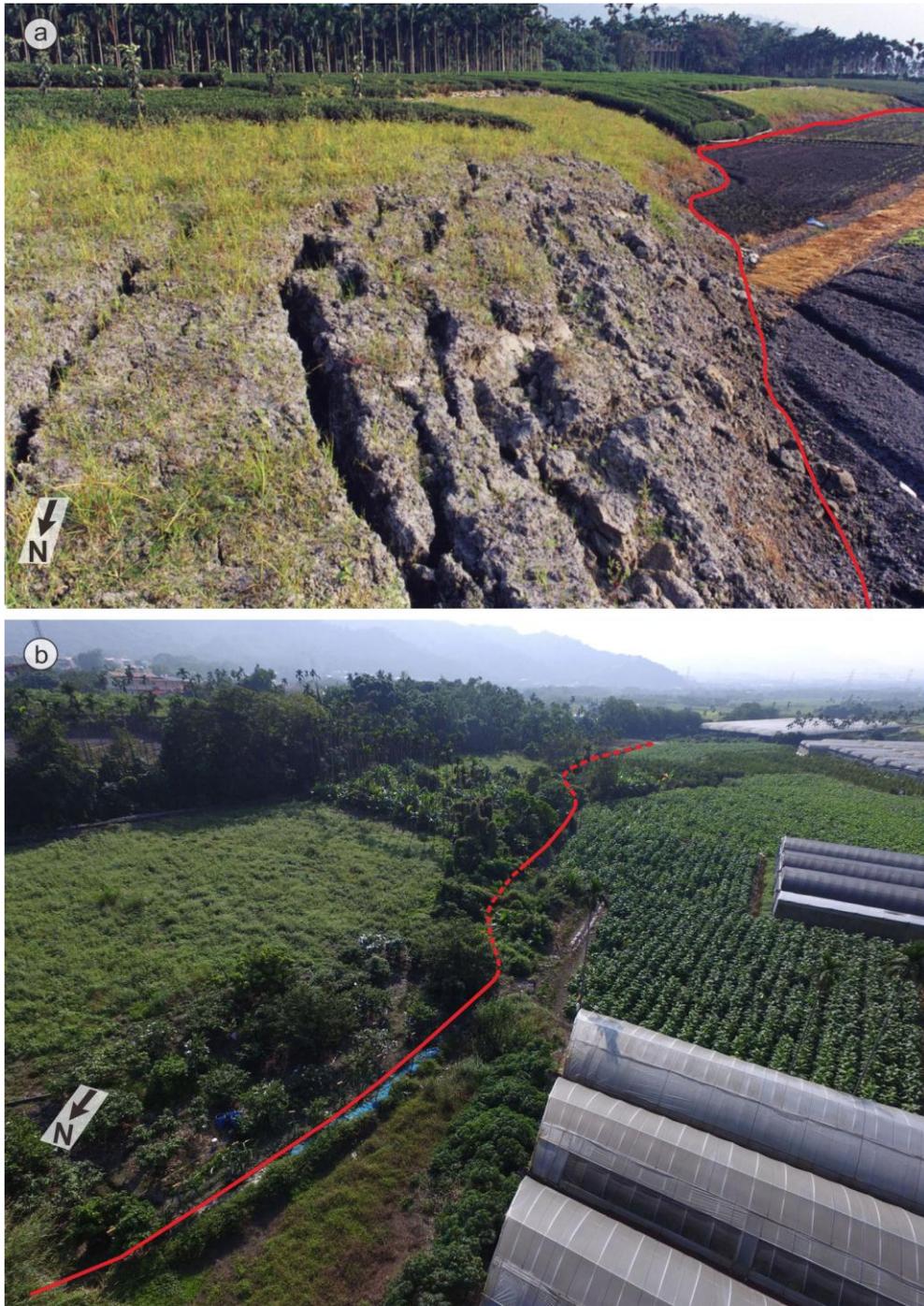


圖 84 水底寮農田 17 年前後比較圖。(a)集集地震時田裡產生 3 公尺單斜狀地形崖，可連續追蹤約 100 公尺(黃文正 攝)；(b)現今地形隆起處種植較高大的植被，但地形崖仍可連續追蹤，視野沒有 17 年前如此空曠。

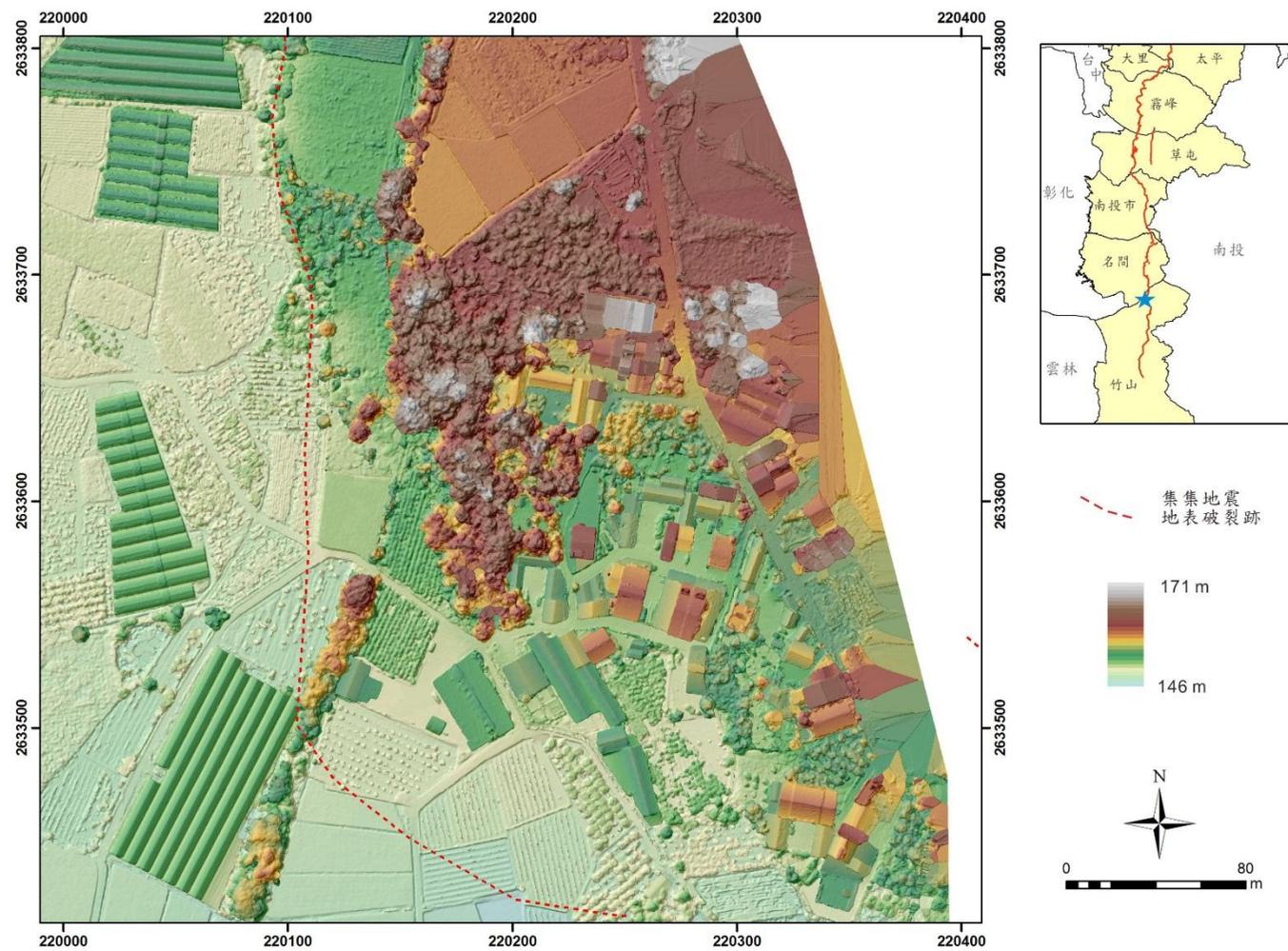


圖 85 水底寮地區的地表數值模型。

6-2 河床露頭調查結果

活動斷層調查過程中，野外露頭找尋及調查也是不可或缺的一部分。本研究挑選埤豐橋下大甲溪的河床、以及一江橋下頭汴坑溪的河床兩個地點，紀錄這兩條河流，集集地震造成地表破裂跡位置附近的河床，紀錄內容包含露頭的分布、岩性及次生構造。

6-2-1 豐原-大甲溪埤豐橋

大甲溪埤豐橋至石岡壩，因集集地震河床面抬升，得以出露良好的露頭，(圖 86)為埤豐橋至石岡壩間大甲溪河床高解析空照圖，露頭出露的範圍從石岡壩至埤豐橋東側 60 公尺處。

位於埤豐橋以東與石岡壩中央的大甲溪河床(圖 87 A 點)，岩層面的位態為 $N55^{\circ}E$ 、 $46^{\circ}SE$ ，岩性以中層至中厚層棕灰色砂岩為主(圖 88)；埤豐橋東側靠近橋下的位置(圖 87 B 點)，岩層面的位態為 $N34^{\circ}E$ 、 $47^{\circ}SE$ ，岩性薄層灰黑色頁岩偶夾薄層極細砂；埤豐橋西側(圖 87 C 點)岩層位態為 $N32^{\circ}E$ 、 $45^{\circ}SE$ ，岩性為薄層灰黑色頁岩偶夾薄層細砂(圖 90)，岩性及岩層面位態與露頭點 A 位置的岩性相近。本調查區未發現剪切帶構造，然而河床 B 點可找到數條小斷層(圖 89)，斷層位態約為 $N19^{\circ}E$ 、 $37^{\circ}SE$ 。

綜合空拍影像進行構造素描及野外量測及調查結果，可歸納出以下兩個主要的現象：

1. 岩層面位態埤豐橋東側靠近橋下的位置產生轉折。
2. 橋下兩側的構造特徵不同，埤豐橋東側靠近橋下的露頭可找到小斷層，埤豐橋西側及石岡壩附近的露頭則無法尋找到岩層被錯動的證據(圖 86)。

