國立中央大學

應用地質研究所碩士論文

台灣西南部中寮隧道北端旗山與龍船斷層帶構造特性研究

Characteristics of the Chishan and Lungchuan Faults exposed around the north end of Zhongliao Tunnel, Southwestern Taiwan

研究生: 藺于鈞

指導教授:黃文正 博士

中華民國一百零八年一月



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 <u>全文電子檔</u> (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:
() 1 17 to Make:
在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」
() <u>同意</u> (立即開放)
() <u>同意</u> (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:
4-3/L 103021000
論文名稱: 台灣西南部中寮隧道北端旗山與龍船斷層帶構造特性研究
指導教授姓名: 黃文正
HA4VIXVI. II. AVII.

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。

系所 : ____應用地質 __所 □博士班 □碩士班

- 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

應用地質學系/研究所<u>蘭于鈞</u>研究生所提之論文 台灣西南部中寮隧道北端旗山與龍船斷層帶構造特 性研究 係由本人指導撰述,同意提付審查。

指導教授<u>党文正</u>(簽章)

國立中央大學碩士班研究生論文口試委員審定書

經本委員會審議,認定符合碩士資格標準。

研究

學位考試委員會召集人

中華民國 一百零八 年 一 月 八 日

台灣西南部中寮隧道北端旗山與龍船斷層帶構造特性 研究

中文摘要

國道三號約378公里高雄中寮隧道的北端處,自民國八十九年開 通以來隧道結構便持續的受到損毀,造成此現象之原因仍未明瞭,前 人藉密集的水準測量及靜態測量發現,國道三號於旗山斷層以及龍船 斷層之間路段的水平位移平均每年約有92公厘、鉛直位移平均每年 約有82公厘,明顯大於台灣島每年82公厘的板塊擠壓縮短量,本 研究之目的便是想釐清如此快速的變形與當地的構造活動特性之關 係。

研究進行期間時逢國道三號隧道改善工程並對隧道北端進行開挖,本研究對中寮隧道整修開挖的露頭及附近區域進行詳細的地質調查,加上 UAV 攝影測量方法所製作的數值地表模型與正射影像,製作中寮隧道北端鄰近區域的地質圖與斷層分布圖。旗山斷層帶在隧道北端的斷層核心厚度約6公尺,位態約為042°/48°S,斷層影響帶厚度約100公尺,斷層上盤開挖出露的岩層厚約80公尺,岩性以厚層砂岩與砂頁互層為主,下盤以厚層泥岩偶夾薄層風暴砂岩為主,且其中的泥岩中可發現三條延伸性佳的黑色剪切帶,並於中寮隧道北端出口西北方向約300公尺處的泥岩中發現厚層的斷層泥真厚至少67公尺,與前人斷層跡的調查比對後判斷為龍船斷層帶。在隧道毀壞嚴重處被彎曲的消防栓與放射狀分布的裂隙,顯示隧道的破壞是由於路面(或仰拱)的抬升以及隧道觀砌的壓縮所導致;隧道毀壞嚴重處的所在位置與旗山斷層核心重合。

中察隧道北端鄰近區域的最大位移量梯度與旗山斷層帶的核心位置相符,露頭所觀察到的正移剪切面結合隧道裂隙觀察結果,推測隧道的損毀肇因於隧道下方岩層的向上推擠,因此本研究提出一地質模式,以旗山斷層為阻水層,在厚層泥岩排水不易的條件下,泥岩中的泥漿受擠壓進而向上推擠地表岩層產生位移,來解釋兩斷層間地塊的高位移量。

關鍵字:中寮隧道、旗山斷層、龍船斷層、UAV 影像測繪、隧道裂隙 測繪。

Characteristics of the Chishan and Lungchuan Faults exposed around the north end of Zhongliao Tunnel, Southwestern Taiwan

Abstract

At the north end of Zhongliao Tunnel on National Highway No. 3, tunnel structure damage has been a problem as it open to the public since 2000 A.D. in Kaohsiung, Taiwan. The cause of this phenomena has not yet been identified. The predecessors have used dense leveling and GPS velocity survey to measure the surface displacement. The horizontal and the vertical movement of the area is about 92 mm and 82 mm per year between Chishan fault and Lungchuan fault which is greater than 82 mm per year caused by the shortening of plate tectonic movement in Taiwan island. Thus, the aim of this study would be to identify the relationship between the rapid ground deformation and the structural characteristics of the study area.

An excavation has been held at the north end of Zhongliao Tunnel during this study. Detailed geological surveys were carried out in the surrounding of the north end of Zhongliao Tunnel. In order to produce the Digital surface model (DSM) and Orthoimages for the geological map and fault map, the UAV photogrammetry method and VRS-RTK survey were taken in the study area. After the investigation, it was found that the fault core of Chishan fault zone is about 6 meters thick with the attitude of 042°/48 °S, and the thickness of the damage zone is about 100 meters. The outcrop is about 80 meters thick after the excavation on the hanging wall of Chishan fault which the lithology is mainly composed of sandstone and alternation with sandstone and shale. The lithology of the foot wall is mainly composed of mudstone interbedded with some fine sandstone. Three branch faults were found in the footwall of Chishan fault. Compared

the location with previous studies, we found Lungchuan Fault zone has a thickness of 67 meters at least which is located 300 meters away from the north end of Zhongliao Tunnel in northwest direction. After the examination in the tunnel, I consider the fractures to be the consequence of the uplifted pavement, and the compression of the tunnel lining in the seriously damaged area.

The maximum displacement gradient in the Zhongliao tunnel is consistent with the location of the Chishan fault core. The observation of the normal shear plane and the tunnel fracture suggest that the tunnel damage is caused by the push of the rock below the tunnel. Therefore, this study proposes a geological model, with Chishan fault as the water-resisting layer. Under the condition that the thick mudstone is not easy to drain, the slurry in the mudstone is squeezed to push the surface rock layer to generate the high displacement of the block between two faults.

Keywords: Zhongliao tunnel, Chishan fault, Lungchuan Fault, Photogrammetry, Tunnel fracture mapping.

誌謝

本篇論文順利完成,首先需感謝黃文正老師的指導,包含研究目的的釐清與研究成果的討論,討論的過程雖然與老師多有不同的見解,但是也同樣讓我獲益良多,也謝謝老師提供的研究室環境,使得研究可以順利進行。

感謝謝孟龍老師、李元希老師與景國恩老師特地遠道而來擔任口試委員,對於論文的寫作給予寶貴的建議並多有提點,使得本篇論文可以更加精進。感謝台灣世曦工程公司的李秉鴻學長與陳琮翰先生在工地進行野外調查時的多方協助。感謝一勤學長與 Maryline 在研究上的討論與建議,感謝翔富學長在無人機測繪方面的指導與幫助,還有承恩學長與奕維學長在論文寫作時的幫忙,也謝謝小波學長在碩一時論文閱讀上的幫助。

在研究室有難熬也有開心的日子,謝謝地質力學研究室的成員: 彥如、Hadis、雅筑、毓呈、廷瑜、智偉、Tri、新翰、冠華、納米、中 威,在研究上、野外上與生活上的幫忙,讓我在研究所的生活多采多 姿,也讓我了解到研究室向心力的重要。

