國立中央大學

地球科學學系 碩士論文 Department of Earth Sciences National Central University Master Thesis

東勢背斜與集集地震大安溪河床隆升機制與關聯性探討

Forming mechanisms and relation of Chi-Chi earthquakeinduced uplift reach of Taan river to Tungshih anticline

研究生:徐毓呈 Student: Yu-Cheng Hsu 指導教授:黃文正 博士 Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國 一百零九 年 六 月 June, 2020

國立中央大學圖書館學位論文授權書

2019.9版

· 1 單日期:109/08/06

授權人姓名		學 號	106622003	
系所名稱	地球科學學系	學位類別	☑碩士 □博士	
論文名稱	東勢背斜與集集地震大安溪河床隆升機制 與關聯性探討	指導教授	黄文正	

學位論文網路公開授權

授權本人撰寫之學位論文全文電子檔:

·在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」.

()同意立即網路公開

()同意 於西元_____年____月____日網路公開

()不同意網路公開,原因是:___

· 在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

(√)同意立即網路公開

()同意 於西元____年___月___日網路公開

()不同意網路公開,原因是:___

依著作權法規定,非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統與國家圖書館,不限地域、時間與次數,以文件、錄影帶、錄音帶、光碟、微縮、數位化或其他方式將上列授權標的基於非 營利目的進行重製。

(2原囚)已申請專利並檢附證明,專利申請案號:
()準備以上列論文投稿期刊
()涉國家機密
()依法不得提供,請說明:
・公開	月日期 :西元年月日
 ・公開 ※繳ジ 延後公 	月日期:西元年月日 ₹教務處註冊組之紙本論文(送繳國家圖書館)若不立即公開,請加填「國家圖書館學位論 ↓開申請書」
 ・公開 ※繳 ※繳 延後 	月日期:西元年月日 足教務處註冊組之紙本論文(送繳國家圖書館)若不立即公開,請加填「國家圖書館學位論 ☆開申請書」

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

<u>地球科學</u>學系/研究所<u>條無主</u>研究生所提之論 文<u>東勢特科與集集地震大安決河东隆升機利樂闌連性探討</u> 係由本人指導撰述,同意提付審查。

指導教授 黄文正 (簽章)

109年7月14日

104.07.24

國立中央大學碩士班研究生

論文口試委員審定書

<u>地球科學</u>學系/研究所<u>徐毓呈</u>研究生所提之論文 東勢背斜與集集地震大安溪河床隆升機制與關聯性探討 經本委員會審議,認定符合碩士資格標準。



中華民國 109年 7月 17日

東勢背斜與集集地震大安溪河床隆升機制與關聯性探討

徐毓呈

摘要

西元 1999 年發生規模 7.3 的集集大地震, 位於車籠埔斷層地表破裂跡 北端的東勢背斜大安溪段河床面受到同震抬升,當時最大垂直抬升量達 10 公尺, 背斜東翼河道抬升量約為 6.5 公尺, 西翼河道垂直抬升量約為 4 公 尺,河道的平衡基準面因此而改變,伴隨著多次的清淤與颱風加速河道下切, 漸而形成如今的大安溪峽谷,峽谷兩側的谷壁與大安溪南岸的吊神山山壁, 使我有機會清晰描繪東勢背斜出露地表的剖面。根據當時地調所調查集集 地震地表破裂跡結果顯示,東勢背斜東翼有明顯的地表破裂跡,而西翼並無 明顯的地表破裂跡,推測經由大安溪的下切而出露的較深部岩層中能觀察 到過去被深掩<mark>地</mark>構造。有關此區域之同震抬升,前人提出斷層作用、褶皺作 用以及複合型等三種不同的機制。本研究使用無人飛行載具 (UAV) 建構大 安溪峽谷的三維點雲模型,並製作空照正射圖與西北-東南向的大安溪峽谷 垂直剖面正射影像與空照正射圖,結合詳細的野外調查結果繪製出現今大 安溪峽谷的區域岩性構造分布圖與東勢背斜出露地表部分的剖面。利用無 人機繪製出的剖面、深井井測及震測剖面,建構出東勢背斜的完整形貌,分 析後認為其為一基底滑脫褶皺,主要以共軛褶皺的機制形成,而河床同震地 變的型貌推測是受到既存的地質構造影響,主要是以共軛褶皺作用為主,輔 以斷層作用,載荷為地下約1公里的基底滑脫斷層的瞬間錯移,此次集集 地震的同震地變的確促使了東勢背斜的增長。

闌鍵字:活動背斜、東勢背斜、同震地變、活動斷層

i

Forming mechanisms and relation of Chi-Chi earthquake-induced uplift reach of Taan river to Tungshih anticline

Hsu, Yu-Cheng

Abstract

The Chi-Chi earthquake was an M_L 7.3 earthquake resulted in the Chelungpu fault in central Taiwan in 1999. The Taan River valley crosses the Tungshih anticline, which is located at the northern end of the Chelungpu fault rupture. The river reach has been uplifted during the Chi-Chi earthquake. The coseismic deform of the river profile is gently decrease in the west, a sharp decrease in the east. The maximum vertical displacement of the river bed was 10 m. The vertical displacements were 6.5 m on the eastern fold limb and 4 m on the western fold limb. This coseismic uplift disturbed the dynamic equilibrium of the fluvial system. Typhoons and river dredging accelerated the incision. After two decades of rapid incision, the river bed became the Taan gorge. The cliffs of the gorge and the Diaoshan Mountain, on the south riverbank, allow me to sketch the exposed geological profile of the Tungshih anticline. According to the survey report of the Chi-Chi earthquake surface rupture from Taiwan Central Geological Survey, there was an obvious surface rupture on the western limb.

Three mechanisms were proposed to explain the Chi-Chi earthquake-induced uplift in this area: which is faulting, folding, and combination of both. The analysis of the newly exposed outcrops of the Taan Gorge should allow me to discriminate between these proposed models. I used UAV (unmanned aerial vehicle) to construct the 3D point cloud model of the Taan gorge. And export the aerial image and NE-SW profile of the Taan gorge and Diaoshan Hill cliff. I combined field data and images from UAV to construct the regional lithology map. Then, I built a geological profile across the Tungshih anticline integrating structural data based on field measurements and the UAV 3D point cloud, a deep well log, and a seismic image profile. My result indicates that the Tungshih anticline is an asymmetric detachment fold, and mainly resulting from the mechanism of (conjugate) folding and the formation reach uplift were strongly influenced by the existing structures and formed via mainly conjugate folding and partly faulting under the loading of sudden slip along the detachment fault at a depth around 1 km. The earthquake-induced uplift participated in the growth of the Tungshih anticline.

Keywords: active anticline, Tungshih anticline, coseismic ground deformation, active fault

致謝

最先要感謝的,是我的指導教授,黃文正老師,在這三年的碩士期 間,除了指導我做研究的方法與方向,與許多學科的知識與理論,最重要 的是不厭其煩的教導我許多做人處事的態度及方式。感謝老師百忙之中督 促並幫助我完成論文研究,少了您的幫助,我興許還會走上許多彎路。感 謝師母 Maryline 於研究方面給了我許多建議,並指導我修正論文及口試投 影片中英文的文法與用詞的錯誤。

感謝目前研究室最老的學長奕維,在做圖及研究方面給我的建議,讓 我少了許多修正錯誤的時間。感謝承恩在無人機方面的教學及訓練,雖然 當時學的有點痛苦,但事後回想,你的訓練方式是對的。感謝畢業的彥如 及于鈞,在我剛進來時各種問你們煩你們,助我從零學起實驗室的必備軟 體。謝謝雅筑在野外及課程中,我剛開始毫無頭緒時適時的給予建議及幫 助。謝謝志偉提著我沒有用到的 RTK 在野外陪我走了一天河谷。謝謝 Tri、廷瑜、中威、育誠協助我出野外,完成資料的收集。

最後要謝謝我的家人,於背後支持我念完碩士,於低潮時給予我安 慰,讓我能夠無憂的完成碩士。感謝一路上幫助過、接觸過的人,沒有你 們,不會成就今天的我。

目錄

摘要	.i
Abstract	ii
目錄	v
圖目錄	'ii
表目錄	ix
一、 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機與目的	3
二、 區域概況	6
2-1 地形	6
2-2 地質概況	8
2-3 東勢背斜1	.0
三、 集集地震北段的同震變形]	1
3-1 地表破裂和變形]	1
3-2 大地測量資料1	.6
四、 研究方法2	20
4-1 無人飛行載具空拍影像處理2	20
4-2 野外地表地質調查方法2	23
4-2-1 河床中視尺度構造岩性地質圖與立面描繪2	23
4-2-2 褶皺軸位態之投影圓分析2	25
4-3 從點雲模型計算層面位態2	28
五、 研究成果	\$1