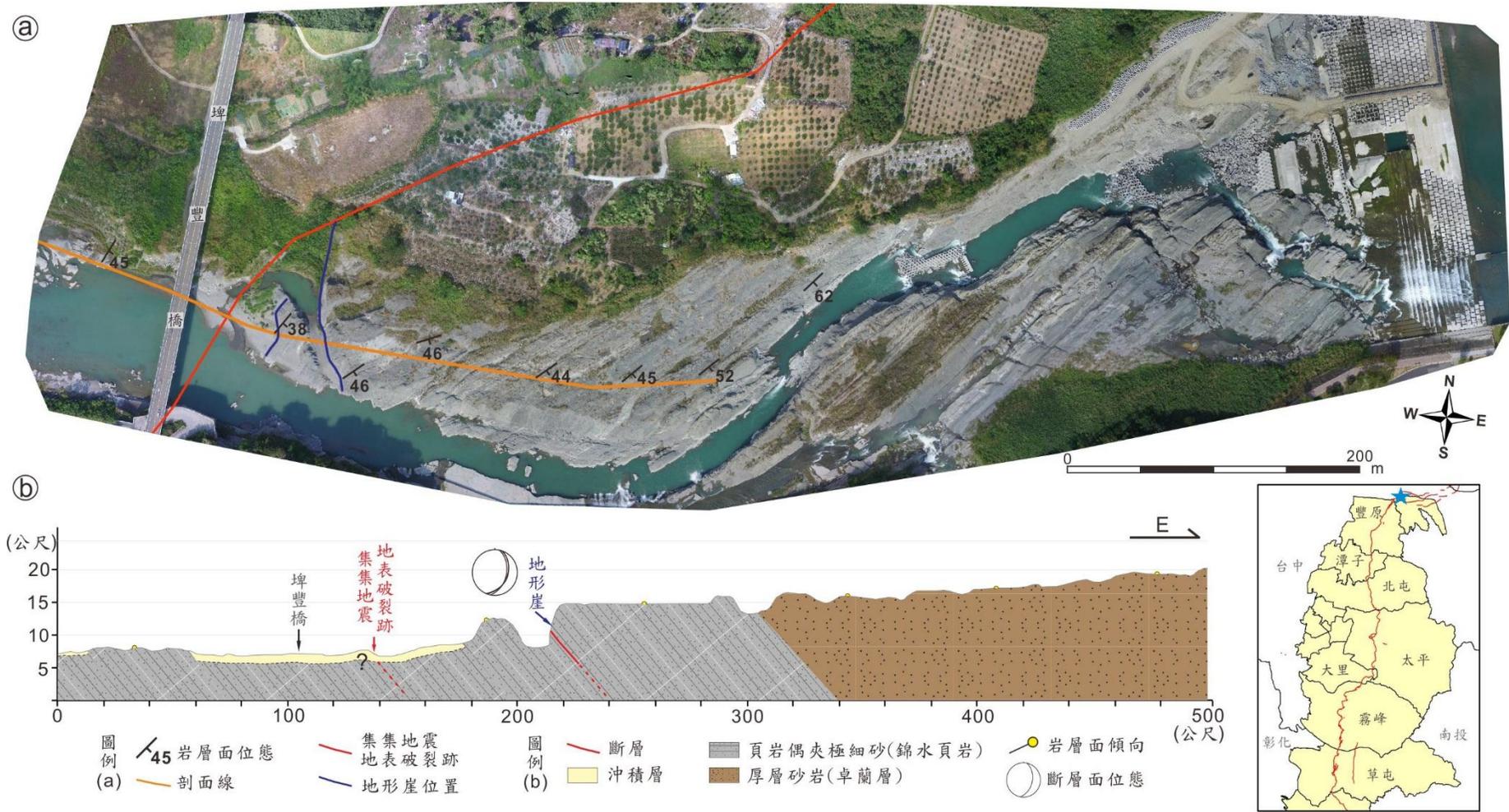


圖 86 石岡壩至埤豐橋間河床正射影像圖及露頭剖面圖。大甲溪石岡壩至埤豐橋間河床露頭出露狀況良好。

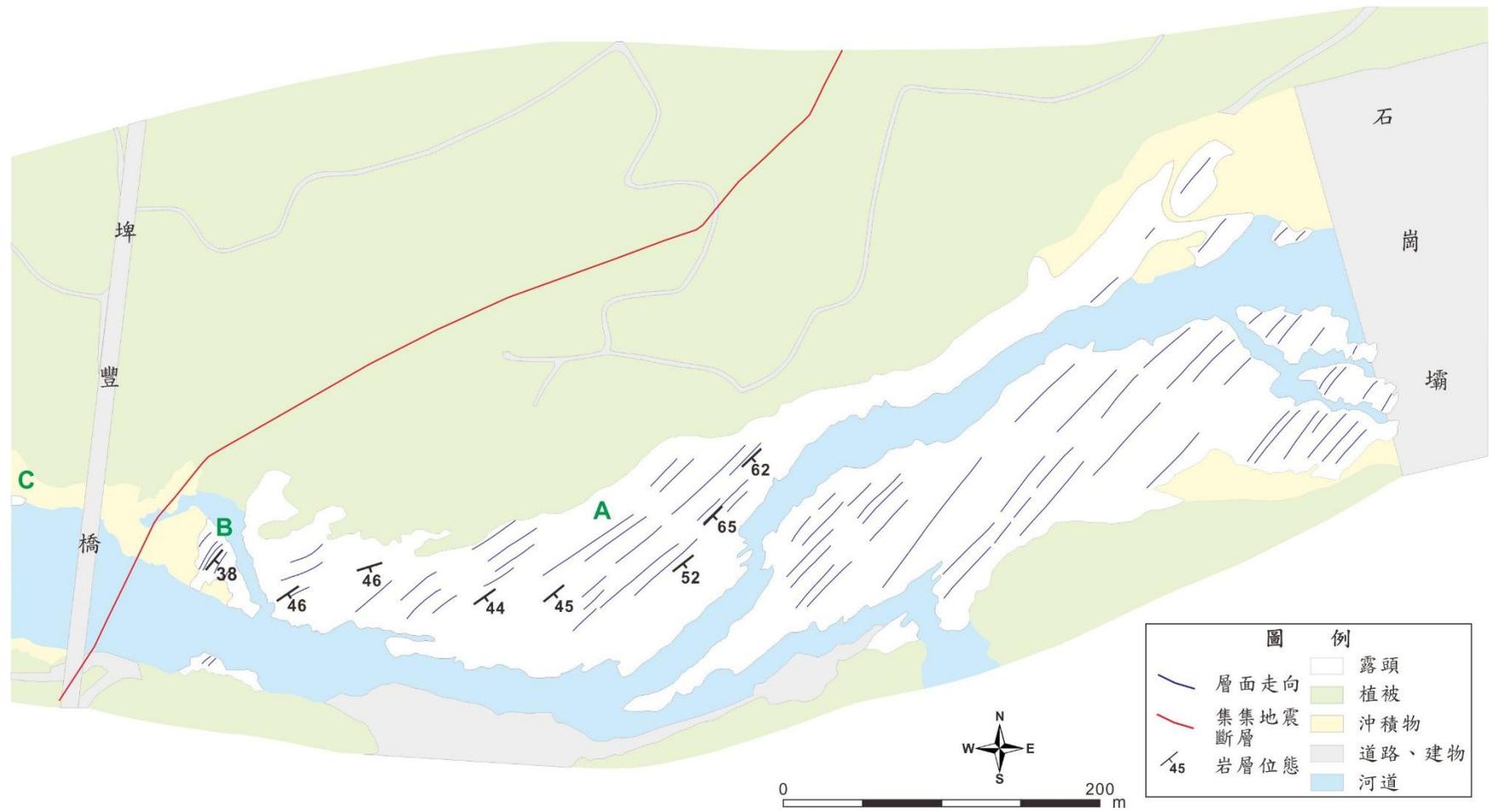


圖 87 石岡壩至埤豐橋間構造素描圖。層面位態於埤豐橋附近轉折。



圖 88 埤豐橋與石岡壩間河床(A 點)露頭樣貌。岩性為中層至中厚層棕灰色砂岩。



圖 89 埤豐橋下河床(B 點)露頭照。紅色線為小斷層截切。



圖 90 埤豐橋西側河床(C 點)露頭產狀。岩性為薄層灰黑色頁岩偶夾薄層細砂。

6-2-2 太平-頭汴坑溪一江橋

本區調查範圍為頭汴坑溪一江橋至下游處自行車道下的河床，(圖 91) 為此調查區的正射影像圖，一江橋至自行車道下的河床出露良好、連續的露頭剖面，一江橋下方發現了剪切帶構造，自行車道西南方的河床則被植被雨沖積物覆蓋，沒有露頭出露。

此區在進行野外調查當時有河床整治工程進行，一江橋旁油管下的河床得已出露了一片約 80 公尺連續且完整的露頭剖面，剖面出露的位置如(圖 91)中顯示。剖面上可觀察到岩層在短短 80 公尺的範圍內，岩層位態劇烈的改變，筆者將露頭剖面照片拼接起來(圖 92)，為了方便展示剖面，在此切成三張，剖面由左至右、由上至下為由東北到西南，以最東北側為原點。剖面第 13 公尺處岩層傾角從為約 40° 突然變成約 70° ，在剖面約第 25~27 公尺處，露頭無法判斷層面的位態，岩層十分破碎，岩石細顆粒的泥岩，因此判定此位置為斷層泥。剖面第 30 公尺處至第 60 公尺處岩層為傾角約 40° 的平行層。剖面第 63 公尺至第 69 公尺處，露頭上出現褶皺，剖面第 70~73 公尺處，露頭外觀十分破碎，細顆粒的泥岩，筆者亦判定此位置為斷層泥，剖面第 74~82 公尺處岩層為平行層，岩層傾角約 30° 。

剖面西南側較下游靠近自行車道處，岩性為棕白色中層至厚層的細粒砂岩，岩層為平行層，岩層位態約 $N70^\circ W, 17^\circ S$ ，露頭上偶爾出現小斷層，錯動量約 10 公分(圖 94)。集集地震發生當時產生地表破裂的位置，被沖積層及植被覆蓋，也無地形曾經隆起的證據，本次野外調查發現斷層泥的位置與集集地震時產生破裂的位置相距 200 公尺。