最後感謝小蝸在我處於情緒低潮時陪伴我、鼓勵我,也感謝我的 家人做為我讀研究所的後盾,讓我在研究所期間無後顧之憂。

目錄

中文摘要	I
Abstract	III
誌謝	V
目錄	VI
圖目錄	VIII
表目錄	XIII
一、前言	1
二、文獻回顧	4
2-1 大地構造	4
2-2 斷層帶組成	7
2-3 隧道破壞與斷層活動之關係	12
三、區域地質概況	16
3-1 地形與水系	16
3-2 地層	18
3-3 地質構造	22
四、研究方法	26
4-1 UAV 攝影測量	26
4-2 野外地表地質調查方法	30
4-2-1 地質調查	30
4-2-2 地質製圖與剖面繪製	
4-3 隧道裂隙測繪方法	33
五、研究成果	
5-1 中寮隧道北端 UAV 測繪結果	
5-2 地質調查結果	
- /,	

5-2-1 東側立面調查(A)	39
5-2-2 西側立面調查(B)	47
5-2-3 中間立面調查(C)	59
5-2-4 國道 3 號以東地質調查(D)	61
5-2-5 國道 3 號以西地質調查(E)	68
5-2-6 地質圖繪製	77
5-3 隧道裂隙測繪成果	82
5-3-1 隧道的變形與襯砌裂隙	83
5-3-2 現地觀察	85
六、討論	94
6-1 隧道毀壞形貌與周遭地質關係之探討	94
6-2 斷層剪切帶分布與地表速度場之關係	100
6-3 可能的地質模型	105
七、結論與建議	110
八、參考文獻	111
附錄 A UAV 攝影測量原理	118
附錄 B 即時動態定位方法	123

圖目錄

圖	1 旗山斷層周遭地形圖	2
圖	2 龍船斷層上盤泥貫入體活動之示意圖	3
圖	3 龍船及旗山斷層地形剖面圖	3
圖	4 台灣地體構造圖	5
圖	5台灣西南部地質構造圖	5
圖	6 台灣西南部 2002 到 2010 間的水平 GPS 速度場	6
圖	7 岩石塑脆性變形特性的分布	9
圖	8 糜嶺岩中線理與顆粒的幾何關係	9
圖	9 岩石受斷層影響的關係圖	10
圖	10 雷德剪切面示意圖(Riedel shear)	10
圖	11 中寮三線隧道標準斷面	14
圖	12 隧道裂隙分類示意圖	14
圖	13 地震發生後隧道破壞與周圍地質概況之關聯	15
圖	14 旗山斷層沿線的斷頭河以及風谷	17
圖	15 崑山地區航空側拍圖	17
圖	16 烏山層中的砂岩露頭	20
圖	17 古亭坑層中的生痕化石	20
圖	18 岡山-旗山區域地質圖	24
圖	19 鄭宏祺(2000)於高雄-屏東地區繪製之平衡剖面圖	25
圖	20 Chiang et al.(2004)於高雄-屏東地區繪製之剖面圖	25
圖	21 地面控制點 G08.1 之野外照片	28
圖	22 影像測繪作業流程圖	28
圖	23 急折法繪製步驟示意圖	32

圖	24 隧道襯砌上可辨識之特徵點範例圖	33
圖	25 民國 106 年 12 月所製作之隧道北端正射影像	36
邑	26 民國 107 年 3 月所製作之隧道北端正射影像	36
邑	27 中寮隧道北端地面控制點與檢合點的相對位置	37
圖	28 中寮隧道北端地質調查分區說明圖	38
圖	29 隧道口開挖面航空側拍圖	38
圖	30 中寮隧道北端東側立面遠觀圖	40
圖	31 開挖面東側的旗山斷層交界	41
圖	32 斷層泥中的細粒砂岩顆粒	41
圖	33 破碎的灰白色細粒砂岩	42
圖	34 砂岩中的剪切面	42
圖	35 砂岩層間的薄層剪切帶	43
圖	36 砂岩層間分岔的薄層剪切帶	43
圖	37 傾向西北方的剪切面	44
圖	38 岩層中的剪切面近照	44
圖	39 岩層呈斷層接觸	45
圖	40 砂頁互層	46
圖	41 東側立面下階的斷層泥	46
圖	42 中寮隧道北端西側立面遠觀圖	50
圖	43 厚砂夾薄頁與砂頁互層的交界	51
圖	44 破碎狀的砂岩	51
圖	45 斷層泥與斷層角礫岩	52
圖	46 砂岩中夾雜薄層的斷層泥	52
圖	47 旗山斷層上盤斷層影響帶	53
圖	48 旗山斷層核心的斷層泥與斷層角礫岩	53

圖	49	糜嶺岩狀的斷層泥	.54
圖	50	西側立面上階的旗山斷層交界	.55
圖	51	下盤斷層影響帶中的黑色條帶	.55
邑	52	黑色條帶中的剪切面組構	.56
圖	53	泥岩中的斷層擦痕	.56
圖	54	旗山斷層帶剪切面之投影圓分析	.57
圖	55	斷層擦痕位態	.57
昌	56	露頭 B9 的砂頁互層	.58
邑	57	隧道旁的剪切面	.58
昌	58	厚層砂岩夾薄頁岩與	.60
昌	59	中間立面的下階	.60
邑	60	國道三號東側露頭調查點位置圖	.62
邑	61	剪切带 C	.63
邑	62	剪切带 C 之近照	.63
邑	63	厚層透鏡狀砂岩	.64
邑	64	厚層透鏡狀砂岩之近照	.64
圖	65	泥岩中的黑色剪切带	.65
圖	66	厚層泥岩夾薄層細粒砂岩	.66
圖	67	山間小路的人造物變形	.66
圖	68	泥岩層中的厚層黑色剪切帶	.67
圖	69	黑色剪切带的近照	.67
圖	70	國道三號西側露頭調查點位置圖	.70
圖	71	泥岩中的斷層剪切帶近照	.71
邑	72	泥岩層中的黑色剪切帶	.71
圖	73	高角度岩層	.72

圖	74 低角度泥岩層	72
圖	75 泥岩層中的正移斷層	73
昌	76 泥岩層中的正移斷層	73
圖	77 國道西側露頭的 3D 模型	74
圖	78 側向延伸良好的剪切帶 C	74
圖	79 泥岩中的黑色剪切面	75
昌	80 龍船斷層帶中的黑色剪切面近照	75
圖	81 龍船斷層帶裂隙投影圓分析	76
圖	82 中寮隧道北端斷層分布圖	79
圖	83 中寮隧道北端斷層分布放大圖	80
圖	84 中寮隧道北端地質圖	81
圖	85 中寮隧道北端北上、南下損壞嚴重區域測繪比較圖	84
圖	86 N006 左側的滲水位置	86
圖	87 N007 右側的裂隙	86
圖	88 N008 左側的裂隙	87
圖	89 N006 至 N009 被抬升的襯砌	87
圖	90 N011 的環向裂隙	88
圖	91 N014 到 N015 頂拱的縱向裂隙	88
圖	92 S010 至 S013 左側的裂隙	90
邑	93 S011 左側受壓的鐵盒	90
圖	94 S010 至 S012 右側的裂隙	91
圖	95 S010 右側的步道	91
圖	96 S011 右側的剪力裂隙	92
圖	97 道路上填補前之裂隙	92
圖	98 S006 至 S007 在頂拱的裂隙	93

