

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Geology

National Central University

Master Thesis

台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特徵與

隱示

Rock Characteristics of the Chegualin Fault
Zone in Mudstone Area, Southwestern Taiwan
and their Implications

研究生：陳新翰

Student: Hsin Han Chen

指導教授：黃文正 博士

Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國一百一十年六月

June, 2021



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： 陳朝毅 學號： 108624009

論文名稱： 台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特徵與隱示

指導教授姓名： 黃文正 老師

系所： 應用地質研究所 博士班 碩士班

填單日期： 110年7月15日

備註：

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

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質研究所碩士班學系/研究所陳新翰研究
生所提之論文台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特
徵與隱示 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

110年6月21日

104.07.24

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

應用地質研究所碩士班學系/研究所陳新翰研究
生所提之論文台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特
徵與隱示 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

葉恩偉

委

員

許文正

郭力翰

陳政同

中華民國 110 年 6 月 21 日

台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特徵與隱示

中文摘要

泥岩為軟弱岩體，在受大地應力作用時會產生與堅硬岩體不同的變形行為。本研究以車瓜林斷層為例，對其進行野外地表地質調查、地質剖面清理以及岩心分析，透過由公釐至公里不同等級的中視尺度觀察，紀錄跨泥質斷層帶的構造變化及岩石特徵。車瓜林斷層位於台灣西南部的泥岩區，斷層上下盤皆為古亭坑層，是一條東北-西南走向且現今活躍的左移逆斷層，總長約 22 公里。經野外地表地質調查發現，車瓜林斷層自大廊亭山至千秋寮一帶可以於野外良好追跡約 5 公里，斷層上盤為厚層泥岩偶夾薄層至中層砂岩；下盤則多為巨厚泥岩。斷層帶出露寬度約 10-30 公尺，產狀為黃褐色與深黑色泥質條帶所交織的寬帶，顏色上與斷層帶兩側的灰色泥岩有所差異。然而斷層帶中的細部組構在泥岩表面清理的前後有顯著的差異，因此，本研究選定車瓜林斷層的兩個露頭分別進行地質剖面及鑽井的施作，以剔除斷層帶受地表風化的因子。地質剖面及岩心分析的結果顯示，於斷層露頭上的泥質岩多具鱗片狀裂理，裂面帶有擦痕且破裂面的方向具有一致性，數十公尺的斷層帶中主要有兩種岩體單元：含砂質角礫泥岩及含黑色條帶泥岩。含砂質角礫泥岩中，砂質碎屑呈數公分至公釐的角礫或透鏡狀被泥質基質包夾；泥岩中則出現數公釐寬的密集黑色條帶狀構造並常夾有角礫狀泥質碎屑，且碎屑長軸具方向性的排列。前人對於黑色條帶的成因主要為純粹碎裂作用細粒化所致或同時有黏土礦物相的轉變，本研究所觀察到的黑色條帶常伴有擦痕及雷德剪切構造出現，故推測其為斷層作用下的產物，可作為應變集中的指標及車瓜林斷層活動的證據，亦可藉此觀察到泥岩斷層帶中應變集中的現象。然而本研究在缺少微觀的觀察狀況下，難以確定其完整的變形機制及

礦物組構以探討斷層演育，仍需後續的研究使泥岩斷層帶中的構造意義更加完備。

關鍵字：車瓜林斷層、斷層帶、活動斷層、古亭坑層、中尺度地質構造

Rock Characteristics of the Chegualin Fault Zone in Mudstone Area, Southwestern Taiwan and their Implications

Abstract

Fault zones tend to have different architectural characteristics in different protoliths. Mudstone, as an incompetent rock, usually deforms in a different way compared to competent rocks during faulting. This study focuses on the Chegualin active fault which mainly appears in the argillaceous Gutingkeng formation in the southwestern Taiwan. We have conducted surface geology survey, fault zone scraping and core analysis to document fault zones at mesoscopic scale. The Chegualin fault can be well traced for 5 km long from Mt. Dabuting to Cheinchouliao in the field. The fault ranging from 10 to 30 meters wide are seemingly composed of yellowish brown and darkly black intertwined stripes distinguished from the adjacent host rocks in grey. Commonly, massive mudstone occasionally intercalated with thinly to medium bedded sandstones occurs in the hanging wall while very thickly bedded mudstone in the footwall. The result from the outcrop section mapping and core analysis indicates that there are two major rock units in the fault zone, which are sandy breccia and black gouge bands. The black bands are centimeter to millimeter in thickness and contain clasts with prefer orientations. The fault outcrops and rock samples with black bands also show scaly fabric, slickenside and Riedel shear structure. Previous studies have shown that black bands in argillaceous fault zone may be attributed to grain size reduction or clay mineral phase change along with cataclasis. Based on our observation and literature review, we infer that black bands form under the low-rate, progressive deformation of faulting and can be considered as the strain

localization indicators. However, it's difficult to completely determine the deformation mechanism and mineral assemblage because relevant microscopic observations are lacking. A further study at microscopic scale is necessary in order to resolve how a fault zone in argillaceous rock may evolve.

Keywords: Chegualin fault, fault zone, active fault, Gutinkeng formation, mesoscopic geological structure

致謝

終於可以打致謝了，這一切真的是太苦了。首先還是先得感謝我的指導老師黃文正老師，有老師所給予的資源及機會我才得以進行研究，以及願意花許多的時間與學生討論，加入研究室的三年以來讓我進步了許多也獲益良多；感謝董家鈞老師及 Maryline 老師在課堂上的教導與鞭策；更感謝三位口試委員葉恩肇老師、郭力維老師、及陳致同老師對我論文的提點及各種指引，使我的論文能更具有意義；以及科博館的王士偉老師，老師耐心且熱情的指導，讓我能更好的呈現我的樣本及觀察。剩下來的空間要感謝的人太多了，能在這間研究室兩年準時畢業根本是拚死拚活後的生命奇蹟，先從大四便開始超前部屬、堅持不懈的自己開始感謝，雖中間無數次有放棄的慾望但還是堅持了下來，論文口試還被打得一塌糊塗，但已經不錯了。感謝研究室的智偉，好幾次心態都要不行了，很多事沒有你我真的是扛不住；感謝廷瑜、雅筑兩位優秀的學姐以及奕維、Tri、毓呈三位學長不論是平時在研究室還是在我研究上所給予的幫忙及建議，都對我有深深的幫助，當然還有帶我第一次踏入泥岩野外的于鈞學長，真的泥岩少碰保平安，有夠難搞。還有時常被拖去出野外的中威還有納米，平常還幫我處理了一堆事情，希望我在你們心目中是個有料的好學長。感謝研究室的 Vicky、琮錡、蘭芝、長志還有承家在研究上的幫忙及陪伴。

最後感謝我的家人所給予我經濟上的援助以及溫暖的陪伴及支持，讓我有力量可以在這兩年中挺過，以及這一路陪伴我的女朋友子鈞，希望你的論文也能順順利利，還有好幾次差點把我論文刪掉的臭貓辛巴，讓我有強健的心態面對各種挑戰，我愛你們，讚。

目錄

中文摘要	i
Abstract	iii
致謝	v
目錄	vi
圖目錄	ix
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究目的	5
第二章 研究區域概述	6
2-1 地形	6
2-2 地質概況	8
第三章 前人文獻回顧	11
3-1 車瓜林斷層地表地質調查	11
3-2 車瓜林斷層活動性研究	13
3-3 斷層在泥岩中的特性	16
第四章 研究方法	21
4-1 斷層沿線地質調查與追跡	21
4-2 地質剖面開挖	26
4-2-1 剖面選址	27
4-2-2 開挖流程	29

4-3 鑽井及岩心分析	31
4-3-1 鑽井選址及設計	31
4-3-2 鑽井流程	32
第五章 結果	35
5-1 地表地質調查	35
5-1-1 半天寮	35
5-1-2 大廊亭山	38
5-1-3 高 40 公路.....	40
5-1-4 國道三號南北兩側.....	47
5-1-5 南勢湖	51
5-1-6 雞冠山	56
5-2 地質剖面清理	57
5-3 岩心分析.....	75
第六章 討論	85
6-1 車瓜林斷層帶中的岩體特徵.....	85
6-1-1 泥岩斷層帶中的岩體單元	85
6-1-2 車瓜林斷層帶與其他泥質斷層帶之特徵比較	87
6-2 泥岩斷層帶中的黑色條帶.....	89
第七章 結論與建議.....	92
7-1 結論.....	92
7-2 建議.....	93

參考文獻	94
附錄一 鑽井岩心照片	101
附錄二 口試委員建議	105

圖目錄

圖 1 台灣的孕震構造及地震危害度分析	3
圖 2 台灣西南部由 PSInSAR 所獲得之 LOS 速度場圖	4
圖 3 車瓜林斷層周邊地形圖	7
圖 4 旗山圖幅地層出露區域與生物地層對照	9
圖 5 車瓜林斷層地層分布條帶圖	10
圖 6 中油及地調所所劃定的車瓜林斷層跡圖	12
圖 7 國道三號中寮隧道北口的構造運動示意圖	14
圖 8 由 Ching et al. (2016) 所提出的國道三號區域地體構造模型 ...	15
圖 9 車瓜林斷層及旗山斷層地形剖面圖	15
圖 10 在堅硬岩體中脆性斷層帶的構造示意圖	18
圖 11 斷層在堅硬及軟弱岩體中的發育模型	18
圖 12 雷德剪切面(Riedel shear)示意圖	19
圖 13 泥岩斷層帶中所出現表面光滑且帶有擦痕的鱗片狀泥岩	19
圖 14 泥岩斷層帶在微觀下所會觀察到的構造	20
圖 15 本研究使用之無人機機型	22
圖 16 本研究空拍執行流程	23
圖 17 無人機操作情形	24
圖 18 惡地地形中的泥岩露頭	24
圖 19 構造等高線之概念及其示意圖	25
圖 20 構造等高線及地形等高線關係圖	25
圖 21 車瓜林斷層的野外之露頭	26
圖 22 地質剖面清理位置圖	28
圖 23 車瓜林斷層帶的野外露頭斜拍影像	28
圖 24 剖面開挖流程	30

圖 25 本研究地質鑽井施作地點	33
圖 26 鑽井位置露頭斜拍圖	33
圖 27 鑽井流程	34
圖 28 車瓜林斷層於半天寮的露頭空照影像.....	37
圖 29 半天寮野外露頭的兩組剪切帶	37
圖 30 大廊亭山南端東側的露頭	39
圖 31 大廊亭山西側的露頭.....	39
圖 32 高 40 北側至大廊亭山間所出露的車瓜林斷層露頭	41
圖 33 高 40 公路南側所出露的車瓜林斷層露頭.....	42
圖 34 高 40 公路南側車瓜林斷層上盤所出露的連續砂岩層面	42
圖 35 車瓜林斷層帶中表面所覆蓋的大量砂岩以及方解石碎屑	43
圖 36 高 40 公路南側車瓜林斷層產狀	43
圖 37 斷層帶中呈現鱗片狀的泥岩	44
圖 38 高 40 公路南側車瓜林斷層露頭及分支斷層露頭位置	44
圖 39 高 40 公路南側的車瓜林分支斷層的露頭產狀	45
圖 40 高 40 公路南側的車瓜林分支斷層露頭中所出現的層面	45
圖 41 高 40 公路南側車瓜林分支斷層露頭上的黑色條帶	46
圖 42 國道三號北側的車瓜林斷層露頭遠照.....	48
圖 43 國道三號北側的車瓜林斷層露頭	48
圖 44 國道三號北側的車瓜林斷層露頭近照.....	49
圖 45 國道三號南側的車瓜林斷層露頭	50
圖 46 國道三號南側的車瓜林斷層露頭內部組構.....	50
圖 47 車瓜林斷層於南勢湖之露頭產狀	52
圖 48 車瓜林斷層於南勢湖露頭北側之道路有明顯破壞的跡象	52
圖 49 車瓜林斷層南勢湖露頭上盤清晰的砂岩層面	53

圖 50	南勢湖露頭的斷層帶中連續的砂岩層面.....	54
圖 51	與車瓜林主斷層相距約 200 公尺的泥岩露頭.....	55
圖 52	雞冠山東側的泥岩露頭.....	56
圖 53	剖面影像圖及立面測繪結果.....	61
圖 54	剖面所劃分各單元於整個露頭上的分布.....	63
圖 55	剖面 0~5m 處編號 A 區局部構造素描圖.....	64
圖 56	剖面 5~10m 處編號 B 區局部構造素描圖.....	65
圖 57	剖面 14~19m 處編號 C 區局部構造素描圖.....	66
圖 58	剖面 28~34m 處編號 D 區局部構造素描圖.....	67
圖 59	黑色破碎泥岩中受拖曳及旋轉的碎屑.....	68
圖 60	黑色破碎泥岩手樣本表面的清晰擦痕.....	68
圖 61	黑色破碎泥岩研磨拋光後的手樣本.....	69
圖 62	黃色破碎泥岩的露頭產狀.....	69
圖 63	黃色破碎泥岩研磨拋光後的手樣本.....	70
圖 64	緻密泥岩中的束狀黑色條帶.....	71
圖 65	緻密泥質岩中含黑色調帶之泥岩研磨拋光後的手樣本.....	72
圖 66	斷層帶下邊界及黃色破碎泥岩、黑色破碎泥岩交界.....	73
圖 67	剖面 5m 處編號 B1 區局部構造素描圖.....	73
圖 68	剖面 28~34 米處灰色緻密泥岩尚未清理前的露頭表面.....	74
圖 69	岩心判釋成果.....	78
圖 70	完整砂岩近照.....	79
圖 71	完整砂岩在岩心中的產狀.....	79
圖 72	破碎砂岩近照.....	80
圖 73	破碎砂岩在岩心中的產狀.....	80
圖 74	以泥質基質支持的含砂岩角礫泥質岩.....	81

圖 75 含黑色條帶的含砂質角礫泥質岩	82
圖 76 岩心截面上所出現的擦痕.....	83
圖 77 含黑色條帶之泥岩近照.....	84
圖 78 含黑色條帶之泥岩於岩心中的產狀	84
圖 79 利吉混同層中的 SC 構造.....	88
圖 80 泥岩中具有黑色條帶的手樣本	91

第一章 緒論

1-1 前言

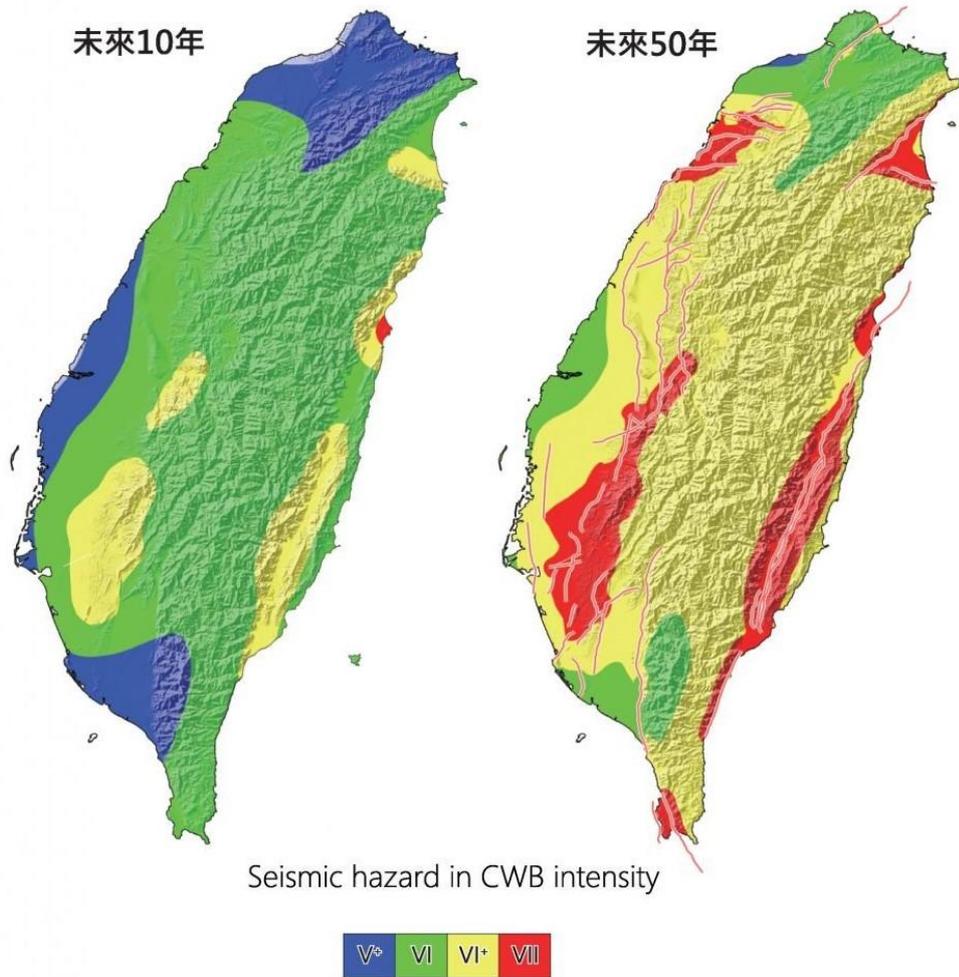
台灣西南部在地震危害度的評估上相較台灣其他區域有較高的潛勢(圖 1)(Chan et al., 2020)，車瓜林斷層位於台灣西南部泥岩區，斷層上下盤皆為古亭坑層，車瓜林斷層呈東北-西南走向，為具有左移分量的逆斷層。車瓜林斷層雖尚未收錄於中央地質調查所的活動斷層目錄中，但已有多項研究表明車瓜林斷層所具有的活動性。近期亦有研究利用鑽井岩心分析指出車瓜林斷層應至少屬於第二類活動斷層(劉彥求和林啟文，2019)；藉由干涉合成孔徑雷達(InSAR)的遙測成果也可以觀測到在台灣西南部有明顯構造抬升的現象，且此構造抬升的活動邊界與車瓜林斷層及旗山斷層的斷層線重合(趙荃敏，2016)。此構造抬升的現象也造成了國道三號中寮隧道近北口處自開通以來的變形及破壞(圖 2)(Ching et al., 2016；張李群，2014；陳勇昇，2015；景國恩，2016)，且疑似在車瓜林斷層向西南延伸的部分也造成高速鐵路軌道的錯移，並向西延伸至至國道一號(荊國彰，2019；趙家賢，2019；謝尊堯，2020)，該區域在未來也有科學園區的相關建設計畫。由此可見，車瓜林斷層在台灣西南部具有一定的威脅及重要性。

在過往的研究中，脆性斷層帶的特性及演育皆有詳盡的報導與紀錄，這些研究以不同的方法分析斷層帶中的構造特性，將其構造分區，如斷層核心(fault core)及斷層破壞帶(damage zone)等(Sibson, 1977；Caine et al., 1996；Choi et al., 2016)。泥岩佔全球沉積岩的 80%(Stow, 1981)，在受大地應力的作用下，泥岩斷層帶有其獨特的變形行為。其受斷層作用時的變形行為也與堅硬岩體(competent rock)不同，斷層帶

產狀也就與脆性斷層帶(brittle fault zone)有所差異，隨著砂岩及泥岩比例的變化，斷層帶中更是能觀察到不同的變形行為(Pei et al., 2020)。

前人對於車瓜林斷層已有充分的證據證明其具有活動性，且對於車瓜林的出露位置亦有相當的瞭解(劉彥求和林啟文，2019)，斷層跡與大地觀測所觀察到的變形位置是相當吻合，然而斷層帶中的精細觀察則較為缺乏。本研究利用野外地表地質沿線調查、地質剖面開挖、無人機空拍影像測繪、手樣本的採集與拋光，以及岩心分析的方法進行車瓜林斷層的研究，記錄車瓜林斷層跨斷層的構造變化及岩石特徵，藉由觀察車瓜林斷層的中視尺度構造，探討泥岩中的斷層-車瓜林斷層的岩石構造特徵及隱示。

超越機率10%之地震震度分布圖



根據TEM孕震構造參數計算之地震危害度

Chan, C. H., Ma, K. F., Shyu, J. B. H., Lee, Y. T., Wang, Y. J., Gao, J. C., Yen, Y. T., & Rau, R. J. (2020). Probabilistic seismic hazard assessment for Taiwan: TEM PSHA2020. *Earthquake Spectra* 2020, 36(S1), 137–159.

圖 1 台灣的孕震構造及地震危害度分析。可見台灣西南部具有高度潛勢。(Chan et al., 2020)。

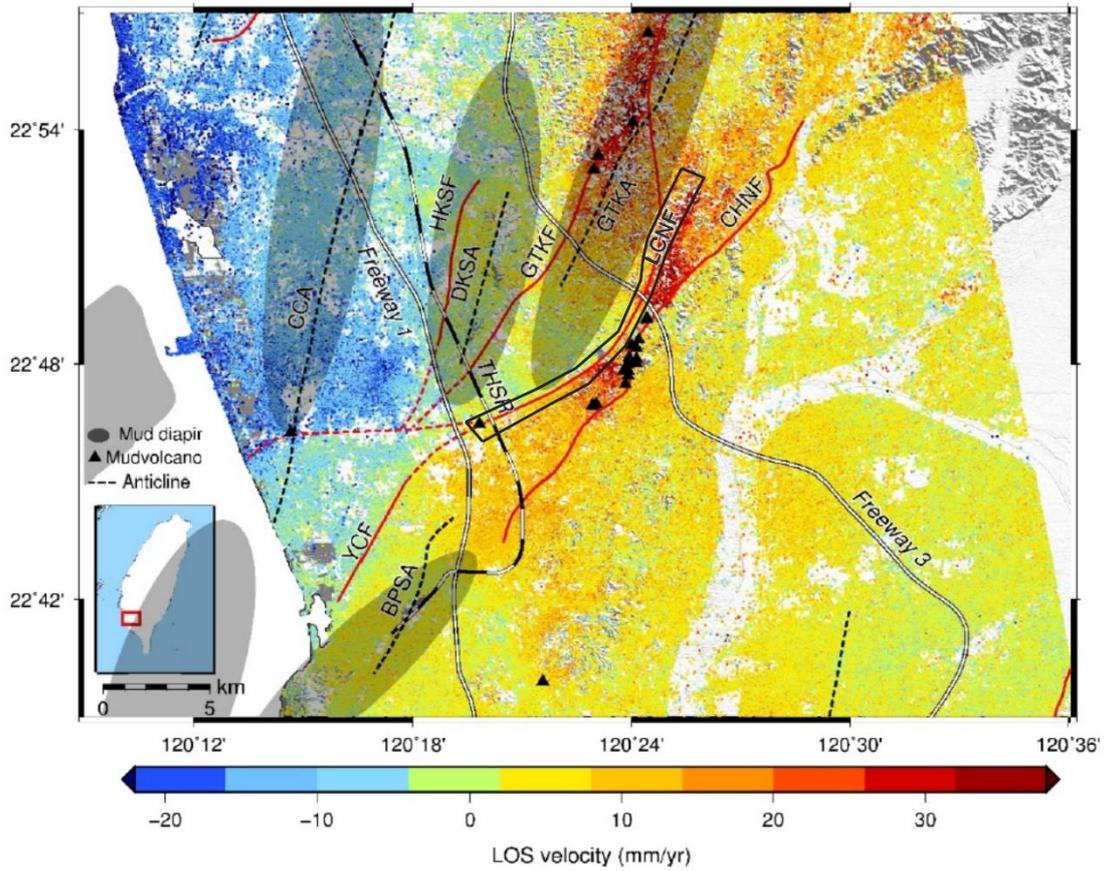


圖 2 台灣西南部由 PSInSAR 所獲得之 LOS 速度場圖。色階表示地表變形量之大小，可見龍船斷層(LCNF)與旗山斷層(CHNF，位於龍船斷層東側之紅線)間有異常的抬升量。車瓜林斷層於該篇文獻屬龍船斷層(LCNF)南段，以黑框標示(趙荃敏，2016；景國恩，2016)。

1-2 研究目的

車瓜林斷層位於古亭坑層中，古亭坑層的厚層泥岩所形成的惡地地形雖然擁有良好且廣闊的露頭分布，然而車瓜林斷層上下盤皆為古亭坑層泥岩，使車瓜林斷層難以利用地形的資訊進行判釋。本研究首先利用無人機高精度空拍及野外地質調查確立斷層的露頭分布，並進行沿線地質調查及追跡，利用構造等高線及地形等高線的作圖方式確認車瓜林斷層的斷層跡分布，再進行地質剖面及鑽井之選址。

前人對於車瓜林斷層的斷層位置已有良好的紀錄，且斷層跡分布與該區域構造抬升的邊界重合，顯示車瓜林斷層具有相當的活動性，然而車瓜林斷層帶中的野外精細特徵觀察報導則較為缺乏。泥岩在露頭表面因岩性的關係，往往被雨水沖刷的泥漿及崩積物所覆蓋，造成觀察及記錄上的困難。本研究利用地質剖面以及岩心分析以剔除風化因素，對車瓜林斷層進行精細地質調查，紀錄並歸納跨斷層的中視尺度構造變化及特徵，再參考既有的文獻，探討泥岩活動斷層帶中的岩石構造與特徵。

第二章 研究區域概述

2-1 地形

車瓜林斷層位於高雄市，斷層跡北起內門往南延伸至半天寮，再以東北西南的走向經大廊亭山，南至燕巢，全長約 22 公里，斷層沿線地形如圖 3 所示。車瓜林斷層沿線地區大多為泥岩惡地地形所形成之丘陵地形，在國道三號中寮隧道口至千秋寮附近，於車瓜林斷層跡東側約半公里處有一東北-西南走向的山脈，為由烏山層之砂岩所構成的中寮山，最高高程為 421 公尺。車瓜林斷層沿線自半天寮至車瓜林，以二仁溪支流所切割的惡地地形為主，所形成的丘陵都在海拔 100~150 公尺之間，此區域亦有砂岩或石灰岩透鏡體所構成的山脊，分別為大廊亭山、雞冠山及崎溜山。車瓜林斷層沿線皆為惡地地形，斷層帶並無造成地形特徵，難以地形判斷斷層線型崖，僅能透過斷層於野外斷層帶露頭的特殊產狀進行追跡。