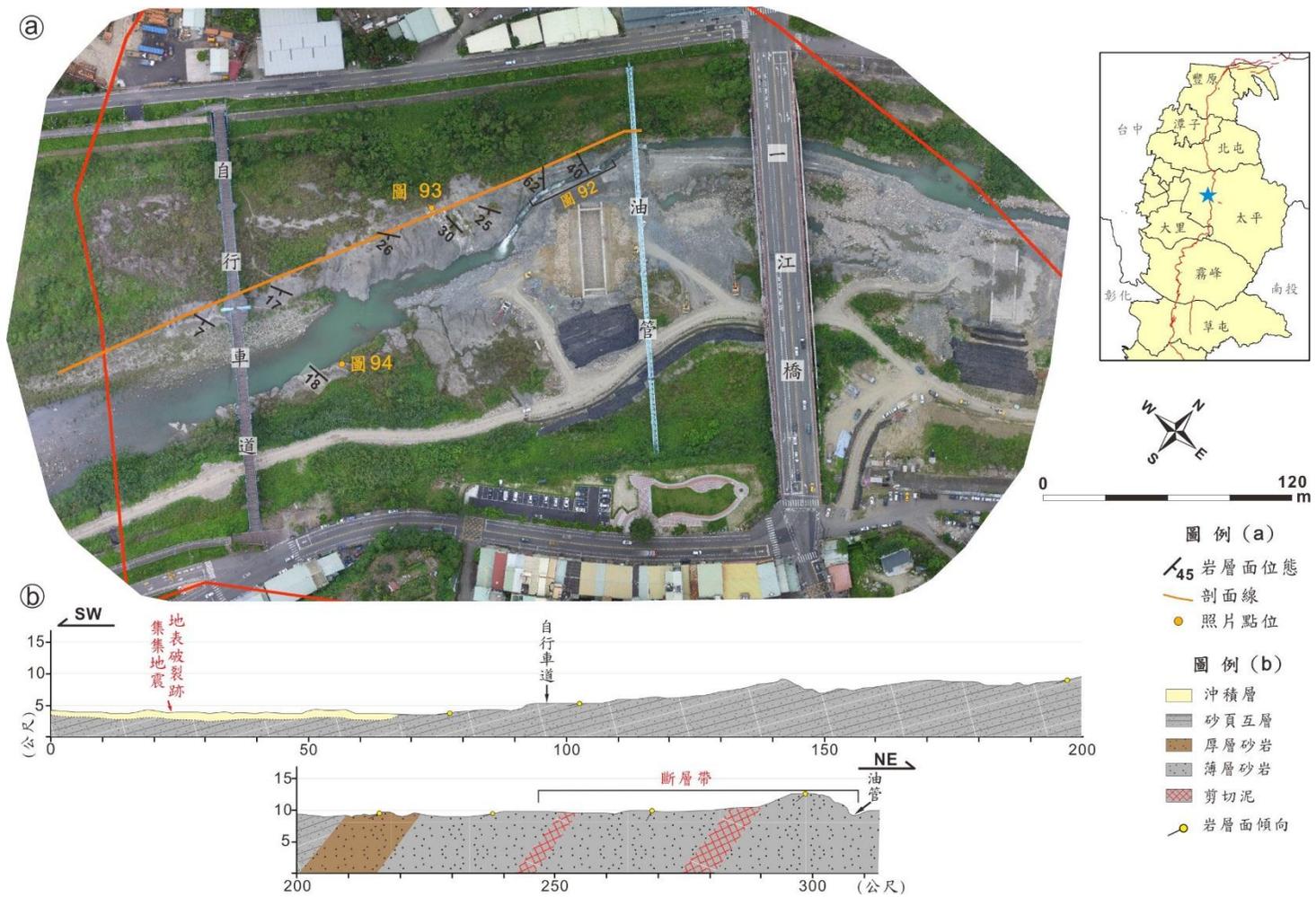


圖 91 頭汴坑溪一江橋下河床正射影像及露頭剖面圖。

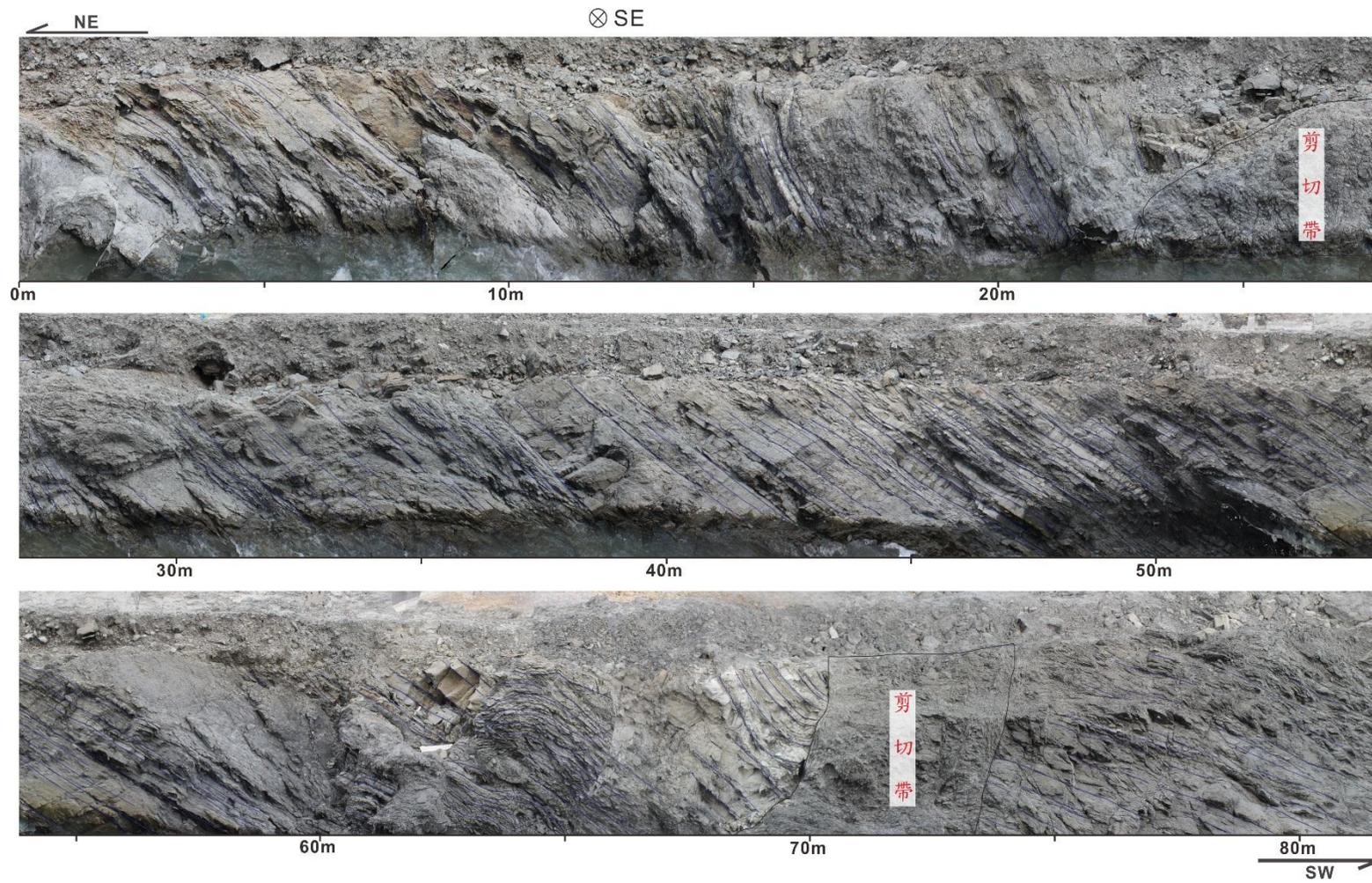


圖 92 一江橋下之剪切帶露頭。岩層的傾角在 80 公尺的範圍內劇烈的改變。



圖 93 一江橋下頭汴坑溪河床出露的露頭。



圖 94 頭汴坑溪自行車道下之河床露頭。岩性以中厚層細粒砂岩為主，岩層間可發現小的錯動。

第七章 討論

7-1 集集地震引致地形崖 17 年前後變化之探討

在 6-1 節筆者整理了各種不同區域，集集地震後至今地形崖的變化狀況，也挑選了 6 個地點詳細追蹤並描述地形崖的延伸狀況，本小節將探討不同地點及土地利用性質，集集地震引致地形崖於 17 年前後的差異。

從本研究詳細調查的 6 個例子觀察到的現象，可分成三個種類探討：

1. 河道：大甲溪埤豐橋。
2. 受人類活動影響較低非河道區域：豐原第二公墓 2016 年 10 月前、興大葡萄園、霧峰車平營電塔。地震發生後至 2016 年 10 月，豐原第二公墓平常較少有人經過，17 年間也沒有重大的整修，興大葡萄園內及霧峰車平營電塔前的土地集集地震時引致的地形崖沒有特別整平，因此 3 個例被歸類在受人為活動較低的類別。
3. 受人類活動影響較高的非河道區域：豐原中正公園、水底寮社區、國家教育院旁的農地。豐原中正公園附近的住宅集集地震過後重建，水底寮地區集集地震後農田內有整頓並改種作物，因此被歸類為受人類活動影響高。

首先，先從非河道地區的實例討論。從受人類活動影響較低的兩個例子中，我們可從野外調查或遙測影像看出，集集地震引致地形崖的線形現今依舊可連續追蹤；受人類活動影響較高的三個例子當中，豐原中正公園及水底寮地區的例子，集集地震時引致的地形崖現今只可在路面、農田看見地表隆起證據，地形崖線形也變得斷斷續續的(圖 71)。葡萄園的例子中，未特別整地的區域，地形形貌與地震剛發生時相較沒有改變，有整地的部分，地形崖高度變低。豐原第二公墓的例子尤其明顯，2016 年 10 月前調查結果顯示，仍可在現地追蹤到集集地震引致的地形線形，2016 年 11 月大規模施工

後地形樣貌則完全改變。因此在 1999 年至今 17 年間，非河道區域的地形崖在集集地震之後的變化，人為活動影響遠大於自然風化侵蝕的影響。

接著，再討論河床上集集地震時引致地形崖的變化，大甲溪河床的例子當中，集集地震發生後 5 年：2004 年，地震引致的地形崖已倒退 30 公尺，且提及 2008 年埤豐橋下因河床工程的影響，河道北邊沒有受河水侵蝕影響，然而河道南邊的地形崖卻開始快速的像上游處後退(徐婉容，2013)，2016 年野外調查資料顯示，大甲溪河道北邊岩層裸露區，地形崖倒退約 40 公尺，南側的河道地形崖甚至因河水的侵蝕而完全消失，且大甲溪埤豐橋下南側的河道有逐年增寬的趨勢(圖 23 2009 年及圖 86 正射影像比較)，因此埤豐橋下河床於地震過後至今，地形崖位置及高度顯著的變化與河流侵蝕與人為活動影響皆有關係。

在集集地震地表破裂跡沿線的實例中，大里溪河道變化以人為活動因素主，大里溪在地震後的隔年：2000 年時進行河川整治(徐婉容，2013)，集集地震引致地形崖的位置，現今變得十分平坦(圖 96)。大安溪地形崖的變化以河水侵蝕為主，大安溪與大甲溪雷同點為，地震後的 1~2 年間河床的地形崖為整段一起倒退，接著河床上會快速地沖蝕出一條河道。其他地震引致地形崖實例也有相同的現象，2008 年汶川地震的例子中(圖 30)，白沙河床地震時引致的地形崖，也在 4 年內退後 50 公尺(Liu & Yang, 2015)，此地區地形崖相上游後退因素僅來自於河流侵蝕因素。因此在河道中，河水侵蝕的因素與人為活動因素都是造成地形崖位置及形貌的改變重要原因。

將本實例與斜坡演化模式比較，崖坡置換式演化現象為崖坡較陡區段與較緩區段會演化成整個崖坡面斜率一致；崖坡擴散式演化為整個崖坡斜度慢慢變緩；崖坡後退模式為崖坡的斜率不變，整個崖坡一致後退(圖 95)。於本研究非河道區的地點，觀察到地形崖變化的現象與人為活動因素較相關，在人為活動因素較少的地區，崖坡的斜率未有變化；於河道區的地點，

大甲溪在地震後河床上尚未沖蝕出新的河道之前，其地形崖演化模式為退後式演化模式，在沖蝕出河道後，大甲溪的河床崖坡位置並無顯著變化，。

根據以觀察結果，本研究推斷再往後的 20 年，即集集地震過後約 40 年，集集地震引致的地形崖應該有下述的變化：

1. 集集地震時在非河道區域上引致的地形崖，自然風化的影響並不顯著，因此若無重大的人為變更，地形仍會維持現今的樣貌。
2. 集集地震時在河床中引致的地形崖，因河水的侵蝕作用，河床的地形面仍會持續改變。

因此，我們在尋找活動斷層地表線形跡時，人為活動較不頻繁的區域，仍可將地形線形作為尋找活動斷層地表跡位置的參考依據，人為活動較頻繁的地區及河道，地形樣貌已經過人為改變或河流侵蝕，斷層的位置也許已沒有地形的特徵。

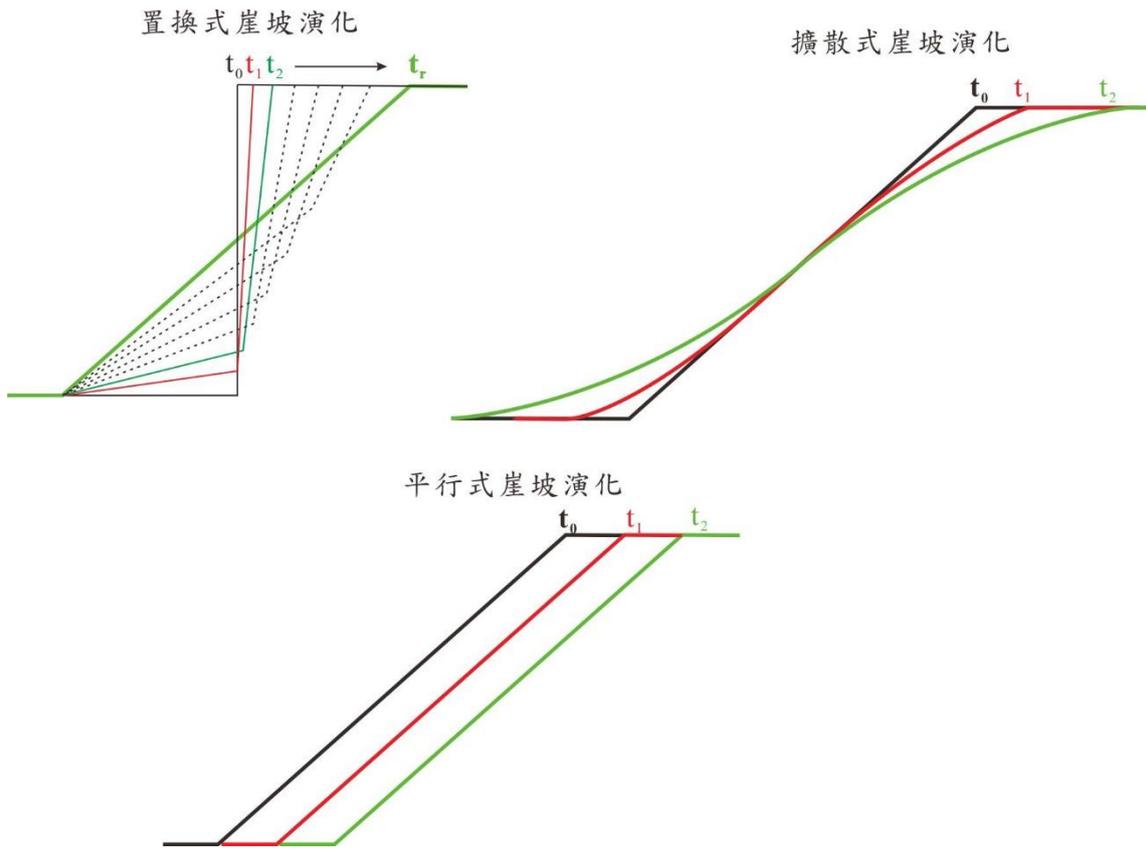


圖 95 崖坡演化模型示意圖。



圖 96 台中北屯大里溪河床 17 年前後對比圖。大里溪河床現今十分平坦 (上圖 黃文正 攝)。

7-2 斷層引致地形崖與破裂跡沿線地形線形之探討

經濟部中央地質調查所活動斷層條帶圖說明書，西南部及南部地區，部分的斷層是以明顯地形線形作為活動斷層地表跡的位置，例如木屐寮斷層、六甲斷層，本章節將討論以此方法決定活動斷層地表線形跡會遇到的問題。

張瑞津與楊貴三於 2001 年、Ota 等於 2004 年及沈淑敏等於 2005 年的研究利用航照判定地形線形的確實度，繪製 1:20000 的圖呈現判釋成果，然而集集地震時引致地形崖的高程大部分落在 1~5 公尺，且有許多地震時隆起的地形崖在地震前是平坦的，因此本研究使用小比例尺的呈現方式，利用高解析度的遙測影像：航空測量與空載光達製作的地形數值模型，判釋地形線形以及探討集集地震引致的地形崖與非集集地震引致地形線形的關聯性。