圖	99 S014 的環向裂隙	93
圖	100 過去與現在隧道毀壞處的比較	97
昌	101 隧道毀壞嚴重處與斷層分布比較圖	98
圖	102 隧道斷面比較圖	99
圖	103 中寮隧道北端測量點分布圖	102
圖	104 水平速度投影到垂直與平行斷層走向示意圖	103
圖	105 速度各分量比較圖	103
圖	106 AA'地質剖面疊合投影後之小區域地表速度場	104
圖	107 臺灣南部陸上泥火山及背斜構造分布圖	107
圖	108 烏山頂附近地質剖面圖	107
圖	109 旗山斷層附近的 GPS 速度場	108
圖	110 烏山頂鄰近之地電阻剖面	108
圖	111 龍船斷層與旗山斷層間泥漿向上推擠模式示意圖	109

表目錄

表	1 斷層岩石組構的分類表1	1
表	2 西部麓山带上新統-更新統地層對比與各地層界限的絕對年代表	专
	2	21
表	3 Mavic Pro 技術參數	29
表	4 民國 107 年 3 月 28 日 VBS-RTK 測量成果3	35
表	5 檢核點與模型差異量	35

一、前言

座落於台灣高雄市田寮區內的中寮隧道北端,國道3號高速公路 南段(南二高)約378公里處(圖 1),自國道三號開通以來隧道結構便 持續的受到損毀,造成此現象之原因仍未明瞭。

為了了解中寮隧道北端附近的變行行為,國立成功大學與台灣世曦工程顧問股份有限公司(以下簡稱台灣世曦)在隧道附近藉由 GPS連續站及高精度水準測量進行監測(張李群,2014;陳勇昇,2015),對速度場進行分析的結果顯示,在中寮隧道北端為張裂的應力環境,且在龍船斷層與旗山斷層間的水平與垂直速度明顯高於大區域的速度場,因此損毀中寮隧道北端的原因被認為,除了旗山斷層的活動外尚有泥貫入體活動(圖 2)的可能(Ching et al., 2016),或者是李錫提老師於 2017 所提出的龍船背衝斷層系統所導致(圖 3),但在前人的研究中仍然沒有直接的地質證據可以說明隧道破壞的成因以及中寮隧道鄰近區域的地質構造活動特性。

本研究進行期間,時逢國道3號中寮隧道改善工程,中寮隧道北端出口有新的開挖面,故本研究以地表地質調查與無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle,以下簡稱 UAV)拍攝航空照片,並利用航空照片製作正射影像、數值地表模型(Digital surface model, DSM)與地質圖,來了解該區域的地質構造,並比較近地表的速度場找出之間的關聯性,另外本研究也會進行隧道壁面及裂隙的測繪作業,以了解裂隙的產生和中寮隧道的損毀是否與地質構造相關。

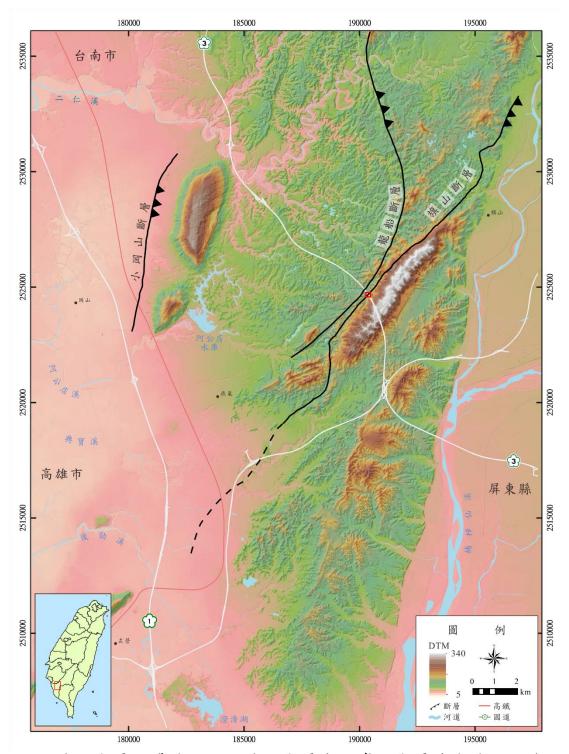


圖 1 旗山斷層周遭地形圖。旗山斷層與小崗山斷層繪自地調所旗山 圖幅,龍船斷層繪自中油台南地質圖,紅色方框處為國道 3 號 378 公 里的約略位置。

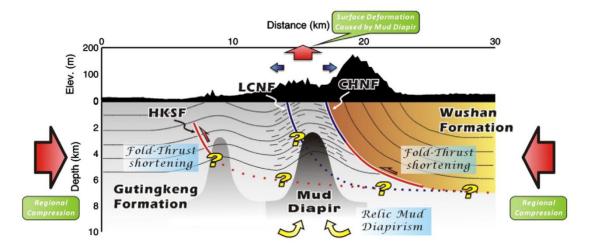


圖 2 龍船斷層上盤泥貫入體活動之示意圖(圖引自 Ching et al., 2016)。

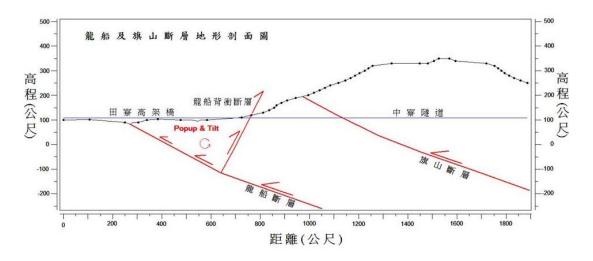


圖 3 龍船及旗山斷層地形剖面圖。根據地表速度場的觀察,李錫堤 (2017)認為旗山斷層的主斷層位置需向中寮隧道內平移約 400 公尺, 而隧道口的破壞則可能是由龍船背衝斷層所導致。

二、文獻回顧

2-1 大地構造

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界,菲律賓海板塊每年以82公厘 (Yu et al., 1997; Ching et al., 2011)的速度向西北方向推擠 (圖4),為一弧陸碰撞(Arc continent collision)的造山系統(e.g. Suppe, 1984; Ching et al., 2011),參考中油所出版的台南十萬分之一地質圖(圖 5),可以發現台灣西南部的主要地質構造是由一系列東北-西南走向的斷層、背斜與向斜所組成,例如關廟向斜、中洲背斜與旗山斷層等,其中旗山斷層為距離中寮隧道最近的地質構造。

從近期(2002~2010)的地表水平速度場來看(圖 6),台灣西南部的 GPS 速度場(相對於澎湖 S01R 測站)為逆時針旋轉且於跨旗山斷層的 位置顏色有明顯的改變,顯示水平速度有驟降的現象,Hu et al. (1997) 藉 3D 離散元素法(Distinct-element method)模擬台灣西南部的活動速度構造和應力狀態,發現北港高區、東部縱谷斷層與馬尼拉隱沒帶的影響,在菲律賓海板塊向歐亞板塊持續推擠下,會使台灣的西南部與東北部產生構造逃脫(Tectonic escape)的現象。

為了解釋地質構造與地表位移場的關係,前人對於旗山斷層的活動特性有許多的探討,其中包含藉地表地質的調查判斷旗山斷層為具左移分量之逆衝斷層(陳柏村,2005;林啟文等,2009),以及藉由 GPS 觀測網觀察地表的水平速度場,發現到在旗山斷層的兩側地塊有右移的現象,進一步判斷旗山斷層為具右移分量之逆衝斷層(Hu et al., 2007; Lacombe, 2001)。

