

國立中央大學

地球科學學系

碩士論文

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

**Study of structural relationship between the
mesoscopic geological structures along the Dahan
riverbed and the Daxi Anticline, Taoyuan**

研究生：范書睿

指導教授：黃文正 博士

中華民國 一 百 零 六 年 六 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: 紀書豪 學號: 103622016

論文名稱: 桃園大漢溪河床中視尺度地質構造與大漢背斜構造關聯性之研究

指導教授姓名: 黃文正

系所: 地球科學系地球物理研究 所 博士班 碩士班

填單日期: 2017/07/13

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士論文網頁。
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

地球科學系地球物理碩士班 學系/研究所

范書睿 研究生所提之論文

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

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

106 年 7 月 13 日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

地球科學學系 學系/研究所 范書睿 研究生

所提之論文

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

委

員

蔡偉

楊昭男

林殷頌

黃文正

何曉凡

中華民國 106 年 1 月 12 日

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

范書睿

摘要

桃園大溪位於臺灣西北部褶皺逆衝帶之前緣。大溪背斜為主控大溪地區地層分佈之構造，依形貌研判屬於斷層延展褶皺（fault-propagation fold）。此背斜向南南西方位傾沒，褶皺軸位態約為 $29^{\circ}/209^{\circ}$ 。因大漢溪的流貫與下切，使得河床連續出露背斜西翼之褶皺岩層。本研究致力於調查大漢溪河床中視尺度地質構造的空間分佈，建構中視構造彼此之先後順序，並探討其與大溪背斜之關聯性。透過野外觀察與紀錄，繪製各段河床露頭的構造地質圖；使用無人飛行載具掛載鏡頭空拍大面積河床露頭，由 Pix4Dmapper 軟體生成地面解析度 5 米之正射空拍影像，大幅增加野外調查之效率與精度。調查結果顯示，大溪背斜西翼，發育具有與主背斜軸相同趨勢之次要褶皺。桂竹林層有一系列半波長 500 至 600 公尺的褶皺；楊梅層出露一道不對稱褶皺。這些次要褶皺可能發育於主要背斜發育階段之中後期。褶皺形貌可能反映了岩性組合的差異，桂竹林層厚層砂岩以長波長褶皺形式，楊梅層疏鬆砂頁互層則發育波長較小之褶皺。背斜北段岩層受多道共軛斷層所截，推測為褶皺作用晚期發育之褶皺關聯裂理。背斜西翼普遍受到走向 010° 至 040° 之左移斷層截切，斷層長度約數十至數百公尺，水平錯距至少數公尺。由截切定律得知在大溪背斜褶皺作用之後，尚有此左移斷層作用的發生。根據變形之地層年代以及未變形之最老河階年代，大溪背斜活動年代晚於 1.75 個百萬年前，並早於 0.05 個

百萬年前。在區域尺度下，大溪背斜具有南北側向顯著的形貌差異，本研究以斷層延展褶皺的演化模型推論，認為此差異可能記錄了背斜發育過程中不同階段的樣貌。

關鍵字：大溪背斜、大漢溪河床、中視尺度地質構造

Study of structural relationship between the mesoscopic geological structures along the Dahan riverbed and the Daxi Anticline, Taoyuan

Fan, Shu-Jui

Abstract

Daxi is located in the frontal part of fold-and-thrust belt in northwestern Taiwan, Taoyuan. The Daxi Anticline is the main regional structure which controls the spatial distribution of stratigraphy in the Daxi area. The anticline has been interpreted as a fault-propagation fold based on its geometrical feature and it is a SSW-plunging fold with the fold axis of $29^{\circ}/209^{\circ}$. Because of the downcutting of the Dahan River, folded rock layers of the Daxi Anticline west limb expose well and continuously along the riverbed of the Dahan River. This study aims to document the mesoscopic structures on the riverbed, and the forming sequence of the meso-structures and the structural relationship with the Daxi Anticline are discussed. To construct detailed structural mapping, we undergo field observations and data collections. Unmanned aerial vehicle with camera and Pix4Dmapper software are used to generate 5-m ortho-images for surveying wide riverbed area with efficiency and accuracy. The results show that, several sub-parallel minor folds develop in the west limb of the Daxi Anticline, including a series of fold with half-wavelength of 500 to 600 meters in the Kueichulin Formation, and asymmetrical folds develop in the Yangmei Formation. They are likely to develop in the middle to late stage during the development of the major anticline. The geometry of minor folds are highly influenced by the lithology and thickness of strata. The long-wavelength folds are composed of thick sandstone layers of

Kueichulin Formation, while the interbeds of loose, weak sandstone and shale tend to form smaller wavelength. Two sets of conjugate faults cutting through steeply dipping strata in the northern Daxi Anticline, and they can be interpreted as fold-related fractures based on the fact that the principal stress axis is perpendicular to the major fold trend. Several sinistral strike-slip faults cut through folded rocks in the strike about 010° to 040° and can be observed all along the study area. The fault traces usually reach several hundred meters long with their strike separation are at least several meters. These faults are regarded as the post-folding sinistral faulting by cross-cutting relationship. According to the ages of deformed strata and undeformed terrace, the age of the development of the Daxi Anticline is after 1.75 Ma and before 0.05 Ma. In the regional scale, the geometry of the Daxi Anticline has significant lateral difference from North to South. This geometrical difference can be explained as historical records in the different stages in the development of the anticline by using the assumption of fault-propagation fold model.

Keywords: Daxi Anticline, Dahan River, mesoscopic structures

誌謝

本篇論文能夠順利完成，首先要感謝我的指導教授黃文正老師，從大二時就受您的照顧，就此踏入地質力學研究室的大門。不論是學業研究上實事求是的精神，還是做人處事上嚴謹的態度，您總是願意花時間與我詳談。在您的督促之下，我才逐漸明白自己各方面的不足，願意去面對問題的本質。

感謝楊昭男老師、羅偉老師特地遠道而來擔任口試委員，給予精闢專業的建議，讓我思考構造地質中最根本、最關鍵的議題。感謝林殿順老師、張中白老師撥冗擔任口委，在我還是大學生時，是您們引發我對地質與野外的熱情，能夠和您們分享論文成果實為我的榮幸。

在研究室奮鬥的日子裡，感謝同屆兩位戰友奕維與承恩，共同度過各種寫作業海、半夜做實驗、跑野外曬太陽、報告咪挺的時光，從你們身上學到很多，只是三個臭皮匠似乎還是打不過諸葛亮。兩位師兄芊翔與家祥，你們一直是我的好榜樣，總是為我帶來滿滿正能量。感謝兩位助理阿根大隊長和 Vicky 協助各種事務；Dwi、彥如、于鈞、宜廷等人協助野外調查工作。謝謝一勤與翔富兩位學長提供寶貴的資料與分享研究經驗。再次感謝羅偉老師贊助影像處理軟體。感謝林偉雄學長野外的指導。謝謝揪吃飯成員們、地物所與應地所同學們。

I would like to express my gratitude to the experts of geology and geomorphology in our lab who provide useful ideas and suggestions on this research: Maryline, Antoine and Jack.

感謝亮好在我最低落的時候陪我渡過難關，總是給予滿滿的鼓勵與支持。感謝我最珍惜的家人：爸爸、媽媽和弟弟，讓我在碩士期間沒有後顧之憂，我的心因你們而強大。

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xiii
一、緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機與目的.....	2
二、前人文獻回顧.....	4
2-1 北臺灣西部麓山帶褶皺-逆衝帶.....	4
2-2 褶皺關聯裂理.....	6
三、區域地質背景.....	8
3-1 地形.....	10
3-1-1 河階地.....	10
3-1-2 丘陵山地.....	11
3-2 地層.....	14
3-3 地質構造.....	22
3-3-1 褶皺.....	22
3-3-2 斷層.....	23
四、研究方法.....	30
4-1 無人飛行載具空拍與影像處理.....	30

4-1-1 無人飛行載具儀器.....	30
4-1-2 影像匹配軟體與技術 (Pix4Dmapper)	33
4-2 野外地表地質調查方法.....	34
4-2-1 河床中尺度構造地質圖測繪.....	34
4-2-2 決定褶皺方向性之投影圓分析.....	35
4-2-3 地質剖面作圖法.....	41
五、野外調查結果與空拍影像判釋	43
5-1 河床露頭次生構造現象.....	43
5-1-1 南港層.....	46
5-1-2 南莊層.....	48
5-1-3 桂竹林層.....	55
5-1-4 錦水頁岩及卓蘭層.....	82
5-1-5 楊梅層.....	84
5-2 褶皺投影圓分析.....	94
5-3 節理與變形條帶構造現象之統整.....	99
5-3-1 節理分佈情形.....	99
5-3-2 變形條帶分佈情形.....	99
六、討論.....	102
6-1 中視尺度與區域尺度褶皺構造關聯性.....	102
6-1-1 大溪背斜褶皺形貌.....	102
6-1-2 褶皺岩層力學特性之探討.....	104
6-2 褶皺與斷層之構造關聯性.....	109
6-3 大溪背斜與中視構造之發育年代.....	111
6-4 由背斜南北側向形貌變化檢視演化過程.....	113

七、結論.....	118
參考文獻.....	120
附錄一 南莊層與桂竹林層地層柱紀錄	127
附錄二 桃園大漢溪河床空拍影像圖	135
附錄三 臺灣沉積岩單壓強度表	136

圖目錄

圖 1 桃園大溪及鄰近地區主要構造線分布圖	3
圖 2 臺灣北部褶皺-逆衝帶之平衡剖面	5
圖 3 背斜構造中的伴生裂理分佈模式	7
圖 4 美國懷俄明州 Sheep Mountain Anticline 裂理與褶皺演化關係 ..	7
圖 5 大溪區域數值地形模型	9
圖 6 大漢溪中下游三維數值地型模型	9
圖 7 大漢溪中游段階地分佈圖	12
圖 8 大漢溪多階河階地形剖面圖	13
圖 9 南港層之厚層砂岩層	18
圖 10 南莊層之砂頁岩互層	18
圖 11 桂竹林層青灰色厚層細粒砂岩層	19
圖 12 錦水頁岩中頁岩偶夾粉砂岩層	20
圖 13 卓蘭層中膠結不良之砂泥薄互層	20
圖 14 楊梅層之厚層砂岩與頁岩互層	21
圖 15 臺灣西北部桃園大溪區域地質圖	26
圖 16 臺灣西北部麓山帶區域構造剖面圖 (AA')	27
圖 17 中油大溪一號井 (TSH-1) 地質構造剖面圖	28
圖 18 湖口-大溪區域構造平衡剖面圖	29
圖 19 DJI Phantom 3 Professional 四軸旋翼型 UAV 系統	32
圖 20 Map Pilot app 圈選拍攝河床範圍之操作介面	32
圖 21 圓柱形褶皺面與 π 極點之幾何關係	39
圖 22 褶皺軸與褶皺軸面空間幾何關係	39
圖 23 一個傾沒褶皺在平坦地表面及褶皺剖面上的褶皺形貌	40

圖 24 繪製鉛直剖面之過程	42
圖 25 大溪區域地質圖	44
圖 26 大漢溪河床調查分區索引圖	45
圖 27 大溪中庄調整池旁河床路線地質索引圖	47
圖 28 砂岩之交錯層沉積構造	48
圖 29 調查區 A 區河床空拍影像	50
圖 30 調查區 A 區河床構造解釋	51
圖 31 調查區 A 區河床局部放大空拍影像	52
圖 32 調查區 A 區局部詳細構造解釋	53
圖 33 橫移斷層截切高傾角之厚層砂岩指準層	54
圖 34 調查區 B 區河床空拍影像.....	58
圖 35 調查區 B 區河床構造解釋.....	59
圖 36 F ₁ 斷層帶構造描繪圖	60
圖 37 F ₁ 斷層帶中斷層泥與青灰色砂岩	61
圖 38 青灰色薄層粉砂岩之小尺度褶皺	62
圖 39 F ₁ 斷層帶中變形之厚層煤層	63
圖 40 F ₂ 斷層構造描繪圖	64
圖 41 武嶺橋 F ₂ 斷層野外露頭情形	65
圖 42 調查區 C 區河床空拍影像.....	68
圖 43 調查區 C 區構造解釋.....	69
圖 44 截切厚層砂岩之左移斷層	70
圖 45 調查區 D 區河床空拍影像	72
圖 46 崁津大橋下之向斜軸部露頭構造描繪與解釋	73
圖 47 崁津大橋河床 Google Earth 衛星空拍影像.....	74

圖 48 崁津大橋下向斜軸部露頭	74
圖 49 調查點 D6 處之構造現象	75
圖 50 調查區 E 區河床空拍影像	77
圖 51 調查區 E 區構造解釋	78
圖 52 內柵河床背斜軸部衛星影像與構造素描	79
圖 53 內柵河床背斜軸部位置岩層褶曲現象 (E3 點)	80
圖 54 內柵河床 F ₄ 斷層之 Google Earth 衛星影像	80
圖 55 F ₄ 斷層附近之小型右移斷層	81
圖 56 錦水頁岩與卓蘭層河床空拍影像	83
圖 57 調查區 F 區河床空拍影像	85
圖 58 子調查區 F-I 河床空拍影像	86
圖 59 子調查區 F-I 之構造解釋	87
圖 60 子調查區 F-I 各調查點野外露頭相片	88
圖 61 子調查區 F-II 河床空拍影像	89
圖 62 子調查區 F-II 河床構造解釋	90
圖 63 子調查區 F-III 河床空拍影像	91
圖 64 子調查區 F-III 構造解釋	92
圖 65 F ₅ 斷層兩側之厚層白色砂岩層	93
圖 66 桂竹林層下部向斜構造投影圓分析結果	95
圖 67 桂竹林層下部背斜構造投影圓分析結果	96
圖 68 楊梅層底部不對稱褶皺構造投影圓分析結果	97
圖 69 大溪背斜褶皺軸之投影圓分析	98
圖 70 大漢溪河床沿線斷層與節理線型分佈情形	100
圖 71 大漢溪沿線變形條帶構造分佈情形	101

圖 72 主要背斜與次要褶皺投影圖分佈情形	103
圖 73 大漢溪河床沿線岩層線型延伸分佈圖	106
圖 74 大溪背斜之褶皺剖面	107
圖 75 共軛斷層與其古應力之方位圖	110
圖 76 大溪背斜與中視構造發育年代	112
圖 77 大溪背斜鉛直剖面位置分佈	114
圖 78 大溪背斜 WW'剖面圖	115
圖 79 大溪背斜 XX'剖面圖	115
圖 80 大溪背斜 YY'剖面圖	116
圖 81 大溪背斜 ZZ'剖面圖	116
圖 82 大溪背斜剖面立體圖 (block diagram)	117

表目錄

表 1 大漢溪河床之褶皺構造特徵比較	98
表 2 大溪區域地層之岩性與強度比較表	108
表 3 西部麓山帶各年代地層中砂岩強度分級（施國欽與李彪， 1994）	108

一、緒論

1-1 前言

褶皺逆衝帶分佈於世界上地殼劇烈壓縮的地帶，臺灣島即為其中一例。褶皺逆衝構造系統的研究與人類生活圈息息相關，不論是礦產與油氣資源探勘、乃至於工程地質與地震地質災害，甚至近年發展的二氧化碳地質封存。因此利用地表露頭與鑽井資料建立地下構造的形貌為最基本亦最重要的一步，甚至能從空間上的形貌差異推演構造在時間上的演化過程。

桃園大溪地區屬於臺灣西部麓山帶前緣地帶，地質構造的活躍程度便是一個重要的課題。在地表幾乎受到現代沖積層與河階堆積層覆蓋的情況下，線索往往隱藏在溪流河床的露頭當中。大漢溪從石門水庫由南往北流至大溪市區一帶，沿線河床出露了約9公里連續的沉積岩露頭。從 Google Earth 的衛星影像來看，就能明顯察覺到這些岩層具有強烈褶曲與錯動的現象，並可於中視尺度下觀察到不同類型的次生構造：褶皺、斷層、節理及變形條帶。由於目前尚未有文獻報導此河床沿線的地質構造現象，因此更有必要製作詳細的河床路線地質圖以及次生構造分析。

欲調查連續大面積的河床露頭，以傳統地質調查方法通常會面臨河道、深潭、植被等自然因素阻隔。無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, 簡稱 UAV)的空拍影像技術在近5年來發展迅速，已逐漸應用於沖積扇與河道地形調查(楊政玕等, 2015; 劉寅春等, 2015)、防災應變(施錦揮等, 2010; 王國隆與黃志杰, 2015)等各個領域。在本研究中，將懸翼型 UAV 應用於構造地質上，

拍攝河床正射影像，以快速掌握露頭分佈範圍與野外路線規劃，更輔助判釋岩層延續情形與構造線型特徵。

1-2 研究動機與目的

臺灣西北部的桃園大溪地區位於兩大構造系統交會區域。一者是以新莊斷層為變形前緣、構造線呈東北-西南走向的褶皺逆衝系統；另一者則是構造線呈東北東-西南西走向的湖口楊梅褶皺逆衝系統（圖 1）。若針對大漢溪河床露頭中的次生構造進行詳細調查，便可解答湖口楊梅變形構造是否向東延伸至新莊斷層以東。

大溪地區主控地層分布的區域構造為大溪背斜（何春蓀，1983），由震測剖面與鑽井綜合研判，其褶皺形貌屬於斷層延展褶皺（fault-propagation fold）（黃旭燦等，2004）。大漢溪河床出露此背斜西翼之褶皺岩層，屬於早中新世至晚更新世沉積岩層。對於此河床露頭之地質相關研究，已有 Pan et al.（2015）建立地層分界與岩性地層柱成果，以及古沉積環境演化之探討。然而如前文所述，目前仍欠缺構造地質方面的研究。透過詳細調查河床露頭中的次生構造，有助於探討中視尺度構造與區域背斜的關聯性，如主要與次要褶皺的伴生關係。推論構造形成原因與形成先後順序。

本研究中視尺度岩層與構造分佈之調查成果，除了構造地質的學術價值，更可應用於工程地質方面，做為現地基礎設計的考量。工程地質領域所關切的要點可包括工址岩盤（此處指沖積層或礫石層下的沉積岩層）的岩層位態、斷層（剪切帶）、節理分

佈等。這些地質特性皆來自於地表地質調查與測繪。詳細的地質調查與測繪能夠幫助土木工程師了解工址之工程地質特性，做出適當的施工決策。

本研究之目的列舉為以下三點：第一點，利用野外地質調查方法以及無人飛行載具空拍河床正射影像，記錄大漢溪河床中視尺度次生構造分佈。第二點，分析中視構造與區域背斜的關聯性，並利用疊置定律與截切定律，建立次生構造相對地質年代。第三點，繪製大溪背斜由南而北的地質剖面，檢視背斜的演化過程。

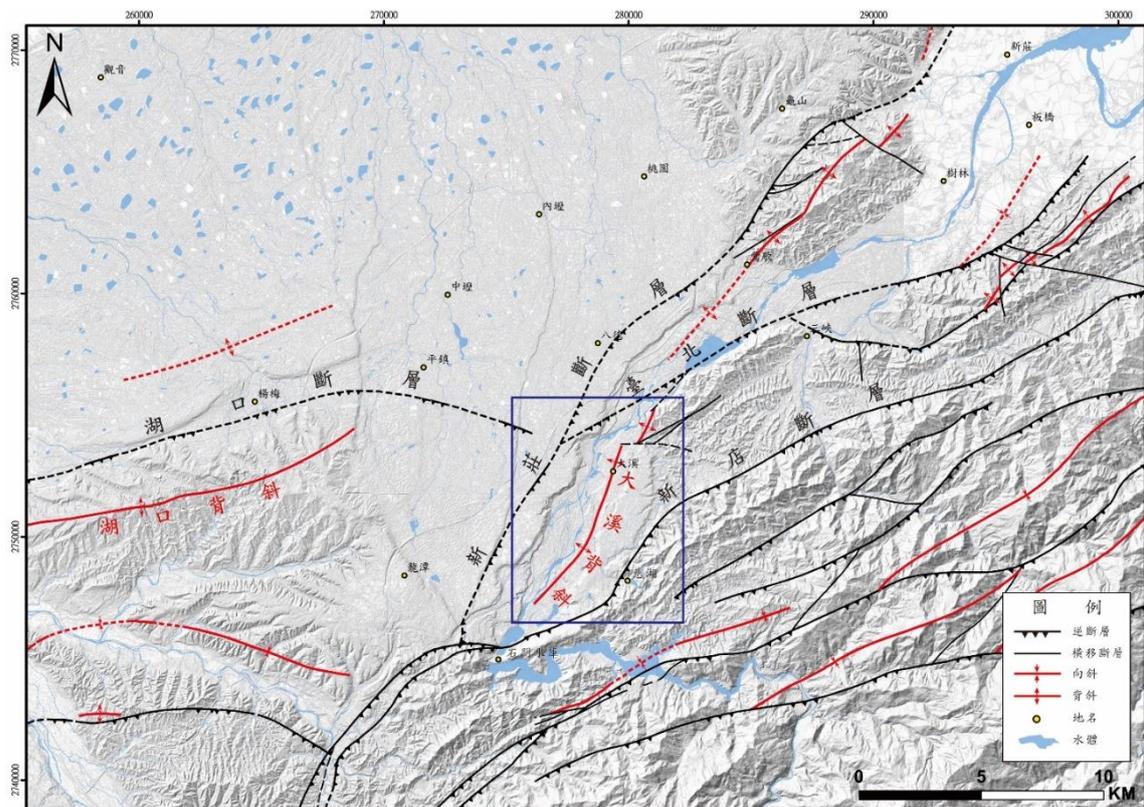


圖 1 桃園大溪及鄰近地區主要構造線分布圖

大溪地區位於兩大逆衝構造系統之交會處，分別具有不同的構造線走向。藍色方框為本研究區域。構造線分佈參考地調所與中油地質圖。

二、前人文獻回顧

2-1 北臺灣西部麓山帶褶皺-逆衝帶

現今臺灣島位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交會處，屬於聚合型板塊邊界上的造山島嶼。在兩大板塊彼此不斷互相擠壓的過程中，臺灣在更新世開始進入了造山運動時期，自漸新世至上新世的整套沉積岩層開始受到褶皺與逆衝斷層作用。岩層受到褶曲形成許多背斜與向斜構造，進而於褶皺陡翼發生逆衝錯動，發育一系列的低角度逆衝斷層，組成覆瓦狀斷層系統 (imbricate fault system)。麓山帶東側的褶皺較緊密且不對稱，逆斷層之間相距甚近；反之，麓山帶西側的褶皺較平緩，逆斷層錯動量亦較小。(何春蓀，1986)

Suppe (1980a) 綜合地表地質與地下震測資料，提出了一套臺灣北部地體構造剖面圖 (圖 2)，假設這整套沉積地層具有可回復性 (retrodeformable)，以及岩層是以斷層彎曲褶皺作用 (fault-bend folding) 的機制變形錯動。由平衡剖面結果顯示，臺灣北部的褶皺-逆衝帶由四道主要逆斷層組成，由西向東依序為新莊斷層、臺北斷層、新店斷層與屈尺斷層，這些逆斷層皆源自於深部的五指山層底部的一道滑脫面斷層。

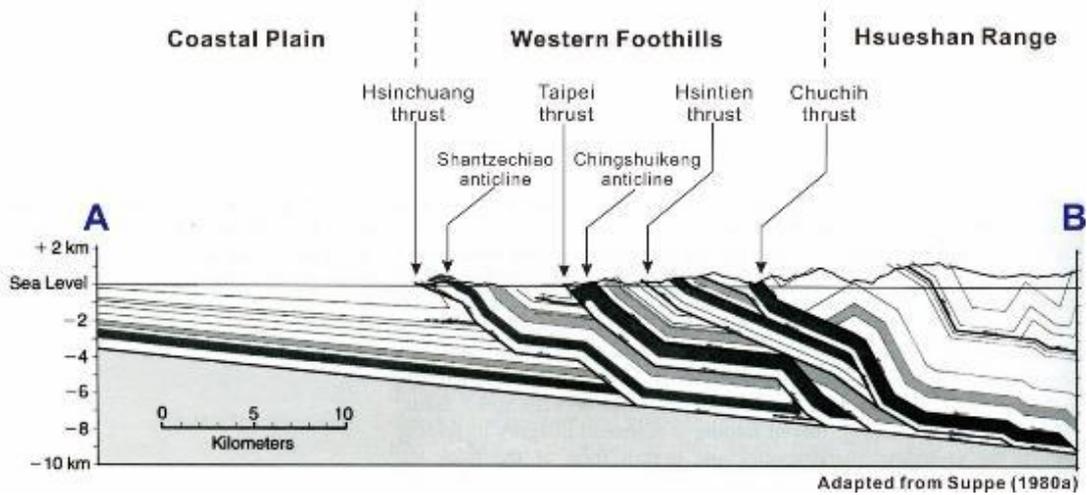
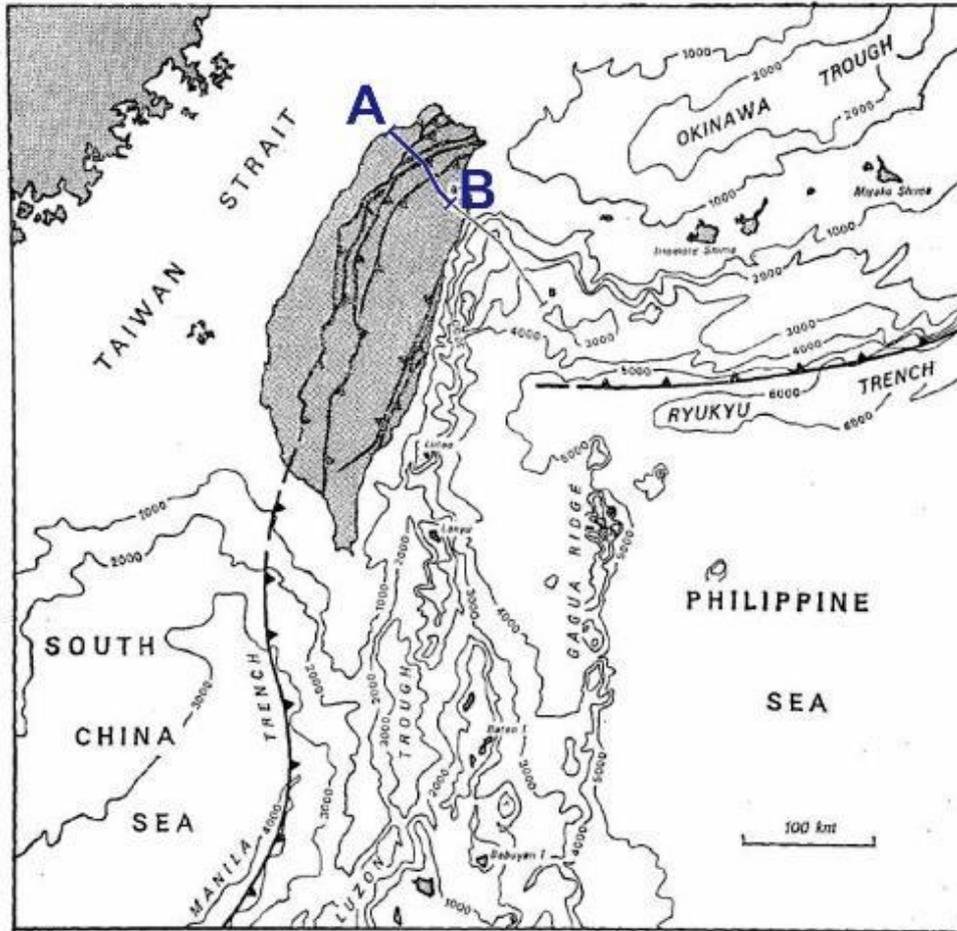


圖 2 臺灣北部褶皺-逆衝帶之平衡剖面

剖面圖顯示北臺灣的地體構造主要是一系列的褶皺與逆斷層，從最前緣的新莊斷層至屈尺斷層之間為西部麓山帶的範圍。引自 Suppe (1980a)。

2-2 褶皺關聯裂理

就定義而言，裂理 (fracture) 在構造地質學領域中為描述岩石中的不連續面之名詞，可以分為張裂裂理 (extensional fracture) 與剪切裂理 (shear fracture)。前者通常稱為節理 (joint)，其破裂面上不具有明顯可辨識的錯動量。後者通常指錯動量在數毫米至數十毫米的尺度，錯動規模更大者則稱為斷層。

裂理形成的原因通常為特定的大地應力作用所造成。在褶皺形成的過程當中，亦會伴隨著裂理的發育。於 1960 年代起，構造地質學家開始對這種與褶皺同時形成之裂理有了初步的概念。Price (1966) 即提出的一套簡單、理想狀況下的褶皺關聯裂理分佈模式 (fold-related fracture pattern)。以一個主要背斜構造為例，張裂裂理通常發育主要兩組：一組通常會垂直褶皺軸發育，另一組則平行褶皺軸。剪切裂理則可能以共軛形式發育為主，可以是走向滑移或者逆衝形式。在背斜軸部外弧可能發育高角度正斷層 (圖 3) (Price, 1966; Price and Cosgrove, 1990)。然而，這套模型有幾個不完整的地方。第一，這個模型只描述了構造最終的狀態，無法進一步探討褶皺演化過程對裂理的發育所造成的效應；第二，未考慮既存裂理所造成的影響 (Bellahsen et al., 2006)。

近年來，有不少的研究針對褶皺逆衝帶中的特定背斜構造，探討裂理的分佈模式與主要背斜的關聯性 (Ahmadhadi et al., 2008; Bellahsen et al., 2006; Beaudoin et al., 2012; Stephenson et al., 2007; Marshak et al., 1982)。Bellahsen et al. (2006) 指出美國懷俄明州 Sheep Mountain Anticline 的裂理分佈特徵，建構出不同組

裂理之間的相對先後順序，並且解釋其順序與褶皺演化過程的關係（圖 4）。

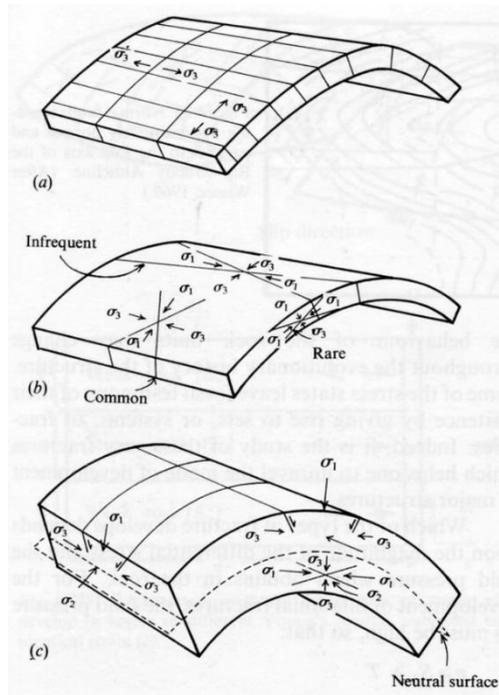


圖 3 背斜構造中的伴生裂理分佈模式
本圖引自 Price and Cosgrove (1990)。

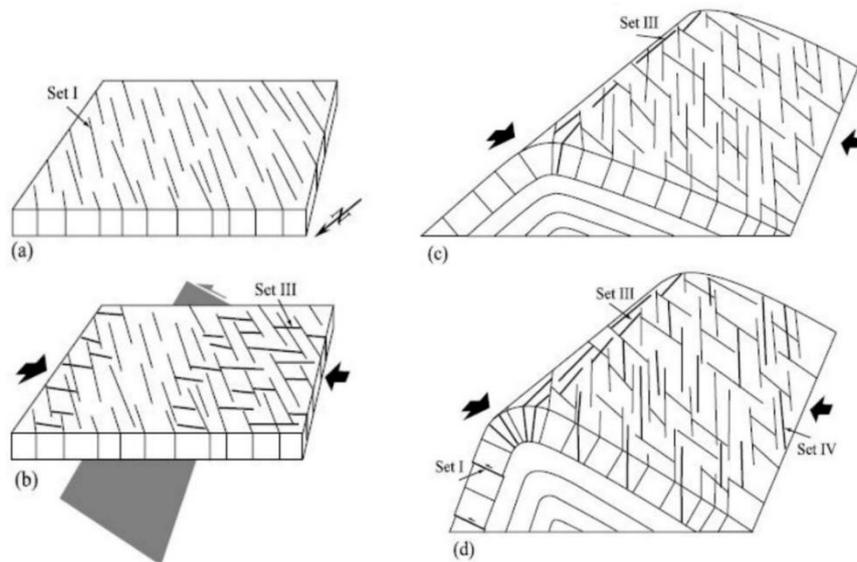


圖 4 美國懷俄明州 Sheep Mountain Anticline 裂理與褶皺演化關係
本圖引自 Bellahsen et al. (2006)。

三、區域地質背景

桃園大溪位於桃園市東南隅，東北方為山子腳山地以及臺北盆地，東南方鄰西部麓山帶之山地，南有石門水庫，西北為桃園臺地與中壢臺地。大漢溪為流貫大溪地區的主要河流，由南邊之石門水庫向北流貫大溪後，再向東北流經鶯歌、三峽、樹林進入臺北盆地，於板橋與新店溪匯流。本研究以大漢溪中下游河床露頭為調查重點，上游自石門水庫起，往下游至大溪山地南段為止（圖 5 與圖 6）。

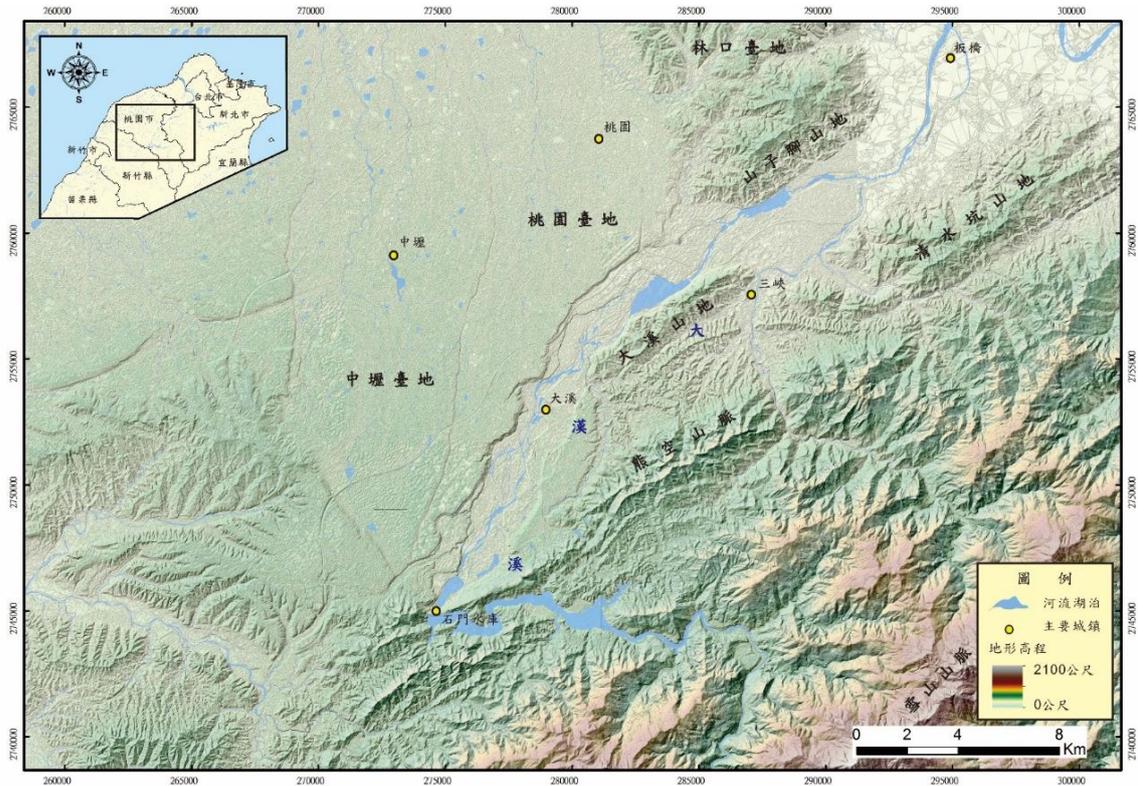


圖 5 大溪區域數值地形模型

大溪地區之地形特徵以大漢溪河階地與西部麓山帶丘陵山地為主。

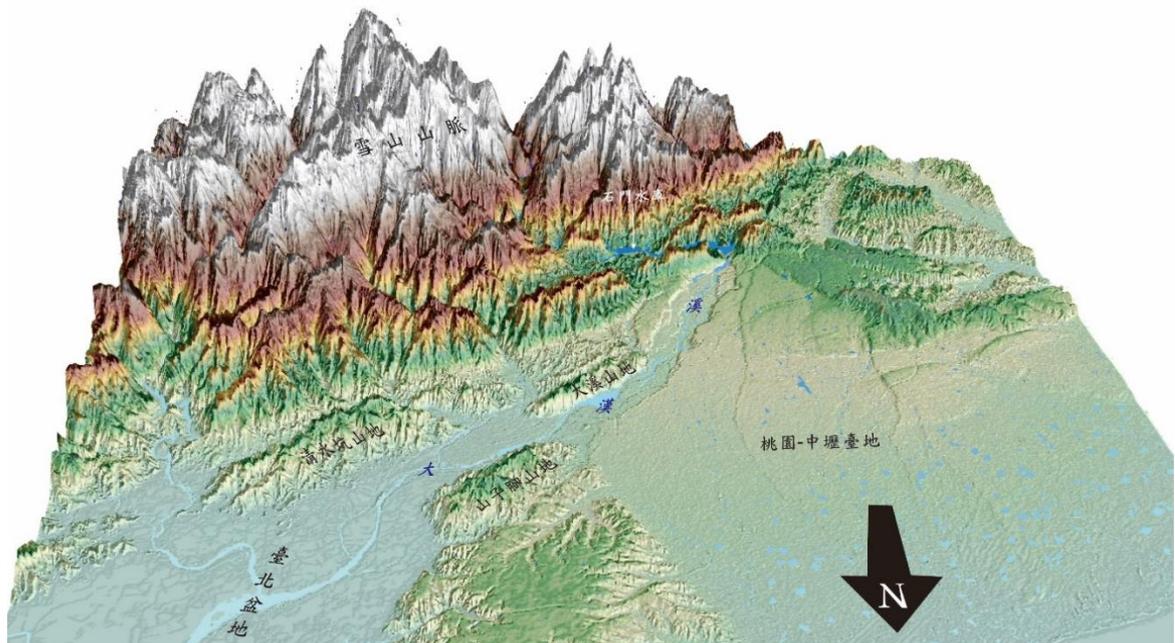


圖 6 大漢溪中下游三維數值地型模型

本圖顯示大漢溪自石門水庫，流貫大溪地區後匯入臺北盆地。圖中黑色箭頭指示正北方。

3-1 地形

3-1-1 河階地

大溪地區之大漢溪河畔發育顯著多階河階地形，大溪市區即座落於一河階面上。大漢溪河階地之形成年代，經過碳十四定年與河階高程對比的研究，可追溯至兩萬五千年前所發生的大漢溪襲奪事件（Chen and Liu, 1991；鄧屬予等，2004）。距今約三萬年以前，古大漢溪（古石門溪）向西方流經桃園中壢地區後注入台灣海峽。然而當時正期全球海水面的下降，臺北盆地內發生強烈向源侵蝕，鶯歌溪（臺北盆地西南隅）切穿了大溪與鶯歌間的分水嶺，襲奪古大漢溪河道。後改流向北北東方向進入臺北盆地。襲奪後河道的下切侵蝕作用加劇，逐漸形成現今的河階地形。

Tomida（1937）將大漢溪下游流域之地形面進行了分類，由高至低依序分為四大類：紅土高地（Lateritic highland, LH），紅土階地（Lateritic terraces, LT），河階地（Fluvial terrace, FT）以及泛濫平原（Flood plain, FP）（Chen and Liu, 1991）。大溪地區大漢溪沿線之地形面主要為上述列舉的後三者（圖 7 與圖 8）：紅土階地（LT）分佈於桃園臺地與中壢臺地；河階地（FT）可依相對高度落差分出兩階河階地，第一階河階（FT（I））的相對高差¹約 10 至 40 公尺，第二階河階（FT（II））相對高差可達 50 至 90 公尺；泛濫平原（FP）則為相對最低之現代河床面。

¹ 相對高差：相對於最低河床面的垂直高差。

根據 Chen and Liu (1991) 各階河階的碳十四定年的結果：
LT 的年代為 46800 ± 2400 年，FT (II) 推估為 18000 年，FT (I)
為 11600 ± 90 年，以及 FP 為 375 ± 55 年²。(圖 8)

3-1-2 丘陵山地

山地地形包括了大溪山地、熊空山脈、山子腳山地以及清水坑山地，皆呈現東北-西南走向，主要受控於西部麓山帶之未變質沉積岩層的分佈。大溪山地與熊空山脈之東南側山坡面具有許多三角面特徵，顯示岩層傾向東南方。石門水庫以東具有一道狹長山脊，其山地之東南側亦可見三角面特徵。鄰近之山子腳山地為桃園龜山與樹林三峽一帶之間的獨立山地，山地呈現長 9 公里、寬 4 公里之狹長狀橢圓形，為山子腳背斜之地形特徵。清水坑山地為臺北盆地南緣一狹長型山地，為清水坑背斜的地形特徵。(圖 5)

² 碳十四定年的年份單位為 yrBP。

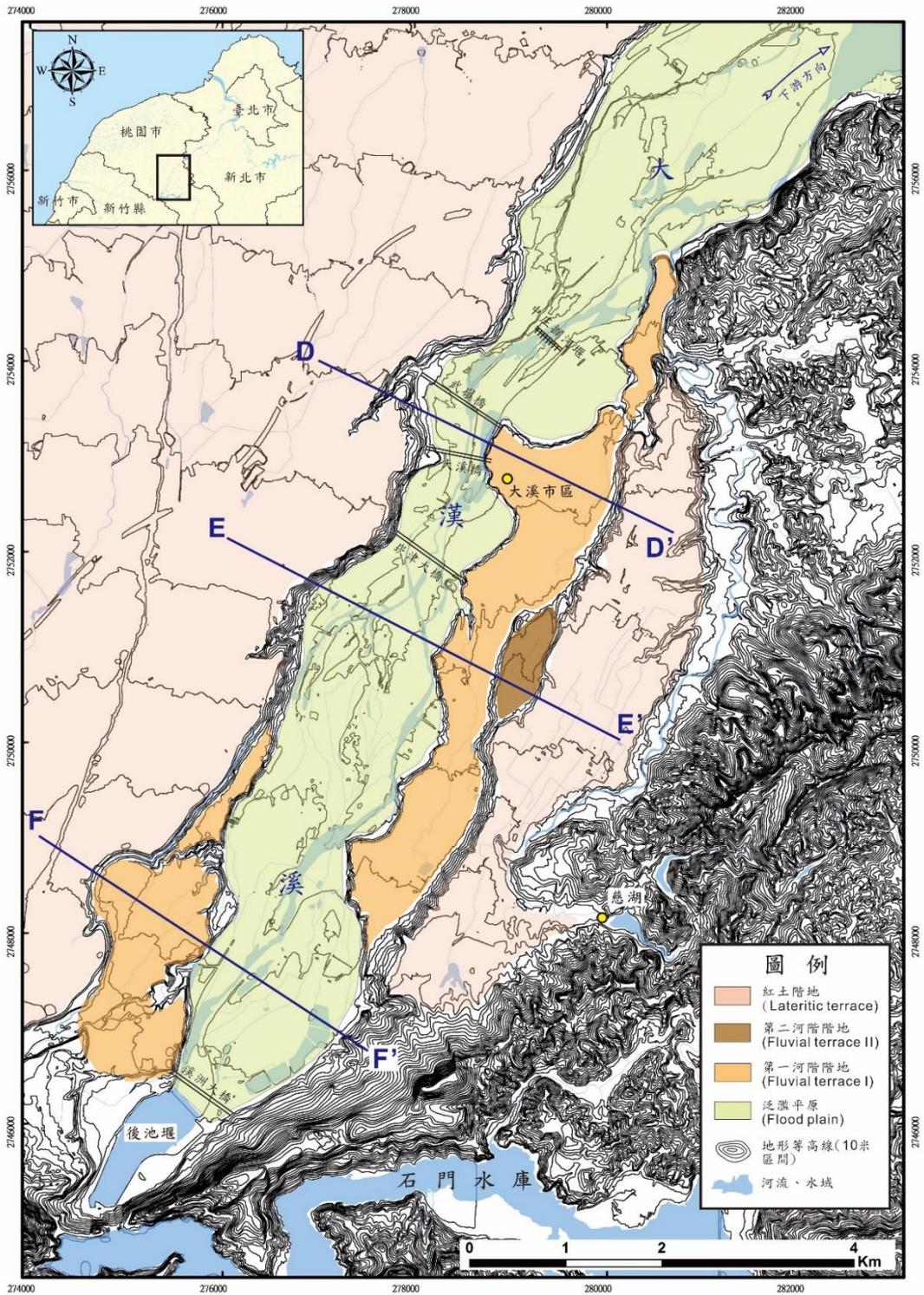


圖 7 大漢溪中游段階地分佈圖

大溪階地主要可依高程分為三階，較高位的紅土階地，以及較低位的兩層河階階地。等高線間距為十公尺。

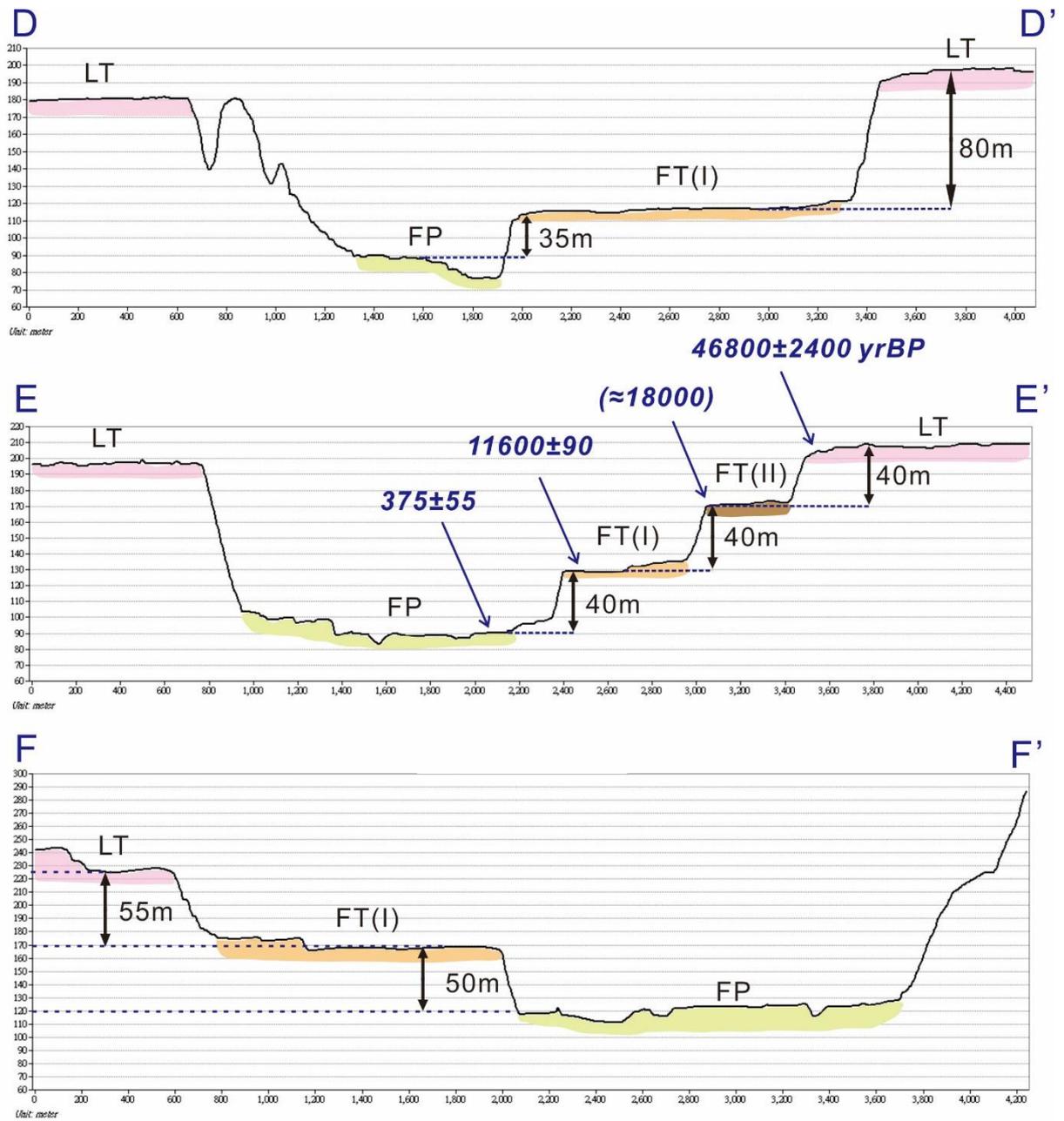


圖 8 大漢溪多階河階地形剖面圖

DD'、EE'與 FF'為三道地形剖面，其位置請參見圖 10。剖面之垂直放大比例約為 6.6 倍。BB'圖中的藍色斜體數字為各階河階碳十四的定年結果 (Chen and Liu, 1991)。

