

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¹ 黃文正^{1,2}

摘要

有關集集地震於東勢背斜的大安溪河床之同震抬升，前人提出斷層作用、褶皺作用及結合型等三種不同的機制，本研究取利於大安溪回春作用造就的新穎谷壁露頭，結合吊神山的山壁，利用無人機空拍影像、深井井錄及震測剖面，建構東勢背斜的完整形貌，分析後認為其為一脫離褶皺，以（共軛）褶皺作用之機制形成，而河床同震地變的形成原因應是受控於既存的地質構造影響，以（共軛）褶皺作用機制為主，斷層作用為輔，載荷則為地下~1.1公里深的脫離斷層之瞬間錯移。

關鍵詞：活動背斜、東勢背斜、同震地變、活動斷層

引言

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，地震震源位於南投縣集集鎮附近（東經 120.816 度，北緯 23.853 度）地下約八公里處（王錦華，2005），為具左移分量的逆斷層錯動所致，造成車籠埔斷層跡沿線的破裂，向南至竹山鎮桶頭附近，向北達台中市豐原區附近，爾後轉向東，續轉東北向，直到苗栗縣的卓蘭鎮。

集集地震的破裂跡北端區段，破裂樣態明顯較其他區段複雜許多，於豐原由南北向單一道，分岔為二，轉為東西向，沿大甲溪床東延，續而轉為次平行，時而兩道時而三道，遇東勢背斜後，轉為東北東向，於背斜兩翼，形成約略平行的兩道破裂跡，順背斜軸跡，往東北延伸至卓蘭鎮（圖 1）。東勢背斜相鄰的大安溪河床，亦即現今的大安溪峽谷的位置，集集大地震當時此河段河床隆升，最大垂直抬升量達 10 公尺，隆升河床東側河道相對抬升量約為 5-6 公尺，西側河道相對抬升量約為 4 公尺（經濟部中央地質調查所，2000）。由於河床的

1. 國立中央大學地球科學系
2. 國立中央大學應用地質所

快速隆升，阻擋水流流路，使河道上游形成堰塞湖（經濟部中央地質調查所，2000），經由日後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解釋模式，參見圖 2，底下簡單介紹：第一個是李建成等（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

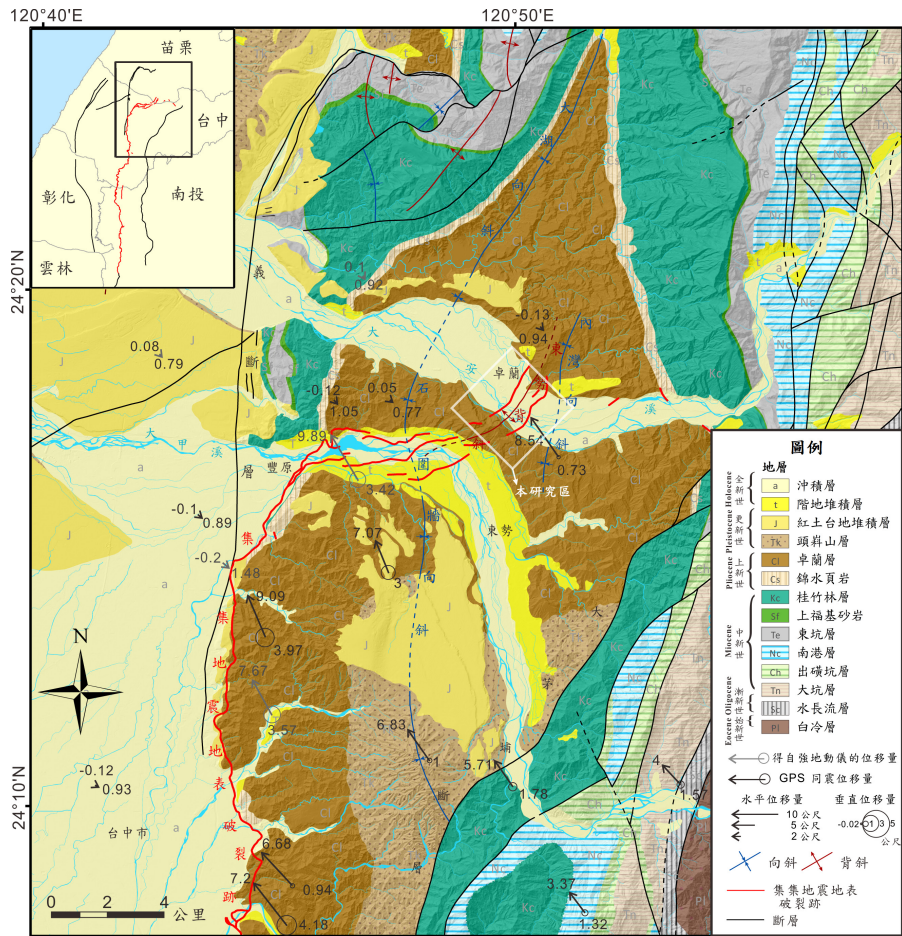


圖 1 集集地震破裂跡北段區域地質圖與同震位移量。地質圖修改自中央地質調查所五萬分之一地質圖（張憲卿，1994；李錦發，2000；何信昌與陳勉銘，2000；羅偉等，1999），同震位移量資料參考自 Yu *et al.* (2001)。

Fig. 1 Geologic map and coseismic displacements of 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 displacement are from Yu *et al.* (2001).