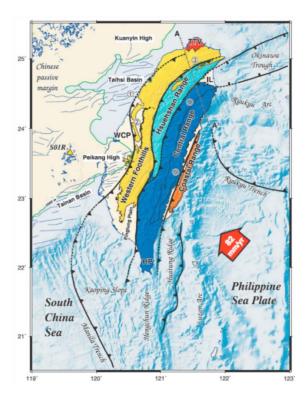


圖 4台灣地體構造圖。菲律賓海板塊每年以 82 公厘的速度向歐亞板塊推擠 (圖引自 Ching et al., 2011)。

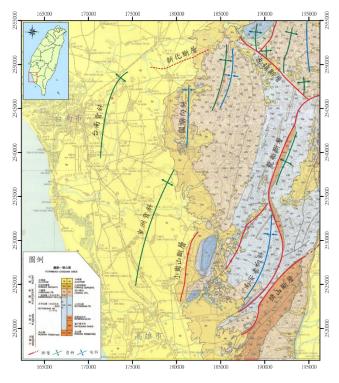


圖 5台灣西南部地質構造圖。構造如斷層、背斜與向斜之間大致呈平行排列且呈東北-西南走向(改繪自中油台南地質圖,1989; Huang et al., 2004; 林啟文,2013)。

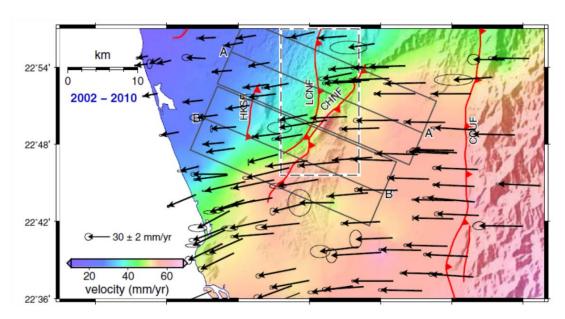


圖 6 台灣西南部 2002 到 2010 間的水平 GPS 速度場。斷層由左至右分別為小崗山斷層(HKSF)、龍船斷層(LCNF)、旗山斷層(CHNF)、潮州斷層(CCUF)(圖引自 Ching et al., 2016)。

2-2 斷層帶組成

現今的斷層相關研究多以斷層帶(Fault zone)與斷層岩石(Fault rock)來描述受斷層影響的岩石產狀 (Billi et al., 2003; Kim et al., 2004; Berg and Skar, 2005; Chen et al., 2011; Maqbool et al., 2016)。

Sibson (1977)認為從 4 到 10 公里深的地底為脆性變形帶,岩層若發生錯動,岩石之間互相的摩擦,會使得岩石變得破碎且方向性不佳,而當岩層溫度超過250~350°C,深度超過大約10~15 公里時,礦物顆粒會表現逐漸表現出塑性變形的特性且顆粒之間具有凝聚力,受剪動作用後會產生葉理狀(Foliated)的流動構造(圖 7),亦可稱此種岩石為糜嶺岩(Mylonite),從糜嶺岩的線理(Lineation)與顆粒的幾何關係,可以判斷出剪切面的剪動方向(Shear sense)(圖 8)。

根據 Sibson (1977)、Lin (2007)以及 Davis et al. (2011)對於斷層岩石的定義,地表至地下約 8 公里處,屬於脆性變形帶,根據凝聚力的有無可以將受斷層作用後的岩石產狀區分為斷層角礫岩(Breccia series)與斷層壓碎岩(Cataclasite series),以上二者皆無特定方向的排列組構,在斷層角礫岩中角礫(clast)與基質(matrix)之間並無凝聚力,基質多由受剪碎且較角礫岩小的顆粒所組成,進一步分類,可藉由角礫的大小區分為,巨角礫岩(Megabreccia)、角礫岩(Breccia)、微角礫岩(Microbreccia)、斷層泥(Gouge),反之若顆粒與基質之間有凝聚力連接,則屬於斷層壓碎岩,再根據基質佔岩石塊體體積的比例,可將斷層壓碎岩分成,初壓碎岩(Procataclasite)、壓碎岩(Cataclasite)、超壓碎岩(Ultracataclasite),佔有比例如表 1 所示。

斷層帶影響範圍的大小,由於深度變淺、溫壓下降,脆性應變帶有比塑性應變帶來的窄的現象,在脆性變形帶中,根據受斷層作用的影響程度可分為,斷層核心(Fault core)、轉換帶(Transition zone)、破

碎帶(Damage zone)以及圍岩(Wall rock)(圖 9),斷層核心主要由斷層泥、斷層角礫岩所組成,在轉換帶中,岩層還是十分破碎,岩石的裂隙分佈十分密集且裂隙之間可能夾雜薄層的斷層泥,在破損帶中,岩石中的裂隙會比轉換帶來的少,可能會有次生斷層(或分支斷層)以及斷層相關褶皺(Fault-related folds)存在於帶中,在圍岩之中,岩層間的層面連續且可以被清楚的辨識出來,但仍可能會有節理存在其中(Choi et al., 2016; Berg and Skar, 2005)。

前人經過野外的調查之後發現,在脆性變形帶或脆-塑性變形帶中,剪切面的描述可以分為主要滑動面(Principle displacement zone, PDZ)與雷德剪切面(Riedel shear, R),主要滑動面為岩層錯動時有最大的位移量的面,隨著岩層不斷的滑動會產生出一系列的裂隙(圖 10),包含共軛產生的剪切面(R, R')與張力裂隙(Tension fractures, T)等(Casciello et al., 2002; Rao et al., 2011)。

在斷層角礫岩中常常可以發現岩石產狀會有自我相似(self-similar)的現象(Davis et al., 2011),從觀察露頭外觀的中視尺度到顯微鏡下岩石的礦物排列方式,本研究皆可以觀察到岩石受到剪切作用的影響會使礦物呈現特定方向的排列,而在泥岩的剪切帶中,Casciello et al. (2002)也有觀察到類似的現象,泥岩在剪動的過程中,由於泥岩的岩石強度不強,變形行為會偏向塑性變形,所以泥岩在生成 Riedel shear 之後,會進一步的生成平行於主要滑動面的 Y-shear 平面。