3-2 地層

1. 南港層

南港層最早被稱為上部海棲化石層，並後續還有許多不同的命名與分層（丹桂之助，1929；市川雄一，1930；丹桂之助，1938；詹新甫，1962），而最後由何春蓀等（1964）重新命名為南港層。標準地為臺北市南港。南港層在新竹苗栗地區可分為北寮層、打鹿頁岩以及觀音山砂岩三個地層。南港層在大溪地區分佈於大溪山地，即大溪老街東北方 2.5 公里之山地往東北延伸，大溪草嶺溪（大漢溪支流）之溪谷以及瑞福橋旁岩壁出露南港層厚層砂岩（圖 9）。岩性以灰色厚層塊狀細至中粒砂岩，夾砂頁岩互層。本層含大量生物碎屑包括貝類、有孔蟲化石等，以及豐富生痕化石。沉積環境解釋為遠濱過渡帶至內遠濱帶。南港層與其上覆南莊層以及下伏石底層皆為整合接觸，但大溪山地以北遇臺北斷層截切而不見南港層底部岩段。地層厚度約 600 至 900 公尺（詹新甫，1962）。年代為中中新世。

2. 南莊層

南莊層最早由何春蓀等（1954）命名，即為市川雄一（1930）所稱之上部夾炭層，代表臺灣北部中新世地層中最上部之含煤地層。標準地位於苗栗縣南莊鄉中港溪河谷。南莊層分佈於大溪下石屯河床、大溪山地以及三鶯大橋下河床。南莊層下部為薄至中層細至中粒砂岩與頁岩互層，常含薄煤層；上部以白色中至粗粒砂岩為主，偶夾砂頁岩互層，亦常含薄煤層（圖 10）。砂岩呈白色，為辨認南莊層的重要層位指標。可見的沉積構造包括了平板狀交錯層、槽狀交錯層、高角度交錯層理、圓丘狀

交錯層理、波狀紋理、透鏡狀砂泥薄紋層等，並偶見直徑數至十餘毫米之黃鐵礦結核群集。沉積環境解釋為陸相河道與河口灣環境。(潘遵友，2011；游能悌、鄧屬予，1996)

大溪下石屯之大漢溪河床為南莊層與其上覆桂竹林層大埔段地層交界位置；三鶯大橋下河床亦可見地層交界。大漢溪流域地層厚度為 700-900 公尺 (詹新甫，1962)。年代為中至晚中新世。

3. 桂竹林層

桂竹林層最早是由鳥居敬造與吉田要 (1931) 所命名。市川雄一 (1930) 所定義的大埔層 (上部) 與二鬮層 (下部)，兩者後合稱為桂竹林層大埔段與二鬮段。本研究區桂竹林層位於內柵至下石屯之大漢溪河床。大埔段之岩性以厚層淡灰色砂岩為主，夾深灰色頁岩，偶夾白色砂岩；二鬮段之岩性為厚層至塊狀灰色砂岩，夾砂頁岩互層，富含貝殼碎片。桂竹林層含有貝類與有孔蟲化石，具有生物擾動現象 (圖 11)。

桂竹林層大埔段與其下伏之南莊層之交界位於大溪下石屯附近之大漢溪河床，在野外可依據南莊層頂部的薄煤層來區分兩地層。桂竹林層二鬮段與其上覆之錦水頁岩之交界位於大溪內柵附近之大漢溪河床，砂岩比例快速下降而轉為深灰色頁岩，岩性差異甚大得以在野外容易辨認。本層中可見大型槽狀交錯層理與波狀紋理；厚層泥質砂岩中受強烈生物擾動，沉積環境解釋為河口灣與濱面環境為主。厚度估計約 700 至 900 公尺；本研究實際估算約為 860 公尺左右，詳細地層柱紀錄參考附錄一 南莊層與桂竹林層地層柱紀錄。年代為晚中新世至上新世。

大埔段可以對比至苗栗以南地區的關刀山砂岩(桂竹林層下段);二鬮段則對比至十六份頁岩(桂竹林層中段)與魚藤坪砂岩(桂竹林層上段)。

4. 錦水頁岩

錦水頁岩最早是由安藤昌三郎(1930)所命名,標準地位於苗栗縣造船鄉錦水。本研究區域之錦水頁岩出露於大溪頂埔尾附近之大漢溪河床。錦水頁岩之岩性以深灰色頁岩為主,夾薄層極細粒至細粒砂岩(圖 12)。沉積環境解釋為遠濱環境。本層於大漢溪河床出露之厚度僅厚 125 公尺(Pan et al., 2015)。年代為上新世。

5. 卓蘭層

卓蘭層最早是由烏居敬造(1935)所命名,標準地為苗栗縣卓蘭鎮大安溪河谷。本研究區域之卓蘭層的底部出露於大溪內柵的大漢溪河床,南延至溪洲附近為止。岩性主要以厚層細至中粒砂岩與砂頁岩互層為主,夾塊狀砂岩及頁岩。下部至中部卓蘭層為厚層砂岩與砂頁岩互層(圖 13),具有生物擾動現象;上部卓蘭層以砂頁岩互層夾塊狀細粒至粗粒砂岩。沉積構造可見平行層理、平板狀交錯層、槽狀交錯層、波痕等,可見貝類、牡蠣化石與炭化木。沉積環境解釋為海岸之河口灣環境。厚度估計約 760 公尺厚。

關於卓蘭層的地層年代,原先定義為上新世晚期至更新世早期之間(烏居敬造,1935)。然而根據近年全球古氣候之相關研究,國際地層學會(ICS, International Commission on Stratigraphy)正式宣布更新世的下界(亦為第四紀之下界)年代

應從原先的 1.86 Ma 修改為 2.588 Ma (Gilbert and Head, 2009)。
因此卓蘭層之下界年代也應調整成為更新世早期的 2.588 Ma。

6. 楊梅層

楊梅層最早是由牧山鶴彥 (1935) 所命名，標準地為楊梅鎮西南方。楊梅層可依岩性分為上部的照門段以及下部的照鏡段 (湯振輝, 1963)，而本研究區域可見後者於河床出露。照鏡段分佈於大溪溪洲至石門水庫後池堰的大漢溪河床，但與下伏卓蘭層之交界並不清楚。此段岩性主要以厚層細至粗粒砂岩與砂泥岩互層為主，砂泥互層比例約在 1:1 至 1:2 之間。砂岩呈灰色至黃黑色，膠結相當不佳 (圖 14)。本段之沉積構造為平行層理、波痕、平板狀與槽狀交錯層理、崩移構造以及荷重構造。泥岩中可見炭化木。沉積環境解釋為陸相曲流河與砂質辮狀河為主 (潘遵友, 2011; Pan et al., 2015)。照鏡段厚度約 1070 公尺，與其上覆楊梅層照門段以及下伏卓蘭層皆為整合接觸關係。年代為更新世中期至晚期。

關於楊梅層與其下伏卓蘭層層界的問題，劉桓吉 (1990) 建議在新竹至苗栗一帶以一礫岩層之底部做為地層界面。然而大溪地區並未從野外觀察到此一礫岩層指準層，Pan et al. (2015) 以首次出現極粗粒砂岩 (辮狀河相之岩性組合) 做為兩地層交界。



圖 9 南港層之厚層砂岩層

黃色線段表示岩層層面，砂岩厚達 1 公尺。此露頭位於大溪草嶺溪的福瑞橋旁岩壁。



圖 10 南莊層之砂頁岩互層

此露頭位於大溪下石屯中庄攔河堰下游右岸河床。

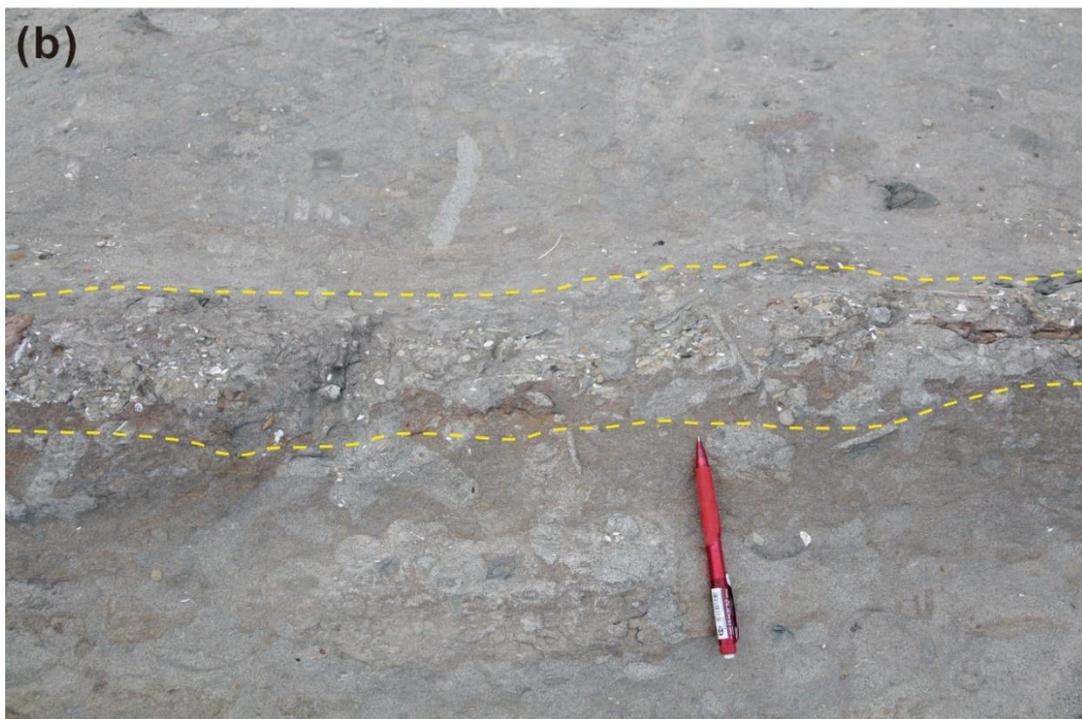


圖 11 桂竹林層青灰色厚層細粒砂岩層

(a) 大型結核層，黃色箭頭指示結核位置。(b) 砂岩貝類化石與生痕化石富集帶。黃色虛線標示富集帶範圍。此露頭位於大溪武嶺橋下河床。



圖 12 錦水頁岩中頁岩偶夾粉砂岩層

相片為錦水頁岩段河床，地勢明顯平坦。整遍頁岩中偶夾粉砂岩層（黃色細線標示處）。



圖 13 卓蘭層中膠結不良之砂泥薄互層

相片為膠結較差之砂岩與泥岩互層，以手即可剝落疏鬆岩塊。



圖 14 楊梅層之厚層砂岩與頁岩互層

此露頭位於大溪溪洲河床。

3-3 地質構造

大溪地區位於臺灣北部褶皺逆衝帶系統前緣地帶，大溪背斜為前緣逆斷層上盤的背斜構造，是本研究區域主要控制地層分佈之地質構造(圖 15)。區域剖面圖顯示，大溪背斜位於臺北斷層(新莊斷層)之上盤，位於新店斷層之下盤(圖 16)。

3-3-1 褶皺

1. 大溪背斜

大溪背斜(何春蓀, 1983)因通過大溪市區而得名。背斜軸走勢呈北北東至東北走向，軸線大致與大漢溪之流向平行。此背斜由大溪市區東北方之大溪山地起，朝南南西方向延伸至石門水庫後池堰附近為止。由於大溪背斜幾乎被大漢溪河階臺地堆積層所覆蓋，背斜軸跡的確切位置無法確定，僅能以鄰近河床與山地露頭位態推測之。此背斜軸向西南方傾沒，由北向南依序出露南港層、南莊層、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層以及楊梅層，地層年代依序逐漸年輕。背斜兩翼岩層位態呈不對稱，西北翼岩層傾角較陡，從 50 度到 80 度傾向西，部份地層倒轉；東南翼較緩，約 40 至 50 度傾向東。軸部附近的岩層傾角約 40 度向西南，顯示背斜軸之傾沒角度甚陡。大溪背斜北端被臺北斷層所截，南端被新莊斷層所截，位置介於兩大逆斷層之間(圖 15)。

中油公司(1975)於大溪市區東北方 1 公里處進行大溪一號井(代號 TSH-1)油氣鑽探，目的為評估大溪背斜構造之油氣儲集潛能。鑽探深度達 2103 公尺，自南莊層下部鑽至石底層，中間鑽穿觀音山砂岩、打鹿頁岩以及北寮砂岩(以

上合稱南港層)。電測圖解釋與岩心樣本分析結果之綜合評估結果顯示，此構造無油氣開採希望。背斜地塊缺乏良好儲集層，南港層僅孔隙率 6.7%、石底層達 14.2%。地質剖面圖(圖 17)解釋，大溪背斜屬於臺北逆斷層的上盤；背斜軸部存在一道高傾角的石屯正斷層，截切軸部並且於深部止於臺北斷層，但此正斷層的地下分佈狀況與形成原因尚待研究。

黃旭燦等(2004)結合前人研究、鑽井資料、野外資料及震測資料進行構造平衡剖面回溯，認為大溪背斜的形貌較類似斷層延展褶皺(fault-propagation fold)，其前翼被新莊斷層所切穿(圖 16 與圖 18)。

3-3-2 斷層

1. 新莊斷層

新莊斷層(市川雄一，1930)為臺灣北部重要的逆斷層之一，沿臺北盆地西緣，以北東向南延伸，切過山子腳地塊西緣，至桃園與臺北斷層會合。新莊斷層為低傾角之逆斷層，上盤出露石底層與南港層，下盤為南莊層與零星桂竹林層；在山子腳背斜軸部核心處，上盤為五指山層，下盤為南莊層，估算其層位落差約達 3700 至 4000 公尺(Chiu, 1968)。

新莊斷層以往被認為是北臺灣西部麓山帶最西邊之前鋒逆斷層，然而詹佩臻等(2012)將臺北盆地西緣斷層露頭與鑽井資料彙整後，發現新莊斷層之西側仍有一條層位落差較小之逆斷層存在；甚者，過去學界對於金山斷層與新莊斷層之間出現明稱混用的問題，因此重新定義了金山斷層、新莊

斷層以及更西側之成子寮斷層：金山斷層自北海岸金山起，南延至臺北盆地西北緣與崁腳斷層會合，並往南始稱新莊斷層；新莊斷層南延至桃園南方 10 公里處與臺北斷層會合，其斷層跡被桃園臺地之更新世礫石層所覆蓋，斷層跡位置不明。中油地質圖顯示，新莊斷層可能繼續延伸至龍潭與石門水庫之間，與大平地斷層（新店斷層之延伸）連接。

2. 臺北斷層

臺北斷層（市川雄一，1930）為臺灣北部主要逆斷層之一，呈東北走向。臺北斷層自基隆與瑞芳之間海岸起向西南沿伸，沿臺北盆地東南緣，大致沿大漢溪經過土城、三峽地區，斷層最後於大溪地區與新莊斷層會合。斷層呈現東北走向，斷層面傾向東南方，為一低角度逆斷層，近地表傾角逐漸轉為高角度。

Ho（1974）首先劃定與描述了臺北斷層之斷層跡於地質圖上。斷層沿線並未發現斷層露頭，僅能透過地形崖、地層層位落差以及震測資料間接定義臺北斷層之位置與形貌。臺北斷層上下盤皆出露中新世地層，層位落差沿著斷層沿線位置有所變化。在三峽與大溪之間，斷層上盤出露石底層與南港層，下盤則出露桂竹林層，層位落差超過 1000 公尺，並且往西南方沿伸落差逐漸減少。

Ho（1974）根據整個褶皺逆衝帶之構造特徵，認為臺北斷層可稱為臺灣北部一道區分內外麓山帶之區域逆斷層；內麓山帶之褶皺形式多以緊密、倒轉褶皺以及較密集之覆瓦狀逆斷層，外麓山帶之褶皺則較為開放、寬廣，逆斷層之間的

間隔也相形寬大。換言之，臺北斷層即為內麓山帶覆瓦狀系統的一道前鋒逆斷層。

3. 新店斷層

新店斷層（市川雄一，1930）為臺灣北部麓山帶中一條重要的逆斷層。斷層大致呈東北東走向，斷層面傾向東南至南方。自石碇大溪墘地區起，沿臺北盆地東南緣向南通過新店，再延續至石門水庫後池堰附近，全長可達 50 公里。新店斷層在石碇以東北始稱牡丹坑斷層，石門水庫以西南則稱石門斷層。大溪地區而言，新店斷層之上盤出露木山層、大寮層以及石底層等早中新世的地層；下盤則出露桂竹林層、錦水頁岩以及卓蘭層，估計層位落差可達 2100 至 2800 公尺。新店斷層之走向大致與其上下盤地層走向一致，為一走向逆斷層（何春蓀，1983）。桃園大溪南方之石門水庫附近之新店斷層，其地表斷層傾角約在 65 至 70 度，推測往地下沿伸轉為低角度逆斷層。

位於大溪東南隅之慈湖陵寢旁之草嶺山，為一更新世鹼性玄武岩岩體覆蓋於新店斷層跡之上（Yen, 1949），被認為是更新世火山活動時期，地底火成岩岩漿沿新店斷層之破碎帶位置噴出地表。

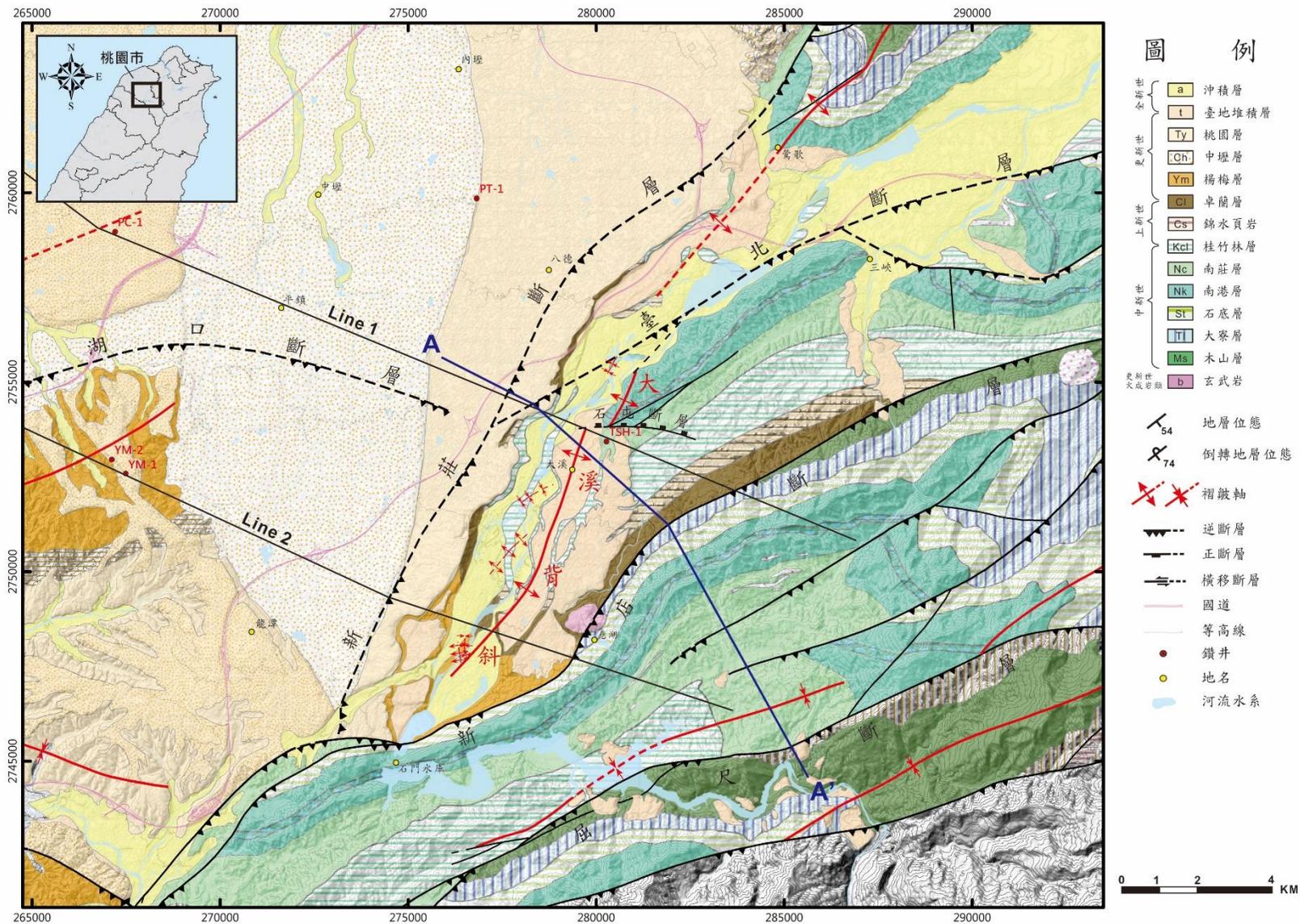


圖 15 臺灣西北部桃園大溪區域地質圖

大溪背斜是本區域主要地質構造，位於兩大逆斷層之間。AA'剖面參照圖 16，Line 1 與 Line 2 剖面參照圖 18。

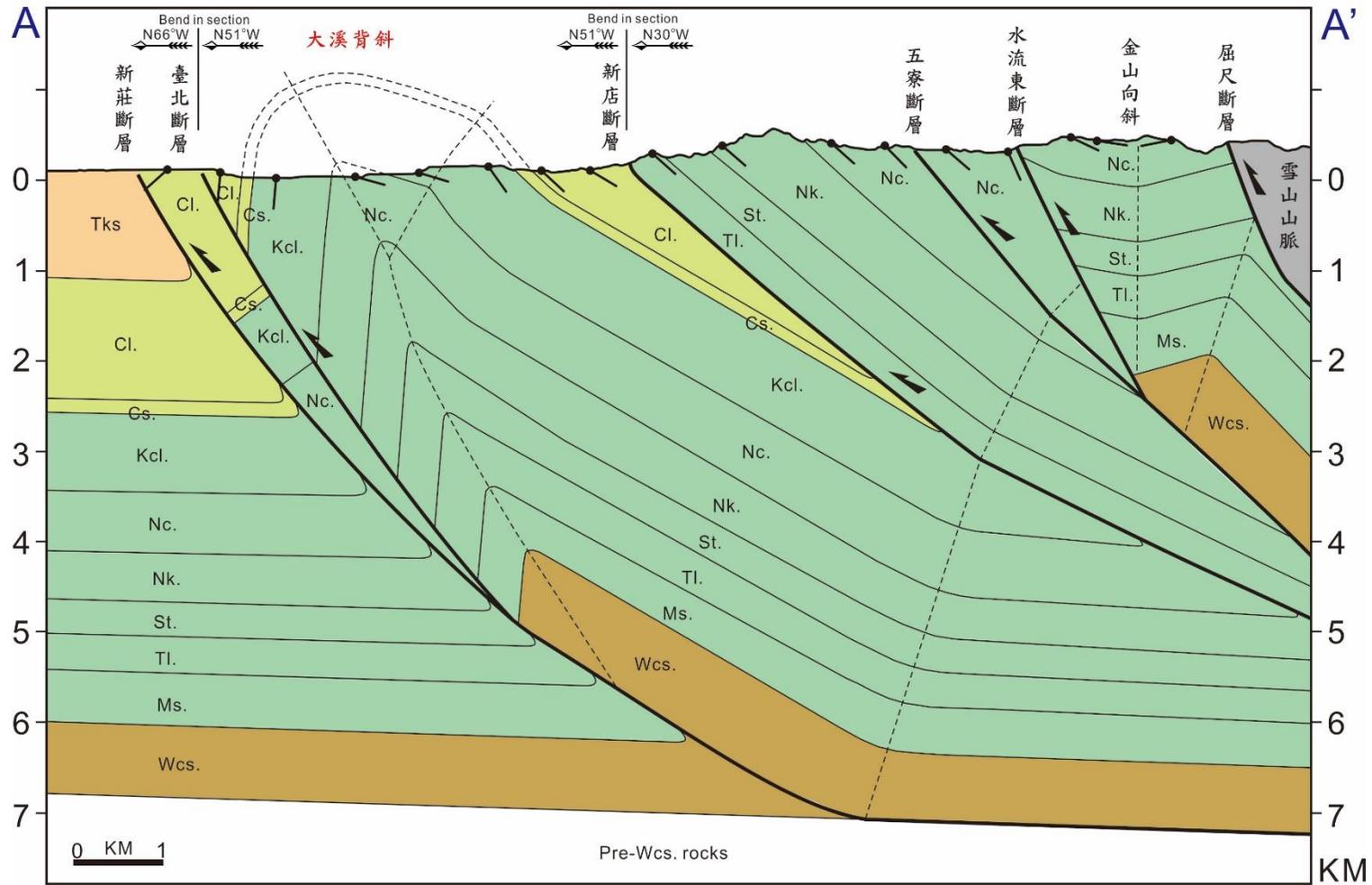


圖 16 臺灣西北部麓山帶區域構造剖面圖 (AA')

AA'剖面之位置參見圖 15。本圖中斷層形貌參考 Suppe (1980) 以及黃旭燦等 (2004) 臺灣北部區域深部構造剖面。地表岩層位態參考地調所地質圖之資料。

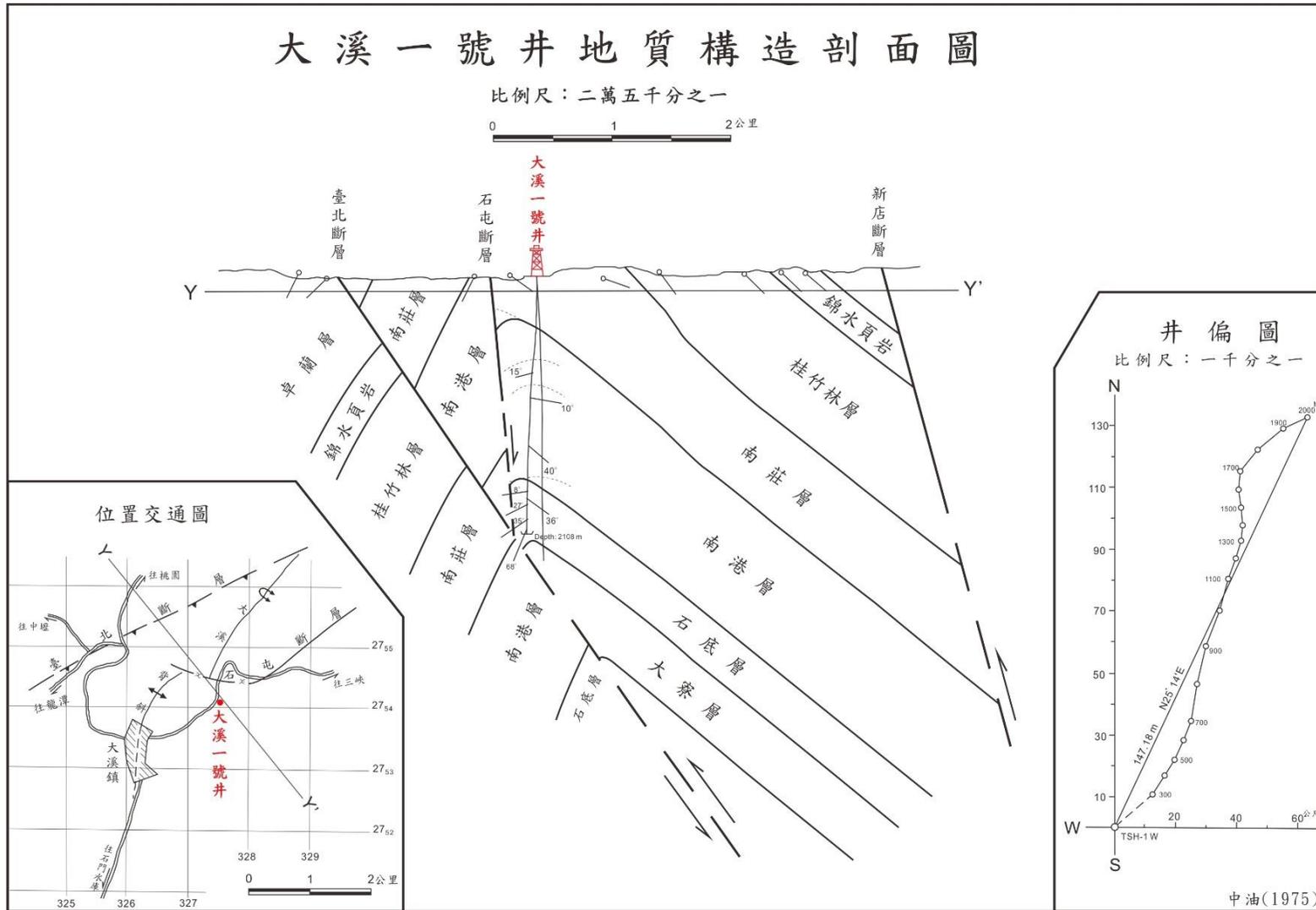


圖 17 中油大溪一號井 (TSH-1) 地質構造剖面圖

剖面顯示大溪背斜位於臺北斷層上盤，石屯正斷層於背斜軸部發育。(中油公司，1975)

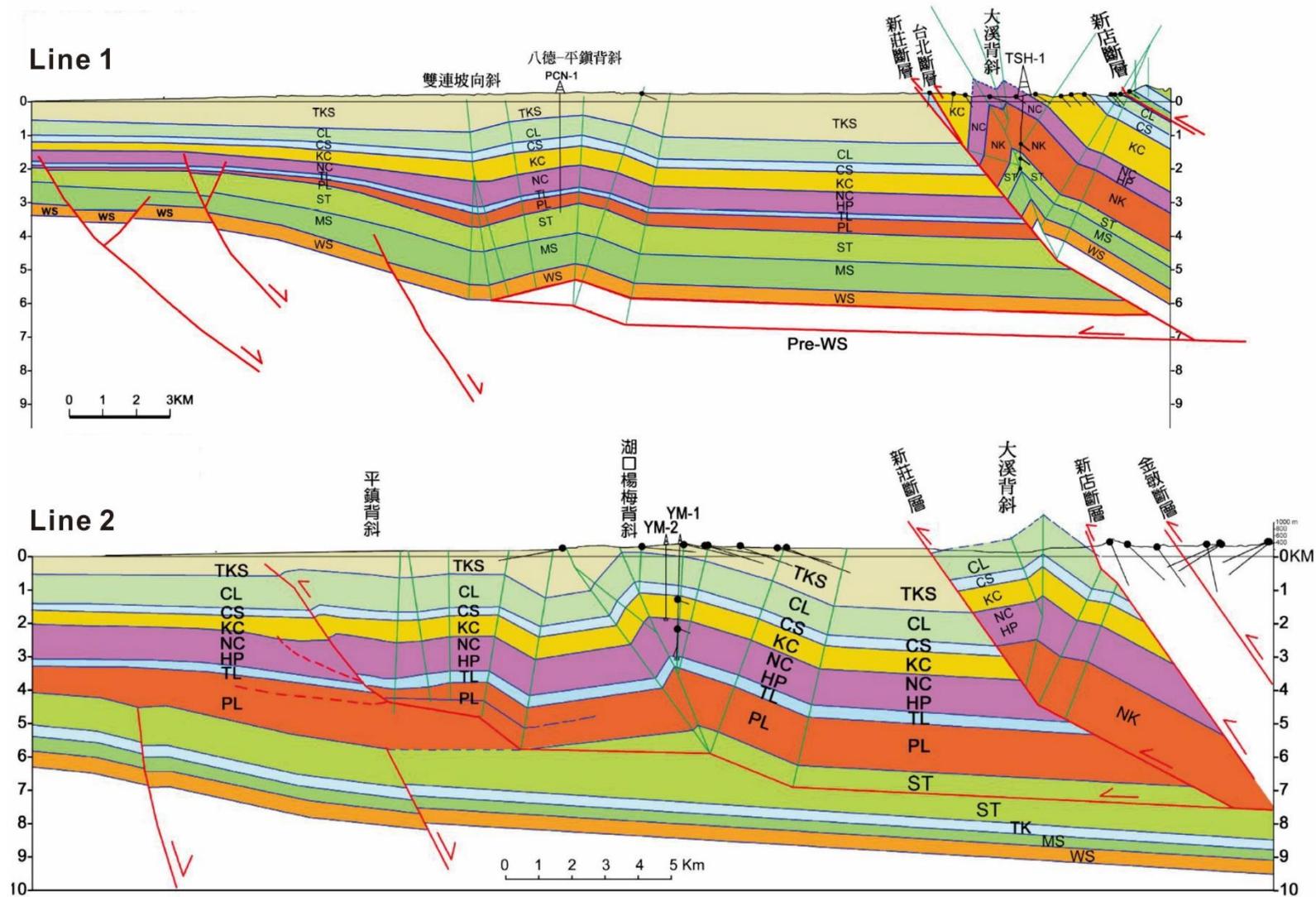


圖 18 湖口-大溪區域構造平衡剖面圖

兩道平衡剖面皆顯示大溪背斜（紅色箭頭處）為一個不對稱背斜構造，以逆斷層與背斜之形研判，其屬於斷層
 延展褶皺（黃旭燦等，2004）。剖面位置參照圖 15。

四、研究方法

4-1 無人飛行載具空拍與影像處理

4-1-1 無人飛行載具儀器

本研究所使用的無人飛行載具為 DJI 公司所出產的 Phantom 3 professional，是一款四軸旋翼型 UAV。這套系統是由飛行器、遙控器以及行動裝置中的 app³所構成（圖 19）。飛行器本身包含四軸螺旋槳、雲台相機、內部飛控系統、電池、固定式降落架等設備。雲台掛載 4K 錄影、1200 萬像素的鏡頭，位於機身正下方。GPS 系統位於機身頂部，天線則附在降落架上。飛控系統位於飛行器機身內。它的最大續航時間約為 23 分鐘，最大水平速度可達 16 m/s；擁有智能返航功能，當遇到電池電量過低或者失控等狀況，UAV 能夠自動回到出發時所記錄的起飛點。遙控器上可放置個人的行動裝置（手機、平板電腦），以行動裝置中的 DJI GO app 對 UAV 進行基本的操作與設定。

Map Pilot 是另一套用於擬定 UAV 測繪任務的 app，內容包括決定拍攝範圍、調整飛行高度（精度）、飛行速度、航線方向等參數。在 app 的地圖介面，用凸多邊形框選出欲調查範圍。同時，app 會考慮相片像幅大小、前後與側向重疊率的設定（不低於 70%），規劃出最佳航線。一旦確認無誤後，即可使 UAV 自動執行飛航任務，開始

³ 行動應用程式（mobile application），簡稱 app。

沿規劃航線連續拍攝相片。UAV 會事先載入任務內容再自動執行，因此升空後並非手動從 DJIGO 操作。換言之，執行自動任務前，必須非常注意附近高壓電塔、地形高地、橋樑建物等（訊號）遮蔽物，確定航線範圍的可行性，避免 UAV 受到訊號干擾而在行動裝置上失去蹤跡，並且注意飛行時間是否達到上限值。

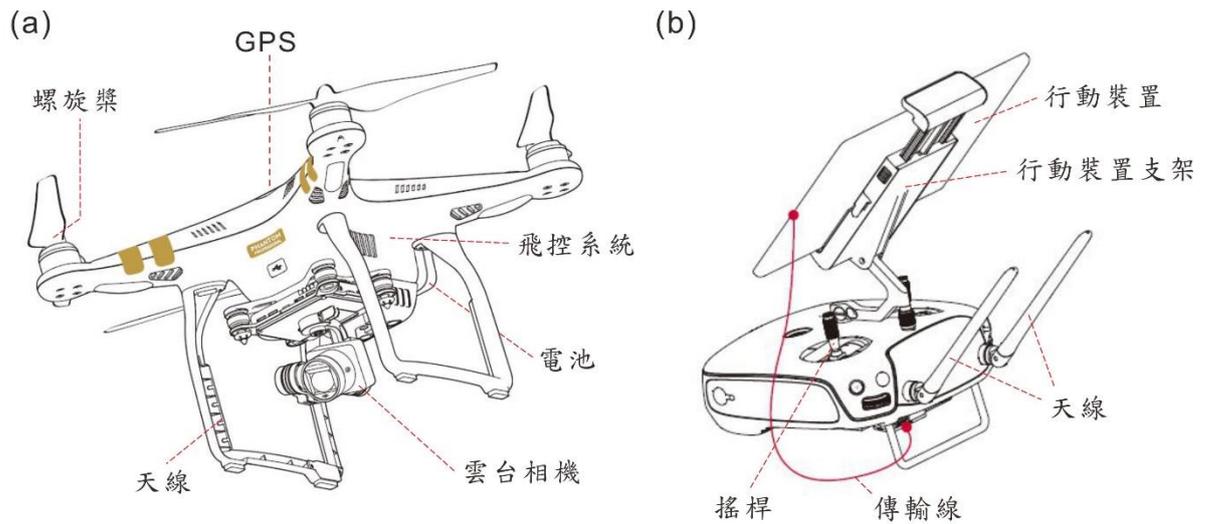


圖 19 DJI Phantom 3 Professional 四軸旋翼型 UAV 系統

(a) 飛行器 (b) 遙控器。圖片引自 DJI 公司之操作手冊。

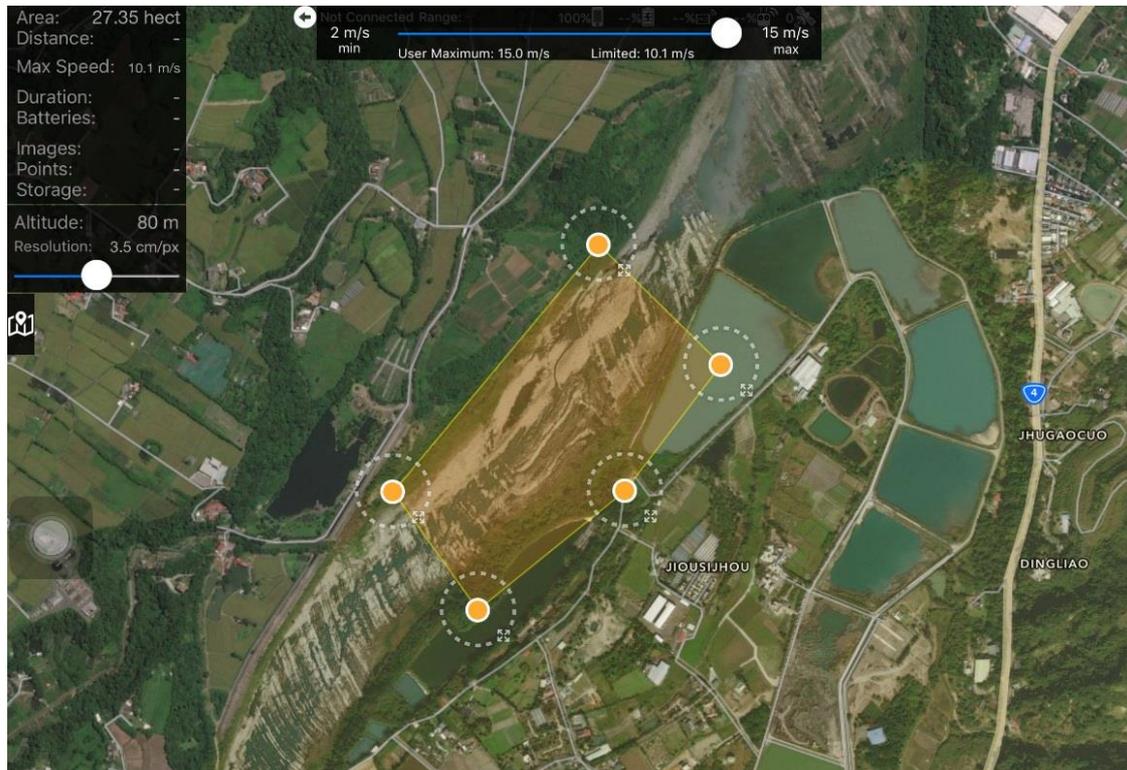


圖 20 Map Pilot app 圈選拍攝河床範圍之操作介面

黃色圓圈為手動決定之多邊形角落，黃色範圍即待拍攝區域。此處以溪洲河床為例。

4-1-2 影像匹配軟體與技術 (Pix4Dmapper)

本研究使用 Pix4Dmapper 影像匹配軟體進行空拍影像處理，生成正射影像 (Ortho-image，或 Orthomosaic)。Pix4Dmapper 是一套專門整合空拍影像的軟體，它的功能包括由空拍相片生成 3D 光雲 (3D raycloud)、數值地表模型 (Digital Surface Model)、等高線地形、正射影像、體積計算等。

在影像處理階段，將 UAV 在野外所拍攝的相片匯入軟體，每一張相片的影像、當時拍攝的 GPS 座標、飛航高度、相機姿態等資訊皆會匯入軟體中。Pix4Dmapper 的操作流程為初始化、點雲密集化與生成正射影像鑲嵌三個步驟。在生成的正射影像的過程中，可針對匹配效果不佳的部份進行手動邊修。製作完成之正射影像具有座標系統，可以在 GIS 系統的環境下做進一步的分析。本研究所製作正射影像之地面解析度約為 5 米。

4-2 野外地表地質調查方法

4-2-1 河床中尺度構造地質圖測繪

欲繪製河床露頭沿線之構造地質圖，首先需要了解目標調查範圍之區域地質圖、地形圖以及空拍影像。本研究參考地調所、中油公司以及其他文獻中之地質圖，大致掌握地層分佈、岩層位態變化、地質構造分佈等架構；以地形圖與空拍正射影像作為構造底圖，規劃多條野外工作路線、工作時間分配、調查重點範圍等，以確保野外調查過程之效率。空拍影像資源包含自行製作之正攝影像以及 Google Earth 的公開衛星空拍影像。實際進行野外調查時，現場狀況多半與原先設想情境有所落差，因此建議外出調查之前，縝密的野外計畫將有助於處理現場的突發狀況。

本研究利用河床空拍正射影像作為構造底圖，大致將主要的指準層岩層、成組節理、斷層走向及其錯動方向與露頭範圍描繪出來，再至野外露頭進行實際觀察與測量。將野外資料記錄於底圖上，並以野外觀察為優先、適當修改原先初步預判的想法。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。

實際進行野外調查時，工作內容包括描述岩性組合、蒐集岩層層面、斷層面以及節理的位態資料等。構造地質領域所關注的問題：岩層之延續性、岩層褶曲程度、岩層錯動方式、岩層中的裂理是否以特定方向成組發育等問題。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。

回到室內工作，將野外資料彙整至構造底圖上。選擇重要的構造部位局部放大，製作較大比例尺的構造地質圖，以呈現較細節的構造特徵與野外資料。

4-2-2 決定褶皺方向性之投影圖分析

1. 求褶皺軸 (fold axis) 位態

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。它是一種線構造，通常以走勢 (trend) 和傾沒 (plunge) 兩個空間參數來表示之。走勢為褶皺軸投影至水平面上的方位角；而傾沒即褶皺軸自水平面之投影線向下俯視至褶皺軸的角度。本研究使用的記錄方式為傾沒/走勢 (plunge/trend)，例如一條線向 137° 的方位傾沒 23° ，則記為 $23^{\circ}/137^{\circ}$ 。層面位態的記錄方式為走向/傾斜，並遵照右手定則，例如一個面的走向為 047° ，向東南方傾斜 25° ，則記為 $047^{\circ}/25^{\circ}$ 。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 Glossary of Geology, 2005; Ramsay and Huber, 1987)。換句話說，一個完美的圓柱形褶皺中，所有的褶皺面可以交會出唯一一個方向的褶皺軸 (圖 21)。由褶皺軸的定義可得知，褶皺軸限於描述一個完美的圓柱形褶皺；然而在自然界中並不容易形成如此完美的褶皺形貌，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。若欲分析之褶皺構造屬於非圓柱形褶皺 (non-cylindrical fold)，則利用投影圓分析來評估此褶皺構造之圓柱度 (cylindricity)，以評估此方法是否適用於該案例。

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。

(1) 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)。

(2) β 圖法 (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。

根據上述兩種求褶皺軸位態的投影圓法的特性，可以發現 π 圖法適用於分析大量層面位態資料； β 圖法則適合分析少量的資料。因露頭連續出露而有利於蒐集大量層面位態資料，本研究當中以 π 圖法進行分析為主。

2. 求褶皺軸面 (axial surface) 位態

褶皺軸面 (axial surface) 為所有褶皺軸線所組成的一個面，也就是說，褶皺軸面包含了一個褶皺所有的褶皺軸，褶皺軸面與水平地表面交出的線即稱為褶皺軸跡 (axial trace)。然而從野外只能測量到層面位態以求褶皺軸，並沒辦法直接知道褶皺軸面。此時就要利用傾沒褶皺當中，褶皺軸、褶皺軸跡與褶皺軸面的特殊幾何優勢。在求出褶皺軸後，在水平地表面上決定出褶皺軸跡的方位。若地形起伏太大，褶皺軸跡將會是一條嚴重彎曲的線，因此這個方法要求在地勢較平坦的區域執行，例如河床面。將褶皺軸與褶皺軸跡繪至下半球投影圓上後，找出兩者共同的大圓，其意義為兩條線所交出的平面，即褶皺軸面。(圖 22)

3. 求褶皺剖面 (profile) 上之褶皺形貌

當以不同角度的斜面或垂直面去切褶皺時，不同的剖面上就會有不同的褶皺形狀。因此若要觀察與探討褶皺形貌的意義，唯有在垂直褶皺軸的剖面圖 (profile view) 上，方能觀察到具有代表性的褶皺形狀。此處指的剖面 (profile) 為垂直褶皺軸的一個褶皺剖面。

一個褶皺軸傾沒角度為零的水平褶皺 (horizontal fold)，其褶皺剖面即為鉛直剖面 (vertical section)；然而，欲建立一個傾沒的褶皺 (plunging fold) 之褶皺剖面，就需要將地表面上的褶皺岩層的分佈位置，投影到褶皺剖面上，且平坦的地形面有助於重建褶皺形狀。