以豐原第二公墓的區域為例，從現今遙測影像判釋，公墓所在的斜坡面及附近可觀察到 3 條地形線形(圖 97)，西側的地形線形為斜坡的坡角，東側及西側的地形線形十分清晰，東側的地形線形為一陡坡，高程差約 10 公尺，在野外也可清楚追蹤到此條連續的地形線形(圖 99 黃色線)，然而 Ota、張瑞津與楊貴三及沈淑敏等判定此線形分別為第 4 類、確實度 2 及確實度 2，代表尚未有確切的證據證實此地形線形與斷層活動有關，此條線形可能早期活動的斷層或是崩積物的前緣，然而穿過坡地中間的地形線形為集集地震引致的地形崖，相較於其他兩條線形相對較為模糊。

再以竹山鎮水底寮農地為例，(圖 98)為水底寮地區附近的地形線形判釋成果，此地區除集集地震引致地形崖外，其附近還有一條明顯的地形線形(圖 100 黃色線)，地震發生後 17 年間，水底寮農田因整地集集地震引致地形崖線形已變得斷斷續續，無法連續的追蹤(圖 98 藍色線段)，從 1 米網格空載光達影像也難以判釋因集集地震造成的地形線形。上述破裂跡附近較清晰的地形線形無論是在野外或從 1 米空載光達資料，皆可容易的被判釋，然而，前人在地形判釋結果並非完全有把握與活動斷層的位置，Ota、張瑞

津與楊貴三及沈淑敏等的判釋結果皆顯示，此條地形線形可能與斷層有關，斷層確切的位置在哪並沒有被證實，另一個可能性為此條線形為濁水溪河畔的河階地。

綜合以上的敘述，地震過後至今集集地震引致地形崖，因自然風化或人為因素導致地形線形消失或線形不連續的現象，以至於在遙測影像判釋時地震引致的地形崖線形並不明顯，或甚至無法判定地形崖的崖腳位置；相較於破裂跡附近既存在的地形線形，雖然沒有更多證據證實其為活動斷層造成，但地形崖線形確比集集地震時引致的還要清晰，此現象會導致在判定活動斷層地表線形跡時，忽略掉地形線形不明顯，但可能是下次地震時破裂跡所在的位置。從此兩例也可學習到，地震發生後立即至野外紀錄地表破裂十分重要，可讓我們直接確認斷層的位置。

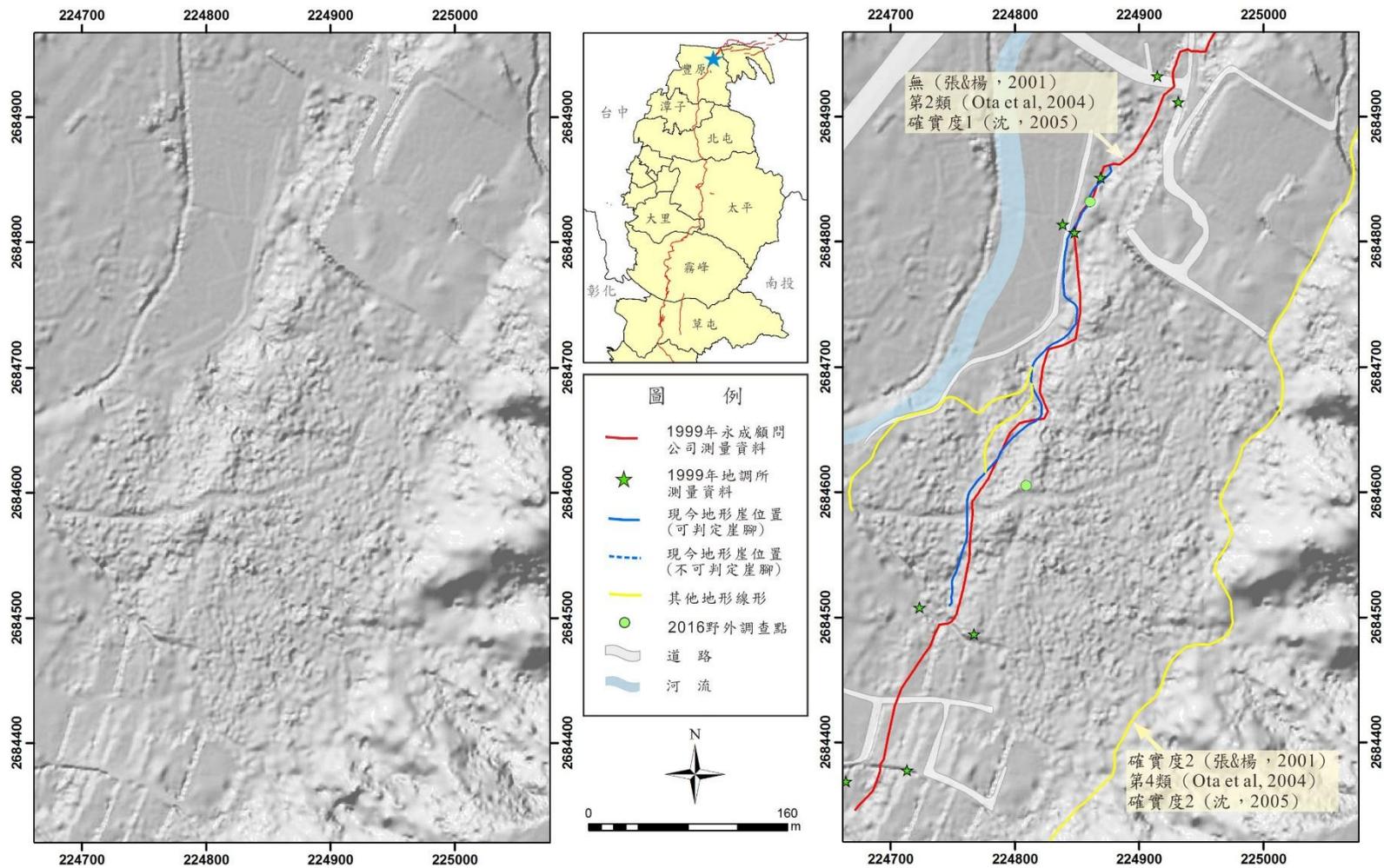


圖 97 豐原第二公墓及附近地形線形判釋比較圖(底圖由地調所提供)。

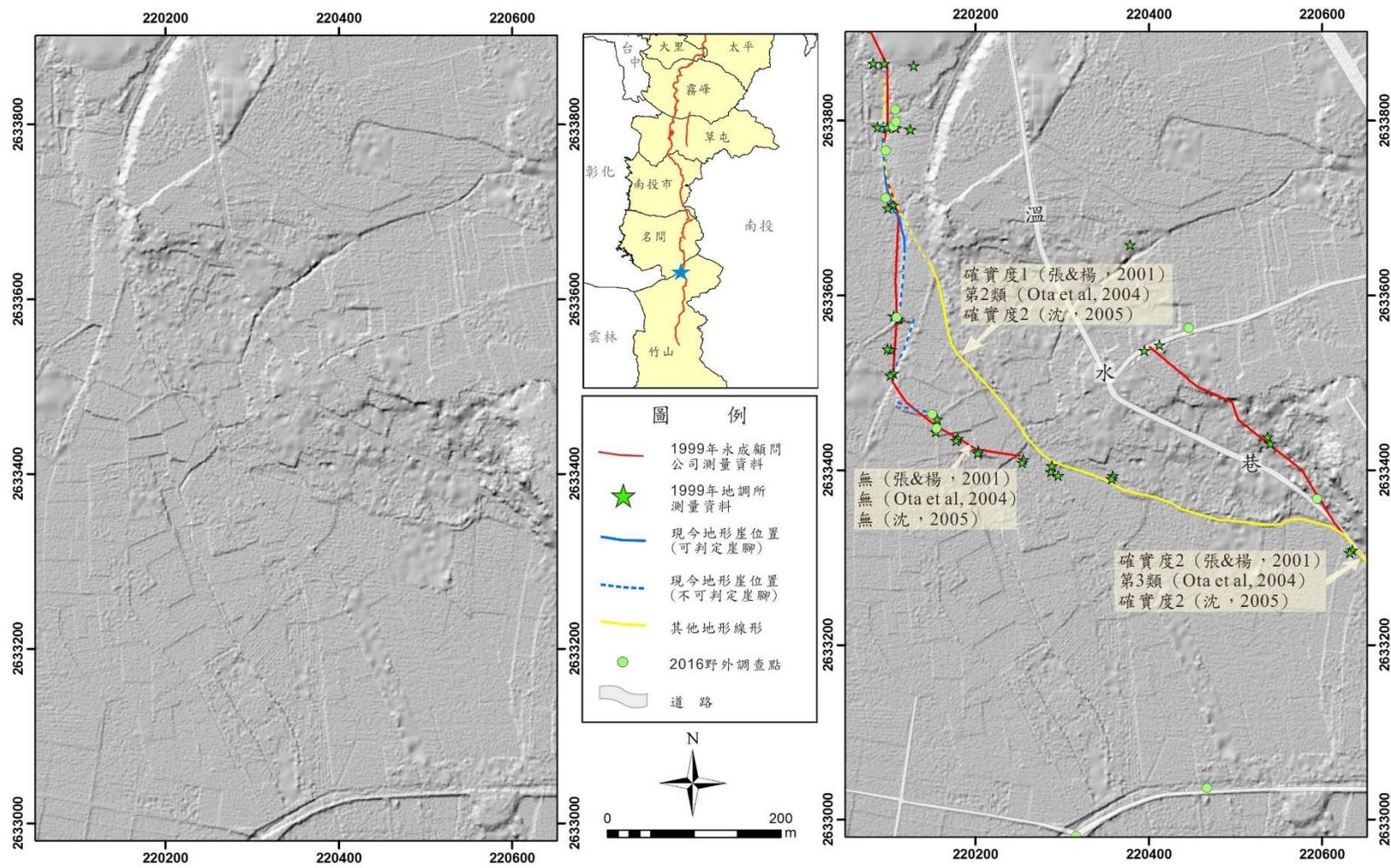


圖 98 水底寮及附近地形線形判釋比較圖(底圖由地調所提供)。



圖 99 豐原第二公墓空照圖(於 2016 年 9 月拍攝)。黃色線為集集地震發生之前已存在的地形線形，藍線為集集地震時產生的地形線形現今位置。



圖 100 水底寮地區空照圖。黃色線為集集地震發生之前已存在的地形線形，藍線為集集地震時產生的地形線形現今位置。

7-3 剪切帶、地形與活動斷層之關聯

尋找野外露頭對於決定活動斷層的位置扮演很重要的角色，然而，露頭上斷層的位置是否可代表斷層地表跡的位置？或是未來發生地震時地表變形最劇烈的位置是否為剪切帶的位置？本研究藉著大甲溪及頭汴坑溪的露頭調查，再結合集集地震產稱破裂跡的位置來探討這些問題。

在埤豐橋下大甲溪的例子中，埤豐橋下東側的河床上能找到小斷層，埤豐橋西側的河床卻找不到斷層錯動的證據，然而，埤豐橋兩側的岩性相同(圖 86)。因此，若在不知道集集地震事件的狀況下進行地質調查，此露頭的調查結果很容易讓我們忽略埤豐橋下有活動斷層經過。在一江橋下頭汴坑溪的例子中，我們在集集地震產生地表破裂處上游 200 公尺的河床發現了剪切帶，然而集集地震時，地表破裂跡卻沒沿著露頭上斷層的位置破裂，而一江橋下，集集地震時產生地表破裂跡的位置，沒有地形特徵，河床上也沒有露頭出露。台中大里區和霧峰區交界附近的北溝溪，斷層剪切帶的位置位於集集地震地表破裂處上游 70 公尺的地方(Lin et al., 2003) (圖 101)。

因此，斷層引致破裂跡的位置可能會因為自然風化、侵蝕，被掩蓋在沉積物底下，因此。我們在野外調查活動斷層過程中，容易因沉積物覆蓋，而忽略掉斷層位置。從頭汴坑溪及北溝溪的例子可知，剪切帶的位置與地震發生時產生地表破裂的位置並無直接關係，地震引致地表破裂的位置，最遠可距離剪切帶約 200 公尺處，因此截至今日為止，我們仍然無法從露頭中觀察到的剪切帶構造，完全掌握下次地震發生時地表會產生破裂跡的位置。