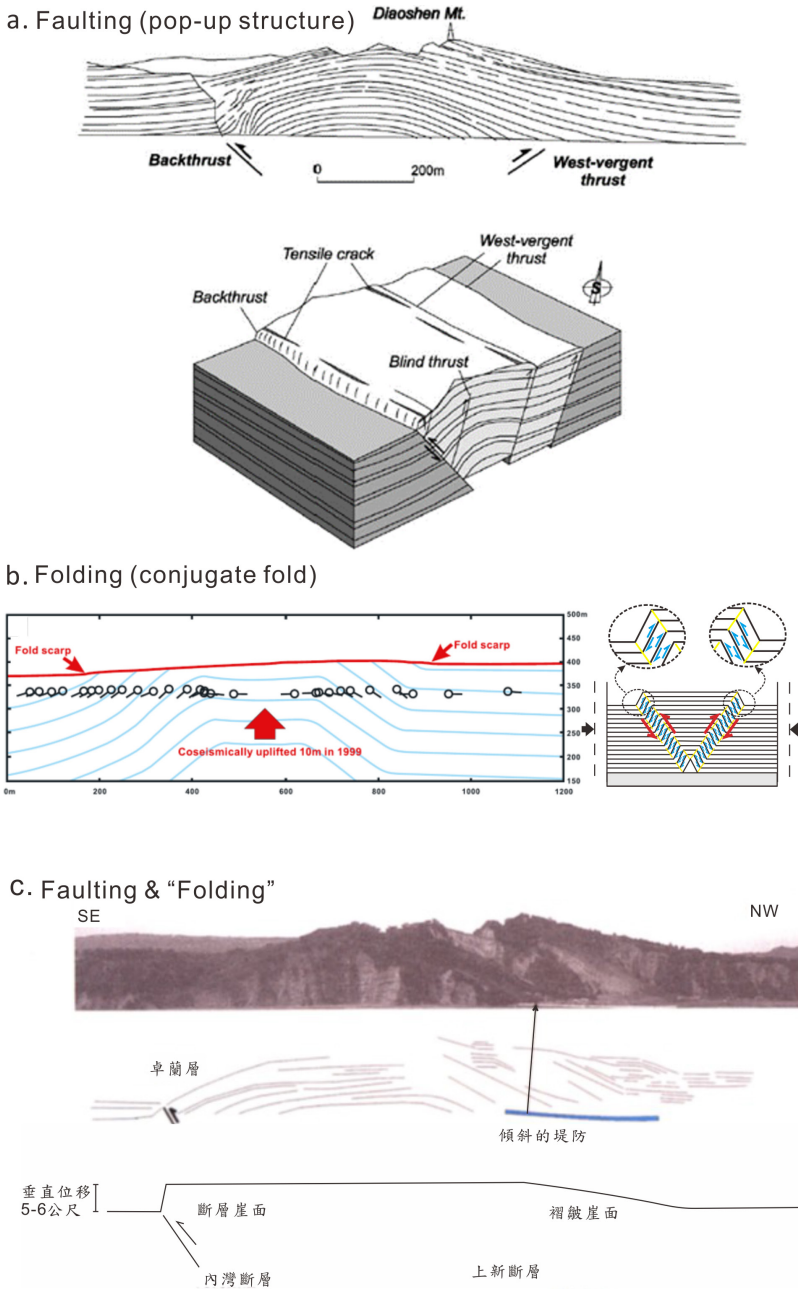


圖 2 三種不同的同震抬升機制。(a) 以斷層作用為主的突起構造 (pop-up structure) (摘自 Lee *et al.*, 2002)。(b) 以褶皺作用為主的共軛急折褶皺 (摘自 Cheng *et al.*, 2007)。(c) 東翼以斷層作用為主西翼以褶皺作用為主的"綜合型" (摘自李元希, 2000)。

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

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）。

大安溪經歷 20 餘年的侵蝕下切，原本的隆升區現今已變成深達十數來米的河道，谷壁暴露地震當時無法知曉的地下構造，本研究即透過詳實的野外地質調查，蒐集新穎的地質資料，同時利用無人飛行載具（unmanned aerial vehicle, UAV）進行拍攝記錄，並使用 Pix4Dmapper 軟體製作山谷模型，生成河谷與吊神山山壁的立面影像，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。

區域概況

東勢背斜為一區域向斜構造（亦即大湖向斜）中的局部褶皺（圖 1），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一吊神山，至大甲溪北岸，呈東北-西南走向，東側有同級的內灣向斜，往西南延，於大甲溪似與石圍牆向斜（亦即大湖向斜於大安溪以南的名稱）合併或相交，集集大地震北端的兩道破裂跡分夾其兩翼。除本身處於車籠埔斷層地震破裂跡上外，亦位在兩活動斷層架構的斷塊上，東側有大茅埔雙冬斷層，西側有三義斷層（圖 3）。

大安溪流貫東勢背斜，為苗栗縣境內最大的河流，發源於大霸尖山，流經泰安，過坪林之後，轉向西流，河床逐漸寬闊，沿岸出現河階臺地，在內灣以下發展成沖積平原（圖 3），直至西部海岸，之間經三義、苑裡、大甲，流入台灣海峽，也是苗栗縣與台中市的界河。就地質分區而言，東勢背斜位處西部麓山帶中，出露的岩層主要屬卓蘭層（烏居敬造，1935）。

大安溪床鄰近處的同震變形

集集地震造成了上百公里長的破裂跡，於埤豐橋以東，破裂方向轉為東西走向，破裂跡轉為 1 至 2 公里寬的變形帶（李元希等，2000），往東延伸至內灣地區後轉為東北走向，此轉向的破裂區域即為本研究區。

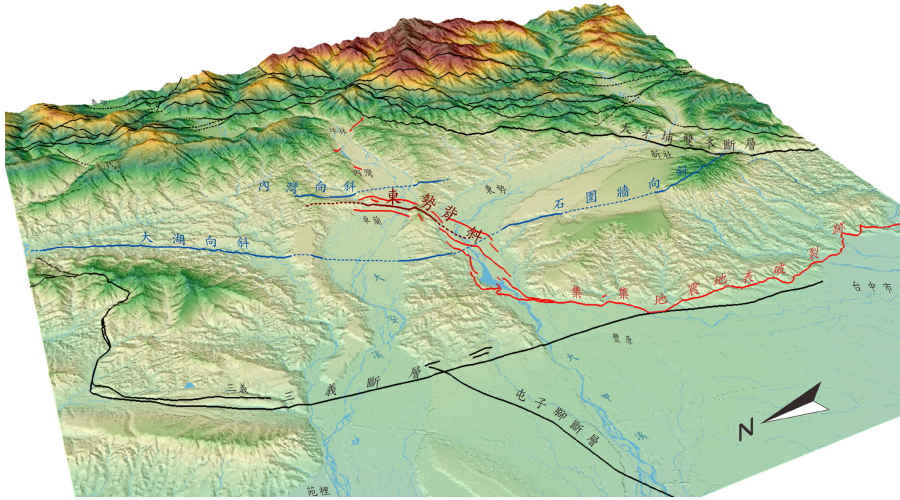


圖 3 中台灣卓蘭-豐原地區的地形圖

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

於研究區東南方東勢區的四角林，約離大安溪隆升河床兩公里處，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軸跡（圖 1）。車籠埔斷層地震破裂跡走向約略平行於東勢背斜軸，鄰近區域的垂直抬升量如圖 4 所示，於吊神山南方的 A-A' 剖面，形似對稱圓丘，變形帶較為寬廣，約 2.2 公里，垂直抬升量高達 16 公尺；B-B' 剖面切大安溪河床，平行於崖壁，形似類箱型褶皺，變形帶寬約 1.2 公里，最大抬升量達 12-13 公尺（Graveleau *et al.*, 2010），於東勢背斜東翼上游河床的沖積層呈現急驟褶曲的單斜構造（monocline）（圖 5a），垂直抬升量約為 5-6 公尺，東勢背斜西翼下游處，地變後地形呈緩傾斜無顯著特徵，約略可從河堤的傾斜端倪些許（圖 4b）；C-C' 剖面，形似圓丘，變形帶範圍比河床上窄，僅 0.8 公里，此剖面西側崖坡較東側陡，最大垂直抬升量約為 11 公尺；D-D' 剖面，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形態變化來看，車籠埔斷層地震破裂跡的隆升變形，呈往北遞緩的趨勢。