圖 23 a 為一個向正北傾沒的褶皺岩層地表分佈圖。由此地質圖著手，先於圖上建立一套與褶皺軸走勢平行和垂直的單位網格，每個網格的邊長皆為 d_s 。接著透過平坦地表面與褶皺剖面之相對幾何關係 (圖 b)，將一組平行褶皺軸走勢的網格長度投影至剖面上，長度成為 d_p ；垂直褶皺軸的一組網格長度不變。 d_s 與 d_p 之三角函數關係式可寫成：

$$d_p = d_s \times \sin (\text{plunge}) \quad (1)$$

此時我們可以選擇以兩種視角來看剖面，一是由地表面往下 (往北) 看剖面，另一則是從地下往上 (往南) 看。這種將視線順著褶皺軸的方向往下看向褶皺剖面的做法，這樣的做法稱為 "Down-plunge viewing"；而如果是逆著褶皺軸的方向往上看向剖面，則稱為 "Up-plunge viewing"。而兩種視角所看到的剖面為左右鏡像顛倒的關係 (圖 23)。

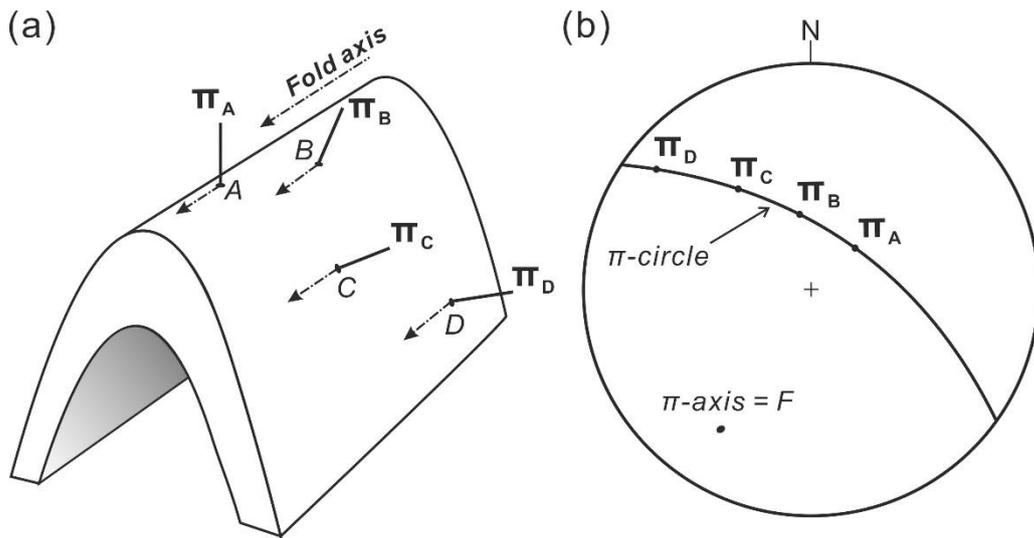


圖 21 圓柱形褶皺面與 π 極點之幾何關係

(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）。

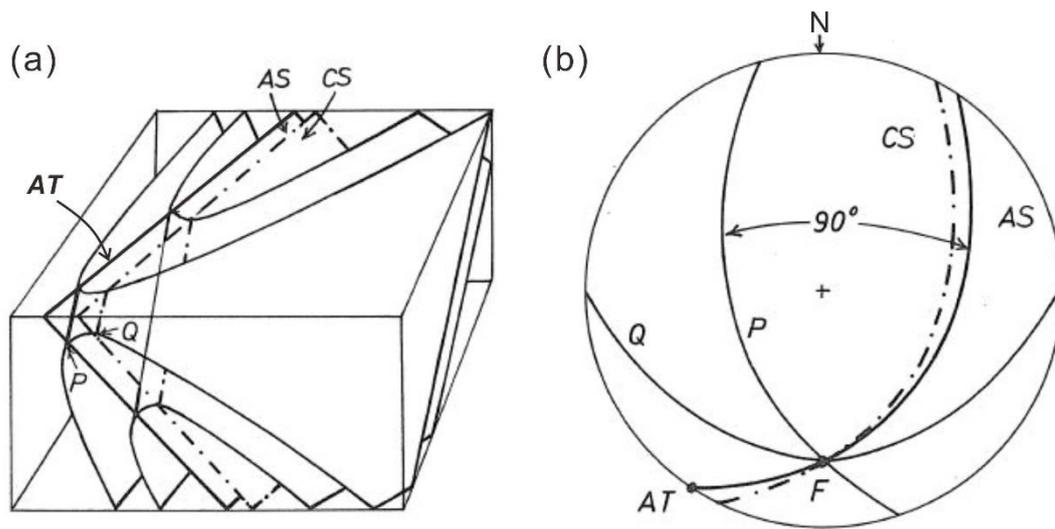


圖 22 褶皺軸與褶皺軸面空間幾何關係

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。引自 Ramsay and Huber（1987）。

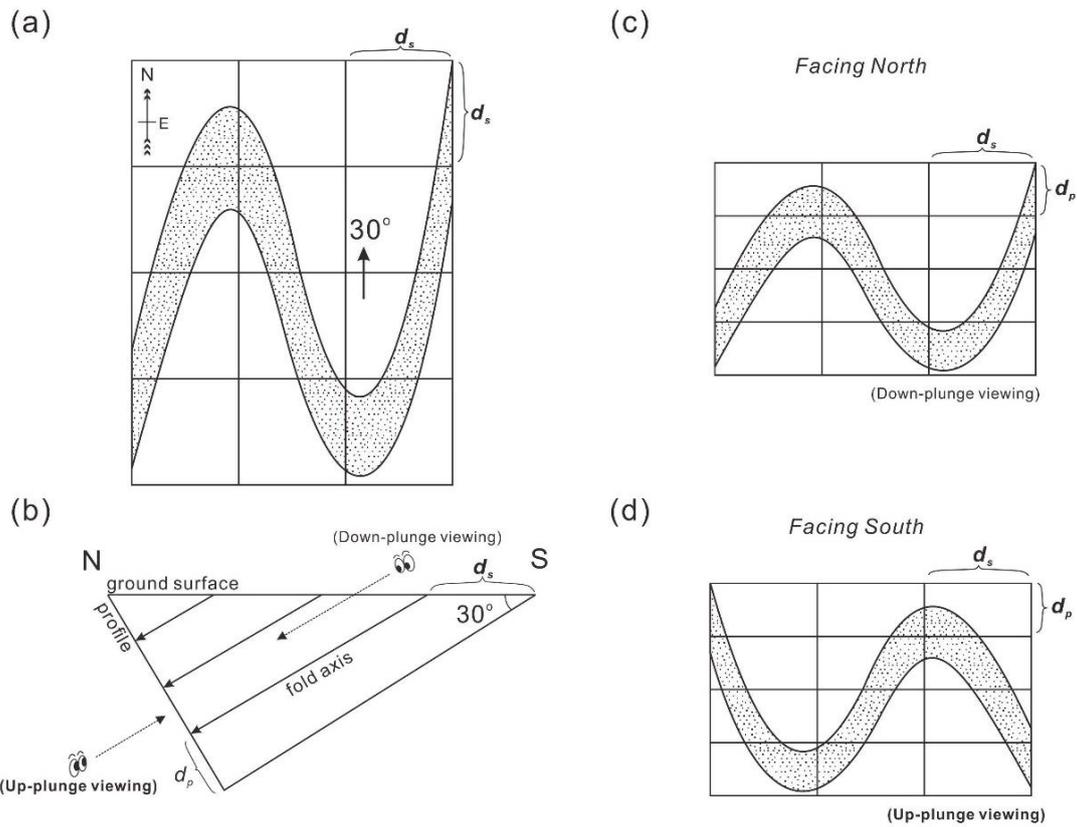


圖 23 一個傾沒褶皺在平坦地表面及褶皺剖面上的褶皺形貌

(a) 傾沒褶皺於平坦地表面上的分佈情形 (b) 地表面與褶皺剖面在鉛直向上的三角幾何關係示意圖 (c) 褶皺地表分佈投影至剖面上之褶皺形貌 (下傾視角，面向北方) (d) 投影至剖面上的褶皺形貌 (上傾視角，面向南方)。引自 Ramsay and Huber (1987) 與 Rowland et al. (2013)。

4-2-3 地質剖面作圖法

為了解大溪地區中視尺度構造與大溪背斜構造之關聯性，本研究繪製鉛直剖面以推測地下深部構造形貌，以及解釋構造形成機制。在製作剖面的過程中，區分成資料與解釋兩部份(圖 24)。首先進行地質資料之整合，包括岩層位態分佈、地層交界位置、斷層跡位置、鑽井資料等。本研究實地蒐集大漢溪河床的岩層位態資料，並整合前人調查結果(地調所地質圖、中油地質圖等)。圖 24 (a) 為將所有資料彙整於剖面的階段。在選定剖面位置與方向時，使剖面通過具有構造現象之部位，剖面方向盡可能與主要斷層跡及褶皺軸垂直，以呈現真實構造樣貌。

在研究區域內，假設各地層厚度在空間上的變化不大。本研究採用之地層厚度如下：五指山層 (Wcs.) 500 公尺⁴；木山層 (Ms.) 600 公尺⁵；大寮層 (Tl.) 300 公尺⁶；石底層 (St.) 400 公尺⁷；南港層 (Nk.) 600 公尺⁸；南莊層 (Nc.) 700 公尺⁹；桂竹林層 (Kcl.) 850 公尺；錦水頁岩 (Cs.) 125 公尺；卓蘭層 (Cl.) 760 公尺；楊梅層 (Ym.) 照鏡段 1070 公尺¹⁰。

大溪背斜構造是本研究主要探討之對象，被認為是斷層延展褶皺，因此假設斷層上盤的背斜構造主要受控於逆斷層面形

⁴ 清水坑背斜鑽穿完整五指山層，厚達 500 公尺 (湯振輝與楊建一，1977；Tang and Huang, 1965)。

⁵ 木山層在大漢溪上游厚 600 公尺 (詹新甫，1962)。

⁶ 大寮層在大漢溪上游約厚 300 至 450 公尺 (詹新甫，1962)。

⁷ 石底層於大漢溪上游厚 400 至 600 公尺 (詹新甫，1962)。

⁸ 南港層於大漢溪上游厚 600 至 950 公尺 (詹新甫，1962)。

⁹ 南莊層於大漢溪厚 700 至 900 公尺 (詹新甫，1962)。

¹⁰ 錦水頁岩、卓蘭層與楊梅層照鏡段之厚度引用自 Pan et al. (2015)。

貌。本研究參考黃旭燦等（2004）平衡剖面（圖 18）當中新莊斷層與臺北斷層之地下形貌，做為逆斷層形貌之基本假設。圖 24 (b) 為假設地層層厚與斷層形貌後所繪製出完整剖面內容。

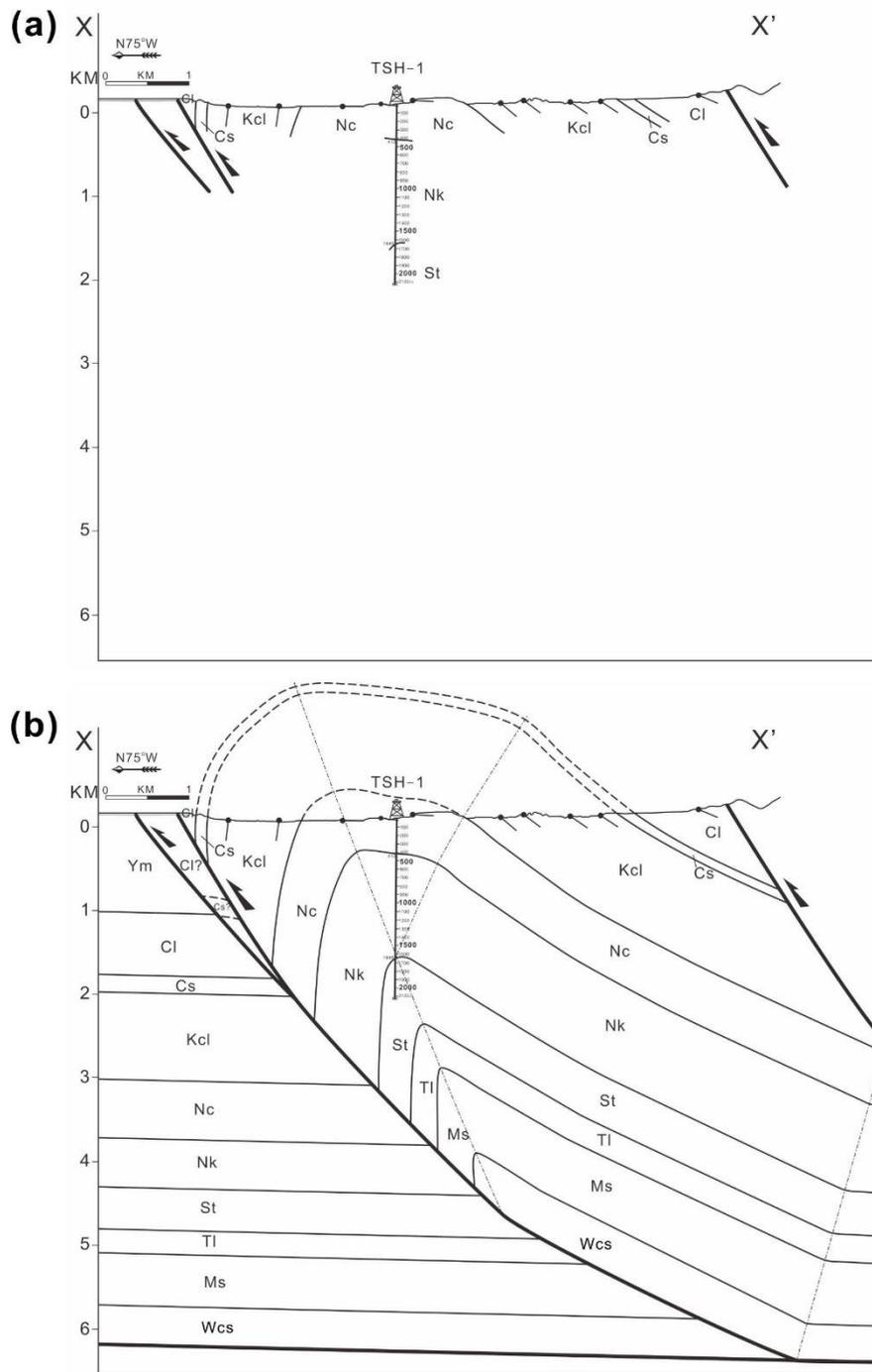


圖 24 繪製鉛直剖面之過程

繪製剖面的過程主要分為 (a) 彙整資料階段與 (b) 假設與解釋階段。

五、野外調查結果與空拍影像判釋

本章節內容為大漢溪河床露頭岩層分佈與次生構造現象的統整。第一節，綜合野外地質調查資料與河床空拍正射影像判釋結果，描繪出河床中褶曲岩層的分佈與延伸情形，並針對具有褶曲、錯動以及節理現象的露頭做詳細記錄。第二節，將所觀察到的中視尺度褶皺構造進行投影圓分析，求得褶皺軸位態的趨勢。第三節，歸納節理與變形條帶構造的分佈情形。

5-1 河床露頭次生構造現象

大溪背斜為向西南傾沒的背斜構造，因大漢溪的流向與背斜軸大致平行，使得河床由北而南依序出露南港層 (Nk.)、南莊層 (Nc.)、桂竹林層 (Kcl.)、錦水頁岩 (Cs.)、卓蘭層 (Cl.) 與楊梅層 (Ym.)，出露的地層越往南方越年輕。以下各次小節報導各地層當中的岩性組合、岩層分佈、次生構造種類與分佈。圖 25 為大溪區域地質圖，顯示地層的分佈呈一個 V 字形。圖 26 為大漢溪沿線各調查區索引圖，各區野外調查結果於各次小節中分別進行描述。調查區一共分為六區，由北而南編號 A 至 F 區。

完整大漢溪河床空拍影像圖請見附錄二 桃園大漢溪河床空拍影像圖。

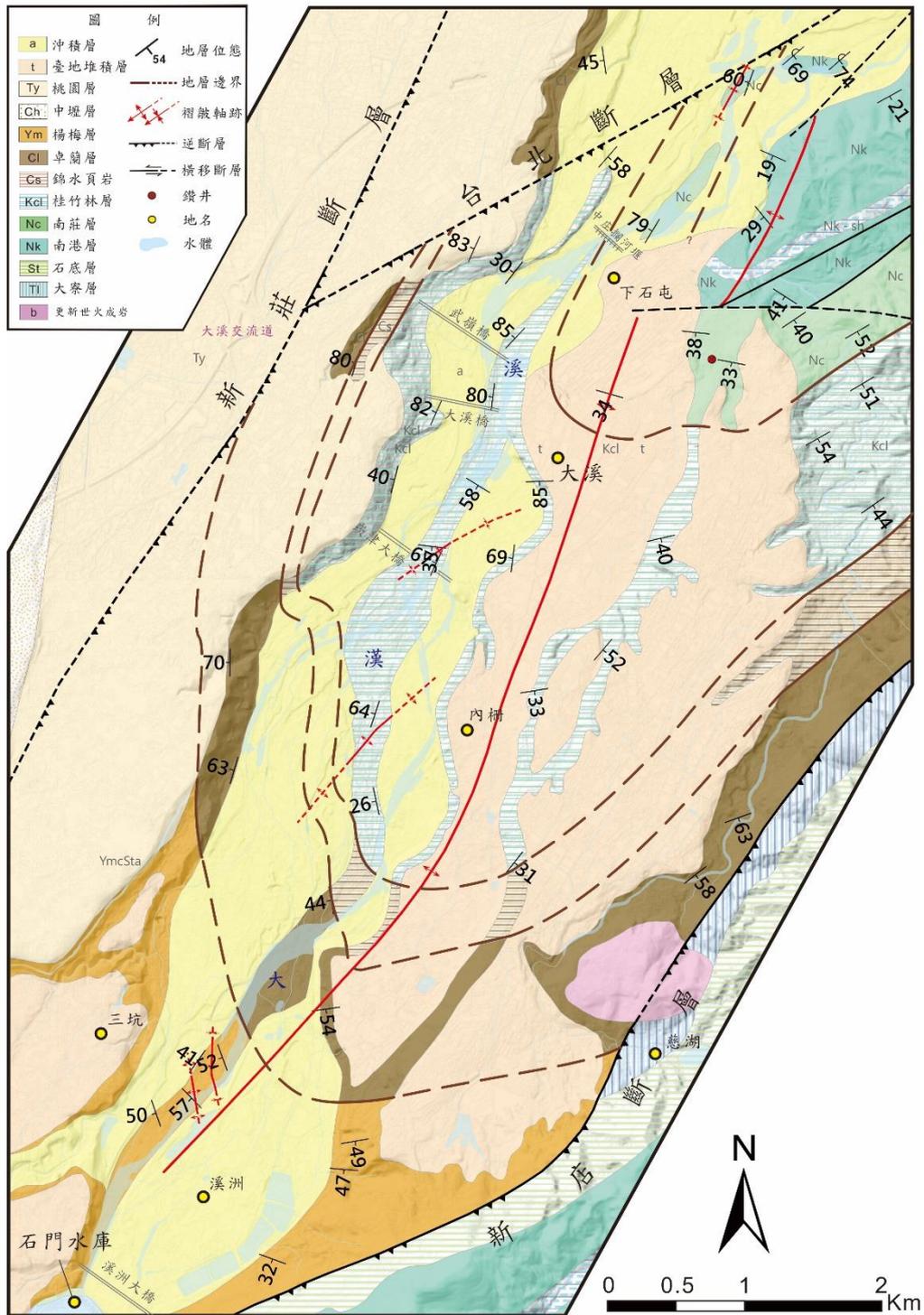


圖 25 大溪區域地質圖

大漢溪河床出露範圍為大溪背斜西翼岩層，河流流向大致平行於背斜軸。地層分佈與位態資料參考 Pan et al. (2015)、地調所地質圖以及中油地質圖。

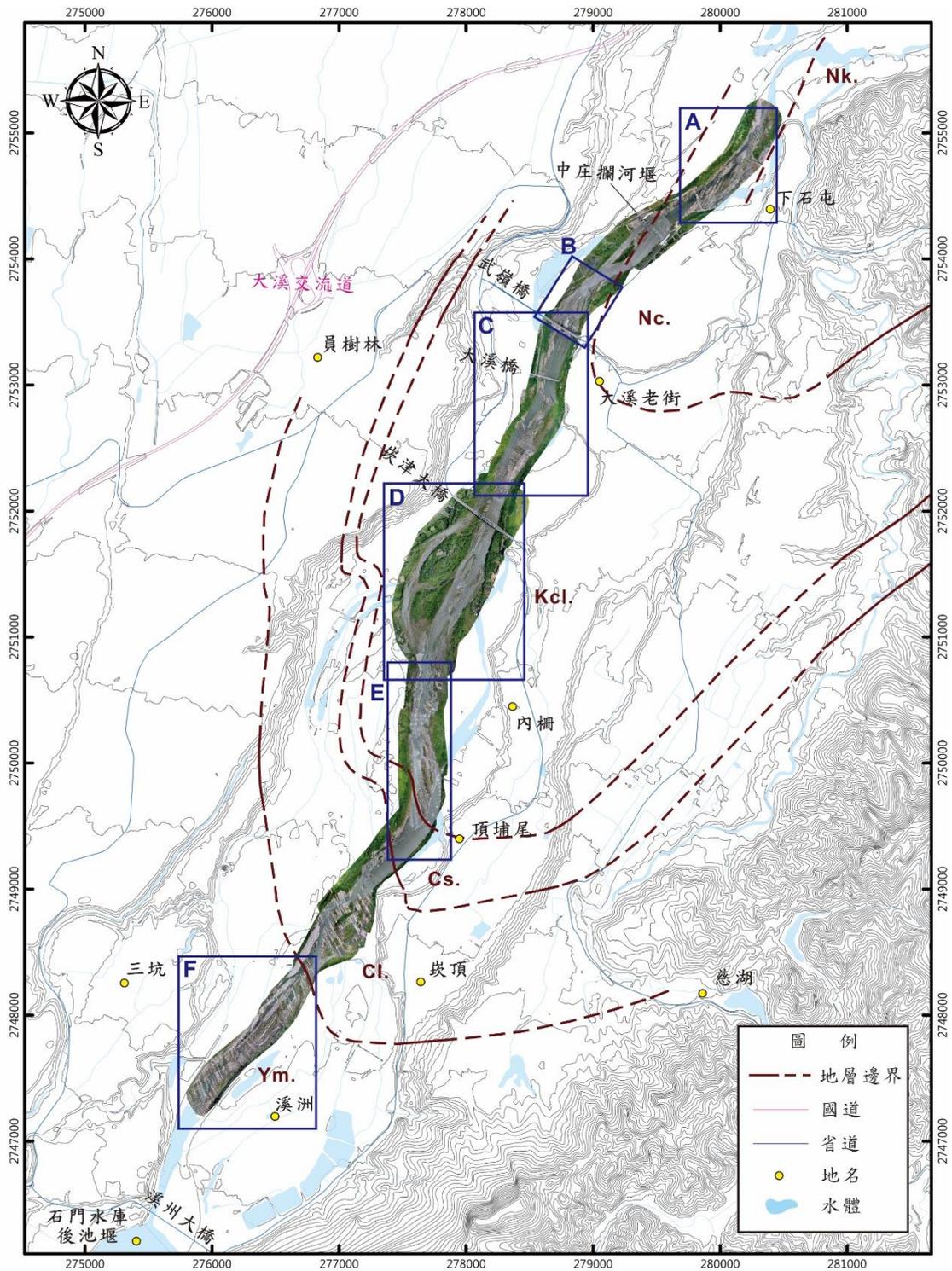


圖 26 大漢溪河床調查分區索引圖

本研究針對大漢溪沿線露頭，挑選六個主要調查區，由北而南編號為 A 至 F 區（藍色粗框）。咖啡色英文字為地層名稱縮寫，請參照內文。

5-1-1 南港層

在本研究區域的最北段之河床（調查區 A 以北，非調查區 A），位於中庄攔河堰調整池旁，河床有出露零星岩層露頭。圖 27 為此段長約數百公尺的露頭路線地質圖。岩性從砂泥薄互層，越往北方，砂層比例逐漸增加增厚，至出現厚層塊狀砂岩層。由岩性變化以及區域地層分佈的趨勢來判斷，這一帶可能南莊層與其下伏南港層交界帶，但交界位置並不清楚。大溪軸部山區中可見到南港層的厚層砂岩露頭，推測從河床左岸走向右岸（往東）會遇到南港層頂部之岩層。

此區出露一道中視尺度的向斜構造（圖 27，圖 c），向斜兩翼岩層位態大致分別為 $055^{\circ}/17^{\circ}$ （西翼）與 $205^{\circ}/59^{\circ}$ （東翼）。向斜以東的岩層傾角漸陡甚至倒轉（圖 27，圖 a 與 b），可從厚砂岩層中的交錯層判斷地層年輕方向（圖 28）。

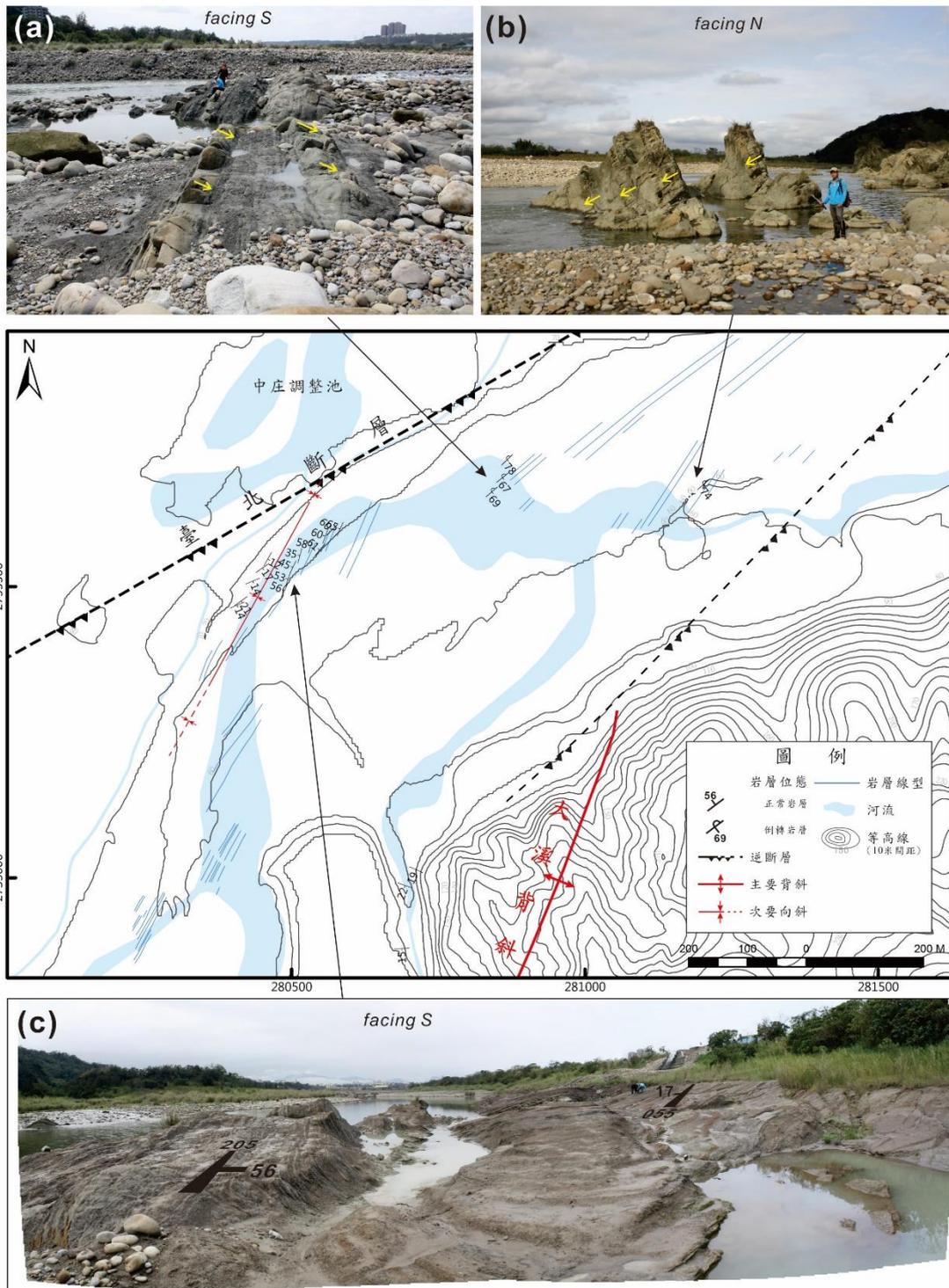


圖 27 大溪中庄調整池旁河床路線地質索引圖

此河床段露頭之構造特徵為一道小型向斜及高傾角倒轉之岩層。野外相片中黃色箭頭指示地層年輕方向。(a)與(b)為高傾角倒轉地層之相片。(c)為中視尺度向斜軸部之相片。



圖 28 砂岩之交錯層沉積構造

黑色線為交錯層理，黃色箭頭指示地層年輕方向。

5-1-2 南莊層

南莊層出露於大漢溪下石屯附近之河床，位於大溪市區北北東約 1.5 公里處。河道設有一中庄攔河堰，本研究調查期間工程單位搭建橫跨河道的臨時連絡橋（圖 29）。

圖 29 為調查區 A 區之河床露頭空拍圖(位置參照圖 26)，岩層具有北北東方向之線型，其中發育數道成組裂隙。此區岩性主要以白色極細至中粒厚層砂岩與砂泥薄紋層，偶夾煤塊與煤跡，含黃鐵礦結核群聚。厚層砂岩厚度平均約 30 至 50 公分，可拼合呈數公尺厚的砂岩。砂泥薄紋層當中偶夾淡灰色中至厚層砂岩，風化後之產狀呈土黃色，矗立露頭面上；在顯微鏡下

觀察砂岩岩塊，發現層面之間夾有一些殘破不完整的樹葉化石。大型交錯層理、高角度交錯層理發達，可見延續良好之大型侵蝕面（不整合面）。砂泥薄紋層多呈波狀紋理。煤塊一般可見長達 30 公分、厚僅 5 公分之透鏡狀產狀；另外偶見較厚者可達 20 公分。煤跡厚度約在數釐米至數公分左右，發育於平行層紋理以及交錯層理當中。

本區岩層位態約為 $210^{\circ}/85^{\circ}$ ，僅在大型交錯層與侵蝕面兩側出現些微變化。由空拍影像上（圖 31），除了能夠明顯看出岩層延續的情形，尚可辨識出有數道切穿岩層的裂理線型。依走向與錯動方向兩項特徵，可歸納為兩組斷層：一組走向約 085° 至 095° 的右移斷層以及另一組走向約 140° 至 160° 的左移斷層（圖 32）。追跡特定延續良好的中或厚層砂岩，即可觀察同一道砂岩層受兩組斷層截切的現象，一般水平錯動量約在數十公分至一公尺左右（圖 33）。觀察兩組斷層的截切關係時，可見到任一組斷層止於另一組斷層跡的現象，研判它們形成時間應為同一時期。兩組斷層之走向夾銳角約 30 至 40 度，認為它們可能互為共軛斷層，且此推論與其錯動方向吻合（圖 32）。由於斷層面露頭多已受侵蝕風化而浸入水中，未能取得斷層面傾角資料。這些斷層跡足以於露頭面留下明顯的線型特徵，以野外現場目測，仍可推測出斷層面應該多呈高角度傾斜。

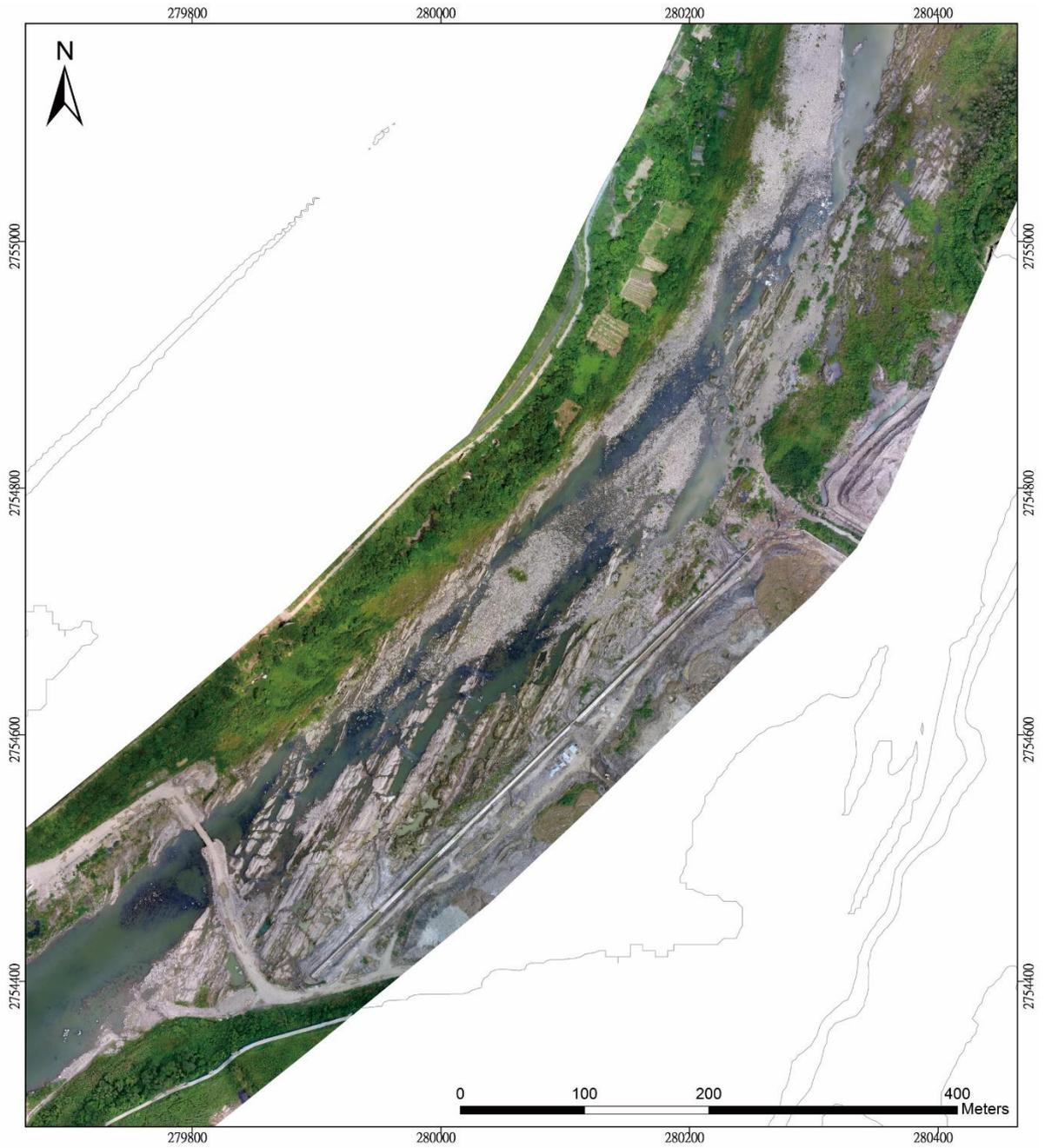


圖 29 調查區 A 區河床空拍影像

河床露頭具有明顯的岩層線型，呈北北東走向。受到兩組斷層截切，斷層通常形成低窪地河水覆蓋。

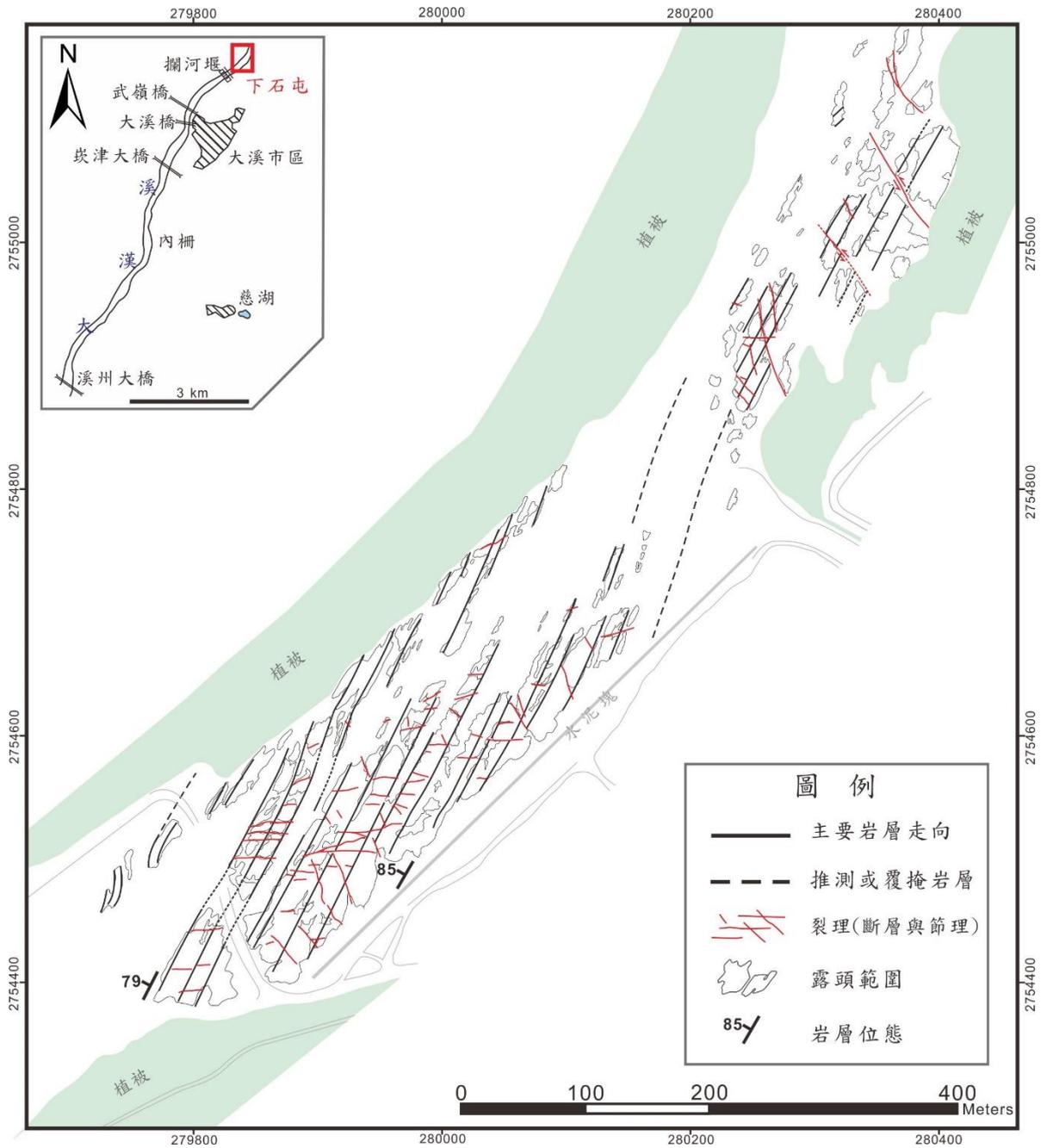


圖 30 調查區 A 區河床構造解釋

本圖以圖 29 為底圖繪製而成，岩層位態大致為 $210^{\circ}/85^{\circ}$ 而維持不變。岩層當中發育兩組斷層，分別是左移與右移斷層。

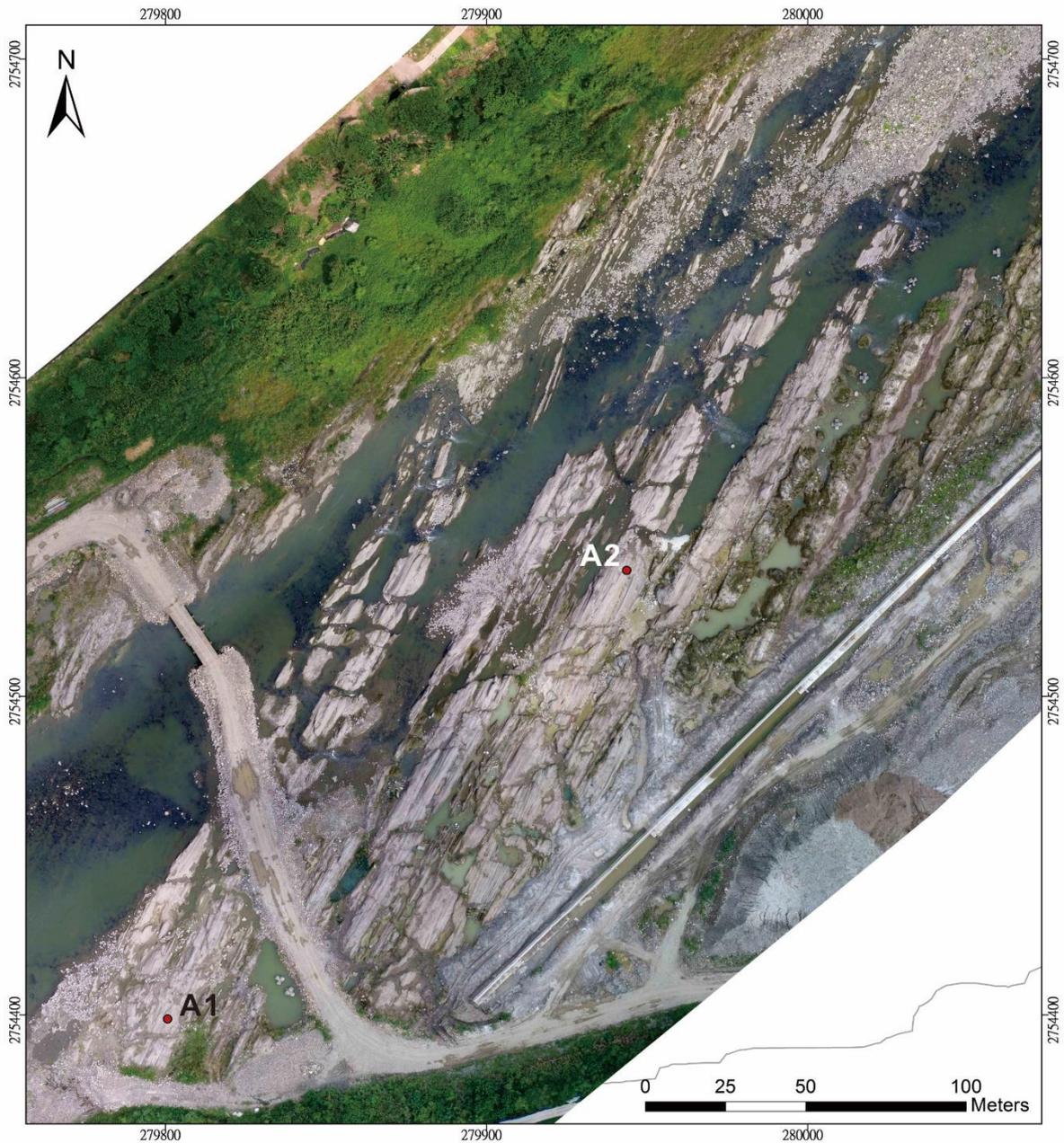


圖 31 調查區 A 區河床局部放大空拍影像

在此空拍影像中，灰白色彼此平行排列的部分為沉積岩層，岩層走向大致為 030° （或 210° ）。位於影像西側、跨越大漢溪主河道的是工程臨時搭建之聯絡橋；影像東側矗立長約 150 公尺的水泥牆。A1 與 A2 表示野外露頭位置。

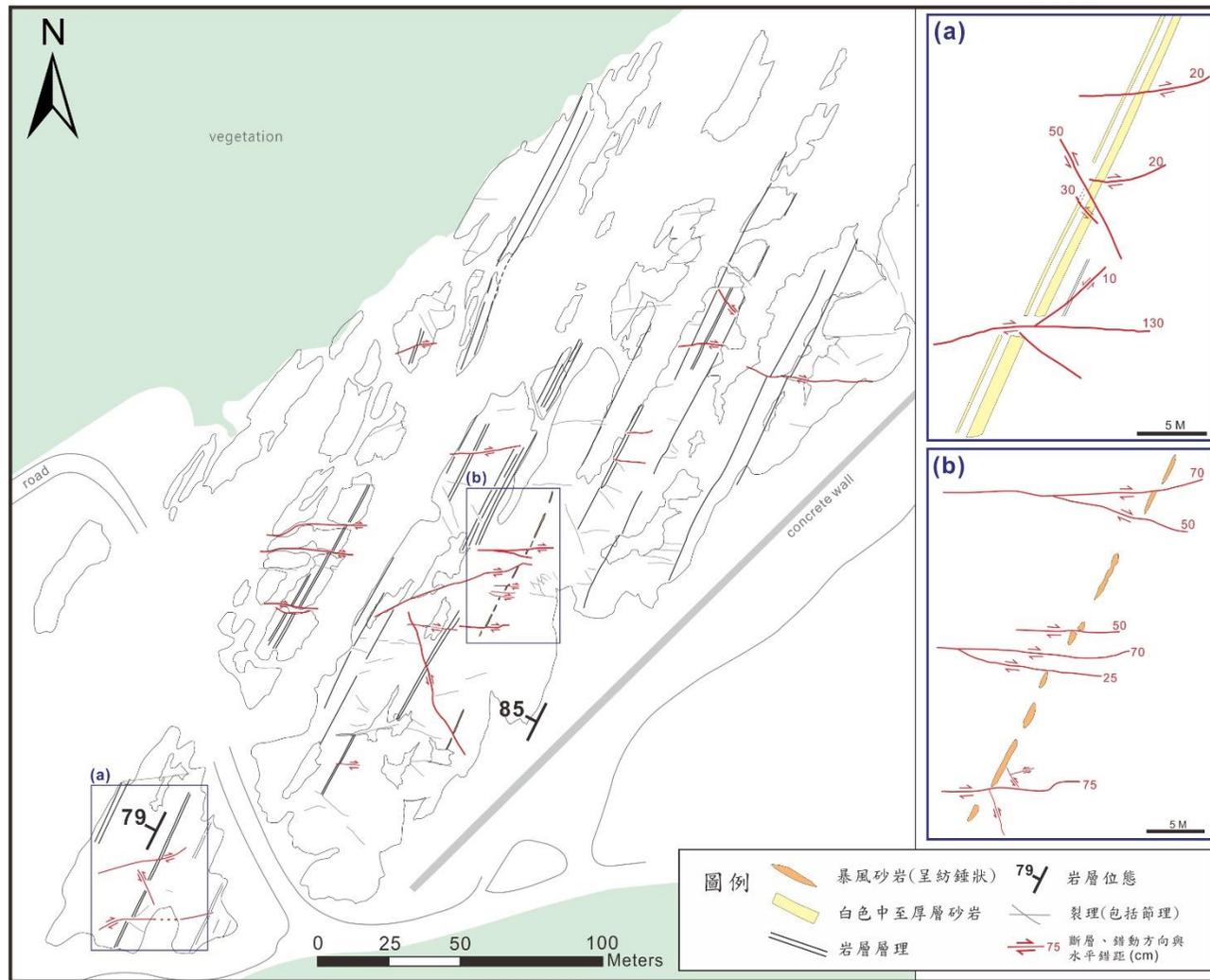


圖 32 調查區 A 區局部詳細構造解釋

從岩層線型之延伸情形，可判釋出兩組橫移斷層發育，分別為左移與右移斷層。圖 31 中 A1 與 A2 兩處之橫移斷層現象分別繪製於此圖 (a) 與 (b) 方框中。