	5-1	中視構造	31
	5-2	大安溪峽谷區域岩層分布	41
	5-3	大安溪峽谷正射影像描繪及投影	45
	5-4	· 大安溪峽谷剖面繪製	50
六、		討論	54
	6-1	同震地表變形的機制	54
	6-2	東勢背斜的形成機制	57
セ、		結論	63
八、		參考文獻	65
九、		附錄	68

圖目錄

圖	1 集集地震地表破裂跡北段區域地質圖與同震位移量	4
圖	2 三種不同的大安溪河床同震抬升機制	5
圖	3 中台灣卓蘭-豐原地區的地形圖	6
圖	4 大安溪鄰近區域地形圖	7
圖	5 卓蘭層中常見的化石及沉積紋理	9
圖	6 震後地表破裂紀錄照片位置	.12
圖	7 埤豐橋及石岡壩震後破裂情形	.13
圖	8 震後地表破裂紀錄照片(一)	.14
圖	9 震後地表破裂紀錄照片(二)	.15
圖	10 大安溪震後河床抬升情形	.17
圖	11 近吊神山之大安溪河床兩側區域垂直抬升剖面	. 18
圖	12 本研究空拍執行流程	.21
圖	13 本研究使用的無人機	.21
圖	14 控制點噴繪	.22
圖	15 RTK 測量並紀錄控制點座標	.22
圖	16 層面位態測量與層厚紀錄	.24
圖	17 圓柱形褶皺面與 π 極點之幾何關係	.26
圖	18 褶皺軸與褶皺軸面空間幾何關係	.27
圖	19 層面測量範例	.30
圖	20 層面與水平面相交示意圖	.30
圖	21 卓蘭大安溪峽谷	.33
圖	22 中層及厚層砂岩中的節理	.33

圖	23	大安溪峽谷中游西北-東南向斷層	35
圖	24	吊神山山壁上斷層	36
圖	25	吊神山山壁於集集地震破裂跡兩側的岩層層序不同	37
圖	26	集集地震破裂跡與吊神山山壁上斷層	38
圖	27	峽谷下游及上游集集地震破裂跡經過位置	38
圖	28	南岸及北岸位態變化轉折點	39
圖	29	南岸及北岸背斜軸露頭	40
圖	30	區域岩性圖	43
圖	31	大安溪峽谷南岸與北岸影像之詳細岩層分佈描繪與沿兩岸層面位	態
		延伸之東勢背斜幾何形貌	46
圖	32	吊神山山壁岩層描繪與東勢背斜幾何形貌	48
圖	33	吊神山山壁上位態	51
圖	34	河岸層面計算之褶皺軸位態與山壁層面計算之褶皺軸位態	52
圖	35	山壁與河岸立面描繪沿不同褶皺軸投影之結果	53
圖	36	三個符合地質背景的構造解釋模式	56
圖	37	前人建構的橫跨東勢背斜區域性剖面的截圖	59
圖	38	不同角度與深度下的盲斷層所造就的褶皺形貌	60
圖	39	本研究認為的東勢背斜幾何形態及集集地震地變之抬升機制解釋.(61

表目錄

表 1 大安溪峽谷區域層序及大致層厚......41

一、 緒論

1-1 前言

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的碰撞帶上,菲律賓海板塊每年 以約8公分之速率向西北方向運動,與歐亞大陸板塊碰撞與擠壓使得台灣 本島抬升,並由東向西產生一系列之褶皺與斷層,因此造成頻繁的地震活動。

民國八十八年九月二十一日凌晨,發生了芮氏規模 7.3 的集集地震,此 地震的震源位於南投縣集集鎮附近(東經 120.816 度,北緯 23.853 度)的地下 約八公里處(王錦華,2005),地震為一具有走滑分量的逆斷層錯動所致,破 裂沿車籠埔斷層跡發展,向南至竹山鎮桶頭附近,向北到達台中市豐原區附 近,而後向東,續轉偏北方向破裂,直到苗栗縣的卓蘭鎮。

集集地震的北端區段,破裂跡分布較豐原以南複雜許多,於豐原以南為 南北向之單一破裂跡,過豐原以後,轉分為二或三道沿大甲溪河床向東發 展,直至遇東勢背斜後轉為東北東向,沿背斜軸跡兩側於背斜兩翼平行發 展,往東北延伸至卓蘭鎮。於集集地震破裂跡北端的東勢背斜與東勢背斜相 鄰的大安溪河床,即如今的大安溪峽谷,河床於地震時最大垂直抬升量約達 10 公尺,隆升河床東側河道相對垂直抬升量約為 6 公尺(經濟部地質調查 所,2000),西側河道相對垂直抬升量約為 4 公尺(李元希等,2000)。此段河 床的東南方約兩公里處,GPS 的同震資料亦顯示有向西北約 8.54 公尺的水 平位移量(圖一),由於河床的快速隆升,使河道上游形成堰塞湖(經濟部中央 地質調查所,2000),經由後日多次的河道清淤與颱風的沖刷,河道下切超 過 10 公尺(Huang *et al.*,2013),形成今日的大安溪峽谷。

大安溪河床的同震抬升機制,前人研究提出了三種不同的機制解釋,第

1

一個是李建成等(Lee et al., 2002)所提的由一逆衝斷層與一背衝斷層所構成 的突起構造(Pop-up structure),兩斷層分別錯動而使得此段河床抬升(圖 2a)。 第二個是陳于高等(Chen et al., 2007)所提的褶皺隆升作用(圖 2b 左),這作用 我們認為雷同於共軛急折褶皺作用(conjugate kink folding)或簡稱共軛褶皺 作用,此作用如圖 2b 右中所示,兩側急折帶中之岩層的相對錯移作用,使 得急折帶中間的地塊相對向上抬升,而急折帶兩側的剪動方向與於急折帶 間的相對層間滑移方向剛好相反,亦即左剪對右剪,右剪則對左剪(Price and Cosgrove, 1990; Huang and Liang, 2012)。第三個是李元希等(2000)所描述的, 東南側變形為高 5-6 公尺斷層崖,以斷層作用為主,西北側為寬廣撓曲崖, 以褶皺作用為主(圖 2c)。

1-2 研究動機與目的

大安溪歷經 20 餘年的侵蝕下切,隆升的河道轉變為現今十數公尺高的 峽谷地形, 嶄露出當時未可見的地下構造,本研究利用無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)拍攝並使用 Pix4Dmapper 軟體製作山谷模 型,生成河谷與吊神山山壁立面影像,將兩者結合以建立東勢背斜出露地表 之剖面形貌,重新審視前人對大安溪河床同震抬升機制所提出的三種模型, 再利用深井及震測剖面資料,繪製地下地質構造剖面,以利探討集集地震的 同震抬升機制與東勢背斜的形成之關聯性。



圖 1 集集地震地表破裂跡北段區域地質圖與同震位移量

地質圖修改自中央地質調查所五萬分之一地質圖。同震位移量資料參考自 Yu *et al.*(2001)。 Fig. 1. Geologic map and coseismic displacements of the northern section of Chi-Chi earthquake ruptures. The map is modified from the 1:50,000 scale geologic map published by Taiwan Central Geologic Survey in 2000 and the data of co-seismic displacements are from Yu *et al.* (2001).