研究方法與成果

本研究製作高解析度區域空拍正射影像，及兩側峽谷與吊神山山壁之立面影像，同時進行河床上精細的野外調查，以正攝影像為底圖，記錄岩性、岩性

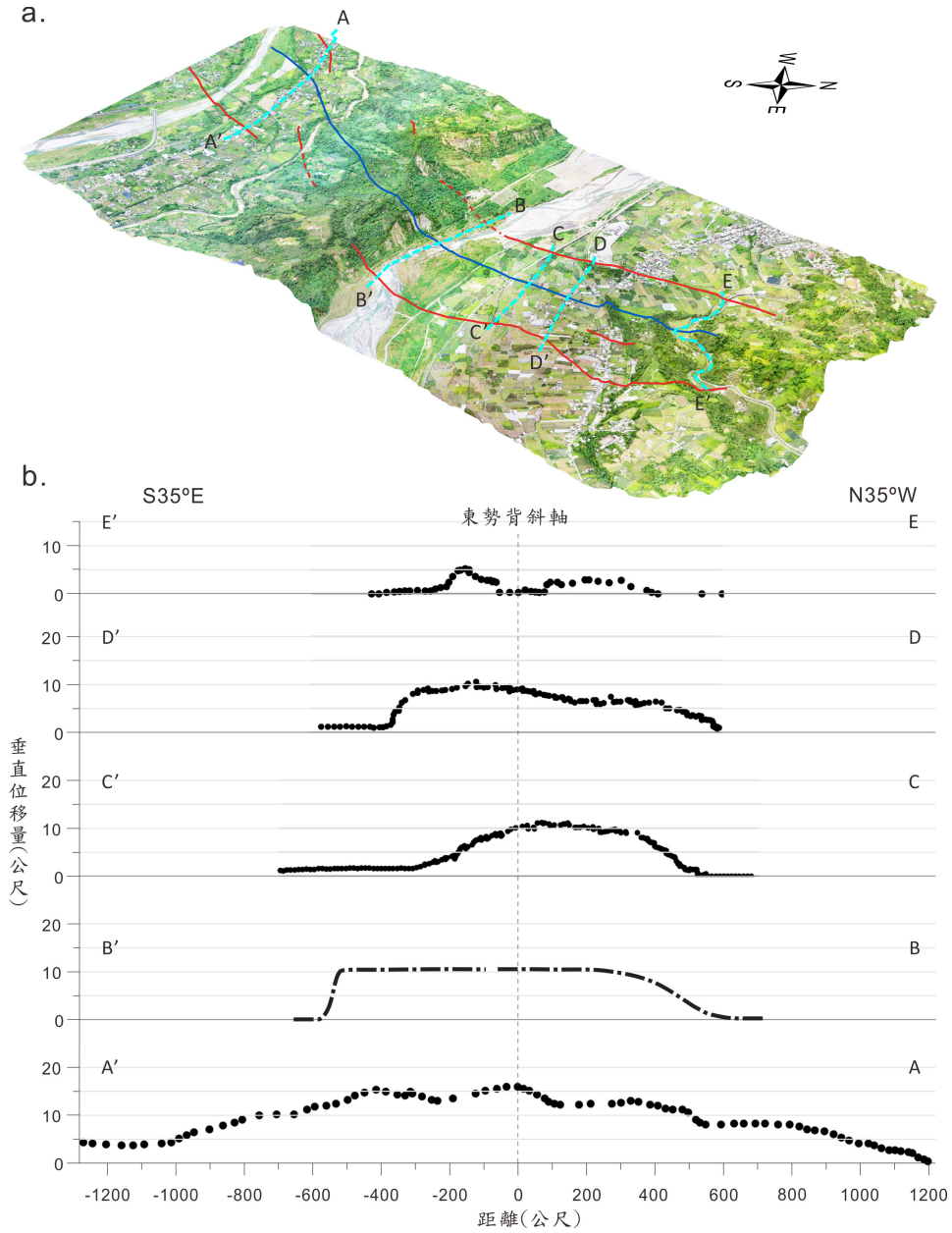


圖 4 大安溪河床鄰近區域抬升剖面（縱軸比例誇大 14 倍）。A-A'、C-C'、D-D'、E-E' 剖面資料來源於 Lee *et al.* (2005)。B-B' 剖面資料參考自 Gravelleau *et al.* (2010)，東側的地形崖根據圖 5a 震後變形的地表形貌略作修正。

Fig. 4 Profiles of uplift in the neighborhood of Taan river (with exaggerated 13 times larger ordinates). Data of A-A', C-C', D-D', E-E' profiles from Lee *et al.* (2005). B-B' profile is adapted from Gravelleau *et al.* (2010) with some modification on the shape of its left step according to the escarpment in Fig. 5a.

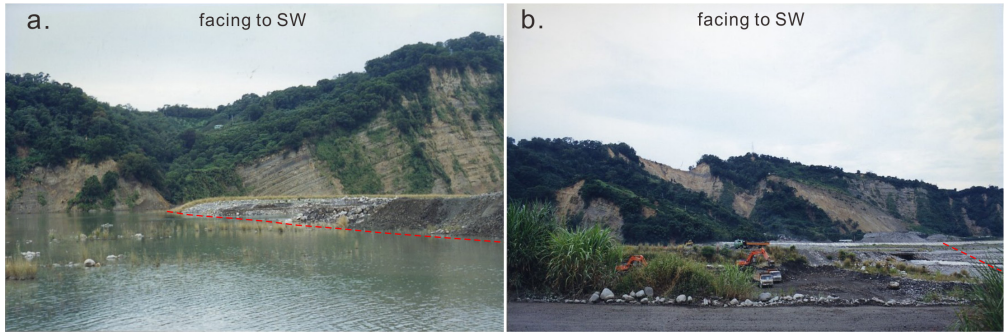


圖 5 大安溪震後河床抬升情形（黃文正攝）。（a）東側河床。（b）西側河床。
 Fig. 5 Uplift reach of Taan river. (Photographs by Wen-Jeng Huang) (a) Eastern side of the uplift reach (b) Western side of the uplift reach.