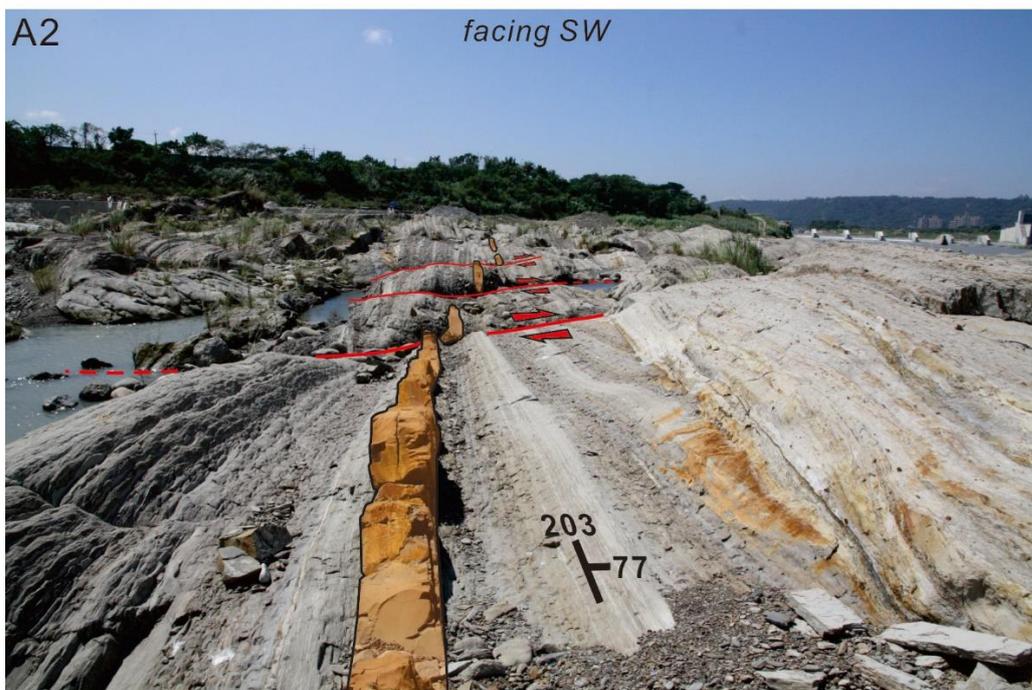
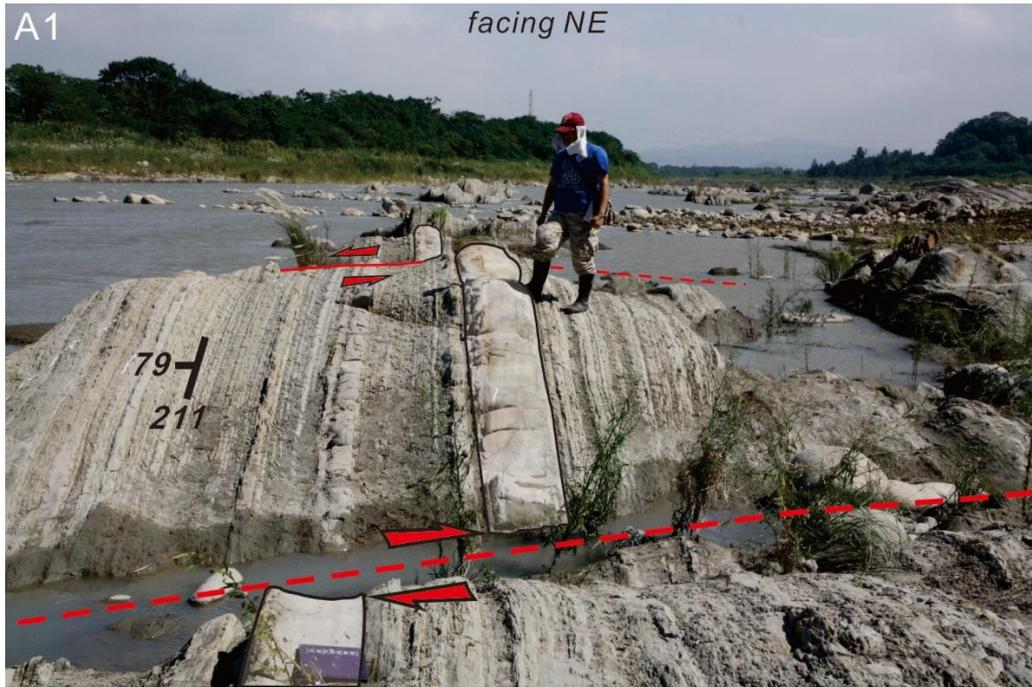


圖 33 橫移斷層截切高傾角之厚層砂岩指準層

A1 處見一道灰白色厚砂岩同時受左移與右移斷層截切，具有數十公分水平錯移量；A2 處見一道淡黃色（風化所致）岩層受多道右移斷層截切，使得岩層斷塊呈右雁形排列。紅色線段表示斷層，虛線表示覆掩。A1 與 A2 位置參照圖 31。

5-1-3 桂竹林層

大漢溪河床沿線出露的桂竹林層具有明顯褶曲之現象，發育數道褶皺構造。桂竹林層大致出露於武嶺橋至內柵之間的河床(地層分佈位置參照圖 25 與圖 26)。以下分別對桂竹林層下部與上部的露頭進行描述：

1. 桂竹林層下部

桂竹林層與南莊層的交界位置並不清楚，僅推測大致介於中庄攔河堰至武嶺橋之間的河床。武嶺橋為大溪重要幹道(臺 3 線)，橋下可見矗立於河道中的岩層。圖 34 為調查區 B 區之河床空拍影像，大漢溪右岸為月眉停車場與月眉山觀音寺，左岸為大溪河濱公園旁的大崙炭人工濕地。

此區岩性以厚層青灰色細粒砂岩為主，夾薄層砂岩與頁岩，偶見粗粒砂岩含粗礫；厚層白色砂岩與砂頁薄紋層，含一道厚層煤層。砂岩中富含貝類化石。灰色砂岩中可見槽狀交錯層理。大型膠結結核排列於特定厚層砂岩層中，結核的尺寸約為直徑 50 公分至一公尺(B1 點)。河道中央露頭可見一道厚達 50 公分至一公尺的厚層煤層(圖 39, B2 點)，但受到斷層擾動而無法追跡其延續位置。

武嶺橋河床露頭空拍影像(圖 34)顯示，岩層線型主要以北北東-南南西至南北向的走向延伸。河道中間的部分可以發現局部岩層呈現褶曲狀，數道岩層彎曲的趨勢一致。B3 與 B4 點為同一道厚層青灰色砂岩，岩層從 B4 點延伸至 B3 點時，走向逆時針偏轉了 35 度左右。同樣地，在 B7 點、B8 點以及 B9 亦可見到褶皺現象。褶曲岩層在河道中被水體覆蓋，無法追跡。

根據野外觀察，研判河道中央露頭的位置存在一道走向滑移斷層（稱 F_1 ），走向約 220° ，但斷層兩側無法比對指準層，錯動量可能甚大。 F_1 斷層可能有延伸至下石屯中庄攔河堰附近，河道中央出露於沙洲上的岩層呈小幅度褶曲，但武嶺橋至攔河堰之間缺乏露頭，推測此 F_1 斷層從武嶺橋下橋墩起，向北延伸至下石屯的中庄攔河堰附近，可能長達 800 至 1000 公尺。

圖 36 為 F_1 斷層帶調查結果。河床可觀察到的 F_1 斷層長至少 40 公尺、寬約 3 至 5 公尺的斷層帶，斷層面位態為 $220^\circ/86^\circ$ 。斷層帶中夾雜數種岩性的破碎岩塊，包含斷層泥、青灰色砂岩、泥岩、白色砂岩與煤層。斷層帶內主要為易碎的白色砂岩與泥岩，兩種岩性彼此鑲嵌使得邊界極不規則。許多煤塊分散於斷層帶之中，多呈紡錘狀，其形狀顯示煤塊應受到剪切作用，且它們應來自厚層煤層。位於斷層帶中的厚層煤層明顯具有變形褶曲之現象，煤層的紋理呈扭曲狀（圖 39）。位於調查點 B9 可見灰色砂岩與斷層泥之接觸位置（圖 37）。其他西側岩層似未受斷層影響而產生明顯褶曲或錯動（B1 點，大漢溪河床左岸露頭）。在位置點 B8 點的白色砂岩層中觀察到至少七至八道成束狀的變形條帶，其走向大致與斷層帶平行。變形條帶，寬度約 0.5 至 2 公分，延續至少 10 公尺以上。

在斷層帶的東側，青灰色砂岩岩層的位態在靠近斷層的位置開始出現偏轉。以下分述近斷層位置岩偏轉的情形。在位置點 B4 與 B3 點，岩層位態分別為 $180^\circ/65^\circ$ 與 $145^\circ/80^\circ$ 。在 B8 點，層面並不明顯。在 B7 點，青灰色薄層砂岩中發育小型褶皺，波長僅約 10 至 20 公分左右（圖 38）。在 B9 點，岩層位態

由 $204^{\circ}/76^{\circ}$ 逐漸轉至 $121^{\circ}/50^{\circ}$ ，最後岩層沒入水中。根據上述野外所觀察到的斷層帶以及斷層附近褶皺現象，研判近斷層之岩層是受到斷層的水平剪切作用，形成拖曳褶皺構造。

位置點 B4、B5 以及 B10 點處，有另一道走向滑移斷層（稱為 F_2 ）。野外所測量道的 F_2 斷層面位態為 $320^{\circ}/70^{\circ}$ （B5 點）與 $325^{\circ}/86^{\circ}$ （B10 點）。 F_2 斷層自 B10 點延伸至 B3 點附近，在進入 B3 點的厚層砂岩中而終止，並未匯入 F_1 斷層中；B10 點以東進入河堤的延伸位置不明（圖 40）。

F_2 斷層的兩側（南北側）分別能以數道厚層砂岩做為指準層，顯示 F_2 是一道帶有左移分量的斷層，水平錯動量約為 12 至 13 公尺。在 B3 點， F_2 斷層附近的岩層位態些微受到擾動，應屬於斷層引致的拖曳褶皺，岩層偏轉方向亦顯示錯動方向為左移形式；斷層向西延伸進入 B3 點的厚層砂岩中，即分散成數道分支斷層而終止（圖 40 之 a）。在 B10 點，一道富含貝類化石、厚約 60 公分的厚層砂岩可做為 F_2 斷層良好的指準層，此道岩層受到斷層截切，水平錯動量共為 13 公尺（圖 40 之 b）。 F_2 斷層是由數道彼此平行的小斷層所組成，將指準層以及其他鄰近岩層截切成左階雁型排列形式。B14 點與 B10 點之間，斷層露頭因受到河流侵蝕而消失殆盡，依斷層位態與水平錯動量，仍判斷 F_2 斷層連續延伸，河床上確知的斷層長度至少 75 公尺。

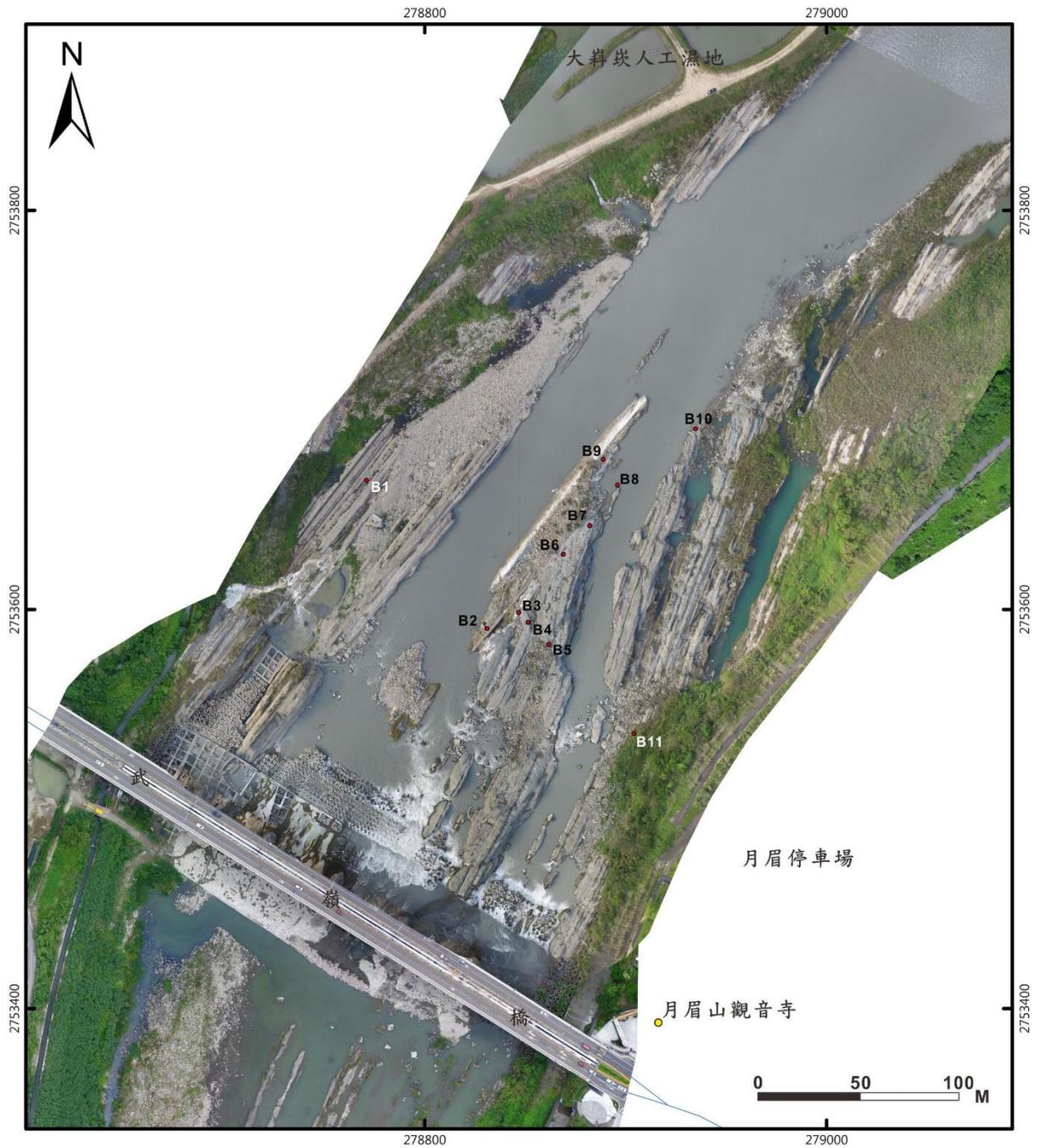


圖 34 調查區 B 區河床空拍影像

空拍影像顯示岩層走向大致呈北北東走向。河床露頭調查位置點包含 B1 至 B11。

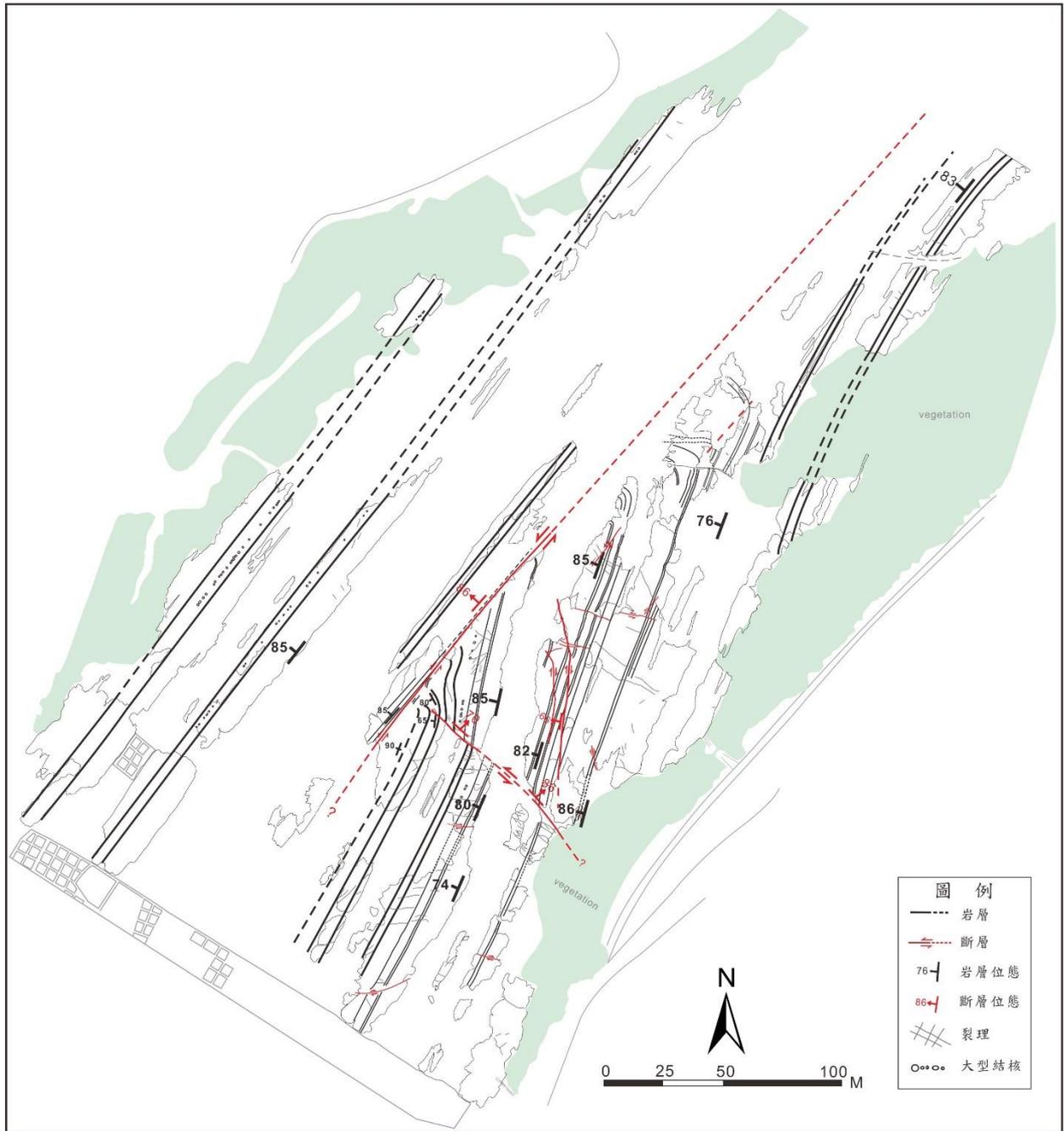


圖 35 調查區 B 區河床構造解釋

本研究研判河道中央有一道走向滑移斷層（稱 F_1 斷層）經過，使得部分岩層產生拖曳作用而褶曲。

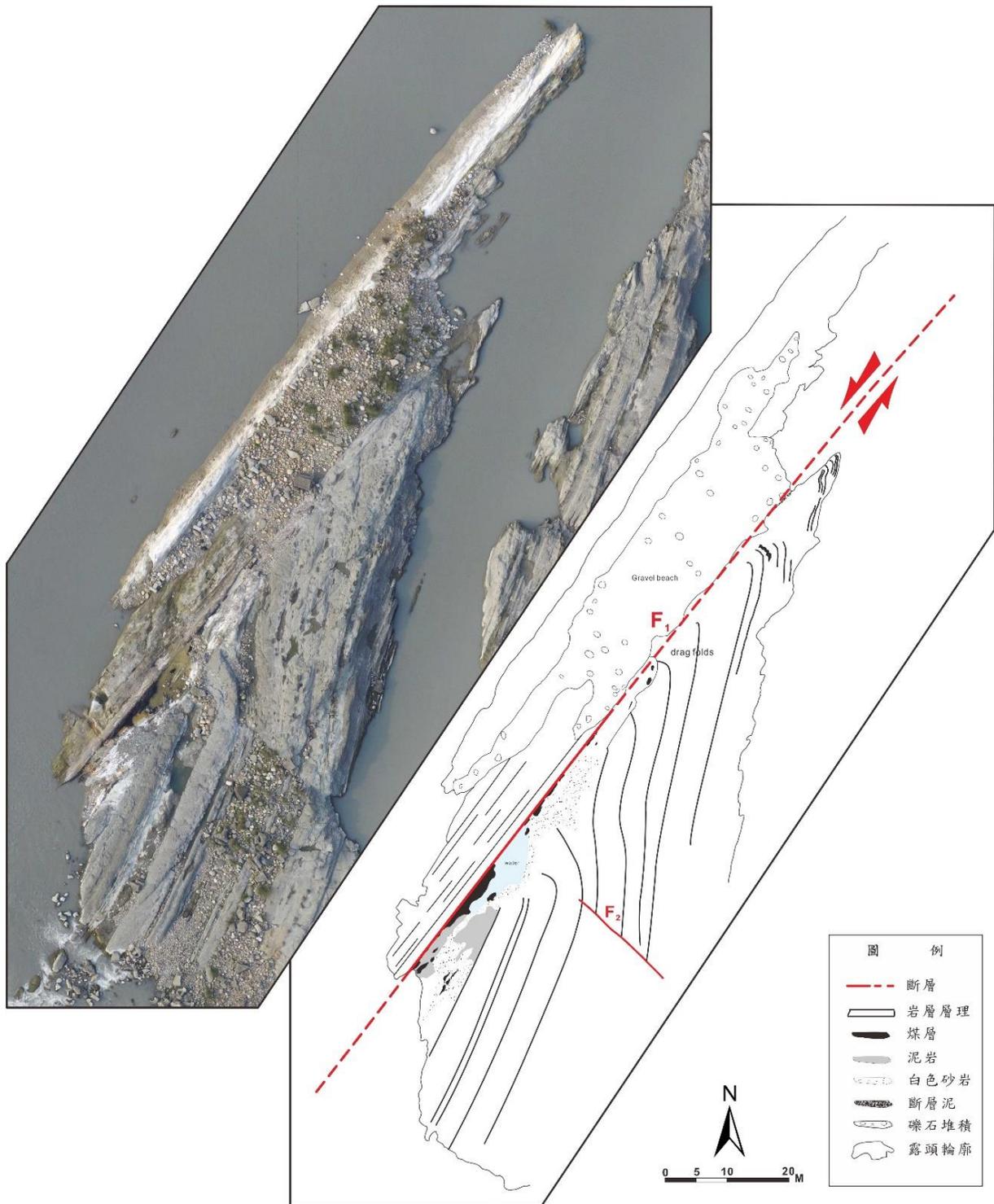


圖 36 F₁ 斷層帶構造描繪圖

在此斷層帶當中可見到不同岩性的碎塊，包含灰色泥岩、白色砂岩、煤層以及少許斷層泥。



圖 37 F_1 斷層帶中斷層泥與青灰色砂岩

(a) F_1 斷層跡位置 (b) 青灰色砂岩與斷層泥接觸。此露頭位於位置點 B9 點

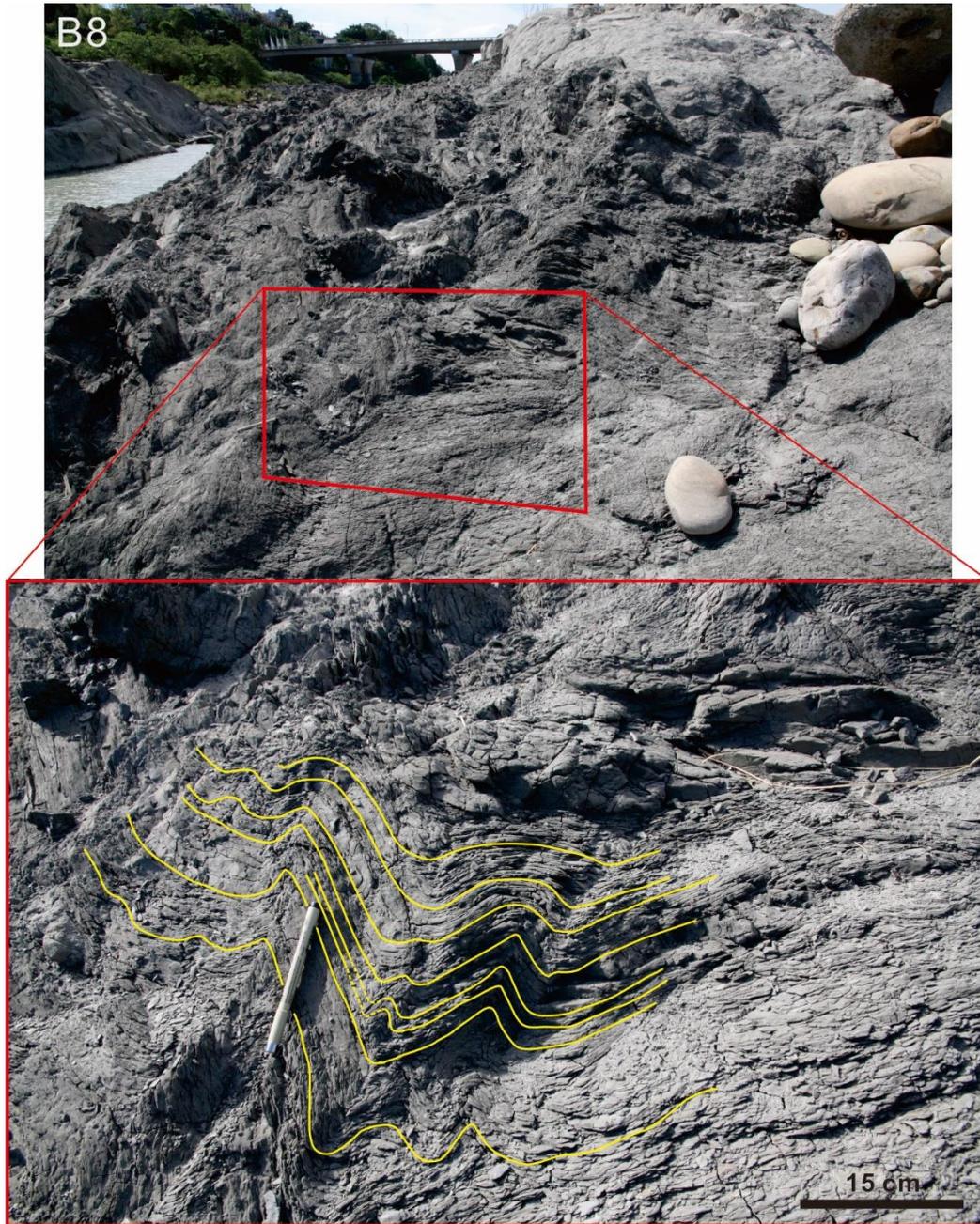


圖 38 青灰色薄層粉砂岩之小尺度褶皺

黃色線段表示岩層層面，粉砂岩層當中發育一系列波長僅約 10 公分的小尺度褶皺。此露頭位於 B7 位置點。

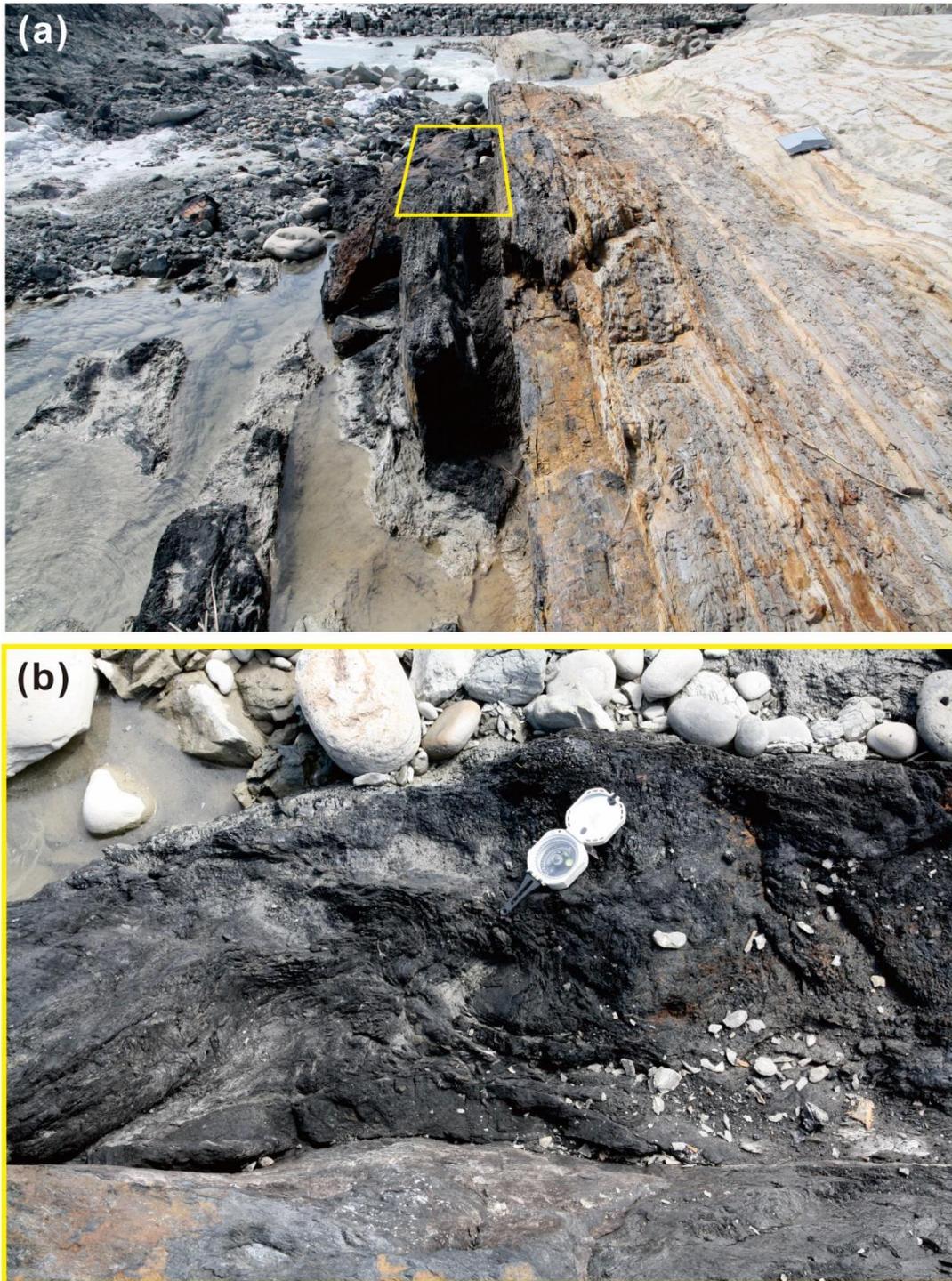


圖 39 F_1 斷層帶中變形之厚層煤層

(a) 厚層煤層露頭遠景 (b) 煤層中之褶曲紋理。此露頭位於武嶺橋河床之位置點 B2。

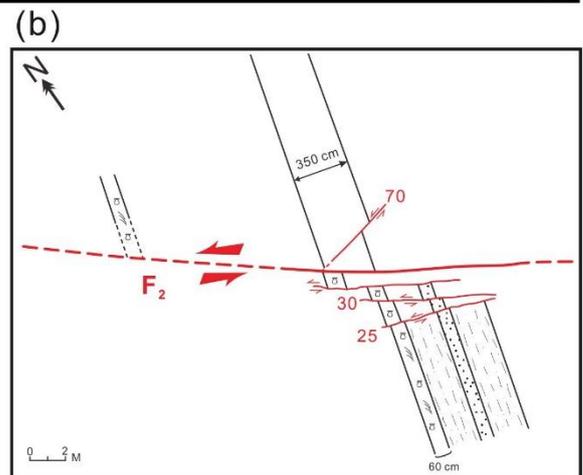
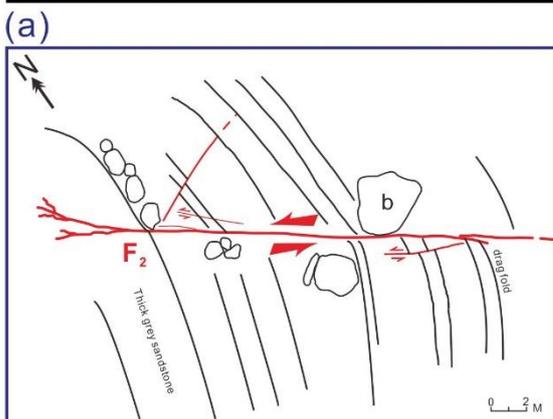
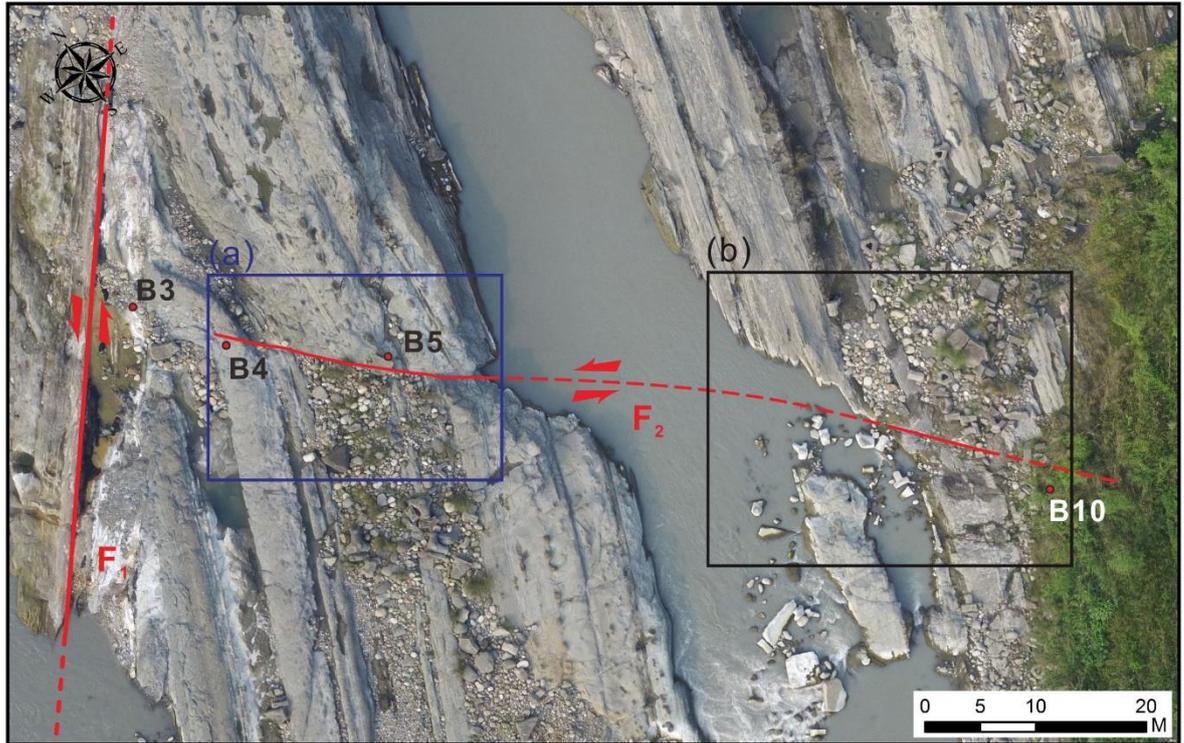


圖 例			
— 30	斷層及水平錯距(cm)		貝類化石
- - -	覆掩斷層		槽狀交錯層理
- - -	主要岩層		巨礫
	砂泥薄互層		
	砂岩		

圖 40 F₂ 斷層構造描繪圖

F₂ 斷層為一道左移斷層，從 B3 延伸至 B10。本圖之正北方逆時針旋轉 33 度。

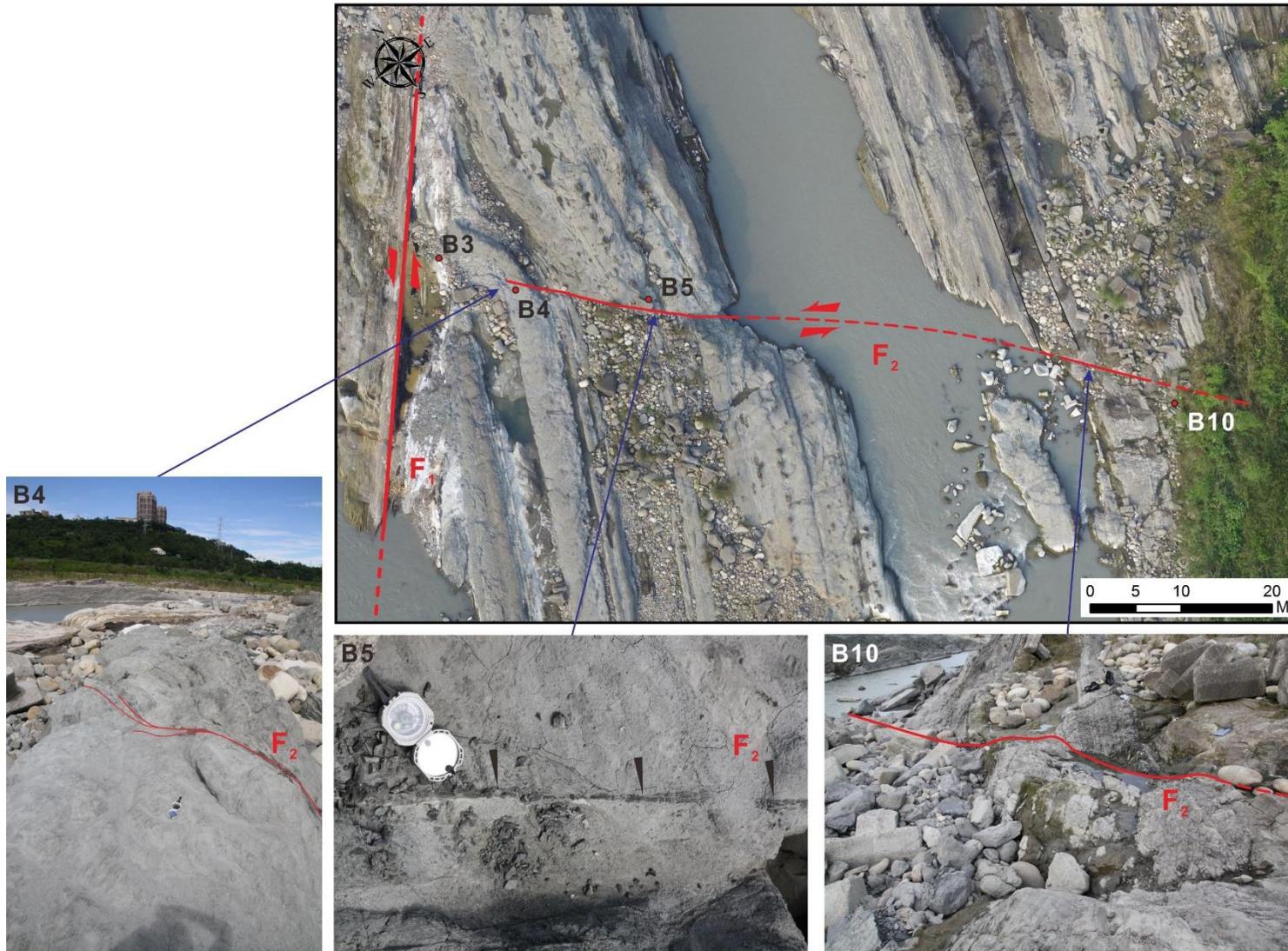


圖 41 武嶺橋 F_2 斷層野外露頭情形

桂竹林層下部岩層從武嶺橋向南延伸至大溪橋，岩層位態在 500 公尺內發生明顯偏轉。大溪橋為大溪橋停車場（左岸）與大溪中正公園（右岸）之間的行人步行橋，位於武嶺橋上游 400 公尺處。圖 42 為調查區 C 區大溪橋下河床之空拍影像。岩層位態由北而南從 $212^{\circ}/75^{\circ}$ 逐漸轉至 $160^{\circ}/59^{\circ}$ （圖 43）。

F_1 斷層在武嶺橋下方因河水覆蓋而無法追跡，亦未見厚層白色砂岩層與厚層煤層等指準層出現，推測可能於武嶺橋附近終止。在武嶺橋至大溪橋之間的厚層岩層當中，發育成組的左移斷層，錯動量僅約一公尺，斷層面位態一致地呈現走向 220° ，傾角約 60 至 75 度。在調查點 C2，以一道厚層砂岩做為指準層，可觀察到數道左移斷層露頭，排列於岩層中的大型塊狀結核明顯受到左移錯動（圖 44）。在位置點 C5 點的岩層中亦可見左移斷層，錯動量僅 15 公分，斷層面位態為 $200^{\circ}/51^{\circ}$ 。

大溪橋以南（上游）的部份，河道中央有一道水平錯距 5 至 8 公尺的左移斷層（以下稱為 F_3 ），斷層走向大約為 035° ，向南延伸進入左岸河岸後位置不明。 F_3 斷層露頭已完全浸於主河道當中，主要以兩側岩層相對錯移辨識。此斷層附近的岩層受到左移斷層作用影響而形成拖曳褶皺，經過風化侵蝕後較其他遠離斷層位置的岩層來得破碎（圖 42，調查點 C5 至 C6 之間）。統整上述現象，可以歸納武嶺橋至大溪橋附近的位態漸變的岩層（由位置點 C1 至 C5 點），皆受到走向約 040° （即 220° ）的左移斷層截切。若岩層位態的變化是因褶皺作用所致，由截切關係推論左移斷層應形成於褶皺作用之後。

在大漢溪左岸位置點 C7 點，出露一道極厚層白色細粒砂岩，此處岩層位態為 $225^{\circ}/60^{\circ}$ ，與調查點 C5 和 C6 的位態相差甚遠；此露頭位置接近推測的 F_3 斷層跡位置，岩層位態估計有受到斷層擾動影響。

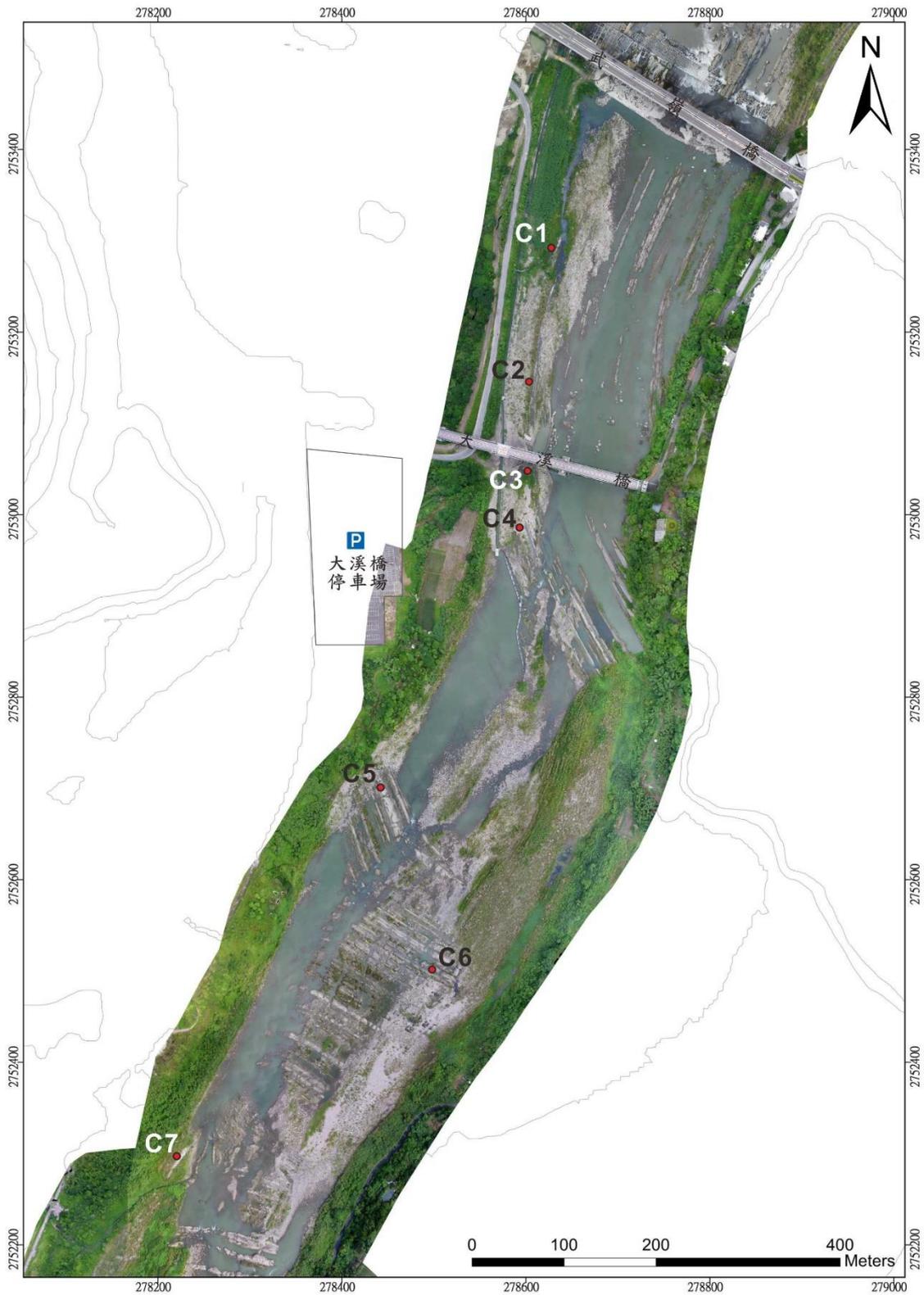


圖 42 調查區 C 區河床空拍影像

影像顯示岩層位態在 500 公尺之間逐漸變化。調查點位置從 C1 至 C7。

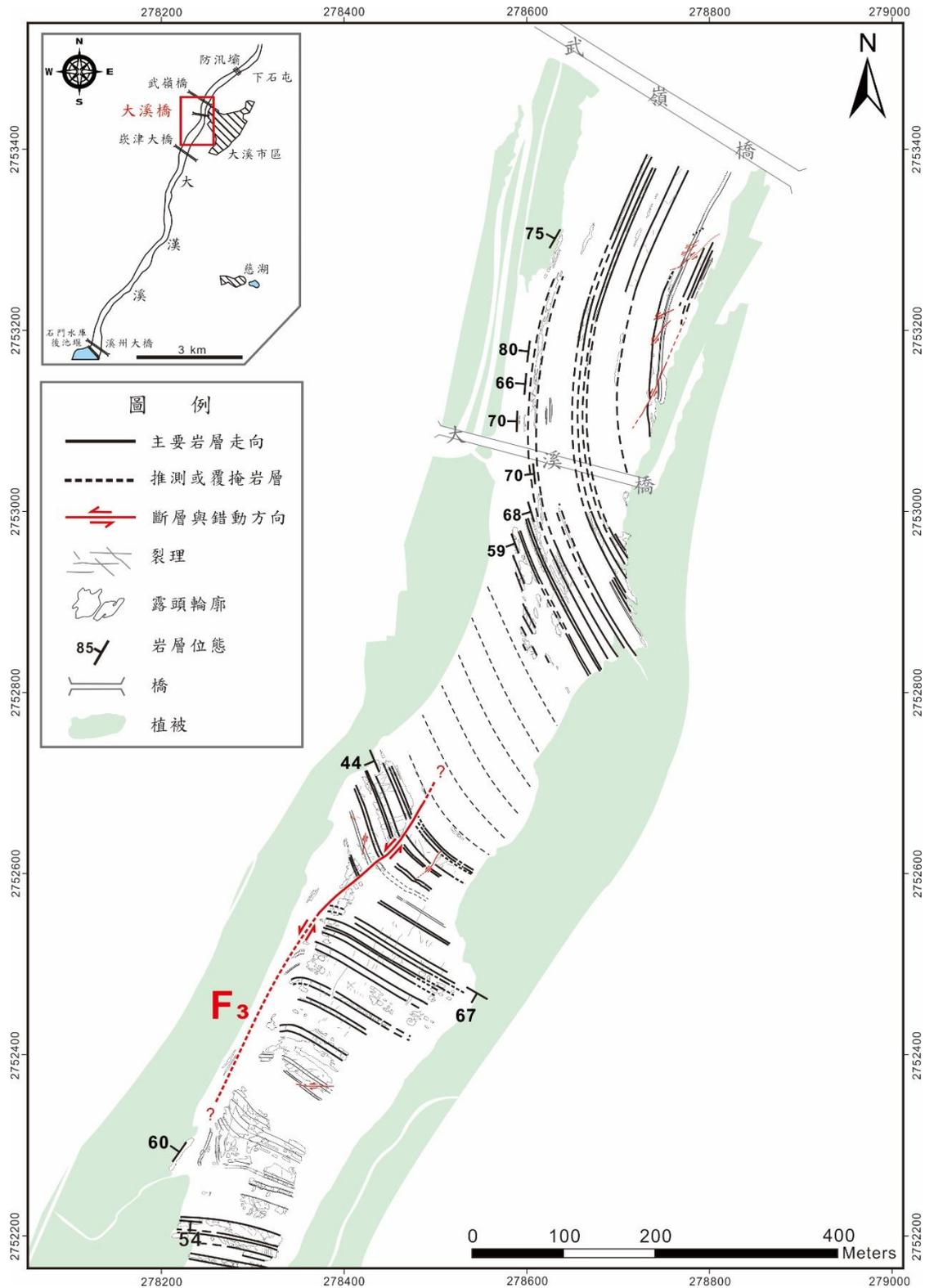


圖 43 調查區 C 區構造解釋

F₃ 斷層具有左移分量，切穿部份岩層，水平錯距約 5 至 8 米，延伸位置不明。



圖 44 截切厚層砂岩之左移斷層

此露頭位於調查點 C2，大溪橋橋墩旁左岸河床。

2. 桂竹林層上部

桂竹林層上部出露於崁津大橋至內柵之間的河床。崁津大橋位於大溪橋上游 1.2 公里處，是大溪地區重要的交通幹道（臺 4 線）。

圖 45 為調查區 D 區的河床空拍影像，河床植被普遍生長茂盛。崁津大橋正下方河床的調查點 D4 處，出露一道向斜的軸部，兩翼岩層在幾公尺的距離內急遽改變（圖 48），褶皺軸部形貌似尖頂褶皺（chevron fold）軸部形貌（圖 46 與圖 47）。向斜西翼的岩層位態約為 $100^{\circ}/35^{\circ}$ ，東翼位態約為 $207^{\circ}/70^{\circ}$ 。由兩翼岩層位態求得向斜軸位態約為 $24^{\circ}/225^{\circ}$ ，向西南方傾沒。此向斜西翼岩層往西延伸至大漢溪左岸（調查點 D2），層面位態逐漸由 $090^{\circ}/54^{\circ}$ 變化至 $072^{\circ}/60^{\circ}$ ，此位態變化之位置接近 F_3 斷層的延伸線上，可能同樣有受到斷層作用的影響。