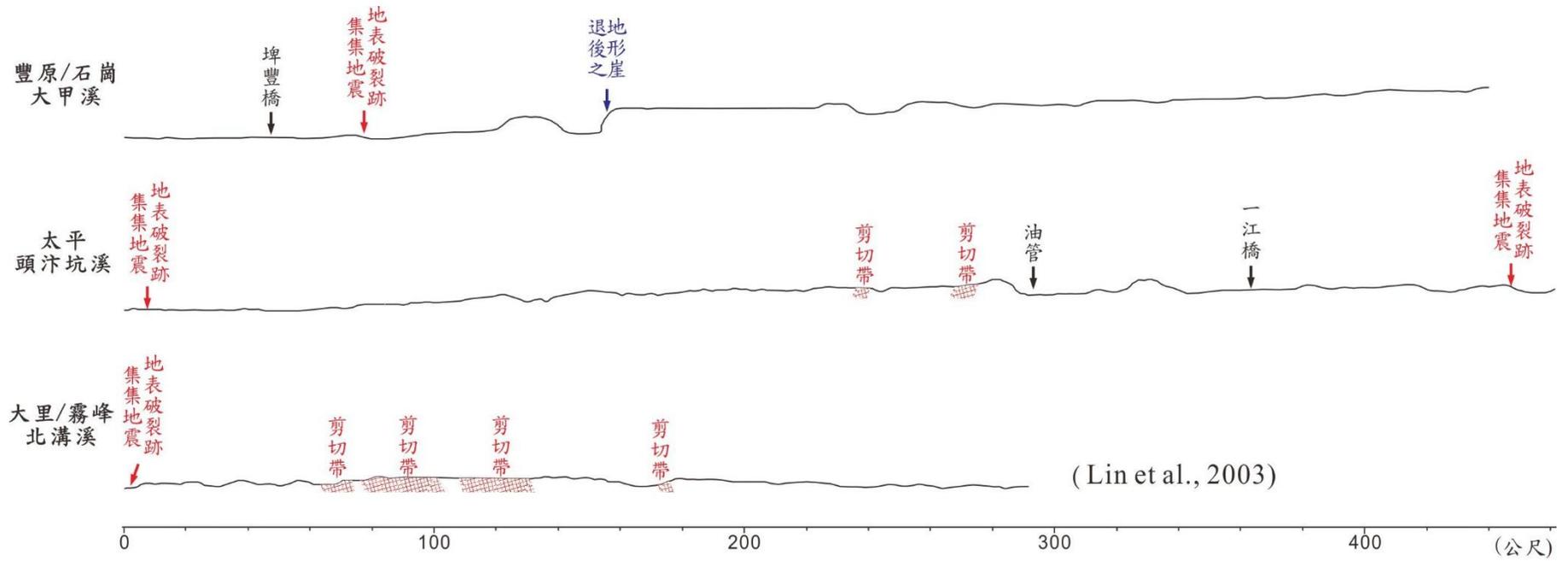


圖 101 大甲溪、頭汙坑溪及北溝溪河床地表破裂跡與剪切帶位置圖。

第八章 結論與建議

本研究野外調查，依照地形崖集集地震當時的土地利用情形及變化的狀況，將其分成河道中、房屋建造區、平坦農田、平坦野地及既存坡地等五類。河道中的地形崖因河水侵蝕作用或人為整治，地形崖為至於 17 年間朝抬升側方向快速後退，地形崖已完全消失；房屋建造區的例子因住宅復原重建，地形崖被修整平緩或剷除，地面上無法追蹤到連續的地形線形；平地農田地例子中除興大葡萄園沒有特別整地外，其餘的農地集集地震引致地形崖的變化方式可歸納為兩種，第一：農田地形高度差被弭平，第二：田地修整成階梯狀；平坦野地上的例子，地形崖高度不變、崖坡變緩，地形線形仍可被連續追蹤；既存坡地上，則難以再判別出集集地震引致的地形崖的位置。

地震至今 17 年間，在非河道區地震引致地形崖的變化主要來自於人為活動因素，自然風化的影響並不顯著；於河道區，河流侵蝕與人為活動因素之影響則同等的重要，可推斷地震發生後 20 年內。並且，現今往後 20 年間，非河道區域集集地震時引致的地形崖若無重大人為變更，地形將會繼續維持現今的樣貌，河道中的地形形貌仍會持續的改變，因此，在較人為活動較不頻繁的區域，地形崖地位置或許仍可作為判定活動斷層地表線形跡的參考依據之一。

本研究使用前人地形線形判釋結果，與現今野外觀察資料及地表數值模型比對，推論出現今地表上既有的地形線形並無法直接證實與活動斷層相關，然而，地震斷層引致地形崖，會因為自然風化、侵蝕或人為開發的因素而使其消失，此現象會使我們在決定斷層地表跡時，容易忽略下次地震地表破裂跡可能引致的位置，此結論也凸顯地震過後立即至野外測繪地表破裂跡是十分重要的工作。

從野外露頭觀察資料及集集地震地表破裂的位置疊合在一起比較，可歸納出地形崖、剪切帶、地震引致地地表破裂跡並無直接關係，因此在進行活動斷層調查時，在野外發現到剪切帶的位置，未必是地震發時會引致地表破裂的位置，剪切帶出露位置與地表破裂位置兩者最遠可相距 200 公尺，因此我們仍然無法從露頭中的觀察結果，推斷未來地震發生時地表破裂跡的位置。

本研究歸類整理集集地震地表破裂跡沿線地形崖 17 年前後的變化，然而，本論文未有太多篇幅提到量化的比較，一方面是本研究蒐集的集集地震剛發生時的地形剖面，都是只提供相對高程，沒有提供絕對坐標，量化比較的工作就顯得較為困難，建議量化的部分可由取得地震後至今一系列時間點的原始航空相片，做影像匹配合成一系列時間點的地表數值模型，也期望定性及定量的描述可應用於其他活動斷層的調查。

參考文獻

- Chang, S.L., Subsurface geologic study of the Taichung basin, Taiwan. Chinese Petroleum Cooperation, 8, pp. 21~54, 1971.
- Chen, W.S., Chen, Y.G. and Chang, H.C., Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Mingjian area. Western Pacific Earth science 1, pp. 351-358, 2001.
- Chen, W.S., Chen, Y.G., Chang, H.C., Lee, Y.H. and Lee, J.C., Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Wufeng area. Western Pacific Earth science, 1, pp. 499-506, 2001.
- Chen, W.S., Huang, B.S., Chen, Y.G., Lee, Y.H., Yang, C.N., Lo, C.H., Chang, H.C., Sung, Q.C., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H. and Lee, K.J., 1999 Chi-Chi earthquake: a case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, pp. 986-994, 2001.
- Chen, W.S., Lee, K.J., Lee, L.S., Streig, A.R., Rubin, C.M., Chen, Y.G., Yang, H.C., Chang, H.C. and Lin, C.W., Paleoseismic evidence for coseismic growth-fold in the 1999 Chichi earthquake and earlier earthquakes, central Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 31(3), pp. 204-213, 2007.
- Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Ota, Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S. and Lu, S.T., Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu fault in central Taiwan: evidence from the Chushan excavation site. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(1B), pp. 1-13, 2007.
- Frankel, K.L., Pazzaglia, F.J. and Vaughn, J.D., Knickpoint evolution in a vertically bedded substrate, upstream-dipping terraces, and Atlantic slope bedrock channels. Geological Society of America Bulletin, 119(3-4), pp. 476-486, 2007.
- Hayakawa, Y.S., Matsuta, N., Maekado, A. and Matsukura, Y., Knickpoint

- recession rates for 10 years after the Chi Chi earthquake, Central Taiwan Japanese Geomorphological Union, 34-1, pp. 21-36, 2013.
- Huang, M.W., Pan, Y.W. and Liao, J.J., A case of rapid rock riverbed incision in a coseismic uplift reach and its implications. *Geomorphology*, 184, pp. 98-110, 2013.
- Huang, W.J., Deformation at the leading edge of thrust faults in Philosophy. Purdue University, 2006.
- Huang, W.J., Chen, W.S., Lee, Y.H., Yang, C.C., Lin, M.L., Chiang, C.S., Lee, J.C. and Lu, S.T., Insights from heterogeneous structures of the 1999 Mw7.6 Chi-Chi earthquake thrust termination in and near Chushan excavation site, Central Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), pp. 339-364, 2016.
- Huang, W.J. and Johnson, A.M., Quantitative description and analysis of earthquake-induced deformation zones along strike-slip and dip-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 115(B3), 2010.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A., Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61(1), pp. 5-28, 2010.
- Kelson, K.I., Kang, K.H., Page, W.D., Lee, C.T. and Cluff, L.S., Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, pp. 930-952, 2001.
- Lee, C.T., Kelson, K.I. and Kang, K.H., Hangingwall deformation and its effect to buildings and structure as learned from the Chrlungpu faulting International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake, 2000.
- Lee, J.C., Chen, Y.G., Sieh, K., Mueller, K., Chen, W.S., Chu, H.T., Chan, Y.C.,

- Rubin, C. and Yeats, R., A vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu fault at Wufeng, western Taiwan: structural and paleoseismic implications for an active thrust fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, pp. 914-929, 2001.
- Lee, J.C., Chu, H.T., Angelier, J., Chan, Y.C., Hu, J.C., Lu, C.Y. and Rau, R.J., Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake_ influence from inherited fold belt structures. *Journal of Structural Geology*, 24, pp. 173-192, 2002.
- Lee, J.C., Rubin, C., Mueller, K., Chen, Y.G., Chan, Y.C., Sieh, K., Chu, H.T. and Chen, W.S., Quantitative analysis of movement along an earthquake thrust scarp: a case study of a vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu fault at Wufeng, Western Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(2), pp. 263-273, 2004.
- Lin, A., Ren, Z., Jia, D. and Wu, X., Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 471(3-4), pp. 203-215, 2009.
- Lin, C.W., Lee, Y.L., Huang, M.L., Lai, W.C., Yuan, B.D. and Huang, C.Y., Characteristics of surface ruptures associated with the Chi-Chi earthquake of September 21, 1999. *Engineering Geology*, 71(1-2), pp. 13-30, 2004.
- Lin, M.L., Chung, C.F. and Jeng, F.S., Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, 88(1-2), pp. 70-89, 2006.
- Liu, F. and Yang, S., The effect of the Wenchuan earthquake on the fluvial morphology in the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau: Discussion and speculation. *Quaternary International*, 371, pp. 280-289, 2015.
- McCalpin, J., *Paleoseismology*, ed. J. McCalpin. Vol. 95. 629, 2009.
- Michel, R. and Avouac, J.-P., Coseismic surface deformation from air photos: The Kickapoo step over in the 1992 Landers rupture. *Journal of Geophysical Research*, 111(B3), 2006.

- Ota, Y., Chen, Y.G. and Chen, W.S., Review of paleoseismological and active fault studies in Taiwan in the light of the Chichi earthquake of September 21, 1999. *Tectonophysics*, 408(1-4), pp. 63-77, 2005.
- Ota, Y., Huang, C.Y., Yuan, P., Sugiyama, Y., Lee, Y., Watanabe, M., Sawa, H., Yangida, M., Sasaki, S., Suzuki, Y., Hirouchi, D. and Taniguchi, K., Trenching study at the Tsaotun site in the central part of the Chelungpu fault. *Western Pacific Earth Science*, 1, pp. 487-498, 2001.
- Ota, Y. and Matta, N., The 1999 earthquake fault and its repeated occurrence at the earthquake museum, central part of Chelungpu fault, Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2010.
- Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Sawa, H., Geomorphological identification of pre-existing active Chelungpu Fault in central Taiwan, especially its relation to the location of the surface rupture by the 1999 Chichi earthquake. *Quaternary International*, 115-116, pp. 155-166, 2004.
- Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., Yanagida, M., Miyawaki, A. and Sawa, H., Style of the surface deformation by the 1999 Chichi earthquake at the central segment of Chelungpu fault, Taiwan, with special reference to the presence of the main and subsidiary faults and their progressive deformation in the Tsauton area. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(3), pp. 214-225, 2007.
- Philip, H., Rogozhin, E., Cisternas, A., Bousquet, J.C., Borisov, B. and Karakhanian, A., The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and palaeoseismicity. *geophysics*, 110, pp. 141-158, 1992.
- Sung, Q.C., Fu, J.K., Chyi, S.J. and Tsai, H., Evolution of river terraces along the Lan-Yang river, northeastern Taiwan: a river response to level change. *Journal of the geological society of China*, 42(3), pp. 331-348, 1999.
- Sung, Q.C., Tsai, H., Fu, J.K., Chyi, S.J. and Lee, P.J., Scarp evolution of fan

terraces along the Lanyang river, Taiwan. *Journal of the geological society of China*, 41(4), pp. 581-592, 1998.