單元的分界與分布、層面與節理面位態，及次生構造的樣態與位置等，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。

野外露頭調查成果

大安溪河床東勢背斜區域於集集地震時被同震抬升，背斜東翼河床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）在短短幾年內急劇的往上游遷移（Cook *et al.*, 2013），形成河流兩岸與河流面高差數十公尺的峽谷景觀（圖 6c），此特殊的地形猶如大型的古地震研究的開挖槽溝，展示東勢背斜的岩層分布樣貌與地震地表破裂跡地下的秘密。

河谷與山壁上的調查結果顯示，本區岩性以砂泥互層或砂頁互層為主，砂岩層厚數十公分到兩、三公呎，淺灰色細粒；泥頁岩層厚約十數公分到五十公分，呈青灰色或深灰色。砂泥及砂頁互層間，偶夾單層五公尺以上之極厚層砂岩或泥岩。中至厚層的砂岩普遍有發育頗為發達的節理組，部分砂岩偶爾可見局部的橘紅色鏽染，亦可見貝類與砂棒生痕化石及豐富的交錯層理，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岩性特徵吻合，故推斷本研究域之岩層相當於上部卓蘭層。

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，除出露於背斜最核心的岩層單元外，皆以 U 型樣態顯現在岩性地質圖上，參見圖 7。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，由東往西順流而下，最東邊的岩層位態約十來度東傾，往西跨東翼地震破裂跡後，層面位態轉為 50-60 度向東南傾（圖 8d），

約保持 150 公尺寬後，轉為 20 多度向東南傾（圖 8c），隨後漸漸趨於水平，甫過褶皺軸，隨即變為 25 度向西北傾（圖 8b），維持差不多的傾角直至峽谷尾端，之後漸緩變為十幾度（圖 8a）。岩層在大安溪峽谷的延續性良好，其中並未觀察到與車籠埔斷層地震破裂跡同為東北-西南走向的斷層，鄰近褶皺軸的岩

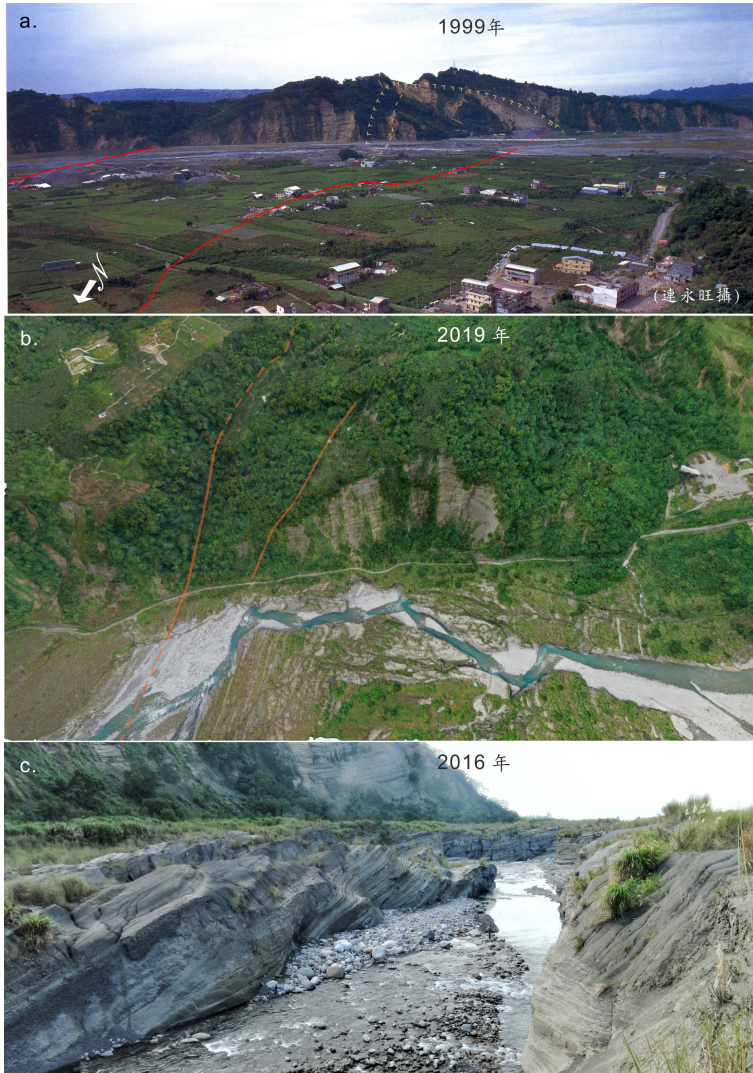


圖 6 大安溪 20 年的變化。(a) 1999 年地震後卓蘭南眺大安溪的情景 (b) 2019 年的大安溪峽谷 (c) 2016 年的大安溪峽谷。紅色線條表集地震破裂跡，橘色線條表斷層跡，虛線代表推測或隱伏的部分。圖 c 的中心點偏右可見一釣客。

Fig. 6 Views of uplift reach of Taan river in different years. (a) View shortly after ChiChi earthquake in 1999 (b) Image of Taan river in 2019 (c) Taan gorge in 2019. Red lines denote the ChiChi earthquake-induced ruptures. Orange lines denote faults where dashed is inferred or concealed. Note that a man is fishing on the bottom of gorge in the nearly center of Fig. c.

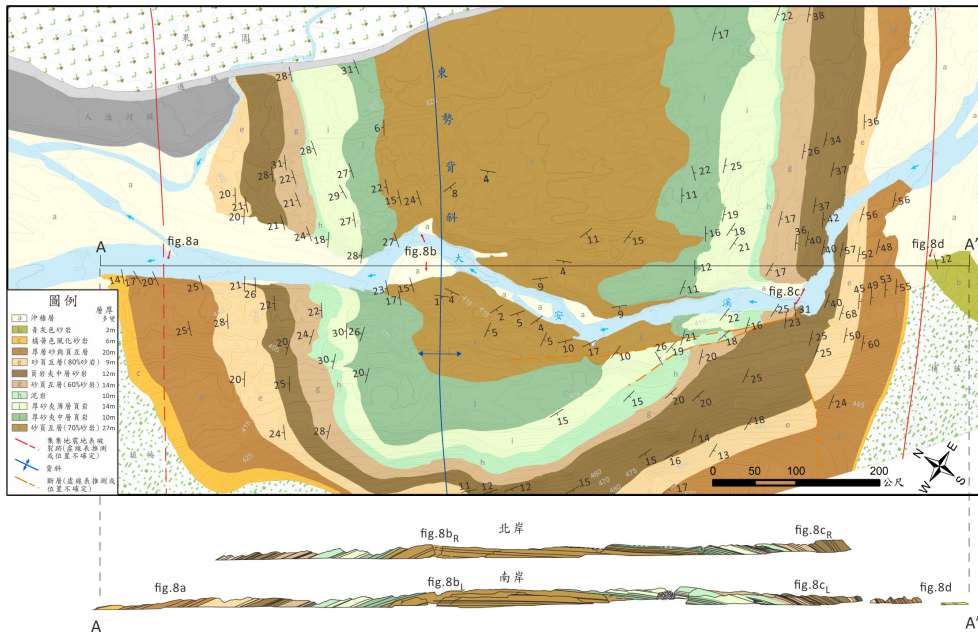


圖 7 區域岩性圖。部分位態資料參考 Huang *et al.* (2013)。A-A' 為垂直褶皺軸切的剖面，上方為北岸剖面，下方為南岸剖面。圖中的 a、b、c、d 為圖 8 照片的位置，箭頭為拍攝方向。

Fig. 7 Lithologic map of the Taan gorge. Part of bedding attitudes are adapted from Huang *et al.* (2013). A-A' indicates the projected orientation of 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. Labels a, b, c, d are the locations of photos in fig. 8. The arrows point toward the facing direction of the photographer.