圖 2 三種不同的大安溪河床同震抬升機制

(a)以斷層作用為主的突起構造(pop-up structure)。(b)以褶皺作用為主的共軛急折褶皺。(c)東翼以斷層作用為主,西翼以褶皺作用為主的複合型。

Fig. 2. Three kinds of mechanisms for the coseismic reach uplift. (a) Faulting (Pop-up) (b) Folding (conjugate fold) (c) Faulting and folding

二、 區域概況

2-1 地形

本研究區域位於苗栗縣卓蘭鎮與台中市東勢鎮交界地大安溪河床上。 大安溪流貫東勢背斜,為苗栗縣境內最大的河流,亦是苗栗縣與台中市的 界河,發源於雪山山脈之大霸尖山西側,向西流至東陽山北麓與支流馬達 拉溪會合後,始稱大安溪,流經泰安、卓蘭、三義、苑裡、大甲流入台灣 海峽。過卓蘭鎮坪林里後,轉向西流,河床逐漸寬闊,沿岸出現河階臺地, 在卓蘭鎮內灣里以下發展成沖積平原,直至西部海岸。大安溪往北過卓蘭 鎮是苗栗丘陵,往南即為大安溪與大甲溪的分水嶺-海拔 594 公尺的吊神 山,吊神山往南是大甲溪,再往南為新社臺地群(圖 3、圖 4)。



圖 3 中台灣卓蘭-豐原地區的地形圖

Fig. 3. Topography of Cholan-Fengyuan region, central Taiwan



圖 4 大安溪鄰近區域地形圖

Fig. 4. Topography of Taan river basin, central Taiwan

2-2 地質概況

就何春蓀(1997)地質分區而言,東勢背斜位處西部麓山帶中,出露的岩 層主要屬卓蘭層(鳥居敬造,1935)。於河谷與山壁上的調查結果顯示,岩性 以砂泥互層或砂頁岩互層為主,砂岩層厚數十公分至二、三公尺,淺灰色細 粒;泥頁岩層厚約數十公分至五十公分,呈青灰色與深灰色。砂頁與砂泥互 層間偶有五公尺或以上之厚層砂岩與厚層泥岩出現;所觀察到的砂岩中,偶 爾可見局部被鐵液浸染而呈橘紅色,其中亦可見貝類與沙棒生痕化石及豐 富的交錯層理(圖 5),於中至厚層砂岩普遍有發育頗為發達的節理組,於峽 谷中所觀察到的岩層相較質地鬆軟,易受沖刷侵蝕。對照上述之觀察結果, 與東勢地質圖幅說明書(李錦發 2000)中所描述之卓蘭層上部岩段特徵吻合。 故推斷本研究區域中之岩層屬上部卓蘭層。

圖 5 卓蘭層中常見的化石及沉積紋理

(a)碳化樹根 (b)交錯層及砂岩局部被鐵液浸染而呈橘紅色 (c)砂棒生痕化石 (d)貝殼化石

Fig. 5. Common fossils and sedimentary structures in Cholan formation. (a) Carbonization roots(b) Crossbedding and partial orange color caused by iron-rich fluids in sandstone (c)Echnofossils (d) Shell fossils

2-3 東勢背斜

東勢背斜為大區域石圍牆向斜構造中的中視背斜,於東勢背斜東側是 與其同級的內灣向斜(圖 1),集集地震北端的兩條破裂跡分夾其兩翼,北 起苗栗縣卓蘭鎮經過大安溪,與大安溪和大甲溪的分水嶺-吊神山,至大 甲溪北岸,呈東北-西南走向(圖 3)。除本身位於集集地震北端地表破裂跡 之間外,亦位在兩活動斷層架構的斷塊上,東側與西側分別有大茅埔雙冬 斷層與三義斷層。

三、 集集地震北段的同震變形

集集地震造成了百公里長的破裂跡,而於埤豐橋以東的地表破裂,向東 變形帶變為1至2公里寬(李元希等,2000),且破裂方向轉為東西走向,往 東延伸至內灣地區後轉為東北走向,此轉為東北向破裂區域即為本研究區。

3-1 地表破裂和變形

本章節會將集集地震破裂跡北端埤豐橋以東的震後地表破裂紀錄照片 整理於此,主要為節錄經濟部中央地質調查所,2000:

- 圖 7b: 斷層通過石岡壩體,東側為升側,垂直落差 9.8 公尺,視左移 1.7 公 尺。
- 圖 7c: 斷層通過埤豐橋南端,南側橋頭斷落,將大甲溪南側及河床抬升約 6.5 公尺(陳文山, 2009),於大甲溪河床形成瀑布。
- 圖 8a: 斷層通過加油站,北側為升側,崖高約3到4公尺。
- 圖 8b: 斷層通過豐勢橋,造成橋梁損毀,橋墩呈東高西低,落差約1公尺, 導致豐勢橋下游的溪水堰塞。
- 圖 8c: 萬安村的舊石岡火車站隆起抬升,南側為升側,以自行車道為基準, 垂直落差 3.5 公尺,水平視左移 3.2 公尺。
- 圖 8d: 九房厝地區一民房遭到抬升隆起,南側為升側,以道路為基準,垂直 落差4公尺,水平視右移2公尺。
- 圖 8e: 地表破裂經過沙連墩地區養雞場西北方 200 公尺的小路,南側為升

側,以小路為基準,垂直落差約4.3公尺,水平視左移4公尺。圖 8f: 石圍橋西南端橋面因斷層通過而崩塌,此點斷層崖並不明顯,向西延

伸,斷層崖逐漸明顯,區域性抬升約5至6公尺。 圖 8g: 地表破裂以西南向經過自行車道,造成北側撓曲上抬,落差約2.8公 尺。

圖 8h: 地表破裂以北偏東 40 度切過校栗埔民誠宮附近的東蘭路, 東側為升

側,垂直落差約4.5公尺,水平視左移0.8公尺。

- 圖 9a: 校栗埔橋南側遭抬升約 0.5 公尺,此區以西變形以撓曲為主。
- 圖 9b: 橫跨沙連溪的興隆橋北岸果園被抬升約4公尺,北側為抬升側。
- 圖 9c: 吊神山電視轉播站西側處可見地面隆起,水泥路面遭拱彎破壞,抬升約1至2公尺。
- 圖 9d: 內灣社區內的苗 58 號道遭斷層以北偏東 60 度經過,西側為升側, 垂直落差約 4.5 公尺,無明顯水平位移。
- 圖 9e: 內灣地區果園附近地表隆升抬起,西側為升側,垂直抬升約6公尺。 圖 9f: 卓蘭鎮食水坑地區,地表及路旁河道被彎曲拱起,拱升高度約5至6 公尺,造成老莊溪溪水堰塞,使食水坑地區積水嚴重。

圖 6 震後地表破裂紀錄照片位置。(修改自經濟部中央地質調查所, 2000) Fig. 6. Location map of the Chi-Chi EQ rupture field photographs shown in Figs. 6 to 9.

- 圖 7 埤豐橋及石岡壩震後破裂情形。(摘自連永旺, 1999)
- Fig. 7. Damage of Pifeng bridge and Shigang reservoir after earthquake.

圖 8 震後地表破裂紀錄照片(一),位置標示於圖 6

- 圖 9 震後地表破裂紀錄照片(二),位置標示於圖 6
- Fig. 9. Photographs of Chi-Chi EQ surface ruptures (locations shown in Fig. 5)

3-2 大地測量資料

於研究區東南方兩公里處的東勢區的四角林,GPS 記錄到集集地震的同 震水平位移量約有 8.54 公尺, 位移方向近乎垂直於東勢背斜(圖 1)。車籠埔 斷層地震破裂跡走向亦是大約平行於東勢背斜軸,鄰近區域的垂直抬升量 如圖 5 所示,於吊神山南方的 A-A'剖面變形帶較為寬廣,約 2.2 公里,最 大垂直抬升量約為 16 公尺,形似對稱圓丘; B-B'剖面切於大安溪河床上, 垂直於東勢背斜軸,形似箱型褶皺,變形帶寬約1.2公里,最大抬升量達12-13 公尺(Graveleau et al., 2010),同震抬升後東勢背斜東翼於上游的河床沖積 層呈急驟褶曲的單斜構造(monocline)(圖 10a), 垂直抬升量約為 5-6 公尺(經 濟部中央地質調查所,2000),東勢背斜於下游的西翼處,鬆軟的河流沖積 層遮蓋加上寬廣的變形範圍,從河床上並不能看出明顯的形變,僅能從河堤 的傾斜端倪些許(圖 10b); C-C'剖面, 形似圓丘, 變形範圍較河床上窄, 僅 0.8 公里,此剖面上西側崖坡較東側陡,最大垂直抬升量約為11 公尺; D-D' 剖面,變形帶約1公里寬,東側呈現較陡的抬升情形,最大垂直抬升量約為 10.5 公尺, 往西緩降; E-E' 剖面位於車籠埔斷層破裂跡末端, 僅有破裂跡經 過處有抬升的情形,於破裂跡中間的區近乎無垂直抬升量,最大垂直抬升量 約為 5 公尺。從上述的最大垂直抬升量及變形帶的型態變化來看,車籠埔 斷層地震破裂跡北端的隆升變形,呈往北遞減的趨勢。

16

圖 10 大安溪震後河床抬升情形

紅色虛線為集集地震地表破裂跡大致位置。(a)東側河床(b)西側河床(黃文正攝) Fig. 10. Uplift reach of Taan river. (a) Eastern side of the uplift reach (b) Western side of the uplift reach (Photographs by Wen-Jeng Huang)

A-A'、C-C'、D-D'、E-E'剖面資料來源於 Lee *et al*. (2005)。B-B'剖面西側與垂直抬升量 資料參考自 Graveleau *et al*. (2010),東側資料推測自於圖 5 a 震後變形的地表形貌。

Fig. 11. Profiles of uplift near Diaoshan Mountain in both side area of Taan river (Vertical exaggeration = 13). Data of A-A', C-C, D-D', E-E' profiles from Lee *et al.* (2005). B-B' profile is adapted from Graveleau *et al.* (2010) with some modification on the shape of its left step according to the escarpment in Fig 5a.

