

九芎坑斷層的斷層特性與活動性研究

Structural Characteristics of the Chiuchiungkeng Fault

陳文山¹、楊志成¹、石瑞銓²、楊小青¹、顏一勤¹、陳于高¹、
張徽正³、林偉雄³、李元希³、石同生³、盧詩丁³

Wen-Shan Chen¹, Chi-Cheng Yang¹, Ruey-Chyuan Shih², Hsiao-Chin Yang¹,
Yi-Ching Yan¹, Yue-Gau Chen¹, Hui-Cheng Chang³, Wei-Hsiung Lin³,
Yuan-Hsi Lee³, Tung-Sheng Shih³, Shih-Ting Lu³

ABSTRACT

The Chiuchiungkeng fault produced a sinuous trace of 17 km in length that followed the boundary between the Western Foothills and the lower hills. The Plio-Pleistocene strata on the hanging wall override the late Pleistocene alluvium and Holocene terraces in the footwall. Based on the measurements of the rupture and seismic reflection, the fault plane angle revealed to determinate the shape of a ramp structure, about 20-30° east-dipping beneath the foothills. Thus, the rapidly uplifting of the foothills makes river incision and uplift on the upthrow block. The neotectono-geomorphologic features reveal to the foothills where display several alluvial and colluvial terraces preservation.

前言

從台灣西南部地區的沉積盆地演化來看，晚更新世之後隆起形成外麓山帶，其西側丘陵更是在晚更新世－全新世才形成，顯然此區域都屬第四紀的活動構造（陳文山等，2003）。前人研究亦已顯示麓山帶地區存在許多晚第四紀以來的活動構造（Bonilla, 1975; Hsu and Chang, 1979）。另外，由全新世階地與大地測

1.台灣大學地質科學系(Dept. of Geosciences, National Taiwan University)

2.中正大學地球與環境科學系(Dept. of Earth and Environ. Science, National Chung Cheng Univ.)

3.經濟部中央地質調查所(Central Geological Survey, MOEA)

量等長期與近期地殼變動速率都顯示，西南部是非常活躍的變動區域(Hashimoto et al., 1972; Yu et al., 1997; Hung et al., 1999; Chen and Liu, 1996; Hsieh and Knuepfer, 2001; 侯進雄等, 2002)。

九芎坑斷層由中國石油公司(1986)首先提出，位於石牛溪(古坑斷層)與八掌溪之間，但地質圖中僅以虛線標示斷層位置。之後，有關此斷層的研究非常缺乏，僅針對斷層露頭敘述(林慶偉等, 1999a; b)、探討河流地形與斷層關係(陳柔妃, 1999)，以及震測資料解釋(林煌棋, 1996)等，但對於斷層活動性、斷層位置以及斷層兩側岩層等相關地質資料仍非常欠缺。因而中央地質調查所的活動斷層分布圖(林啓文等, 2000)，亦僅將九芎坑斷層列為存疑性活動斷層。

根據河流地形特性，陳文山等(2003)將西南部由東向西劃分為麓山帶、隆起台地與海岸平原等三個構造地形區(tectono-geomorphic terrain)。麓山帶是由多條呈疊瓦狀排列的逆斷層構成，桐樹湖斷層、九芎坑斷層、木屐寮斷層以及六甲斷層是位在麓山帶最西側，與隆起台地或海岸平原區相接的前緣斷層。麓山帶的逆斷層發育較早，已發育成為斷層轉折褶皺的型態；隆起台地區形成較晚，尚屬於斷層擴展褶皺的型態(陳文山等, 2003)。九芎坑斷層屬於麓山帶最前緣的逆衝斷層，東側為觸口斷層，西側的紅土台地即由嘉義斷層產生的擴展褶皺(小梅背斜)所隆起的地形。本研究主要針對嘉義地區九芎坑斷層的構造特性與活動性作深入的探討。

區域地質構造與九芎坑斷層位置

本區的斷層可以分為兩種型態，一為南北走向，向西逆衝的逆斷層計有觸口斷層、九芎坑斷層與嘉義斷層。觸口斷層位於最東側，此區段的斷層跡呈弧形向西突出，上盤的岩層最老(中新統)逆衝於下盤最年輕的地層之上(頭嵙山層火炎山相)；由斷層兩側層位差來看，此區段觸口斷層的斷距最大，垂直斷距可達3000公尺。最西側的嘉義斷層為一盲斷層(葉明官等, 2000)，於上盤的擴展褶皺構造(小梅背斜)造成撓曲的紅土台地。另一屬於西北西與西南西走向的橫移斷層計有古坑斷層、梅山斷層與竹崎斷層(圖一)。從古坑斷層兩側地層的關係來看，斷層性質屬於右移斷層，其為九芎坑斷層的北界(中國石油公司台探總處, 1986)。921地震斷層的最南端即延伸到古坑斷層為止(Chen et al., 2001b; 陳文山等, 2000)。梅山斷層為1906年嘉義地震時地表產生長達13公里的地震斷層，