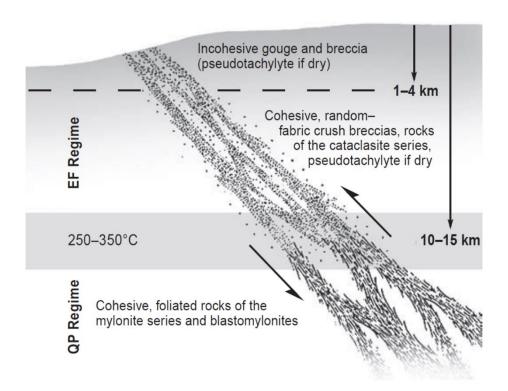


圖 7 岩石塑脆性變形特性的分布(圖引自 Davis et al., 2011)。

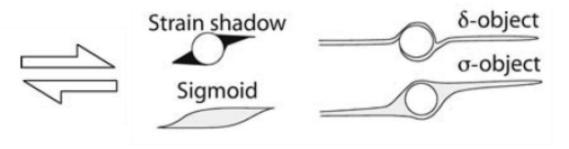


圖 8 糜嶺岩中線理與顆粒的幾何關係。箭頭表示剪動的方向(圖引自 Passchier and Trouw, 2005)。

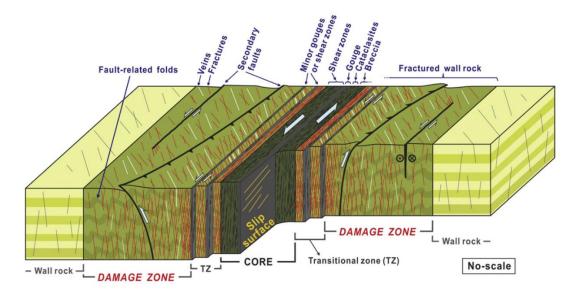


圖 9 岩石受斷層影響的關係圖(圖引自 Choi et al., 2016)。

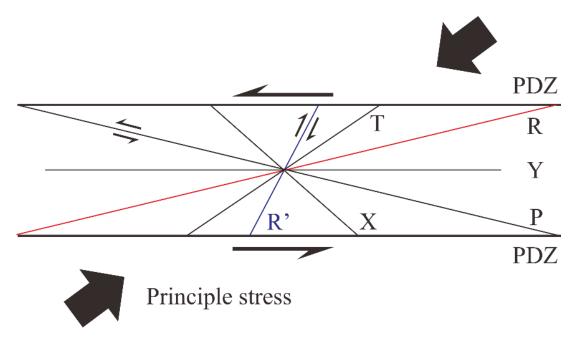


圖 10 雷德剪切面示意圖(Riedel shear)。在主要滑動面滑動時(PDZ), 會產生一系列的裂隙,包含共軛產生的剪切面(改繪自 Rao et al., 2011)。

表 1 斷層岩石組構的分類表(表引自 Passchier and Trouw, 2005)

_																
	*Random fabric-foliated				Plastically foliated											
	*Foliations defined by preferred orientations of fragments and shear bands without dynamically recrystallized grains															
Incohesive	Fault breccia (visible fragments > 30% of rock mass)				?											
Inco	Fault gouge (visible fragments < 30% of rock mass)			?												
	Pseuoudotachylyte *(Glass-devitrificated matrix and/or fine-grained fragments of host rocks)					*Foliated pset (Glass-devitri										
Cohesive	Nature of matrix	Crush breccia (fragments < 0.5 of Fine crush breccia (0.1cm < fragments O.1 cm) Crush microbreccia (fragments 0.1 cm)				agments < 0.5 cr	5 cm) 0-10									
		Nature of matrix	Tectonic reduction in grain size donminates grain growth by recrystallization and neominerlization	size donmi	8	Procataclasite		Protomylonite	;	10-50	natrix					
				Cataclastic series	Cataclasite	Mylonitic series	Mylonite	Phyllonite varieties	50-90	Percent of matrix						
			~	2	۷	Ž	Z	Z	Tectonic red growth by n	Ca	Ultracataclasite	Myl	Ultramylonite	Phylloni	90-100	
					Grain growth pronounced		?		Blastomy	lonite						

2-3 隧道破壞與斷層活動之關係

本篇所研究的中寮隧道屬三線隧道,每車道寬 3.65 公尺外加兩側路肩 0.3 公尺,總寬 11.55 公尺,隧道地面與頂拱的距離約 7.7 公尺,隧道的結構大致上可分成頂拱、襯砌(Lining)、仰拱(invert)、仰拱回填層、防水膜、排水管等,混凝土襯砌(Lining)厚度約 40~60 公分(圖 11),襯砌混凝土的強度約為21 MPa (張吉佐和劉弘祥,2001)。

地震過後根據製隙與隧道軸向的關係(圖 12),大致可分為縱向製隙(longitudinal cracks)、垂直製隙(horizontal cracks)、斜向製隙(oblique cracks)與環狀製隙(ring cracks)、放射狀製隙、漣漪狀製隙,其中縱向製隙的延伸性最佳且多發生於隧道的頂拱與肩部,斜向製隙多發展於觀砌且部分製隙可跨越環狀施工縫,再根據隧道破壞的種類可分成路面或仰拱破壞(pavement or invert failure)、門拱破壞(portal failure)、剪應力破壞(shear failure)與邊坡破壞(slope failure) (Roy and Sarkar, 2017; Chen et al., 2011; Wang et al., 2001; 陳正勛等, 2011; 李佳翰, 2013)。

仰拱與襯砌由於並非一體成形的拱形,結合處容易形成結構上的 弱面,仰拱的破壞原因可分為,1.仰拱因軟弱岩層的解壓而隆起。2. 仰拱與襯砌交界處發生錯動。3.因軟弱岩盤的排水不良,使得地下水 入滲至仰拱內,進而掏空仰拱回填層使其失去支撐力。4.仰拱與襯砌 結合處的抗剪鋼筋不足,若側向受力過大則易導致襯砌及仰拱的破壞。 (摘寫自張吉佐和劉弘祥,2001)

Wang et al. (2001)針對集集地震(1999/09/21)後中台灣的隧道進行研究,發現所觀察的 57 個隧道中有 49 個受到損毀,且受損的程度與隧道和震央的遠近有關,並認為由於地震波在堅硬且質地緊密的岩層中傳播速度較軟弱的岩層中傳播速度快,使得隧道容易於軟硬岩的交界處因地表變形及擠壓而破壞。

Yashiro et al. (2007)曾對日本災害型地震引致的隧道損毀進行統計,並將隧道毀壞的原因分為三類(圖 13),第一類為「淺埋隧道的損毀」(Damage to shallow tunnels),當地震波傳達時由於隧道埋深不深且地質軟弱,地表因為剪應力而產生了明顯的位移,此時隧道會因為傾斜而於隧道的肩部產生平行裂隙與剝落;第二類為「不穩定地質條件中隧道的損毀」(Damage to tunnels in poor geological conditions),此類型為當隧道埋於斷層帶中可變形性大,當地震波傳達時,隧道會受到額外的壓應力,進而產生嚴重的平行破壞;第三類為「斷層滑動引致的隧道損毀」(Damage to tunnels caused by fault slide),隧道橫跨斷層並當斷層滑動時,隧道會受到許多種應力的作用,如剪應力、張應力與壓應力,使得隧道會產生複雜形貌的裂隙,如環形裂隙。

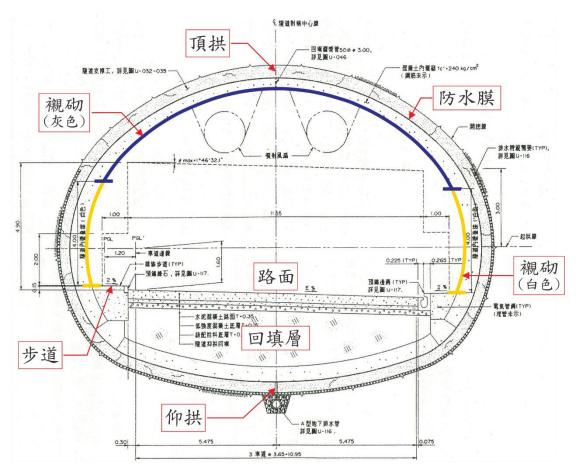


圖 11 中寮三線隧道標準斷面。圖中黃色段表示白色的襯砌,藍色段表示灰色的襯砌(改繪自張吉佐和劉弘祥,2001)。

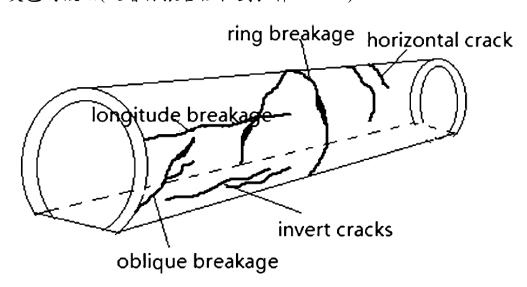
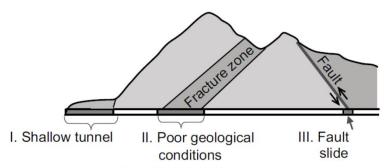
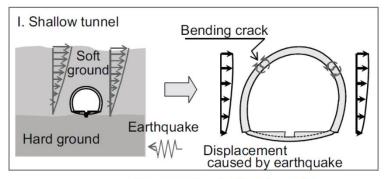