在調查點 D5 與 D6，岩層位態大致接近南北走向、呈高角度向西傾斜。圖 49 為調查點 D6 的局部空拍影像與構造解釋。岩性為灰白色厚層細粒砂岩，偶夾薄層砂岩，含貝殼化石與煤塊。層面位態由南而北從 $171^{\circ}/69^{\circ}$ 逐漸轉為 $199^{\circ}/80^{\circ}$ 。岩層同時受到多道左移斷層截切，走向大約為水平錯動量約頂多達 1 公尺左右。在 D5 點，層面位態為 $181^{\circ}/61^{\circ}$ ，其中一道岩層受到一道走向約 035° 的左移斷層截切而錯動，水平錯動量為 50 公分。

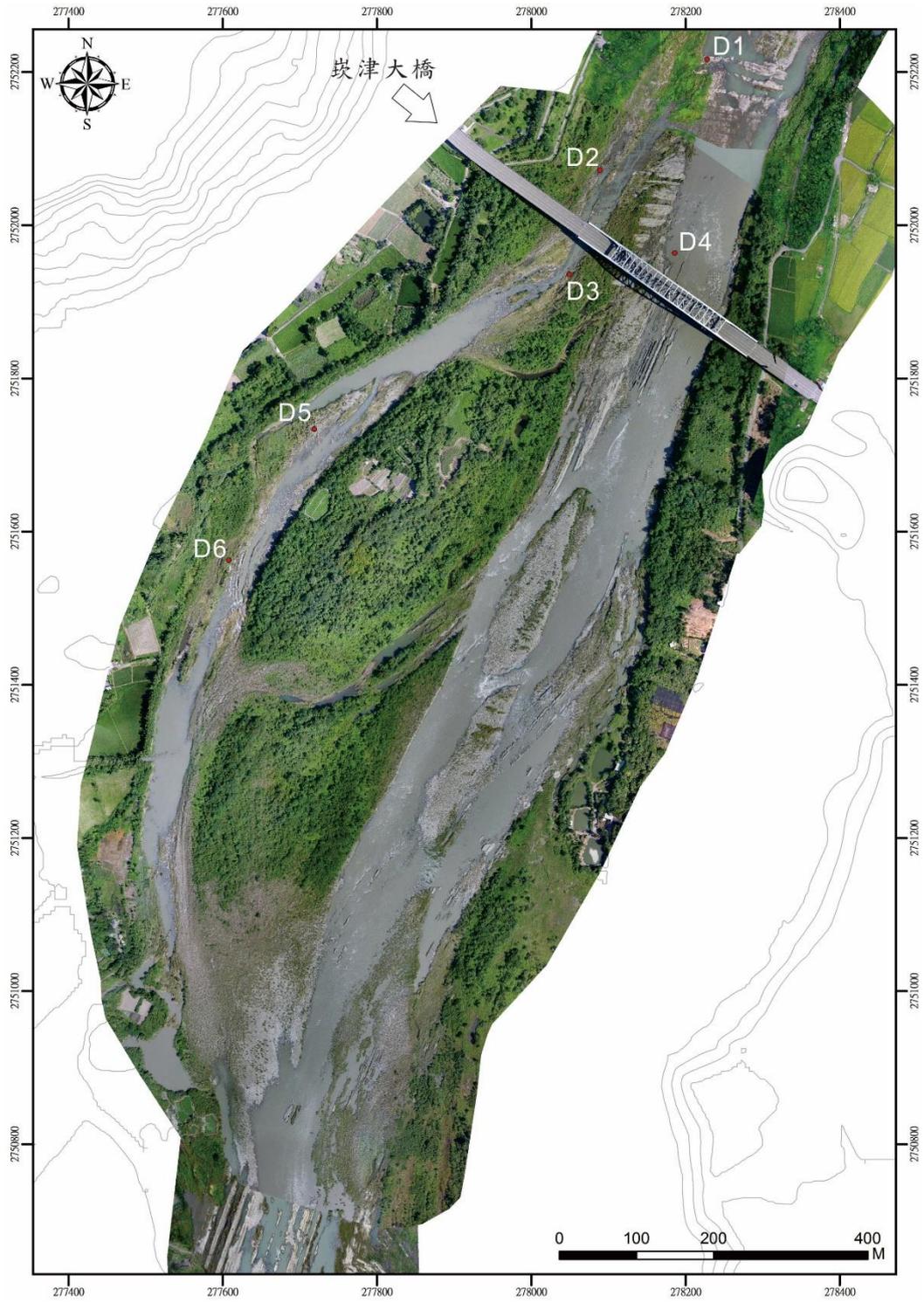


圖 45 調查區 D 區河床空拍影像

崁津大橋通過此區河段，橋下出露一道向斜構造。調查點為 D1 至 D6。

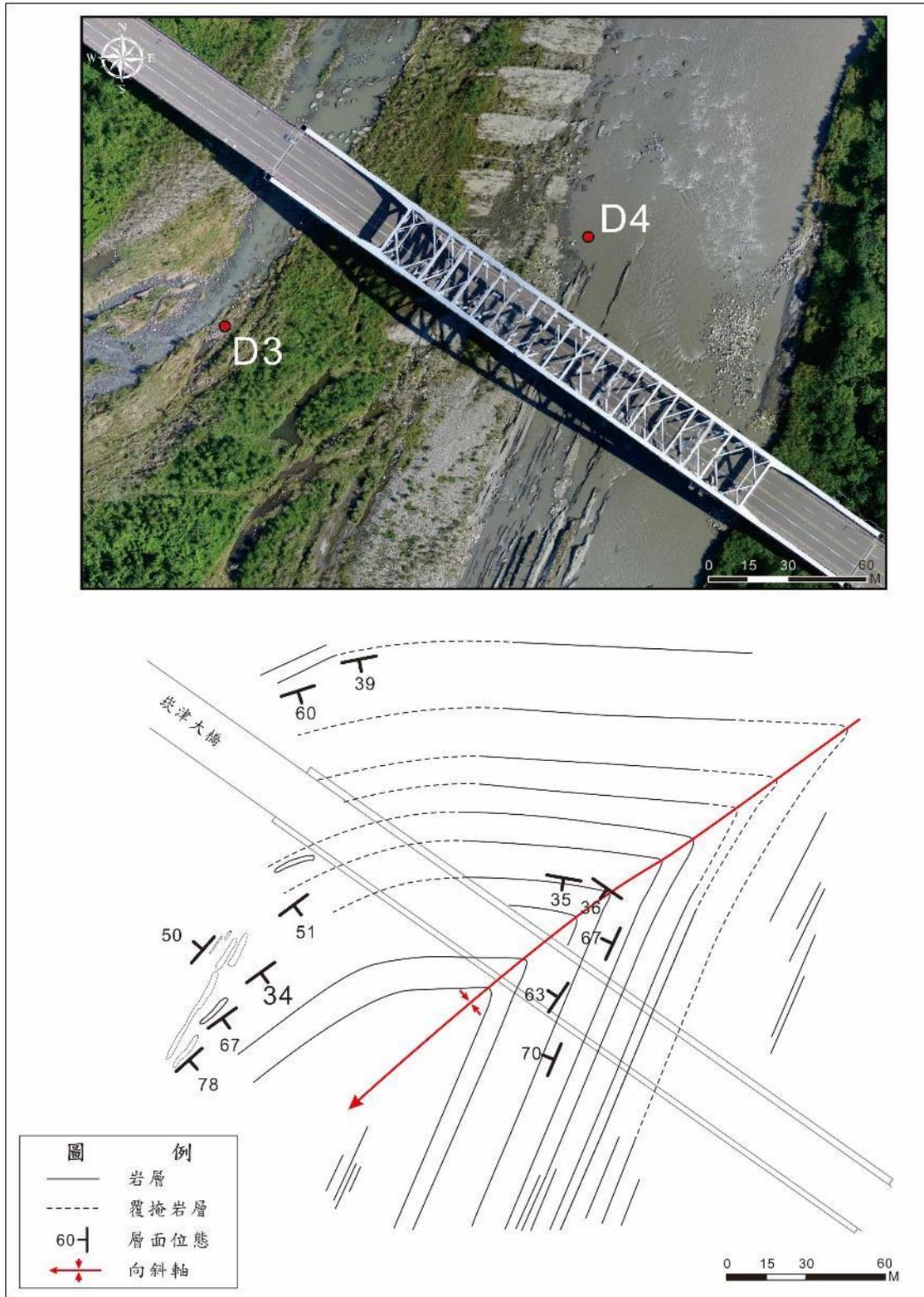


圖 46 崁津大橋下之向斜軸部露頭構造描繪與解釋

由空拍影像與層面位態資料，可判斷此向斜軸向西南傾沒。



圖 47 崁津大橋河床 Google Earth 衛星空拍影像

衛星影像顯示，岩層位態在崁津大橋下方位置急遽改變（黃色箭頭所示）。引用 Google Earth 於 2014 年 2 月 24 日之衛星影像。



圖 48 崁津大橋下向斜軸部露頭

紅色線段表示向斜軸延伸位置，黃色線段為岩層。此露頭位於調查點 D4。相片面向西南方拍攝。



圖 49 調查點 D6 處之構造現象

影像中可判釋出岩層走向有些微變化，並受到成組的左移斷層截切，水平錯距大約數十公分至 1 公尺。

桂竹林層上部的岩層（崁津大橋河床）可繼續追跡至更上游的位置。內柵距離崁津大橋上游 1.5 公里處，圖 50 為調查區 E 區內柵河床的空拍影像，岩層延續性良好而容易追跡。在調查點 E3 與 E4 之間，可見一背斜軸部露頭，岩層位態由西翼之 $205^{\circ}/71^{\circ}$ 轉至東翼之 $122^{\circ}/33^{\circ}$ （圖 51）。在背斜軸部的不同部位，具有不同的形貌。圖 52 為背斜軸部的構造描繪與解釋，背斜內弧部位發育小波長褶皺（調查點 E3 與 E4、圖 53），外弧部位則趨於平緩（調查點 E5 與 E6）。岩性以灰色細粒至粉砂岩夾砂泥岩互層為主。由兩翼岩層位態求得之褶皺軸位態為 $37^{\circ}/223^{\circ}$ ，向西南方傾沒。

在調查點 E7 處，有一道走向約 289° （相當於 109° ）的斷層（稱為 F₄）。斷層兩側的岩層具有相對右移現象，河床出露三道厚層白色以及兩道深色較薄岩層做為指準層。斷層水平錯距約為 30 公尺（圖 54）。由於 F₄ 斷層出露於河床中，已受到嚴重的風化侵蝕而形成落差甚大的凹陷地貌，無法得知斷層面傾角。

此區岩層中發育一組走向約 92° 至 120° 、呈高角度傾斜之節理，與 F₄ 斷層走向大致平行。尤其在 F₄ 斷層附近 200 公尺內，節理具有明顯的錯移量而成為小型右移斷層，其水平錯距達 5 公尺，E7 點附近的斷層面位態為 $288^{\circ}/69^{\circ}$ 以及 $113^{\circ}/79^{\circ}$ 。E7 點附近所測量到的節理面位態為 $108^{\circ}/74^{\circ}$ 。斷層與節理的位態顯示它們應屬於同一組裂理，推測可能與 F₄ 斷層有關。

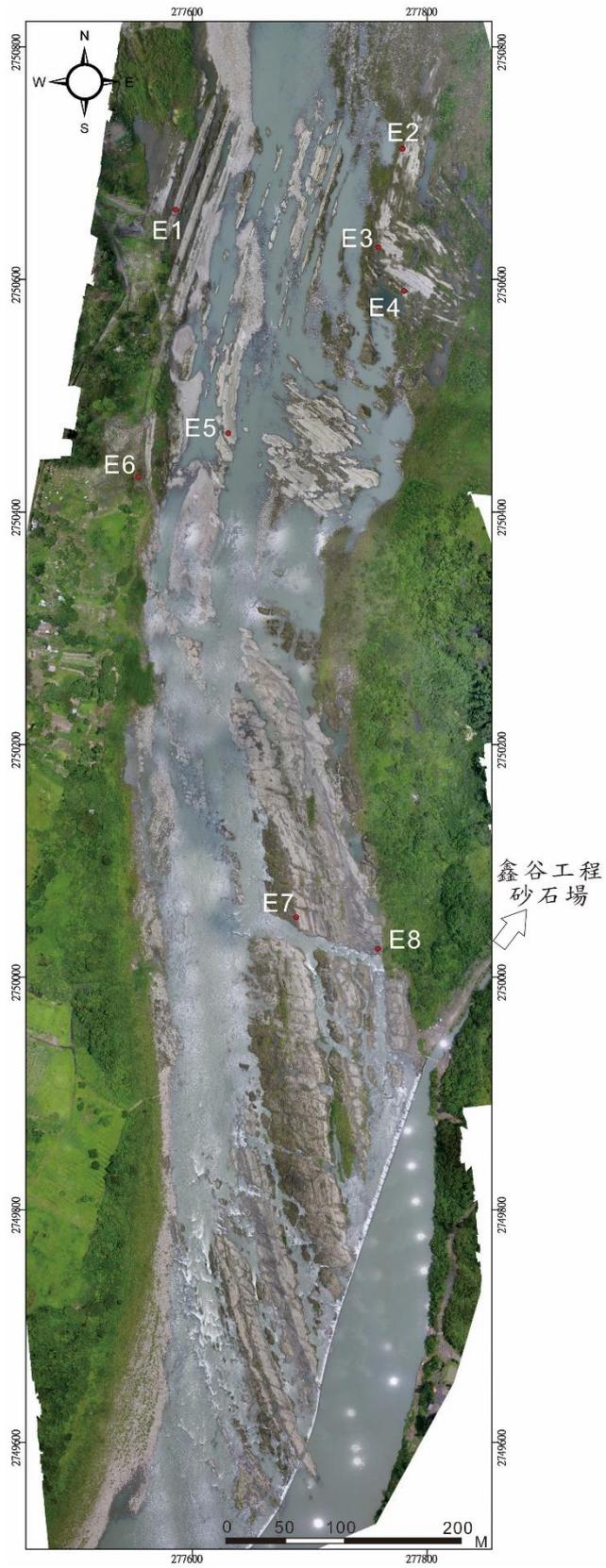


圖 50 調查區 E 區河床空拍影像

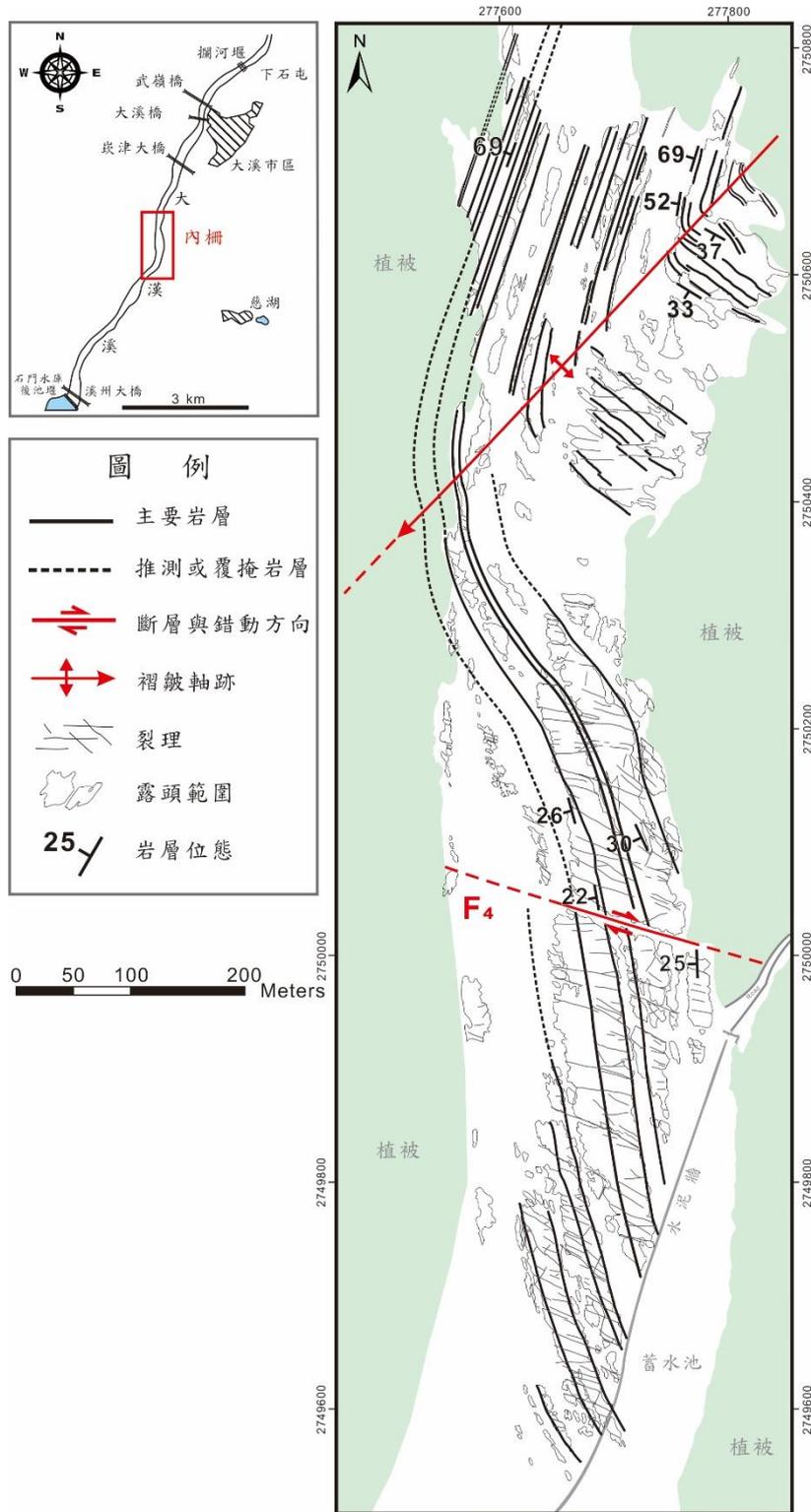


圖 51 調查區 E 區構造解釋

背斜軸向西南傾沒，西翼岩層傾角甚陡，東翼則較緩。F4 斷層具有明顯右移分量，切穿岩層形成凹陷地形。

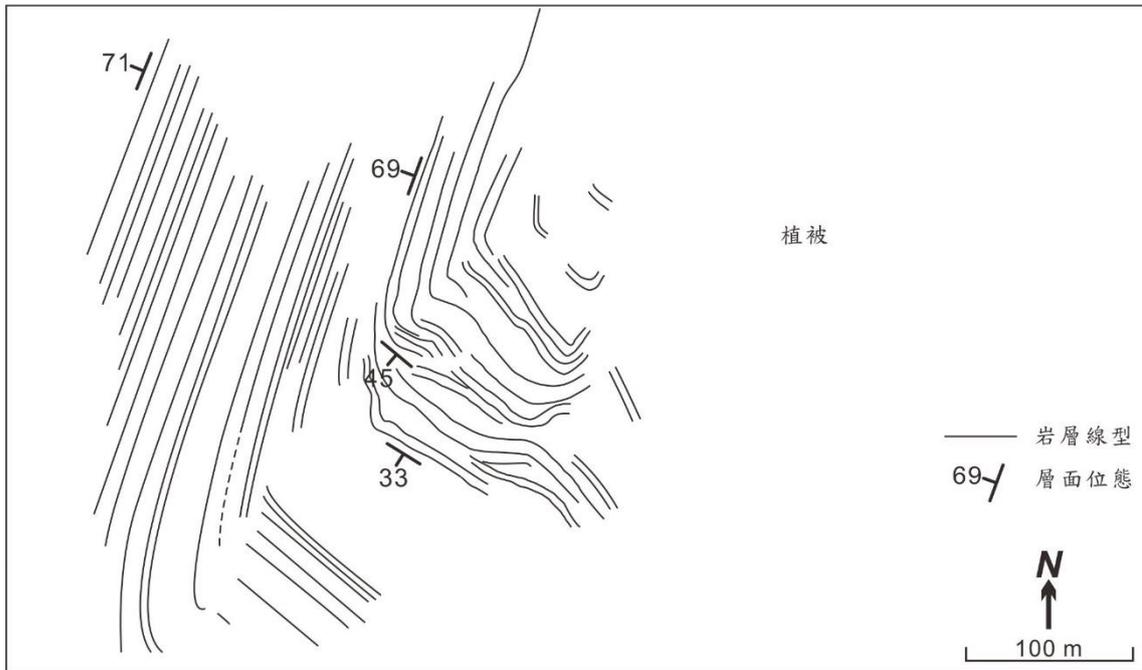


圖 52 內柵河床背斜軸部衛星影像與構造素描

背斜內弧與外弧的幾何形貌有所差異，內弧以多道密集小波長褶皺形式，外弧褶曲程度則較平緩。

(a)



圖 53 內柵河床背斜軸部位置岩層褶曲現象 (E3 點)



圖 54 內柵河床 F_4 斷層之 Google Earth 衛星影像



圖 55 F₄ 斷層附近之小型右移斷層

5-1-4 錦水頁岩及卓蘭層

桂竹林層與其上覆之錦水頁岩交界位於內柵以南約 1 公里的河床（參照圖 25）。從桂竹林層頂部進入到錦水頁岩底部，岩層中砂岩比例明顯下降，以致河床露頭趨於平坦一致；岩性轉變為以頁岩偶夾薄層細粒砂岩。圖 56 為錦水頁岩至卓蘭層河床露頭空拍影像，岩層位態無急遽的變化，大約為 $170^{\circ}/44^{\circ}$ 至 $158^{\circ}/26^{\circ}$ ，接近大溪背斜軸部位置。

內柵地區桂竹林層下部的節理組，同樣可在錦水頁岩及卓蘭層當中觀察到，但節理間距逐漸增加且延續性較差。

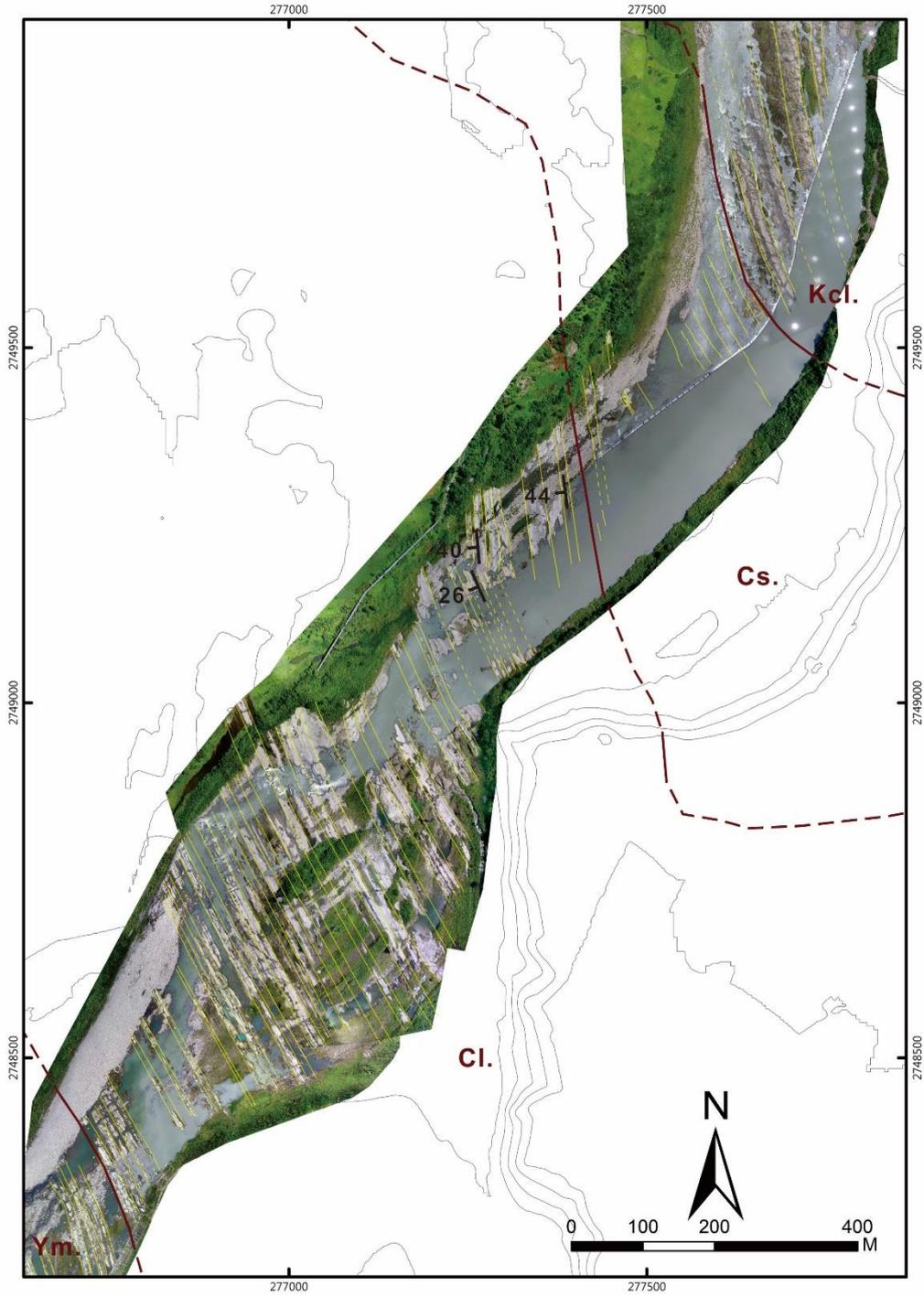


圖 56 錦水頁岩與卓蘭層河床空拍影像

從空拍影像可見，岩層位態無急遽改變。黃色線段為岩層線型，咖啡色粗線段為地層交界線。

5-1-5 楊梅層

楊梅層與卓蘭層的交界大約位於石門水庫後池堰下游約 2.5 公里處，大漢溪左岸設有三坑生態自然公園。圖 57 為溪洲地區之河床露頭空拍影像，包括三塊調查子區域 F-I、F-II 與 F-III，地層為楊梅層照門段（楊梅層下部）。

子區域 F-I 河床部份，岩層位態大致維持走向 157° 至 166° ，傾角約 44° 至 60° 度傾向西南方。一道呈現 S 形的不對稱褶皺（圖 58 與圖 59），由一向斜與一背斜所組成，兩者共同的短翼岩層位態約為 $026^{\circ}/42^{\circ}$ 。褶皺岩層中有兩道明顯的厚層白色細粒至粉砂岩層夾於厚層深色岩層之中。由兩翼岩層位態得到褶皺軸位態為 $37^{\circ}/162^{\circ}$ ，向南南東傾沒。在向斜的軸部（圖 58，調查點 F4），岩層位態由高傾角的 60 度逐漸轉為低傾角的 30 度。向斜軸部的砂岩層外弧發育許多張裂節理。在背斜軸部附近（圖 60 之 c，調查點 F6）則發育多道逆斷層發育。

在子區域 F-II 與 F-III，岩層中發育多道成組的左移斷層，走向多集中在 010° 至 020° 之間，其中一道長度約 300 公尺、水平錯距達 40 公尺者（稱為 F₅）規模最大，斷層跡受侵蝕過後成為一道凹陷的水道（圖 63 與圖 65）。F₅ 斷層跡兩側的岩層皆具有變形的現象，推測應該是斷層引起的拖曳褶皺（F14 點）。部份褶皺岩層（圖 58 與圖 59 圖 61，位於 F7 與 F8 點之間）受到此左移斷層所截切，形成多段左階雁形排列的斷塊。依此截切關係判斷，左移斷層作用發生的時間應晚於褶皺。