爲一西南西走向的右移斷層（Omori, 1907）。野外調查以及震測資料顯示梅山斷層可能呈一寬約數百公尺的斷層擾動帶，此帶由數條右移斷層所構成，並呈現開花狀構造（石瑞銓等，2002）。竹崎斷層位於牛稠溪以南，爲約呈東西走向的左移斷層，九芎坑斷層的南端延至竹崎斷層。九芎坑斷層就介於古坑斷層與竹崎斷層等橫移斷層之間，由三條斷層的構造關係來看上盤地塊沿九芎坑斷層向西逆衝，而逆衝地塊南北兩側就以古坑與竹崎斷層爲側斷坪（lateral ramp；圖一）。

地形

研究區依據陳文山等（2003）的構造地形分區，九芎坑斷層上盤屬於麓山帶構造地形區，與嘉義斷層之間屬於隆起台地區，而嘉義斷層下盤爲海岸平原構造地形區。以下探討各區地形的特徵以及與九芎坑斷層的關係。九芎坑斷層兩側地形有很大差異，上盤地勢較高且地形坡度較大，約在15-35度，而下盤隆起台地區的坡度在20度以下，觸口斷層上盤的地形坡度則更大，約在25-50度（圖二）。從河流型態來看，海岸平原區的河流屬於曲流型態，但隆起台地與麓山帶地區則屬於下切曲流與辮狀河。三疊溪在隆起台地區的河流型態即屬於下切曲流，但九芎坑斷層上盤的麓山帶河段則屬於辮狀河。從河床坡度分析發現，九芎坑斷層上盤河段坡降爲每公里140公尺，下盤坡降爲每公里小於10公尺（圖三）；上述結果顯示九芎坑斷層屬於活動的逆斷層，上盤地塊長期持續抬升造成兩側地形的變異。

階地分布與九芎坑斷層亦密切相關，如沖積扇階地僅分布於九芎坑斷層上盤（圖四）。沖積扇階地大致分爲三群，主要分布在大湖口溪、三疊溪以及牛稠溪上游。從沖積扇階地的產狀，推測其原來環境應位於觸口斷層下盤的山前沖積扇，之後因九芎坑斷層所產成的抬升作用將沖積扇隆起，同時被河流切割形成寬長的階地地形，殘留在九芎坑斷層上盤地塊的山麓頂面。另外，西南部唯一發育的紅土台地就形成於九芎坑斷層下盤，由於小梅背斜擴展褶皺構造的隆起所形成的台地地形，此紅土台地是西南部麓山帶前緣地區發育最早且最明顯的台地地形。

地層

依據嘉義地質圖（中國石油公司，1986），牛稠溪南北兩側為不同的地層劃分，北側採用卓蘭層與頭料山層，南側採用澧水溪層—六雙層。本文大致採用上述的分層，但將九芎坑斷層下盤的頭料山層改為六雙層（圖一）。陳文山等（Chen *et al.*, 2001a）將臺灣中部草湖溪剖面對比於西南部曾文溪剖面的地層（圖一），其中卓蘭層對比至澧水溪層與六重溪層，頭料山層對比崁下寮層與二重溪層，由圖一可以發現六雙層層位較草湖溪剖面的頭料山層還年輕。本研究利用砂岩岩象分析發現紅土台地以下地層的砂岩組成，與六雙層較相似，均以石英與變質砂岩岩屑為主，僅含少量板岩岩屑，推測是來自東側麓山帶中新統—更新統的沉積物。因此，紅土台地礫石層以下的地層是屬於較九芎坑斷層上盤的頭料山層還年輕，應對比於六雙層。

斷層露頭描述

九芎坑斷層出露範圍由石牛溪北側的荷苞山向南延伸至牛稠溪南側，全長約17公里（圖一）。北段斷層逆衝至紅土台地與階地礫石之上，倒孔山溪以南斷層則逆衝至六雙層之上。目前所發現的斷層露頭主要在北段區域，倒孔山溪心慈橋東側約200公尺、大湖口溪光華橋西側約800公尺以及石牛溪。九芎坑斷層向北延伸至石牛溪北側時即被古坑斷層截切，因此古坑斷層鄰近的岩層受到右移斷層作用牽引而呈與斷層走向略為平行的西北西走向（圖一）；斷層南段露頭狀況不佳，斷層兩側岩層傾角僅些微差異，上盤岩層向東傾斜約20-30度，下盤傾角約10度或近乎水平。另一斷層特徵是，南段斷層帶擾動帶的寬度較窄，可能僅有數公尺，而北段斷層擾動帶可達數百公尺以上，也因此造成南段斷層不易發現。以下針對各露頭剖面進行描述與討論。

（1）石牛溪剖面：剖面中九芎坑斷層擾動帶寬約1000公尺，其中具有3條明顯的斷層，最西側斷層即為九芎坑斷層（圖五）。北岸斷層呈現卓蘭層逆衝到階地礫石層之上，斷層走向為北偏東26度，向東傾斜26度，斷層擦痕為北偏西50度。上盤卓蘭層受到強烈剪切作用形成無數的小型剪切構造，岩層向東傾斜約40度。南岸也可見卓蘭層逆衝到階地礫石層之上（圖五）。