Yanites, B.J., Tucker, G.E., Mueller, K.J. and Chen, Y.G., How rivers react to large earthquakes: Evidence from central Taiwan. *Geology*, 38(7), pp. 639-642, 2010.

Yu, G., Xu, X., Klinger, Y., Diao, G., Chen, G., Feng, X., Li, C., Zhu, A., Yuan, R., Guo, T., Sun, X., Tan, X. and An, Y., Fault-Scarp Features and Cascading-Rupture Model for the Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, Eastern Tibetan Plateau, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B), pp. 2590-2614, 2010.

石再添、張瑞津、楊貴三和許民陽，草屯與車籠埔河階群的活斷層與地形面，*中國地理學會會刊*，**13**，12 頁，1985。

石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得和楊貴三，台灣活斷層的地形學研究，師大地地理研究報告，**12**，1986。

何信昌和陳勉銘，五千分之一台灣地質圖說明書，台中圖幅，經濟部中央地質調查所，2000。

何維信，航空攝影測量學，大中國圖書公司，602 頁，1995。

何維信，測量學 第五版，宏泰出版社，555 頁，2004。

沈淑敏、張瑞津和楊貴三，地震地質調查及活動斷層資料庫建置-活動構造地形及資料庫建置分析，經濟部中央地質調查所，2005。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求和陳柏村，台灣中部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所，經濟部中央地質調查所，2008。

林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄和林燕慧，台灣西南部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，經濟部中央地質調查所，2007。

- 林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生和張徽正，臺灣中部濁水溪以南地區的集
集地震斷層與構造分析，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。
- 林朝榮，台灣地形，卷 1，台灣省文獻委員會，424 頁，1957。
- 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶和林慶偉，空載光達數
值地形產製與地質災害的應用，航測及遙測學刊，**18**，93-108 頁，2014。
- 徐金煌和張國楨，以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像之空間資料產製，中國
土木水利工程學刊，**第 27 卷**，241-246 頁，2015。
- 徐婉容，軟岩河床遷急點倒退率模式發展與參數率定，國立交通大學土木工
程學系碩士論文，165 頁，2013。
- 徐鐵良，地質與工程，中國工程師協會，1983。
- 康耿豪，921 集集地震造成之地表變形模式，國立中央大學應用地質研究所
碩士論文，2004。
- 張瑞津和楊貴三，台灣中部活斷層的分布與地形特徵，師大地理研究報告，
35，36 頁，2001。
- 張徽正、林啟文和盧詩丁，九二一地震地質調查報告，經濟部中央地質調查
所，陳肇夏，314 頁，1999。
- 連永旺，大地裂痕，財團法人地工技術研究發展基金會，151 頁，1999。
- 陳文政、朱傲祖和賴典章，石崗壩地區之地震斷層，經濟部中央地質調查所
特刊，**第 12 號**，2000。
- 陳勉銘和何信昌，九二一集集地震斷層與車籠埔斷層之關聯，經濟部中央地
質調查所特刊，**第 12 號**，2000。
- 陳思仁和王成幾，內政部數值地形模型建置現況及加值應用。
- 陳華玟、陳勉銘和石同生，五萬分之一台灣地質圖說明書南投圖幅，經濟部
中央地質調查所，林朝宗，2004。
- 黃文正、陳致言、劉思妤、林燕慧、林啟文和張徽正，台灣中部大甲溪至頭

- 汴坑溪九二一集地震地表破裂模式，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。
- 盧泓佑，1999 集地震引致的河道遷急點倒退速率與倒退機制，國立交通大學土木工程學系碩士論文，119 頁，2012。
- 蕭國鑫、劉進金、游明芳、陳大科、徐偉城和王晉倫，結合空載 LiDAR 與航測高程資料應用於地形變化偵測，航測及遙測學刊，**11(3)**，283-295 頁，2006。
- 石再添、張瑞津、楊貴三和許民陽，草屯與車籠埔河階群的活斷層與地形面，中國地理學會會刊，**13**，12 頁，1985。
- 石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得和楊貴三，台灣活斷層的地形學研究，師大地理研究報告，**12**，1986。
- 何信昌和陳勉銘，五千分之一台灣地質圖說明書台中圖幅，經濟部中央地質調查所，2000。
- 何維信，航空攝影測量學，大中國圖書公司，602 頁，1995。
- 何維信，測量學 第五版，宏泰出版社，555 頁，2004。
- 沈淑敏、張瑞津和楊貴三，地震地質調查及活動斷層資料庫建置-活動構造地形及資料庫建置分析，經濟部中央地質調查所，2005。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求和陳柏村，台灣中部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所，2008。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄和林燕慧，台灣西南部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，2007。
- 林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生和張徽正，臺灣中部濁水溪以南地區的集地震斷層與構造分析，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。

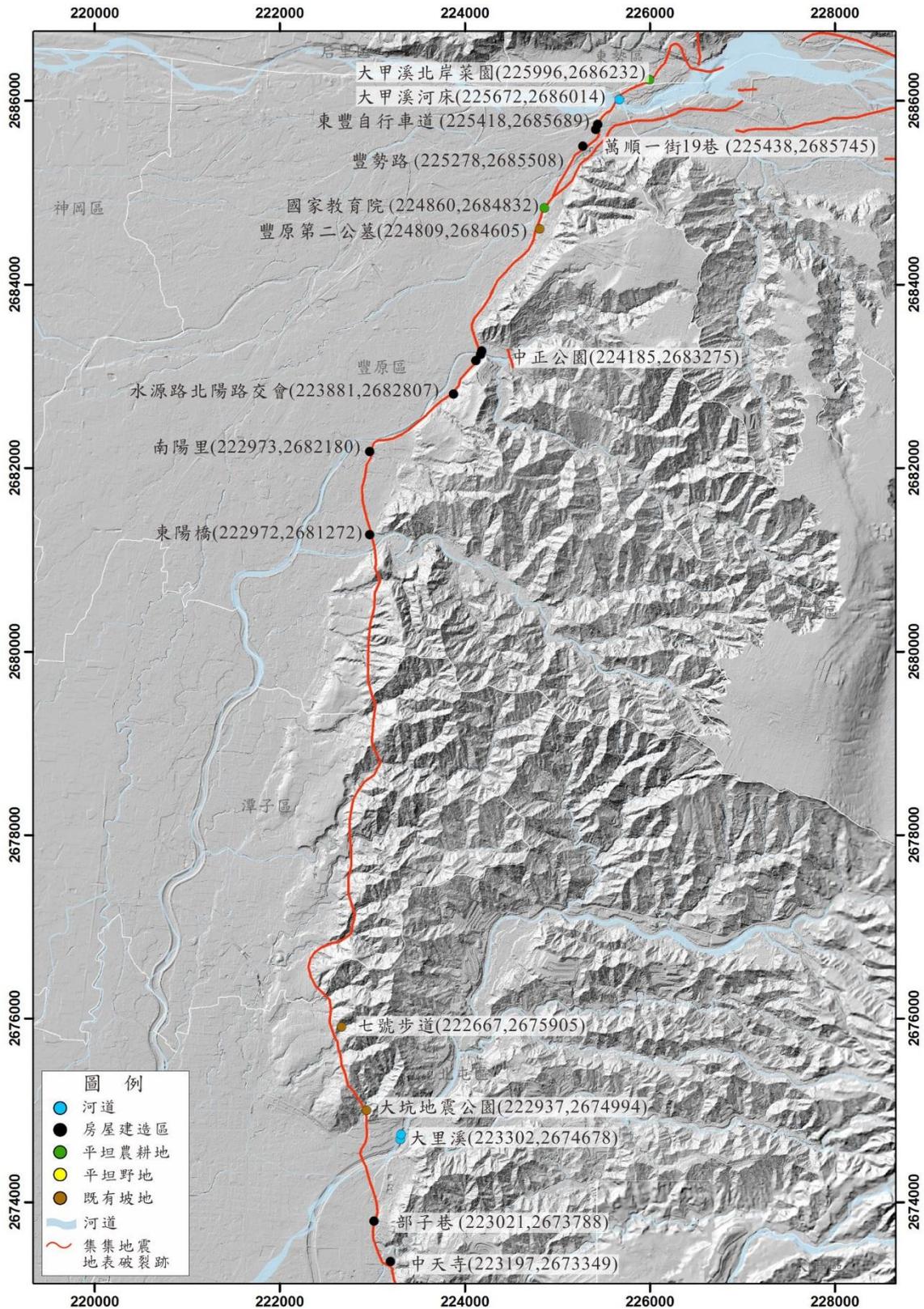
- 林朝榮，台灣地形，卷 1，台灣省文獻委員會，424 頁，1957。
- 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶等人，空載光達數值地形產製與地質災害的應用，航測及遙測學刊，**18**，93-108 頁，2014。
- 徐金煌和張國楨，以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像之空間資料產製，中國土木水利工程學刊，**第 27 卷**，241-246 頁，2015。
- 徐婉容，軟岩河床遷急點倒退率模式發展與參數率定，國立交通大學土木工程學系碩士論文，165 頁，2013。
- 徐鐵良，地質與工程，中國工程師學會，1983。
- 康耿豪，921 集集地震造成之地表變形模式，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，2004。
- 張瑞津和楊貴三，台灣中部活斷層的分布與地形特徵，師大地理研究報告，**35**，36 頁，2001。
- 經濟部中央地質調查所，九二一地震地質調查報告，經濟部中央地質調查所，314 頁，1999。
- 連永旺，大地裂痕，財團法人地工技術研究發展基金會，51 頁，1999。
- 陳文政、朱傲祖和賴典章，石崗壩地區之地震斷層，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。
- 陳勉銘和何信昌，九二一集集地震斷層與車籠埔斷層之關聯，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。
- 陳思仁和王成幾，內政部數值地形模型建置現況及加值應用。
- 陳華玟、陳勉銘和石同生，五萬分之一台灣地質圖說明書，南投圖幅，經濟部中央地質調查所，2004。
- 黃文正、陳致言、劉思妤、林燕慧、林啟文和張徽正，台灣中部大甲溪至頭汴坑溪九二一集集地震地表破裂模式，經濟部中央地質調查所特刊，**第 12 號**，2000。

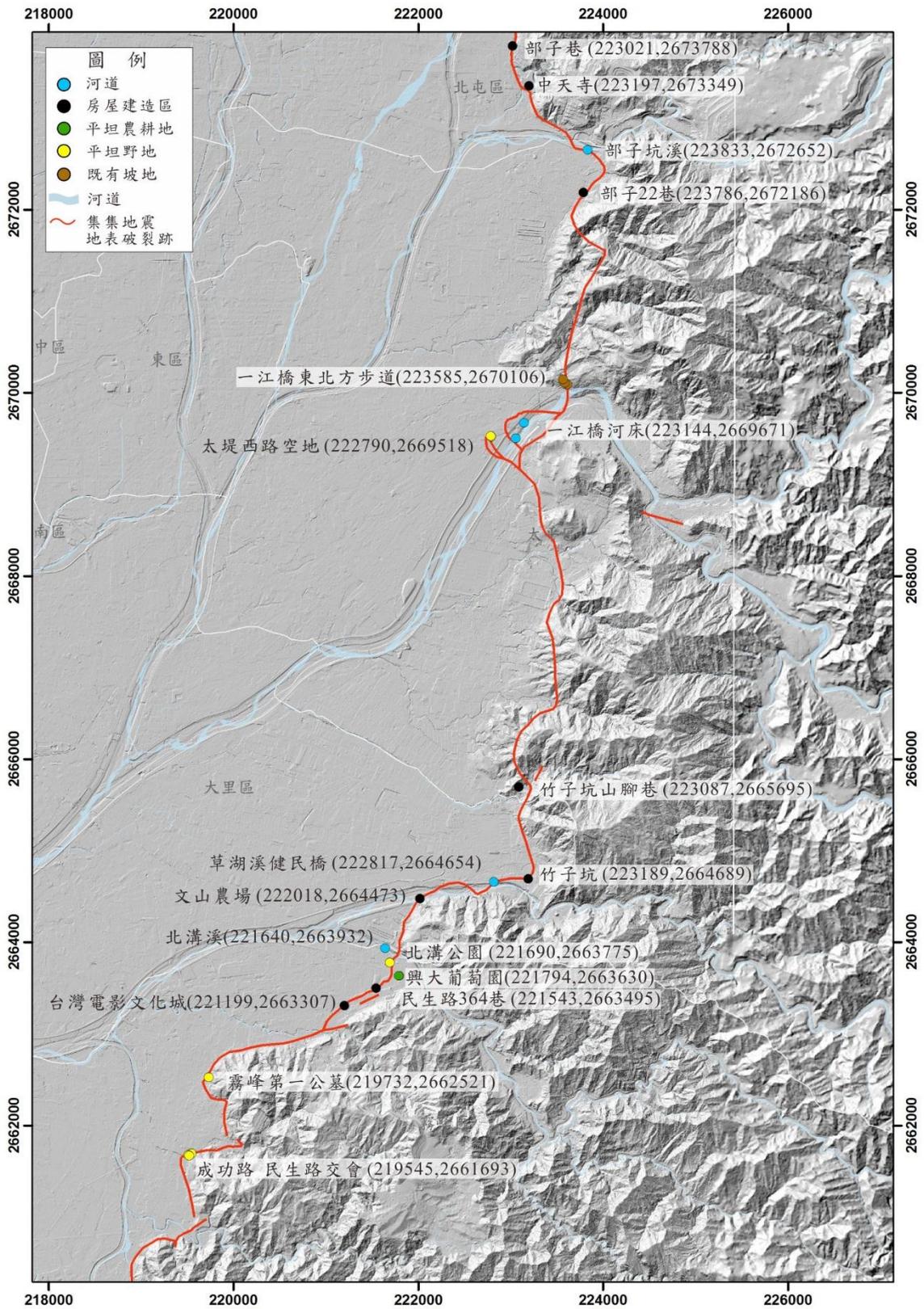
盧泓佑，1999 集地震引致的河道遷急點倒退速率與倒退機制，國立交通大學土木工程學系碩士論文，119 頁，2012。