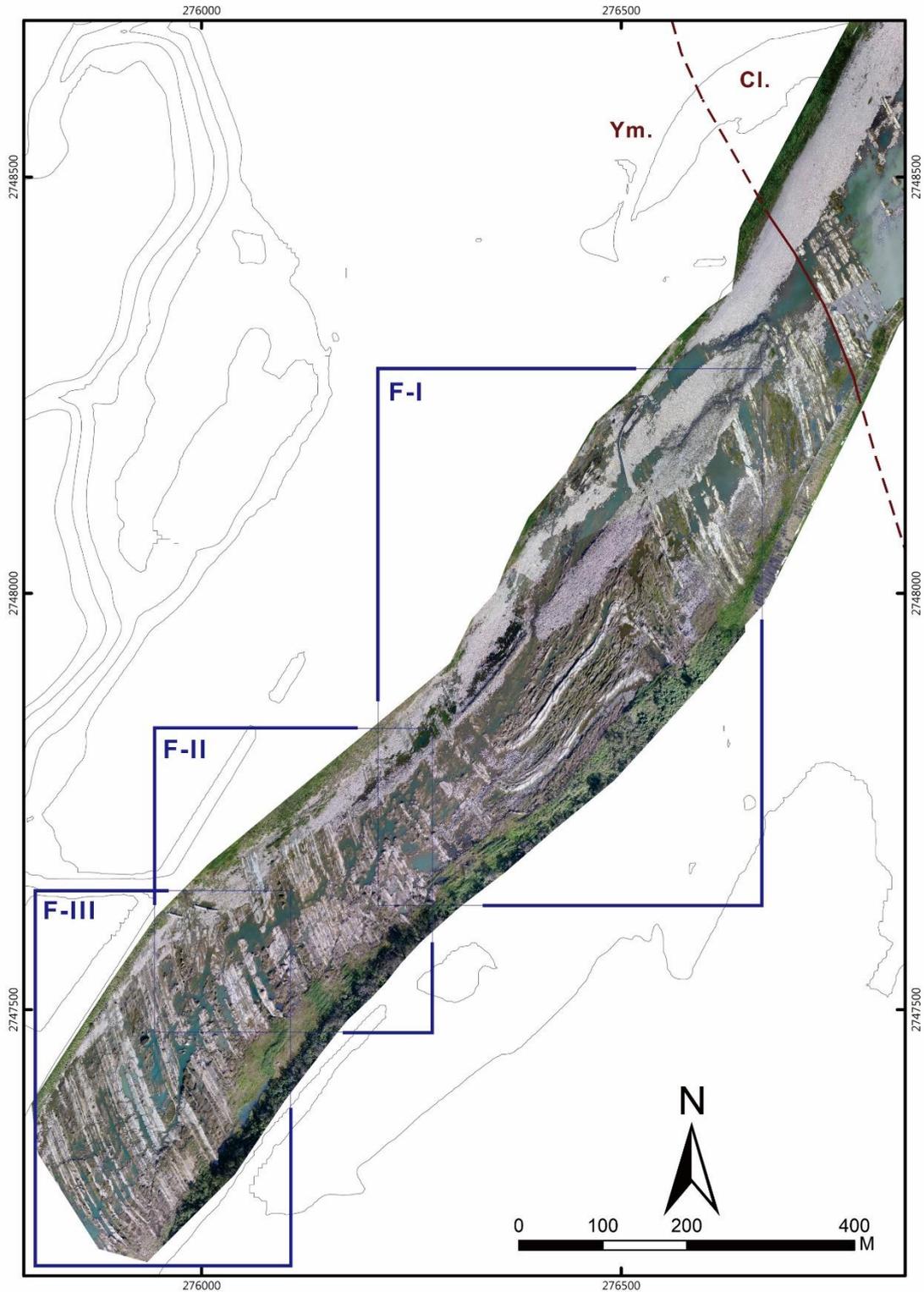


圖 57 調查區 F 區河床空拍影像

本調查區包含三塊調查子區域 F-I、F-II 與 F-III。咖啡色線段為卓蘭層與楊梅層之交界位置。

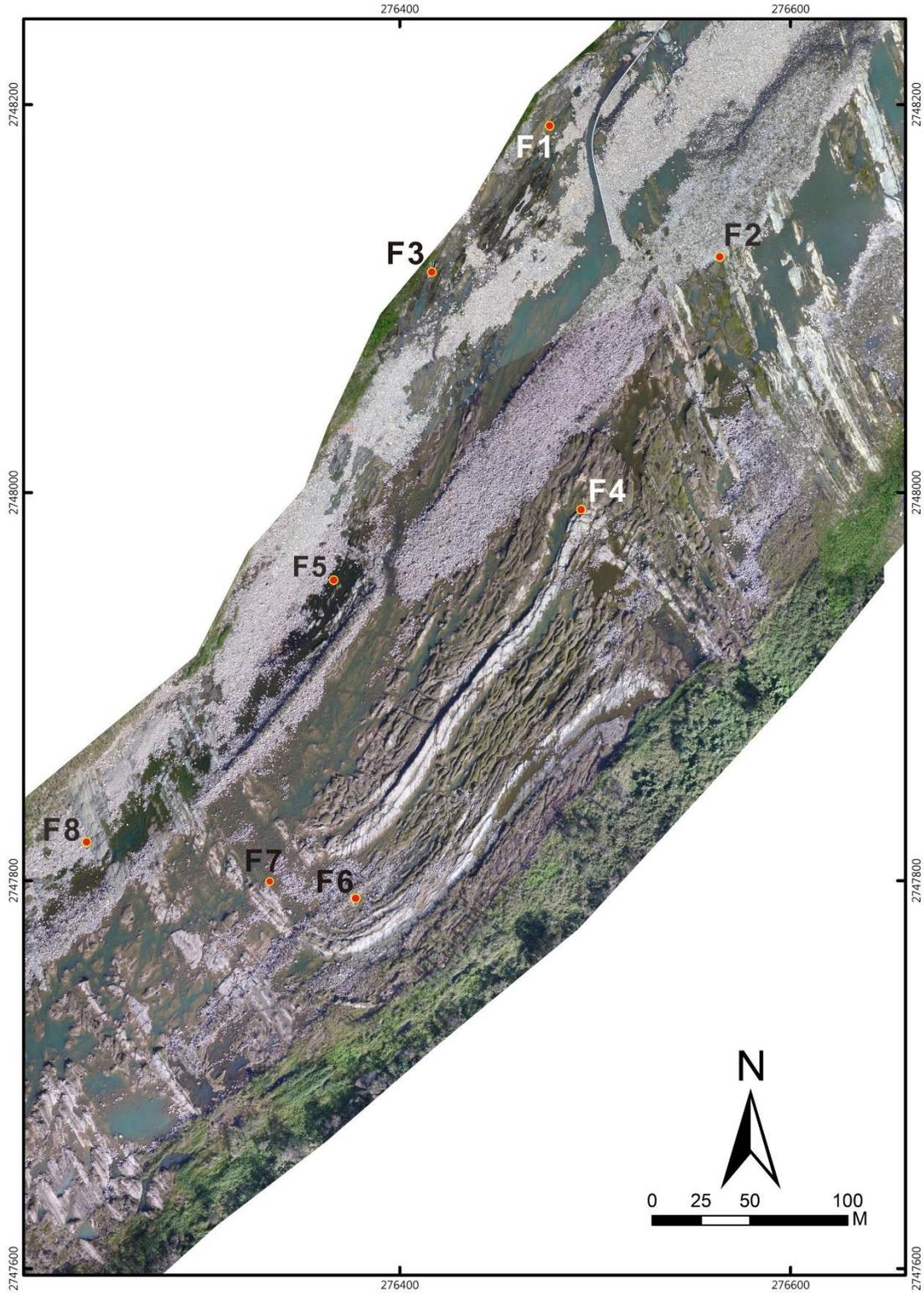


圖 58 子調查區 F-I 河床空拍影像

此區之調查點包含 F1 至 F8。本圖之構造解釋參照圖 59。

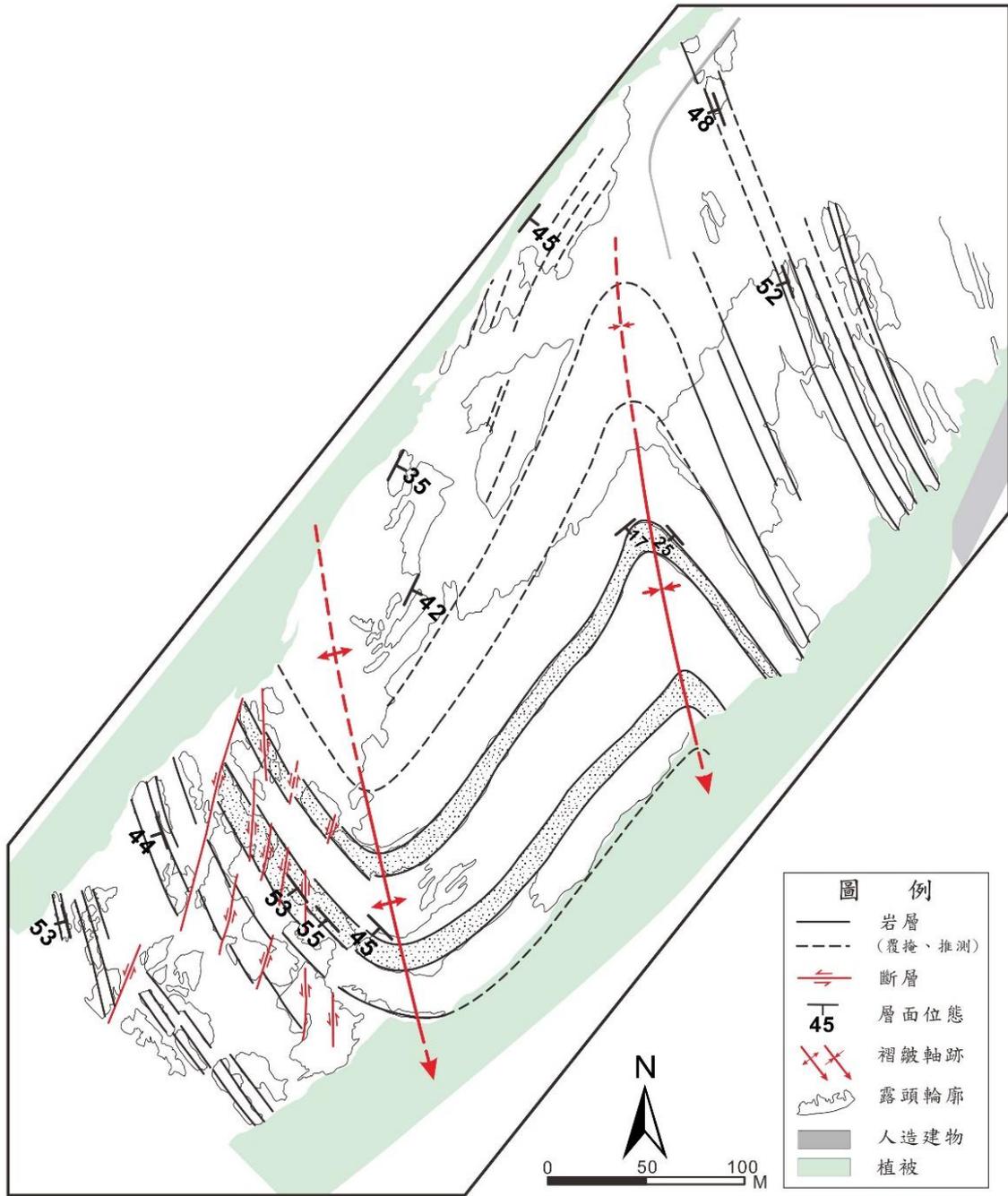


圖 59 子調查區 F-I 之構造解釋

本圖為圖 58 之構造解釋圖。河床出露向南傾沒之不對稱褶皺，呈現 S 字形。該褶皺的西南側岩層受成組左移斷層截切。

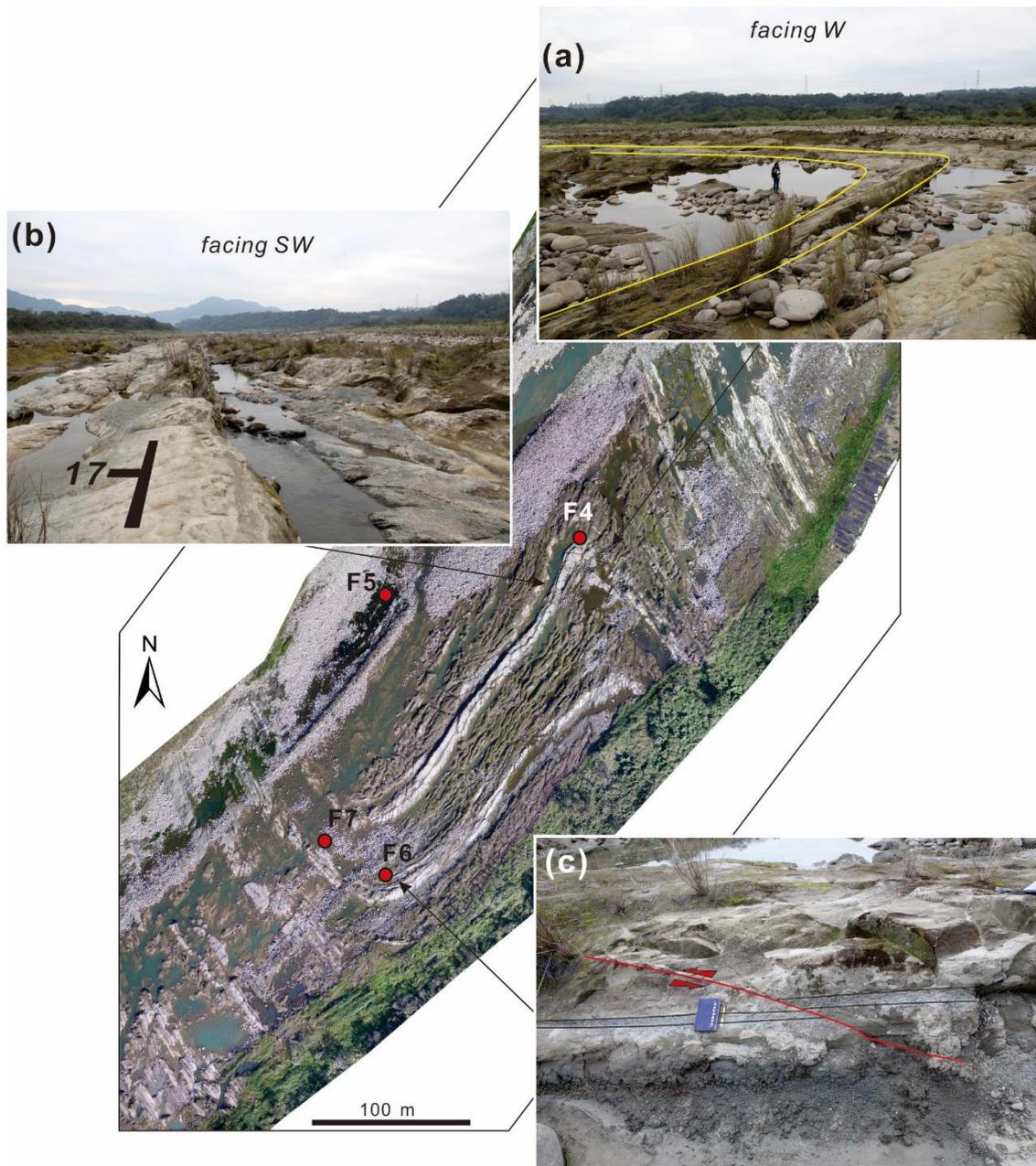


圖 60 子調查區 F-I 各調查點野外露頭相片

(a) 向斜軸部 (b) 向斜西翼岩層，向東南傾斜 (c) 背斜軸部之小逆斷層

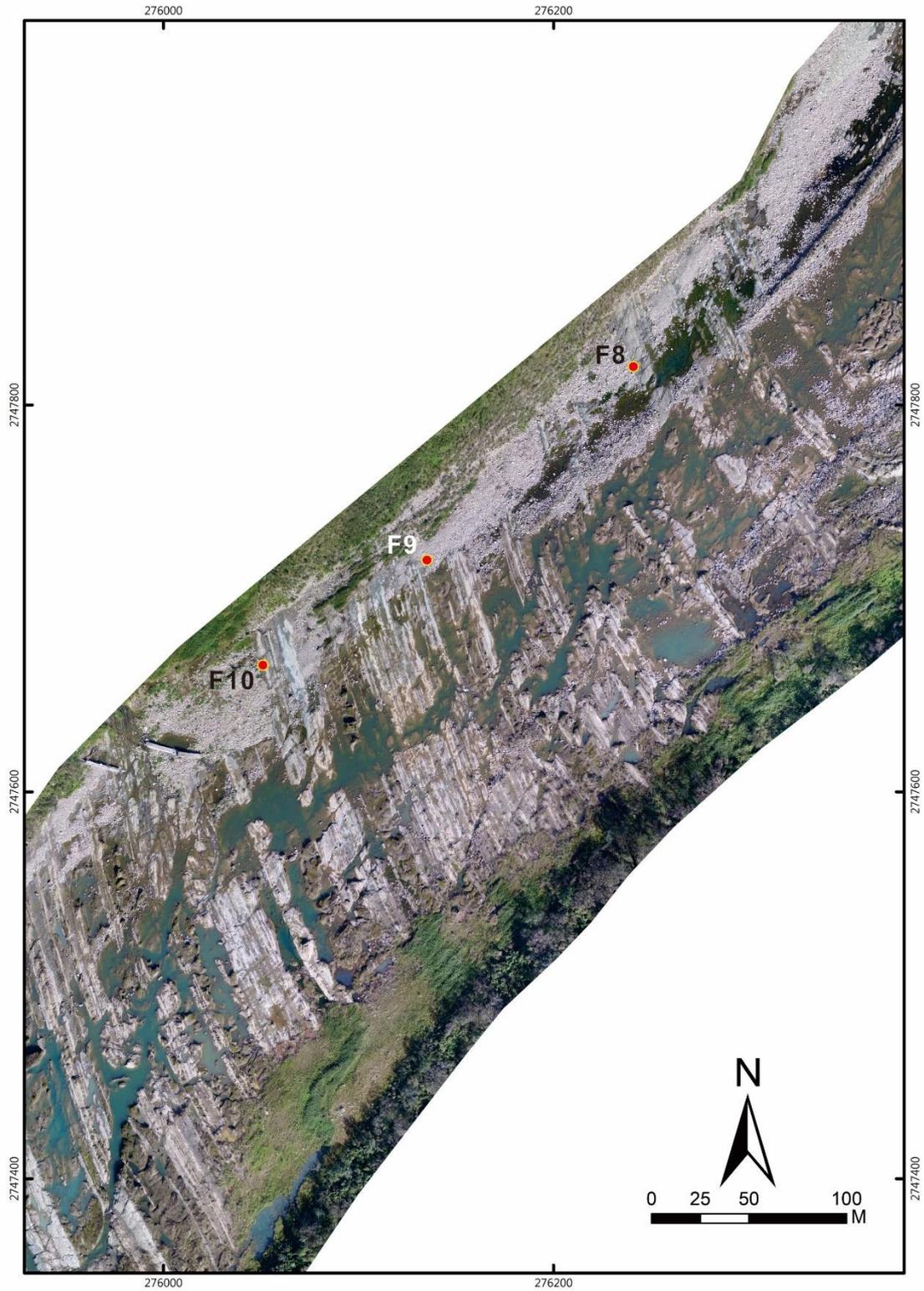


圖 61 子調查區 F-II 河床空拍影像
圖中的調查點位置包含 F8 至 F10。

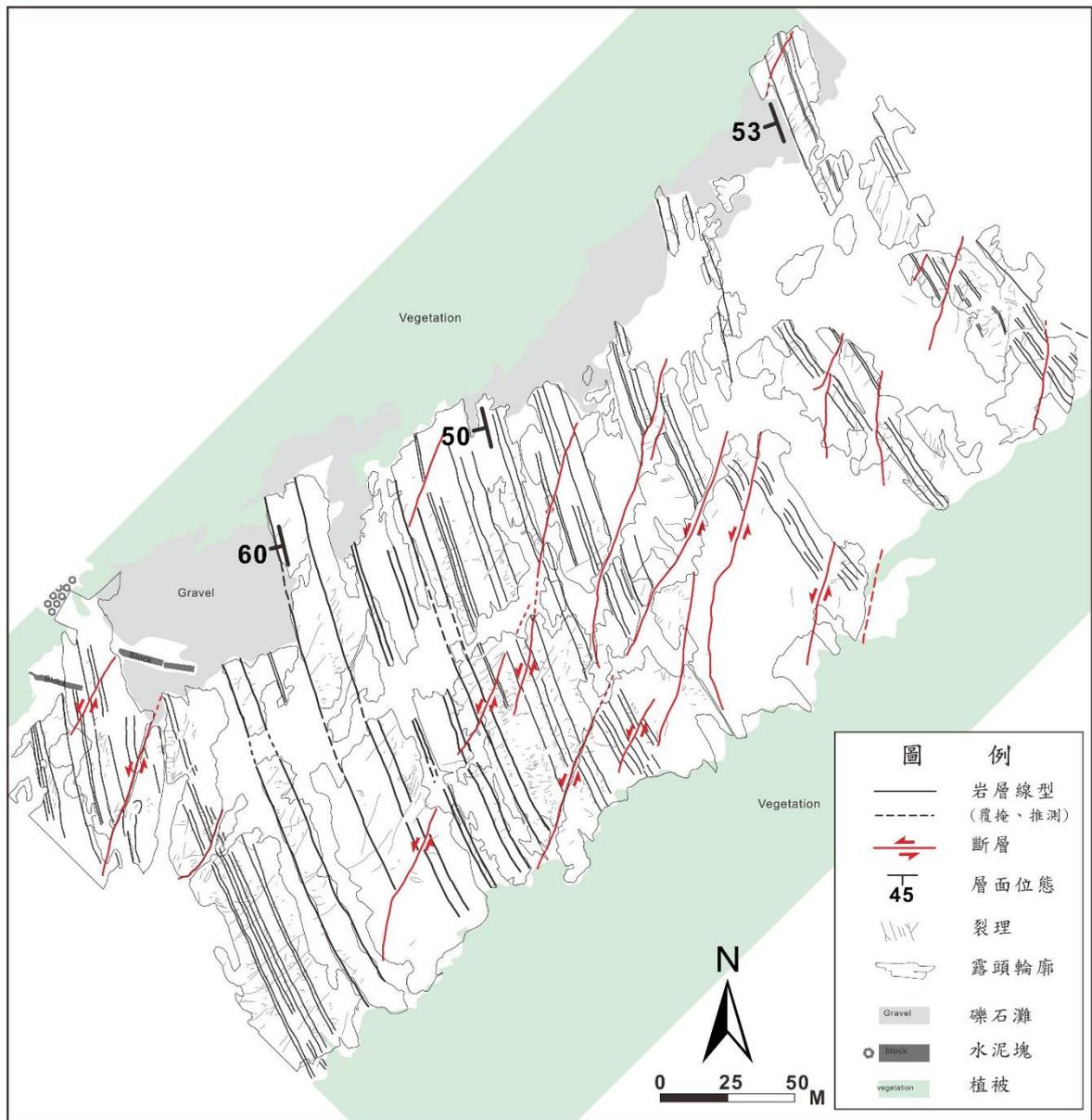


圖 62 子調查區 F-II 河床構造解釋

本圖為圖 61 空拍影像之構造解釋。彼此平行的岩層之中發育成組左移斷層。

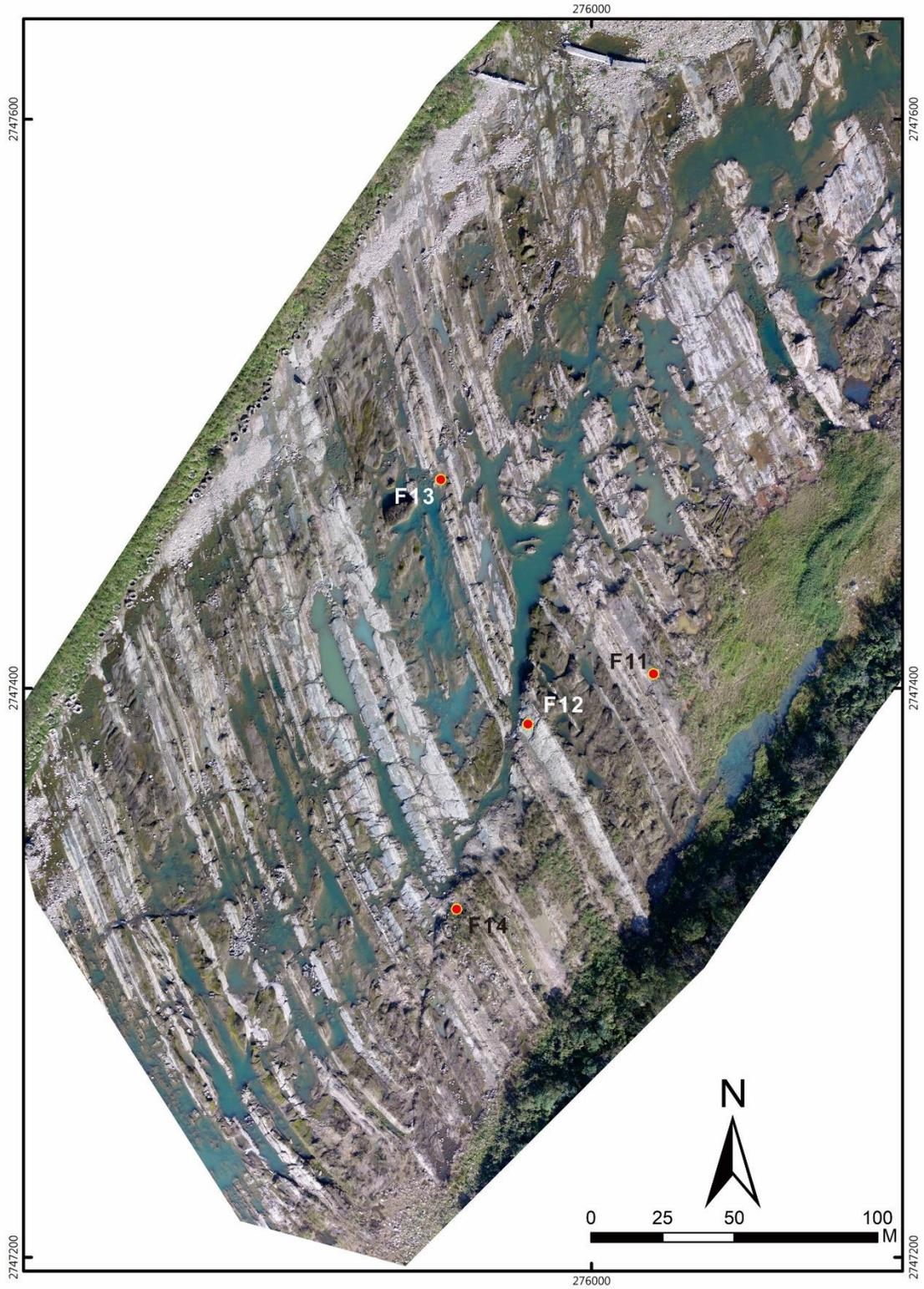


圖 63 子調查區 F-III 河床空拍影像

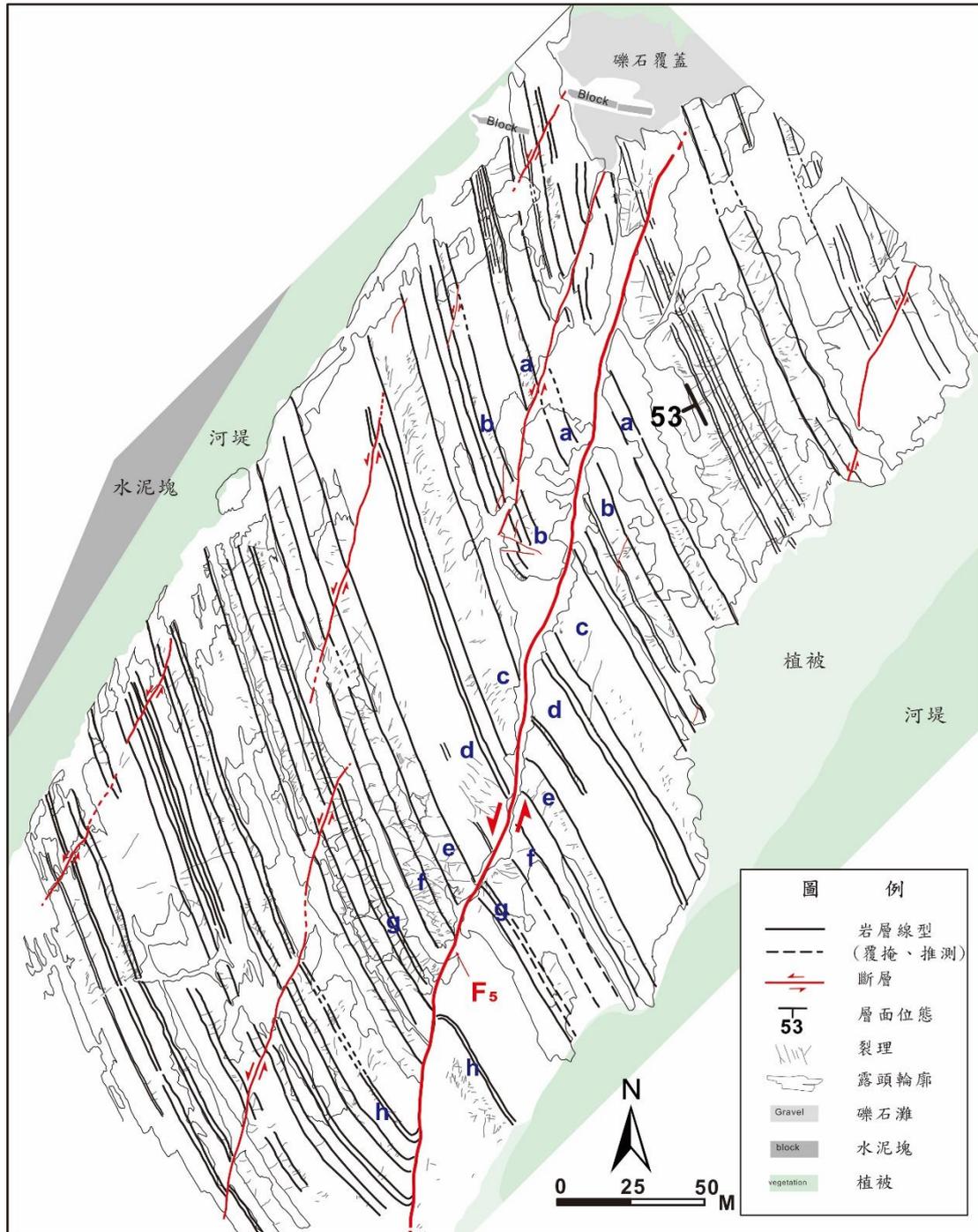


圖 64 子調查區 F-III 構造解釋

本圖為圖 65 空拍影像之構造解釋。圖中藍色小寫英文字母 a 到 h 為指準層代號，用於比對 F₅ 斷層兩側岩層。

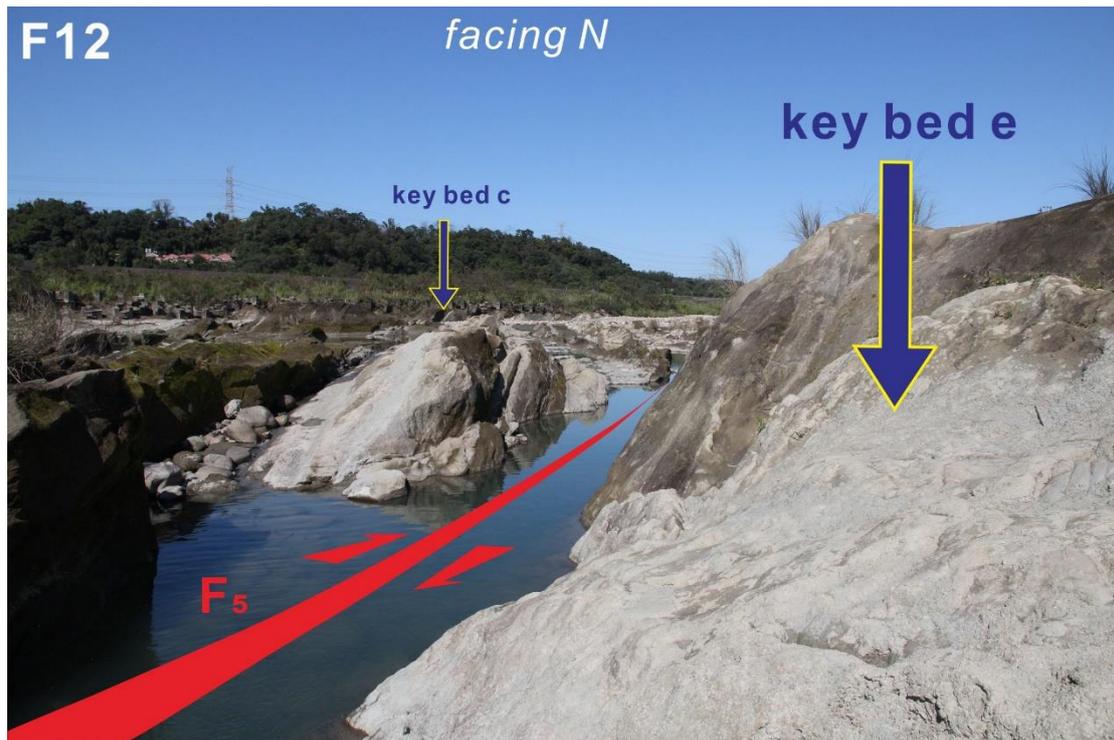


圖 65 F₅ 斷層兩側之厚層白色砂岩層

相片中較近的白色岩層為指準層 e，河道對岸為指準層 c（指準層代號參照圖 64），此河道為 F₅ 斷層位置。此相片攝於調查點 F12 位置，面向北方拍攝。

5-2 褶皺投影圓分析

在大漢溪河床露頭當中，有完整出露軸部與兩翼的中視尺度褶皺構造可列舉為：桂竹林層下部的一道向斜與一道背斜，以及楊梅層照鏡段的不對稱褶皺。本研究欲建立褶皺構造之幾何形貌與方向性，以探討中視尺度褶皺與大溪背斜主要褶皺是否為同一期褶皺作用下的產物。表 1 為針對各個褶皺構造的投影圓分析結果整理。

桂竹林層下部的向斜（位於崁津大橋下方河床，見圖 46）為一個向西南方傾沒的褶皺。野外所蒐集的兩翼岩層位態資料顯示，褶皺軸位態為 $24^{\circ}/225^{\circ}$ （圖 66）。此向斜的兩翼傾斜程度不同，可得知向斜的軸面是傾斜的。由地表褶皺軸跡的方位與褶皺軸位態，可求得褶皺軸面的位態；空拍影像判釋決定向斜軸部位置，將軸部連線形成褶皺軸跡，方位約為 056° 。褶皺軸面位態為 $056^{\circ}/74^{\circ}$ ，向東南方高角度傾斜。

桂竹林層下部的背斜（位於內柵河床，見圖 51 和圖 52）亦西南方傾沒，褶皺軸位態為 $37^{\circ}/223^{\circ}$ 。由空拍影像判釋出的褶皺軸跡方位大致為 039° ，求得褶皺軸面位態為 $84^{\circ}/219^{\circ}$ （圖 67）。

楊梅層中的不對稱褶皺（位於溪洲河床，見圖 58 和圖 59）之褶皺軸位態為 $37^{\circ}/162^{\circ}$ 。將兩道褶皺軸跡之方位定為 166° ，求得褶皺軸面的位態為 $346^{\circ}/85^{\circ}$ ，向東方高角度傾斜（圖 68）。

將整個大溪地區的層面位態資料繪製於投影圓上，可求得整個大溪背斜大致的褶皺軸位態為 $29^{\circ}/209^{\circ}$ 。此結果顯示大溪背斜是大致是向南南西方傾沒將近 30° 的背斜構造。

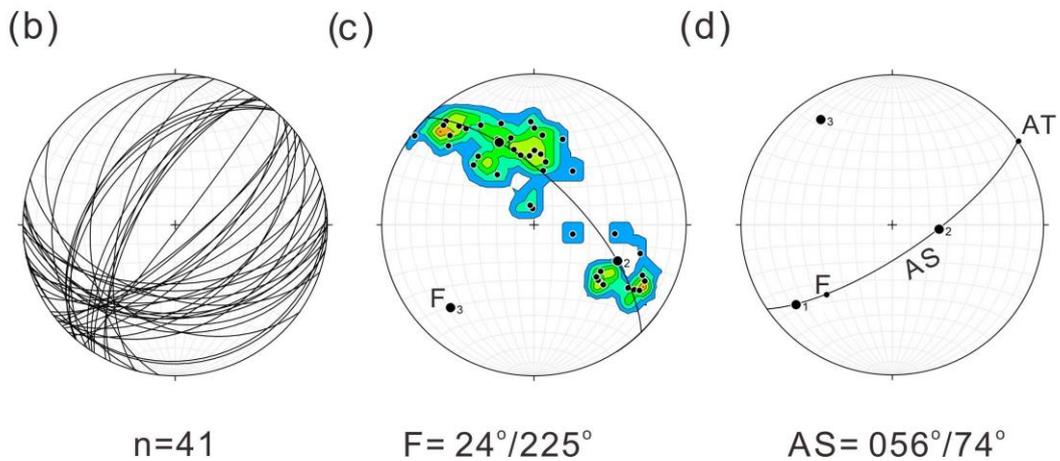
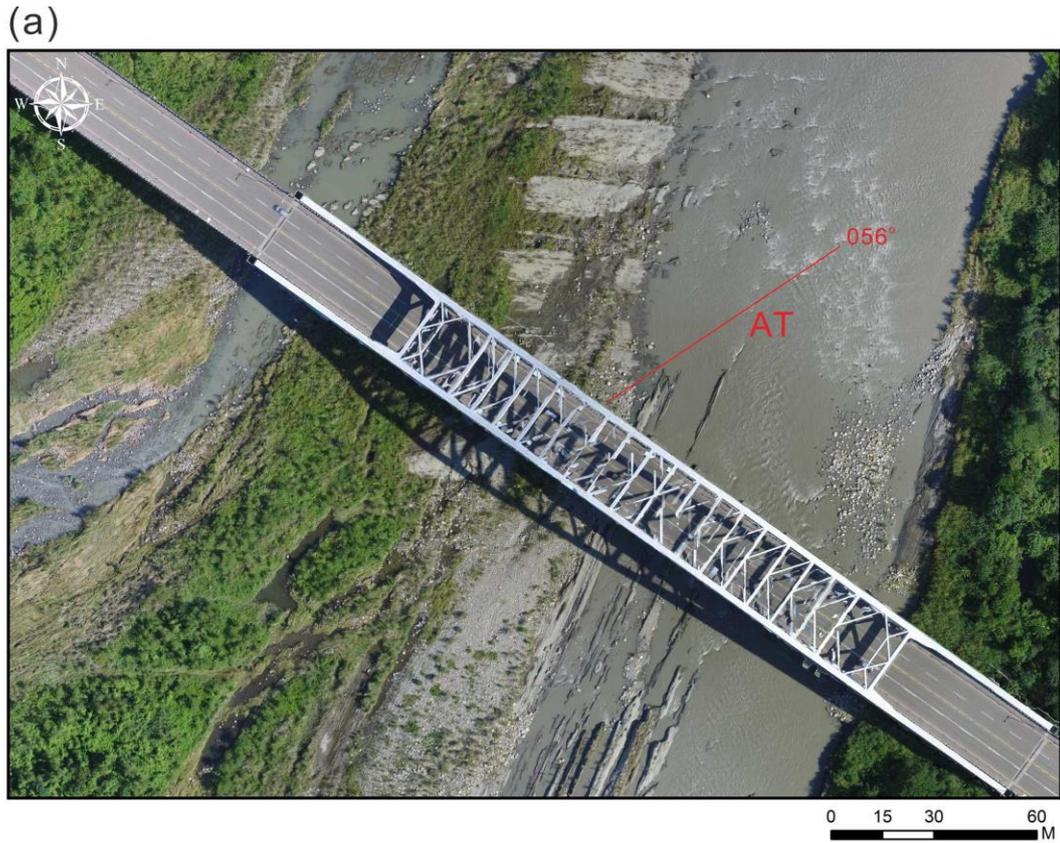
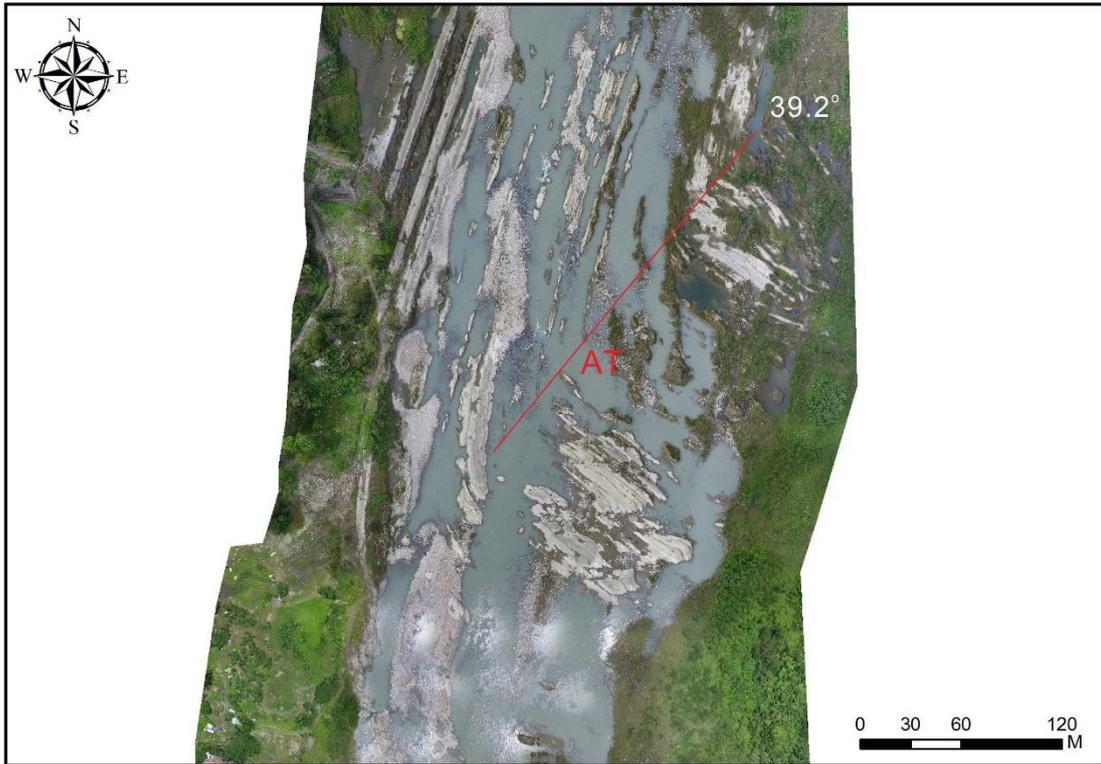


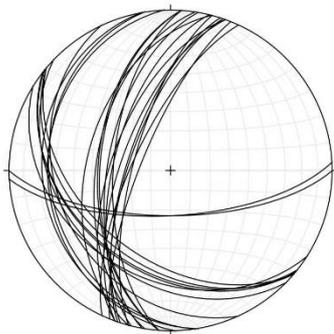
圖 66 桂竹林層下部向斜構造投影圓分析結果

(a) 崁津大橋河床之向斜軸部露頭與褶皺軸跡方位 (b) 向斜之 β 圖，41 筆層面資料 (c) π 圖與等值線 (d) 褶皺軸面位態。圖中的 n 為層面位態資料樣本數， F 為褶皺軸， AT 為褶皺軸跡， AS 為褶皺軸面。

(a)

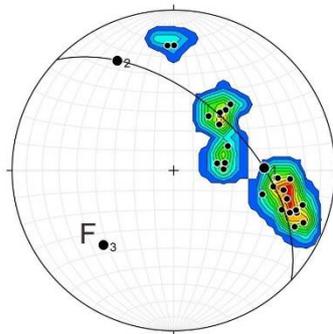


(b)



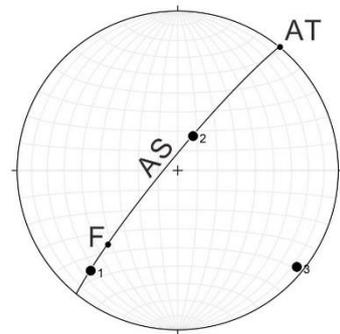
$n=26$

(c)



$F=37^{\circ}/223^{\circ}$

(d)

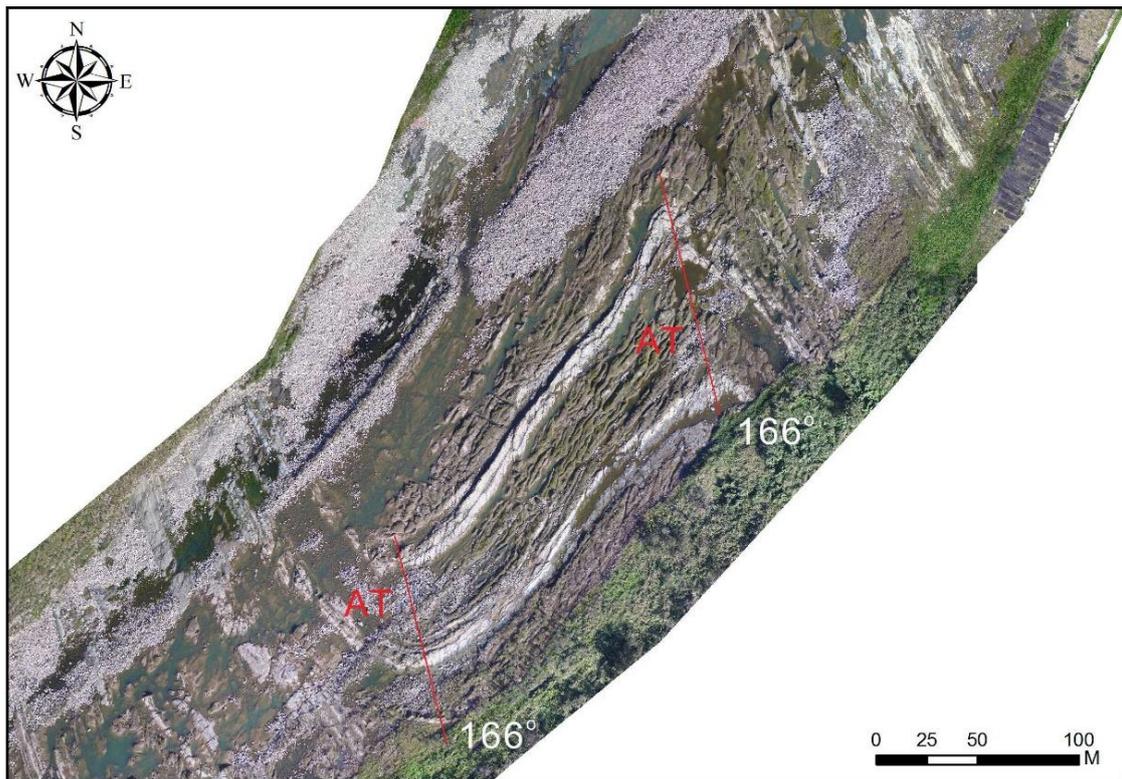


$AS=219^{\circ}/84^{\circ}$

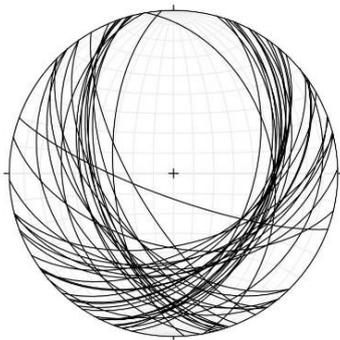
圖 67 桂竹林層下部背斜構造投影圓分析結果

(a) 內柵河床之背斜露頭與褶皺軸跡方位 (b) 背斜之 β 圖，26筆層面資料 (c) π 圖與等值線 (d) 褶皺軸面位態。

(a)

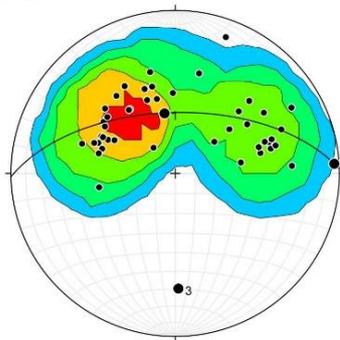


(b)



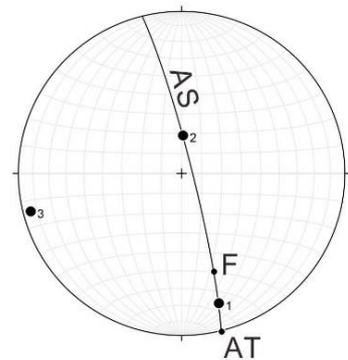
n=45

(c)



F = 37°/162°

(d)



AS = 346°/85°

圖 68 楊梅層底部不對稱褶皺構造投影圖分析結果

(a) 溪洲河床之褶皺露頭與褶皺軸跡方位 (b) S 型褶皺之 β 圖，45 筆層面資料 (c) π 圖與等值線 (d) 褶皺軸面位態。

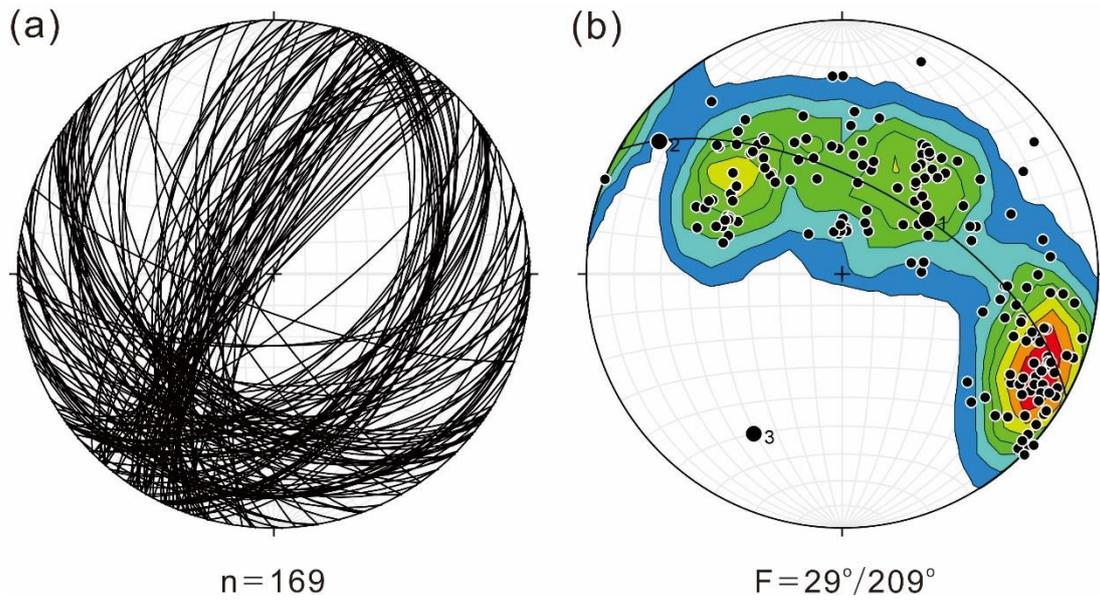


圖 69 大溪背斜褶皺軸之投影圓分析

(a) 大溪背斜層面資料之 β 圖，共 169 筆層面資料 (b) π 圖與等值

表 1 大漢溪河床之褶皺構造特徵比較

編號	出露地點	構造形式	褶皺軸位態 (plunge/trend)	褶皺軸面位態 (strike/dip)
1	大溪地區	大溪背斜	$29^{\circ}/209^{\circ}$	-
2	崁津大橋	向斜	$24^{\circ}/225^{\circ}$	$056^{\circ}/74^{\circ}$
3	內柵	背斜	$37^{\circ}/223^{\circ}$	$219^{\circ}/84^{\circ}$
4	溪洲	不對稱褶皺	$37^{\circ}/162^{\circ}$	$346^{\circ}/85^{\circ}$

5-3 節理與變形條帶構造現象之統整

5-3-1 節理分佈情形

歸納整段河床中的節理分佈狀況，內柵附近的桂竹林層上部至錦水頁岩河床具有局部成組密集的節理現象。本研究選定桂竹林層上部至錦水頁岩露頭進行節理調查。從節理位態在投影圓上的分佈（圖 70），大部份節理的走向集中在約 090° 至 120° 之間，呈高角度傾斜。進入到卓蘭層下部岩段，節理密度與延續性皆明顯下降。

5-3-2 變形條帶分佈情形

大漢溪沿線河床露頭中的變形條帶構造，可在南莊層、桂竹林層、卓蘭層以及楊梅層中的極細粒砂岩至粉砂岩觀察得到。同一地點通常能夠觀察到至少兩組方向以上，彼此互相截切，形成複雜網格狀分佈。圖 71 為本研究所觀察到之變形條帶分佈位置以及方向性分佈情形。整體而言，分佈在不同位置的變形條帶各自之方向性，各地並不一致。

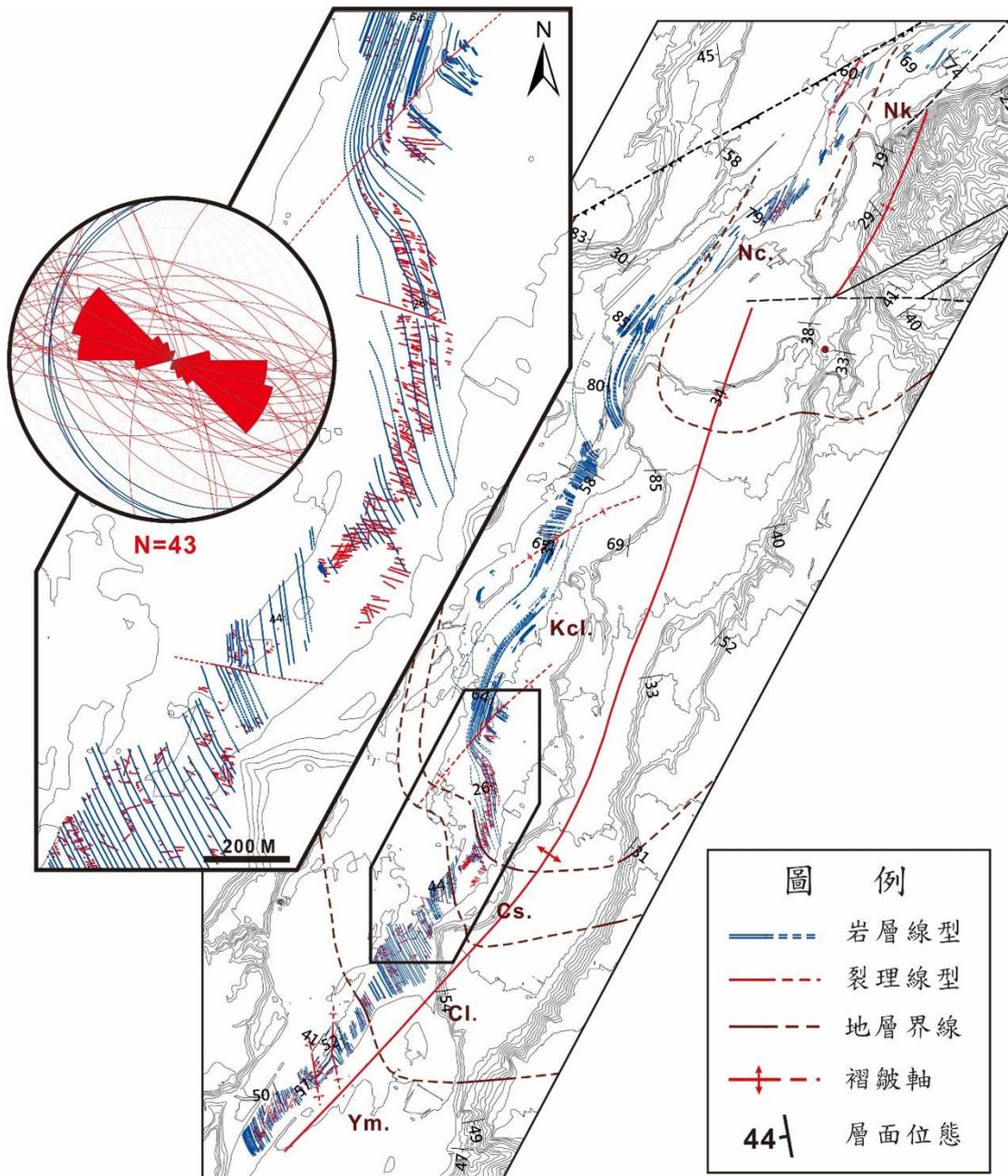


圖 70 大漢溪河床沿線斷層與節理線型分佈情形

N 為投影圓上節理面位態資料筆數。

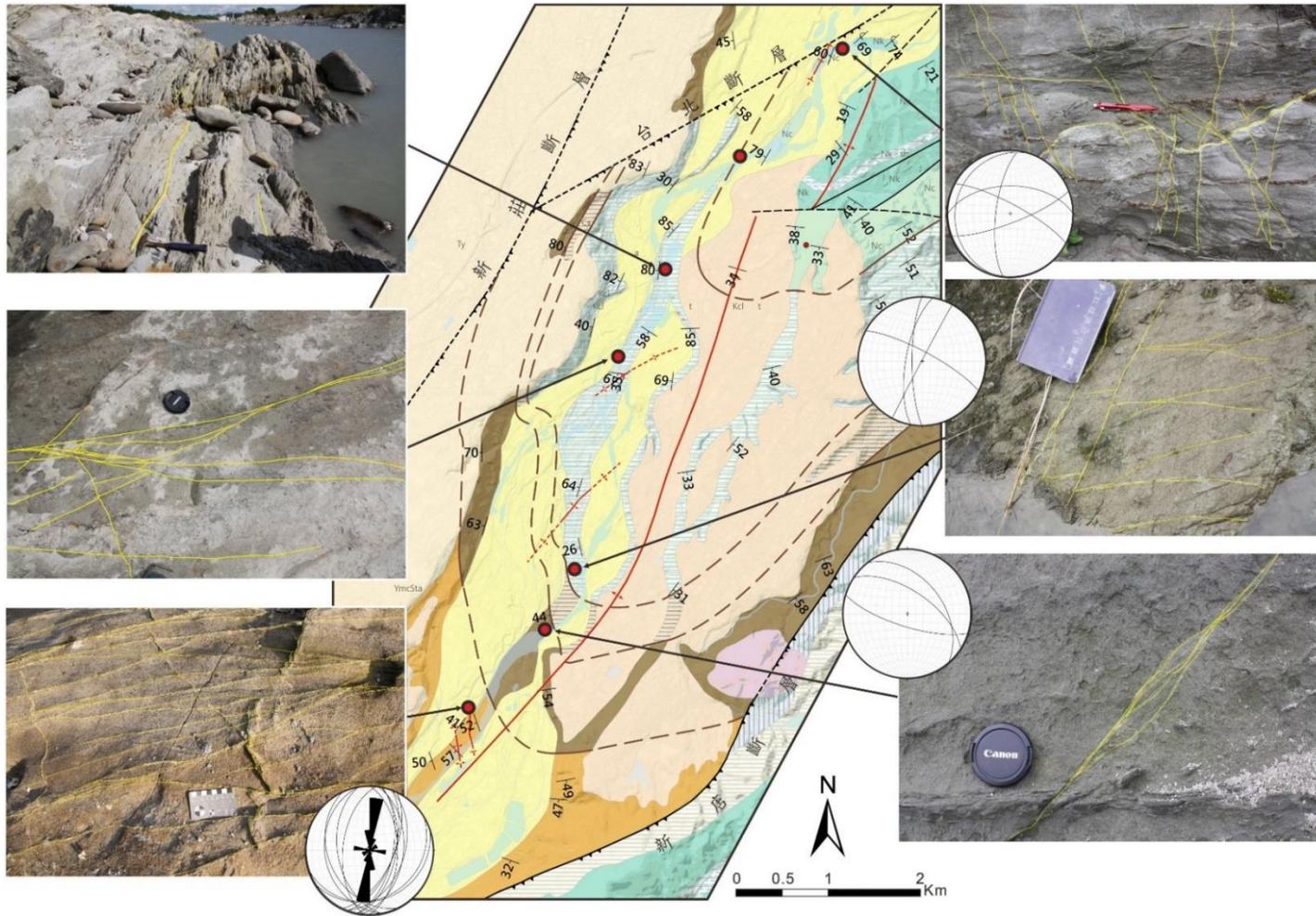


圖 71 大漢溪沿線變形條帶構造分佈情形
各照片中的黃色細線為變形條帶的描繪結果。

六、討論

6-1 中視尺度與區域尺度褶皺構造關聯性

6-1-1 大溪背斜褶皺形貌

為了觀察具代表性的褶皺形貌，將河床面上的岩層線型（圖 73）投影至褶皺剖面上，並且以上傾視角（Up-plunge viewing）視之。使用大溪背斜褶皺軸位態 $29^{\circ}/209^{\circ}$ 做為幾何關係轉換計算（圖 74）。

在褶皺剖面上，可以看到在桂竹林層中發育一系列的褶皺，半波長¹¹估計有 500 至 600 公尺。錦水頁岩以及卓蘭層當中，岩層可能不具有中視尺度的褶皺變形行為。楊梅層中的不對稱褶皺在剖面中呈線 Z 字形，短翼相對於兩個長翼可能經歷了順時針旋轉。本研究解釋此不對稱褶皺構造是主要背斜當中的寄生褶皺構造。值得注意的是，楊梅層中的褶皺與主要背斜的褶皺軸位態有所差異（表 1 大漢溪河床之褶皺構造特徵比較。一般認為，寄生褶皺應與主要褶皺兩者褶皺軸位態平行，此稱為龐氏定律（Pumpelly's rule）（Pumpelly, 1894）。不過後續許多研究已指出，在造山帶的環境中，寄生褶皺與主要褶皺之間通常存在著褶皺軸不一致的現象（Borradaile, 1972; Sanderson, 1973; Ramsay and Sturt, 1973; Ramsay, 1979）。Ramsay（1979）指出，這樣的現象可能是寄生褶皺軸位態在形成初期與主要褶皺軸有著些微差異，而這個差異在變形的

¹¹ 半波長為兩相鄰褶皺反曲點之間的距離。

過程中會逐漸增加，並且褶皺軸會出現偏轉的現象。Ramsay 歸納出，在主要褶皺翼部位置的寄生褶皺，將會比位於軸部者更容易產生褶皺軸偏轉的現象。特別對於褶皺形貌屬於圍斜形（periclinal）或者圓頂形（domal）的褶皺，位於主要褶皺不同部位的寄生褶皺軸將發育不同程度的偏轉。大溪背斜南段的寄生褶皺軸位態明顯與主要背斜軸。從大溪背斜南段的層面資料來看，背斜兩翼傾角大約在 30 至 60 度，兩翼夾角約 140 度，形貌上屬於平緩（gentle）的背斜。