（2）大湖口溪剖面：斷層露頭位在光華橋下游約700公尺，上盤為卓蘭層，下盤為紅土階地砂礫層與階地礫石層。碳14定年結果紅土階地砂礫層的沉積年代為 $47,100 \pm 1,750$ BP，其上階地礫石層則未有定年資料。北岸剖面斷層擾動帶寬約

100公尺以上，斷層前端的擾動帶中混雜上盤卓蘭層與下盤紅土階地砂礫層，形成5條明顯的剪切帶。其中3條斷層剪切帶截切下盤的紅土階地砂礫層與階地礫石層，顯示近期曾有活動，此三條斷層暫以A、B、C斷層稱之（圖六）。

A斷層位在擾動帶最西側，斷層位態為北偏西8度走向，向東傾斜54度；上盤為卓蘭層，下盤為紅土階地砂礫層，但斷層被L礫石層覆蓋（圖七）；表示A斷層在L礫石層沉積後即不再有活動跡象。B斷層上下盤都為紅土階地砂礫層，於斷層尖端紅土階地砂層逆衝至L礫石層之內，但被上部L礫石層覆蓋（圖八、圖九）；顯示B斷層發生在下部L礫石層沉積之後，而上部L礫石層沉積至今未曾活動。C斷層下盤為紅土階地砂層，上盤為卓蘭層，於斷層尖端發現卓蘭層逆衝至上部L礫石層之上，但斷層被U礫石層覆蓋（圖十）；顯示C斷層發生於上部L礫石層沉積之後，但U礫石層沉積後未曾活動。由大湖口溪剖面所呈現斷層與階地沉積層的關係來看，A斷層為早先形成的剪切帶，C斷層為最近期活動的剪切帶。另外，從河階地形亦可以發現南北岸在斷層兩側的階面並沒有高差，顯示最後期由U礫石層所構成的階面並未受到斷層擾動，表示九芎坑斷層在U礫石層沉積後沒有活動跡象。

討論與結論

（1）九芎坑斷層是由卓蘭層逆衝至六雙層、紅土礫石層及階地礫石層之上，斷層走向約為北東10-20度，斷層傾角在南北有很大的差異，北段約向東30度，南段約為20度。從斷層傾角以及與觸口斷層的關係來看，九芎坑斷層可能是觸口斷層斷坡向前（向西）的分枝斷層（圖十一）。從斷層與階地沉積層的關係顯示，九芎坑斷層應屬於第一類的活動斷層。斷層兩側地層的層位落差顯示，九芎坑斷層的垂直斷距至少有1500公尺。

（2）九芎坑斷層南北兩側被古坑斷層與竹崎斷層所截切，由斷層兩側層位關係，古坑斷層屬於右移斷層，竹崎斷層屬於左移斷層；形成九芎坑斷層上盤地塊向西逆衝突出，竹崎斷層為地塊向西運動時的南側的斷坡。而古坑斷層是九芎坑斷層與桐樹湖斷層分段的界線斷層。但大地測量資料（Yu et al., 1997；侯進雄等，2002）來分析，古坑斷層北側地塊向西位移速率大於南側地塊，顯示現階段古坑斷層屬於左滑斷層；竹崎斷層的南側地塊向西位移速率亦大於北側地塊，顯示現階段竹崎斷層活動屬於右滑斷層；顯然現階段地表變形型態與九芎坑斷層的

長期活動型態相反。此變化的可能因素是大地測量結果僅代表短期而非長期的變形行爲。尤其古坑斷層與竹崎斷層屬於撕裂斷層 (tear fault)，其斷層活動是因爲兩側地塊的不等量運動所造成；而地塊的活動是因爲各自的逆衝作用所造成，某一地塊發生活動時，其邊界斷層 (撕裂斷層) 亦產生活動。以古坑斷層爲例，當桐樹湖斷層活動時，古坑斷層亦隨即產生左滑的運動型態，當九芎坑斷層活動時，古坑斷層的活動型態即爲右滑斷層。

(3) 斷層長期的運動型態可能變化不大，但針對一次地震事件期間 (地震週期, earthquake cycle) 的應變速率則會有很大的變化。尤其震後時期 (post-seismic period) 的應變速率往往大於震間時期 (inter-seismic period)，且震前時期的應變速率小於震間時期 (Hyndman and Wang, 1995; Stein and Ekstrom, 1992)。九芎坑斷層上盤地塊的向西位移速率，小於古坑斷層北側地塊的速率，也小於竹崎斷層南側地塊的位移速率，因此現階段九芎坑斷層可能處於斷層被鎖定的震前階段。