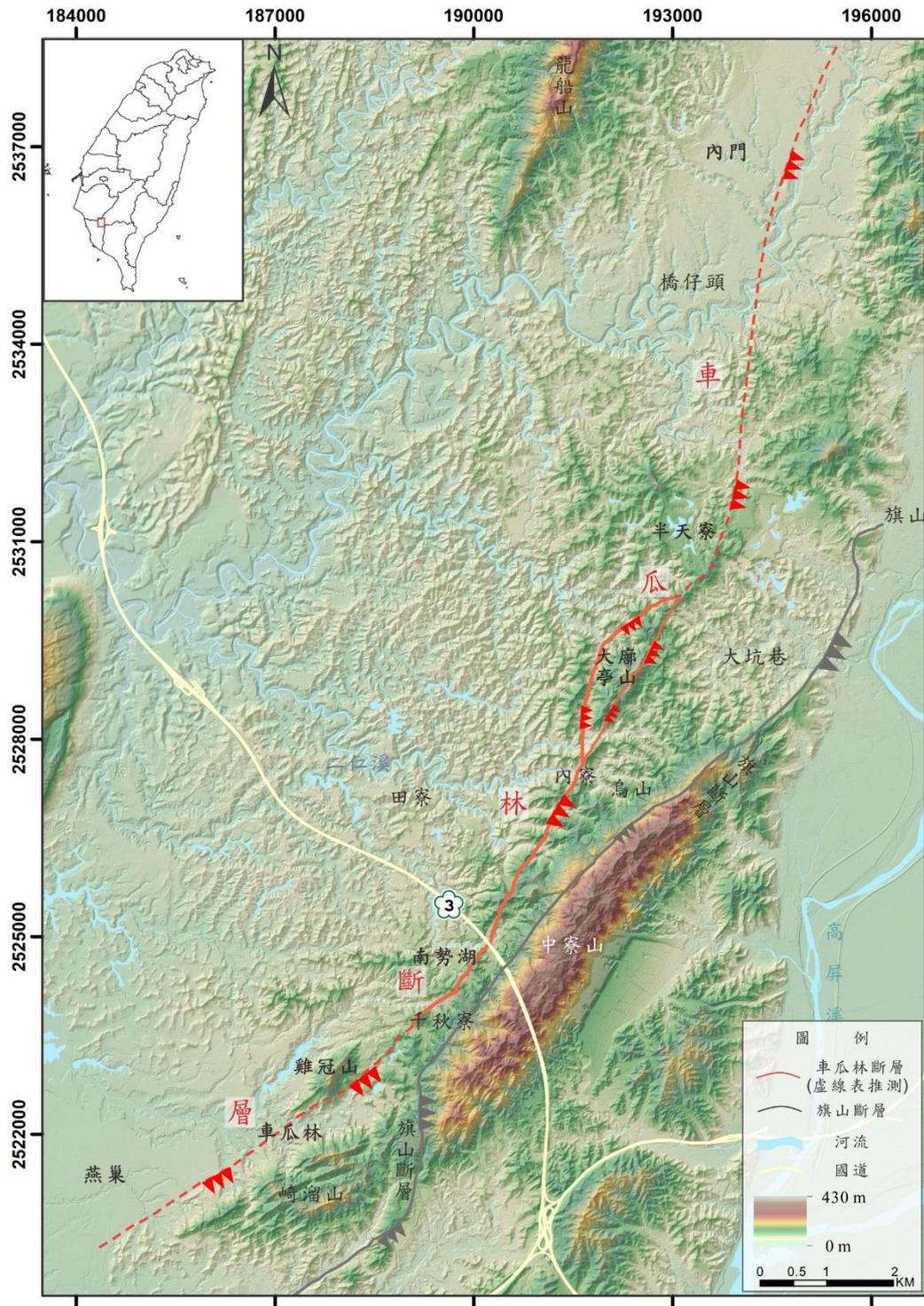


圖 3 車瓜林斷層周邊地形圖。車瓜林斷層跡參考自劉彥求與林啟文 (2019)，旗山斷層跡繪自地調所旗山圖幅(林啟文，2013)

2-2 地質概況

本研究區位於台灣西南部的高雄地區，以車瓜林斷層為核心，出露地層以古亭坑層之厚層泥岩為主，本研究採用旗山圖幅的地層劃分方式(表 1)並參考劉彥求與林啟文(2019)的斷層跡及細部的地層分布(圖 4 旗山圖幅地層出露區域與生物地層對照(紅框部分)(林啟文，2013)。本研究區皆位於古亭坑層中，地層年代為中新世晚期至更新世，以厚層泥岩為主。古亭坑層最早由烏居敬造(1932)所提出，岩性為厚層暗灰色泥岩為主並偶夾薄層砂岩，砂泥比率小於 1:10，其標準露頭位於高雄市田寮區古亭。古亭坑層分布於範圍廣，出露於新化、玉井並向南延伸至旗山及燕巢一帶，厚度可達數千公尺。

車瓜林斷層上下盤皆為古亭坑層，斷層的上下盤皆為古亭坑層泥岩。於斷層上盤的泥岩多為厚層泥岩偶夾薄層至中層砂岩，岩層多接近東北-西南走向；下盤則多為不具砂岩層理的巨厚(massive)泥岩。在古亭坑層的厚層泥岩中，亦存在砂泥互層與厚層砂之透鏡狀岩體，岩體分布位置可由地形所觀察，因砂岩抗風化程度較泥岩佳，可以形成較高聳的地形，分布於古亭坑層及車瓜林斷層沿線的砂岩透鏡體有大廊亭山及崎溜山，在地質分區上為稱為大廊亭山透鏡體及雞南山透鏡體，皆相當於段的位階(林啟文，2013)。

吉田要 (1932)	鳥居敬造 (1932, 1933)	耿文溥 (1981)	中國石油公司 (1989)	本(旗山)圖幅					
				木柵斷層以西 旗山斷層以北	旗山斷層 以東	木柵斷層 以東			
大岡山石灰岩		嶺口礫岩		崎頂層	嶺口礫岩				
崎頂層	崎頂層	關廟層	六雙層 二重溪層				崎頂層	嶺口礫岩	
砂岩層 石灰岩 頁岩質砂岩	砂岩層 頁岩質砂岩								
古亭坑層	古亭坑層	南化泥岩	古亭坑層	古亭坑層	泥岩	大社層			
砂質頁岩層 砂岩層	砂質頁岩層 砂岩層								
木柵層	木柵層	八張犁層	古亭坑層	南勢崙砂岩 蓋仔寮頁岩 烏山層	雞南山透鏡體 泥岩 龍船透鏡體 泥岩	南勢崙砂岩 蓋仔寮頁岩 烏山層	隘寮腳層 鹽水坑頁岩 糖恩山砂岩 長枝坑層		
砂頁岩互層 砂岩層 礫岩層 砂頁岩互層	頁岩層 砂頁岩互層 (含石灰岩、玄武岩)	十六份頁岩 南勢坑層 石內層							

表 1 旗山圖幅地層對比表與研究區域主要出露地層(紅框部分)(林啟文, 2013)。

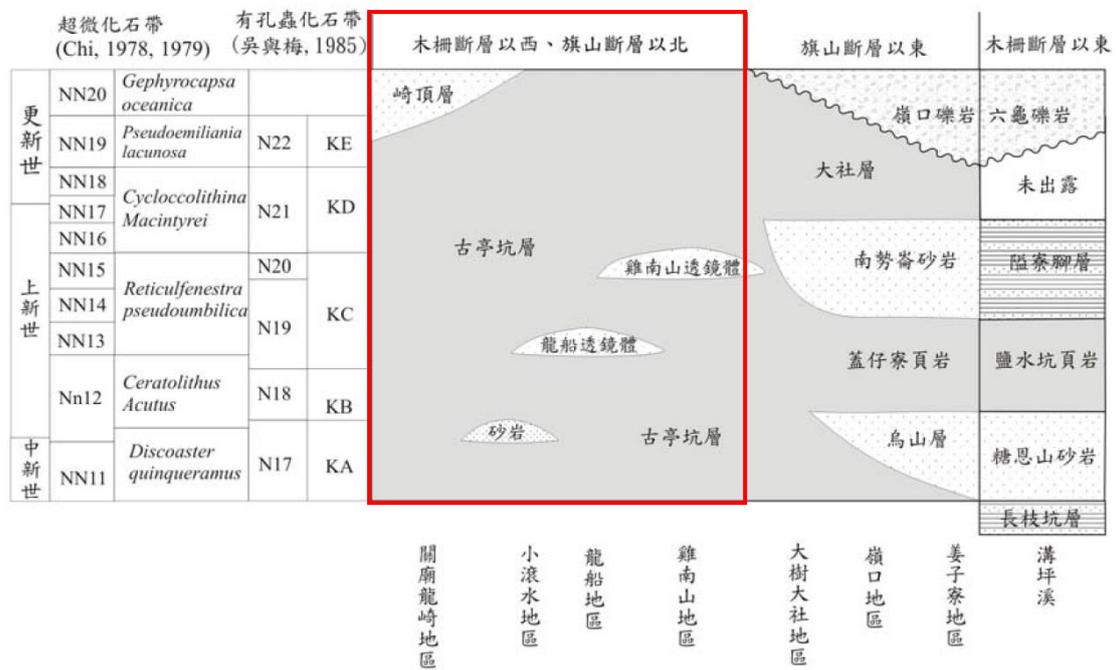


圖 4 旗山圖幅地層出露區域與生物地層對照(紅框部分)(林啟文, 2013)。

第三章 前人文獻回顧

3-1 車瓜林斷層地表地質調查

車瓜林斷層為一條在台灣西南部，大致呈東北-西南並帶有左移分量的逆斷層。車瓜林斷層最早為龍船斷層的南段，在崎溜附近併入旗山斷層(吉田要，1932)，孫習之(Sun,1965)的地質圖中認為旗山斷層在千秋寮附近轉向東南方連接深水斷層，而後在徐慶雲(1975)的地質圖中將大廊亭山經崎溜至燕巢的斷層改稱為龍船斷層。直到陳文山等(2012)藉由野外地質調查發現龍船斷層南段與北段的構造特性有所不同，建議將龍船斷層南段自大廊亭山經崎溜至燕巢之斷層改稱為車瓜林斷層。林啟文等(2012)在經濟部中央地質調查所所出版的旗山圖幅中根據斷層的位置、特性及兩側出露岩層的差異，將車瓜林斷層由龍船斷層南段區分出來(圖 6)。然而，車瓜林斷層的向南延伸仍存在不確定性，在燕巢以西南的區域地表皆為沖積物所掩蓋，難以進行斷層追跡，趙家賢(2019)利用大地測量資料及觀察到地表變形並造成高速鐵路軌道的結構位移，荊國彰(2019)亦觀測到此地表變形可能一路延伸至國道一號，並推測與車瓜林斷層的活動有關。

在大廊亭山以北，車瓜林斷層經半天寮至內門原被稱為橋仔頭斷層(徐慶雲，1975)，斷層兩側均為厚層泥岩偶夾薄層砂岩，因該處多為沖積物覆蓋，僅能由位態推測斷層可能延伸位置，劉彥求與林啟文(2019)將其與車瓜林斷層以表推測的虛線連接並延伸至木柵斷層下盤，該篇研究亦對車瓜林斷層進行了沿線的地質調查，報導了斷層沿線多處露頭的出露，露頭於野外可連續追跡，且斷層跡與大地觀測資料所判定的構造抬升邊界相符。該研究對露頭有遠距至中距的觀察，

然而對於車瓜林斷層帶中的內部組構報導則較為缺乏。

車瓜林斷層的幾何形貌也有前人以野外地質調查以及大地測量資料反演算的方法進行過調查，車瓜林斷層於大廊亭山以北呈現北東北走向，傾角為 50° - 70° 向東；車瓜林斷層在大廊亭山以南經南勢湖至車瓜林的走向則轉為約北 30° 東，傾角 20° - 50° 之間並向東傾；而車瓜林以西南的區域出露不佳，則難以追蹤，以大地觀測資料及排鑽推定車瓜林斷層於此呈東北東走向並以約 20° - 40° 的角度向南傾(陳柏村，2005；林啟文等，2012；張李群，2014；劉彥求與林啟文，2019)。

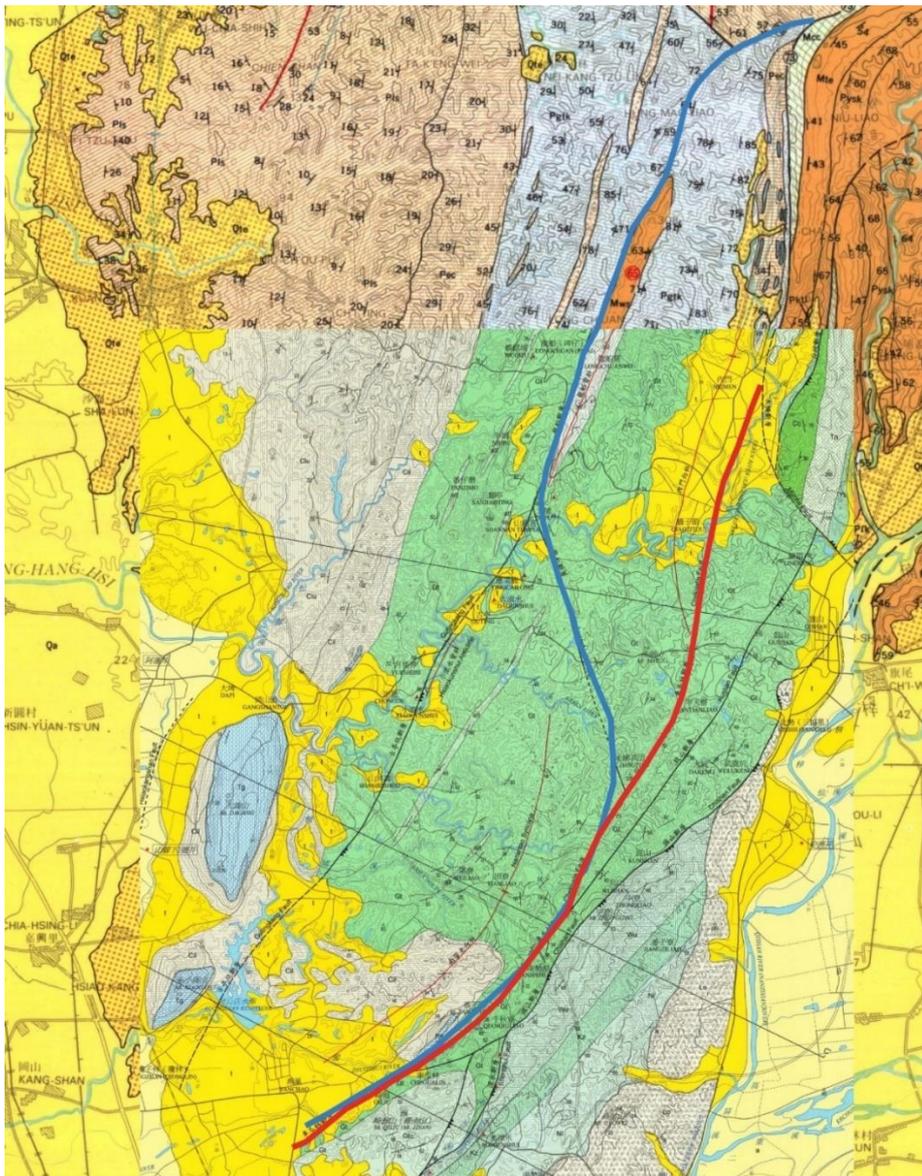


圖 6 中油地質圖(藍線)及地調所地質圖(紅線)所劃定的車瓜林斷層跡。

3-2 車瓜林斷層活動性研究

斷層的活動常引發災害性的地震，斷層的活動性及其造震與否與斷層地質敏感區的劃定和防災減災息息相關。車瓜林斷層尚未被劃入經濟部中央地質調查所的活動斷層目錄之中，但近年來陸續有研究指出台灣西南部現今有構造抬升的現象，且有一構造抬升邊界正好與車瓜林斷層跡與旗山斷層跡重合。

中寮隧道自開通以來隧道結構持續地受到損毀，國立成功大學與台灣世曦工程股份有限公司在中寮隧道北口附近設置大地監測網(包含 GPS 連續站、GPS 移動站、導線點與水準點)，利用 2011 年至 2014 年的觀測資料，發現在車瓜林斷層上盤與旗山斷層下盤間的水平與垂直速度場明顯高於周圍的區域速度場，在跨車瓜林斷層之垂直斷層走向分量有約 46.6 ± 16.4 mm/yr 之擠壓量且為左移，造成車瓜林斷層與旗山斷層間的地塊抬升(圖 7)(張李群，2014；陳勇昇，2015；景國恩，2017；楊名等，2018)，並由 2007 至 2011 的 PSInSAR 所得出的衛星視線(LOS)平均速度圖可觀察到車瓜林斷層跡的位置與速度梯度急遽變化的線型區域有所重疊(趙荃敏，2016)。陳勇昇(2015)利用斷層模型推測車瓜林斷層傾角為 32° 至 41° ，斷層鎖定深度約 0.1 公里且震間滑移速度約 1.2 mm/yr 的潛移斷層，許書琴(2012)認為泥岩區的活動斷層因應力不易累積，使斷層活動形式以潛移為主，與前者的看法一致。

除了由遙測資料所獲取的資訊，於中寮隧道北口鄰近處所設置的傾測管亦有發現地下通過車瓜林斷層帶的位置有明顯變位，平均變化量為 3-4 公厘/月(陳國隆等，2018)。此外，地調所於車瓜林斷層南端進行排鑽，發現屬崎頂層的疏鬆砂岩逆衝到沖積層上，斷面傾角約 50 度，且炭物質定年結果為 32730 ± 240 BP，顯示車瓜林斷層至少屬於

第二類活動斷層(劉彥求與林啟文，2019)。

有學者認為於台灣西南部的抬升較為局部，且該區域與外海的泥火山及泥灌入體有空間上的線性分布關係，故認為有可能是泥灌入體所造成(圖 8)(Sung et al., 2010；許書琴，2012；陳松春，2013；Ching et al., 2015)；李錫堤(2017)根據地表速度場的觀察則認為該處為車瓜林斷層的背衝斷層系統所導致(圖 9)；郭鶯萍(2017)則利用大地測量資料及有限數值模擬討論該區域的變形，認為主控的變形機制為為於車瓜林斷層下盤的疊覆構造(duplex structure)及位於古亭坑層高壓層中的向西傾斷層所致。儘管此處的抬升機制仍存在爭議，但不可否認車瓜林斷層在此構造運動所扮演的重要角色。

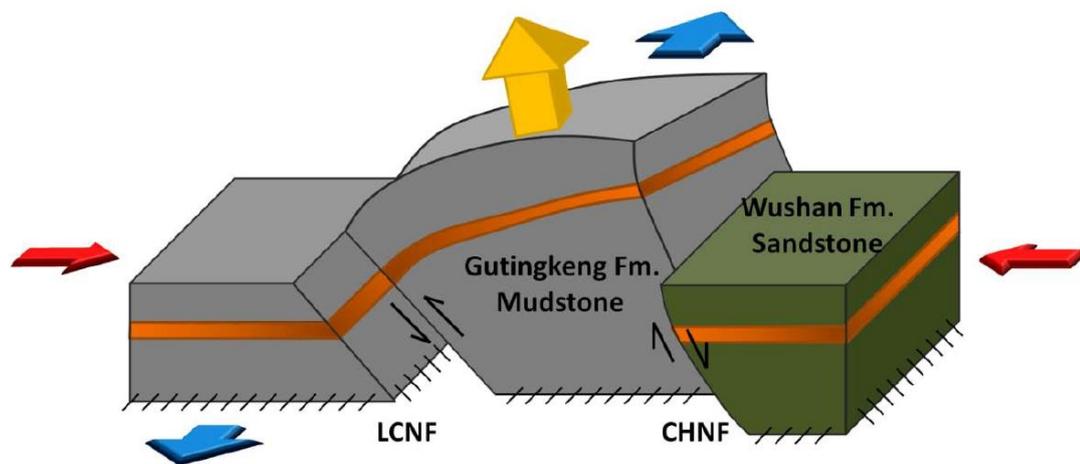


圖 7 國道三號中寮隧道北口的構造運動示意圖(張李群，2014)。LCNF 為龍船斷層南段(車瓜林斷層)；CHNF 為旗山斷層，以兩斷層為邊界，藉由大地測量資料發現中間的地塊有向上抬升的現象。

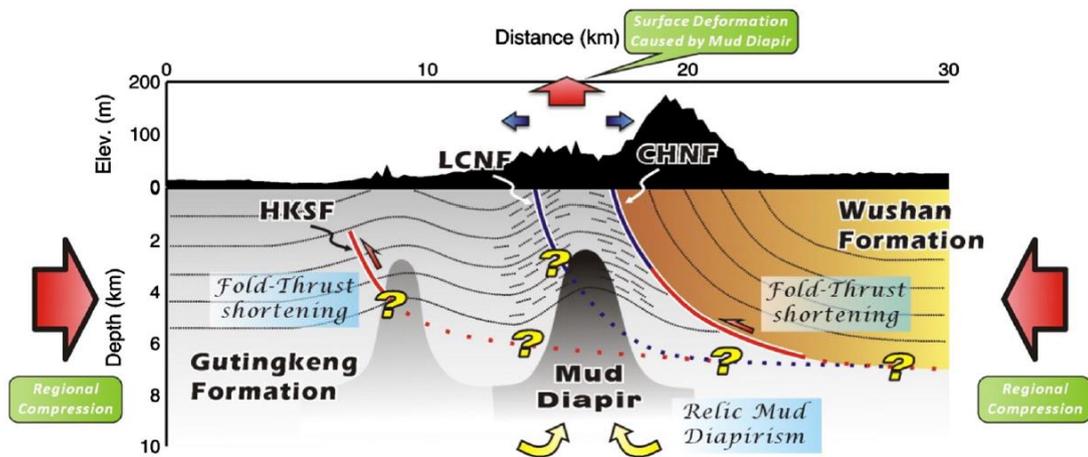


圖 8 由 Ching et al. (2016) 所提出的國道三號區域地體構造模型，並以泥灌入體的活動解釋車瓜林斷層及旗山斷層間的構造運動。

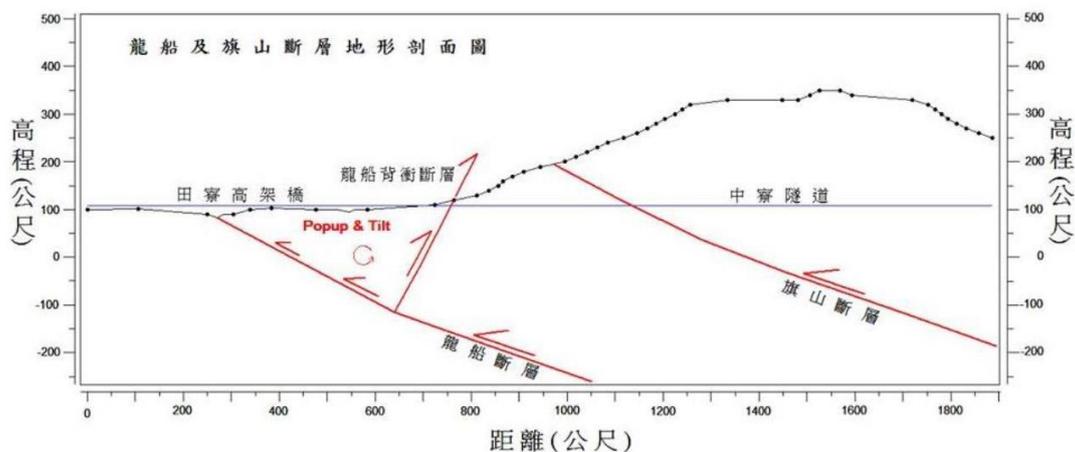


圖 9 車瓜林斷層及旗山斷層地形剖面圖，該剖面認為中寮隧道北口的抬升主要為車瓜林斷層的背衝斷層所致(李錫堤，2017)。

3-3 斷層在泥岩中的特性

斷層在火成岩、砂岩等堅硬岩體(competent rock)中所發育的脆性斷層(brittle fault)在過往已經有詳盡的研究，對於其構造特性及斷層帶的演育皆有深入的探討，及利用不同的方法針對斷層的細部進行分析。脆性斷層的構造分區大致可分為斷層核心(fault core)以及破壞帶(damage zone)。斷層核心帶是在斷層錯移時具有高度局部應變與強烈剪切的窄帶，由斷層岩如斷層泥(gouge)、斷層壓碎岩(cataclasite)與斷層角礫岩(breccia)組成；斷層破壞帶的應變及變形量相較於斷層核心帶則沒有那麼劇烈，與斷層核心不同處在於在斷層破壞帶中仍可以觀察到圍岩的組構，通常出現較次級(minor)的微小斷層或是破裂面(圖 10)。

岩體的變形與岩性有密切的關係，泥岩隨著所含礦物成分與含水量的不同，在變形行為上也會產生極大的差異，如泥岩中方解石含量的減少、黏土礦物與含水量的增加會使其產生強度的變化且變形更趨近於韌性 (Chiarelli et al., 2000 ; Beynon & Faulker, 2020)，即在受力變形時不易產生破裂或斷層面的變形行為。泥岩屬於較軟弱的岩石，沉積時間短淺的泥岩更容易產生破壞(霍亮等，2017)，尤其古亭坑層的泥岩由於成岩時間短，岩化程度低，乾燥時可堅硬如石，然而遇水則易回脹、崩解並軟化成泥(李德河等，2008)；且前人研究顯示古亭坑層的泥岩在含水與不含水的情況下強度會產生差異，含水量達 12%的古亭坑層泥岩在 ISRM 大地材料單壓強度分類分級圖中被分類為極軟弱岩石，單壓強度僅有 0.75 MPa，且含水量 4-6%的泥岩在 4.9 MPa 的圍壓下即會產生延性變形行為，即岩體達到屈服應力後承載能力沒有明顯下降的變形能力(陳俊价，2008；葉昆麟，2010)，可以預見泥

岩在受應力作用時會產生與脆性斷層不同的變形行為及擁有不同的產狀。由砂岩-泥岩互層所構成的岩體在受應力作用變形的過程中，會傾向先於脆性的砂岩層形成斷層及破裂面，而較軟弱的泥岩層則會使應變不易集中在一狹窄的剪動面上，產生大量具有特殊方向性的滑動面，並相較平均的散布在整個剪切帶中，來調適其所受的應變（謝孟龍等，2000；Lee& Kim, 2005）。隨著砂岩與泥岩比例的不同，其整體的表現也會不同，在堅硬岩層所主導的岩體當中，主要的變形模式都會是以斷層及破裂為主的脆性變形；當泥岩比例遠高於砂岩時，變形型態會偏向脆性-韌性變形(brittle-ductile deformation)及褶皺為主(圖 11)(Pei et al., 2020)。

根據野外的觀察，泥岩斷層帶難以觀察到變形及錯動集中在單一平面的斷層面，大多是以剪切寬帶的形式存在，剪切變形傾向於相對平均的分佈在整個斷層帶中。剪切帶分為主要滑動帶(Principle displacement zone)及雷德剪切面(Riedel shear)，在岩體產生剪切破壞時會在主要滑動帶中產生一系列的破裂面及次要滑動面，根據其與主要滑動帶的方位關係可以將其分組如圖 12 所示(Riedel, 1929；Rao et al., 2011)，大多可觀察到 P、R 型葉理(P, R-foliation)及 Y 剪切面(Y-shear)。也有研究指出，在泥岩斷層帶中存在許多深黑色的剪切條帶。泥岩中的剪切條帶呈現深黑色細條帶狀，時夾砂岩或方解石碎屑並出現於剪切帶內，在變形較劇烈處會叢聚成群。黑色剪切條帶為在斷層剪動下應變集中的產物，會沿著 Y、R、P 型葉理的方向生長，存在黑色剪切條帶的區域中的泥岩常具有方向性的破裂面，泥岩表面較為光滑並可能帶有擦痕(圖 13)(Casciello et al., 2002；Lee& Kim, 2005；陳柏村，2005；Nussbaum et al., 2011；Eiichi Ishii, 2012；黃家俊，2015；蘭于鈞，2019；Lao et al., 2020)。以微觀尺度觀察黑色剪切條帶，能

觀察到其內部的礦物顆粒出現具有方向性的排列(圖 14)，並藉由觀察推論剪切條帶中的剪切泥之孔隙率及強度較圍岩低(Laurich et al., 2018 ; Orellana et al., 2018)。