四、 研究方法

4-1 無人飛行載具空拍影像處理

本研究空拍影像測繪的步驟如圖 12 所示,首先於空拍範圍內,選擇數 個空曠能見度良好的位置均佈地面控制點(圖 14),地面控制點尺寸及顏色 應使其可以於空拍影像上輕易辨識為原則,並採用即時動態定位(VBS-RTK) 的方法測量地面控制點(圖 15),取得地面控制點高精度的坐標。第二步以影 像解析度(GSD:每個像素在現實空間中的實際大小,單位為 cm/pixel)來決 定航高,並考量單顆電池飛行時間將研究區域使用 Pix4Dcapture 應用程式 規劃成多個多邊形或矩形的飛行任務,每個飛行任務均是單顆電池能完成 的範圍。飛行計畫執行後的下一步為影像資料處理,本研究使用 Pix4Dmapper 軟體製作三圍點雲模型並生成正射影像與 DSM,首先將航拍 照片與控制點定位資料匯入 Pix4Dmapper 軟體,於航拍照片中將定位控制 點點出,Pix4Dmapper 會尋找照片中的特徵點進行三角測量並匹配照片計算 出點雲座標,接續進行點雲密集化、三角網格生成,最終利用點用點雲模型 生成正射圖與立面投影正射影像作為測繪底圖。

本研究使用的空拍機為 DJI Phantom 3 Professional、DJI Mavic pro 及 DJI Mavic 2 pro 等 3 款無人機(圖 13),此三款無人機具有高機動性以及便攜 性等特性,mavic pro 與 mavic 2 pro 可摺疊收納,方便攜帶。mavic pro 的續 航時間為 27 分鐘、mavic 2 pro 的續航時間為 30 分鐘、phantom 3 pro 的續 航時間則是 23 分鐘,可於距離起飛點最遠約七公里遙控操作(中間無干擾與 遮擋的情況下)。並均搭載高解析度之照相機,mavic pro 與 phantom 3 pro 的 鏡頭可拍攝最高 1200 萬畫素的照片,mavic 2 pro 的鏡頭則可達 2400 萬畫 素。三台無人機皆可於拍照時實時自動記錄 GPS 資料,有助於後續資料處

20

理的匹配速度與精確度。

圖 12 本研究空拍執行流程(引自謝承恩等, 2016)

Fig. 12. Work flow chart of UAV survey. (From 謝承恩等, 2016)

圖 13 本研究使用的無人機

(a)DJI Phantom 3 Professional (b)DJI Mavic pro (c)DJI Mavic 2 pro

Fig. 13. Drones used in this study. (a)DJI Phantom 3 Professional (b)DJI Mavic pro (c)DJI Mavic 2 pro

圖 14 控制點噴繪

Fig. 14. Ground control point painting

圖 15 RTK 測量並紀錄控制點座標 (邱奕維攝)

Fig. 15. RTK survey and recording the coordinates of a ground control point. (Photograph by Yi-Wei Chiou)

4-2 野外地表地質調查方法

4-2-1 河床中視尺度構造岩性地質圖與立面描繪

欲探討大安溪河床於集集地震同震抬升的機制,若只分析空拍出來的正 射圖與立面正射投影是不夠的,同時需要實地調查的資料作為輔助。本研究 使用空拍正射影像與立面正射投影作為底圖,初步描繪岩層走向與明顯構 造,並標示出前人調查的露頭與構造位置,分區進行細部野外調查,以實際 觀察為優先,將調查結果適當更新於底圖上,以求更精確的資料。由於地質 學是以野外觀察為優先的一門學科,雖本研究使用空拍技術快速掌握露頭 狀況,但現地觀察與測量地質資料仍是不可或缺、最重要的部分。

本研究區域有東勢背斜與集集地震地表破裂跡通過,進行野外調查時, 需蒐集岩層岩性、是否有斷層面出現於峽谷中、岩層的位態資料以及分布、 岩層的延續性、是否出現層間滑動、節理是否以特定方向成組發育等資料。 針對上述特定構造,在野外時就必須將重點放在局部次生構造的調查與描述,同時思考構造之間的關聯以及形成原因。


- 圖 16 層面位態測量與層厚紀錄
- Fig. 16. Measuring bedding attitude and bed thickness.

4-2-2 褶皺軸位態之投影圓分析

褶皺軸(fold axis)是用來描述褶皺構造在空間中方向性的表示法。其為一種線性構造,通常使用走向(trend)與傾沒(plunge)兩個空間參數來表示。走 向為褶皺軸向上投影至水平面上的方向角;而傾沒則為水平面上的投影線 向下俯視至褶皺軸之間的夾角。本研究中的線理表示方式為:傾沒/走向 (plunge/trend)。層面位態的方式是:走向/傾角 (strike/dip),並遵循右手定則, 亦即傾角的方位為走向指向方位的右手邊,例如有一面走向為 152°,向西 南傾斜 20°,則紀錄為 152°/20°。方位角皆使用 360°格式,正北方為 000°, 角度以順時針方向增加度數,以三位數表示之。

褶皺軸的定義為,若褶皺軸在空間中平行地移動,則此移動軌跡能夠組成一圓柱形褶皺(cylindrical fold)之褶皺面(參照 Jackson, 2005; Ramsay and Huber, 1987)。換言之,一個完美的圓柱型褶皺中,所有的軸面會交會出一條唯一的褶皺軸(圖 18),然而,在自然界中的褶皺很難如此完美,廣義地使用褶皺軸的概念,試圖描述自然界中所看到的褶皺構造。

欲求得一褶皺構造的褶皺軸,根據上述定義,將所有在野外測量到的褶 皺層面位態資料表現在下半球投影圓上,以決定褶皺軸的位態。以下為兩種 求得褶皺軸位態的投影圓方法,分別為π圖法與β圖法。

i. π 圖法 (π diagrams)

 π 圖法中所指的 π 即為 π 極點(π poles), 是任一褶皺層面的法向量(法 向量必定與層面垂直)。將所有的層面位態, 在投影圓上沿各自傾斜的方向 平移 90 度,轉換成 π 極點,則得到該褶皺面的 π 極點的投影圓分佈圖,即 為 π 圖。若對一個完美的圓柱形褶皺而言, 在投影圓上所有的 π 極點將全部 落在某一特定大圓上,稱為 π 圓 (π circle)。垂直於此 π 圓的法向量, 稱 為 π 軸 (π axis), 此 π 軸在空間中會與褶皺軸平行,故求得 π 軸即可同時 得知褶皺軸位態 (兩者線位態相同)。 ii. β 圆法 (β diagrams)

從上述有關褶皺軸的定義,圓柱形褶皺上所有褶皺面會同時包含一道褶 皺軸;換言之,任意兩個層面就會相交出一條線,此線會平行褶皺軸。β圖 法即是利用這個觀念求得褶皺軸位態:同樣將多筆層面位態資料以大圓呈 現在投影圓上,大圓將會彼此交會出一個點,稱為β軸(β axis)。此β軸 亦在空間中平行於褶皺軸,故其位態可同視為褶皺軸位態。



圖 17 圓柱形褶皺面與π極點之幾何關係

(a) 圓柱形褶皺面與其對應之 π 極點(法向量)之示意圖 (b) π 極點於投影圓上之分 佈 (Ramsay and Huber, 1987)。

Fig. 17. Relationships of cylindrical fold surface and pole(π). (a) Schematic diagram of surfaces on the cylindrical fold and each relative pole(π) (b) Distribution on stereographic projection of pole(π) (Ramsay and Huber, 1987)