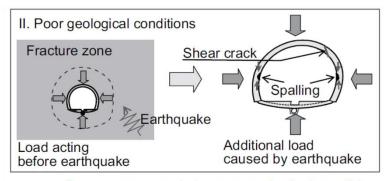
圖 12 隧道裂隙分類示意圖。基本上可分為縱向裂隙、垂直裂隙、斜向裂隙、環狀裂隙與仰拱破壞(圖引自 Chen et al., 2011)。



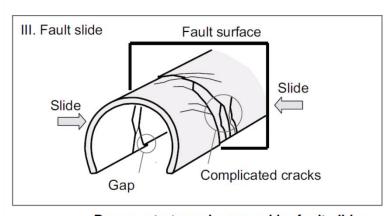
Classification of damage patterns



Damage to shallow tunnels



Damage to tunnels in poor geological conditions



Damage to tunnels caused by fault slide

圖 13 地震發生後隧道破壞與周圍地質概況之關聯(圖引自 Yashiro et al., 2007)。

三、區域地質概況

3-1 地形與水系

地形的發育主要為地殼運動的內營力與侵蝕的外營力交互作用的結果(古兆禎,1965),在本研究區域中,主要以丘陵地形為主,有大崗山、小崗山、中寮山、雞南山等,以水系盆地來區分的話,可以分為二仁溪流域、阿公店溪流域與楠梓仙溪流域,楠梓仙溪以中寮山為分水嶺向東流入屏東平原之中,而二仁溪流域與阿公店溪則向西流入高雄平原(圖 1)。

宋國城等(2004)認為於田寮南勢崙、金山地區,於地形上可以發現許多錯置河與原河道所形成的風谷(圖 14),藉由將旗山斷層上下盤的河谷拉回,宋國城認為河谷有受到約 0.83 公里的右移相對位移。

本研究利用空拍機拍攝了田寮崑山地區的航空照片(圖 15),照片中可以觀察到地形起伏與岩性的關係,已知崑山地區的地層為古亭坑層以厚層泥岩為主,而中寮山側的地層為烏山層由砂岩與砂頁互層所組成,從地形的起伏來看,中寮山側的地勢明顯較崑山地區高且植被相對茂密,顯示崑山地區的抗風化能力較差,容易受雨水侵蝕而崩解。

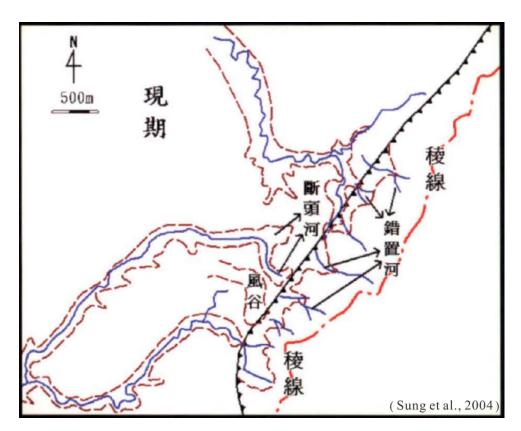


圖 14 旗山斷層沿線的斷頭河以及風谷。黑色線形代表旗山斷層(圖 引自宋國城等,2004)。



圖 15 崑山地區航空側拍圖。紅線標示處為岩性交界。

3-2 地層

本研究區域出露的地層有烏山層、蓋子寮頁岩、南勢崙砂岩、古亭坑層、嶺口礫岩,地層層序如表 2 所示。

烏山層

由孫習之於 1965 年命名(Sun, 1965),標準剖面位於高雄旗山區中寮山附近的烏山,本層岩性以厚層灰色細粒砂岩為主,但經表面經風化後多呈棕褐色(圖 16)。沉積環境屬潟湖(濱面)至中大陸棚(內遠濱相)沉積環境,浮游性有孔蟲的定年結果屬於 N17-N18 帶(吳榮章和梅文威,1992),超微化石的定年結果屬於 NN11-NN13 帶(Chi, 1979),本層底部被旗山斷層所截未出露於地表,與上覆之蓋子寮頁岩為整合接觸,地層年代上為晚中新世到上新世,可對比楠梓仙溪以東的糖恩山砂岩(林啟文,2013)。

蓋子寮頁岩

由孫習之於1965年命名(Sun, 1965),標準剖面位於旗山姜子寮, 沉積環境屬於深海相,以暗灰色頁岩與砂質頁岩為主,偶夾薄層風暴 砂岩層,層厚約500至700公尺,本層與上下之烏山層、南勢崙砂岩 皆為整合接觸,由超微化石定年屬於NN12-NN15,地層年代為上新 世(林啟文,2013)。

南勢崙砂岩

南勢崙砂岩由孫習之所命名,可分為上下兩段,上段岩性為厚層 細粒砂岩與泥質砂岩,夾薄層砂頁互層(陳志雄等,1993),下段以厚 層砂岩為主,夾砂頁互層,常有貝殼、單體珊瑚等化石碎屑,本層整 合於蓋子寮頁岩之上。(摘寫自陳文山 (2016))

古亭坑層

由烏居敬造 (1932)命名,廣布於高雄古亭至田寮區域,地層層厚約 4000 公尺,地層年代為早上新世到早更新世(陳文山等,2011),本層以泥岩夾數公分灰白色細粒砂岩為主,砂岩層常因風化而呈棕褐色,沉積環境屬於外遠濱相沉積環境,本層偶夾數公尺厚層砂岩,砂岩中可見平行層理及生痕化石(圖 17),顯示沉積環境屬於內遠濱相沉積環境(陳文山,2016)。本層中可在細粒砂岩的裂隙之中發現方解石的結晶以及泥岩的基質當中發現薄層的碳屑。本層的成岩時間較短、膠結不佳,又泥岩中的片狀礦物容易遇水回帳,進而使得泥岩崩解,是以本層與鄰近地層相比更容易受到水的侵蝕出露(李德河等,1994),使得植被不易生長形成泥岩惡地。

嶺口礫岩

嶺口礫岩以厚層礫岩為主,偶含細粒砂岩,其中礫岩以變質礫岩 與石英岩為主,本層向南厚度逐漸增加,標準地層出露於旗山斷層東 側的嶺口地區,沉積環境為陸相的辮狀河系,本層與下覆的南勢崙砂 岩呈交角不整合接觸和古亭坑層呈斷層接觸(陳志雄等,1993;林啟 文,2013)。



圖 16 烏山層中的砂岩露頭。露頭表面因風化而呈棕褐色,砂岩位態為044°/49°E,攝於高雄旗山中寮山。



圖 17 古亭坑層中的生痕化石。露頭地點位於高雄旗山花旗路旁,薄 層細粒砂岩中可見平行層與生痕化石。

表 2 西部麓山带上新統-更新統地層對比與各地層界限的絕對年代表 (表引自陳文山,2016)