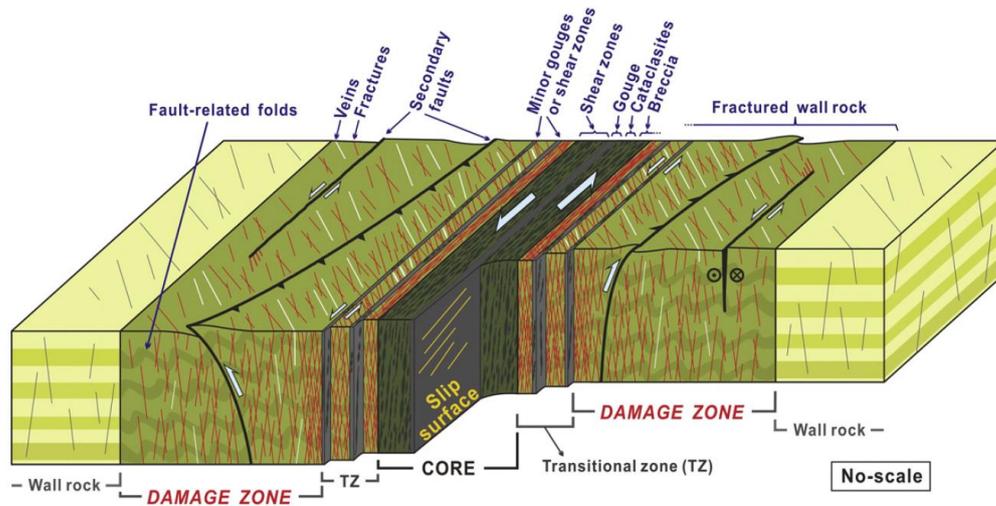


圖 10 脆性斷層帶的構造示意圖(圖引自 Choi et al., 2016)。

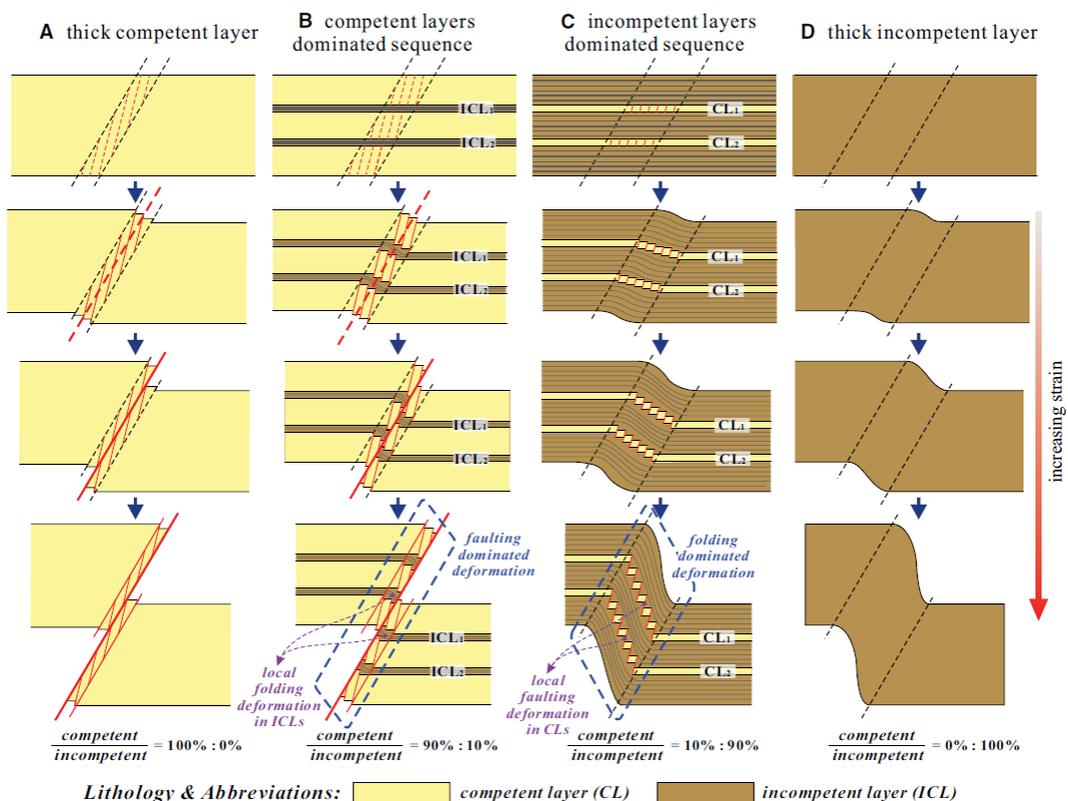


圖 11 斷層在堅硬及軟弱岩體中的發育模型。在砂泥互層的岩體中，隨著兩者比例的變動，其變形行為也會有所不同(圖引自 Pei et al., 2020)。

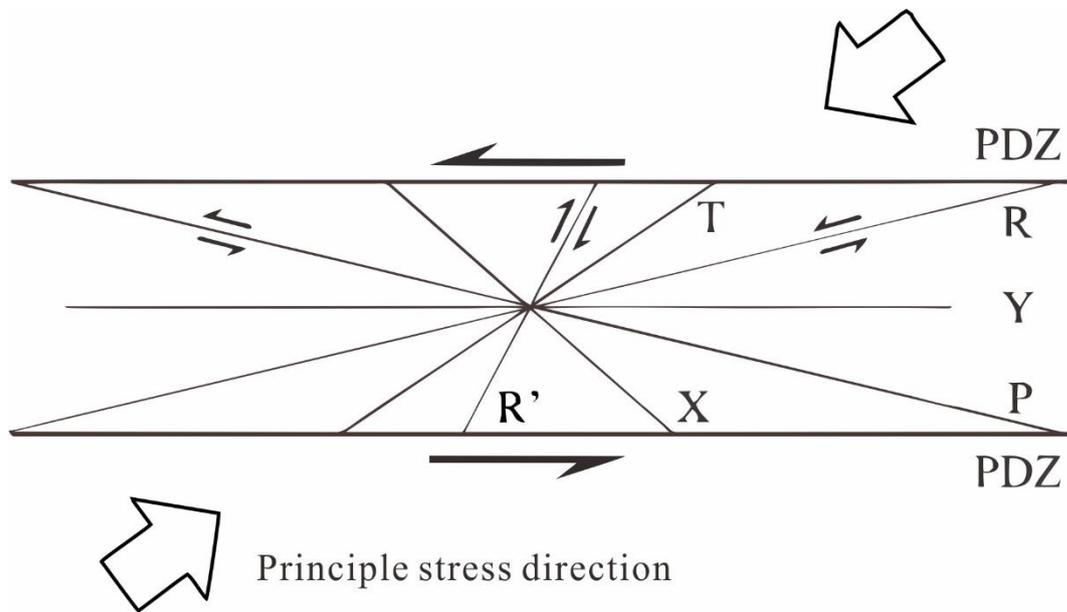


圖 12 雷德剪切面(Riedel shear)示意圖。係指岩體受剪力破壞時所會產生的一系列裂面(改繪自 Rao et al., 2011)。



圖 13 泥岩斷層帶中所出現表面光滑且帶有擦痕的鱗片狀泥岩(scaly clay)(照片引用自 Orellana et al., 2018)。

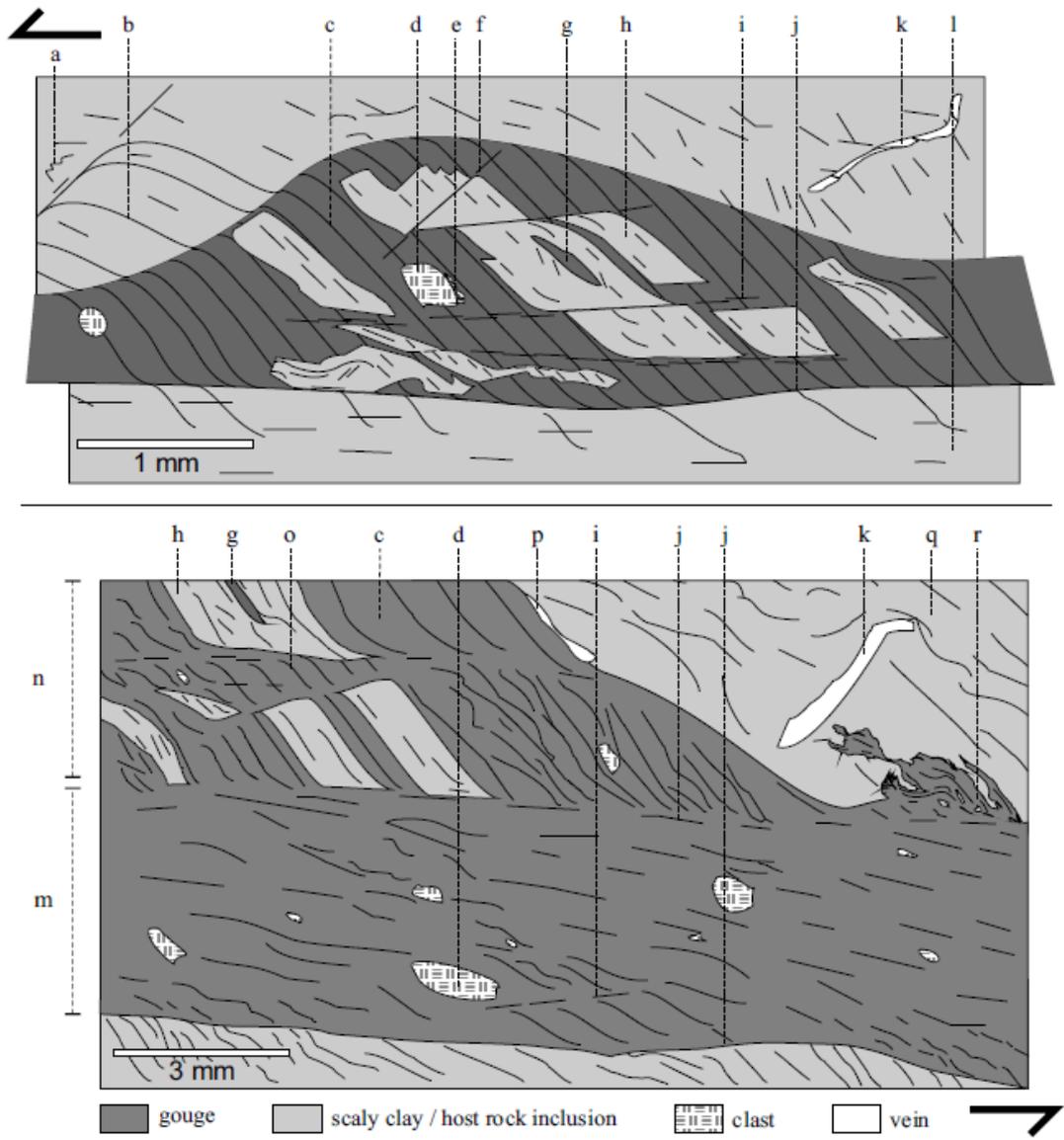


圖 14 泥岩斷層帶在微觀下所會觀察到的構造。可看到順向排列的圍岩碎屑及具有方向性的破裂面(圖引用自 Laurich et al., 2018)。

第四章 研究方法

4-1 斷層沿線地質調查與追跡

野外地表地質調查為地質調查的一種方式，為藉由觀察並記錄現今野外出露於地表的岩石露頭所存在的資訊並將其彙整，利用野外地質調查所獲得的資料來對於該地區進行更進一步的探討。車瓜林斷層位於古亭坑層的泥岩惡地地形中，於地表露頭出露連續且範圍廣闊，十分適合進行野外地表地質調查。

在進入野外進行調查之前，需先進行地質文獻的蒐集以及研究，利用前人所彙整及發表的資料先對該區域有初步的認識。例如地調所以及中油的地質圖中，有該區域的地層以及地質構造分布，當中的圖幅說明也涵蓋了前人對於該區域地層和主要構造的描述，劉彥求與林啟文(2019)也對於車瓜林斷層的露頭位置分布及構造特性有詳細的觀察及紀錄。

本研究亦利用無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle，以下簡稱 UAV)協助野外調查的進行，本研究使用之無人機為 DJI Mavic 2 pro、DJI Mavic pro 及 DJI Phantom 3 Professional(圖 15)，作業流程如圖 16 所示(謝承恩等，2016)。因惡地地形中泥岩易受雨水沖刷侵蝕，地形崎嶇且許多道路因年久失修而中斷，使多處露頭往往僅能遠觀而不易到達，利用 UAV 可以克服地形及距離上的障礙並對於難以到達之露頭進行較近距離的拍攝及記錄(圖 17、圖 18)。此外，利用 UAV 所拍攝之航空照片可藉由套裝軟體 Pix4Dmapper 進行空中三角測量並製作出大比例尺之高精度正攝影像，協助進行地形判視、露頭紀錄及 3D 立體模型的建構。本研究區域在拍攝期間尚未被交通部民用航空局劃

入禁航區及限航區內，故不存在違法之爭議，然而本研究區域目前多處已被劃入禁航區中，未來須依規定申請後得以飛行。

本研究野外地質調查的重點為車瓜林斷層帶的構造特徵及精確位置，野外工作內容主要為紀錄露頭中斷層帶的分布位置、產狀及位態，並記錄斷層帶兩側泥岩的岩性及位態。利用上述所得的資料進行斷層的追跡以及地質圖的繪製，在假設斷層為單一平面且延續良好的情況下，斷層位態可用以繪製構造等高線(structure contours)(圖 19)。構造等高線為利用走向為水平面與構造面的交線方向的此一特性，建構與構造面走向平行的等高線，利用傾角可推得等高線的間距，進而建構出完整的構造等高線，而構造等高線與地形等高線所相交的交點即為構造可能出露的位置(圖 20)，可藉以推測斷層跡於地表的走向並與正攝影像進行比對，從而得知斷層的位態是否在空間上有產生變化。



圖 15 本研究使用之無人機機型。(a)DJI Mavic 2 pro (b)DJI Phantom 3 Professional (c)DJI Mavic pro

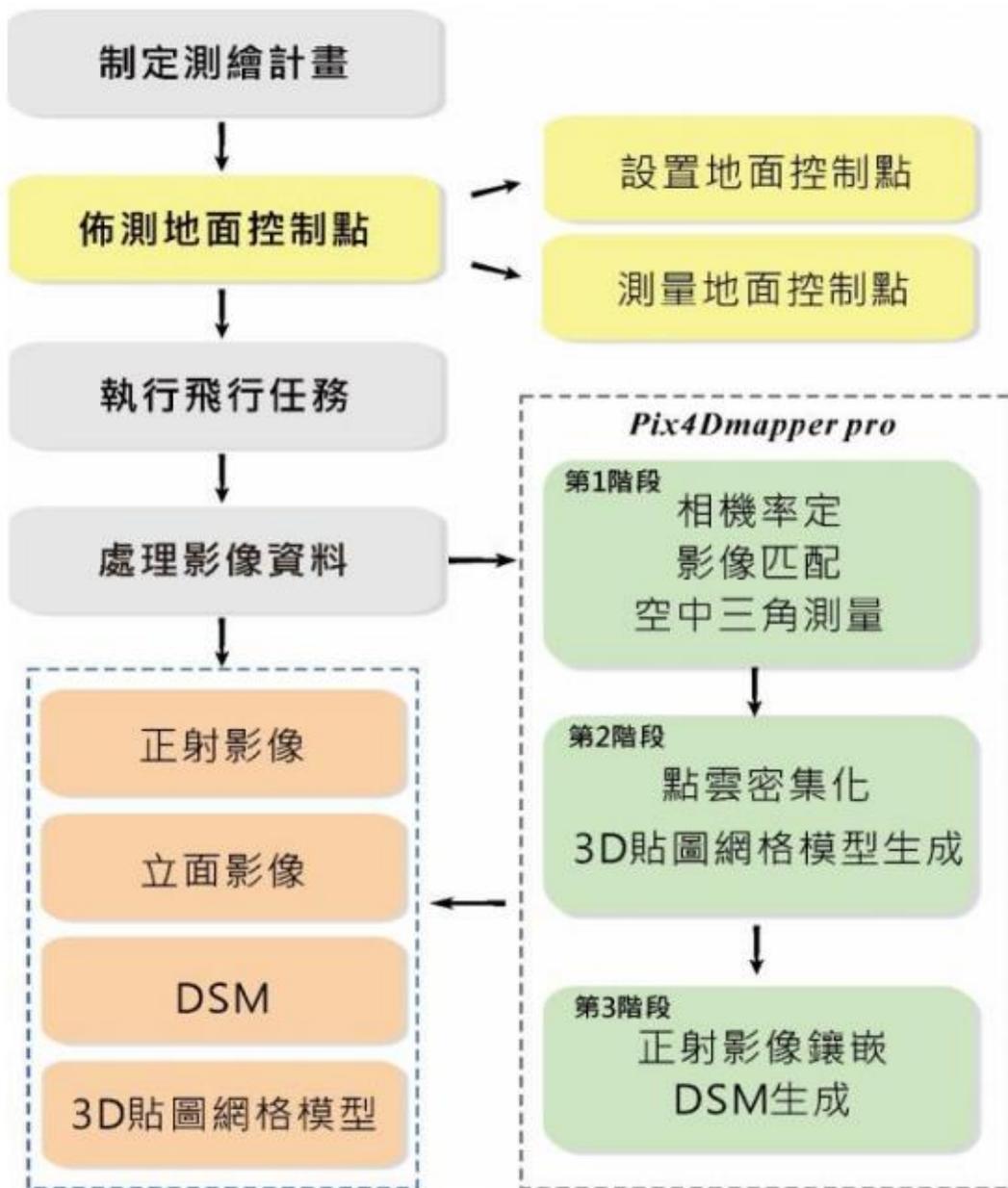


圖 16 本研究空拍執行流程(引用自謝承恩等，2016)。



圖 17 無人機操作情形。



圖 18 惡地地形中的泥岩露頭。泥岩出露良好且廣闊，但地形崎嶇難以到達，故使用無人機設備進行空拍得以進行更詳細的觀察。

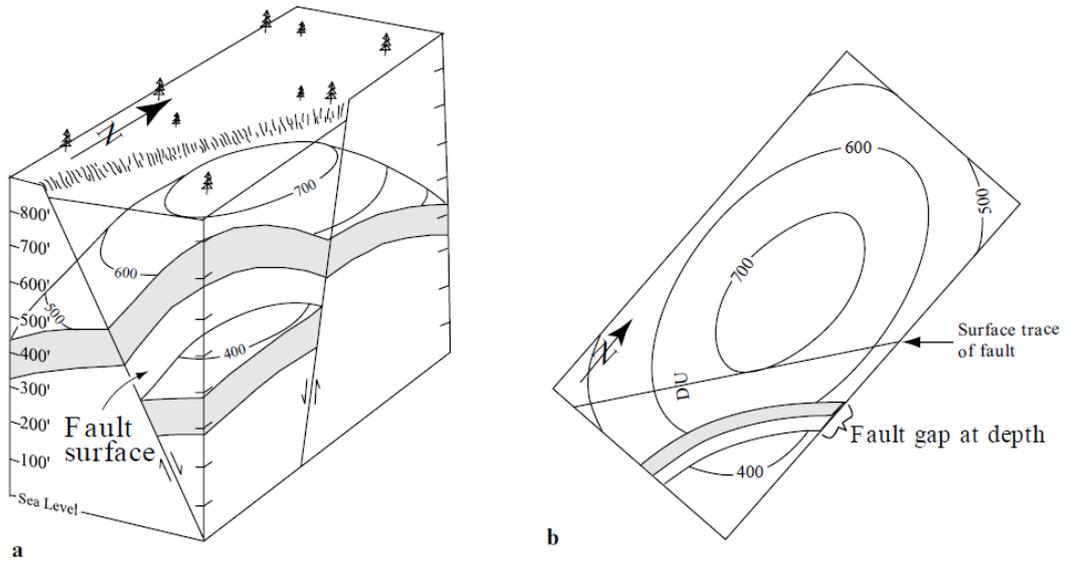


圖 19 構造等高線之概念及其示意圖(圖取自 Roland et al., 2013)。

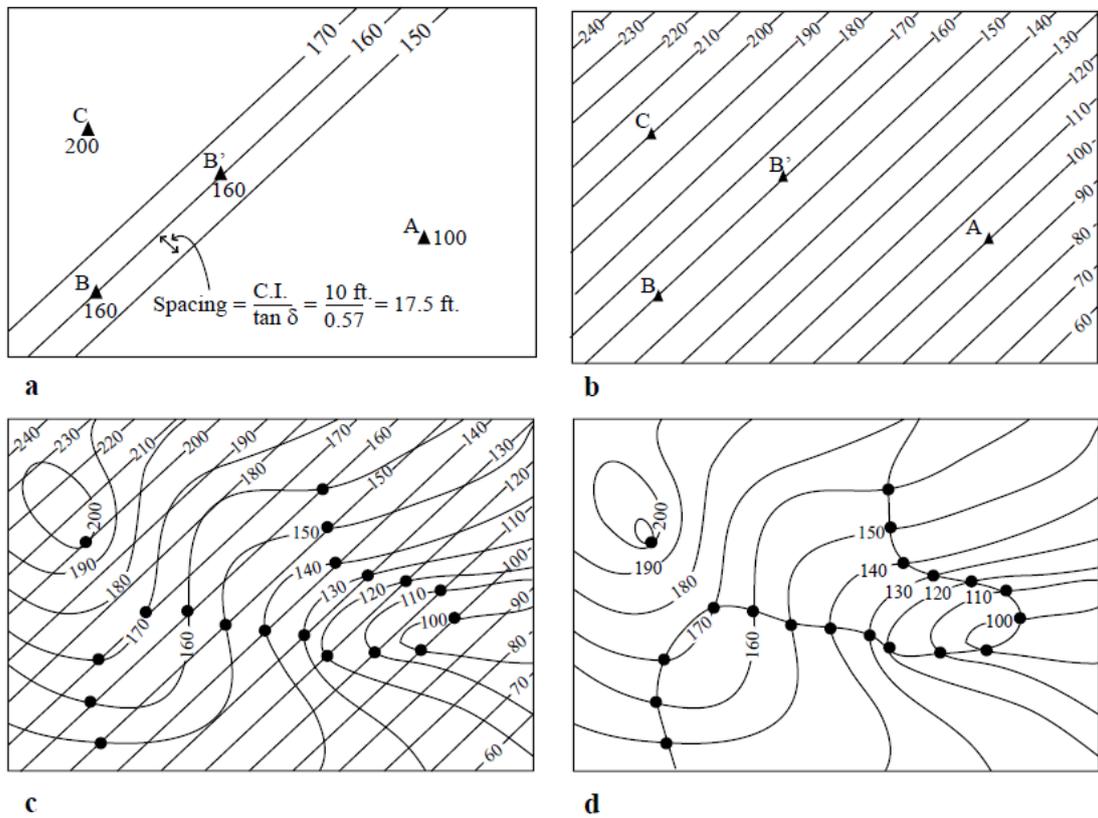


圖 20 構造等高線及地形等高線關係圖。於兩者交點處可得知目標構造可能於地表出露的位置(圖取自 Roland et al., 2013)。

4-2 地質剖面開挖

地質剖面開挖為斷層地質調查的方法之一，為利用野外所擁有的天然立面，以人力或機具將表面風化物或崩積物的清除，拉以格線後再進行大比例尺的露頭描繪，紀錄斷層細部的構造並加以探討其特性。因古亭坑層的泥岩遇水即會崩解，在雨水沖蝕後表面易受沖洗下來的泥所覆蓋，儘管露頭出露多且廣闊，仍難以觀察其細部組構，僅能由岩石表面的顏色及些微變化的岩性來推估紀錄(圖 21)。進行露頭調查時須將表面約五公分的泥岩以工具清除後再以刮刀將表面細修至平整，方能觀察到目標區域的內部組構並加以記錄。車瓜林斷層的斷層帶於千秋寮至大廊亭山間出露良好且可連續追跡，斷層帶寬以航空照片判斷約十數公尺，然而表面多覆蓋泥岩崩積物及風化物，故本研究選擇以地質剖面開挖的方式進行車瓜林斷層帶的調查。



圖 21 車瓜林斷層的野外之露頭。斷層帶露頭表面為風化之泥岩所覆蓋，難以觀察其內部組構。

4-2-1 剖面選址

經野外調查，分析斷層沿線空拍結果並進行比對，本研究進行地質剖面開挖的地點選定在國道三號中寮隧道口往北約一公里處，高 40 公路旁的泥岩露頭，剖面位置位於泥岩區中，通過車瓜林斷層帶，剖面位置層帶的相對關係如圖 22 所示。斷層東側的上盤可觀察到連續且可追跡之砂岩層面，愈接近斷層帶則愈破碎至無法追跡；斷層帶中的泥岩呈黃褐色且有黑色條帶交織並延伸於整個露頭立面；於斷層西側的下盤則為巨厚泥岩，沒有觀察到明顯的剪切構造(圖 23)，故本研究決定於此露頭進行地質剖面開挖。剖面全長 34 米，高 2 米，長邊受地形影響呈 $N55^{\circ}W-N45^{\circ}W$ ，與斷層於該區域 $N31^{\circ}E$ 的走向近乎直交，剖面兩端點之 TWD97 座標為(1905443.837，2525653.194)及(190570.244，2525631.449)。

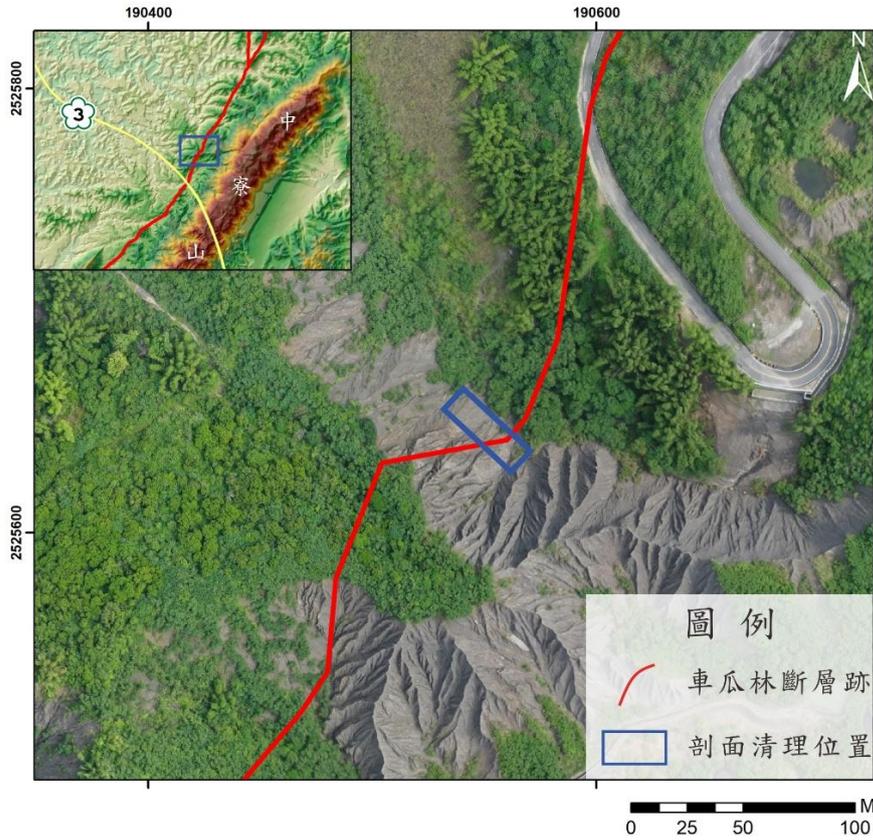


圖 22 地質剖面清理位置圖。本研究露頭位於國道三號以北，距中寮隧道北口約一公里處。



圖 23 車瓜林斷層帶的野外露頭斜拍影像，面南拍攝。

4-2-2 開挖流程

地質剖面開挖的流程可分為以下數個階段，如圖所示(圖 24)，包含:剖面位置的調查與選定、剖面開挖、立面精修、設置網格線及最後的拍照與描述。

1. 剖面位置調查與選定:本研究剖面位置的選址依據主要考量為千秋寮經國道三號中寮隧道北口至大廊亭山間，一處出露良好且可連續追跡約四公里長的車瓜林斷層露頭，詳見章節 4-2-1。
2. 剖面開挖:由人力以農業用具將覆蓋露頭表面的崩積物、風化物做最大可能的清除，並將剖面挖掘至近乎垂直。
3. 立面精修:在剖面有初步的清理並出現大致輪廓的立面後，接著以刮刀清理立面，使細部的構造顯現，並沿構造的方向進行清理及追跡，顯現剖面中完整的構造分布。
4. 設置網格線:在立面上設置水平及垂直的網格線，垂直線間距 1 公尺、水平線間距 0.5 公尺。
5. 拍照與描述:利用無人機及相機進行立面的拍照並使用 Pix4Dmapper 合成 3D 的立面模型並產生正攝化的影像，此軟體能利用多張具有高重疊率的照片相互匹配，建構出完整的 3D 模型，並可選擇適當的視角輸出正攝化影像，再結合於剖面露頭的現場構造描述，以比例尺不小於 1/100 的立面圖展現。