圖 18 褶皺軸與褶皺軸面空間幾何關係

傾沒褶皺之褶皺軸面(AS)、褶皺軸跡(AT)與峰跡(CS)彼此於(a)立體空間中的分佈以及(b)下半球投影圓上的交會關係。(Ramsay and Huber 1987)

Fig. 18. Relationships of axial surface (AS) and crest surface (CS) in plunging cylindrical folds (a), and intersection in stereographic projection (b). (Ramsay and Huber 1987)

4-3 從點雲模型計算層面位態

於野外的調查中,位態的蒐集及測量是重要的一環,然而有些時候的到 達或觸及露頭的風險太高,無法順利地收集資料,例如本研究區域中吊神山 壁上的層面,山壁過於陡峭,且有一條急流的深圳橫亙於溪邊小徑及山腳, 因此不論山壁下或山壁上的層面測量皆屬難以達成之事。在野外的位態測 量中有一技巧,若露頭岩層沒有完整的平面可供測量,可以利用同一層面出 露的兩條不同角度的層面,建構出層面並測量(圖 19)。

本研究將此方法的原理應用於點雲模型中,基於點雲模型的特色,我們 可以找出每個點雲的座標位置,因此在模型中岩層找出同為上界或下界的 三個點座標,利用三個點座標計算出平面方程式,找到法向量,同時,層面 走向的定義是層面與水平面的交線,從幾何上來看,此線會與層面的法向量 及水平面的法向量垂直,因此將層面法向量及水平面法向量外積可得出走 向的向量,再將此向量與正北的向量做內積即可算出走向與正北的夾角。傾 角的定義是: 垂直於走向,水平面到層面的夾角,從空間中看,此角的角度 即等於層面法向量與水平面法向量的夾角(圖 20),因此可從層面法向量與 水平面法向量內積得出。最後再利用法向量判斷層面形貌,將走向使用右手 定則表示。

關於此方法的誤差值,對比於河床中的實際測量資料,考慮到實際測量 也會因風化程度而有所誤差,其結果與測量差值,走向約在正負8度以內, 傾角約在正負5度以內。



找出 A、B、C 三點座標,計算向量 \overline{BA} 、 \overline{BC} 法向量 $\overline{n}(a, b, c)$ 等於 \overline{BA} 外積 \overline{BC}

$$\vec{n} = \overline{BA} \times \overline{BC}$$

走向方向向量(x, y, z) ⊥ (a, b, c)和(0,0,1)

 $(x, y, z) = (a, b, c) \times (0, 0, 1) = (y, -x, 0)$

由公式可知兩向量夾角之 $\cos\theta = \frac{\vec{P} \cdot \vec{Q}}{|\vec{P}||\vec{Q}|}, \theta = \cos^{-1}\theta$

因此走向與正北的夾角α為走向方向向量(x, y, z)與(0,1,0)的夾角

$$\cos \alpha = \frac{(x, y, z) \cdot (0, 1, 0)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{1}} , \alpha = \cos^{-1} \alpha$$

傾角θ即為層面法向量 n 與水平面法向量(0,0,1)之夾角(圖 19),並取 銳角

$$\cos \theta = \left| \frac{(a, b, c) \cdot (0, 0, 1)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{1}} \right| \cdot \theta = \cos^{-1} \theta$$





Fig. 19. Demonstration of bedding measurement.





Fig.20. Schematic diagram of intersect between bedding and level.

五、 研究成果

本研究使用無人機(UAV)拍攝影像,並製作高解析度區域空拍攝影像與 兩側峽谷及吊神山山壁之立面影像。基於所得的正射影像為底圖,紀錄岩層、 岩性單元的分界與分布,層面與節理面位態,次生構造的樣態與分布等,續 而利用立面影像及量測到的野外資料,繪製構造剖面圖。底下分節呈現各項 成果。

5-1 中視構造

大安溪河床東勢背斜區域於集集地震時被同震抬升,上游在短距離內抬 升量急遽變化,使得上游區域在震後形成堰塞湖,河流的回春作用加上此區 域岩性鬆軟的特性,遷急點(knickpoint)在短短十來年內急劇往上游遷移,形 成河流兩岸與河流面高差數十公尺的峽谷景觀(圖 21),此特殊的地形猶如 大型的古地震的開挖槽溝,展示東勢背斜的岩層分布樣貌與地震地表破裂 跡被沉積物掩蓋的秘密。

i. 節理

研究區域內的中層及厚層砂岩中普遍有發育頗為發達的節理組(圖 22), 節理主要以兩組相互垂直的走向遍布於大安溪峽谷中,其中一組走向為 055 °,大約與褶皺軸平行,另一組走向為 145°(圖 22d)。這兩組節理由於其垂 直與平行褶皺軸的特性,推測其為張裂性質的褶皺關聯裂理 (fold-related fracture pattern) (Pirce, 1966)。

ii. 斷層

在南岸有一與流向平行(西北-東南向)之斷層,於峽谷中上游處始分為兩 條分支斷層,東北側為抬升測,最大錯距(seperation)推估有數十公尺,錯距 自峽谷上游往中游遞減,中游處所量測到的垂直錯距約1至2公尺,斷層 傾角約79度,屬高角度逆斷層(圖 23),推測此斷層可能是集集地震同震抬 升時所形成的調適構造,但若須確定還需做更進一步的研究。此外,於吊神 山山壁出露的露頭上亦可觀察到一垂直錯距約20公尺之斷層,但僅出露於 山壁上,河床上的相對位置之岩層延續良好(圖 24)。於集集地震破裂跡經 過的位置在吊神山呈凹谷的地形,凹谷兩側的層態與層序皆不同,故推測此 凹谷兩側之岩層曾受過斷層錯移(圖 25)。以地形為依據判斷,山壁上斷層 與集集地震破裂跡於吊神山的大致延伸走勢如圖 26 所示。

iii. 集集地震地表破裂跡經過位置及褶皺軸

沿著河岸自上游往下游調查,最東邊的岩層位態約為 12 度向東南傾, 往西跨東翼地震破裂跡後,層面位陡變為 5、60 度向東南傾(圖 27a),續在 100 公尺的範圍內變為 20 多度(圖 28),隨後漸漸趨於水平,甫過褶皺軸位 態即變為 25 度向西北傾,維持差不多的傾角直至峽谷末端,過西翼地震破 裂跡後漸緩變為十幾度(圖 27b)。岩層在大安溪峽谷範圍的延續性良好,其 中並未觀察到與車籠埔斷層破裂跡同為東北-西南走向的斷層,鄰近褶皺軸 的岩層雖有破裂,但並未觀察到錯移發生(圖 29)。



圖 21 卓蘭大安溪峽谷 (2019 年,向東南攝)

Fig. 21. Taan gorge in Cholan. Shot in 2019, facing to SE.



圖 22 中層及厚層砂岩中的節理 (a) 本 岩 中 屋 小 出 中 母 小 出 中 母 小 出 中

(a)南岸中層砂岩中的正交節理 (b)北岸中層砂岩中的節理 (c)北岸厚約 2 米的厚層砂岩 中沿節理破開的斷面 (d)峽谷中蒐集的節理資料所繪製的玫瑰圖(Rose diagram) Fig. 22. Joints in medium and thick sandstone. (a) Orthogonal joints in medium sandstone in southern reach (b) Joints in medium sandstone in Northern reach (c) Crack surfaces along joints in ~2m thick sandstone in northern reach (d) Rose diagram of joints attitude collected from the gorge



- 圖 23 大安溪峽谷中游西北-東南向斷層 照片位置顯示於 30。VS: 垂直錯距。
- Fig. 23. NW-SE fault in midstream of Taan gorge. Position shown in fig. 30.
- VS: Vertical Separation.



圖 24 吊神山山壁上斷層 以圖中黃色砂岩層為指準層,推估垂直錯距約 20 公尺。向西南攝。 照片位置顯示於圖 26。

Fig. 24. Fault on Diaoshan Mountain cliff. Yellow sandstone layer is the index bed. The approximate separation is around 20m. Facing to SW. Position shown in fig. 26.



圖 25 吊神山山壁於集集地震破裂跡兩側的岩層層序不同 照片位置顯示於圖 25

Fig. 24. Difference of bedding sequences on two sides of Chi-Chi earthquake rupture eastern limb on Diaoshan Mountain cliff. Position shown in fig. 25.