桂竹林層與楊梅層的褶皺軸，分別與主要背斜軸在空間中偏差了 15 度與 40 度，本研究解釋這些中視褶皺構造仍與主要背斜有關，推測是背斜形成過程中伴生的構造。

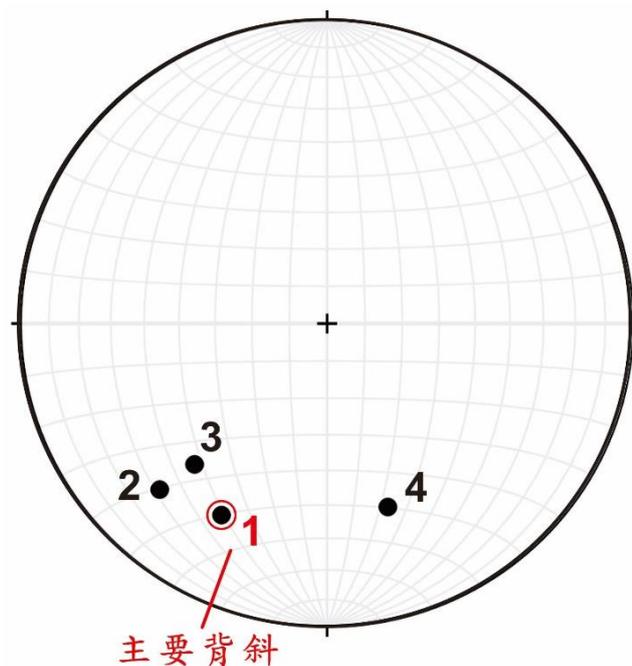


圖 72 主要背斜與次要褶皺投影圓分佈情形

圖中 1 至 4 號代表褶皺軸，對應的褶皺構造參照表 1。

6-1-2 褶皺岩層力學特性之探討

為了解褶皺形貌與岩性力學特性之間的關係，本研究以力學地層學的觀點討論。假設大溪背斜發育之前，整套中新世至更新世的地層連續沉積。岩層主要是由不同厚度的砂岩、頁岩以及砂頁岩互層所組成，不同岩性具有不同的力學特性。在背斜發育的過程中，岩石在承受擠壓的應力下，可能會出現不同的變形行為。因此藉由調查各地層的岩性組合，綜合前人對各地層岩石進行的力學試驗結果，本研究嘗試去解釋形成褶皺構造的主控因素。

表 2 彙整了大溪地區出露地層當中主要岩性與力學參數（施國欽與李彪，1994；徐智宏等，1994；魏聲焜，1994）。施國欽與李彪（1994）統計臺灣西部麓山帶中各地層的砂岩單壓強度，歸納後認為年代越老的岩層，其砂岩強度有越大的趨勢（表 3）。各地層砂岩的楊氏係數資料（徐智宏，1994；魏聲焜，1994）亦隨著年代越老而數值越大。桂竹林層（引用苗栗關刀山砂岩段）之楊氏係數略高。臺灣沉積岩單壓強度的詳細結果可參照附錄一。

根據岩性力學性質的差異，本研究解釋桂竹林層中的褶皺應向上影響到部份錦水頁岩。由於頁岩本身比砂岩來得塑性，因此容易扮演著軟岩調適空間的角色。桂竹林層中的厚砂岩層常拼合成數十公尺厚；而楊梅層中的厚層砂岩常頁岩互層出現，岩層皆較疏鬆，單壓強度明顯低於桂竹林層的砂岩（表 2）。此岩性的差異足以使得褶皺形貌相差甚遠。南莊層中的厚層砂岩厚度約 1 至 10 公尺，單壓強度達 39.9 MPa。

由此推測南莊層中應同樣可能發育一系列褶皺構造，但砂岩層較桂竹林層薄，推測褶皺波長將會小於 500 公尺。砂岩的強度較高，所承受的應力也較大，這可能可以解釋在背斜北段的南莊層中所觀察到以斷層構造為主的變形行為。

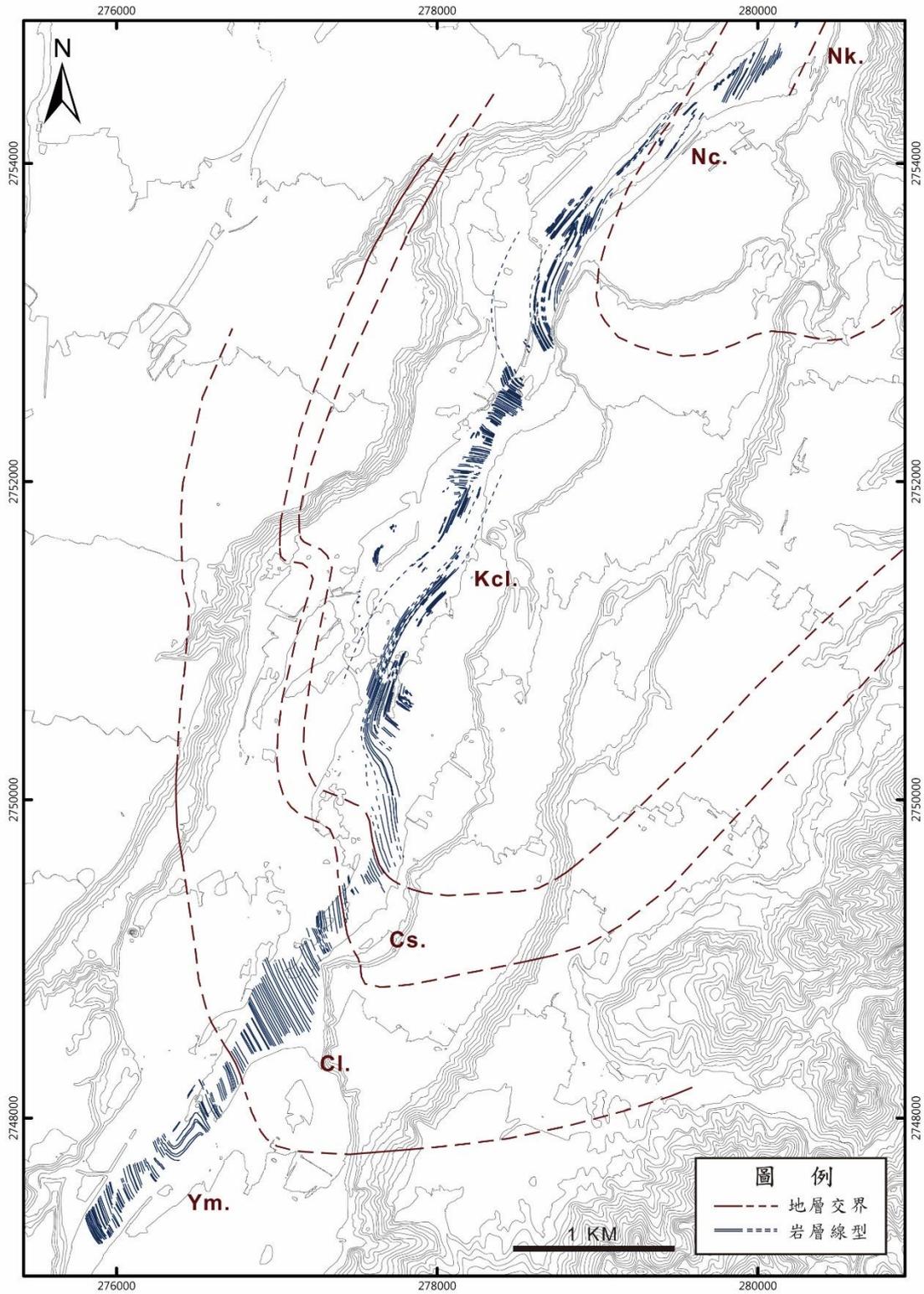


圖 73 大漢溪河床沿線岩層線型延伸分佈圖

圖中深藍色粗線段表示由空拍影像所判釋之主要岩層線型。

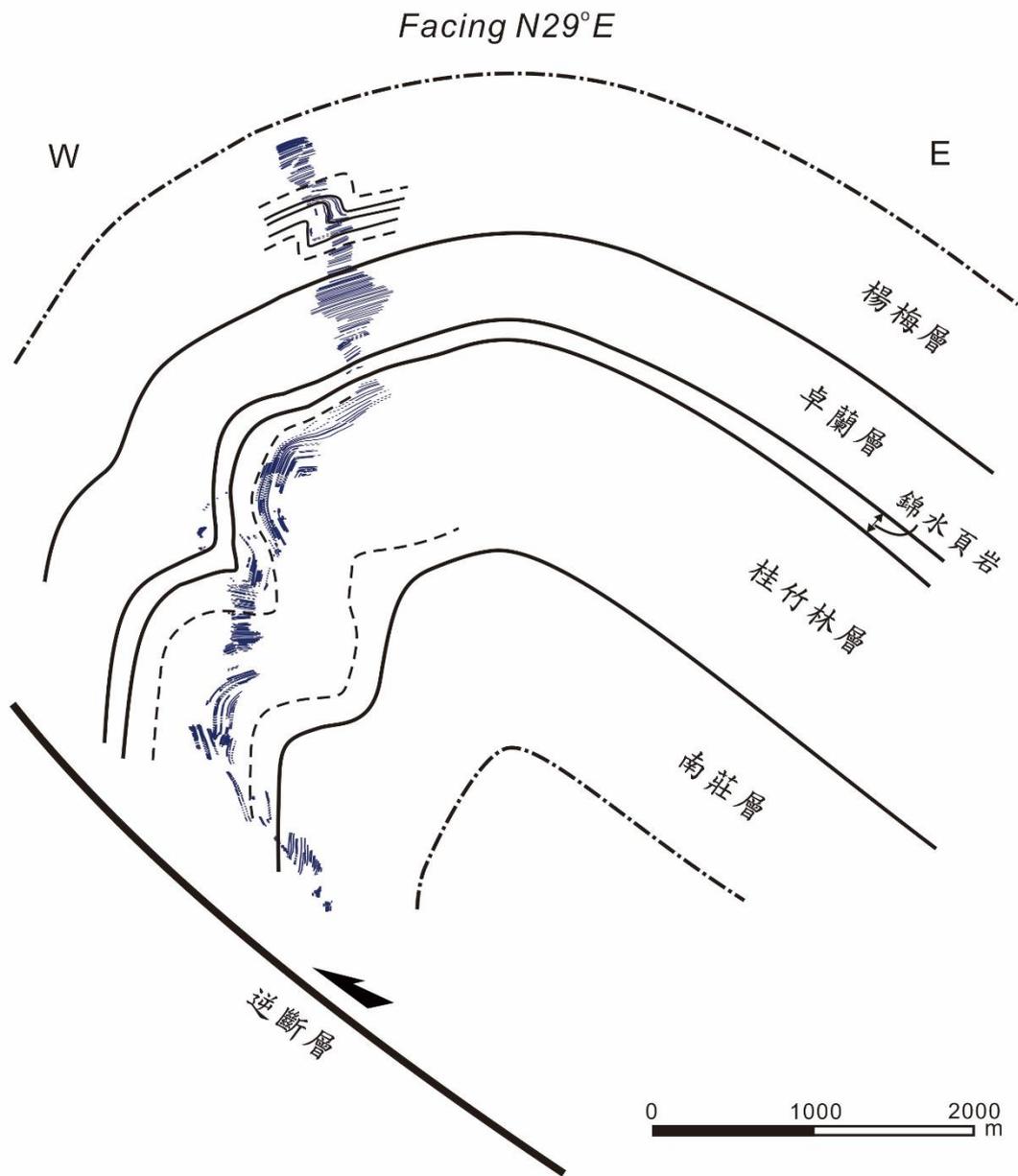


圖 74 大溪背斜之褶皺剖面

剖面上的岩層線型為地表面所投影。此剖面是由上傾視角視之，沿著大溪背斜軸位態為 $29^{\circ}/209^{\circ}$ 做投影，以建立較真實背斜剖面樣貌。在背斜西翼，桂竹林層中發育一系列褶皺，楊梅層發育一道不對稱褶皺。

表 2 大溪區域地層之岩性與強度比較表

年代	地層	厚度 (m)	主要岩性	砂岩厚度 (m)	平均砂岩強度 ¹² (MPa)	楊氏係數 (GPa)
更新世	卓蘭層與楊梅層	1600+	厚層之砂頁岩互層	10-20	3.6	0.4
上新世	錦水頁岩	125	頁岩偶夾薄層砂岩	0.03-0.1	0.5-1.0 (shale)	-
					1.0 (sandstone)	-
	桂竹林層	900	厚層泥質砂岩夾砂頁岩互層	10-80	10.0	5.8-20.5
中新世	南莊層	700-900	砂岩夾砂頁岩薄互層	1-10	39.9	1-4.6
	南港層	600-900	厚層至塊狀砂岩為主，夾砂頁岩互層	1-20	8.4-31.6	4-9.7

表 3 西部麓山帶各年代地層中砂岩強度分級(施國欽與李彪, 1994)

地層年代	砂岩單壓強度	岩石強度分類 ¹³
上新世至更新世	3.0-3.6	甚弱岩
中至晚中新世	6.6-11.8	弱岩
早中新世	26.5-28.7	中強岩

¹² 強度為砂岩平均單軸壓縮強度 (Uniaxial Compressive Strength)。

¹³ 岩石強度分類表為 Brown (1981) 所提出的分類標準。

6-2 褶皺與斷層之構造關聯性

從野外調查結果歸納得知，河床所見的斷層現象主要為走向 010° 至 040° （北偏東 10° 至 40° ）左移斷層，包括桂竹林層中的 F_1 斷層（圖 36，走向 220° ，相當於 040° ）、 F_3 斷層（圖 43，走向 035° ）以及楊梅層中的 F_5 斷層（圖 64，走向 010° 至 020° ），斷層跡長度至少 250 公尺，水平錯距從 5 至 40 公尺。此組斷層截切大溪背斜西翼的中視尺度褶皺構造，楊梅層的寄生褶皺一翼受多道左移斷層截切；桂竹林層岩層亦受到 F_3 以及其他小規模左移斷層截切。由此截切關係，認為此斷層作用應於岩層褶曲後之後才發生。

調查區 A 區觀察到的兩組共軛斷層（圖 32），發育在大溪背斜西翼中的岩層，分別為走向 085° 至 095° 之右移斷層與 140° 至 160° 之左移斷層，兩組斷層彼此互相截切。形成共軛斷層所對應的最大主應力方向應大致來自方位角 120° （或者 300° ）（圖 75）。此方位與大溪背斜軸的方向垂直，代表該共軛斷層可能是背斜形成過程的伴生斷層構造（圖 3）。斷層切穿傾角甚陡的岩層，假設西翼整體岩層的傾斜程度是因背斜逐漸發育所造成，推測斷層形成時間應為背斜發育的晚期。

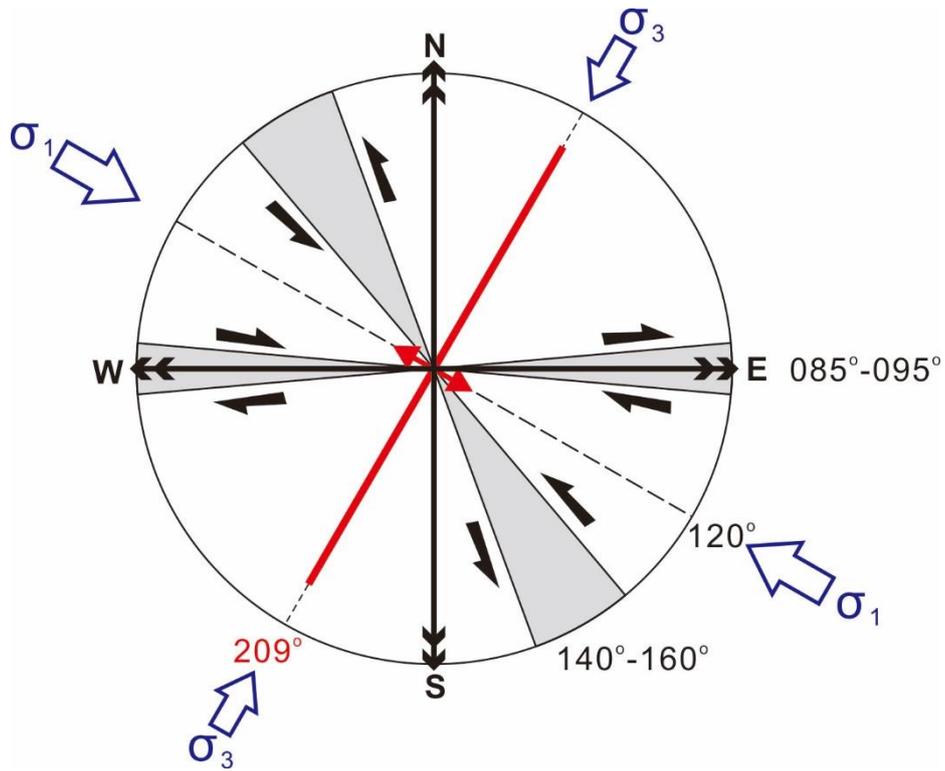


圖 75 共軛斷層與其古應力之方位圖

圖中紅色線為大溪背斜軸走勢的方位，兩組灰色區塊為共軛斷層方位，黑色實心箭頭為斷層錯動方向，藍色空心箭頭代表當時的主應力方向。

6-3 大溪背斜與中視構造之發育年代

大漢溪河階群的各河階面，在垂直主河道的方向上，傾斜角度平均不超過 1 度，不具有明顯受擾動或變形之特徵。根據碳十四定年結果，最老河階面的年代大約為 50000 年前 (Chen and Liu, 1991)。根據以上條件可以推測，大溪背斜可能最晚在 50000 年前就已經停止發育。大溪背斜中的楊梅層為最年輕之地層，在楊梅層底部觀察到褶皺構造。已知楊梅層與下伏卓蘭層的交界年代約為 1.75 個百萬年 (早更新世)，則楊梅層受到褶皺作用的年代必定為地層沉積完成以後，因此推論大溪背斜最早的發育年代可能是從 1.75 個百萬年前開始。

圖 76 為大溪背斜與河床中視構造圖 76 大溪背斜與中視構造發育年代的發育年代整理。在各地層的細顆粒砂岩中普遍可觀察到變形條帶構造。一般而言，變形條帶通常形成於孔隙率至少 15% 之砂岩 (Fossen et al., 2007)。假設大溪背斜地層孔隙率皆未達 15%，則代表變形條帶是在地層尚未深埋前發育。

依據目前認為的大溪背斜演化模式，背斜隨著逆斷層逐漸延展而形成。位於背斜西翼當中的次要褶皺岩層，可能需受到相當的擠壓程度才開始發育褶皺，推測於主背斜發育期間的中後期階段才出現。

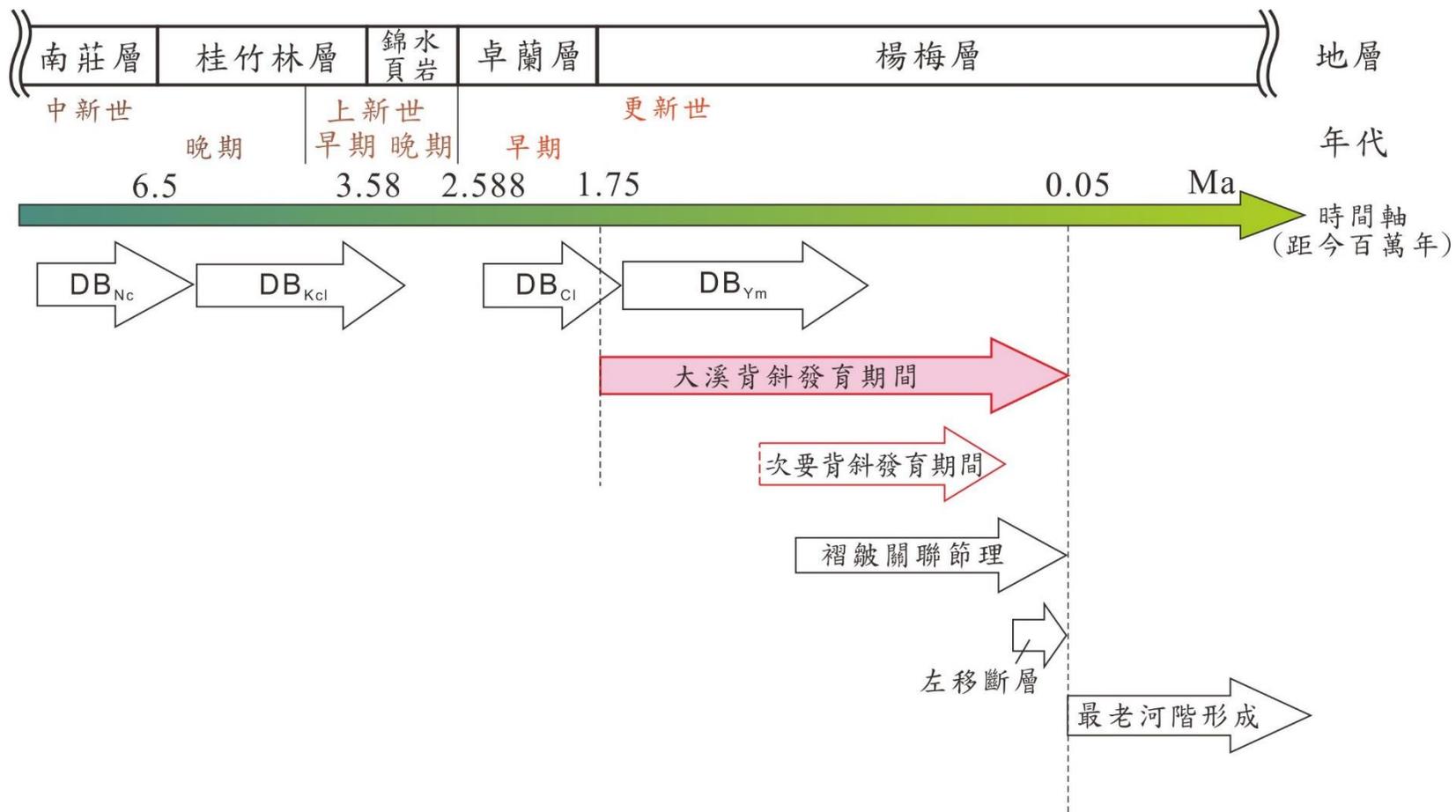


圖 76 大溪背斜與中視構造發育年代

6-4 由背斜南北側向形貌變化檢視演化過程

在區域尺度之下，整段大溪背斜由北而南的形貌差異甚大。本研究沿著背斜軸製作四道鉛直剖面 WW'、XX'、YY' 以及 ZZ'，以呈現不同部位的背斜形貌(圖 77)。WW' 剖面顯示大溪背斜軸部與西翼皆不完整，可能存在小型逆斷層切穿軸部(圖 78)。XX' 剖面，大溪背斜具有甚陡至局部倒轉的西翼，兩翼夾角小於 90 度，軸部的桂竹林層與南港層形貌呈較平緩寬廣的分佈(圖 79)。YY' 剖面中，背斜兩翼夾角接近 90 度，西翼發育數道次要褶皺(圖 80)。ZZ' 剖面中，背斜兩翼夾角略大於 90 度，在軸部偏西翼的岩層中存在 Z 形不對稱褶皺(圖 81)。

本研究試圖以現今背斜形貌解釋其演化過程。在褶皺逆衝帶構造演化研究上廣泛應用的一套假設概念，稱為「自型模型」(self-similar modelling technique)。在逆斷層沿線上，通常存在錯移量較大以及較小的區段，甚至在逆斷層尖滅處的錯移量為零。假設岩層變形行為發生在相同的溫壓條件下，並且遵循漸進變形(progressive deformation)，則現今所觀察到空間上構造形貌的側向變化，即是記錄了構造形貌逐步演化的過程(Means, 1976)。言下之意，在斷層錯移量較小處，逆斷層上盤的變形構造應屬於較早期的狀態；錯移量最大處，可能是構造發育較後期的階段(Fischer and Woodward, 1992)。因此，本研究解釋 ZZ' 剖面的背斜形貌較接近構造發育早期的階段，隨著逆斷層錯移量增加，後期形貌應較接近 WW' 剖面。圖 82 為大溪背斜四道剖面的立體圖，此南北側向形貌的差異逐步記錄了背斜演化過程中主要形貌特徵。

臺北斷層自三峽向南延伸，於大溪市區西北方與新莊斷層合併，層位落差由北而南遞減。這點解釋了大溪背斜向南西傾沒的幅度甚陡（約 30 度）的原因，為逆斷層南北不等量的抬升量與錯移量所致。如今大溪背斜西翼皆已被逆斷層切穿，背斜的發育生長可能因此進入尾聲或已經終止。

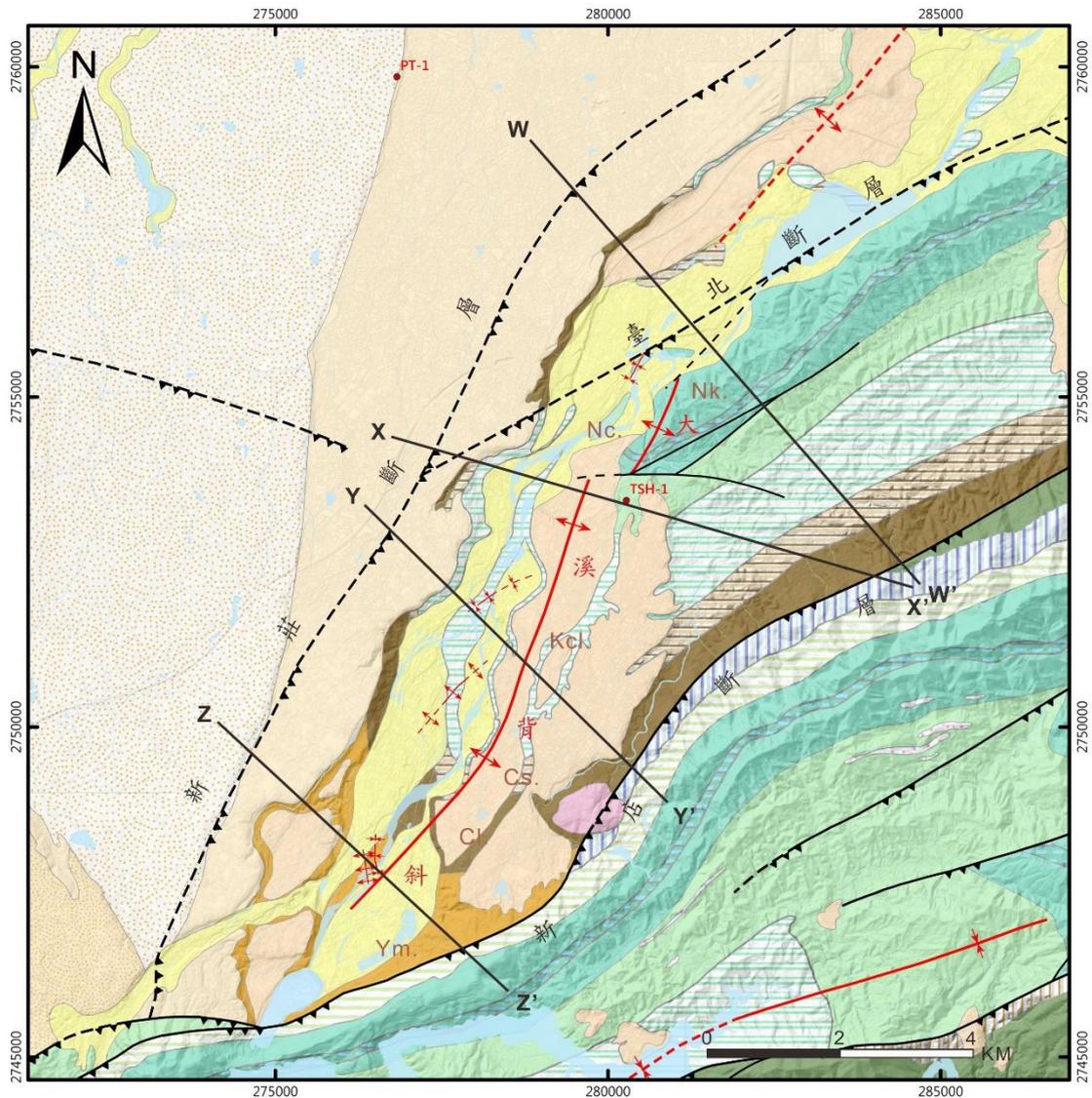


圖 77 大溪背斜鉛直剖面位置分佈

沿背斜軸由北而南分別有 WW'、XX'、YY'與 ZZ' 四道剖面。

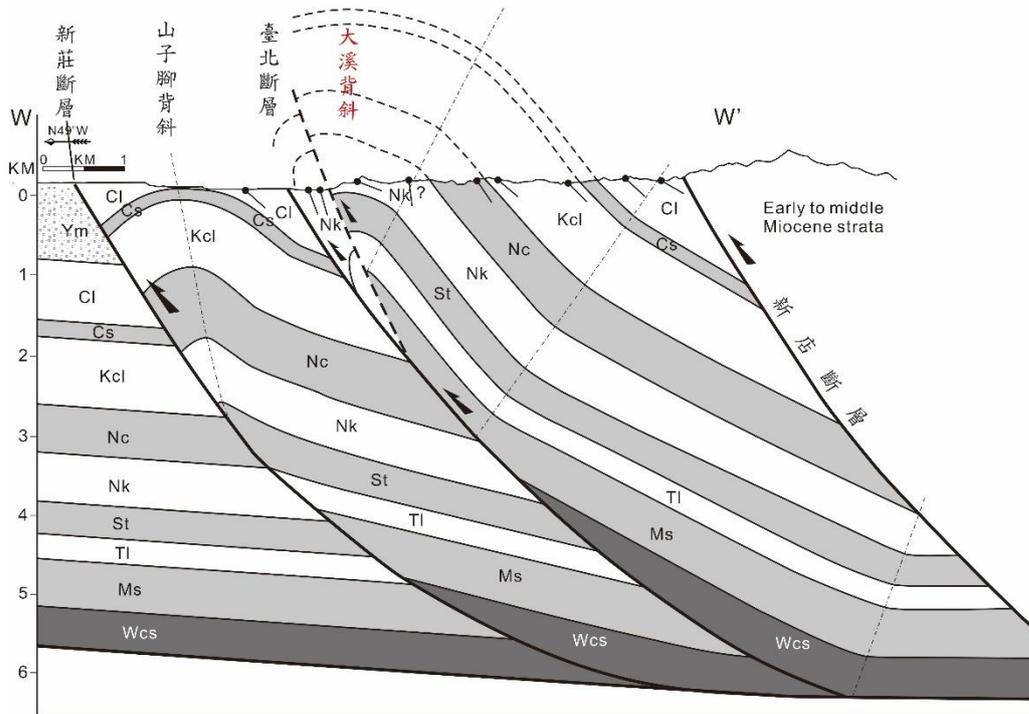


圖 78 大溪背斜 WW'剖面圖

此段大溪背斜之西翼與軸部皆不完整，推測軸部尚發育小逆斷層。

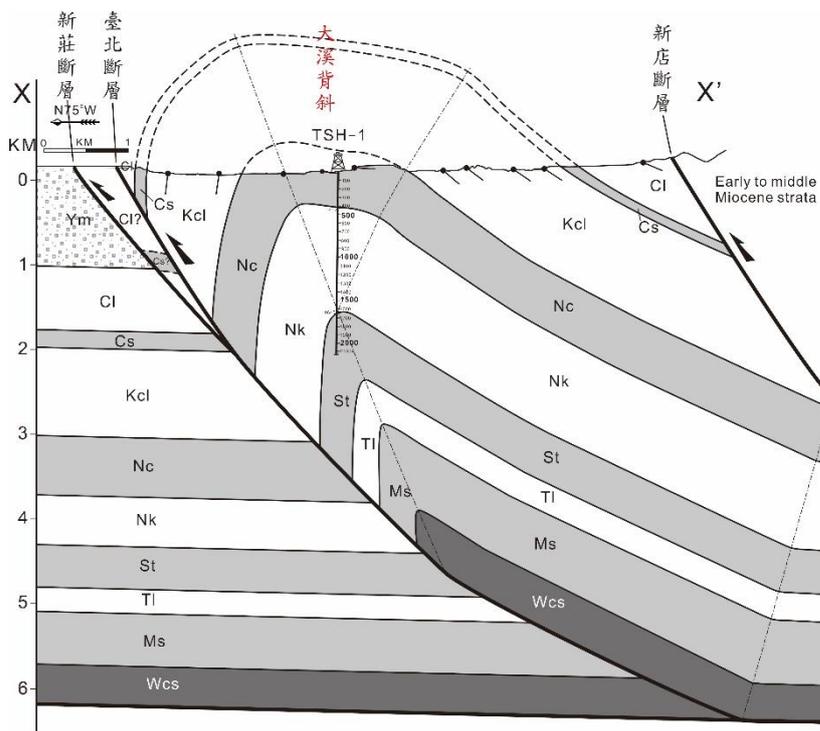


圖 79 大溪背斜 XX'剖面圖

此段大溪背斜呈一不對稱褶皺。TSH-1 為中油大溪一號井。

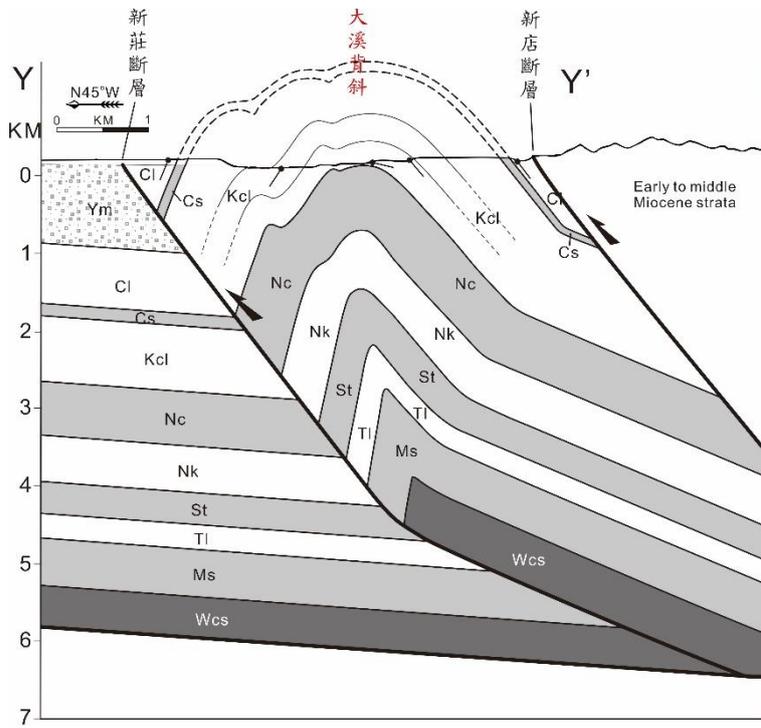


圖 80 大溪背斜 YY'剖面圖

此段背斜西翼桂竹林層中具數道次要褶皺，似影響錦水頁岩與南莊層。

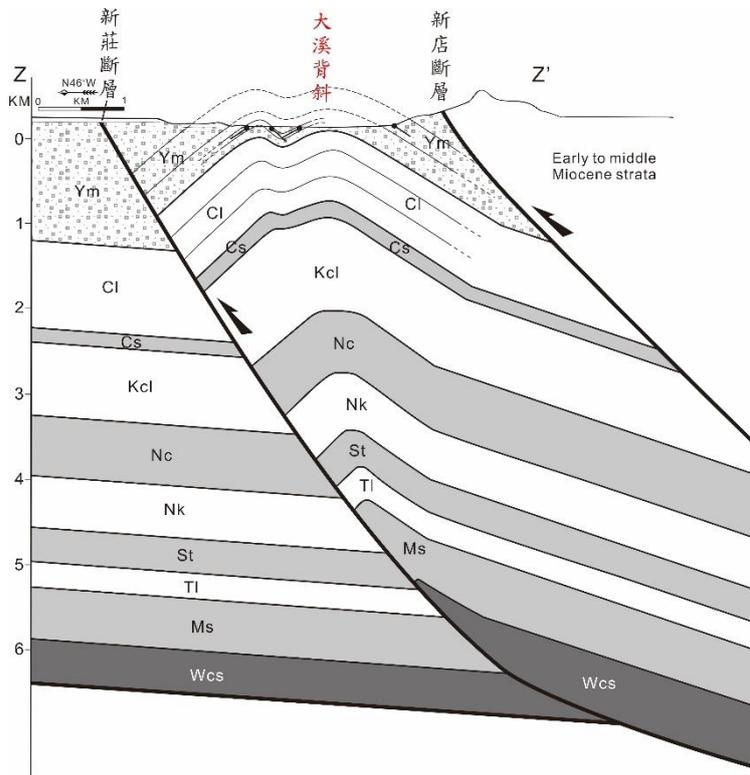


圖 81 大溪背斜 ZZ'剖面圖

背斜西翼楊梅層底部具有一道不對稱次要褶皺。

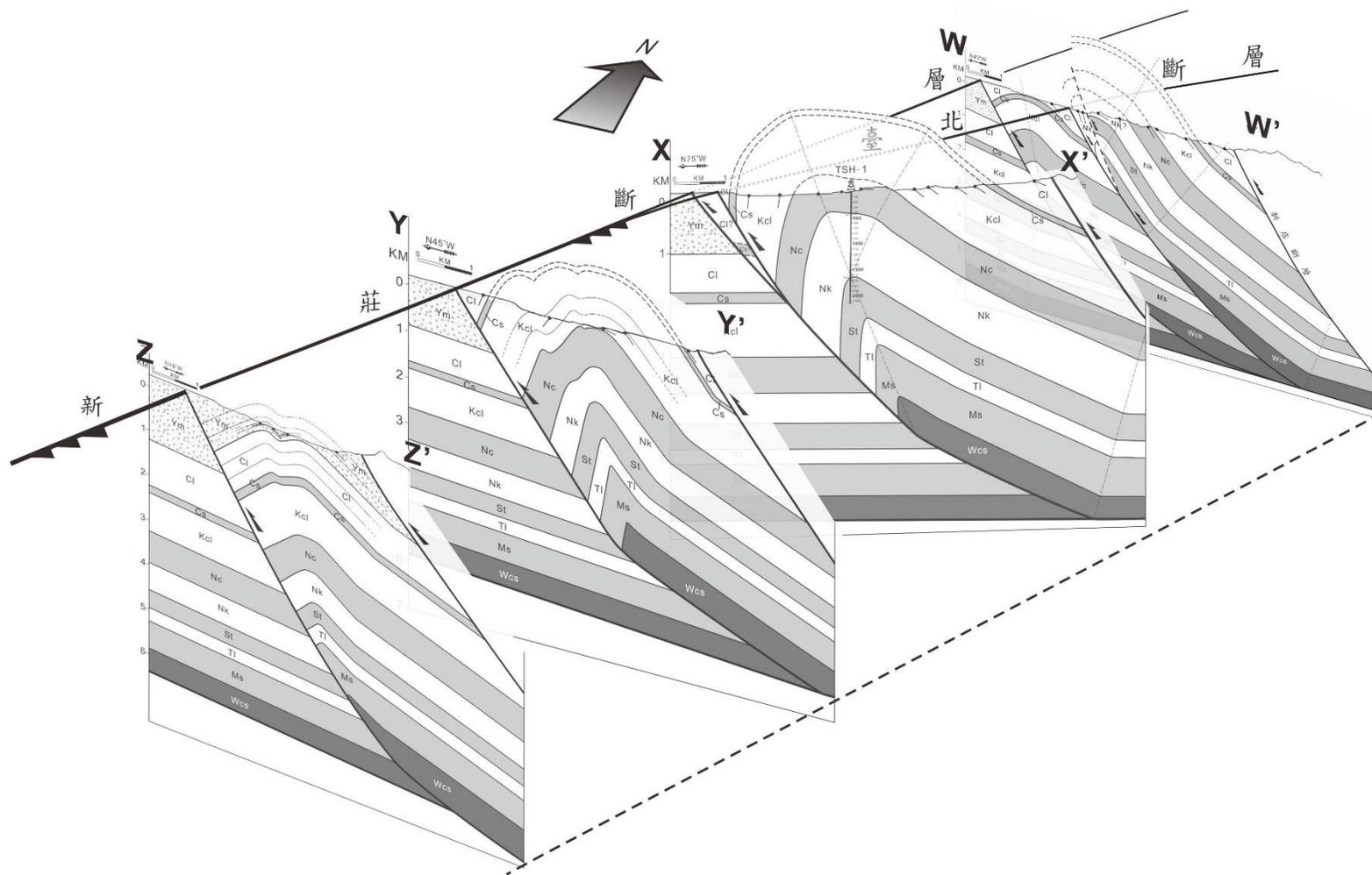


圖 82 大溪背斜剖面立體圖 (block diagram)

立體圖由四道背斜鉛直剖面 (WW' 至 ZZ') 併置所組成，以呈現背斜南北側向形貌差異。

七、結論

桃園大溪地區之大溪背斜為一個向南南西傾沒的背斜構造，褶皺軸位態為 $29^{\circ}/209^{\circ}$ ，主控了本區地層分佈。大漢溪河床連續出露大溪背斜西翼之褶皺岩層，由北而南出露南港層、南莊層、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層以及楊梅層。野外地質調查與 UAV 空拍影像綜合分析結果顯示，主要背斜西翼當中可見數道伴生的次要褶皺：桂竹林層中發育半波長約 500 至 600 公尺之一系列褶皺，求得其中兩道褶皺軸位態為 $24^{\circ}/225^{\circ}$ 以及 $37^{\circ}/223^{\circ}$ ；楊梅層當中發育一道不對稱褶皺，褶皺軸位態為 $37^{\circ}/162^{\circ}$ ，與主背斜軸有所偏差，推測可能為褶皺作用期間發生褶皺軸旋轉現象。依各地層內砂岩之力學性質而論，桂竹林層中的厚層砂岩層容易發育波長較大的褶皺系列，錦水頁岩可能扮演軟岩調適層。背斜西翼岩層中一致發育走向 010° 至 040° 的左移斷層 (F_1 、 F_3 與 F_5)，斷層跡長度至少 250 公尺，水平錯距約 5 至 40 公尺。左移斷層截切數處之褶皺岩層，顯示此斷層作用為褶皺形成之後。另外，大溪背斜北段岩層發育共軛斷層，其古應力方向與主要背斜軸垂直，研判屬於背斜發育後期伴生的斷層現象。桂竹林層上部岩層中具有局部密集成組節理，走向約為 090° 至 120° 之間，其方位亦與主背斜大致垂直，解釋為與背斜有關的節理現象。根據變形之地層年代以及未變形之河階年代，推測大溪背斜活動年代介於 1.75 至 0.05 百萬年之間。區域尺度下，大溪背斜具有顯著的南北側向形貌差異，本研究解釋此差異記錄了背斜逐步演化過程主要的形貌特徵。

本研究將 UAV 空拍技術應用於大範圍河床露頭調查，並首度繪製大漢溪沿線中視尺度地質構造分佈情形。未來建議於河床水位較低時進行局部河床補充地質調查。

參考文獻

- Ahmadhadi, F., Daniel, J.-M., Azzizadeh, M., and Lacombe, O., "Evidence for pre-folding vein development in the Oligo-Miocene Asmari Formation in the Central Zagros Fold Belt, Iran", Tectonics, Vol 27 (1) , 2008.
- Beaudoin, N., Leprêtre, R., Bellahsen, N., Lacombe, O., Amrouch, K., Callot, J.-P., Emmanuel, L., and Daniel, J.-M., "Structural and microstructural evolution of the Rattlesnake Mountain Anticline (Wyoming, USA) : New insights into the Sevier and Laramide orogenic stress build-up in the Bighorn Basin", Tectonophysics, Vol 576–577, pp. 20-45, 2012.
- Bellahsen, N., Fiore, P., and Pollard, D. D., "The role of fractures in the structural interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming", Journal of Structural Geology, Vol 28 (5) , pp. 850-867, 2006.
- Borradaile, G., "Variably oriented co-planar primary folds", Geol. Mag, Vol 109, pp. 89-98, 1972.
- Brown, E. T., "Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods", 1981.
- Chen, Y. G., and Liu, T. K., "Radiocarbon dates of river terraces along Tahanchi, northern Taiwan", Proc. Geol. Soc. China, Vol 34 (4) , pp. 175-185, 1991.
- Chiu, H., The Hsinchuang fault in the Taoyuan area, northern Taiwan, *in* Proceedings Proc. Geol. Soc. China 1968, Vol 11, p. 60-73.

- Fischer, M., and Woodward, N., "The geometric evolution of foreland thrust systems", Thrust Tectonics, pp. 181-189, 1992.
- Fossen, H., Schultz, R. A., Shipton, Z. K., and Mair, K., "Deformation bands in sandstone: a review", Journal of the Geological Society, Vol 164 (4) , pp. 755-769, 2007.
- Gibbard, P. L. H., M. J. , "The definition of the Quaternary System/Era and the Pleistocene Series/Epoch", Quaternaire, Vol 20, 2, pp. 125-133, 2009.
- Ho, C., "The Taipei fault and related structural features in northern Taiwan", Proceedings of the Geological Society of China, Vol 17, pp. 95-109, 1974.
- Jackson, J. A., "Glossary of geology", 5th revised and enlarged ed. ISBN 3-540-27951-2. Berlin: Springer, 2005., pp. 5th, 2005.
- Marshak, S., Geiser, P. A., Alvarez, W., and Engelder, T., "Mesoscopic fault array of the northern Umbrian Apennine fold belt, Italy: Geometry of conjugate shear by pressure-solution slip", Geological Society of America Bulletin, Vol 93 (10) , pp. 1013-1022, 1982.
- Means, W., Stress and Strain: Basic Concepts Of continuum Mechanics for Geologists, 1976.
- Pan, T. Y., Lin, A. T. S., and Chi, W. R., "Paleoenvironments of the evolving Pliocene to early Pleistocene foreland basin in northwestern Taiwan: An example from the Dahan River section", Island Arc, Vol 24 (3) , pp. 317-341, 2015.

- 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.
- Pumpelly, R., Wolff, J. E., and Dale, T. N., Geology of the Green Mountains in Massachusetts, 1894.
- Ramsay, D. M., "Analysis of rotation of folds during progressive deformation", Geological Society of America Bulletin, Vol 90 (8) , pp. 732-738, 1979.
- Ramsay, D. M., and Sturt, B. A., "An analysis of noncylindrical and incongruous fold pattern from the eo-cambrian rocks of sørøy, northern Norway: I. Noncylindrical, incongruous and aberrant folding", Tectonophysics, Vol 18 (1-2) , pp. 81-107, 1973.
- Ramsay, J. G., and Huber, M. I., The techniques of modern structural geology: Folds and fractures, Vol 2, 1987.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., and Schiefelbein, I. M., Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology, 2013.
- Sanderson, D. J., "The development of fold axes oblique to the regional trend", Tectonophysics, Vol 16 (1) , pp. 55-70, 1973.
- Stephenson, B. J., Koopman, A., Hillgartner, H., McQuillan, H., Bourne, S., Noad, J. J., and Rawnsley, K., "Structural and stratigraphic controls on fold-related fracturing in the Zagros Mountains, Iran: implications for reservoir development", Geological society, London, special publications, Vol 270 (1) , pp. 1-21, 2007.