表層覆蓋清除及精修

由人力以農業用具將覆蓋露頭表面的崩積物、風化物做最大可能的清除，並將剖面挖掘至近乎垂直。



設置網格線

在立面上設置水平及垂直的網格線，垂直線間距1公尺、水平線間距0.5公尺。



剖面紀錄與描述

利用無人機及相機進行立面的拍照並使用Pix4Dmapper合成3D的立面模型並產生正攝化的影像，結合於剖面露頭的現場構造描述，以比例尺不小於1/100的立面圖展現。

圖 24 剖面開挖流程。

4-3 鑽井及岩心分析

利用地質鑽探取得的岩心進行分析為斷層研究中常見且十分重要的研究方法，因地表所能獲得的資訊有限，且在泥岩區中，露頭往往是有植被覆蓋或被崩積、沖積物所掩蓋，透過鑽探並提取岩心的方式了解跨斷層連續的構造變化及了解其特性具有十分顯著的幫助。

地質鑽探多使用旋轉鑽探，是現今最普遍的鑽井方式，是以轉盤旋轉帶動，由鑽筴及鑽桿傳動旋轉扭力，再施予適當的重量，利用鑽頭向前鑽鑿地層，鑽屑則由泥漿循環帶出，並於鑽探時進行岩心的取樣，藉以觀察斷層帶的變化。

4-3-1 鑽井選址及設計

經野外地質調查、空拍結果比對及地質剖面開挖的成果，本研究選定位於中寮隧道以西南約 700 公尺的月世界泥岩地形進行鑽探調查，鑽井處之 TWD97 座標為(189762, 2324223)(圖 25)，此處有於野外有觀測斷層的特殊產狀並與本研究利用構造等高線所判斷的斷層出露位置相互重合。除此之外，鑽井地點必須為車輛及鑽井機具易到達且具有足夠水源處。故本研究決定於此處進行單一口井之鑽探作業，以 HQ 孔徑之鑽頭(直徑 6.35 公分)進行作業，鑽井深度 50 米，並以 60° 傾斜於地表，走向 330° 欲以最短距離垂直貫穿斷層帶，並進行岩心取樣(圖 26)。取出之岩心以熱收縮膜固定防止岩心因解壓及水分逸散而導致泥岩岩心破裂，將岩心帶回實驗室後將其沿長軸方向對半切開並進行掃描及中視尺度的觀察，以探討車瓜林斷層在此露頭的構造特徵及連續變化。

4-3-2 鑽井流程

地質鑽井的流程可分為以下數個階段，包含：鑽井位置的調查與選定、鑽井機具架設、取岩心及岩心清洗、岩心紀錄及分析(圖 27)。

1. 鑽井位置的調查與選定：本研究鑽井位置的選址依據主要考量為千秋寮經國道三號中寮隧道北口至大廊亭山間，一處出露的車瓜林斷層露頭頂部且交通易到達處，在平坦處架設鑽井機具。鑽井處附近是否存在足夠的水源亦為選址的重要考量。詳見章節 4-3-1。
2. 鑽井機具架設：本研究所進行的鑽井具有 60° 的傾角，故需要先以鋼筋將鑽桿固定，確認鑽探角度及方向無誤後再連接發電及捲揚設備(圖 27-1)。在每日鑽井作業開始之前須調配足量的超泥漿液體，並於鑽探期間不斷的抽水及調配供鑽探使用，一天約會消耗 5 公噸的水。
3. 岩心取樣及岩心清洗：機具架設完畢後會放入用以取岩心內管，再將外管連接鑽機後以旋轉帶動整隻鑽桿，控制鑽機轉盤對鑽頭施加重量進行作業(圖 27-2)。當下鑽至一定深度後，以捲揚設備將帶有岩心的內管取出(圖 27-3)。因內管中的岩心大於一公尺，取出後的岩心會按一公尺的長度進行裁切(圖 27-4)，剛取出且裁切後的岩心因表面仍殘有泥漿，須以清水及毛刷將其作初步的清洗後以熱縮膜包裹以防止岩心解壓或吸水產生的變形，才放入岩心箱中(圖 27-5)，即完成一公尺的岩心取樣。
4. 岩心紀錄及分析：在鑽探結束後，記錄前將岩心表面泥漿刮除，利用岩心紀錄表紀錄岩心之岩性及構造，繪製完整岩心柱，並用相機將岩心進行拍照記錄，以利後續的對照(圖 27-6)。

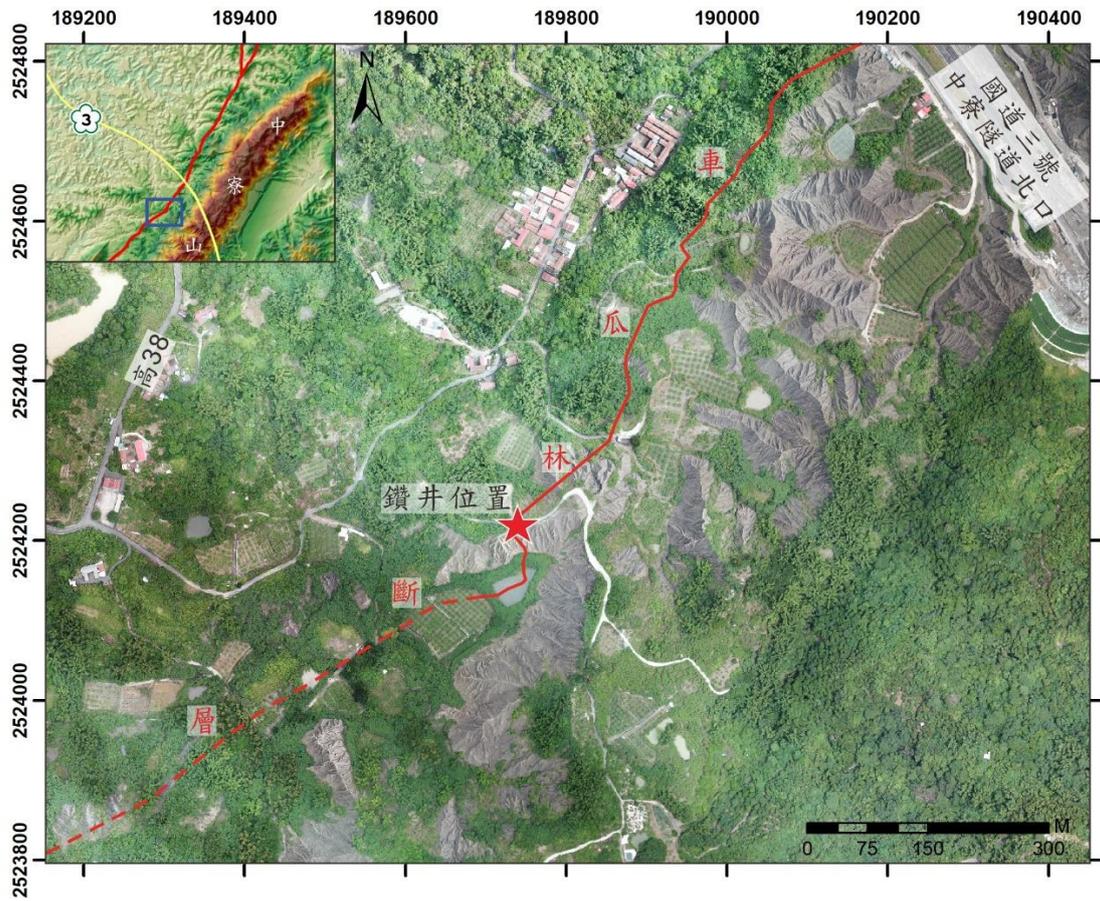


圖 25 本研究地質鑽井施作地點，紅色線段為車瓜林斷層斷層跡。

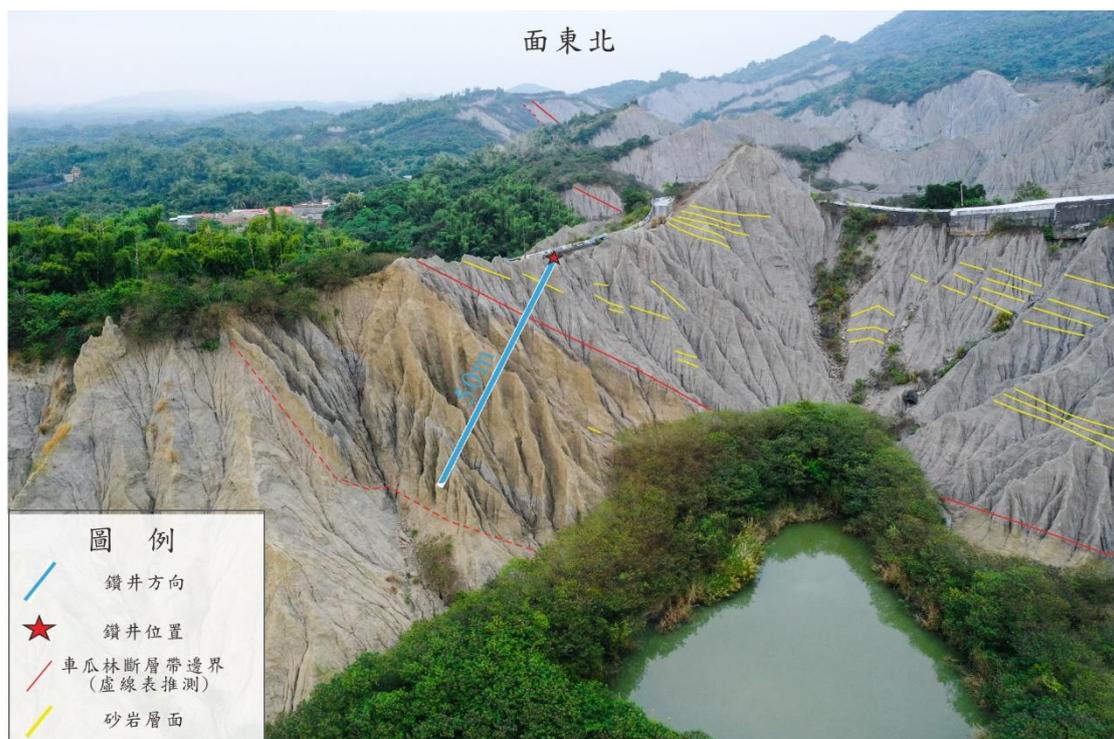


圖 26 鑽井位置露頭斜拍圖，面東北拍攝。

1. 鑽井機具架設



2. 鑽井作業執行



3. 岩心取樣



4. 岩心裁切



5. 岩心清洗



6. 岩心紀錄



圖 27 鑽井流程。

第五章 結果

5-1 地表地質調查

車瓜林斷層沿線位於古亭坑層內，出露岩層皆以泥岩為主，因泥岩易被沖蝕，所形成的惡地地形植被覆蓋較少，使本研究區域露頭出露良好且連續，可精準追蹤斷層跡。然而泥岩易被沖蝕的特性也使許多露頭難以到達，僅能遠觀或利用無人機進行較近距離的空拍。本研究利用無人機完成車瓜林斷層沿線的高精度空拍，利用空照圖及車瓜林斷層於露頭上的特殊產狀協助判釋，確定斷層於地表出露的位置後於可到達的露頭進行進一步的精細調查，以了解車瓜林斷層中岩體的精細構造。車瓜林斷層於大廍亭山至南勢湖一帶可良好追跡並與構造等高線之推測出露位置吻合，顯示斷層於此區段的位態較為一致，區域位態大致為 $N30^{\circ}E/30^{\circ}E$ 。本章節將由北而南報導車瓜林斷層沿線露頭的地質構造特性，露頭分別位於半天寮、大廍亭山、高 40 公路、國道三號南北兩側、南勢湖及雞冠山。

5-1-1 半天寮

半天寮露頭位置位於旗山鎮西方約 3 公里處，(TWD97 座標:193886,3531466)。於該露頭利用空拍影像可觀察到寬數公尺的黑色條帶狀構造，位態呈 $N19^{\circ}W/69^{\circ}E$ 且截切砂岩層面 (圖 28)，而位於下盤的砂岩層面則為 $N72^{\circ}W/82^{\circ}N$ 。於露頭上有數條灰黑色高角度條帶出露，單一剪切條帶寬約十數公分，黑色條帶以髮辮狀交織並叢聚成束，形成數公尺寬的剪切帶，並可於黑色條帶的手樣本中看到其內部夾有角礫狀的泥質碎屑。依位態的差異可將剪切帶區分為兩組，

其中有一組較寬且具有高角度的剪切帶，位態為 $N24^{\circ}W/69^{\circ}E$ ，被另一組較低角度，位態為 $N29^{\circ}E/29^{\circ}W$ 的剪切帶所截切(圖 29)。剪切帶的兩側上下盤岩性皆為泥岩與薄層極細砂岩互層，砂岩層在接近剪切帶處受折曲拖曳，砂岩受破壞呈現破碎角礫狀；下盤中有出現約 3 公尺厚的泥岩，可於其中觀察到數條 3-5 公分較低角度的黑色條帶發育其中。



圖 28 車瓜林斷層於半天寮的露頭空照影像。虛線包夾處為露頭上所能觀察到呈現束狀的灰黑色條帶，走向為 $N19^{\circ}W$ 。

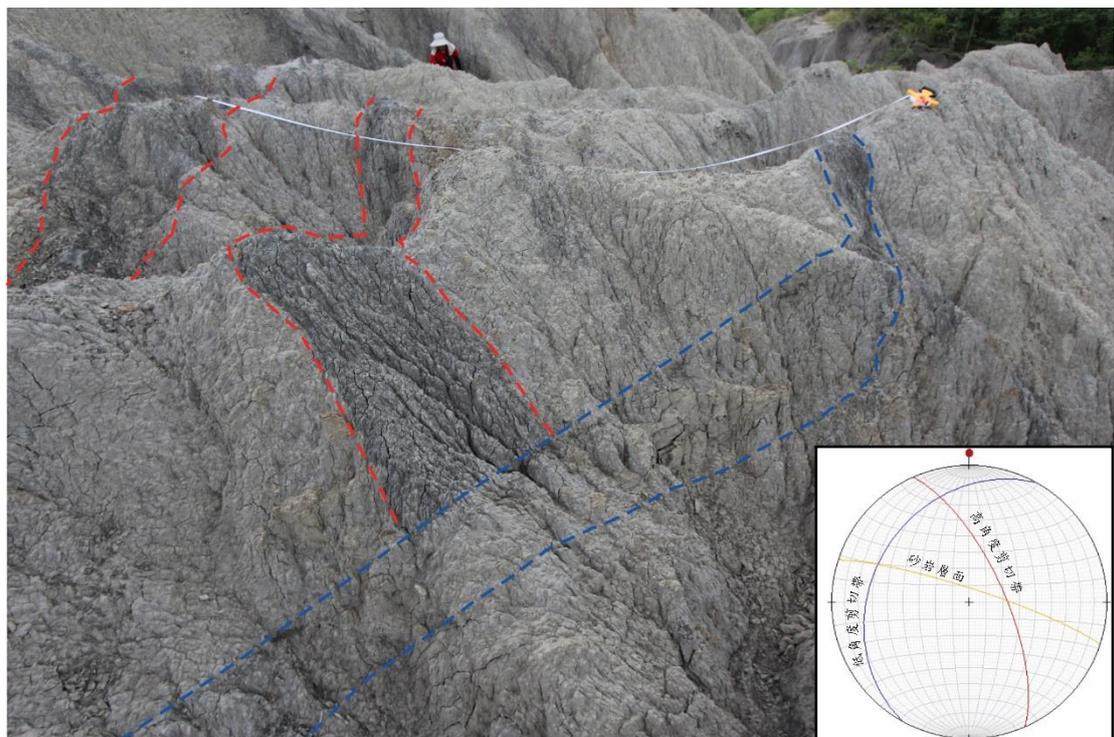


圖 29 半天寮野外露頭的兩組剪切帶。其中低角度位態為 $N29^{\circ}E/29^{\circ}W$ 的剪切帶截切高角度位態為 $N24^{\circ}W/69^{\circ}E$ 的剪切帶。

5-1-2 大廊亭山

大廊亭山為一位於古亭坑層中的砂岩透鏡體，形成一座約 2.5 公里長的小丘陵，與周圍的惡地地形有所不同。龍船斷層與車瓜林斷層的斷層跡於此產生分歧，車瓜林斷層的斷層跡為沿大廊亭山兩側，斷層包夾大廊亭山透鏡體並向北延伸；龍船斷層則為斷層經大廊亭山西側邊緣，在大廊亭山的約中點處向北西延伸連接龍船斷層。

該區域無交通道路且植被茂盛，僅能以無人機以空拍的方式對零星露頭進行遠距的觀察及嘗試追跡，在透鏡體南側端點的東西兩側皆可以觀察到剪切帶的出現。在大廊亭山南端點的東側(TWD97 座標:192088, 2528179)仍可在緊鄰斷層帶處觀察到砂岩層面的出現，砂岩層面呈現近乎垂直，斷層帶呈現約十數公尺的高角度灰黑色剪切寬帶(圖 30)。大廊亭山南端點的西側則可利用空拍機觀察到於灰色泥岩中所出現的黃褐色帶狀構造，但因其道路中斷且植被茂密，難以近距離對於露頭進行觀察及測量(圖 31)。



圖 30 大廂亭山南端東側的露頭，虛線包夾處為剪切條帶叢聚處，於圖片中其左側可看到高角度的薄砂岩與泥岩互層。



圖 31 大廂亭山西側的露頭。

5-1-3 高 40 公路

高 40 公路在近烏山處可在略呈東西走向的公路的南北兩側觀察到車瓜林斷層完整且連續的出露(圖 32)。高 40 公路的北側露頭可於一公墓小徑(TWD97 座標:190791, 2526089)遠眺約 1.5 公里至大廂亭山, 車瓜林斷層與此區域皆可連續追跡。於車瓜林斷層的產狀主為黃褐色的剪切帶伴隨著有深黑色的剪切條帶交織而成, 能利用色調上的差異於白灰色的泥岩中清楚辨識。此區域的車瓜林斷層利用空照資訊及構造等高線的作圖, 斷層帶位態約為 $N31^{\circ}E/27^{\circ}E$, 寬度則約為 30 公尺, 而車瓜林斷層的上下兩盤皆為厚層泥岩夾薄砂的古亭坑層。

在高 40 公路南側亦有車瓜林斷層的出露(TWD97 座標:190527, 2525652)(圖 33), 上盤清楚出露泥岩與砂岩薄互層的完整層面, 位態為 $N0^{\circ}-22^{\circ}E/33^{\circ}-38^{\circ}E$ (圖 34), 隨著逐漸靠近車瓜林斷層帶, 砂岩傾角增加並變得較為破碎, 砂岩層面位態轉為 $N62^{\circ}E/75^{\circ}S$, 進入車瓜林斷層帶後砂岩層面消失, 僅能觀察到破碎的砂岩塊出現在斷層帶中, 且露頭表面覆蓋大量砂岩及帶有擦痕的方解石碎屑(圖 35)。斷層帶外觀呈現黃褐色的寬帶並有深黑色的條帶交織其中(圖 36), 斷層帶中泥岩呈鱗片狀, 在黃褐色的寬帶中可看到泥質岩中存在砂質碎屑(圖 37), 本研究於此處進行地質剖面的開挖, 詳細的產狀及構造特性將會於 5-2 章節進行更進一步的說明。車瓜林斷層於此露頭的下盤為巨厚泥岩, 泥岩中無法觀察到明顯的構造發育。

然而在該露頭向西北延伸 200 公尺處(TWD97 座標:190433, 2525810), 亦有發現分支斷層的存在, 兩露頭關係如圖 38 所示, 主斷層線上的露頭以星號表示, 此分支斷層露頭以圓圈符號表示。利用空拍機可清楚看見於泥岩壁面上所出現的深黑色剪切寬帶(圖 39),

此露頭的岩性為泥岩夾薄層至紋層砂岩(圖 40)，位態約呈 $N20^{\circ}-38^{\circ}E/60^{\circ}SE$ ，剪切條帶以 $N27^{\circ}E/36^{\circ}SE$ 截切層面並以髮辮狀交織其中，剪切條帶中包裹透鏡狀及角礫狀的泥岩碎屑(圖 41)。

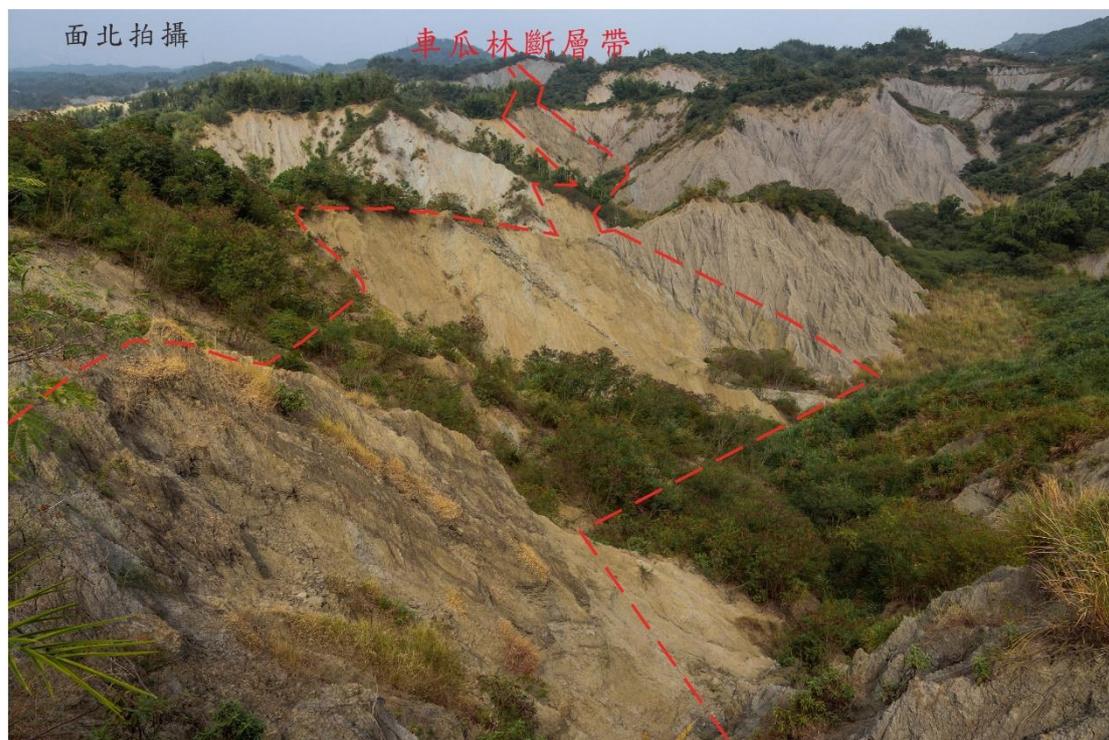


圖 32 高 40 北側至大廓亭山間所出露的車瓜林斷層帶露頭。虛線包夾處為車瓜林斷層的出露位置，斷層帶由黃棕色泥岩及黑色條帶交織而成，與一旁泥岩的灰色形成差異。



圖 33 高 40 公路南側出露的車瓜林斷層帶露頭。斷層帶由黃褐色及深黑色的寬帶交織而成，呈現不同顏色，上盤有連續砂岩層面可追蹤。



圖 34 高 40 公路南側車瓜林斷層帶上盤所出露的連續砂岩層面。



圖 35 車瓜林斷層帶中表面所覆蓋的大量砂岩以及方解石碎屑。於方解石碎屑中可觀察到擦痕存在。



圖 36 高 40 公路南側車瓜林斷層帶產狀。黑色及黃棕色的破碎泥岩以帶狀呈現於露頭上。



圖 37 斷層帶中呈現鱗片狀的泥岩，其中存在淺色的砂質碎屑。



圖 38 高 40 公路南側的車瓜林斷層主斷層露頭及分支斷層露頭位置。兩露頭距離相隔約 200 公尺，詳細座標見內文。



圖 39 高 40 公路南側的車瓜林分支斷層所能觀察到的露頭產狀。紅色虛線包夾處為灰黑色剪切條帶叢聚區域。



圖 40 高 40 公路南側的車瓜林分支斷層露頭中的層面。岩性為泥岩夾紋層砂。



圖 41 高 40 公路南側車瓜林分支斷層露頭上的黑色條帶。其中包裹透鏡狀及角礫狀的泥岩碎屑。

5-1-4 國道三號南北兩側

延續高 40 公路的露頭，向南追跡車瓜林斷層也能在國道三號中寮隧道口附近觀察到良好的出露及延伸，並於國道三號的南北兩側皆能觀察能找到車瓜林斷層的露頭。於國道三號北側的露頭可清楚觀察到車瓜林斷層出露(TWD97 座標:190397,2525355)(圖 42)，斷層位態為 $N29^{\circ}E/33^{\circ}SE$ ，斷層帶產狀為灰黑色的密集剪切寬帶，單一剪切條帶寬度約十餘公分，以髮辮狀出現於露頭壁面，整個斷層帶因地形關係難以觀測到全貌，以現有的露頭資訊判斷車瓜林斷層帶寬度有數十公尺寬(圖 43)。此露頭車瓜林斷層帶的下邊界出露良好，下盤出露為薄層黃棕色極細砂岩與泥岩互層，砂岩位態為 $N19^{\circ}E/84^{\circ}E$ 近乎垂直(圖 44)，斷層上邊界則因地形而無法明顯觀察，且車瓜林斷層於此處與旗山斷層僅相距約 500 公尺，難以區分兩斷層間的區域所出現之剪切帶屬於車瓜林斷層亦或是旗山斷層的分支斷層。

在北側的露頭向西南 500 公尺，在國道三號的南側也可以發現車瓜林斷層的露頭(TWD97 座標:190173,2524824)，側向延伸約 60 公尺，以密集的灰黑色剪切條帶為主(圖 45)，可以清楚觀察到其內部結構與先前所見相似(圖 46)，剪切條帶位態約為 $N55^{\circ}E/50^{\circ}S$ 。