圖 26 集集地震破裂跡(紅色虛線)與吊神山山壁上斷層於吊神山上的延伸

Fig. 26. Surface rupture of Chi-Chi earthquake (red dash line) and the inferred orientation of faults on the cliff.



圖 27 峽谷下游及上游集集地震破裂跡經過位置

Fig. 27. The position of Chi-Chi earthquake rupture on the downstream and upstream of Taan gorge.



圖 28 南岸及北岸位態變化轉折點

Fig. 28. Where the bedding dip change on the southern bank and the northern bank.



圖 29 南岸及北岸背斜軸露頭

Fig. 29. Outcrops of fold axis on the southern bank and the northern bank.

5-2 大安溪峽谷區域岩層分布

對於研究區域內的層序及層厚調查,發現區域內的岩層層厚非常多變, 在峽谷不同位置的同一岩層層厚有可能有1至3公尺的改變量,因此使用 層序來作為背斜兩翼對應岩層之依據。表1中為區域內觀察到的岩層層序 及大致的層厚,層厚計算方面,部分使用路線地質圖調查的成果進行計算, 其餘步行不易到達的區域使用無人機河谷立面正射影向結合野外測量層面 位態資料計算。

本研究將出露的岩層依岩性及層厚的組合特徵分成 10 個單元(未算沖積層),因地形及構造之故,除出露於背斜核心的岩層單元外,皆以U型樣 態顯現在岩性地質圖上(圖 30),谷壁出露的岩層之位態有類似區間(panel) 式變化,每一區間岩層位態雷同。

表 1 大安溪峽谷區域層序及大致層厚

TT 1 1 TT 1	1	1 . 1	.1.1	•
Inhia I Iha	laver ceallence and	d annrovimate la	verthickness in Loon	anna realon
	lavel sequence and	a addition intract ia	iver unexhess in raan	
				000

Unit	層序	層厚	
青灰色砂岩	砂岩≧2m	$\geq 2m$	
橘黃色風化砂岩	砂岩≧4.9m	\geq 4.9m	
	砂岩=5.6m		
	砂岩≒3.3m		
	頁岩≒2.5m	=25.45m	
厚層砂與頁互層	泥岩≒2.4m		
	頁岩≒6.15m		
	砂岩≒3.7m		
	頁岩≒1.8m		

砂頁互層(80%砂岩)	頁岩≒6.1m 砂岩≒2.5m	≒8.6m
頁岩夾中層砂岩	頁岩≒6.1m 砂岩≒2.5m 頁岩≒3m	≒11.6m
砂頁互層(60%砂岩)	砂岩=0.6 m 砂頁互層=13.3m	≒13.9m
泥岩	泥岩=9.7	≒9.7m
厚砂夾薄層頁岩	砂岩≒13m 頁岩≒3.1m	≒14.1m
厚砂夾中層頁岩	砂岩=3.5m 頁岩=4.8 m 砂岩=2.1m	≒10.4m
砂頁互層(70%砂岩)	頁岩≒16m 砂岩≒2.15m 頁岩≒6.5m 砂岩≧3.2m	≥27.85m



部分位態資料參考 Huang et al(2013)。A-A'為垂直褶皺軸切的剖面,上方為北岸剖面,下方為南岸剖面。

Fig. 30. Lithologic map of the Taan gorge. Part of bedding attitudes are adapted from Huang *et al.* (2013). A-A' indicates the orientation of the geological profiles. The upper cross section is the projected profile for the exposure on the north bank; the lower cross section is the projected profile for the exposure on the south bank.

5-3 大安溪峽谷正射影像描繪及投影

為了更正確地呈現東勢背斜整體的幾何形貌,我們使用無人機拍攝的影像,製作垂直於背斜軸的兩岸河床與吊神山山壁正射立面影像作為底圖進 行描繪,由於河岸並非完美的平面,有些的岩層在投影面上並非以正確的位 態顯示,因此在直接描繪後仍須結合野外所測量的位態資料測量計算投影 後的正確位態,再依描繪後的岩層位態,向上延伸繪製完整的東勢背斜的幾 何形貌,如圖 31。根據山壁立面影像,如是地重繪的東勢背斜之幾何形貌, 見圖 32。

圖 31 中北岸與南岸的背斜呈急折的形貌,與圖 32 根據山壁岩層分布 描繪出來相對圓滑的背斜形貌不同,顯示由谷壁的岩層位態依作圖法外插 繪製的背斜形貌與真實的背斜不符。



斷層 圖 31 大安溪峽谷南岸與北岸影像之詳細岩層分佈描繪與沿兩岸層面位態延伸之東勢背斜幾何形貌 咖啡色系為砂頁互層,黃色系為砂岩為主之岩層,綠色系是泥岩為主之岩層。

Fig. 31. Geological cross-sections of southern and northern banks of Taan gorge. Brown tone denotes alternation of sandstone and shale. Yellow tone denotes lithologic units mainly composed of sandstone. Green tone denotes lithologic units mainly composed of mudstone.



圖 32 吊神山山壁岩層描繪與東勢背斜幾何形貌

最上方為使用點雲製作之正射影像,中間為可見岩層之描繪,最下方為將可見岩層延伸以呈現東勢背斜於吊神山上之幾何形貌。S: 錯 距。VS: 垂直錯距。

Fig. 32. Elevation of Diaoshen Mountain cliff and delineations of Tungshih anticline. The top figure is the ortho image made by point cloud. The mid figure is the delineations of visible layers. The bottom figure is the extrapolation of visible layers, to show geometry of Tungshih anticline on the Diaoshan Mountain. S: Separation. VS: Vertical Separation.

5-4 大安溪峽谷剖面繪製

前一章節中我們已將河床與品種山壁上之岩層描繪出來,接著要將兩者 結合在同一剖面上,但河床與山壁之間有約 150 公尺之水平距離差,考量 到褶皺軸傾沒角(plunge)並非水平,為確認投影至同剖面後河床與山壁之間 的相對位置正確,我們分別計算山壁與河床的褶皺軸位態,但由於山壁露頭 極為陡峭且山壁與河岸間橫亙一灌溉用之急流深圳,測量位態過於危險,故 利用點雲模型中的點雲座標,在模型中尋找同一層面的三個相鄰點雲,使用 三個點坐標計算出平面方程式,找到法向量,藉此推得此處的岩層位態(詳 細計算過程請閱章節 4-3)。接著將河岸測量的位態資料山壁上計算出的位 態資料使用β圖法分別找出於河岸及峭壁的褶皺軸,褶皺軸位態如圖 34 所 示,兩者的傾角相差約 8 度。最後將山壁的岩層描繪剖面沿山壁的褶皺軸 投影至與河床剖面相同的平面,此投影後山壁與河岸的高差約為 50.9 公尺, 以及將河岸的岩層描繪剖面沿河岸的褶皺軸投影至與山壁剖面相同的平 面,此投影後山壁與河岸的高差約為 23.6 公尺,沿兩褶皺軸投影之結果相 差約 26 公尺(圖 35),然而投影後的背斜形貌相去不大,低層位的褶皺形貌 有急折的特徵,越往高層位褶皺越趨圓滑。



圖 33 吊神山山壁上位態

Fig. 33. Bedding attitudes on Diaoshan Mountain cliff calculated from the UAV point cloud



圖 34 河岸層面計算之褶皺軸位態與山壁層面計算之褶皺軸位態

Fig. 34. β diagrams of fold axis. Left one is the fold axis calculated from river bed attitudes, right one is the fold axis calculate from cliff attitudes.



圖 35 山壁與河岸立面描繪沿不同褶皺軸投影之結果

深色線條為山壁剖面沿山壁上之褶皺軸位態投影至河岸剖面;淺色線條為河岸剖面沿河岸之褶皺軸位態投影至山壁剖面。

Fig. 35. Overlapping projected profiles of the anticline. Dark lines denote cliff profile along the fold axis of cliff projected to river bank profile, light gray lines denotes river bank profile along the fold axis of river bank project to cliff profile.