- Suppe, J., "A Retrodeformable cross section of Northern Taiwan",
Proceedings of the Geological Society of China, Vol 23, pp. 46-55,
1980a.
- Tang, C. H., and L., H. C., "Geologic map of the Chingshuikeng anticline,
Taipei", Taiwan Petroleum Exploration Division, Chinese Petroleum
Corporation, 1965.
- Tomita, Y., "Correlation of the geomorphologic surface of the terraces
along the river coast of Tanshuiho (in Japanese) ", Taiwan Tigaku
Kizi, Vol 13, pp. 10-12, 101-119, 1937.
- , "Surface Geology and Correlation of River Terraces", Annals of The
Tohoku Geographycal Association, Vol 6 (4) , pp. 51-58, 1954.
- Yen, T., "A preliminary study on the alkaline basalt of Tsaolingshan, Tachi,
Sinchu, Taiwan", Bull. Geol. Surv. Taiwan, Vol 2, pp. 1-23, 1949.
- 中國石油公司，「桃園縣大溪構造第一號探井地下地質報告」，1975。
- 丹桂之助，「臺灣山子腳地方の層序に就いて」，臺灣博物學會會報，
19 (105)，第 552-558 頁，1929。
- 丹桂之助 (Tan)，「山子腳油田地形及地質圖 (縮尺一萬分之一)」，
臺灣總督府殖產局，806，1938。
- 市川雄一，「桃園圖幅說明書，縮尺五萬分之一圖幅第 13 號」，臺灣
總督府殖產局，581，1930。

安藤昌三郎，「臺灣苗栗油田之地質與構造」，地質學雜誌，37

(447)，第 799-803 頁，1930。

何春蓀，「臺灣基隆沿海至桃園縣大溪間煤田地質及構造」，經濟部中

央地質調查所彙刊，2，1983。

何春蓀，「臺灣地質概論，臺灣地質圖說明書」，經濟部中央地質調查

所出版，1986。

何春蓀、徐茂揚、任樂孫、方傑士，「臺灣北部沿海區之地質及煤礦

資源」，臺灣省地質調查所彙刊，15，第 1-64 頁，1964。

何春蓀、詹新甫、潘志偉、楊應塘，「台灣苗栗南莊煤田地質」，6，

第 1-36 頁，1954。

牧山鶴彥，「中壢圖幅及說明書」，臺灣總督府殖產局（692），1935。

施國欽、李彪，「臺灣地區沉積岩單壓強度初步研究」，岩盤工程研討

會論文集，第 219-228 頁，1994。

施錦揮、游政恭、鄒慶敏、蔡季欣、林志清、林燕山，「無人飛行載

具應用於防救災圖資供應之研究-以北二高崩塌地為例」，地籍測

量：中華民國地籍測量學會會刊，29（3），第 17-36 頁，2010。

徐智宏，「臺灣地區沉積岩靜彈性初步研究」，岩盤工程研討會論文

集，第 209-218 頁，1994。

鳥居敬造，「東勢圖幅及說明書」，臺灣總督府殖產局出版，732，
1935。

鳥居敬造、吉田要，「新竹州苗栗及竹東油田調查報告」，臺灣總督府
殖產局，585，1931。

游能悌、鄧屬予，「臺灣北部中上中新統的岩相與沉積循環」，地質，
15 (2)，第 29-60 頁，1996。

湯振輝，「湖口地區更新世楊梅層與沉積同時之變形」，中國地質學會
會刊，六，第 75-79 頁，1963。

湯振輝、楊健一，「論青潭層與五指山層間之地層對比」，臺灣石油地
質，14，第 37-43 頁，1977。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威等人，「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
地下構造綜合分析」，經濟部中央地質調查所報告 93-13 號，
2004。

楊政玕、溫明璋、吳宗翰、蔡孟涵、康仕仲，「沖積扇數值地形模型
資料蒐集-無人飛行載具之系統設計與實作」，中國土木水利工程
學刊，27 (3)，第 263-270 頁，2015。

詹佩臻、劉桓吉、林銘郎、盧詩丁、林燕慧，「台北盆地西緣之斷層-
成子寮斷層」，2012 大臺北地區防災地質研討會論文集，2012。

詹新甫，「桃園角板山區地質」，臺灣省地質調查所彙刊，14，1962。

劉桓吉，「新竹苗栗地區頭嵙山層與卓蘭層之劃分問題」，經濟部中央地質調查所特刊，四，第 368 頁，1990。

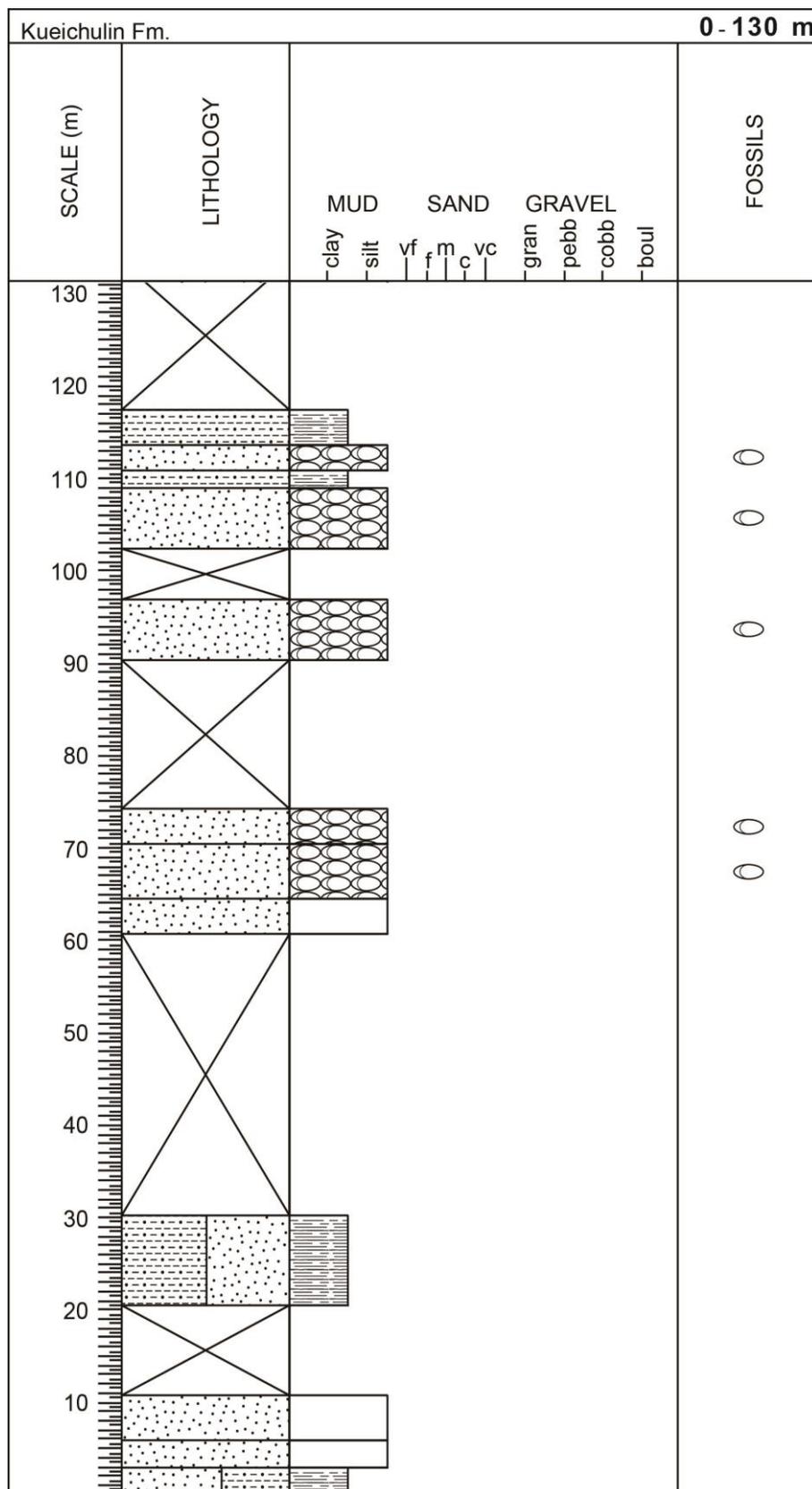
潘遵友，「台灣西北部大漢溪剖面南莊層至楊梅層之沉積環境研究」，國立中央大學地球物理研究所，碩士論文，2011。

鄧屬予、劉聰桂、陳于高、劉平妹、李錫堤、劉桓吉、彭志雄，「大漢溪襲奪對臺北盆地的影響」，師大地理研究報告，2004。

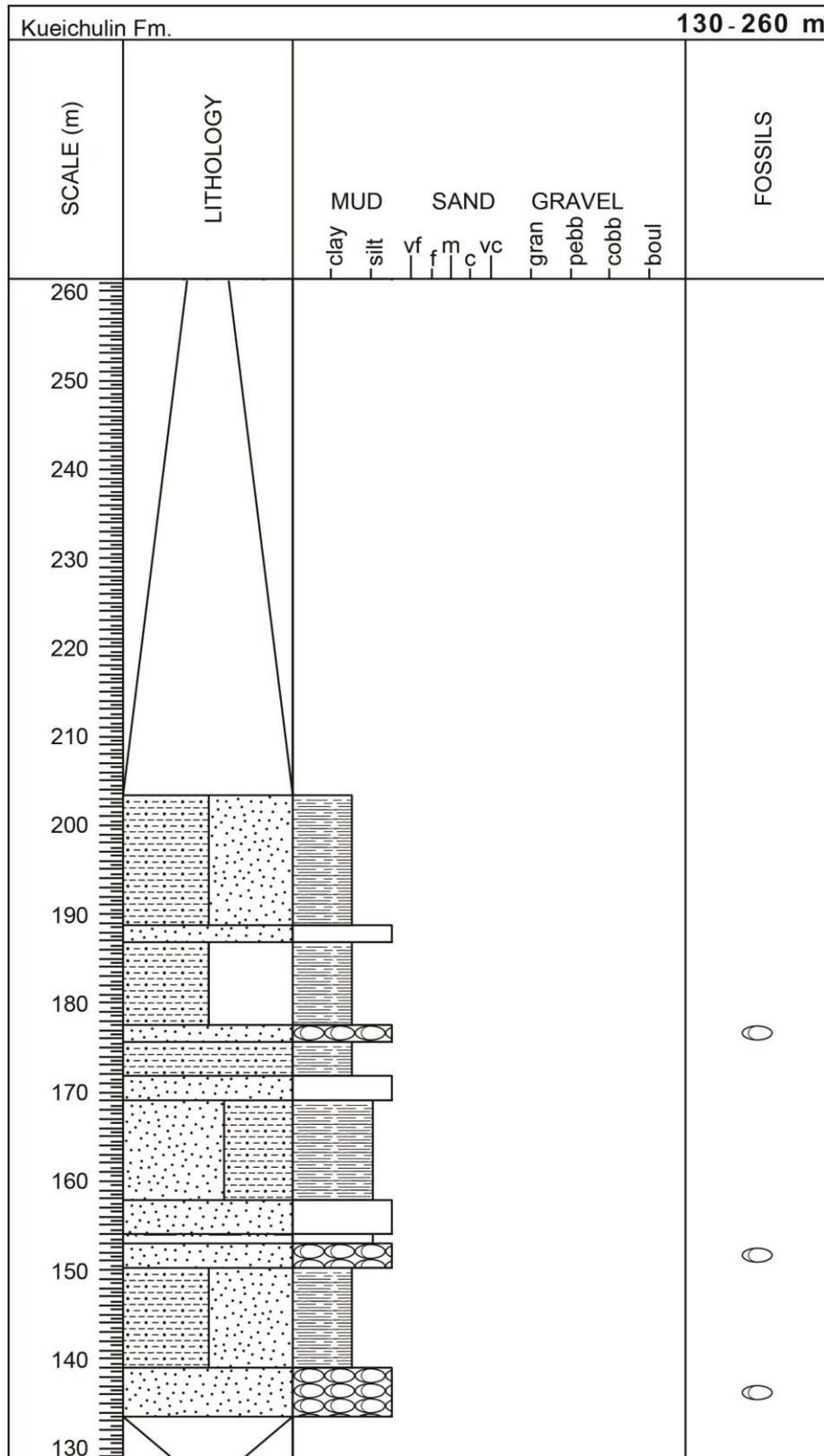
魏聲焜，「苗栗地區上新世至中新世地層之構造地層學研究」，國立成功大學地球科學研究所，碩士論文，1994。

- 桂竹林層地層柱（大溪內柵至武嶺橋河床段），共計 860 公尺。

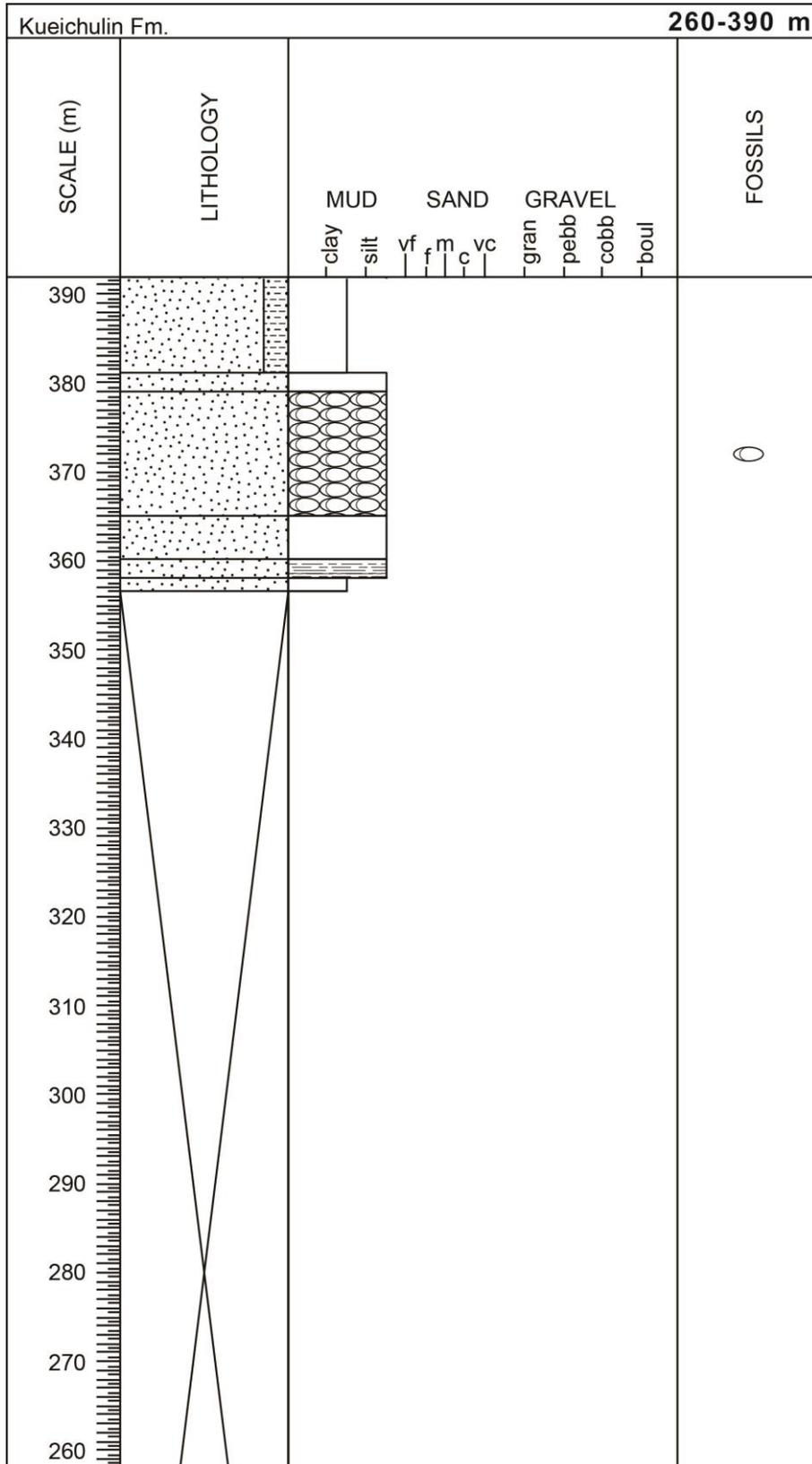
0 至 130 公尺



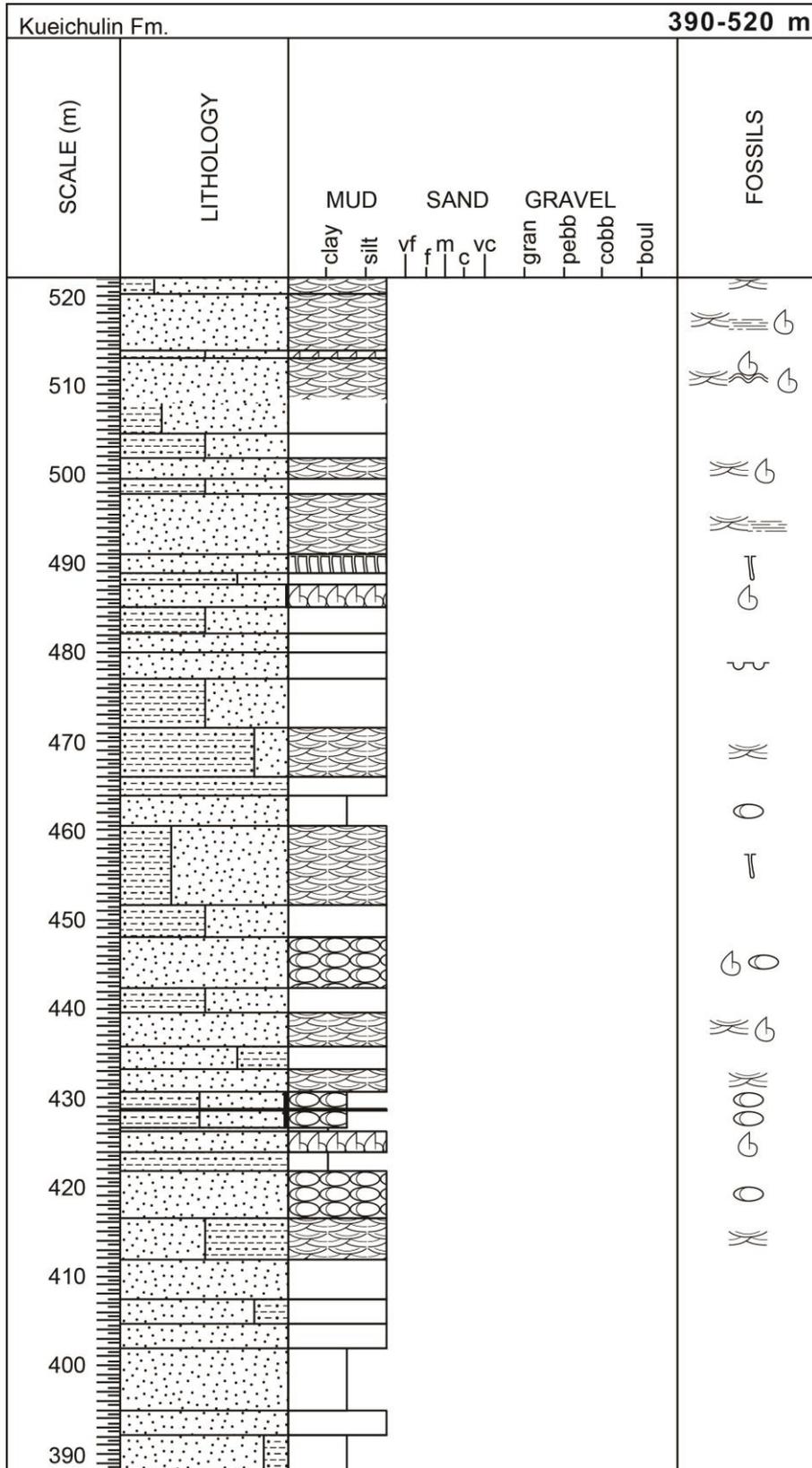
130 至 260 公尺



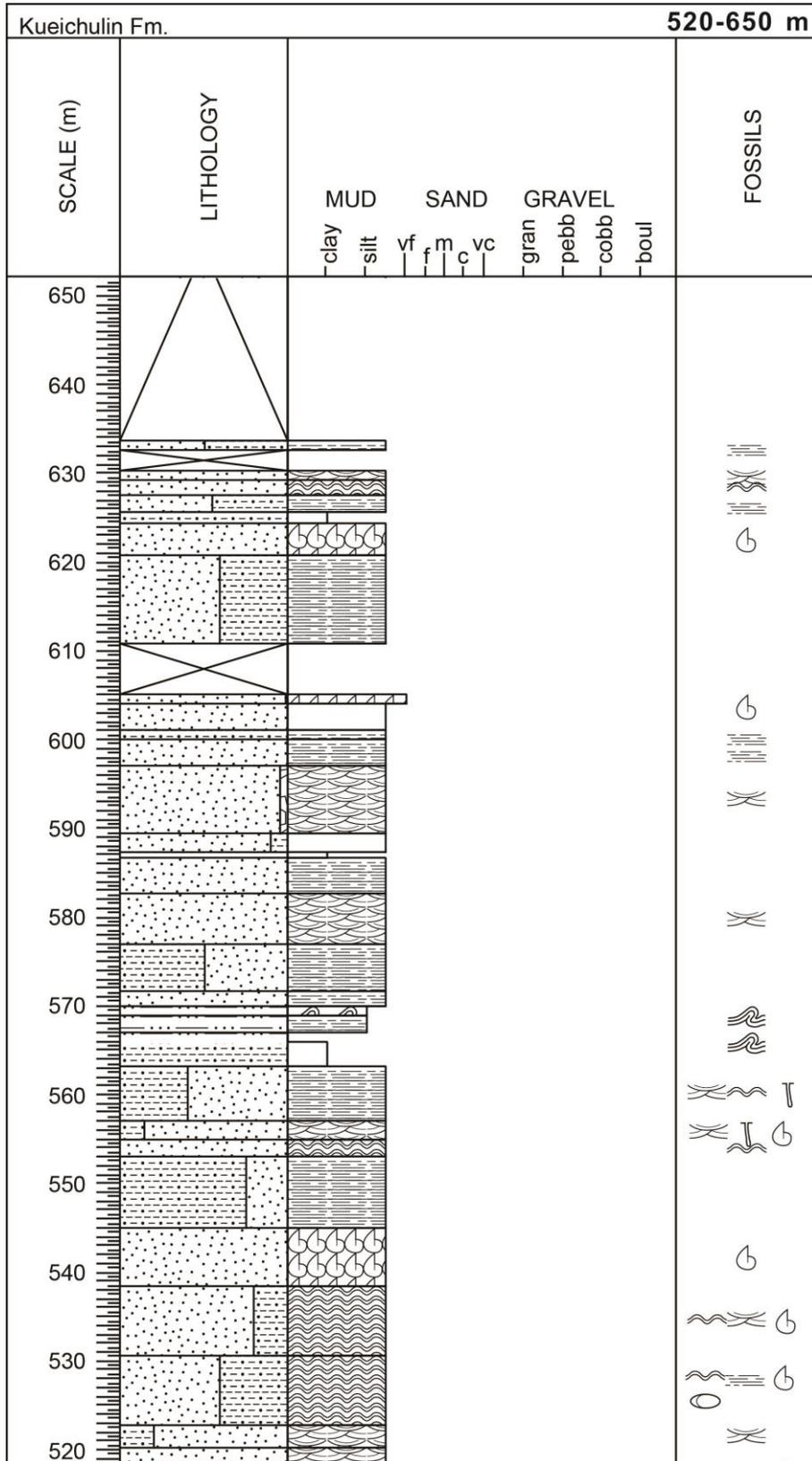
260 至 390 公尺



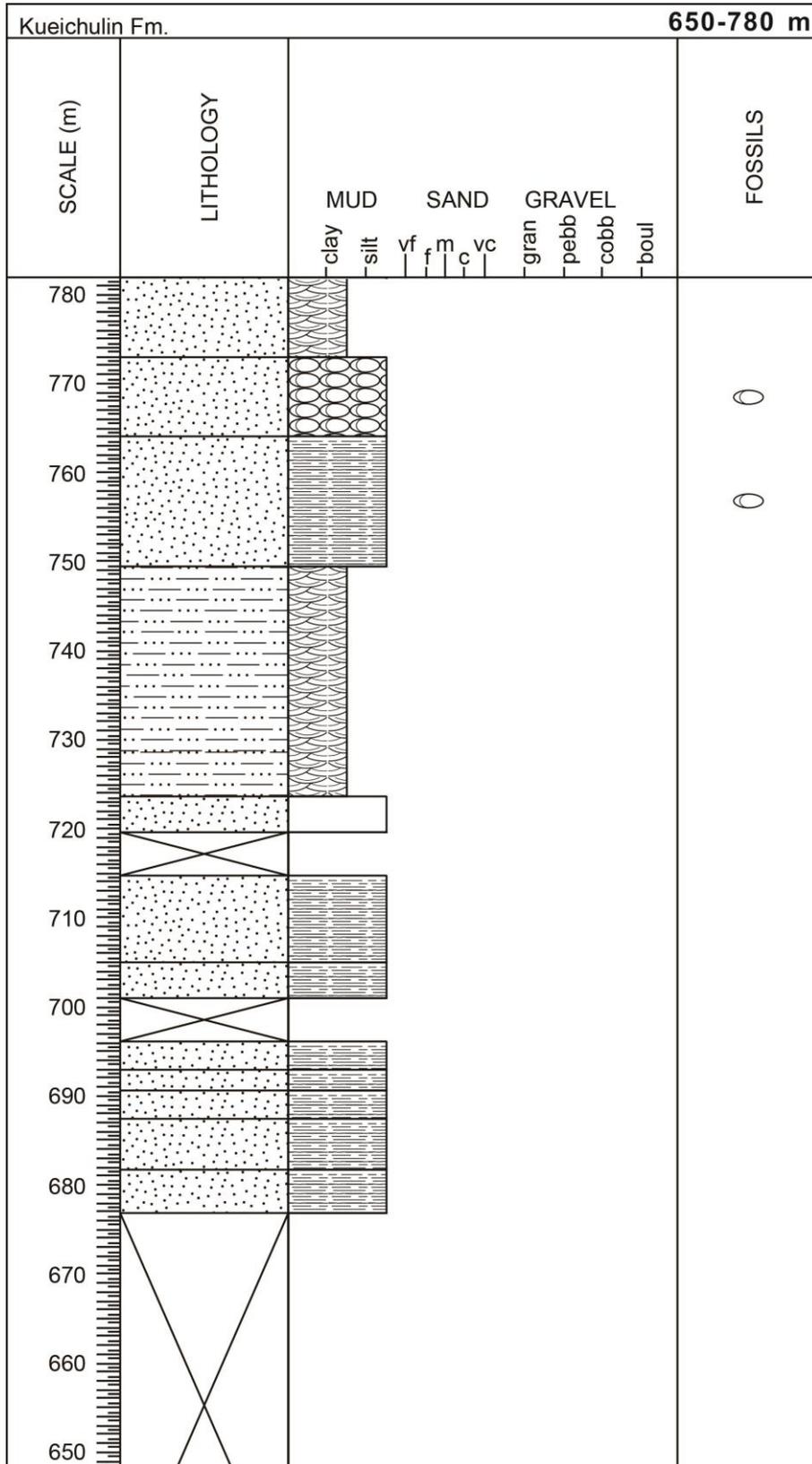
390 至 520 公尺



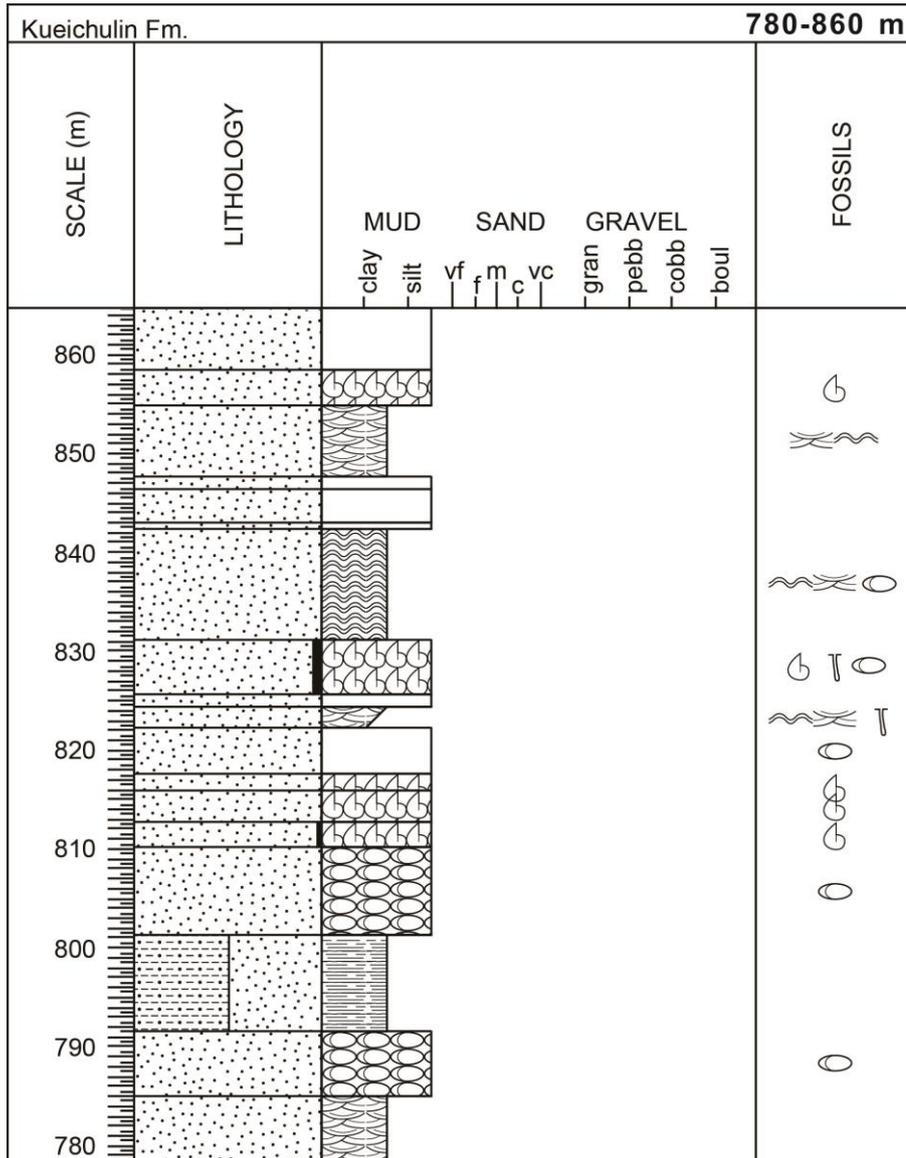
520 至 650 公尺



650 至 780 公尺



780 至 860 公尺



附錄二 桃園大漢溪河床空拍影像圖

本研究製作桃園大漢溪河床露頭進行空拍紀錄，總長約 9 公里。為提高 UAV 正射影像的優勢，特製 A2 尺寸的河床空拍影像圖，包含一張比例尺為一萬五千分之一的全區河床空拍索引圖，以及四張比例尺為五千分之一的各區河床空拍影像圖。各分區之圖名與編號為：中庄攔河堰（DHR-1）、大溪橋（DHR-2）、內柵（DHR-3）以及溪洲（DHR-4）。

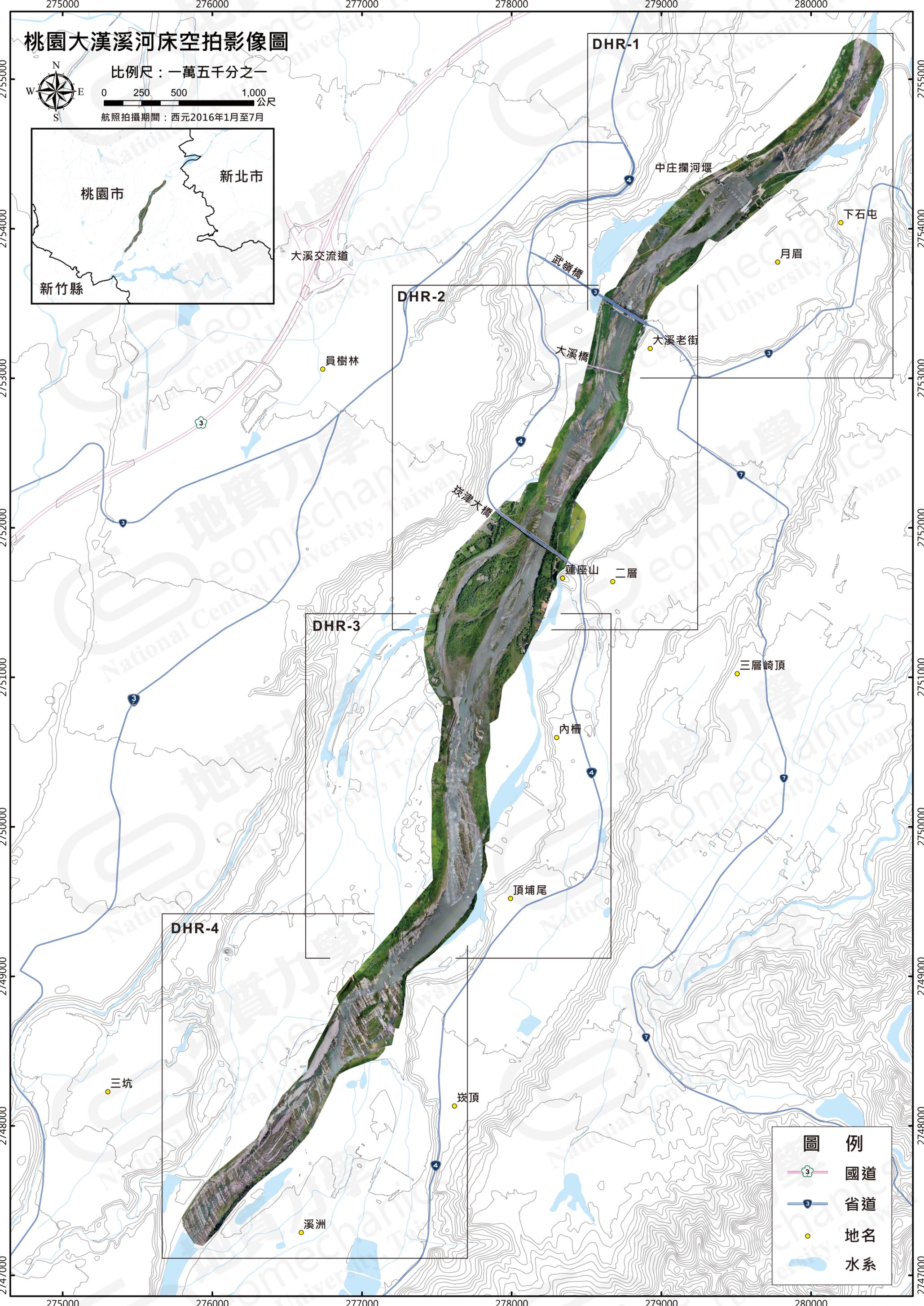
桃園大漢溪河床空拍影像圖

比例尺：一萬五千分之一

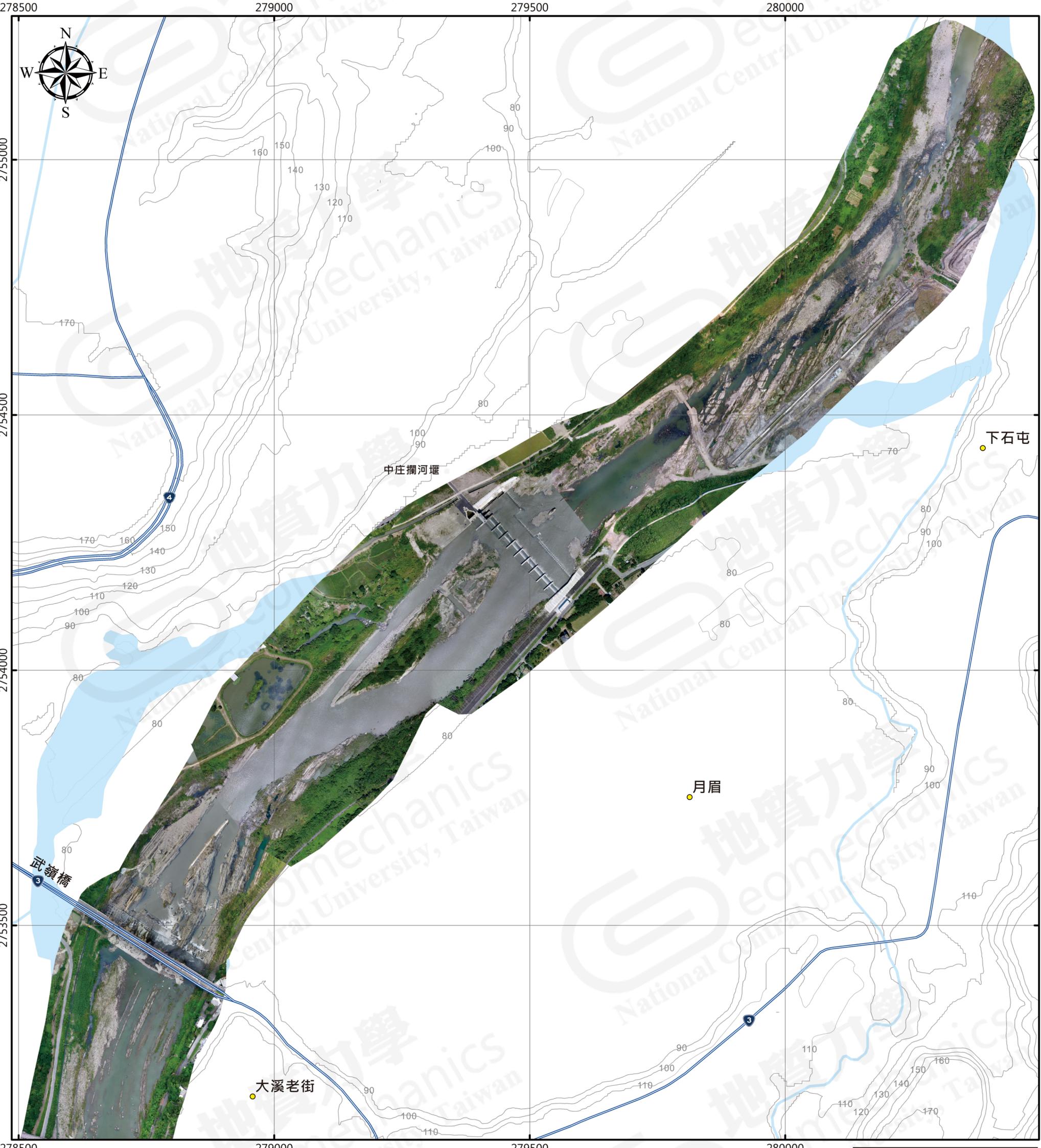


0 250 500 1,000 公尺

航照拍攝期間：西元2016年1月至7月



圖例	
	國道
	省道
	地名
	水系



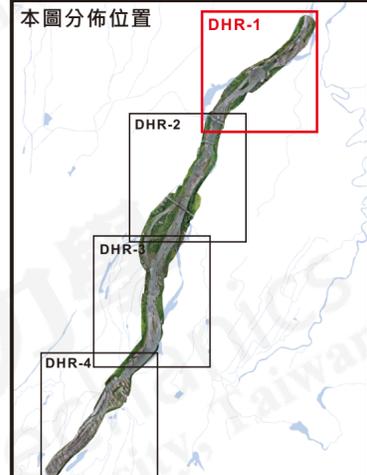
- 圖 例**
- 省道
 - 地名
 - 等高線(公尺)
 - 水系

比例尺：五千分之一

0 500 1000 2000
公尺

地圖上1公分相當於實際50公尺
 座標系統：二度分帶TWD97
 道路資料：交通部開放國道與省道資料
 地形資料：內政部20公尺網格數值地形模型
 航照拍攝時間：西元2016年1月至7月

製圖：范書睿



277500

278000

278500

279000



277500

278000

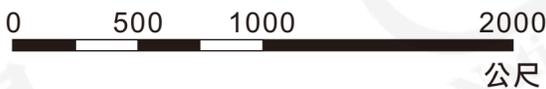
278500

279000

圖 例

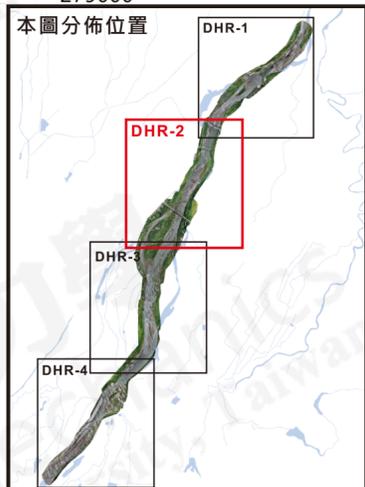
- 省道
- 地名
- 等高線(公尺)
- 水系

比例尺：五千分之一



地圖上1公分相當於實際50公尺
 座標系統：二度分帶TWD97
 道路資料：交通部開放國道與省道資料
 地形資料：內政部20公尺網格數值地形模型
 航照拍攝時間：西元2016年1月至7月

製圖：范書睿



277000

277500

278000

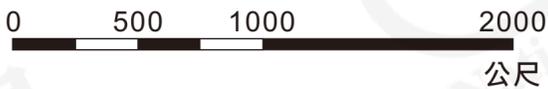
278500



圖例

-  省道
-  地名
-  等高線(公尺)
-  水系

比例尺：五千分之一



地圖上1公分相當於實際50公尺

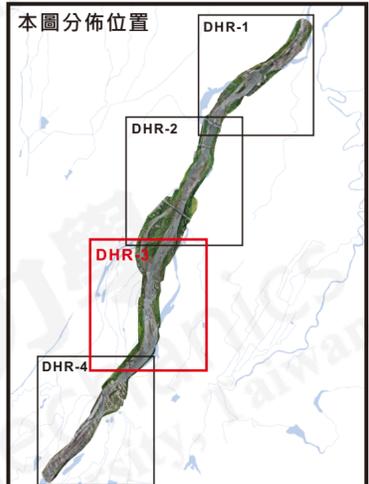
座標系統：二度分帶TWD97

道路資料：交通部開放國道與省道資料

地形資料：內政部20公尺網格數值地形模型

航照拍攝時間：西元2016年1月至7月

製圖：范書睿



276000

276500

277000

277500



崁頂

溪洲

圖例

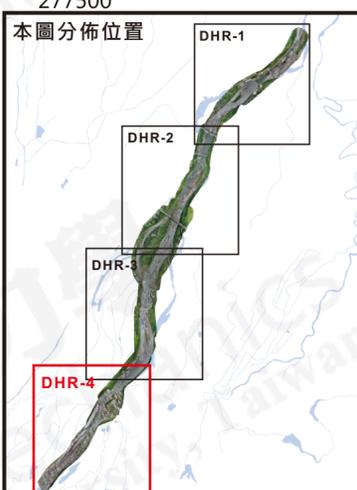
- 省道
- 地名
- 等高線(公尺)
- 水系

比例尺：五千分之一

0 500 1000 2000
公尺

地圖上1公分相當於實際50公尺
 座標系統：二度分帶TWD97
 道路資料：交通部開放國道與省道資料
 地形資料：內政部20公尺網格數值地形模型
 航照拍攝時間：西元2016年1月至7月

製圖：范書睿



附錄三 臺灣沉積岩單壓強度表

臺灣沉積岩單壓強度統計表（施國欽與李彪，1994）¹⁴

地質時代	地層	岩性	取樣地區*	組數	Q _u (kg/cm ²)					
					極大值	極小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
上新世 更新世	隆起珊瑚礁	石灰岩	46	3	126.62	68.76	98.11	121.74	74.48	23.63
	楊梅層	砂岩	23、42、45	25/28	196.87	1.18	33.67	80.05	0	46.38
	楊梅層	泥岩	29、45	10/11	110.00	1.39	27.63	57.51	0	29.88
	頭嵙山層	砂岩	5、9、23、34	92	154.73	2.92	30.59	60.56	0.63	29.96
	頭嵙山層	頁岩	23、37	4	61.22	7.09	39.05	62.23	15.87	23.18
	頭嵙山層	泥岩	23、37	7/9	54.62	2.12	26.41	45.09	7.74	18.68
	頭嵙山層	砂頁互層	37	2	14.71	5.56	10.14	14.71	5.56	4.58
	頭嵙山層	砂頁夾層	37	1	—	—	44.07	—	—	—
	二重溪層	頁岩	30	3	157.16	69.76	100.98	140.79	61.17	39.81
二重溪層	泥岩	30	13	11.77	4.71	7.72	9.89	5.56	2.17	
上新世	卓蘭層	砂岩	12、23、27、35、37、44	112	209.93	0.83	36.54	78.90	0	42.36
	卓蘭層	頁岩	19、44	12/13	275.44	1.83	65.12	147.24	0	82.12
	卓蘭層	泥岩	14、23、27、37	24	44.94	2.42	14.69	26.14	3.24	11.45
	卓蘭層	砂頁互層	37	3	21.97	2.81	13.26	21.17	5.34	7.92
	卓蘭層	砂頁夾層	37	8	22.79	2.70	13.07	20.81	5.33	7.74
中新世 晚期	桂竹林層	砂岩	7、10、23、43	17	339.43	3.33	102.02	186.78	17.26	84.76
	桂竹林層	頁岩	7、23	2	198.41	88.27	143.34	198.41	88.27	55.07
	南勢坑層	砂岩	28	16	354.00	44.02	194.19	278.11	110.27	83.92
	南莊層	砂岩	22	13	820.16	66.61	407.37	635.74	179.00	228.37
南莊層	頁岩	22	1	—	—	182.70	—	—	—	
中新世 中期	南港層	砂岩	4	5	231.52	6.49	107.72	181.95	33.49	74.23
	南港層	砂岩	11	26	206.88	18.00	66.61	116.63	16.59	50.02
	南港層	砂岩	13	2	116.67	47.23	81.95	116.67	47.23	34.72
	南港層	砂岩	20	58	167.53	17.55	94.51	127.63	61.40	33.11
	南港層	砂岩	22	29	327.38	5.02	72.59	158.40	0	85.81
	南港層	砂岩	36	15	323.68	12.89	120.41	208.90	31.91	88.49
	南港層	砂岩	38	85	755.00	17.00	322.39	479.80	164.97	157.41
	南港層	砂岩	33	3	119.27	25.71	83.53	124.80	42.27	41.27
	南港層	頁岩	22、36、38	8	31.00	13.72	23.06	28.88	17.24	5.82
	南港層	砂頁夾層	22、36、38	4	21.06	8.83	15.07	19.74	10.40	4.67
	石底層	砂岩	8、13、31、32	21	226.96	10.94	88.75	146.27	31.24	57.52
	石底層	頁岩	13	1	—	—	57.59	—	—	—
	石底層	砂頁互層	13、31、39	6	161.84	11.19	61.62	115.63	7.61	54.01
中新世 早期	大寮層	砂岩	17、23、24、26、41	44	735.71	14.56	275.44	458.55	92.34	183.10
	大寮層	頁岩	3、8、24	10	391.09	15.00	127.79	249.29	0	121.50
	大寮層	砂頁互層	15	1	—	—	209.60	—	—	—
	大寮層	砂頁夾層	6	1	—	—	557.63	—	—	—
	木山層	砂岩	16、18、21、40	21	761.07	101.44	269.80	428.08	111.52	158.28
	木山層	頁岩	40	11	284.91	52.65	163.35	234.44	92.26	71.09
	木山層	砂頁互層	40	6	416.00	66.13	228.42	364.79	92.05	136.37
	五指山層	砂岩	38、40	80	755.00	55.00	292.62	436.31	148.93	143.69
五指山層	頁岩	38	1	—	—	227.00	—	—	—	

*註：取樣地區編號

1八斗子2八堵3士林4大安5大里6大武崙7大埔8中和9中南二高10中壢11內湖12斗六13木柵14王田15台北市16外雙溪
17正濱18石門19名間20南港21安康22汐止23板橋~後龍溪24松山25金山26信義27南投~彰化28美濃29桃園30烏山頭
31基隆32深坑33深澳34通霄35造橋36景美37新竹~通霄38新店39瑞芳40萬里41萬華42龍潭43礁溪44壽峰45寶山46蘭嶼

¹⁴ 表格中的單壓強度 q_u 之單位 kg/cm^2 應指 kgf/cm^2 ，是壓力單位。1 $kgf/cm^2 = 0.098$ MPa。