圖 42 國道三號北側的車瓜林斷層露頭遠照。紅色箭頭為車瓜林斷層出露位置。



圖 43 國道三號北側的車瓜林斷層露頭。上界因地形關係而無法觀察全貌。

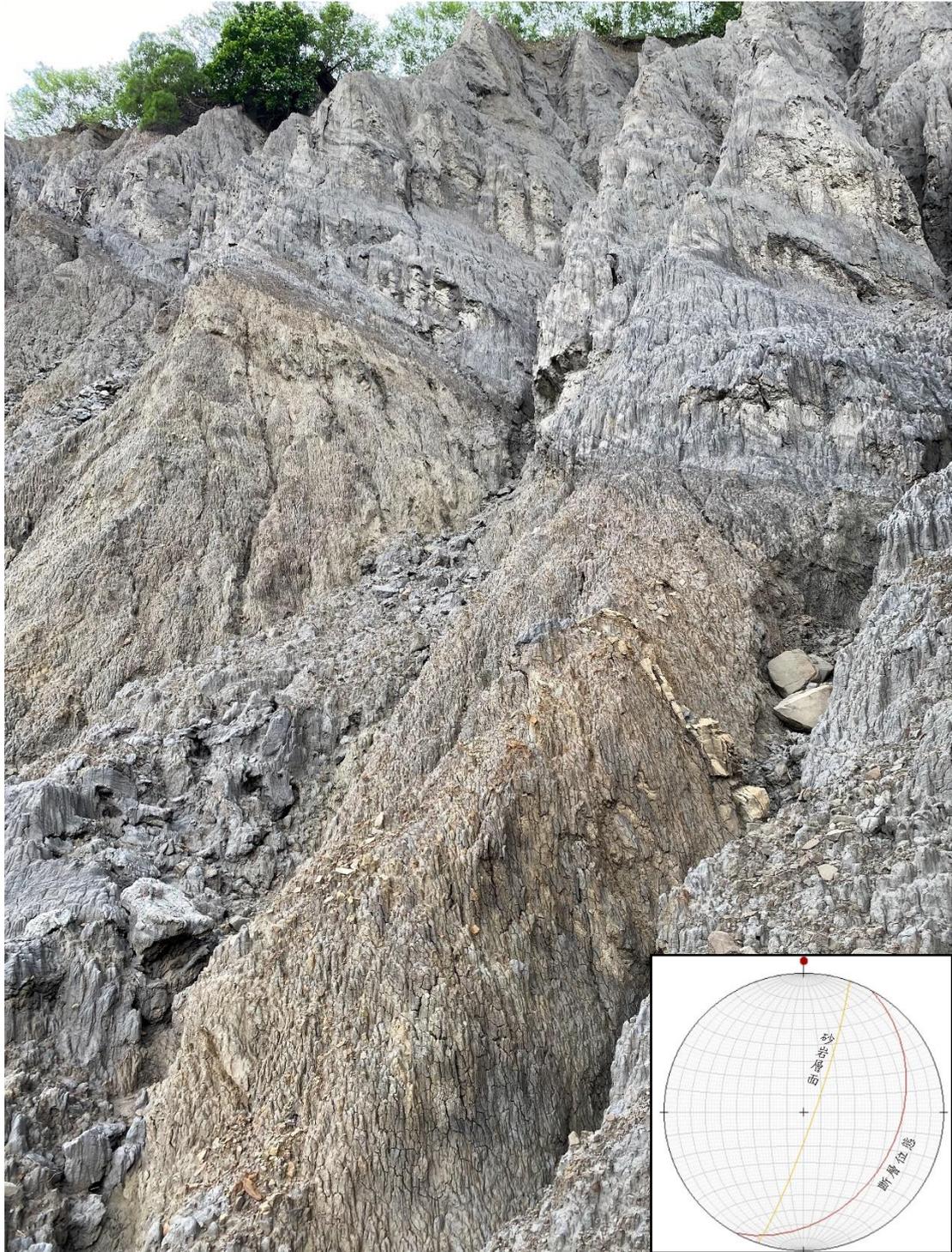


圖 44 國道三號北側的車瓜林斷層露頭近照。其下盤為高角度的薄層黃棕色極細砂岩與泥岩互層。



圖 45 國道三號南側的車瓜林斷層露頭。



圖 46 國道三號南側的車瓜林斷層露頭內部結構。

5-1-5 南勢湖

南勢湖至千秋寮為車瓜林斷層所能清楚且連續追跡的露頭最南處，於該區域可藉由無人機的空拍影像明顯辨識車瓜林斷層的露頭位置，於國道三號可向南追跡約一公里，車瓜林斷層之區域位態截至該處皆維持約 $N30^{\circ}E/30^{\circ}S$ ，與構造等高線作圖所判斷斷層露頭出露位置相吻合。在 google map 景點-田寮月世界秘境處(TWD97 座標:189743, 2524199)有斷層完整出露之露頭，道路通過露頭上方並可在高處遠眺車瓜林斷層的連續出露至國道三號北側露頭(圖 47)，在露頭下東北側的道路上有觀察到道路受到破壞的現象(TWD97 座標:189869, 2524332)(圖 48)。斷層於此亦呈現黃棕色寬帶並於斷層的上邊界觀察到灰黑色的剪切條帶，斷層上盤為泥岩夾薄層砂岩，砂岩層面可連續追跡，位態約為 $N3^{\circ}W/45^{\circ}E$ (圖 49)，當砂岩層接近斷層帶上邊界，砂岩傾角逐漸增加且轉為破碎至難以追跡。斷層帶邊界為黑色的剪切條帶，斷層帶中則以黃棕色的泥岩與破碎砂岩為主，亦有黑色條帶交織於其中，並可在斷層帶中觀察到具有連續層面的砂岩出現在斷層帶中，砂岩層面連續性不佳，僅可追跡約 3-5 公尺，位態為 $N45^{\circ}W/56^{\circ}E$ 與上盤所量得之砂岩位態有所不同(圖 50)。下盤則為巨厚泥岩，難以觀察到層面以及次生構造的出現。然而在距該露頭西方約 200 公尺處有一泥岩露頭出露，露頭壁面上散布間距約十餘公分，每條寬約 5 公分的黑色剪切條帶，且位態與斷層帶大致平行，邊界因植被覆蓋難以判定(圖 51)。

本研究亦於此處進行鑽井作業，藉由對岩心的觀察以更瞭解斷層帶中的岩石特徵，詳細請見 5-3 章。



圖 47 車瓜林斷層於南勢湖區域之露頭產狀。面東北拍攝。



圖 48 車瓜林斷層於南勢湖露頭北側下方之道路有明顯破壞的跡象。東側相較西側於有明顯的抬升跡象，面南拍攝。



圖 49 車瓜林斷層南勢湖露頭上盤可見清晰的砂岩層面。



圖 50 南勢湖露頭的斷層帶中仍能觀察到連續的砂岩層面。其連續性僅數公尺且與上盤砂岩的產狀及位態有所不同。



圖 51 與車瓜林主斷層相距約 200 公尺的泥岩露頭。露頭上可看到大量的灰黑色剪切條帶。

5-1-6 雞冠山

在雞冠山東側受植被影響，出露不佳僅存在些許泥岩露頭。於雞冠山東側邊緣的崩塌地(TWD97 座標:188026, 2522574)可以觀察到有剪切帶的出露(圖 52)，該處可觀察到連續性不佳且層態紊亂的薄砂岩層面，有灰黑色的剪切條帶穿插其中，剪切條帶的寬度為 20-30 公分，位態為 $N18^{\circ}E/47^{\circ}W$ ，且露頭上剪切條帶分布較為稀疏，較難以觀察到如國道三號附近的車瓜林斷層帶露頭，其剪切條帶叢聚且帶有砂岩角礫的明顯產狀。



圖 52 雞冠山東側的泥岩露頭。露頭上僅有數條灰黑色的條帶，以紅色虛線標示，沒有明顯的劇烈剪切寬帶。

5-2 地質剖面清理

本研究所清理的剖面長 34 公尺，高 2 公尺，長邊方向與斷層走向近乎直交，剖面影像接合成果與立面測繪成果如圖 53。根據剖面的岩性、破碎程度以及構造特徵，將其分為五個單元，分別為塊狀砂質泥岩(單元 1)、黑色極破碎泥岩(單元 2)、黃色破碎泥岩(單元 3)、灰色緻密泥岩(單元 4)、及崩積物(單元 5)，其中單元 2、單元 3 及單元 4，除分布於清理的剖面上，亦可追跡至剖面外，甚至整個露頭(圖 54)。在進行露頭清理後可觀察到不同單元中的內部構造，本研究於野外採集黑色破碎泥岩、黃色破碎泥岩以及灰色緻密泥岩之岩石樣本，進行表面及裂隙的上膠後以岩石拋光機進行表面的研磨，並以高解析度掃描觀察其公分至公釐等級的構造特徵，以下分別描述其岩性及構造特徵：

1. 塊狀砂質泥岩(單元 1)：本單位分布於剖面 0~5 米處，為低度破碎之泥岩，具有相對稀疏的裂隙，兩相鄰裂隙相距約 10-30 公分，大部份的延續性不佳。泥岩中偶夾薄層淺色的極細砂，厚度約 1-2 公分，泥岩中亦可觀察到約四道黑色破碎帶，各道寬約 5 公分，亦即圖 55 中的橘色實線。

2. 黑色破碎泥岩(單元 2)：本區位於剖面 8~10 米處、15 米處以及 18 米處，岩性以泥質為主，外觀呈鱗片狀，表面帶有明顯擦痕(圖 60)，在拋光後的表面可觀察到黑色的條帶中夾雜小於一公分的泥質碎屑以及方解石碎屑，泥質碎屑呈透鏡狀且具有方向性的排列，顯示曾經受過強烈的剪切變形(圖 61)，其中黑色條帶不與稀鹽酸產生反應。此單元介於塊狀砂質泥岩與黃色破碎泥岩間，呈帶狀分布，有三道，寬約 10-20 公分，可於清理剖面露頭連續追跡約 0.5~1.8 公尺，

並且向上延續至清理剖面外。

3. 黃色破碎泥岩(單元 3)：本區為泥岩夾透鏡狀砂岩，所夾的透鏡狀砂岩可達十餘公分以上(圖 62)，砂岩塊亦有拖曳構造及旋轉的情形，分布於 9-10 米及 15-18 米處，寬度約 1-2 公尺。此單元相較其他岩性單位的砂含比例較高，在經風化後外觀呈黃褐色，與泥岩相比亦較為破碎，破碎程度僅次於黑色極破碎泥岩。去除表層風化後，可見其內部砂岩及泥岩碎屑亦呈透鏡狀，有拖曳構造及旋轉的情形。黃色破碎泥岩中含有密集的黑色條帶，寬度可達 1-2 公分(圖 63)且可以於手樣本中觀察到明顯的雷德剪切面，推測黑色條帶的生成與斷層的剪切作用相關。

4. 灰色緻密泥岩(單元 4)：本區為相對完整(intact)之泥岩，易剝面發育不佳，因此剖面清理時泥岩相較不易剝落，其中存在數條走向相近且可追跡一公尺以上之破裂面，介於正北至北北東之間。細部可觀察到延續性良好，可追跡數公尺之黑色剪切細紋(圖 64)，寬度在 2-5 公釐之間(圖 65)，剪切細紋大致與破裂面走向相同。

5. 崩積物(單元 5)：本區為膠結相當良好，泥塊表面凹凸不平且難以使用鋤頭將其破壞，其中存在數條方向雜亂且難以追跡之黑色剪切細紋，可追跡長度皆小於十公分。崩積物存在侵蝕溝並延伸至地面下之侵蝕洞，表層在進行開挖清理前有砂岩塊及帶有擦痕的方解石塊。

本研究判定斷層帶變形最劇烈處分布於剖面橫坐標 8~18 公尺處，本區主要以黃色破碎泥岩及黑色破碎泥岩兩個單位為主，於 13~15 公尺夾約 2 公尺厚的灰色緻密泥岩，其中 10~12 公尺受剖面上方崩落下來的崩積物覆蓋，無法記錄到其真實構造分布。黃色破碎泥岩及黑色破碎泥岩外觀相當破碎，且黑色破碎泥岩區中的裂隙，相較於黃色破碎泥岩更為密集，外觀更為破碎(圖 56)，岩層中包裹著受

拖曳及旋轉砂岩塊，也含有可連續追蹤的剪切細紋(圖 66)，黃色破碎泥岩中含可追跡數公尺的破裂面或剪切帶，略與斷層帶邊皆同向(圖 57 紅線)，位於斷層帶下邊界外的砂質塊狀泥岩之裂隙的密度則較為疏鬆，但仍可在約 7 公尺處，剖面深溝處側邊追蹤到兩條數公尺的黑色剪切帶(圖 67)。在 8~10 公尺處，斷層帶下邊界(破碎泥岩與砂質塊狀泥岩的接觸面)之走向為 $N50^{\circ}E$ ，傾角為 $33^{\circ}S$ ，14~18 公尺處可看到兩道帶狀黑色破碎泥岩，位態分別為 $N39^{\circ}E$ 、 $56^{\circ}S$ 及 $N45^{\circ}E$ 、 $56^{\circ}S$ ，走向與 8-10 公尺出露之黑色破碎泥岩位態大致相同，而兩道黑色破碎泥岩中間包夾黃色破碎泥岩，在剖面上的寬度約為 2 公尺。13~15 公尺塊狀泥岩中裂隙的產狀與 0~8 公尺處泥岩產狀接近，裂隙分布較黃色破碎泥岩稀疏。

斷層帶變形劇烈處的東南側 (圖 53 - D 區)為：於剖面橫坐標 28~34 公尺處，岩性以灰色緻密泥岩為主。此區於剖面清理前，露頭表面即可觀察到數條深灰色條帶(圖 68)，清理後的剖面，可追蹤到兩組破裂面，兩組破裂面走向皆為 $N-N26^{\circ}E$ ，傾角分別為約 26° ~ 30° 及約 51° 向南傾斜，其延續性至少 1 公尺(如圖 64)，近距離觀察，可發現更多束狀的剪切細紋，單條剪切細紋的寬度約為 2~5 毫米，部分剪切細紋可追跡 1 公尺以上，高傾角的剪切細紋被低傾角的剪切細紋截切的現象。此類束狀剪切帶約數十公分出現一束，且束狀剪切帶出現的密度隨著遠離斷層帶而降低。

斷層帶西北側(下盤)(圖 53 - A 區)：於剖面橫坐標 0~8 公尺處，岩性為砂質塊狀泥岩，未發現薄層砂岩，岩層面位態難以取得。本區裂隙依方向大致有 3 組，因遠離斷層變形最劇烈處，裂隙密度相較於破碎泥岩較為稀疏，剖面中存在數道與裂隙略同向，可被追跡數公尺的黑色破碎帶 (圖 55 橘線)。

根據本研究的構造紀錄結果，界定 8~18 公尺泥岩層為剪切變形相較強烈的位置，28~34 公尺緻密泥質岩中，亦可以追蹤到連續的破裂面或黑色剪切帶，且間距為數公分至數十公分不等，因此此區間亦位於車瓜林斷層影響的範圍內。

本研究將車瓜林斷層帶的下邊界標定在剖面的 8 公尺，以黑色破碎泥岩作為邊界；上界則是位於剖面外，以完整砂岩層面消失處作為邊界，斷層帶寬至少 20 公尺，以黃色及黑色破碎泥岩為主的變形集中帶則約 5-10 公尺。車瓜林斷層帶上盤為泥岩夾薄層砂岩，可觀察到完整且連續的層面；下盤為塊狀砂質泥岩，泥岩成塊狀且難以觀察到剪切構造。

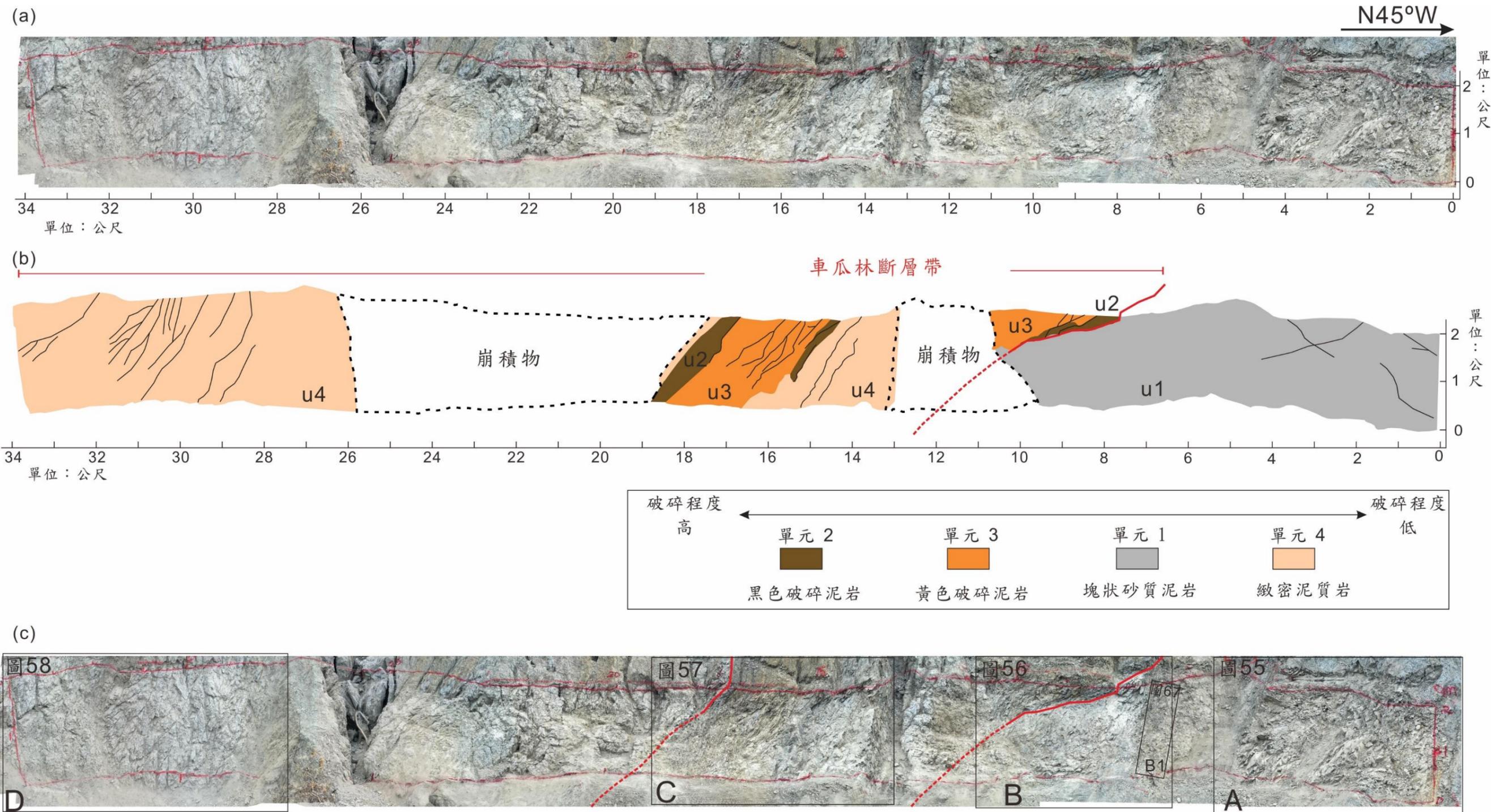


圖 53 剖面影像圖及立面測繪結果。(a)剖面接合照片；(b)剖面素描圖；(c)構造分區素描索引圖。

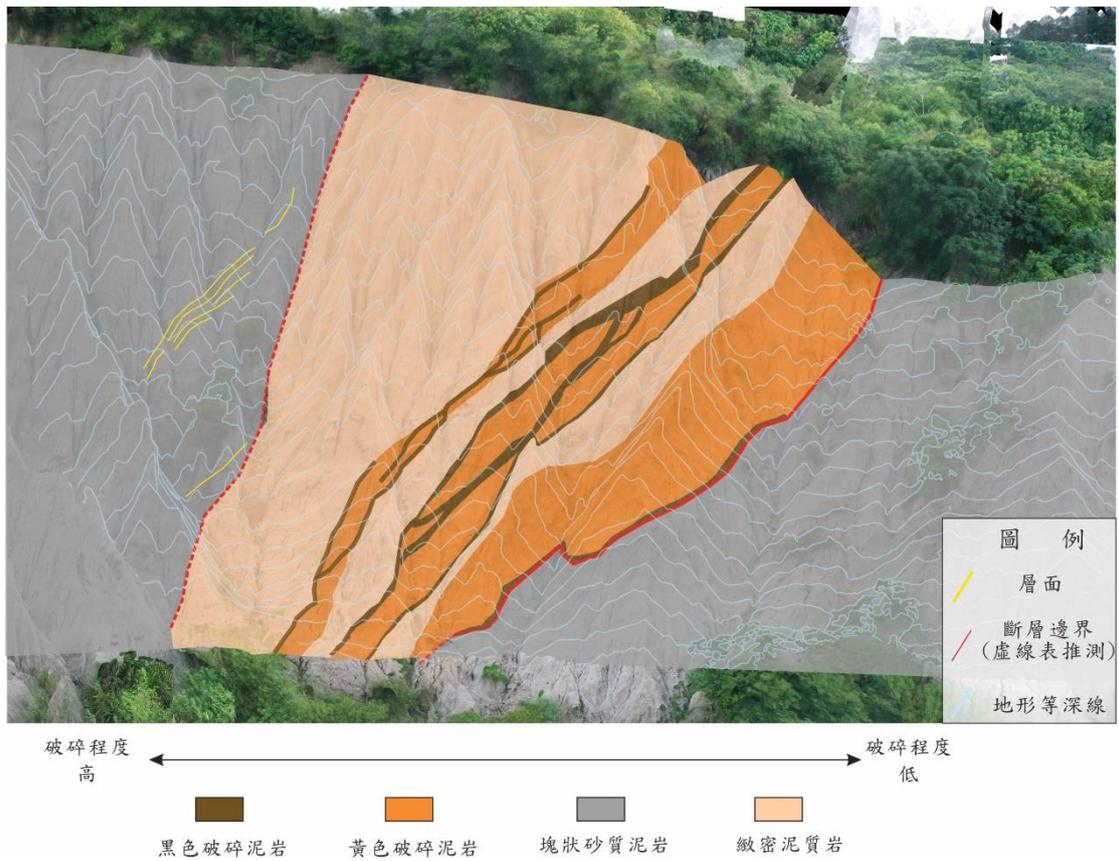


圖 54 剖面所劃分各單元於整個露頭上的分布。本研究於該處所劃分之單元可延伸出剖面至整個露頭，並可以利用剖面外的資訊推測崩積物下的岩石單元。

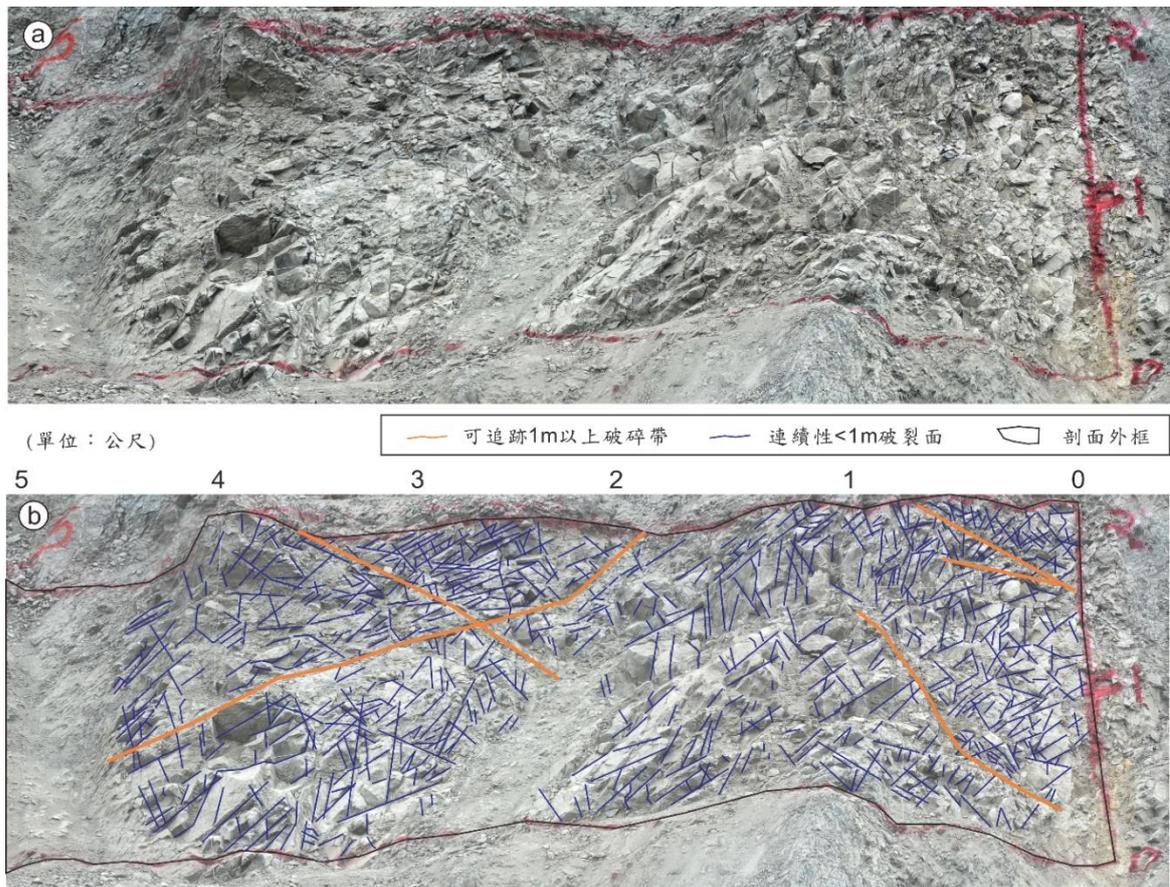


圖 55 剖面 0~5m 處編號 A 區局部構造素描圖。岩性為塊狀砂質泥岩，有 3 組以上連續性小於 1 公尺的破裂面(藍色線段)。有數條可追跡 1 公尺以上的黑色破碎帶(橘色粗線)。

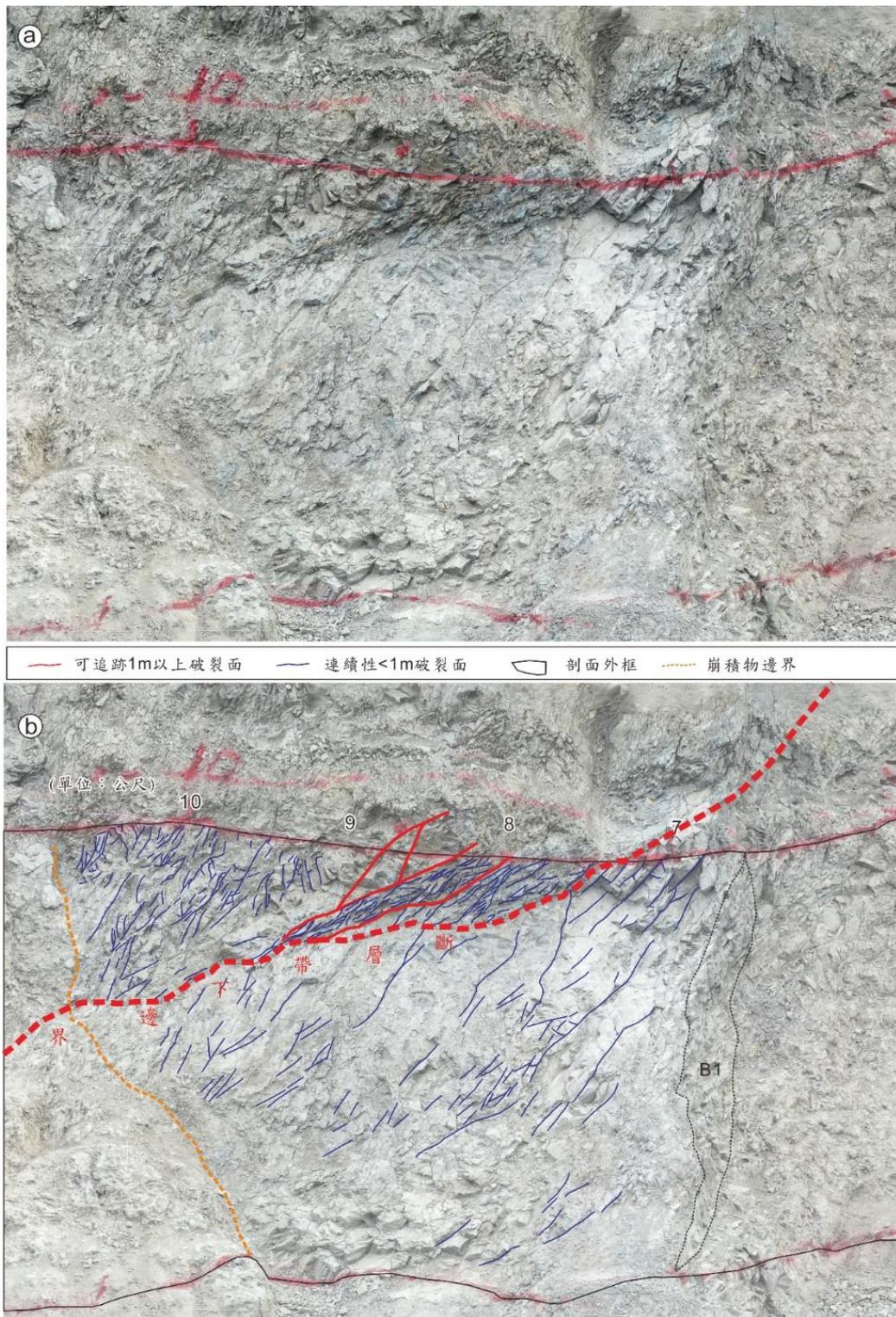


圖 56 剖面 5~10m 處編號 B 區局部構造素描圖。斷層帶下邊界(紅色虛線)通過此區，斷層帶外為塊狀砂質泥岩，斷層帶內破裂面有兩組，其中一組傾角較緩約與斷層帶下邊界方向同向，另一組傾角較大，斷層帶外的破裂面密度較斷層帶內的破裂面密度疏。