層雖有破裂，但並未觀察到錯移發生，在南岸有一與流向平行（西北-東南向）之斷層，最大水平錯距（separation）推估有數十公尺，錯距往上下游遞減。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，其斷層跡如圖 6b 中右道橘色實線所示。

大安溪峽谷立面影像描繪

為了正確地的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，製作垂直於背斜軸跡的兩岸河床與吊神山山壁的立面影像，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，須結合野外所測量的位態資料計算投影，以投影後的位態重繪，再依重繪後的岩層位態，向上延伸，繪製完整的東勢背斜之幾何形貌，如圖 9。根據山壁立面影像，如式地重繪的東勢背斜之幾何形貌，見圖 10。圖 9 中兩剖面的背斜呈急折的（kinky）形態，與圖 10 根據山壁岩層分布描繪出來

的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。



圖 8 大安峽谷東勢背斜層態急驟變化處的露頭照片。(a) 東勢背斜西翼集集大地震破裂跡經過位置，岩層位態於褶皺翼部末端逐漸變緩，圖中的岩層由東向西從 28 度向西北傾漸變為 14 度向西北傾，朝西南攝。(b) 左圖為北岸背斜軸露頭，岩層折曲處雖已破裂，但無錯動，朝東北攝。右圖為南岸背斜軸露頭，褶曲幅度較北岸背斜軸緩，朝西南攝。(c) 東勢背斜東翼南岸與北岸位態急遽變化的位置。(d) 東勢背斜東翼大安峽谷上游集集地震破裂跡原址位置，兩側的岩層位態相差極大，左側砂岩傾角約為 12 度向東南傾，右側岩層位態約為 55 度向東南傾。

Fig. 8 Views of outcrops at turning points of bedding attitude at Taan gorge. Locations are shown in Fig. 7.

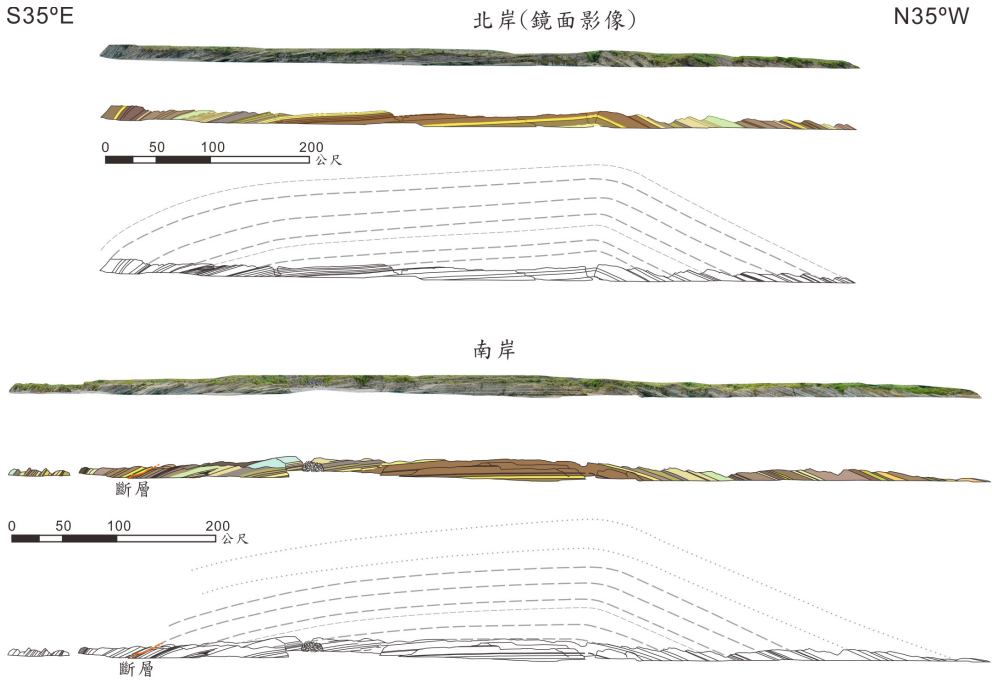


圖 9 大安溪峽谷南岸與北岸的立面影像及地質構造剖面。咖啡色系為砂頁互層，黃色系為砂岩為主之岩層，綠色系是泥岩為主之岩層。

Fig. 9 Elevations and vertical 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.

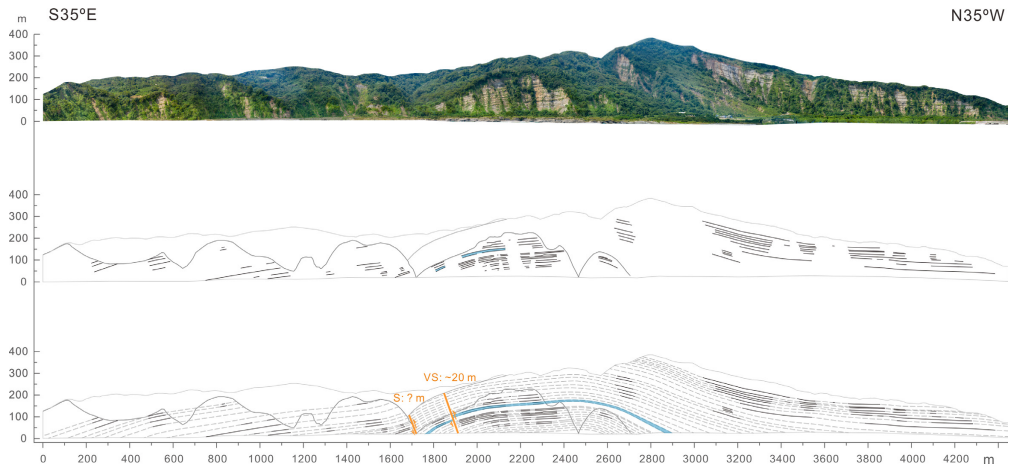


圖 10 吊神山山壁立面影像及東勢背斜幾何形貌之描繪。最上方為使用點雲製作之立面影像，中間為可見岩層之描繪，最下方為將可見岩層延伸以呈現東勢背斜於吊神山山壁上之幾何形貌。

Fig. 10 Elevation of Diaoshenshan cliff and delineations of Tungshih anticline.