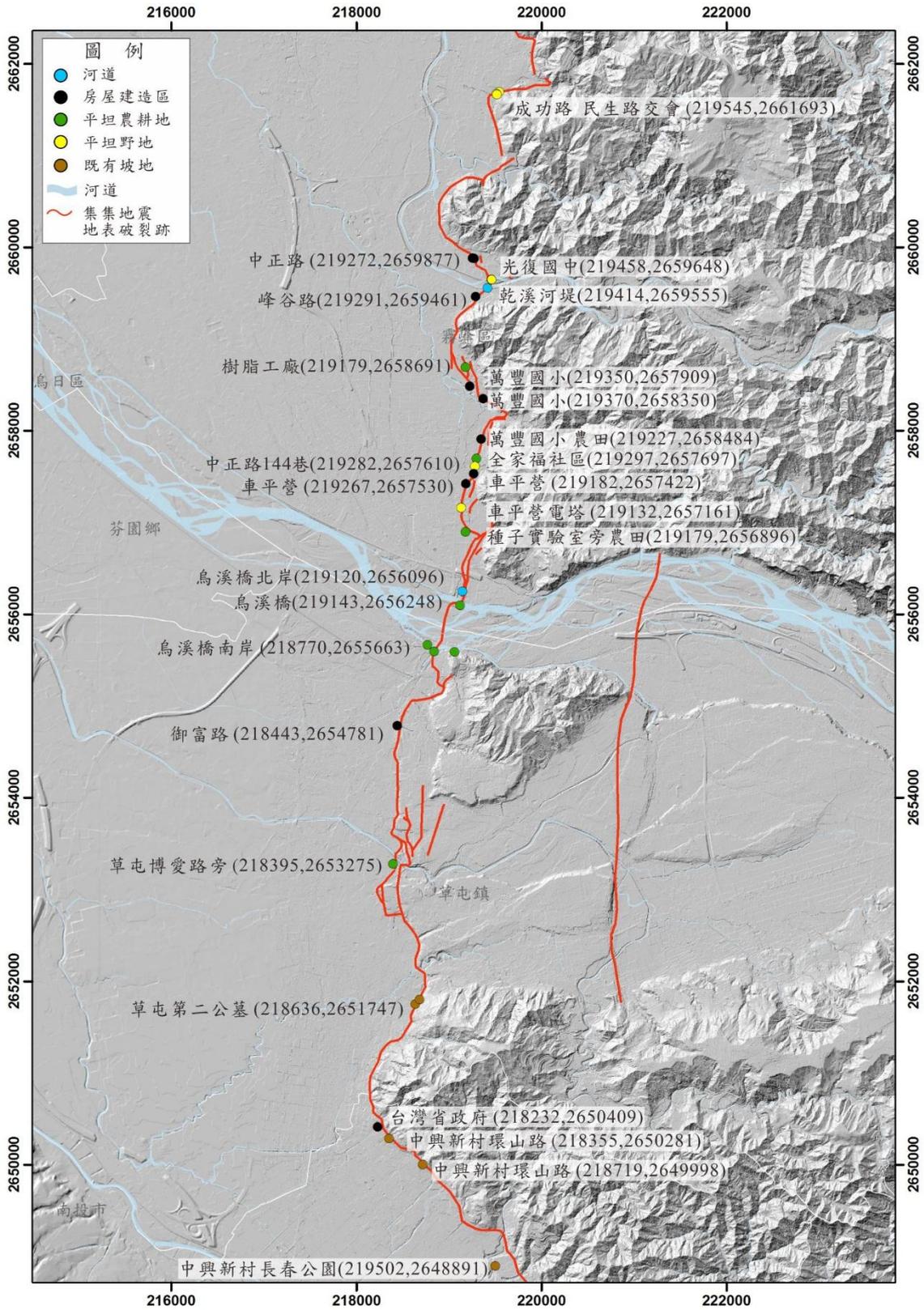
蕭國鑫、劉進金、游明芳、陳大科、徐偉城和王晉倫，結合空載 LiDAR 與航測高程資料應用於地形變化偵測，航測及遙測學刊，**11**(3)，283-295 頁，2006。