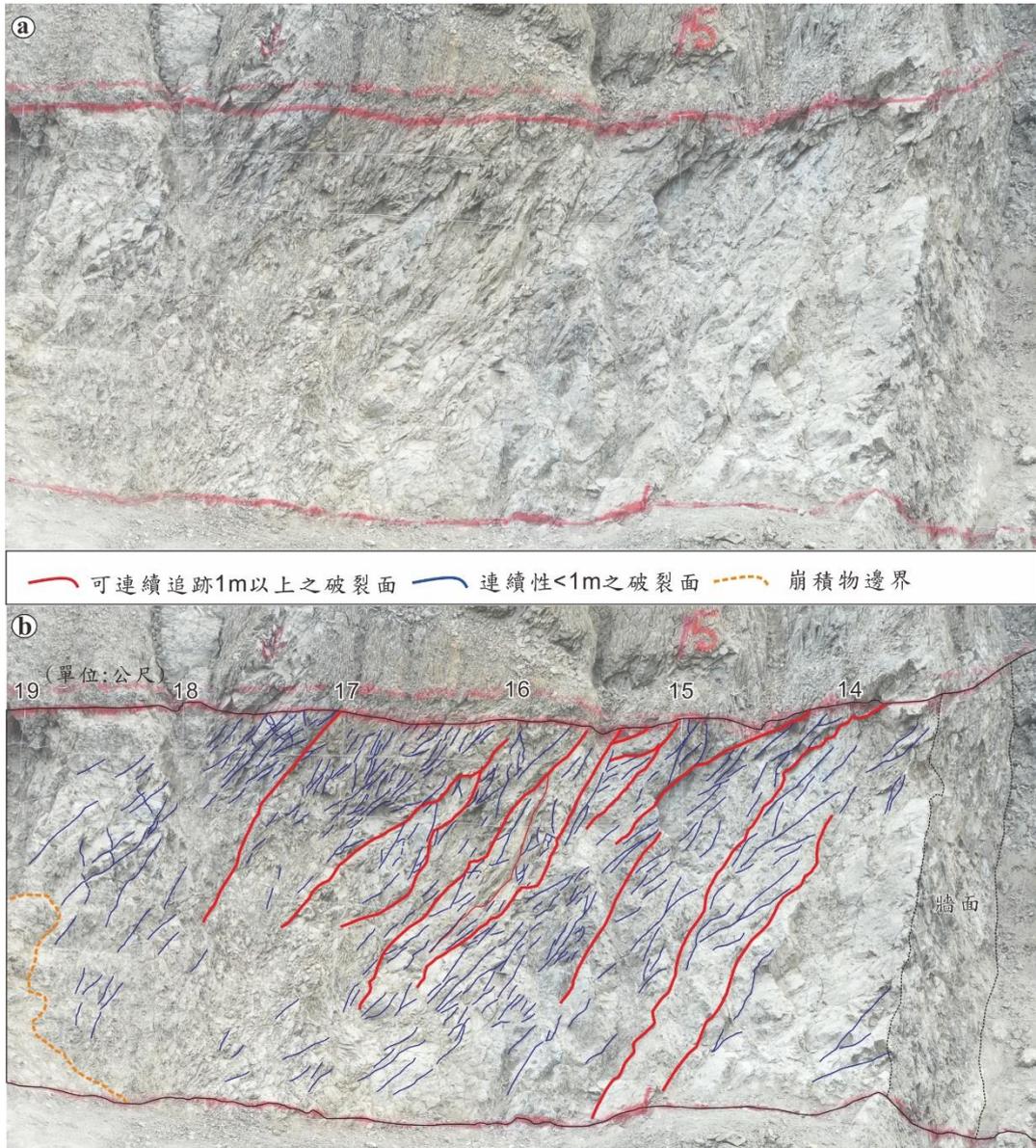


圖 57 剖面 14~19m 處編號 C 區局部構造素描圖。斷層帶上邊界(紅色虛線)通過此區，斷層帶外側為緻密泥塊，斷層帶內破裂面方向相近，略與斷層帶上邊界同向。

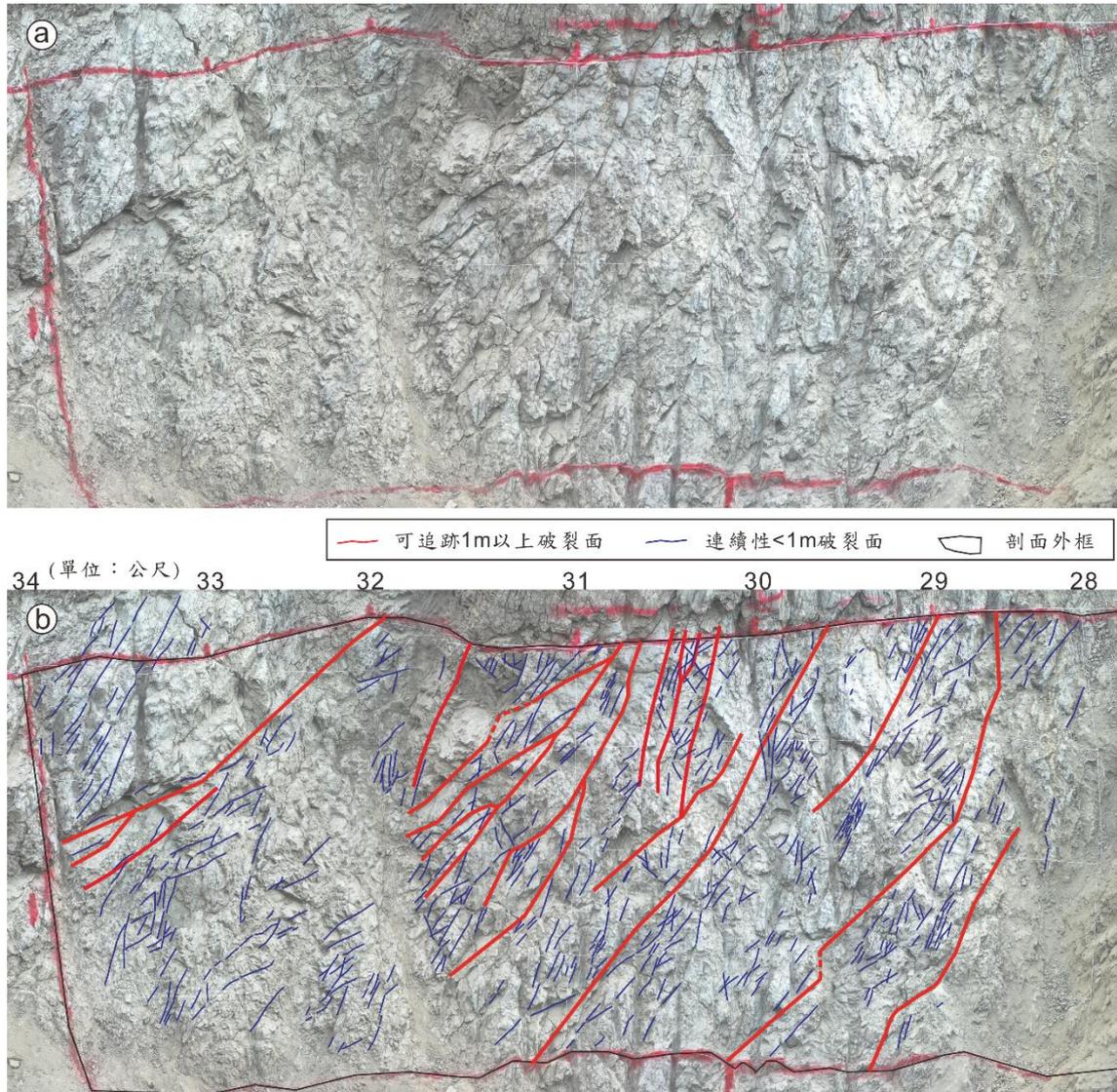


圖 58 剖面 28~34m 處編號 D 區局部構造素描圖。岩性為灰色緻密泥岩。



圖 59 黑色破碎泥岩中受拖曳及旋轉的碎屑。



圖 60 黑色破碎泥岩手樣本表面的清晰擦痕。紅色箭頭處指示擦痕位置，因岩石表面已進行上膠保存處理，顏色及反光在紀錄上存在些許差異。

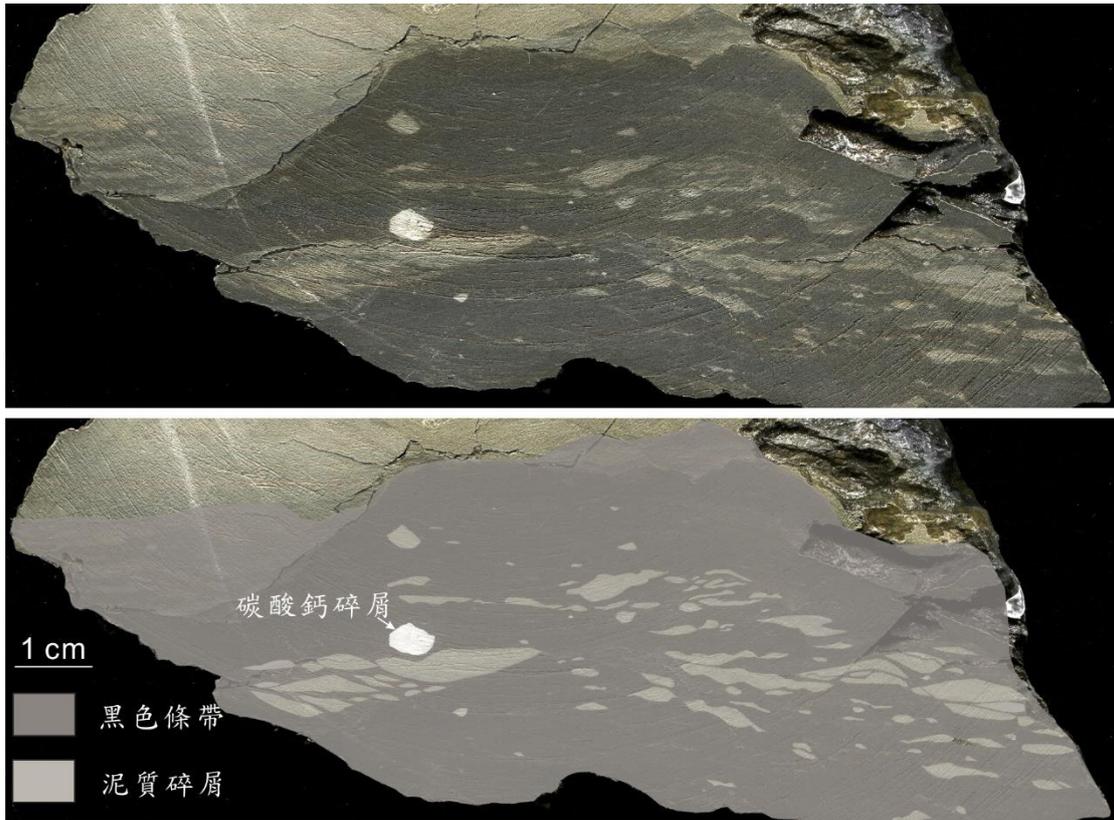


圖 61 黑色破碎泥岩研磨拋光後的手樣本。



圖 62 黃色破碎泥岩的露頭產狀。黃色破碎泥岩中所包裹的砂質碎塊較黑色破碎泥岩中的砂質碎塊大，亦有拖曳構造及旋轉的現象。

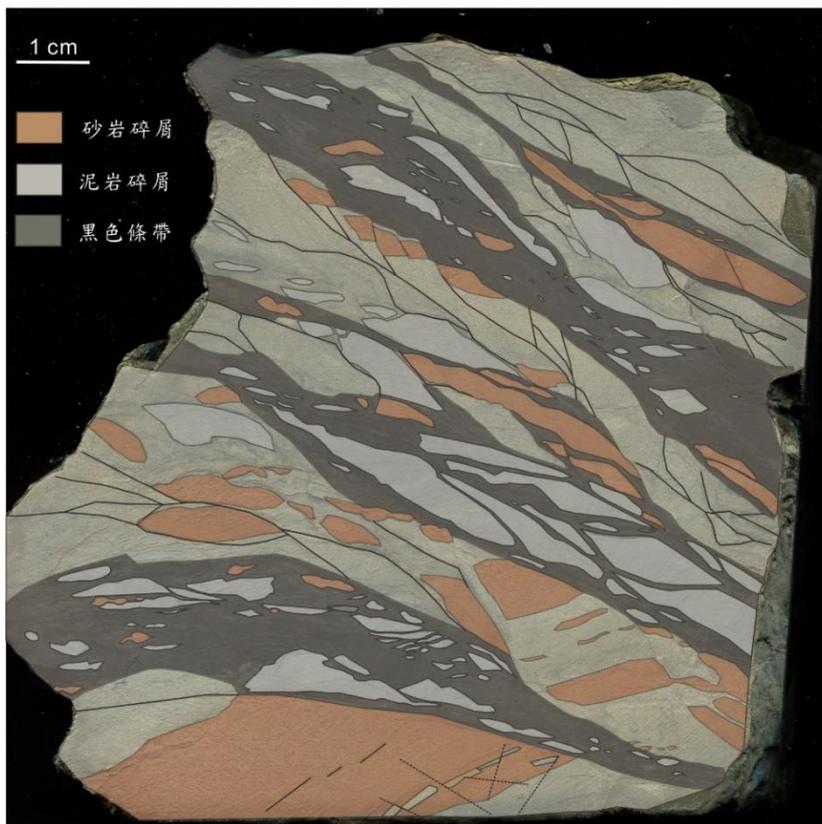


圖 63 黃色破碎泥岩研磨拋光後的手樣本。可在其中觀察到 Riedel shear structure 的出現。



圖 64 緻密泥岩中的束狀黑色調帶。其延續性良好，可追跡數公尺，寬度在 2-5 公釐之間。

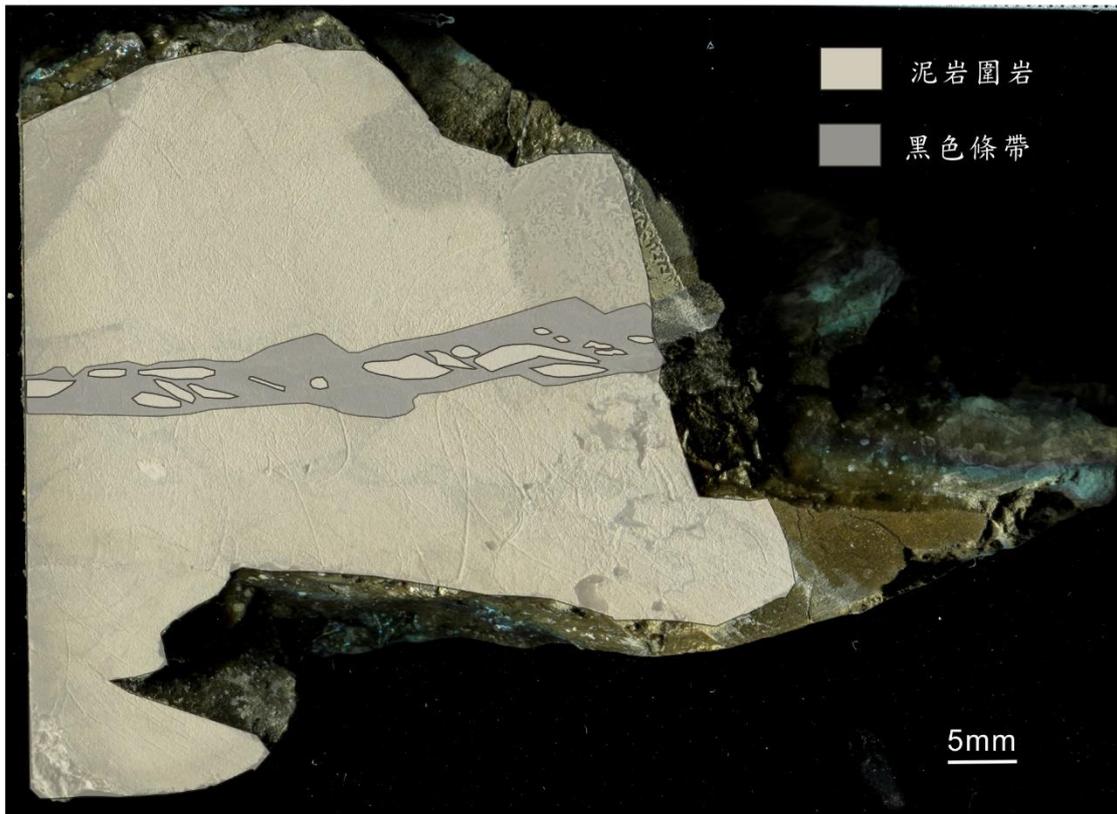
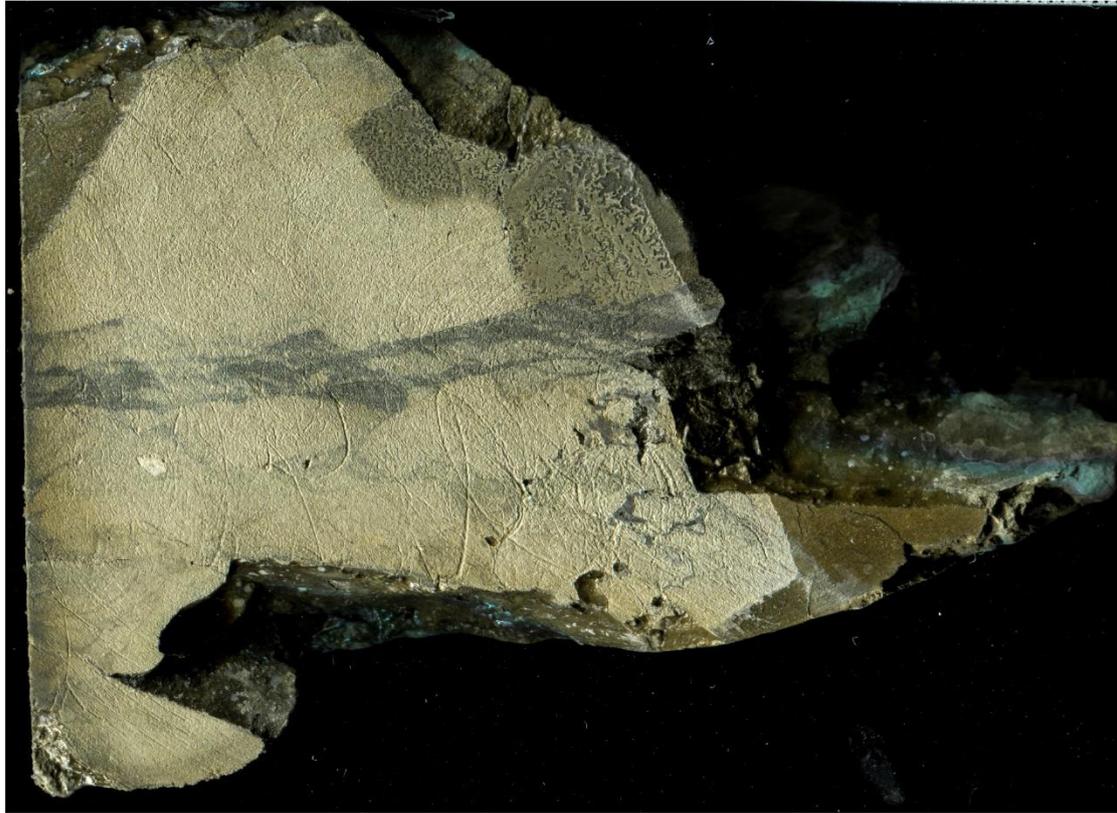


圖 65 緻密泥質岩中含黑色條帶之泥岩研磨拋光後的手樣本。



圖 66 斷層帶下邊界及黃色破碎泥岩、黑色破碎泥岩交界。破碎泥岩中含受拖曳、旋轉的砂塊及可連續追跡之剪切細紋。

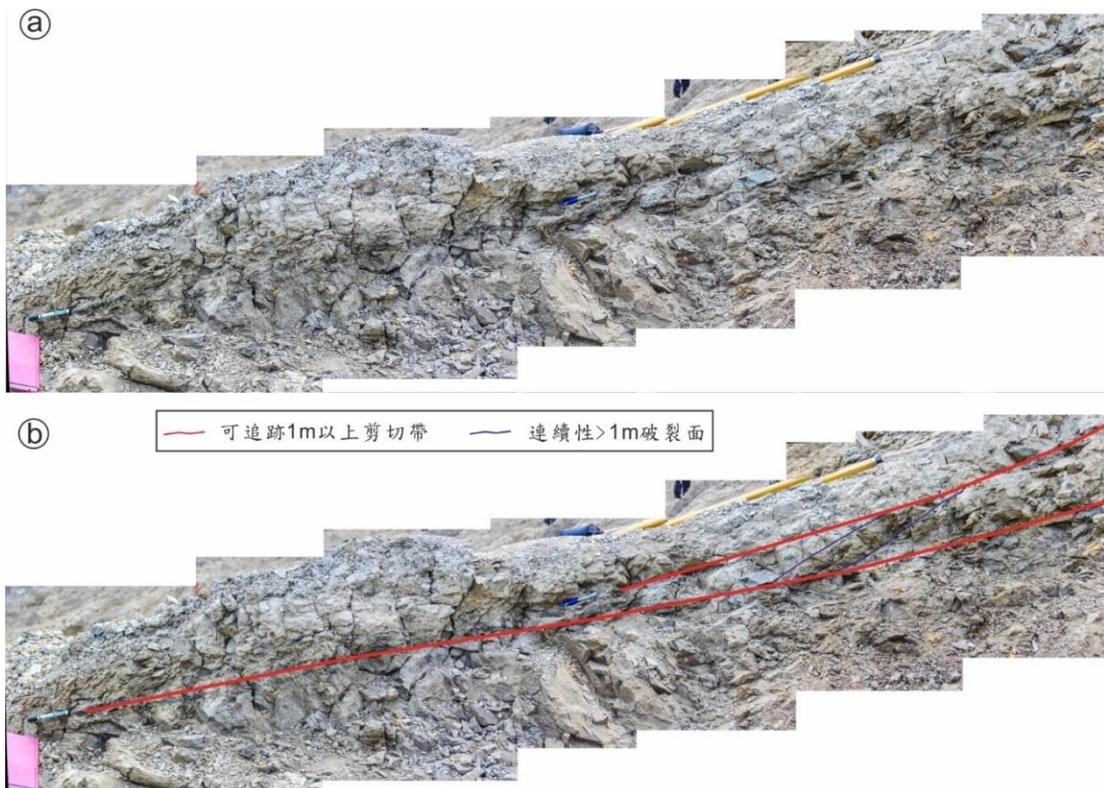


圖 67 剖面 5m 處編號 B1 區局部構造素描圖。與剖面方向斜交的側邊面，黑色剪切帶可連續追蹤。



圖 68 剖面 28~34 米處灰色緻密泥岩尚未清理前的露頭表面。表面能觀察到黑色條帶狀構造的存在。

5-3 岩心分析

本研究在車瓜林斷層帶上以 30° , 330° 方向鑽取 50 公尺的岩心，鑽井判釋成果如圖 69 所示。本研究鑽井岩心未進行定向，蝌蚪圖所表示為岩心中面狀構造之傾角與岩心軸的夾角，蝌蚪圖指向僅註記兩相鄰的面其傾向為同向抑或反向，如圖 69 中的 8、14、27 公尺處，其餘蝌蚪圖之指示方向在空間中不具方向代表性。根據鑽井岩心的構造特徵及產狀可將其分為五個單元，分別為完整砂岩、完整泥岩、破碎砂岩、含砂質角礫泥岩及含密集黑色條帶之泥岩。直至岩心 50 公尺處仍出現以泥為基質的砂質角礫及黑色條帶，判斷其仍受斷層作用影響，意味著本鑽井皆位於車瓜林斷層帶中。值得注意的是，於斷層帶的岩心中仍可觀察到數段 1-2 公尺長未受擾動的完整砂岩出現，夾於受劇烈變形的岩體間，僅存在大致與層面平行的破裂面。各單元間皆沒有觀察到明顯的交界面，多以角礫狀的砂岩做漸進式的轉變。本研究切取個單元較具代表性的區段並進行岩心的清理、3D 建模紀錄及繪製，以下將分別描述各單元的特徵：

1. 完整砂岩:本單元分別出現於剖面 11.5-13.2 公尺、39.9-42.3 公尺處出現大於一公尺的完整砂岩段，於 19.8-20.2 公尺、32.8 公尺、35.1-35.6 公尺處皆有出現約 10-40 公分長的完整砂岩段。該單元的岩性以極細砂岩為主，較抗水沖蝕，在岩心經清洗過後能清楚觀察表面的層理，由含泥量不同的淺色及深色砂岩互層而成(圖 70)。岩心中完整砂岩的破裂面較其他單元不發達，破裂面多與層面平行出現(圖 71)。

2. 完整泥岩:本單元於岩心中出現的長度每段皆僅約 10-20 公分，難以於所繪製的岩心柱上表示。泥岩中不存在角礫狀砂岩碎屑或灰黑

色的剪切條帶等變形後的產物，僅偶夾紋層砂於其中，泥岩強度較弱，遇水會產生崩解並可以徒手將其破壞。

3. 破碎砂岩:本單元的岩性主要為破裂面發達的砂岩，砂岩破碎但砂岩碎塊間仍互相支持，裂隙中常有泥質物填充。在破碎砂岩與其他單元的邊界，砂岩的破碎程度增加，轉為泥質基質支持的砂質角礫(圖 72、圖 73)。

4. 含砂質角礫泥岩:含砂質角礫泥岩為岩心中佔比最多的單元，在將岩心表面泥漿以小刀刮除時，此單元區段的岩心在刮平後表面難以判斷砂質或泥質碎屑，須使用大量清水對岩心進行清洗才能使砂質碎屑於岩心中顯現並加以觀察記錄。於此單元砂質碎屑呈現角礫狀散佈於泥質基質中，砂質角礫破碎程度高，大小分布在數公釐至數公分不等，其排列多不具有方向性(圖 74)，推測此單元可能為斷層帶中水岩作用(fluid-rock interaction)下的產物，然而與斷層的應變集中應較無關聯。在此單元的泥質基質中偶爾可以觀察到黑色條帶的出現，黑色條帶中有包裹砂質或泥質碎屑，在其周圍及內部的砂質碎屑則會出現旋轉並呈與黑色條帶同向的方向性排列(圖 75)。

5. 含密集黑色條帶的泥質岩:在岩心大部份的泥質岩中，多有黑色條帶的出現，黑色條帶的寬度分布在不足一公釐的細紋狀至寬數公分的條帶狀，密集或稀疏的出現在岩心中的泥質岩處。在岩心 8.3 公尺處的截面上觀察到擦痕出現在光滑的曲面上(圖 76)，截面為岩心在濕潤狀態下因搬運所造成，然而其餘位置的岩心截面則不易觀察到擦痕的出現。黑色條帶出現的角度不一，在數十公分的區段內往往出現多組角度不同且存在截切關係的黑色條帶，方向相異、相互截切的黑色條帶也往往具有不同的剪動方向，與岩心軸的夾角界於 0° - 60° 之

間。黑色條帶中夾有淺色泥質碎屑，長軸排列方向與黑色條帶的延伸方向一致(圖 77、圖 78)。

本研究所施作的鑽井雖以斜井方式欲以最段距離垂直貫穿斷層帶，但岩心紀錄結果顯示，岩心 0 公尺及 50 公尺處所出現的單元皆為含砂質角礫泥岩，並在 44 公尺處仍有密集黑色條帶的出現，為斷層作用影響下的產物，故判定岩心整體皆位於車瓜林斷層帶中。由 0 公尺所出現的含砂質角礫泥岩可得知斷層帶的邊界較難以利用泥岩露頭所出露的資訊進行推測，上盤所存在的連續砂岩層面在接近黑色條帶前已經形成受斷層作用形成的砂質角礫，然而表面資訊為泥質沖蝕物所覆蓋，斷層帶邊界應再向外延伸約 5-10 公尺。岩心中所夾帶有完整層面的砂岩亦可以在露頭上觀察到，然而砂岩層面連續性不佳且位態與上盤砂岩有所差異，詳見 5-1-5。