時間	時代	西部麓山帶				
(距今 百萬年)	可了人	中部地區	西南部地區			
0.46 - 0.78 - 1.00 -	更新	頭嵙山層	六雙層 二重溪層 崁下寮層	~0.52 ~0.88	一————————————————————————————————————	嶺口礫岩
1.77 -	世	阜蘭層	~1.35 六重溪層 ~1.9	玉井頁岩 鏡面砂岩 北寮頁岩	(下部古亭坑層) ~1.5 古亭坑層	~1.6
2.588-	上新	錦水頁岩	澐水溪層	竹頭崎層	3.35	>3.35
	新世	大窩砂岩	烏嘴層	茅埔頁岩 隘寮腳層	4.2	南勢崙砂岩
5.33 -		十六份頁岩	~4.8 中崙層	鹽水坑頁岩	5.23	蓋子寮頁岩
	晚中新世	關刀山砂岩		糖恩山砂岩	木柵層 (烏山層)	烏山層

3-3 地質構造

本研究區域的主要地質構造有旗山斷層、龍船斷層與南安老向斜, 於研究區域內三構造的走向互相平行(圖 18)。

旗山斷層

旗山斷層由吉田要 (1932)首先提出。地調所於民國九十八年藉地 質鑽井與地表地質調查,發現旗山斷層截切全新世沖積層,將旗山斷 層從存疑斷層改列為第一類活動斷層,亦透過鑽井定年資料研判最近 一次旗山斷層活動時間約為距今 7189 B.C. (林啟文等,2009)。旗山斷 層的上盤為烏山層下盤為古亭坑層,為一大致呈北北東-南南西走向 的逆移斷層,由旗山區向南延伸,始由東北-西南走向途經三桃山、中 寮山,至烏山頂後轉為南北走向,並在更南方的深水地區轉回東北-西 南走向,至於旗山斷層是否延伸至大社、仁武地區並未有明確的定論 (林啟文等,2009;陳柏村等,2009)。

龍船斷層

龍船斷層最早由烏居敬造 (1931)命名。龍船斷層起自內門龍船窩, 向北北東走向延伸至台南左鎮區截切左鎮斷層且與平溪斷層相接,向 南由北北東轉向東南方切過二仁溪、古亭坑斷層與南安老向斜,最後 在大約高雄內寮附近轉向西南方向。

由超微化石的定年結果,斷層上盤的龍船窩厚層砂岩年代屬於上新世的 NN13-NN15 帶,在龍崎地區,斷層下盤屬於 NN19-NN20 的更新世古亭坑層。龍船斷層南段由大埔西方延伸至大廍亭山,雖然在斷層兩側岩性相近皆為泥岩層,但在斷層上盤的馬頭山附近找到屬於 NN11 的中新世超微化石,與下盤南安老向斜附近的 NN20 帶相差甚遠(吳榮章和梅文威,1985)。

於大廍亭山至崎溜山(舊稱雞南山)附近,林啟文於 2009 年的地質調查結果,認為此處的斷層特性與北方所調查之龍船斷層不同,稱之為車瓜林斷層,但本研究為了與前人文獻中的斷層名稱統一,故仍稱之為龍船斷層以方便比較。

南安老向斜

最早由吉田要 (1932)所提出,亦可被稱之為田寮向斜,向斜的東 翼被龍船斷層所截,向斜的兩翼呈西翼地層較緩東翼較陡的不對稱形 貌,於南勢湖附近的地區可觀察到地層倒轉的現象(林啟文, 2013)。

前人剖面

鄭宏祺 (2000)利用平衡剖面方法繪製剖面,並藉中油的鑽井資料 與震測剖面做為地層深度控制,他認為龍船斷層角度會以高角度向下 延伸,並會與旗山斷層交會於長枝坑層底部的滑脫面(約地下 10 公里 處),更進一步解釋,大崗山至中寮山地區其下可能由中新世的長枝坑 層的疊瓦狀構造 (Duplex structure)所組成(圖 19)。

中油位於屏東平原約 3 公里深的 PTG-1 井顯示,屏東盆地的沉積層序為自烏山層以後為蓋子寮頁岩、南勢崙砂岩、嶺口礫岩,最後是現代沖積層,顯示屏東盆地經過了由深海相轉變為沖積平原相的過程,亦可以說明屏東盆地於大地構造上可能屬於負背盆地 (Piggyback basin),如圖 20 所示 (Chiang et al., 2004)。

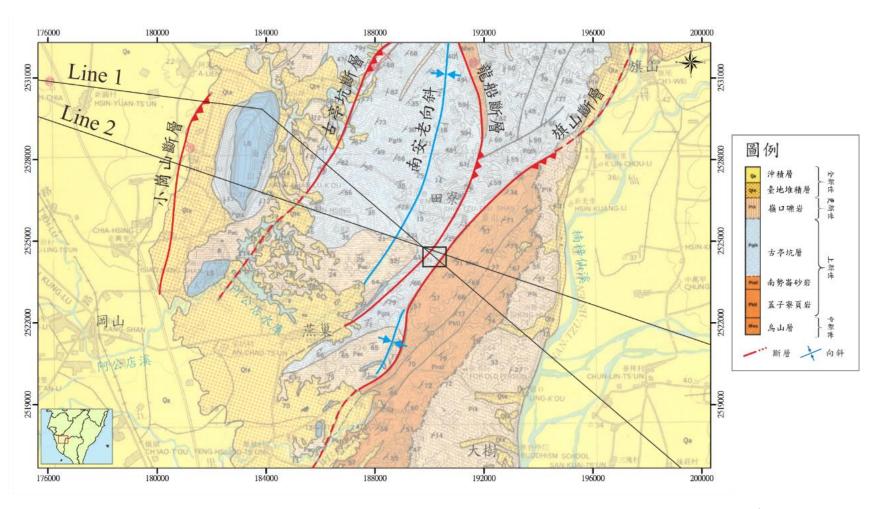


圖 18 岡山-旗山區域地質圖。圖中黑色方框為研究區域之範圍(改繪自中油台南地質圖,1989)。小崗山斷層跡取自 地調所旗山地質圖幅。

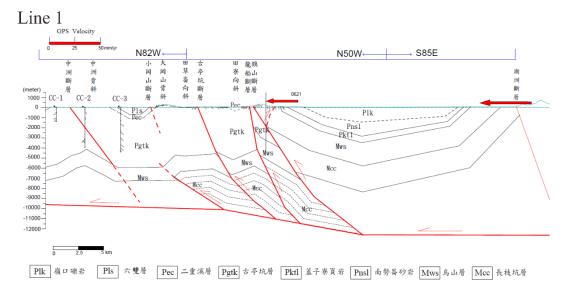


圖 19 鄭宏祺(2000)於高雄-屏東地區繪製之平衡剖面圖。剖面位置參照圖 18 的 Line1。

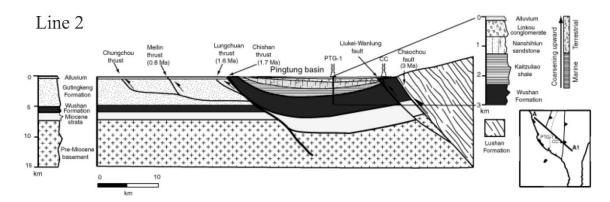


圖 20 Chiang et al.(2004)於高雄-屏東地區繪製之剖面圖。剖面位置參照圖 18 的 Line2。

四、研究方法

4-1 UAV 攝影測量

本研究採用空中無人飛行載具拍攝航空照片,並藉由套裝軟體 PIX4Dmapper 進行空中三角測量製作出大比例尺之正射影像與數值 地表模形(DSM),來進行地形判釋及製作野外地質調查所需的調查底 圖,方便本研究製作大比例尺地質圖,並利用攝影測量技術獲得隧道 內的三維模型,來幫助進行隧道裂隙測繪作業。