大安溪峽谷剖面繪製

前一章節中我們已將河床與吊神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互一灌溉用之急流深潭，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（圖 11b），藉此推得此處的岩層位態，接著使用 β 圖法，找出於河岸及峭壁的褶皺軸位態（如圖 11），分別為 $4.1^\circ/235.3^\circ$ 及 $12.3^\circ/229^\circ$ ，兩者的傾角

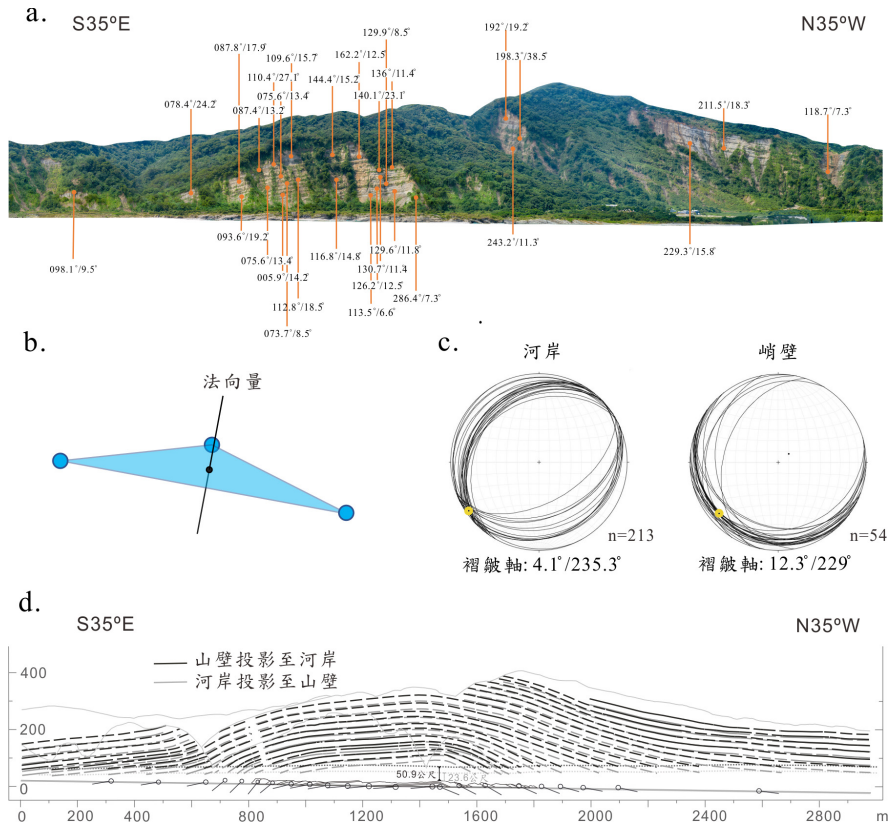


圖 11 東勢背斜構造剖面之建構 (a) 吊神山山壁的層面位態 (b) 空間中三點成面與其法向量示意圖 (c) 褶皺軸位態之 β 圖 (d) 背斜投影剖面。深色線條為山壁剖面沿山壁上之褶皺軸位態投影至河岸剖面；淺色線條為河岸剖面沿河岸之褶皺軸位態投影至山壁剖面。

Fig. 11 Construction of profiles of Tungshih anticline (a) Bedding attitudes on Diaoshenshan cliff (b) Illustration of a plane constructed with three points and its normal vector (c) β diagrams of fold axis (d) Overlapping projected profiles of the anticline.

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 11d），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。

討論

同震地表變形的機制

從前面的野外觀察結果顯示，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，且中間岩層被侵蝕消失（圖 8d），沿破裂跡通過之吊神山山壁唯一山溝（圖 6b），山壁兩側岩層層序及層態亦有所不同，因此推測當時破裂沿既存的斷層面錯動延伸至地表的可能性極大，唯河床為鬆散的沉積物覆蓋，地表面僅呈單斜褶皺形貌（圖 4a），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 8a）。

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 12），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，但事實上於野外中並未在西翼觀察到破裂或斷層（圖 8a），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 Gravelleau *et al.*（2010）所得的同震變形結果不符（圖 12a）。

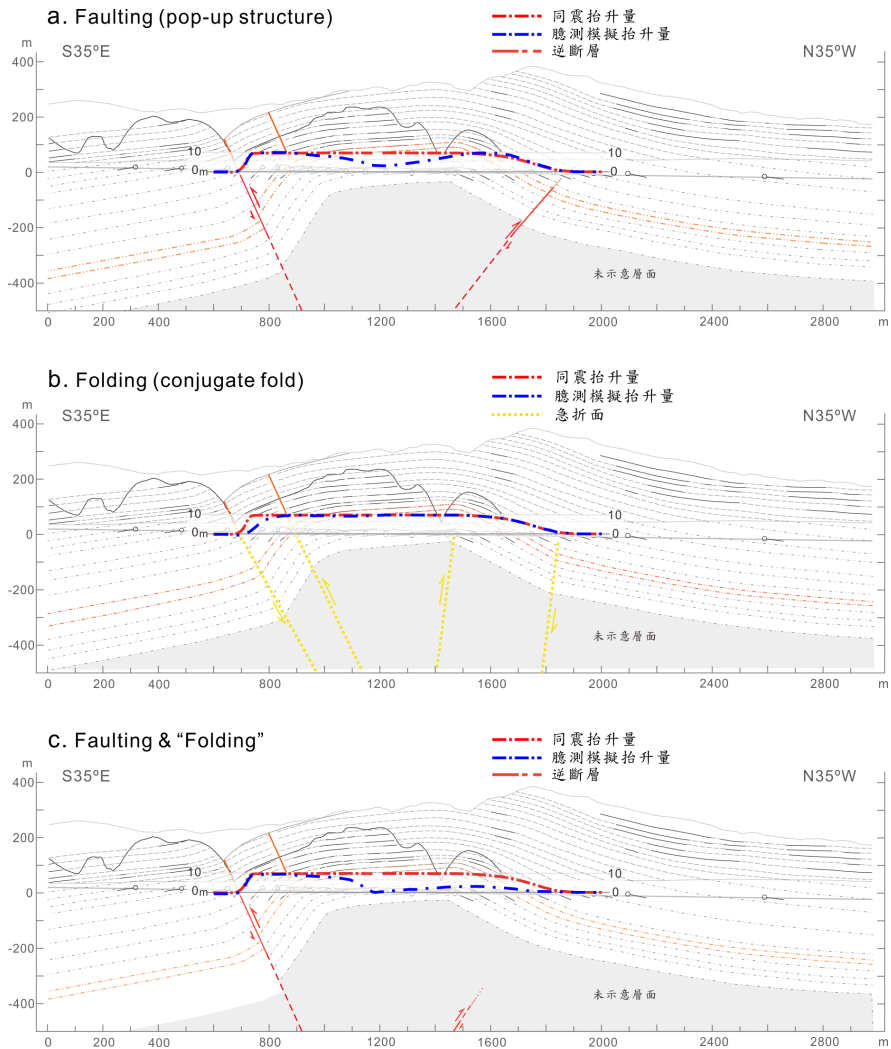


圖 12 三個吻合地質背景的構造解釋模式。(a) 斷層作用為主的突起構造 (pop-up structure) (b) 共軛急折褶皺 (c) 東側為斷層作用，西側以被動褶皺作用為主。

Fig. 12 Three inferred models which all match the geologic setting. (a) Pop-up structure (b) Conjugate kink fold (c) Faulting and passive folding model.