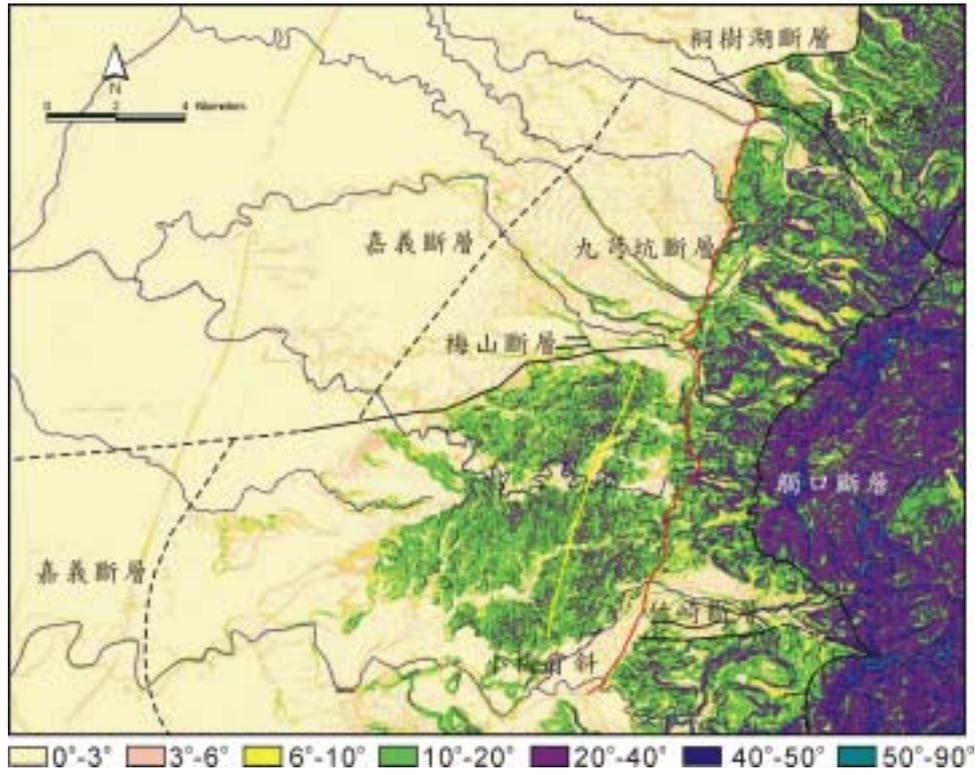
誌謝

本研究經費來自經濟部中央地質調查所之九十年『斷層活動性調查』—新期構造、古地震與槽溝開挖研究，以及九十一年『地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫』—槽溝開挖與古地震研究計畫 (2/5) (計畫編號：92EC2A380204)，特此致謝。

參考文獻

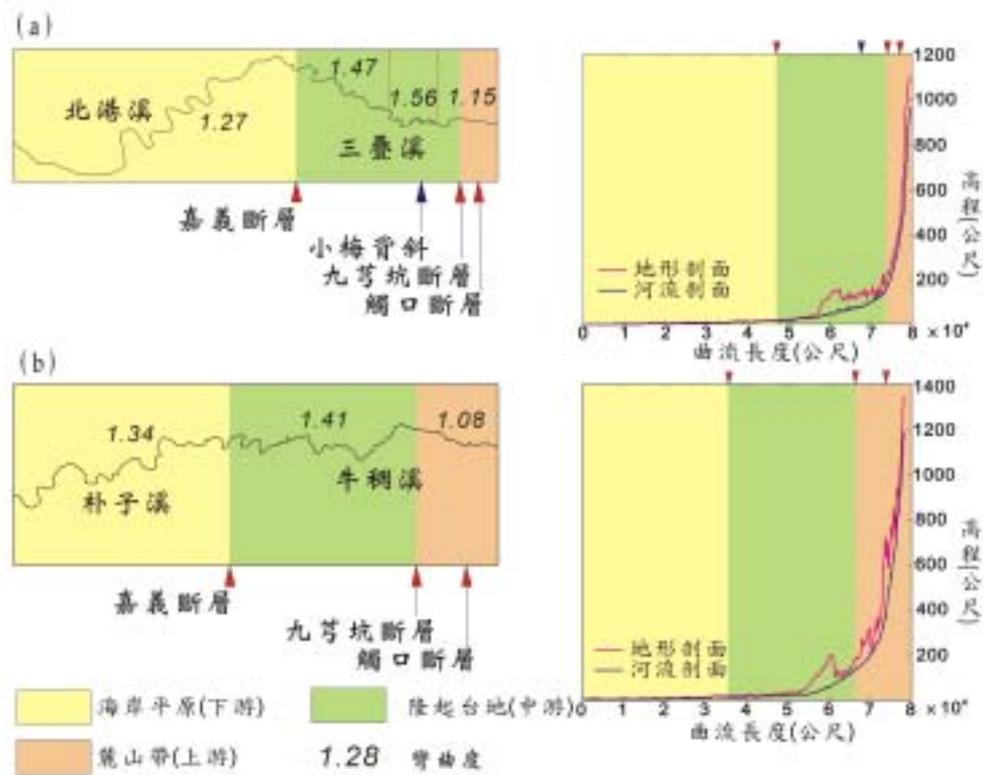
- 中國石油公司 (1986) 比例尺1:100,000地質圖—嘉義幅。中國石油公司台灣油礦探勘總處。
- 林啓文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000) 台灣活動斷層概論。經濟部中央地質調查所特刊，第13號，共122頁。
- 林煌棋 (1996) 嘉南地區麓山帶地質構造之研究。中央大學地球物理研究所碩士論文，共144頁。
- 林慶偉、吳炫宗、蕭崇利 (1999a) 嘉義地區活動斷層研究：梅山斷層與九芎坑斷層之初步研究。中國地質學會88年年會論文集，279-280頁。
- 林慶偉、吳炫宗、朱偉嘉 (1999b) 九芎坑斷層與新化斷層之地表構造現象。第二屆台灣活動斷層調查研討會，11-15頁。
- 侯進雄、王菁穗、費立沅 (2002) 台灣西南地區地殼變形監測，第21屆測量學術及應用研討會論文集，