六、 討論

6-1 同震地表變形的機制

從前面的野外觀察結果可以看到,於東勢背斜東翼的集集地震地表破裂 跡兩側岩層位態差異極大,且中間的岩層被侵蝕消失(圖 27b),沿破裂跡通 過之吊神山山壁為一山溝,山壁兩側岩層層序及層態亦有所不同(圖 25), 因此推測當時有斷層破裂至近地表的可能性極大,唯河床為鬆散的沉積物 覆蓋,地表面僅呈單斜褶皺形貌(圖 10a),而西翼於集集地震地表破裂跡經 過的位置層面延續良好,位態為向西北方向逐漸變緩(圖 27a)。

為了探討東勢背斜於集集地震時同震抬升機制,我們將前人研究中提出 的抬升機制,結合現今大安溪峽谷出露的岩層與構造,延伸繪製出最有可能 的符合機制之地下構造(圖 36),作進一步的討論。

a.突起構造(Pop-up structure)

突起構造為一逆衝斷層與背衝斷層所構成,為符合此模式,我們假設東 勢背斜西翼為逆斷層,但實際上於野外中並未在西翼觀察到破裂或斷層(圖 36a),故設定此逆斷層並未破裂至地表,且相對錯移量不大,於近地表處消 失於較軟的岩層中;東翼為高角度背衝斷層,且有破裂至地表或近地表,錯 移量較西翼逆衝斷層大,於東翼形成明顯且急遽褶曲的斷層崖。若以突起構 造的模型利用彈性錯移理論(elastic dislocation theory)進行斷層作用模擬 (Okada, 1992; Huang, 2006),預期所得的變形將會是鄰近兩斷層的上盤處會 有較大的抬升量,而然兩斷層上盤的中間處抬升量則相對小,整體變形呈現 兩側突起,中間下凹的形態,形成這樣形貌的原因主要是連續體相容性 (compatibility)的問題。然而,這模擬的變形結果與 Graveleau *et al.* (2010)所 得的同震變形結果不符(圖 36a)。

b.共軛褶皺(conjugate fold)

共軛褶皺的模式則認為褶皺作用為主要的同震變形機制,這代表東勢背 斜的東翼及西翼在河床下皆無斷層存在,因此剖面繪製時,東翼岩層位態急 驟轉變處,雖然山壁有斷層的存在,往下延伸則接續急折帶(kink band)的兩 分邊界,見圖 36b。可以預期地主要變形區域集中在褶皺兩翼的急折帶,兩 翼急折帶中間的地塊抬升,褶皺頂部平直,東翼急折帶呈左剪,西翼則為右 剪,不過於野外調查中,急折帶範圍內的岩層並無找到關鍵性的相對錯移證 據,東翼急折帶相較窄因此地表的變形也相對明顯,以上陳述的變形,主要 是由兩側的急折帶中之岩層的相對滑動所造成(Price and Cosgrove, 1990 與 梁又升, 2013)。儘管若以共軛褶皺進行模擬,預期會有較類似集集地震同 震抬升量的形貌,但東翼的急折帶寬度仍過寬,以至於相對應的地表變形難 完全吻合(圖 36b)。

c.斷層與"褶皺"作用模式

在李元希等(2000)的文章中,認為河床隆升西側的撓曲崖為"褶皺作用" 所形成,然而其在撓曲崖地下以未切出地表的盲斷層(亦即上新斷層)表示, 因此推測李元希等(2000)所稱的 "褶皺作用" 應是下伏斷層引致的被動褶 皺作用(passive folding),由於這下伏斷層離地表較遠,因此剖面繪製時近地 表處的岩層連續未被斷層錯移,東翼則如同突起構造模式剖面,有一錯移量 較大的斷層,且破裂至地表。如此的模式可預期的變形結果,由於下伏斷層 離地表太遠,將無法有效地貢獻,讓河床有如是集集地表變形的形貌(如圖 36c)。

以上結合地質資料與可能機制的三個地下構造模式,似乎仍無法模擬出 吻合大安溪河床同震變形的地變形貌,我們將在下一節的討論提出較佳的 可能模式。



圖 36 三個符合地質背景的構造解釋模式

Fig. 36. Three inferred models which all match the geologic setting. (a) Pop-up structure (b) Conjugate kink fold (c) Faulting and passive folding model.

⁽a)斷層作用為主的突起構造(pop-up structure) (b)共軛急折褶皺 (c)東側為斷層作用,西 側以被動褶皺作用為主。

6-2 東勢背斜的形成機制

於 2-3 中曾提及東勢背斜出現於區域性石圍牆向斜的東翼(圖 1),為了 解其出現於此的原因,我們嘗試從前人的區域性地質剖面尋找線索。黃旭燦 等(2004)及 Yue et al.(2005)分別建構橫跨東勢背斜的區域性平衡剖面(圖 37),兩個平衡剖面中可見,東勢背斜位在三義斷層的上盤,是大區域向斜 (石圍牆向斜)構造中的背斜,黃旭燦等(2004)的剖面中,東勢背斜是由於地 下4 公里深的滑脫斷層之彎曲(bend),使上伏岩層因上盤滑動時,被動造成, 與斷層彎曲褶皺(fault-bend fault)相似,但其剖面中背斜成尖頂的形貌,與實 際觀察到的幾何形貌不符;Yue et al.(2005)則結合集集地震的地表破裂資料 與較多的地表層態資料,推測於卓蘭層下的錦水頁岩可能存在一近乎平行 層面滑動的滑脫面,錦水頁岩層於滑脫面前緣增厚,而東勢背斜及坐落在此 滑脫面前緣之上,此滑脫面類似基底滑脫斷層(detachment fold)。Graveleau et al.(2010)等重新將震測圖的垂直走向由走時轉為深度,輔以中油的深井 岩心紀錄資料(葉天順,1958),對東勢背斜建構更詳細及更大的比例尺剖面, 也估算基底滑脫斷層的深度約 1-1.2 公里,其剖面構造大致與 Yue et al. (2005)的雷同。

本研究根據 Graveleau et al. (2010)重新轉換走時與深度的震測剖面及滑動面深度的解釋、加上中油的深井資料(葉天順,1958)對地層深度(詳見附錄A)的控制,結合本研究前節的剖面成果及機制討論,繪製的圖 39的構造剖面圖,採納 Yue et al. (2005)及 Graveleau et al. (2010)的見解,錦水頁岩中的基底滑脫斷層區隔開了斷層上下的構造特徵,此基底滑脫斷層的前緣增厚或許為促使東勢背斜發展的原因之一,然而在 Huang. (2006)中的模擬結果(圖 38 左 1)顯示,若地下有一平行於地層之滑脫面,會在滑脫面前緣形成上拱的褶皺,褶皺呈中間曲度最大且兩側平緩之幾何形貌,因此使東勢背斜

形成現今的幾何樣貌應還有受到其他因素影響。

若從東勢背斜的同震變形特徵及形貌,本研究認為東勢背斜的形成機制 較雷同於共軛褶皺作用,從黃文正和凱強生(2010)中加州 Kettleman Hills 背 斜的例子可見,震間大地應力側向水平的推擠,使岩層間相互地滑動,使得 該背斜增長;然而褶皺作用與基底滑脫斷層於同震錯移之載荷(loading)作用 對於東勢背斜的形貌造成的影響比例便不得而知了。再者,依據集集地震大 安溪河床的變形形貌推論,整體而言的主要機制應是共軛褶皺,而地變東側 的急驟抬升則較似與斷層作用相關,因此合理推測該處的既存斷層(preexiting fault)於地震時亦對於同震地變有所貢獻。

比對集集同震地變的幾何形貌與本研究區域所得的東勢背斜剖面幾何 形貌,若是每次東勢背斜的同震變形皆依循集集地震同震地變的幾何形貌, 最終疊加而出的幾何形貌與現今所觀察到的東勢背斜幾何形貌不會完全相 符,故僅可確定,於集集地震的同震變形的確促使了東勢背斜的增長,但其 形成僅是由多次的同震地變疊加或是震間亦持續增長,兩者之間的比例猶 未可知。



圖 37 前人建構的橫跨東勢背斜區域性剖面的截圖

Fig. 37. Parts of two published cross-sections that cut across Tungshih anticline.
Fold name		Pucker fold	Bumped fold	Monocline	
FS	⁻ old hape				
Faul slip/Depth	1.0				¥
	0.5			k	····· +·····
Fault angle 0°			20°	60°	90°

(摘自Huang., 2006)

圖 38 不同角度與深度下的盲斷層所造就的褶皺形貌

Fig. 38 Different fold geometry caused by different angle and depth blind fault.