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 12b。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，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，相關的理論及模擬可參考 Price and Cosgrove (1990) 及梁又升 (2013)。儘管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 12b)。

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 12c)。

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。

東勢背斜的形成機制與同震變形的關聯性

東勢背斜突兀地出現在區域性石圍牆向斜的東翼 (圖 1)，究竟是褶皺翼部的寄生褶皺，如大溪背斜 (范書睿等, 2018)、或類似多重協調褶皺 (polyharmonic fold) 因力學硬層 (competent layer) 褶曲的次級褶皺，如砂卡礑溪山壁的褶皺，還是斷層關聯褶皺 (fault-related folds) (Jamison, 1987)、亦或其他如火成岩漿上湧造成上伏沉積岩褶曲的構造，如觀音坑山 (鄧屬予等 2011)，這或許可先從前人的區域性地質剖面找尋線索。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 13)，兩個平衡剖面中可見，東勢背斜在三義斷層的上盤，是大區域向斜 (石圍牆向斜) 構造中的背斜，然而黃旭燦等 (2004) 以地下四公里深的滑脫斷層之彎曲 (bend)，意指上伏岩層因上盤滑動時，被動地造成東勢背斜，雷同於斷層彎曲褶皺 (fault-bend fold)，然而其東勢背斜呈尖頂狀，與我們的觀察不吻合；俞力凡等 (2005) 則結合集集地震的現象及較多的地表層態資料，推論在卓蘭層底下的錦水頁岩中有一平行層面的滑動面，東勢背斜即坐落在滑動面的前緣，類似脫離褶皺 (detachment fold)，Yue *et al.* (2005) 的剖面相較有較多資料的支持。Graveleau *et al.* (2010) 等重新演算震測資料將垂直向由走時轉為深

度，同時以中油的深井岩心記錄資料，對東勢背斜有更詳細及更大比例尺的構造剖面，也估算的平行層面之滑動面（滑脫斷層）深約 1-1.2 公里，其剖面構造大體上與俞力凡等（2005）的雷同。我們根據 Gravelleau *et al.*（2010）的震測剖面及滑動面深度的解釋、加上中油的深井資料對地層深度的控制，結合我們前節的剖面成果及機制討論，繪製的圖 14 的構造剖面圖，我們認為錦水頁岩中的滑脫斷層，區隔的滑脫斷層上下的構造特徵，此乃採納俞力凡等（2005）及 Gravelleau *et al.*（2010）的見解，但從背斜的形貌及同震變形特徵，認為東勢背斜的形成機制應較雷同於共軛褶皺作用，至於是否皆為該滑脫斷層同震錯移之載荷（loading）所造成，似乎並非必要，震間大地應力側向水平的推擠，使岩層間相互地滑動，也可使該背斜增長，如黃文正和凱強生（2010）中加州 Kettleman Hills 背斜的例子，至於兩者的貢獻比例，就無法評估了，再者，從集集地震的河床隆升形貌推論，共軛褶皺作用應是主要的機制，然而地變東側的急驟抬升，較似與斷層作用有關，因此認為地震時該處的既存斷層（pre-existing fault）（圖 14 及圖 6b）的錯移，也貢獻部分的同震地變。

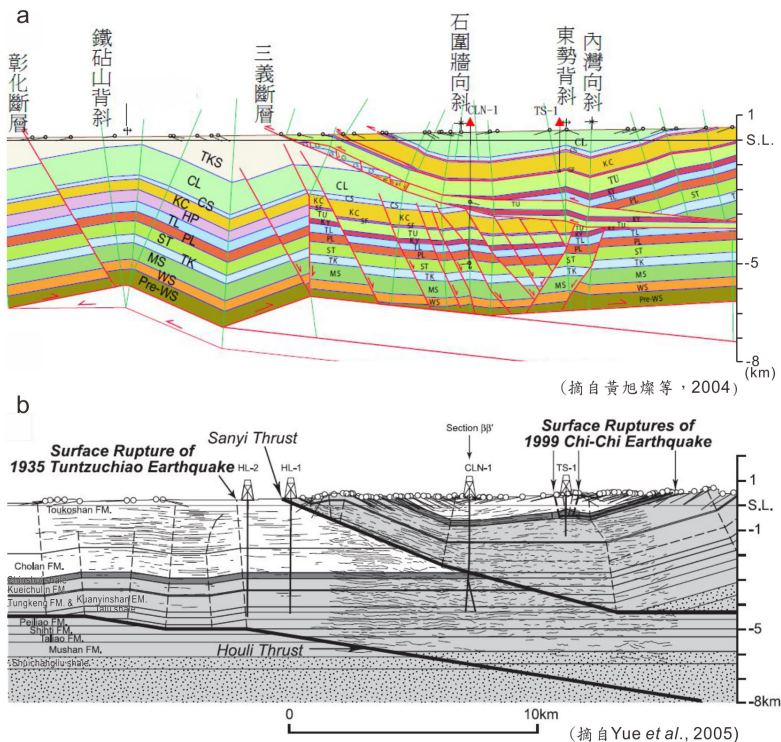


圖 13 前人建構的橫跨東勢背斜區域性剖面的截圖。相關解釋參見內文。

Fig. 13 Parts of Two published Tungshih anticline-transpassed cross sections. Relevant comments refer to the content.