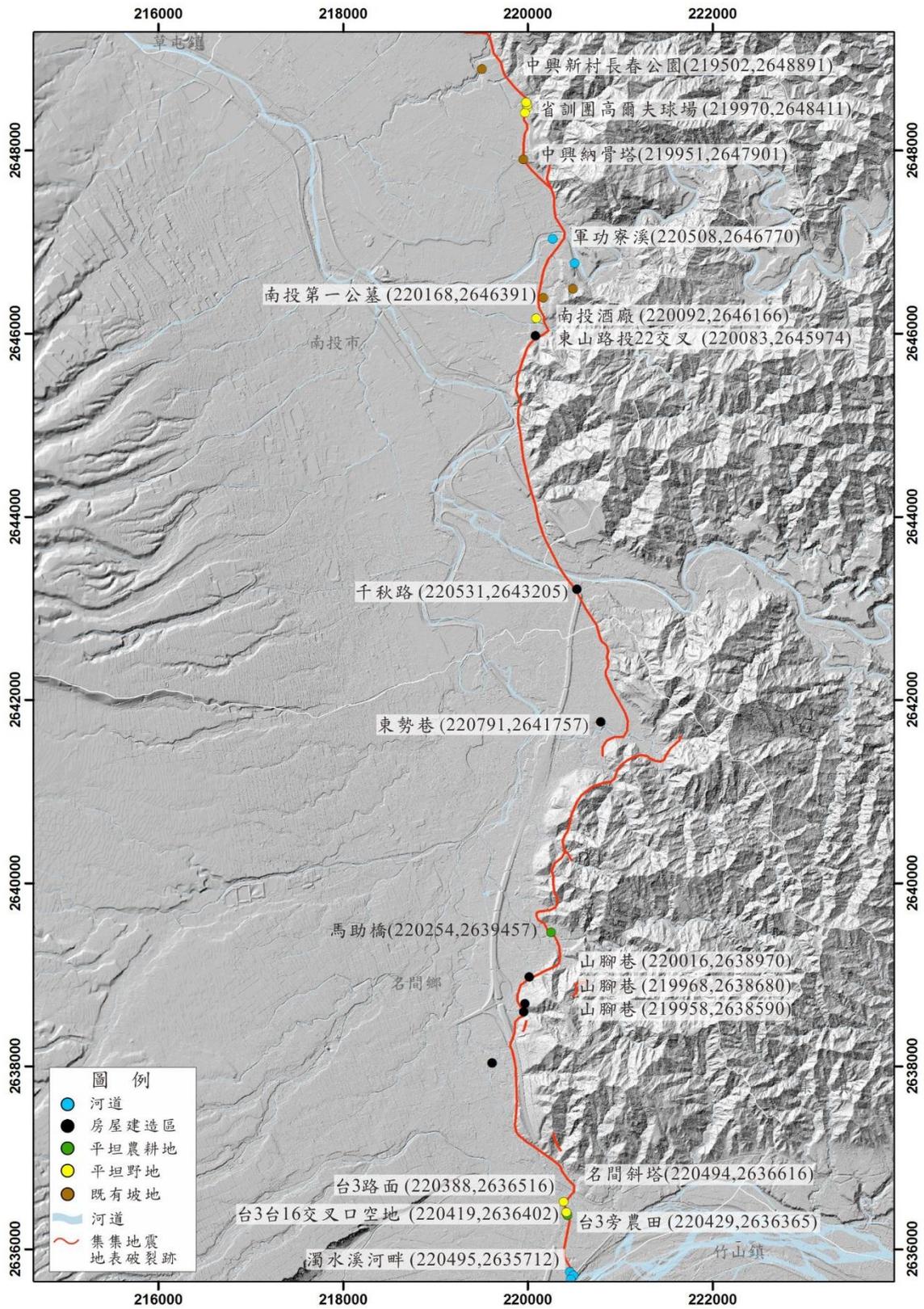
附錄

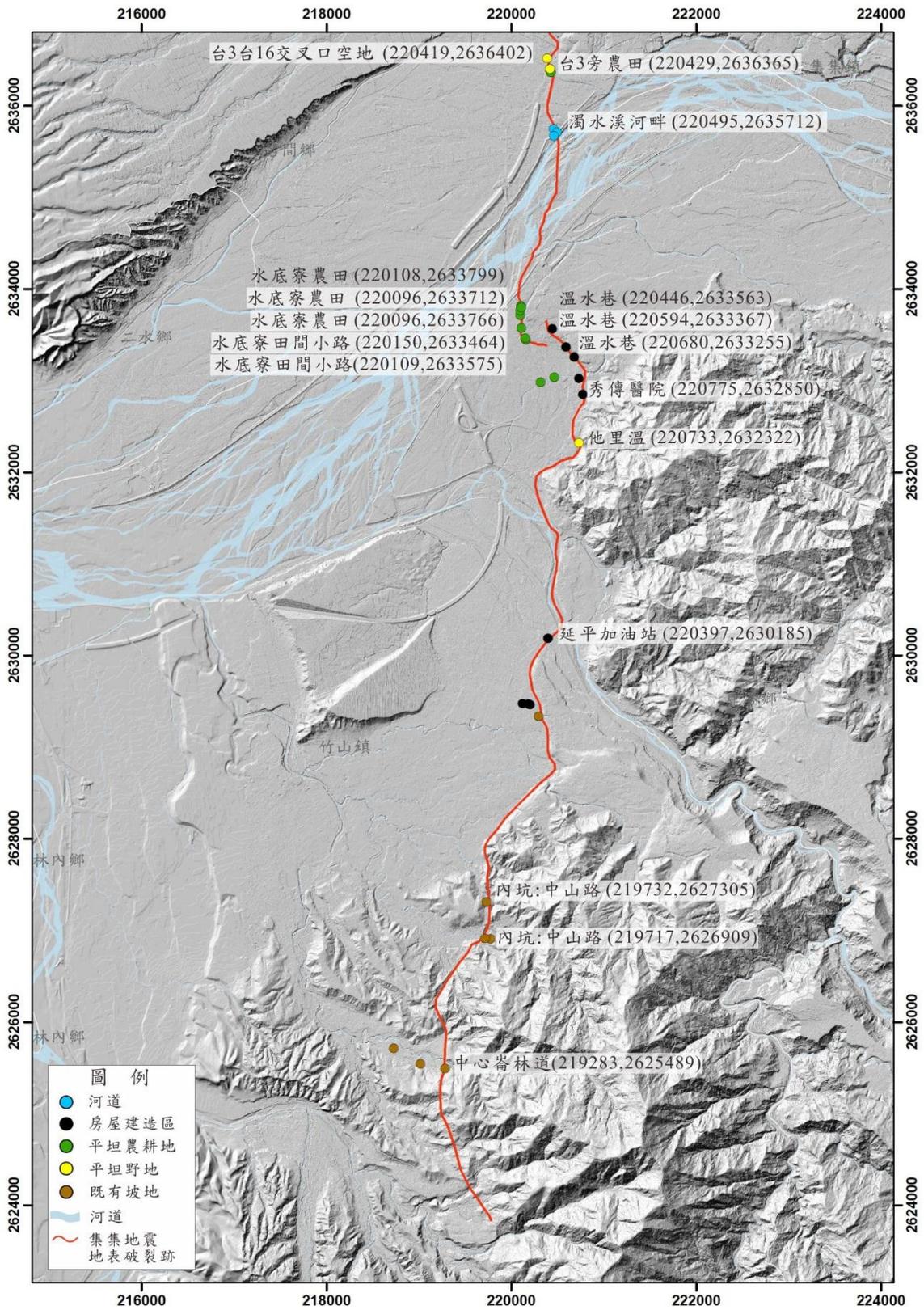
A. 野外調查點位及分類圖





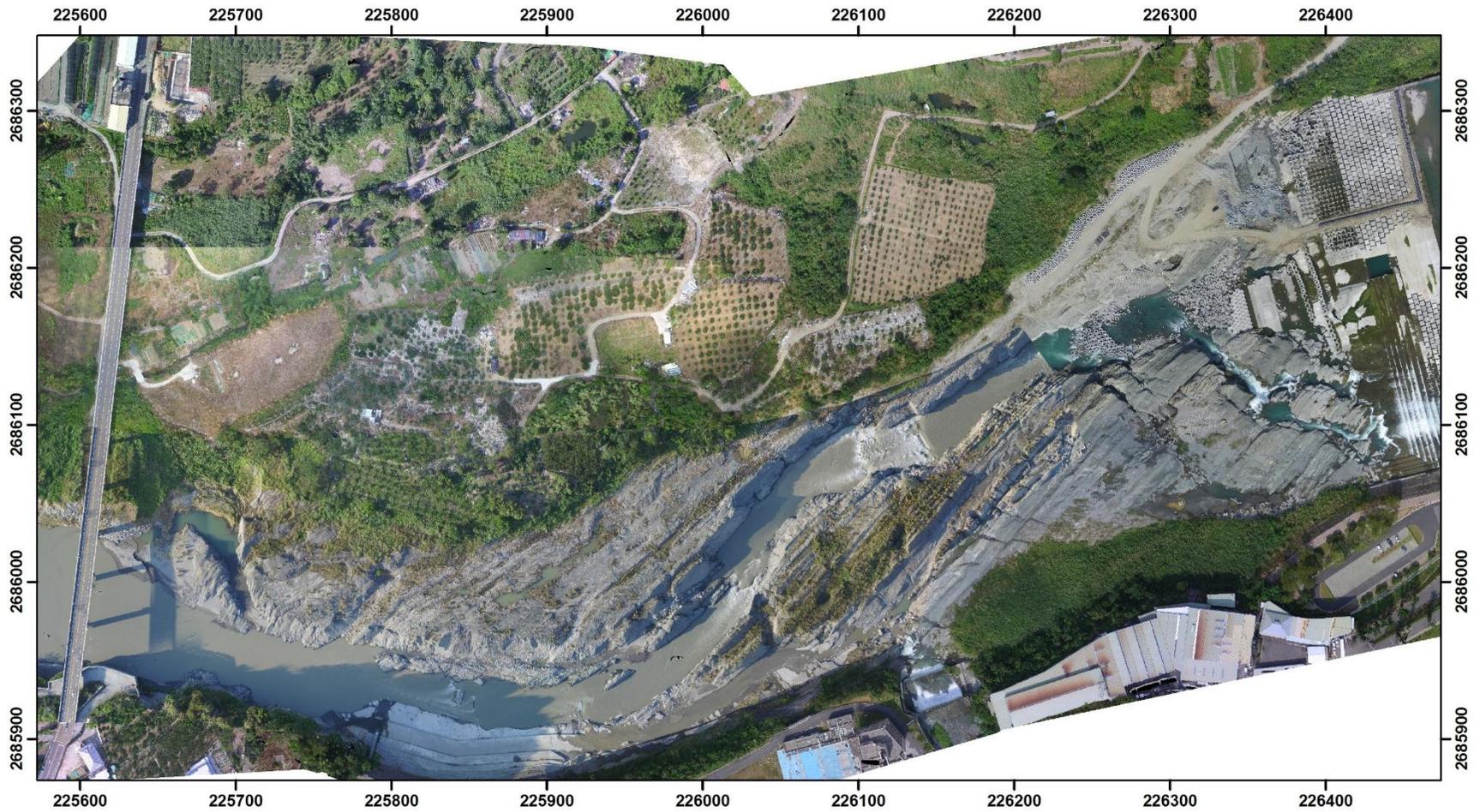




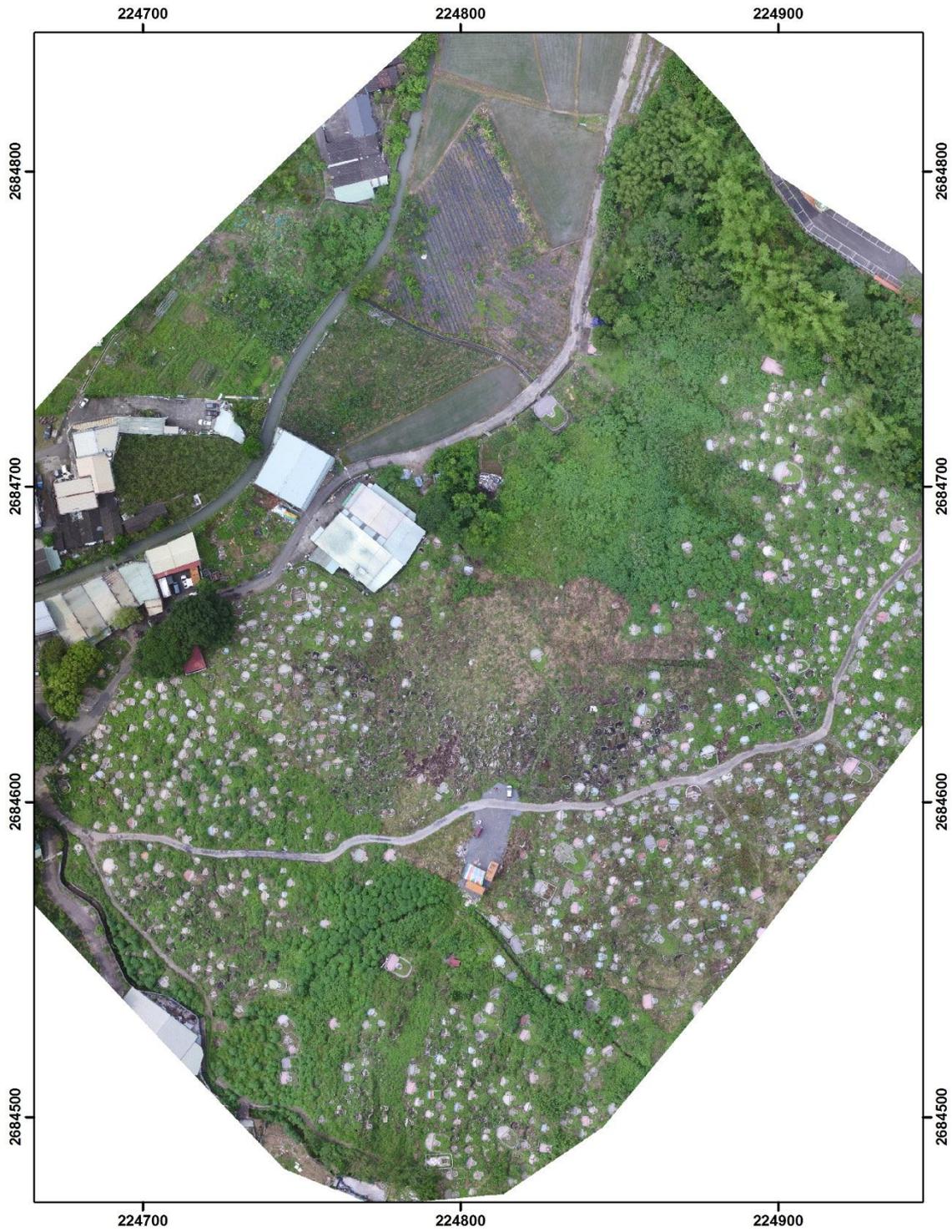


B. 正射影像

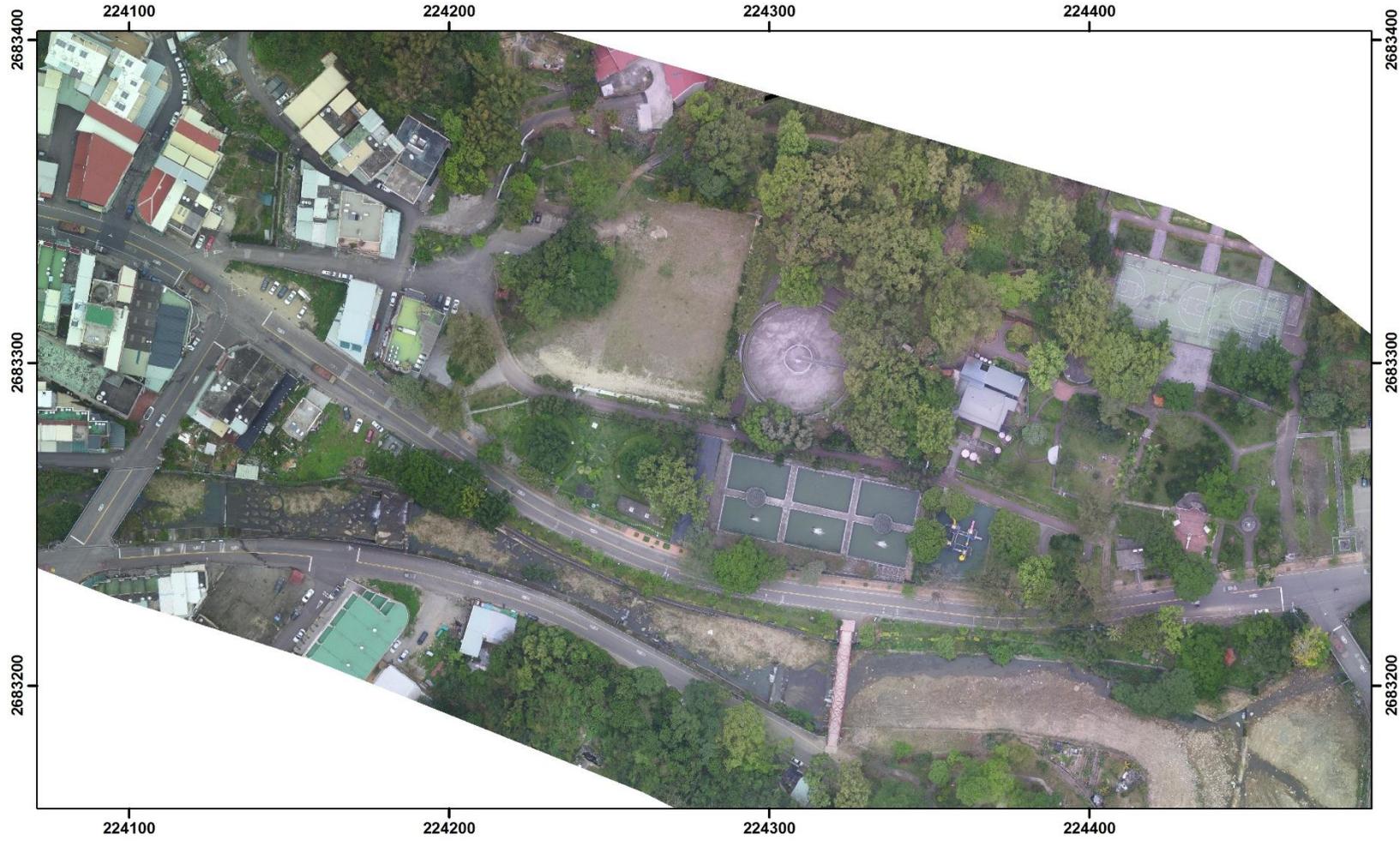
- 大甲溪埤豐橋



● 豐原第二公墓



- 豐原中正公園



● 霧峰興大葡萄園



● 竹山水底寮