- 第687-694頁。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2000）921集集大地震的地震斷層特性與構造意義。經濟部中央地質調查所特刊，第12期，第139-154頁。
- 陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啓文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁（2003）從構造地形特徵探討嘉南地區的活動構造。經濟部中央地質調查所彙刊（投稿中）
- 陳柔妃（1999）嘉南地區活動構造之地形計測指標研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共146頁。
- 葉明官、陳文山、石文卿、陳若玲（2000）從震測剖面來看梅山斷層的特性。中國地質學會八十九年度年會，第106-108頁。
- Bonilla, M.G (1975) A review of recently active faults in Taiwan: U.S. Geological Survey Open-File Report, no.75-41, 58pp.
- Chen, W.S., Ridgway, K.D., Horng, C.S., Chen, Y.G, Shea, K.S., and Yeh, M.G (2001a) Stratigraphic architecture, magnetostratigraphy, and incised-valley systems of the Pliocene-Pleistocene collisional marine foreland basin of Taiwan: eustatic and tectonic controls on deposition: *Geol. Soc. Am. Bull.*, 113, no.10, 1249-1271.
- 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. (2001b) Chi-Chi Earthquake, 1999 September 21: A case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes: *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 5.
- Chen, Y.G, and Liu, T.K. (1996) Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait: *Quat. Res.*, V. 45, 254-262.
- Hashimoto, W., Taira, K., Kurihara, K., Imai, T., and Makino, Y. (1972) Studies on the younger Cenozoic deposits in Taiwan (Formosa): part II. The younger Cenozoic deposits in south and east Taiwan: *Geol. Paleont. Southeastern Asia X*, 265-303.
- Hsieh, M.L., and Knuepfer, P.L.K. (2001) Middle-late Holocene river terraces in the Erhjen river basin, southwestern Taiwan- implications of river response to climate change and active tectonic uplift: *Geomorphology*, 38, 337-372.
- Hsu, T.L., and Chang, H/C. (1979) Quaternary faulting in Taiwan: *Mem. Geol. Soc. China*, no.3, 155-165.
- Hung, J.H., Wiltshko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P., and Bock, Y. (1999) Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt: *TAO*, 10, 543-568.
- Hyndman, R.D., and Wang, K., (1995) The rupture zone of Cascadia great earthquakes from current deformation and the thermal regime: *J. Geophys. Res.*, V. 100, 22133-22154.
- Omori, F. (1907) Earthquake of the Chiayi area, Taiwan, 1906: Introduction of Earthquake: 103-147. (In Japanses)
- Stein, R.S., and Ekstrom, G (1992) Seismicity and geometry of a 110-km-long blind thrust fault 2. Synthesis of the 1982-1985 California earthquake sequence: *Jour. Geophys. Reas.*, v.97, p.4865-4883.
- Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area: *Tectonophysics*, 274, 41-59.



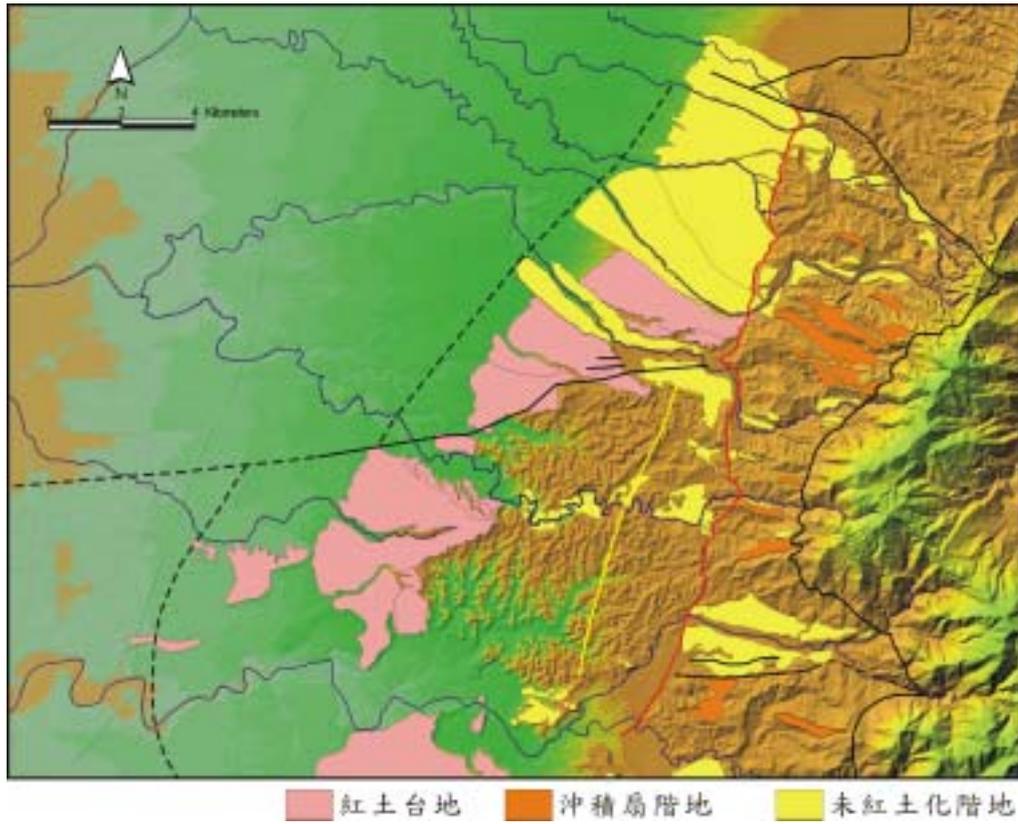
圖二 九芎坑斷層上盤地形坡度約在 15-35 度之間，下盤地形坡度約 20 度以下，而觸口斷層上盤地形坡度則大於 25 度。