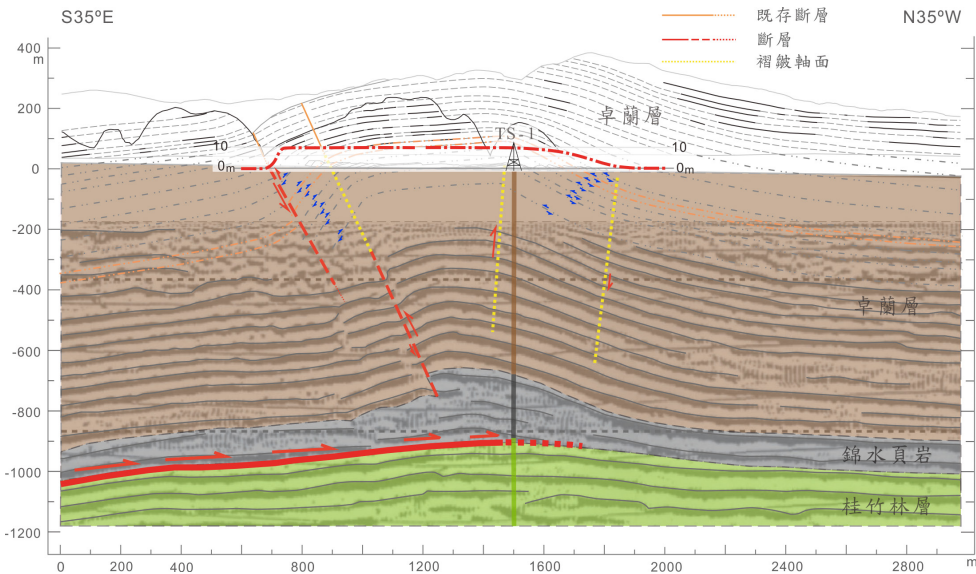


圖 14 本研究認為的東勢背斜幾何形態及集集地震地變之抬升機制。震測剖面摘自 Gravelleau *et al.* (2010)。

Fig. 14 Configuration of Tungshih anticline and forming mechanism of Chi-Chi earthquake-induced ground deformation proposed by this study. The seismic profile is adopted from Gravelleau *et al.* (2010).

結論

集集地震時大安溪河床東勢背斜區域被同震抬升，河流的回春作用加上此區域卓蘭層岩性鬆軟的特性，形成數十公尺的峽谷景觀。結合新穎的谷壁露頭、吊神山山壁岩層、深井岩心及震測剖面等資料，搭配理論的分析，歸結如下，東勢背斜為一脫離褶皺，形成機制以（共軛）褶皺作用為主，載荷可以是滑脫斷層地震時的瞬間滑移，亦或震間的水平大地應力之側向推擠；集集地震的大安溪河床地變形貌，應是受控於既存地質構造的影響，以（共軛）褶皺作用的形成機制為主，斷層作用為輔。

參考文獻

- 王錦華、王乾盈、宋國城、辛在勤、余水倍、謝秋霽、溫國樑、鐘孫霖、李民、郭鎧紋、張國強（2005）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，共593頁。
- 何信昌、陳勉銘（2000）台中圖幅及說明書，五萬分之一圖幅第24號。經濟部中央地質調查所，第1-39頁。

- 李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正（2000）九二一集集地震地表變形特性－埤豐橋以東。經濟部中央地質調查所特刊，第12號，第19-40頁。
- 李錦發（2000）東勢圖幅及說明書，五萬分之一圖幅第18號。經濟部中央地質調查所，第1-90頁。
- 范書睿、黃文正、羅偉（2018）桃園大漢溪河床中視尺度地質構造與大溪背斜構造關聯性之研究。經濟部中央地質調查所特刊，第33號，第31-56頁。
- 張憲卿（1994）大甲圖幅及說明書，五萬分之一圖幅第17號。經濟部中央地質調查所，第1-46頁。
- 梁又升（2013）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學學系研究所碩士論文，共90頁。
- 烏居敬造（1935）東勢圖幅及說明書（比例尺五萬分之一）。臺灣總督府殖產局，第732號，共26頁。
- 黃文正、凱強生（2010）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24號，第95-132頁。
- 黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）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，共59頁。
- 經濟部中央地質調查所（2000）九二一地震地質調查報告。經濟部中央地質調查所編印，共315頁。
- 鄧屬予、劉志學、陳文福、游鎮源、蔡宜伶（2011）觀音山地質與火山作用。經濟部中央地質調查所彙刊，第24號，第123-153頁。
- 羅偉、吳樂群、陳華玟（1999）國姓圖幅及說明書，五萬分之一圖幅第25號。經濟部中央地質調查所，第1-52頁。
- 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. (2007) Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B3), DOI: 10.1029/2006JB004388.
- Cook, K.L., Yurowski, J.M. and Hovius, N. (2013) A demonstration of the importance of bedload transport for fluvial bedrock erosion and knickpoint propagation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(7), 683-695.
- Graveleau, F., Suppe, J., Ustaszewski, M., Chang, K.J., Dominguez, S. and Huang, M.H. (2010) Incremental fold growth during Taiwan Chi-Chi Earthquake Examples from the Tungshih anticline and Neiwan syncline. *Western Pacific Geophysics Meeting*, poster. 202 pp.
- Huang, M.W., Pan, Y.W. and Liao, J.J. (2013) A case of rapid rock riverbed incision in a coseismic uplift reach and its implications. *Geomorphology*, 184, 98-110.
- Huang, W.J. (2006) Deformation at the leading edge of thrust faults in Philosophy. *Purdue University*.

- Huang, W.J. and Liang, Y.S. (2012) Study on mechanical mechanism of kink folds via BEM. The 36th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics, November 16-17, 2012, Paper X-039
- Jamison, W.R. (1987) Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, 9(2), 207-219.
- Lee, J.C., Chu, H.T., Angelier, J., Chan, Y.C., Hu, J.C., Lu, C.Y. and Rau, R.J. (2002) Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures. *Journal of Structural Geology*, 24(1), 173-192.
- Lee, Y.H. (2005) Structures Associated with the Northern End of the 1999 Chi-Chi Earthquake Rupture, Central Taiwan: Implications for Seismic-Hazard Assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 471-485.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 82(2), 1018-1040.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W. (1990) *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press. 502 pp.
- 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., Tseng, T.F., Tsai, C.S. and Shin, T.C. (2001) Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 995-1012.
- Yue, L.F., Suppe, J. and Hung, J.H. (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw= 7.6). *Journal of Structural Geology*, 27(11), 2058-2083.

Forming Mechanisms and Relation of Chi-Chi Earthquake-induced Uplift Reach of Taan River to Tungshih Anticline

Yu-Cheng Hsu¹ and Wen-Jeng Huang^{1,2}

ABSTRACT

Three mechanisms — faulting, folding, and faulting-folding combination — were proposed to explain how the Chi-Chi earthquake-induced uplift reach of the Taan River formed on the Tungshih anticline. This study takes advantage of the new exposures resulting from the rejuvenation of the Taan River, as well as the exposure on the Diaoshenshan Cliff, to re-examine these mechanisms. Integrating the data obtained from UAV images, a deep well log, and a seismic image profile, this study constructs a complete configuration for the Tungshih anticline. Our result indicates that the Tungshih anticline is a detachment fold formed through the mechanism of (conjugate) folding, while the formation of the uplift reach was strongly influenced by the existing structures and triggered mainly via (conjugate) folding and partly via faulting under the loading of a sudden slip along the detachment fault at a depth of ~ 1.1 km.

Key words: active anticline, Tungshih anticline, co-seismic ground deformation, active fault

1. Department of Earth Science, National Central University

2. Institute of Applied Geology, National Central University