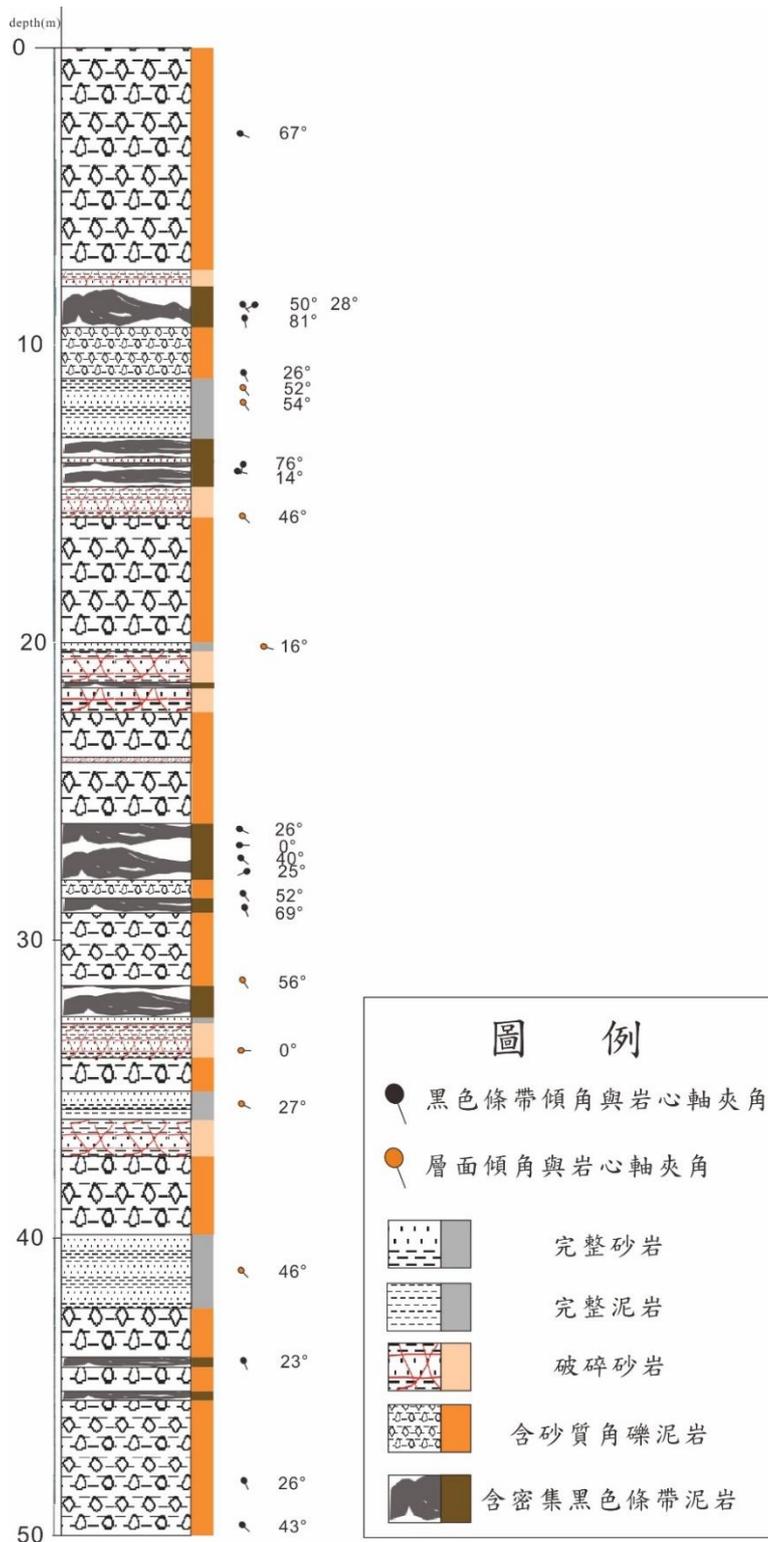


圖 69 岩心判釋成果。本研究將岩心內的岩體區分為五個單元，蝌蚪圖僅表示兩相鄰面之傾向關係，因本鑽井未進行定位，其指示方向傾向在空間中較不具代表性。



圖 70 完整砂岩近照。岩心中的完整砂岩在清洗過後可觀察到其為砂泥含量不同的砂岩所組成。

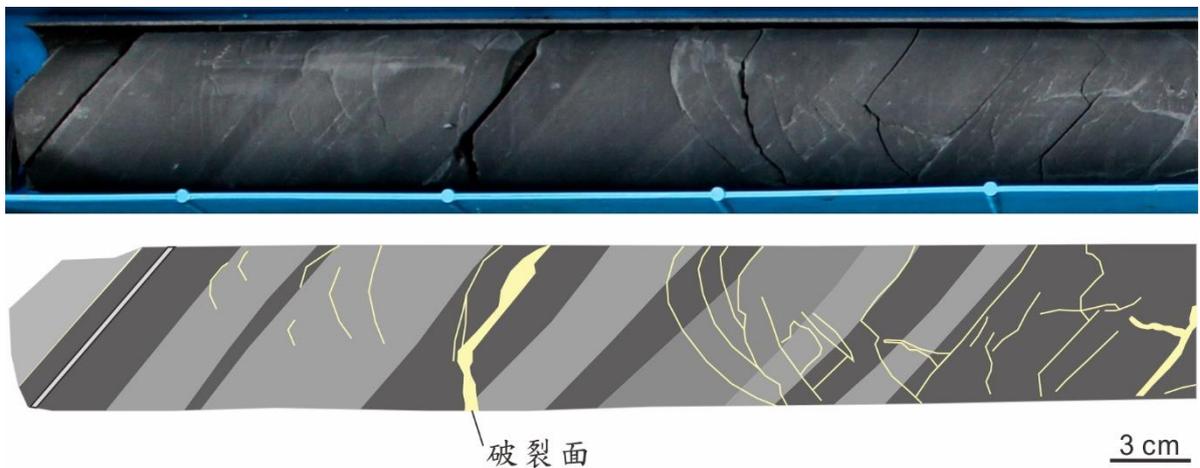


圖 71 完整砂岩在岩心中的產狀，破裂面不發達且多為平行層理。



圖 72 破碎砂岩近照。破碎砂岩破裂面發達且不具有特定方向，並可在其中觀察到微型斷層的出現。

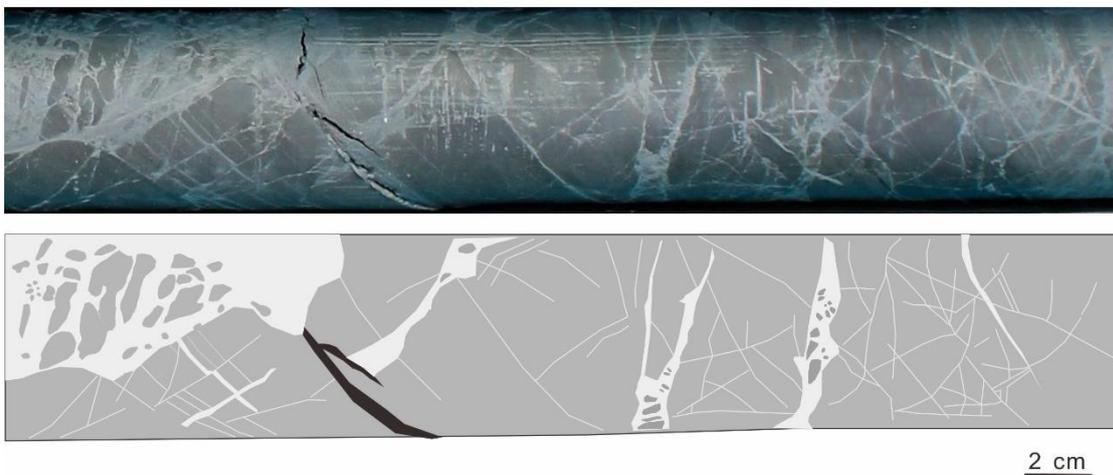
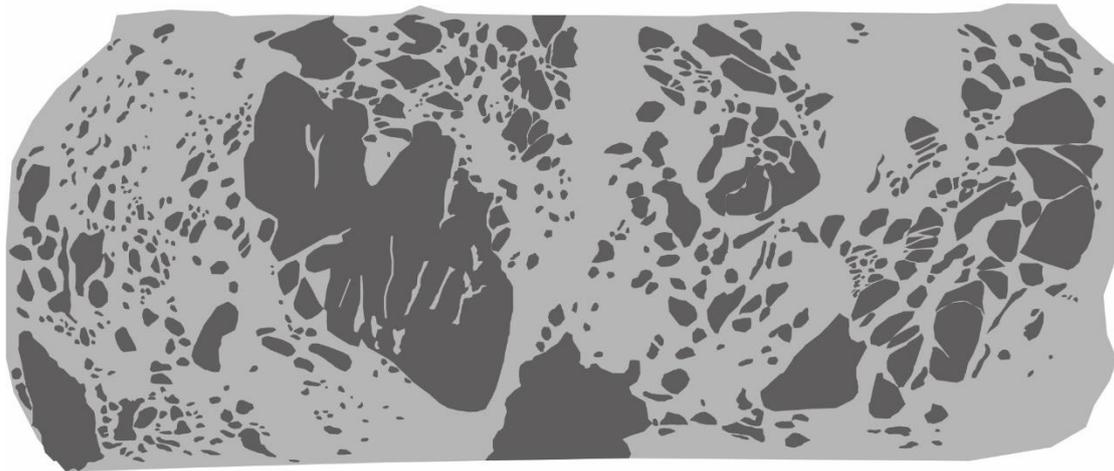
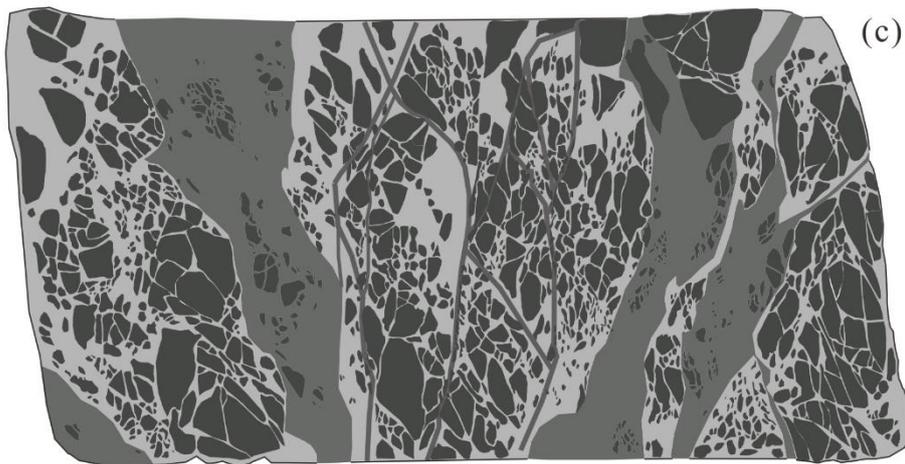
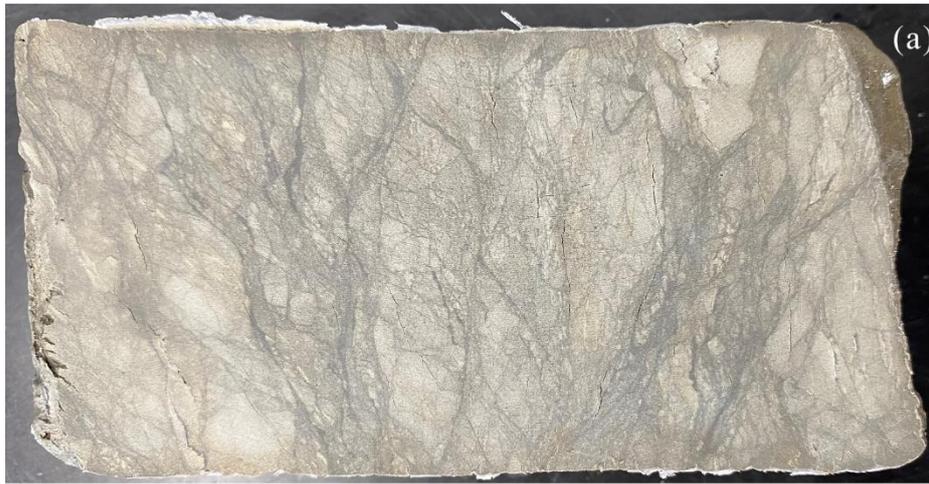


圖 73 破碎砂岩在岩心中的產狀。破裂面發達且多以泥質物填充，在其邊界形成更為破碎的砂岩角礫。



2 cm

圖 74 以泥質基質支持的含砂岩角礫泥質岩。角礫大小在數公釐至數公分不等，角礫排列方向不具有方向性。



1 cm

圖 75 含黑色條帶的含砂質角礫泥質岩。不同方式處理下的岩心會呈現不同產狀，可觀察到於黑色條帶中及周圍的砂岩角礫長軸呈方向性的排列，與黑色條帶延伸方向一致。



圖 76 岩心截面上所出現的擦痕。擦痕位於岩心 8.3 公尺處且出現於光滑的曲面上。

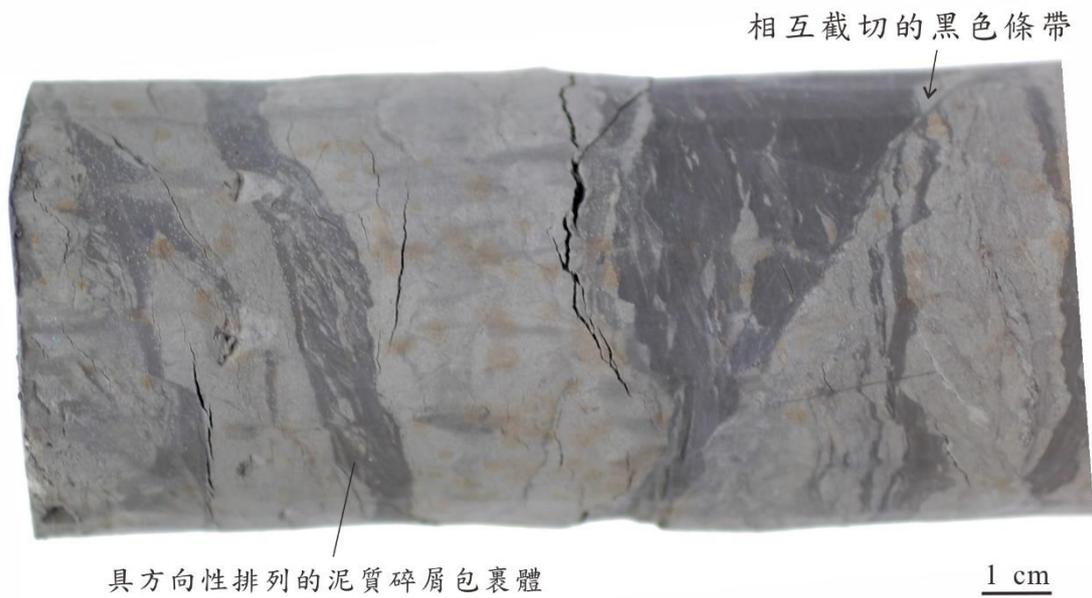


圖 77 含黑色條帶之泥岩岩心近照。其中黑色條帶相互截切且其中所包裹的泥岩碎屑長軸排列方向與黑色條帶延伸方向一致。

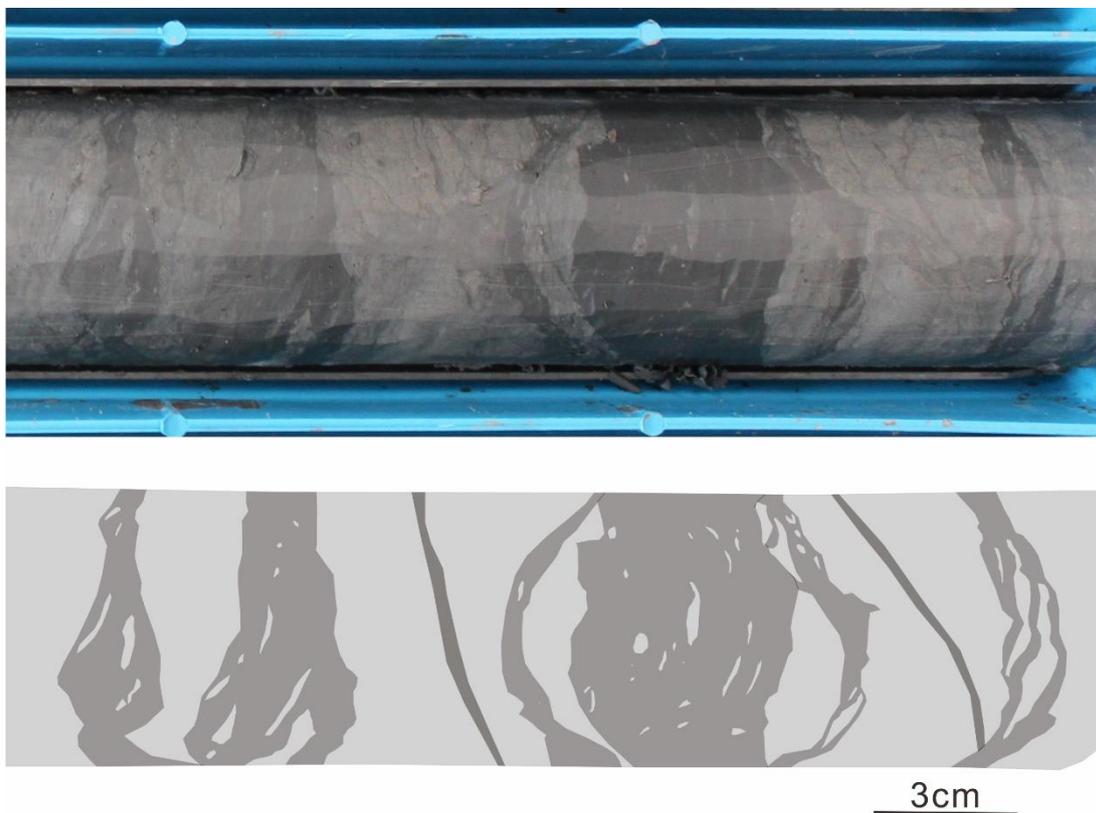


圖 78 含黑色條帶之泥岩於岩心中的產狀。可觀察到數組黑色條帶，寬度介於數公釐至數公分。

第六章 討論

6-1 車瓜林斷層帶中的岩體特徵

本節將藉由野外工作所獲得的資訊及觀察，探討泥岩斷層帶的構造特性。車瓜林斷層帶於地質剖面清理至鑽井處的露頭皆有類似產狀，上盤為泥岩夾薄層砂岩；下盤則為巨厚泥岩；斷層帶產狀為黃褐色與深黑色泥質條帶所交織的寬帶，顏色上與斷層帶兩側的灰色泥岩有所差異。本節首先於第一項將藉由地質剖面清理手樣本及岩心分析討論泥岩斷層帶中的岩體單元特徵，探討砂質及泥質岩在斷層帶中的產狀及特徵；第二項將透過文獻回顧比較車瓜林斷層的特徵與其他泥質斷層帶是否有相似及可相比對之處。

6-1-1 泥岩斷層帶中的岩體單元

本研究於車瓜林斷層的兩處露頭分別進行了地質剖面及鑽井岩心分析的項目，透過去除表面沖蝕及崩積物的方法以瞭解泥岩斷層帶中的岩體特徵。於地質剖面可以觀察到其表面受地表風化影響，呈現乾燥且岩體單元多為破碎；而鑽井所取得岩心內的岩體則較為濕潤，除砂岩單元外，岩心泥質部分多保持完整，破碎砂岩及砂質角礫間的縫隙皆有泥填充，幾乎沒有出現將岩心切穿的破裂面。剖面及鑽井中的泥岩產狀因環境及會出現差異也可以在前人的文章中可以觀察到，Jaeggi et al.(2017)在泥岩斷層剖面中觀察泥岩產狀以鱗片狀為主，並以斷層泥的出現作為泥岩斷層帶的邊界，且可以在鱗片狀泥岩中觀察到 S-C 構造及微型褶皺的出現。然而 Lao et al.(2020)在泥岩斷層帶的鑽井中觀察則以角礫帶(breccia belt)及以泥岩帶有擦痕的滑移帶

(sliding belt)的產狀為主，兩者所觀察到斷層帶中的泥岩產狀而不盡相同。

儘管於地表及地下所觀察到的泥質岩產狀稍有不同，還是可以將出現在泥岩斷層帶中的岩性及變形特徵進行歸納。於剖面及岩心中本研究觀察到斷層帶中主要有黑色條帶及夾砂質角礫泥岩的出現，且黑色條帶僅出現在泥質岩中。於岩心中的砂質角礫可以觀察到其破碎程度高且碎塊大小不一，於岩心中多不具有方向性的排列(圖 74)。砂質角礫的出現無疑與斷層作用有關，然而其產狀顯示該單元與斷層的應變集中較無關聯。反觀黑色條帶於露頭或岩心中的出現常伴有擦痕及剪切構造，其中所包夾與相伴的砂、泥質碎屑皆出現方向性的排列及顆粒旋轉的情形(圖 63、圖 75)，可作為在斷層作用下岩體受力而形成的應變集中指標，顯示了車瓜林斷層帶曾經活動的證據。

本研究藉由地質剖面及岩心分析的觀察，認為於車瓜林斷層帶中所出現的黑色條帶可做為應變集中的指標，於泥質岩中的黑色條帶出露於斷層各處，於地表出露後叢聚處因含水量變化及表面風化而形成由黑色破碎泥岩組成的寬帶；較泥岩少量的砂岩則經斷層作用及水岩作用轉變為砂質碎屑並散布在斷層帶中，形成泥質支持的含砂質角礫泥岩，並經地表風化而出露黃色破碎砂岩，使野外露頭呈黃色帶狀。藉由黑色條帶於露頭上的分布(圖 54)，儘管斷層是以寬帶的形式出露，我們仍能於斷層帶的露頭中觀察到應變集中的現象。

6-1-2 車瓜林斷層帶與其他泥質斷層帶之特徵比較

車瓜林斷層發育在古亭坑層的泥岩中，泥岩為軟弱岩層，與脆性斷層的行為及產狀稍有差異。Lee and Kim (2005) 認為斷層帶於泥岩中的變形會傾向於較平均的分布於整個斷層帶中，而非如脆性斷層帶集中於一個窄帶。Pei et al. (2020) 所提出的斷層模型(圖 11)認為在不同比例的堅硬岩層與軟弱岩層的情況下，斷層會有不同的行為，尤其當軟弱岩層占比遠大於堅硬岩層時，斷層帶的變形會以較為延性的褶皺作用為主，僅有局部的斷層作用發生在堅硬岩層上。

Jaeggi et al. (2017) 在瑞士 Opalinus 黏土中的 Main Fault 研究中，認為泥岩斷層帶中大部分的錯移被黑色的斷層泥所容納，且黑色的斷層泥與鱗片狀泥岩相伴而生，為空間上的應變集中帶。應變集中帶出現在斷層帶的邊界上，斷層帶中心反而承受較少的應變。在車瓜林斷層帶中，本研究亦有觀察到類似的現象，斷層帶中的泥岩在野外呈現鱗片狀，出現常伴隨擦痕及剪切構造的黑色條帶，暗示其與斷層應變集中作用有關，並以條帶狀出現於露頭上。藉由這些應變集中指標的出露，我們仍能於斷層帶中觀察到應變集中的現象(圖 54)。

在台灣的南部以及東部地區亦有兩處在岩性上與古亭坑層相似，且受劇烈剪切作用的區域，即墾丁混同層和利吉混同層。混同層在岩性上皆以泥質為主並在地形上形成了與本研究相似的惡地地形，然而混同層中的泥岩，以多受應力作用、強烈剪動的泥為基質，並夾雜有許多外來岩塊。混同層中的層面多為破碎，與古亭坑層中多處可見完整且連續的層面有所不同，且古亭坑層中並不具有外來岩塊，泥岩當中也多不具有剪切構造的出現，兩者的剪切量明顯有所差異。大量的剪應力作用在混同層的泥岩中，鱗片狀葉理(scaly foliation)及 S-C 構

造(S-C fabric)為利吉混同層中最常見的構造(圖 79)，與本研究所觀察車瓜林斷層帶內的泥岩組構有相似之處(圖 37、圖 60)，然而受劇烈的剪切作用的泥岩僅出現在車瓜林斷層帶中有黑色條帶出現的區域，而非遍布於整個斷層帶中，圍岩部分更保有完整層面並缺乏剪切構造。以地質構造觀點來看，墾丁混同層可被視為一個寬達一公里，長達二十公里的巨大剪切帶(Chang et al., 2003)，相較於古亭坑層中的車瓜林斷層，其寬度僅數十公尺，且僅有黑色條帶伴隨出現的泥岩為鱗片狀並具有擦痕及剪切構造，混同層與車瓜林斷層的剪切應變量有明顯的差異存在。

近期亦有研究在池上斷層的利吉混同層中發現有黑色條帶的出現，並報導了這些黑色條帶中有發現非晶質礦物的出現，指示其可以做為應變集中的指標並為池上斷層近期仍然活動的證據 (Wu et al., 2020)，本研究在中視尺度上亦有觀察到與剪切作用及應變集中相關聯的黑色條帶，可見在受剪的泥岩中其內部所存在的構造具有一定的相似性，且黑色條帶可能做為泥岩斷層帶中的應變指標。

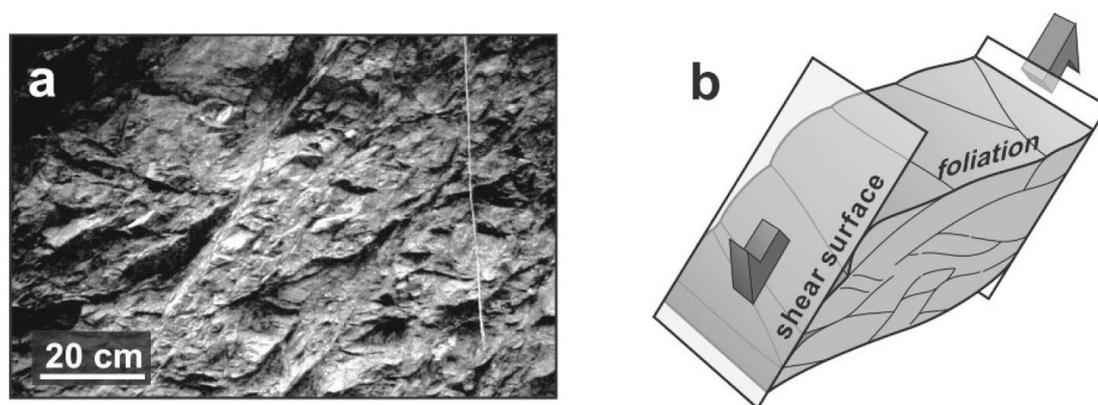


圖 79 利吉混同層中的 SC 構造(S-C fabric)。(圖引自 Chang et al., 2009)
(a)泥質基質中的鱗片狀葉理(scaly foliation)。(b)鱗片狀葉理的 S 面可表示剪切面的移動方向。