Fig.2 Mountain slope is commonly smaller than 20° on the footwall and 15° -35° on the hangingwall of the Jiuchongkeng Fault, and is more than 25° on the hangingwall of the Chukou Fault.



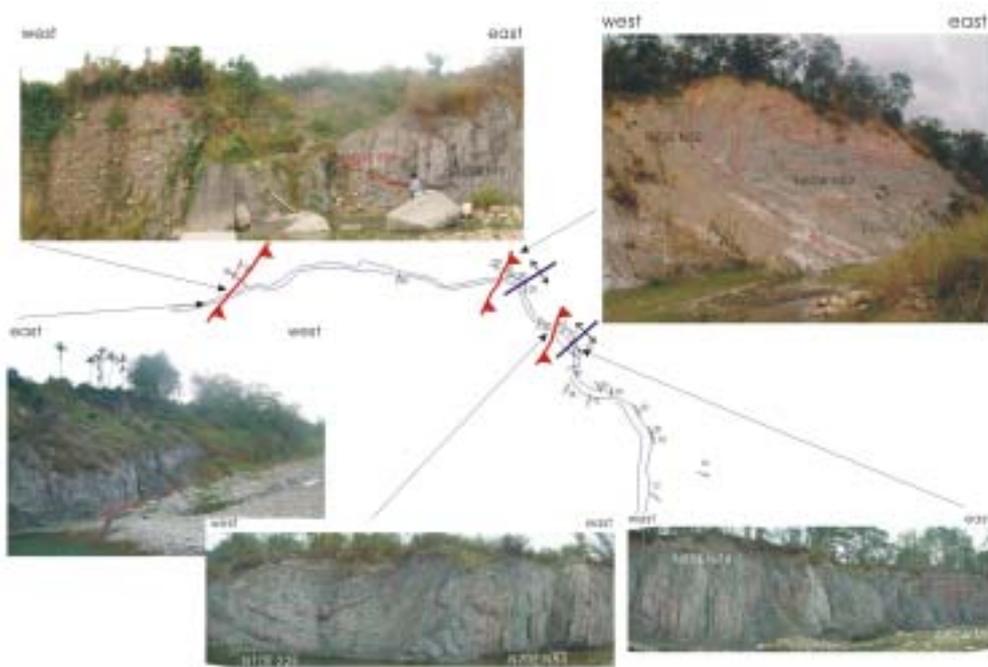
圖三 河床坡度分析資料顯示九芎坑斷層兩側河床坡度有明顯差異，上盤河床坡降為每公里 140 公尺，下盤坡降為每公里小於 10 公尺。北港溪與朴子溪的河流彎曲度也顯示受到嘉義斷層，九芎坑斷層與小梅背斜等構造作用影響。

Fig.3 Longitudinal profile of the Peikang and Putze Rivers changes in channel slope and sinuosity across the Chiayi fault, Chiuchungkeng fault and Hsiaomei anticline. Channel slope is 140 m/km on the hanging wall and 10 m/km on the footwall of the Chiuchungkeng fault. The sinuosity increases on the hanging wall of the Chiayi fault.



圖四 從階地的分布可以發現九芎坑斷層兩側的階地型態有明顯差異，如沖積扇階地僅分布於九芎坑斷層上盤，晚更新世紅土台地僅發育在下盤。

Fig.4 Distribution of the non-lateritic and lateritic alluvial-terraces. Non-lateritic terraces are only distributed on the hanging wall of the Chiuchungkeng Fault.



圖五 石牛溪剖面的九芎坑斷層呈現一寬約 1000 公尺的斷層擾動帶，其中共有 3 條明顯的斷層，圖中所示為沿河的地層位態以及斷層位置。

Fig.5 Disturbed zone of the Chiuchiangkeng Fault is about 1000 m wide along the Shihniu River, which is exposed to three major faults.