紅色點虛線為集集地震時大安溪河床的同震地變形貌。灰色實線為震測反射面之描繪。震測剖面摘自 Graveleau et al. (2010)

Fig. 39 Configuration of Tungshih anticline and mechanism of Chi-Chi earthquake-induced ground deformation proposed by this study. Red dashdot line denotes the coseismic ground deformation of Taan river bed, gray solid line denotes delineations of seismic reflection lines. Seismic line from Graveleau *et al.* (2010)

七、 結論

大安溪東勢背斜河床段於集集地震時被同震抬升,受回春作用影響,經 過十多年來的河川侵蝕與下切,逐漸形成現今高十多公尺的大安溪峽谷,於 峽谷壁面的露頭揭示了過去深掩的地層構造。經調查結果顯示,峽谷中的岩 層於西北東南向的延續性良好,並未觀察到與背斜軸平行(東北-西南向)的 斷層,但岩層於東側峽谷邊緣位態劇變處(集集地震地表破裂跡附近)有所缺 失,鄰近褶皺軸的岩層破裂,但並無錯移發生;由東往西順流而下,岩層位 熊自東側峽谷外的 12 度向東南傾,甫過集集地震地表破裂跡後陡變為 50-60 度向東南傾,約保持 150 公尺寬後,轉為 20 多度向東南傾,隨後漸漸趨 於水平,過褶皺軸後,隨即變為25度向西北傾,維持差不多的傾角直至峽 谷尾端,之後漸緩變為十幾度。南岸有一東南-西北向的斷層,東北側為抬 升側,垂直錯距自上游往中游遞減,推測可能為集集地震同震抬升時的調適 構造,但證據不足,若須確定,未來仍需做進一步研究。於峽谷東側山壁上 有二條東北-西南向的斷層,較東側之斷層為一凹谷地形,凹谷兩側層序及 位熊皆不同,推測與集集地震表破裂跡相連,但未有可見指準層,無法估算 錯移量;另一斷層位在山壁上,垂直錯距約20公尺。河岸層面計算的東勢 背斜軸位態約 4.1°/253.3°,山壁上層面計算的東勢背斜軸為態約 12.3°/229 ° 0

結合谷壁露頭、吊神山山壁岩層、深井岩心及震測剖面與前人研究等資料,搭配理論分析,歸結如下,東勢背斜為一滑脫褶皺(detachment fold), 形成機制以褶皺作用為主,基底滑脫斷層地震時的瞬間滑移亦或是水平大 地應力的側向推擠皆是其有可能的載荷;而集集大地震時大安溪河床的同 震地變,推測可能受既存的地質構造,既存斷層與原本的褶皺形貌影響,形 成機制以共軛褶皺作用為主,斷層作用為輔。

63

比對集集同震地變的幾何形貌與本研究區域所得的東勢背斜剖面幾何 形貌,於集集地震的同震變形的確促使了東勢背斜的增長,但其形成僅是由 多次的同震地變疊加或是震間亦持續增長,兩者之間參與東勢背斜增長所 佔的比例猶未可知。

八、 參考文獻

- Chen, Y.-G., Lai, K.-Y., Lee, Y.-H., Suppe, J., Chen, W.-S., Lin, Y.-N. N., Wang, Y., Hung, J.-H. and Kuo, Y.-T., "Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan", <u>Journal of Geophysical Research</u>, Vol. 112(B3), 2007.
- Graveleau, F., Suppe, J., Ustaszewski, M., Chang, K, J., Dominguez, S., Huang, M,H., "Incremental fold growth during Taiwan Chi-Chi Earthquake Examples from the Tungshih anticline and Neiwan syncline. "Westen Pacific Geophysics Meeting, poster, 2010.
- Huang, W.-J. and Liang, Y., "Study on Mechanical Mechanism of Kink Folds via BEM". The 36th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics, November 16-17, Paper X-039, 2012.
- 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", <u>Geomorphology</u>, Vol. 184, pp. 98-110, 2013.
- Huang, W.J., Deformtion at the leading edge of thrust faults in Philosophy. Purdue University, 2006.
- Jackson, J. A., <u>Glossary of geology</u>, 2005.
- 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, Vol. 24(1), pp. 173-192, 2002.
- Lee, Y. H., "Structures Associated with the Northern End of the 1999 Chi-Chi Earthquake Rupture, Central Taiwan: Implications for Seismic-Hazard Assessment", <u>Bulletin of the Seismological Society of America</u>, Vol. 95(2), pp. 471-485, 2005.
- Okada, Y., "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space",

Bulletin of the seismological society of America, Vol. 82(2), pp. 1018-1040, 1992.

- Price, N. J., Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rock: The Commonwealth and International Library: Geology Division, 1966.
- Price, N. J., and Cosgrove, J. W., Analysis of geological structures, 1990.
- Ramsay, J. G., and Huber, M. I., <u>The techniques of modern structural geology:</u> Folds and fractures, Vol 2, 1987.
- Yu, S.-B., Kuo, L.-C., Hsu, Y.-J., Su, H.-H., Liu, C.-C., Hou, C.-S., Lee, J.-F., Lai, T.-C., Liu, C.-C. and Liu, C.-L., "Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake", <u>Bulletin of the Seismological Society of America</u>, Vol. 91(5), pp. 995-1012, 2001.
- Yue, L.-F., Suppe, J. and Hung, J.-H., "Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6)", <u>Journal of Structural Geology</u>, Vol. 27(11), pp. 2058-2083, 2005.
- 王錦華、王乾盈、宋國城、辛在勤、余水倍、謝秋雰、溫國樑、鐘孫霖、李 民、郭鎧紋、張國強,「九二一集集大地震」,行政院國家科學委員會「地 震活動斷層研究」跨部會重大科技計畫辦公室,2005。
- 李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正,「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,第十二號, 第19-40頁,2000。
- 李錦發,「東勢地質圖幅說明書」,<u>五萬分之一台灣地質圖說明書</u>,經濟部中 央地質調查所圖幅,第18號,127頁,2000。
- 梁又升,「利用邊界元素法探討急折褶皺之形成機制」,國立中央大學地球科

<u>學學系研究所碩士論文</u>,90頁,2013。

鳥居敬造,「東勢圖幅及說明書」,臺灣總督府殖產局出版,732,1935。 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。 陳文山,「用古地震推估大地震發生的機率?」,經濟部中央地質調查所地質

季刊,第28卷第3期,2009。

黄文正、凱強生,「結合斷層滑移與岩層拱彎機制的斷層居中型褶皺之增長」,

經濟部中央地質調查所特刊,第二十四號,第95-132頁,2010。

黄旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏,「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(5/5)-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」,經濟部中

央地質調查所,報告93-13號,59頁,2004。

葉天順,「東勢 TS-1 井井下地質總報告」, 1958。

- 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 所編印,2000。
- 謝承恩、范書睿、林彦廷、黃文正、羅偉,「無人飛行載具搭載數位相機於 地質構造判釋之應用」,<u>航測及遙測學刊</u>,第21卷,第257-269頁, 2016。

九、 附錄

A 東勢 IS-I 开开卜地僧貧	料
------------------	---

井下岩層 下所遇地層: 由砂礫組成 (一台地堆積層 0-24.00公尺 (二)卓 蘭 曆 24.00 - 680.00公尺 係自其中部鑽入,為灰色至 淡灰色細粒砂岩或細粒泥質 砂岩與深灰色頁岩之互層, 地層傾斜20-12 度含多量 Rotalia sp. 及少量貝殼化 石。 **闫錦水頁岩** 680.00 - 890.00公尺 深灰色頁岩成砂質頁岩,夾 潭層細粒泥質砂岩,富含貝 設化石。 個硅竹林燈 1魚藤坪砂岩段 890.00-1,200.00公尺 灰色細粒泥質砂岩為主,下 部肥質成份較多,地層傾斜 6°° 2 十六份頁岩段1200.00-1254.00公尺 深灰色頁岩與灰色細粒泥質 砂岩之互層,地層傾斜5 左 右。 3 關刀山砂岩段1254.00-1530.00公尺 灰色細粒砂岩及細粒泥質砂 岩為主, 夾梁灰色頁岩, 慶 含石炭碎片Op. Armonotices. Rotalia sp. Textularia sp. **举**化石。 白色至灰白色細胞至細胞就 (由上福基砂岩 1,530.00-1,570.00 公尺 意砂岩欢深灰色頁岩及灰色 中粒泥質砂岩,地層傾斜6° ,化石甚少。 灰色細粒縞狀砂岩與淡灰色 份河 俳 盾 1.570.00-1.601.00 公尺 **頁岩之互層。**