6-2 泥岩斷層帶中的黑色條帶

在泥岩斷層帶中，可以在露頭面上觀察到黑色條帶出現在斷層帶各處，在斷層帶露頭中的黑色條帶叢聚處，黑色條帶呈數公分的寬帶並可以追跡至整個露頭，而越往圍岩靠近，黑色條帶則轉為寬數公釐的細紋且分布較為稀疏。然而在斷層帶中出現頻繁的黑色條帶成因繁多，諸多研究在形成及變形機制上仍有許多不同看法：Ishii(2012) 在泥岩中觀察到在斷層周圍的泥岩有細黑色條帶的出現，利用電子顯微鏡的觀察發現其主要為壓密碎屑之組構(compactional cataclastic fabrics)，並認為泥岩斷層帶中的黑色條帶為在脆性-塑性環境下所形成的壓剪變形條帶(compactional shear bands)。Casciello et al. (2011) 於野外觀察到泥岩斷層帶由淺色的泥岩透鏡體及黑色條帶所構成，其中黑色條帶主要分布在 P 型葉理及 Y 型葉理方向上，且黑色條帶在露頭形貌上的地形起伏較大。利用 XRD 及 XRF 的方法，他們認為在剪應力的作用下，黏土礦物沿著 P 型葉理發生膨潤石-依萊石的礦物相轉變為泥岩顏色變黑的主要原因，並且此轉變所造成的脫水現象導致斷層帶局部孔隙水壓上升使整體弱化。Kaneki and Hirono (2016) 則認為斷層泥的黑化也有可能為摩擦所導致的磨碎及加熱作用使細小黑色顆粒(如煤或磁鐵礦)擴散而造成。前人文獻在斷層泥中也發現並報導了非晶質礦物的出現，而非晶質礦物的出現可指示為斷層近期的活動證據以及斷層中有限的流體活動，使其不易風化而得以保存於斷層泥中 (Hirono et al., 2016; Laurich et al., 2018; Wu et al., 2020)。

本研究於露頭所採集帶有黑色條帶的泥岩皆呈鱗片狀，有關鱗片狀泥岩 Orellana et al. (2018) 對未變形之泥岩利用雙直剪試驗結果發現泥岩可以在低溫低壓($\leq 20\text{Mpa}$)下形成表面光滑且帶有擦痕的鱗片

狀泥岩(scaly clay)，其中鱗片狀泥岩在機械性質上具有速度強化及弱化、低摩擦強度及低癒合率(healing rate)的特性。微觀構造上則觀察到內部有礦物粒徑削減(grain size reduction)、黏土礦物順向排列的現象，指示其變形機制為摩擦滑動(frictional sliding)、微壓裂(micro fracturing)及碎屑流(cataclastic flow)。

Laurich et al. (2018) 則認為泥岩中所出現的黑色條帶係由鱗片狀黏土發育而來的斷層泥，而鱗片狀黏土則為泥岩在幾何鎖定及局部孔隙水壓上升的情況下發育而成。其中斷層泥變黑的主因為在變形過程中礦物粒徑削減(grain size reduction)連帶造成促使孔隙率下降，再加上方解石的溶解消耗(calcite depletion)所導致。變形機制主要為新黏土礦物生成作用(neoformation of clay)、方解石的壓溶作用(pressure solution of calcite)、壓碎及磨損作用(cataclasis and abrasion)以及摩擦顆粒流(frictional granular flow)，並認為受以上機制變形所形成的斷層泥會較圍岩軟弱。

亦有研究於車瓜林斷層以北的龍船斷層進行斷層泥的微觀組構分析，龍船斷層亦位於古亭坑層中，地質背景與車瓜林斷層相似。黃家俊(2015)利用 X 光粉末與極圖繞射技術及光學與電子顯微分析龍船斷層中的泥岩及斷層泥，得知斷層泥的生成機制為機械性剪碎作用、黏土礦物重新旋轉及沿裂面順向排列。而斷層泥中的礦物相與泥岩圍岩相似，為持續的變形使其晶格受到破壞導致黑色條帶的形成，且越黑的斷層泥其所經歷的應變越多，可作為應變集中的指標。該研究認為斷層泥的此種性質會提供斷層良好滑移面並造成滲透性差異，導致局部孔隙水壓改變使斷層弱化，促使斷層產生潛移的行為。

前人對於黑色條帶的成因主要為純粹碎裂作用細粒化所致或同時有黏土礦物相的轉變，本研究所觀察到的黑色條帶中包夾有許多砂、

泥質碎屑，碎屑多呈透鏡狀及角礫狀，其長軸排列的方向與黑色條帶的延伸方向一致，在黑色條帶中也可以觀察到有許多微小斷層截切其他黑色條帶或碎屑的現象，於黑色條帶的面上也可觀察到擦痕存在(圖 80)，且伴隨著剪切構造出現(圖 63)。本研究根據野外及岩心中對泥岩斷層帶中黑色條帶的中視尺度觀察，推測其為斷層作用下的產物，並可作為應變集中的指標。前人文獻中，黑色條帶或是鱗片狀泥岩藉由微觀觀察，多推論為機械性剪碎作用及黏土礦物的順向排列的結果，並可能導致斷層帶的弱化，而使斷層更容易產生潛移行為，與車瓜林斷層在巨視尺度下的觀察相符。本研究預期若以車瓜林斷層中的黑色條帶進行分析，應能與前人研究獲得接近的結果，且若能在其中觀察到非晶質礦物的出現，更能將黑色條帶與車瓜林斷層帶的現生變形進行連結。然而黑色條帶遍布於車瓜林斷層帶中，在缺乏微觀尺度的觀察下，難以比較於斷層各處出現的黑色條帶，並判定何處應為車瓜林斷層的滑動帶處及其活動性，從而加以探討車瓜林斷層帶的演育及行為，此部分仍需後續的研究將其完備。

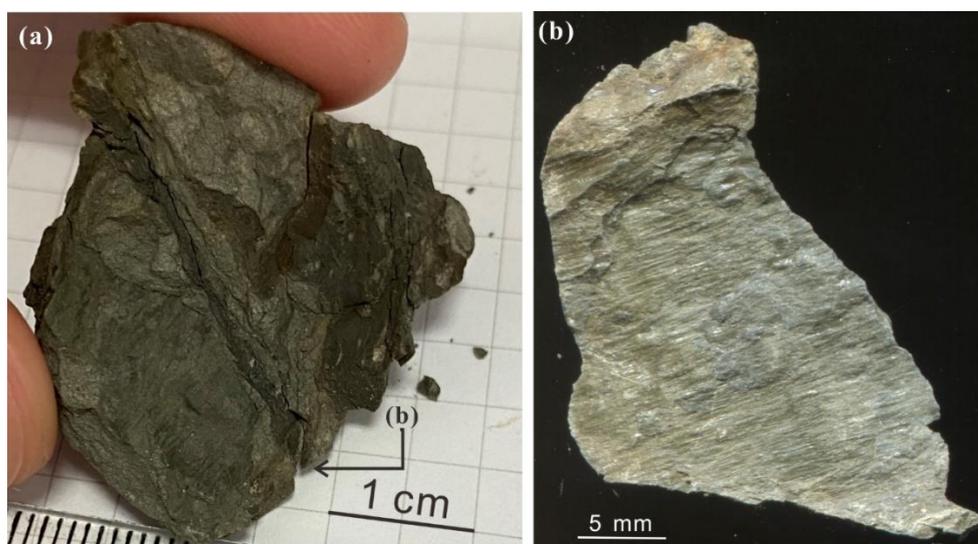


圖 80 泥岩中具有黑色條帶的手樣本。可沿黑色條帶將泥岩分裂為兩塊並於黑色條帶的表面看到明顯擦痕。(a)泥岩手樣本 (b)黑色條帶面之高解析度掃描，故擦痕呈現亮白色。

第七章 結論與建議

7-1 結論

本研究對車瓜林斷層進行了精細調查，項目包括地表地質調查、地質剖面清理及岩心分析，欲探討該泥岩斷層帶中的構造及岩石特徵。根據本研究所進行的上述項目，提出以下結論：

1. 車瓜林斷層自大廊亭山至千秋寮一帶可以於野外良好追跡約 5 公里，斷層產狀為黃褐色與深黑色泥質條帶所交織的寬帶，顏色與斷層帶兩側的灰色泥岩有所差異，可良好辨識。
2. 於泥岩惡地地形中的車瓜林斷層帶其地表及地下之岩石產狀有顯著差異，表面的精修與否也大為影響岩石樣貌。於地表的泥岩裂面發達多呈破碎狀，然而鑽井所取得之岩心鮮少有破裂面使岩心多保持完整。
3. 車瓜林斷層帶中泥岩特徵為其中所含有的砂質角礫及黑色條帶，其中黑色條帶在露頭及岩心中常伴隨有擦痕及剪切構造出現，本研究藉由野外觀察及前人文獻探討，認為黑色條帶為斷層作用下的產物，並可作為車瓜林斷層的變形證據及應變集中的指標，可暗示車瓜林斷層的地表變形蹤跡。
4. 泥岩斷層帶中變形雖傾向於較平均的分布於斷層帶中，然而藉由觀察黑色條帶於露頭或岩心中的分布，仍能在觀察到斷層帶內變形集中的現象。
5. 泥岩中出現黑色條帶的成因繁多，在缺乏微觀觀察下難以確定其變形機制及礦物組構，建議後續研究對於黑色條帶進行微觀構造之觀察，以確定其變形機制及活動特性，對泥岩中斷層帶的特性瞭解才能更加完備。

7-2 建議

本研究僅藉由中視尺度下的觀察對車瓜林斷層進行的初步探討，本研究認為泥岩斷層帶中所出現的黑色條帶為斷層作用應變集中的產物，在缺乏微觀尺度的觀察下，對於其內部的變形機制及礦物組構瞭解較有限。建議未來從事相關研究者能進行泥岩光薄片的製作，並進行更進一步的研究如利用掃描、穿透式電子顯微鏡在微觀尺度下的觀察以及礦物組構的分析，能將結果套用在現正變形的泥岩斷層帶中，使車瓜林斷層的相關研究更加紮實。

參考文獻

- Beynon, S. J. and Faulkner, D. R., "Dry, damp, or drenched? The effect of water saturation on the frictional properties of clay fault gouges", Journal of Structural Geology, Vol. 140, pp. 104094, 2020.
- Caine, J. S., Evans, J. P. and Forster, C. B., "Fault zone architecture and permeability structure", Geology, Vol. 24(11), pp. 1025-1028, 1996.
- Casciello, E., Pappone, G. and Zuppetta, A., "Structural features of a shear-zone developed in an argillaceous medium: the southern portion of the Scorciabuoi fault (southern Apennines)", Bollettino della Società Geologica Italiana, Volume Speciale, Vol. 1(2), pp. 659-667, 2002.
- Casciello, E., Cosgrove, J. W., Cesarano, M., Romero, E., Queralt, I. and Vergés, J., "Illite-smectite patterns in sheared Pleistocene mudstones of the Southern Apennines and their implications regarding the process of illitization: A multiscale analysis", Journal of Structural Geology, Vol. 33(11), pp. 1699-1711, 2011.
- Chan, C.-H., Ma, K.-F., Shyu, J. B. H., Lee, Y.-T., Wang, Y.-J., Gao, J.-C., Yen, Y.-T. and Rau, R.-J., "Probabilistic seismic hazard assessment for Taiwan: TEM PSHA2020", Earthquake Spectra, Vol. 36(1_suppl), pp. 137-159, 2020.
- Chang, C.-P., Angelier, J., Lee, T.-Q., Huang, C.-Y., "From continental margin extension to collision orogen: structural development of the Hengchun Peninsula and tectonic rotation, southern Taiwan.", Tectonophysics, Vol.361, pp.61-82, 2003.
- Chang, C.-P., Angelier, J., Huang, C.-Y., "Evolution of subductions indicated by mélanges in Taiwan" Subduction zone geodynamics, Springer, Berlin, Heidelberg, pp207-225, 2009.
- Chiarelli, A.-S., Ledesert, B., Sibai, M., Karami, M. and Hoteit, N.,

- "Influence of mineralogy and moisture content on plasticity and induced anisotropic damage of a claystone; application to nuclear waste disposals", Bulletin de la Société géologique de France, Vol. 171(6), pp. 621-627, 2000.
- Ching, K.-E., Gourley, J. R., Lee, Y.-H., Hsu, S.-C., Chen, K.-H. and Chen, C.-L., "Rapid deformation rates due to development of diapiric anticline in southwestern Taiwan from geodetic observations", Tectonophysics, Vol. 692, pp. 241-251, 2016.
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.-S., "Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach", Earth-Science Reviews, Vol. 152, pp. 70-87, 2016.
- Hirono, T., Asayama, S., Kaneki, S. and Ito, A., "Preservation of amorphous ultrafine material: A proposed proxy for slip during recent earthquakes on active faults", Scientific reports, Vol. 6(1), pp. 1-9, 2016.
- Ishii, E., "Microstructure and origin of faults in siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan", Journal of Structural Geology, Vol. 34, pp. 20-29, 2012.
- Jaeggi, D., Laurich, B., Nussbaum, C., Schuster, K., and Connolly, P., "Tectonic structure of the “main fault” in the Opalinus Clay, Mont Terri rock laboratory (Switzerland)", Swiss Journal of Geosciences, Vol. 110, pp.67-84, 2017.
- Kaneki, S., & Hirono, T., "Blackening of fault gouge by comminution and pyrolysis of carbonaceous materials during earthquake slip", Tectonophysics, Vol. 677, pp. 160-170, 2016.
- Lao, H., Shan, Y., Wang, Y. and Wu, Z., "Characteristics of growth fault architecture and its evolution in mudstone strata: Evidence from the core of Bohai Bay basin", Marine and Petroleum Geology, Vol. 119,

pp. 104503, 2020.

- Lao, H., Wang, Y., Shan, Y., Wu, Z. and Li, Q., "Architectural characteristics of the normal-dextral fault in mudstone strata: Anatomy based on the cores from the Bohai Bay basin", Marine and Petroleum Geology, Vol. 119, pp. 104502, 2020.
- Laurich, B., Urai, J. L., Vollmer, C. and Nussbaum, C., "Deformation mechanisms and evolution of the microstructure of gouge in the Main Fault in Opalinus Clay in the Mont Terri rock laboratory (CH)", Solid Earth, Vol. 9(1), pp. 1-24, 2018.
- Lee, H.-K. and Kim, H. S., "Comparison of structural features of the fault zone developed at different protoliths: crystalline rocks and mudrocks", Journal of Structural Geology, Vol. 27(11), pp. 2099-2112, 2005.
- Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F. and Aubourg, C., "Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland)", Swiss Journal of Geosciences, Vol. 104(2), pp. 187-210, 2011.
- Orellana, L. F., Scuderi, M. M., Collettini, C. and Violay, M., "Do scaly clays control seismicity on faulted shale rocks?", Earth and Planetary Science Letters, Vol. 488, pp. 59-67, 2018.
- Pei, Y., Paton, D. A., Knipe, R. J., Lickorish, W. H., Li, A. and Wu, K., "Field-based investigation of fault architecture: A case study from the Lenghu fold-and-thrust belt, Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau", Geological Society of America Bulletin, Vol. 132(1-2), pp. 389-408, 2020.
- Rao, G., Lin, A., Yan, B., Jia, D., Wu, X. and Ren, Z., "Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China", Tectonophysics, Vol. 507(1-4), pp. 86-94, 2011.

- Riedel, W., "Zur Mechanik geologischer Bruchersche-Inungen zentralblatt fur Mineralogie Geologie and Palaeontologie", Abhandlung B 354-368, 1929.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M. and Schiefelbein, I. M., Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology, John Wiley & Sons, 2013.
- Sibson, R., "Fault rocks and fault mechanisms", Journal of the Geological Society, Vol. 133(3), pp. 191-213, 1977.
- Stow, D. A., "Laurentian Fan: morphology, sediments, processes, and growth pattern", AAPG bulletin, Vol. 65(3), pp. 375-393, 1981.
- Sun, S. C., "On the occurrence of an unconformity in the Upper Miocene Wushan Formation and Kaitzuliao shale near Shengshui-tsun, Kaohsiung, Taiwan", In Proc. Geol. Soc. China, Vol. 8, pp. 100-101, 1965.
- Sung, Q.-C., Chang, H.-C., Liu, H.-C. and Chen, Y.-C., "Mud volcanoes along the Chishan fault in Southwestern Taiwan: A release bend model", Geomorphology, Vol. 118(1-2), pp. 188-198, 2010.
- Vrolijk, P. and van der Pluijm, B. A., "Clay gouge", Journal of Structural Geology, Vol. 21(8-9), pp. 1039-1048, 1999.
- Wu, W. J., Kuo, L. W., Ku, C. S., Chiang, C. Y., Sheu, H. S., Aprilniadi, T. D. and Dong, J. J., "Mixed-mode formation of amorphous materials in the creeping zone of the Chihshang Fault, Taiwan, and implications for deformation style", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 125(6), pp. e2020JB019862, 2020.
- 吉田要，「高雄州旗山西南部油田調查報告及地質圖，比例尺三萬分之一」，台灣總督府殖產局出版第 610 號，37 頁，1932。
- 李德河、楊沂恩、吳建宏、廖正傑和陳柏穎，「泥岩地區護坡工法研究」，土工技術，117 期，35-47 頁，2008。

李錫堤，變色山河看見台灣毒害 Part 4 曾入鏡"看見台灣" 台南月世界變掩埋場?! | 60 分鐘 20170805，第 6:58~7:39 處，中視新聞，2017，https://www.youtube.com/watch?v=_dT389k8oTs。

林啟文，「五萬分之一台灣地質圖說明書-旗山圖幅」，經濟部中央地質調查所，2013。

林啟文、游鎮源、洪國騰和周稟珊，「台灣南部台南-高雄泥岩區的地質構造研究」，經濟部中央地質調查所彙刊，25，143-174 頁，2012。

徐慶雲，「台南縣及高雄縣龍船、坑內、小滾水構造地質圖，比例尺二萬五千分之一」，中國石油公司未出版報告，1975。

荊國彰，「監測車瓜林斷層西南端地表變形之研究」，高雄科技大學土木工程系學位論文，共 135 頁，2019。

張李群，「以大地測量資料進行龍船斷層與旗山斷層行為分析之研究」，成功大學測量及空間資訊學系學位論文，共 110 頁，2014。

許書琴，「泥貫入體與逆斷層活動在台灣西南部陸域造成之現今地表變形」，成功大學測量及空間資訊學系學位論文，共 102 頁，2012。

郭鶯萍，「探討泥岩區對臺灣西南部褶皺逆衝帶的高異常變形量之影響」，臺灣大學地質科學研究所學位論文，共 137 頁，2017。

陳文山、游能悌和楊小青，「重要活動斷層構造特性調查研究計畫-斷層活動特性分析與評估(2/4)」，經濟部中央地質調查所報告，101-109 頁，2012。

陳松春，「臺灣西南海域上部高屏斜坡泥貫入體及泥火山之分布及相關海床特徵」，國立中央大學地球科學學系博士論文，共 116 頁，2013。

陳俊价，「古亭坑層泥岩含水量對力學特性影響之研究」，成功大學土

木工程學系學位論文，共 147 頁，2008。

陳勇昇，「藉由大地測量資料探討龍船斷層與旗山斷層之間震變形特性」，成功大學測量及空間資訊學系學位論文，1-79 頁，2015。

陳柏村，「旗山斷層南段變形特性之研究」，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 125 頁，2005。

陳國隆、王吉杉、楊智、吳文隆和蕭秋安，「月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例討論」，中華技術 119，106-112 頁，2018。

烏居敬造，「臺南州新化油田調查報告及地質圖，比例尺三萬分之一」，台灣總督府殖產局出版第 609 號，29 頁，1932。

景國恩，「台灣及鄰近地區地體動力學研究 II (GOTTA II)-探討台灣西南部，菲律賓中部與印度東北部主要都會區之震間期地表變形特性及其地震潛能」，2016。

黃家俊，「臺灣南部龍船斷層北段泥岩與斷層泥之電子顯微及 X 光極圖繞射研究」，成功大學地球科學系學位論文，共 180 頁，2015。

葉昆麟，「台南台地基盤泥岩物性及遇水弱化行為之研究」，成功大學土木工程學系學位論文，共 147 頁，2010。

趙家賢，「以 2015 至 2018 年大地測量資料分析車瓜林斷層地表變形及橫跨斷層之高架橋結構位移」，成功大學測量及空間資訊學系學位論文，共 73 頁，2019。

趙荃敏，「利用大地測量及 PSInSAR 技術探討鳳山斷層之運動特性」，成功大學地球科學系碩士在職專班學位論文，共 89 頁，2016。

劉彥求和林啟文，「臺灣南部車瓜林斷層的構造特性研究」，經濟部中央地質調查所特刊，第三十四號，53-82 頁，2019。

霍亮、周雁、楊春和、冒海军、劉俊新和陈西磊，「不同沉积年代泥岩卸荷力学特性试验研究」，岩土力学，38，3，714-722 頁，2017。

謝孟龍、謝凱旋、李元希、楊志成、石同生和陳政恆，「西南部泥岩區龍船斷層的構造特徵」，中央地質調查所年報，八十八下半年及八十九年度，16-17 頁，2000。

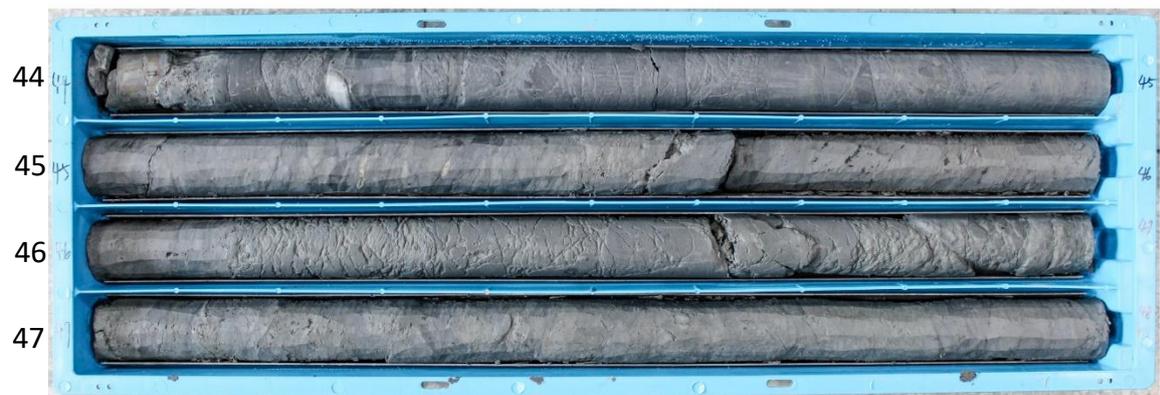
謝承恩、范書睿、林彥廷、黃文正和羅偉，「無人飛行載具搭載數位相機於地質構造判釋之應用」，Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，21，4，257-269 頁，2016。

謝尊堯，「利用 2016-2019 年之大地測量資料探討車瓜林斷層及其西延構造線形之間震變形特性」，成功大學測量及空間資訊學系學位論文，共 104 頁，2020。

附錄一 鑽井岩心照片









附錄二 口試委員建議

委員建議	回覆
以研究結果來看論文原標題並不適當，論文中對於「泥岩中的斷層帶特性」討論較為缺乏。	已將論文題目更改為「台灣西南部泥岩車瓜林斷層之岩石特徵與隱示」
研究主軸為對於斷層帶中岩石的觀察，然而研究區域、地表變形位置及斷層跡的關聯沒有陳述清楚。	已於文中進行說明，地表變形位置與斷層跡是相當吻合，詳見 P2、P13。
論文中提及「泥岩斷層帶的文獻相較為少」，若沒有證據則不宜秉持此說法。	已將類似詞句移除。
文中出現數次 ductile 然而是與不同的中文名詞做對應，需要對 brittle-ductile-plastic 進行釐清，並應於文中明確定義。	已於文中加以區別，分別是地質上所使用的韌性及描述岩體受力變形能力的延性，以於文中加以解釋。因於文獻中兩領域所使用之英文詞語相同，僅顯示中文部分，詳見 P16。
層間斷層通常所指為 bedding slip，而位於古亭坑層中且上下兩盤皆為古亭坑層的斷層，應由其他名詞稱之。	已將層間斷層移除並以「斷層上下盤皆為古亭坑層」作表示。

委員建議	回覆
<p>野外所量得的位態在文章較為缺乏，可以再多提供斷層與兩側層面的位態間的關聯，以確認其在大地構造上的意義。</p>	<p>已將各露頭斷層兩側之岩層位態補上，然而多處露頭難以到達或出露為巨厚泥岩，位態資料則較難以取得，亦有於文內說明。</p>
<p>對野外露頭中黃色及黑色條帶狀泥岩的排列關係文字描述不清。</p>	<p>已於文中進行修正，詳見 5-1-3</p>
<p>野外露頭中提到有低角度及高角度兩組具有截切關係的黑色條帶與裂隙，應思考可能發生了甚麼事。</p>	<p>感謝委員建議，然而本研究僅具有野外為態資料及其兩者的截切關係，僅能由此判斷兩者先後順序，在缺乏資料的情況下較難以給予解釋，僅對岩石特徵進行報導。</p>
<p>岩心當中的壓碎岩(cataclasite)為斷層作用下的產物，然而與應變集中較無明顯關聯，不須過度討論。</p>	<p>已於 5-3 及第六章進行修改，將其與應變集中進行區隔。</p>
<p>不應將黑色條帶排除為應變集中下的產物。</p>	<p>以對黑色條帶的描述及意義進行更正及說明，詳見 6-1。</p>
<p>可將黑色條帶與車瓜林斷層帶現生的變形產物進行更進一步的連結。</p>	<p>已於章節 6-2 將黑色條帶與車瓜林斷層帶的變形進行連結及探討。</p>
<p>研究結果中的黑色條帶應多加描述其特徵及代表意涵，並詳述前人研究以強調自身貢獻。</p>	<p>已於結果詳述黑色條帶的產狀並於討論中探討其出現的意涵，詳見 5-2、6-1。</p>

委員建議	回覆
文中提及在泥岩斷層帶中難以觀察到斷層核心及斷層破壞帶等脆性斷層中的構造，然而於圖 54 中仍可以觀察到相似的構造分區。	已於 6-1-1 進行文字敘述及判釋上的更改，斷層帶中仍能觀察到應變集中的現象。
建議將研究成果套用到其他區域(如混同層、池上斷層、恆春斷層)進行比對，探討黑色條帶是否也能在其他泥岩區域作為應變指標(strain indicator)。	已對其他類似區域進行文獻探討並將本研究所觀察進行比較，詳見 6-1-2。
論文中可再加入對於未來針對黑色條帶可以進行的後續工作及分析，使車瓜林斷層的相關研究更加完整。	已新增於章節 7-2
引用文獻排版需要調整。	已進行重新整理，並按字母編排。
地形及地質圖僅有座標網格，缺少比例尺。	已將比例尺置於圖例中。
圖 2、圖 3 顏色配比不佳，使圖中字不明顯。	已進行字體修改及加框線輔助閱讀。
圖 5 斷層與地層配色不明顯，地名有誤。高 40 公路可標於圖中。	已將字體加工使其明顯並更正，公路也已標於圖中。
P.32,P.57 圖中的引用資料無法相對應	已進行更正。

委員建議	回覆
<p>野外露頭利用箭頭雜亂且不明顯，用虛線邊界進行標記會較易讀。或箭頭於圖兩側，同向指同一條構造線。</p> <p>特別是，斷層與圍岩的邊界盡可能標示清楚</p>	<p>已將野外露頭部分用紅色線段包夾替代箭頭，詳見 5-1。</p>
<p>圖 53 中圖號因論文調整圖內編號有誤</p>	<p>已對圖中的圖號進行修正。</p>
<p>圖 63 可以觀察到明顯的 Riedel shear，應將其標明使其在構造上更具意義。</p>	<p>已於內文及圖中加註。</p>
<p>岩心判釋圖有出現蝌蚪圖及傾角，然而岩心沒有定向，需在圖例中說明清楚</p>	<p>已於 5-3 及圖中進行說明，蝌蚪圖僅表明相鄰兩面之傾向關係。</p>
<p>P22 構造等高線的解釋請再次確定，線應為兩個面相交的結果。同時，可否說明論文中哪些圖是你使用構造等高線與地形圖繪製出的車瓜林斷層跡？</p>	<p>已在內文進行更正及說明，主要為大廊亭山至南勢湖一帶可良好追跡並與構造等高線之推測出露位置吻合，詳見 P35。</p>
<p>圖 29，高低角度裂隙請標示清楚</p>	<p>已標註於圖中，以兩不同顏色的線段標示，並附上位態資料。</p>