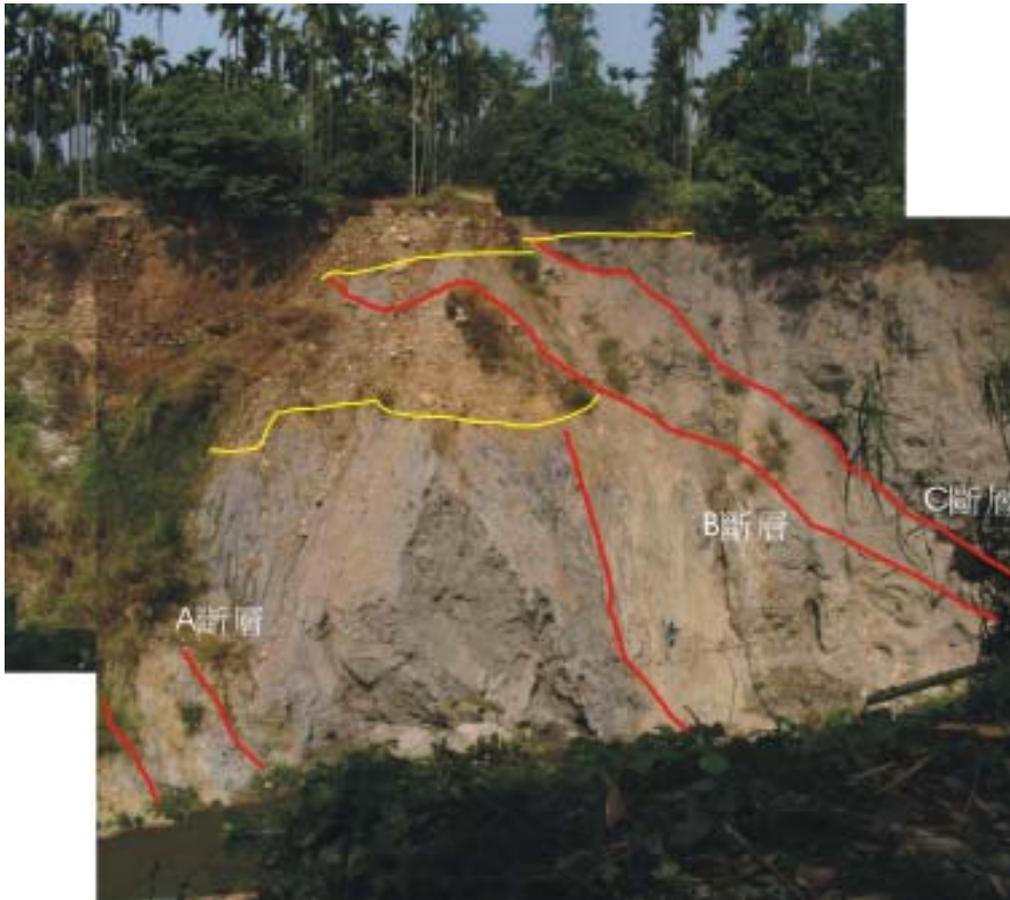
圖六 大湖口溪北岸剖面的 A,B,C 斷層都截切下盤的晚更新世 - 全新世的紅土階地砂礫層與階地礫石層，顯示近期曾有活動。

Fig.6 A, B and C Faults cut through the Pleistocene-Holocene fluvial deposits indicating that these faults are an active fault.



圖七 A 斷層位在擾動帶最西側，上盤為卓蘭層，下盤為紅土階地砂礫層，但斷層被 L 礫石層覆蓋，顯示 A 斷層在紅土階地砂礫層沉積之後曾有活動，斷層位態為北偏西 8 度，向東 54 度。

Fig.7 The Plio-Pleistocene formation thrusts onto the late Pleistocene fluvial deposits along the A Fault .



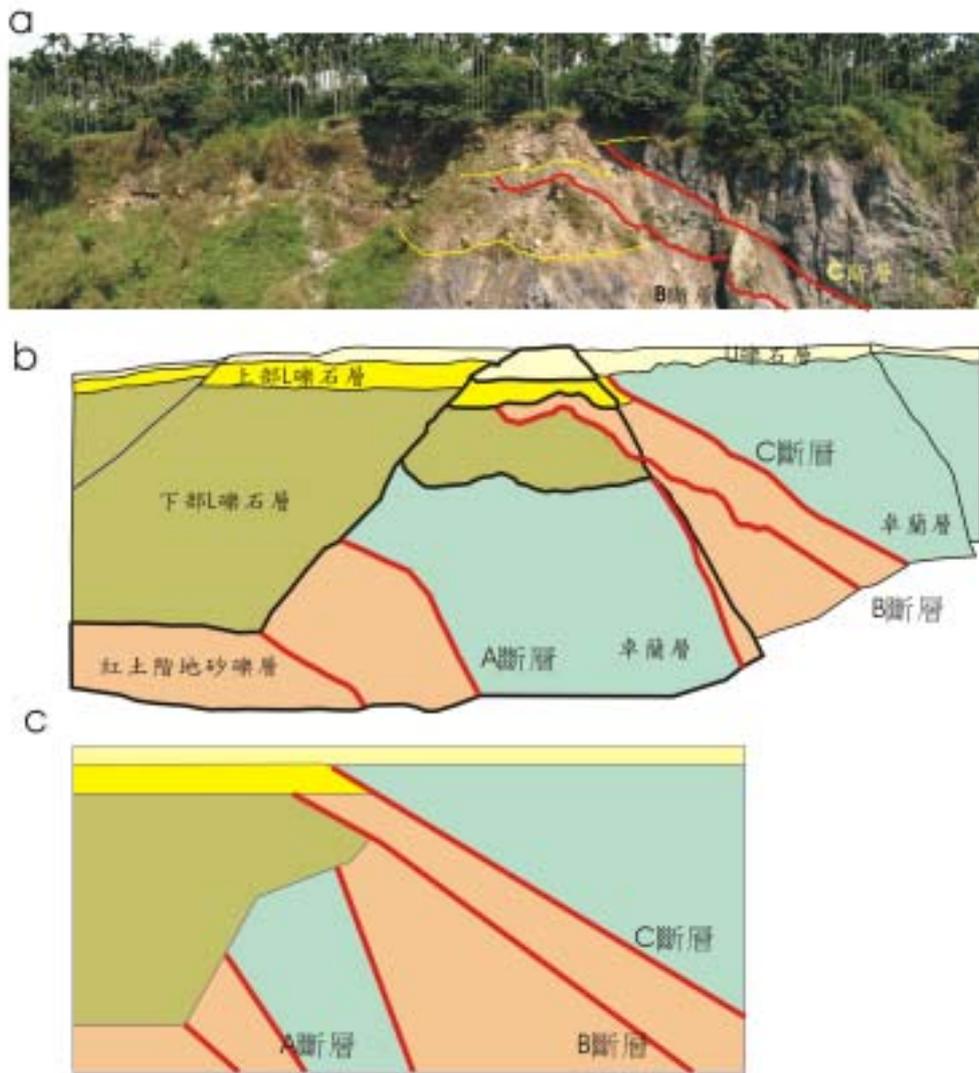
圖八 B 斷層上下盤都為紅土階地砂礫層，在斷層尖端是由紅土階地砂層逆衝至 L 礫石層之內，但斷層沒有截切上部 L 礫石層。

Fig.8 The late Pleistocene fluvial deposits are overthrust on the lower of L gravel-bed and overlaid by the upper of L gravel-bed.



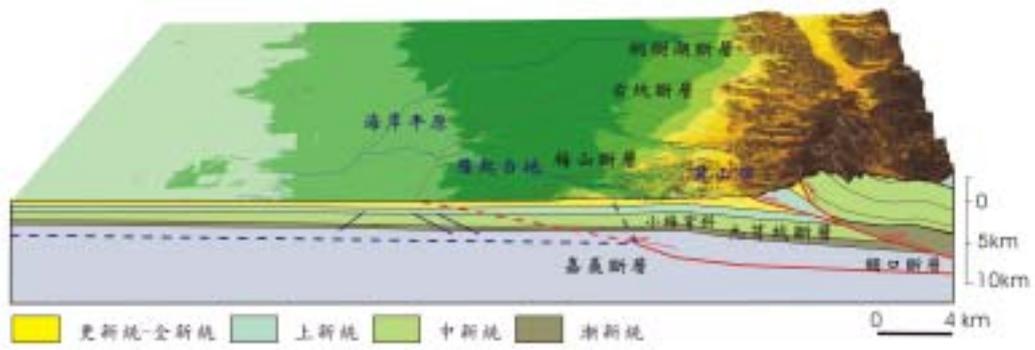
圖九 C斷層為卓蘭層逆衝至上部L階地礫石層之上，但斷層被U礫石層覆蓋。

Fig.9 The cholam formation overthrust onto the L gravel-bed along the C Fault which is overlaid by the U gravel-bed.



圖十 a 圖為斷層露頭位在光華橋下游約 700 公尺，上盤卓蘭層的砂頁岩互層逆衝至下盤紅土階地砂礫層（A 斷層）與階地礫石層（B,C 斷層）。階地礫石可分為兩層，下層礫石層（L 礫石層），上層礫石層（U 礫石層）。b 圖為剖面述描圖，圖 c 剖面示意圖。

Fig.10 (a) Profile of the Chiuchiungkeng Fault along the Tahukou River. (b) and (c) are schematic diagrams exhibit the relationship of these faults, the Plio-Pleistocene strata and fluvial deposits.



圖十一 九芎坑斷層是由卓蘭層逆衝至六雙層、紅土礫石層及階地礫石層之上。從與觸口斷層的關係來看，九芎坑斷層是觸口斷層斷坡的分枝斷層。

Fig.11 Schematic diagram shows the structural profile of the Chiuchiungkeng and Chukou faults. It shows that the Chiuchiungkeng fault is probably the branch fault of the Chukou fault.