UAV攝影測量是一種利用 UAV 進行航空相片的拍攝並進行資訊分析,來確定地表物體大小分布亦可獲取地表高層的技術,航空攝影的特點在於快速、便利與大資訊量的獲取,尤其是人員不易到達的高山地區此方法更具優勢(王儂和過靜珺,2003),近年來由於 UAV 的輕量化與商業化,航空照片的取得變的更加即時、方便與便宜(葉家承等,2015)。

本研究使用的 UAV 為大疆創新科技有限公司(DJI)的 Mavic Pro,近年來 UAV 的商品化與輕量化,本研究選用 Mavic Pro 是由於其方便攜帶且高續航力的特性,使本研究更容易在出野外時一同攜帶並拍攝航空照片,技術參數如表 3 所示。

近年來由於低成本高性能的 UAV 推陳出新,卻也因為民眾對於 飛安意識的輕忽以及對於飛行器性能的不熟悉,使得 UAV 失控造成 民眾的傷害,是以航空計劃的擬定以及航高、航線的選定愈發重要。

在選定測區後須確認該區域是否為禁航區(或限航區),本研究區域並非位於禁航區或限航區之內,但需小心周遭山脈的高度、高壓電塔電線的高度以及無限電波遮蔽的問題,規劃航線時照片間的重疊率需大於80%,本次航線採單 S 飛行,部分區域因受電塔干擾,故採雙

S 飛行以增加相片間的重疊率。本研究在野外設置了航空標做為地面控制點(圖 21),並以 VRS-RTK 測量大地座標,本研究採用二度分帶 TWD97 座標系統,航空標的規格由一10 公分×10 公分 的正方形與 三個10 公分×20 公分 的長方形所組成的 T 字形(圖 21)。

在進行完航空照片的拍攝與地面控制點的量測後,即可進行空中三角測量的解算,本研究使用套裝軟體 PIX4Dmapper 來進行,在解算之前須先將相機的內方位參數匯入,然後輸入地面控制點座標並以人工判讀的方式將像空間中的航空標做手動的點選,解算完成後本研究可以得到具空間座標與彩色的點雲模型與數值網格模型,再將模型正射化後即可得到正射的航空影像,作業流程可參照圖 22,UAV 攝影測量原理請參照附錄一。

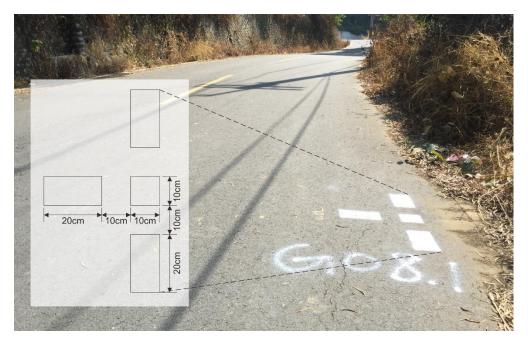


圖 21 地面控制點 G08.1 之野外照片。位於高雄旗山中寮二路上,航空標由一10 公分×10 公分 的正方形與三個10 公分×20 公分 的長方形所組成的 T字形。

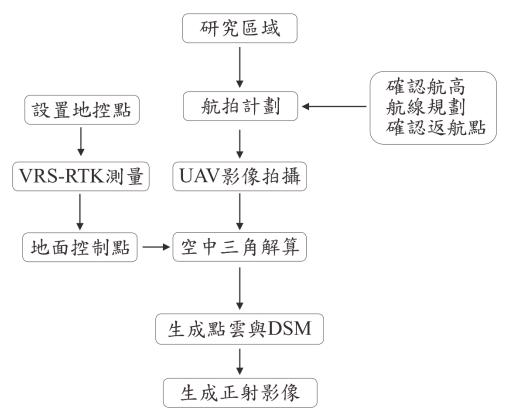


圖 22 影像測繪作業流程圖。

表 3 Mavic Pro 技術參數(參考 Mavic Pro 使用者手冊, 2016)。

飛行器參數				
對角軸距(不含漿)	335 公厘			
尺寸(摺疊狀態)	83×83×198 公厘			
起飛重量	734 克			
平均續航力	21 分鐘			
最大上升速度(無風)	5 公尺/秒			
最大飛行速度(無風)	18 公尺/秒			
最大抗風能力	5 級風			
最大圖傳距離	7 公里			
衛星定位模組	GPS; GLONASS			
鏡頭參數				
感光原件大小	1/2.3 英吋			
視野大小(FOV)	78.8°			
焦距	28公厘(35公厘等效焦距)			
影像尺寸	4000*3000			

註: FOV=Flight of view, 相機所能看到的視野角度。

4-2 野外地表地質調查方法

4-2-1 地質調查

欲對研究區域進行地質調查前,會先參考前人所製作的地質圖, 例如地調所或中油的地質圖,以了解前人對於該區域地層和主要構造 的描述。

野外地質調查主要在紀錄露頭中岩層的岩性、走向、傾角、顏色以及是否有原生或次生構造,原生構造所指為沉積物沉積時所形成的構造與沉積環境有關,例如層面、粒級層等,次生構造所指為沉積物成為岩石後,受到大地應力作用或高溫加熱後所形成的構造,例如斷層、節理等。野外工作結束後,會將所收集的面狀資料(層面、斷層面等)繪於赤平投影圓上,赤平投影為下半球投影,在投影圓上空間中的面狀資料會以線來表示,而空間中的線狀資料會以點來表示。為了觀察面狀資料在位態上的分布與集散程度,可用與面狀資料相差90°的極點(pole)做為代表。

UAV 技術的應用,使得進行野外調查時航空照片的取得更為方便,使得調查時對於研究區域有更全面、更即時的了解,本研究更進一步利用 UAV 攝影測量製作正射影像與數值地形,來做為地質調查與繪製地質圖時的底圖。

4-2-2 地質製圖與剖面繪製

地質圖所指為地表地質圖,也就是在加入地形後地層、岩層與構造會在地表出露的位置,其中地質圖繪製時有其基本的假設,由於沉積物在沉積時大多會沿著水平面沉積,因此在無構造影響的條件下,地質學家會假設岩層的側向延續性佳與岩層為一平面,在野外調查時會量測岩層的走向與傾角並進行側向的調查,但於野外出露的岩層大多產狀相似,因此在野外時需尋找定的岩層做為指準層(Marker bed)或以明顯的岩性交界做為畫分地層與岩層時的準則。

在假設岩層為平面且側向延續良好的情況下,野外量測到的岩層位態可用來繪製構造等高線(Structural contour),構造等高線將岩層的走向做為構造的等深度線,傾角計算後可得到等高線的間距,而同高程的地形等高線與構造等高線的交點便是岩層出露的位置。

在繪製完地質圖後下一步便可繪製地質剖面,地質剖面的選線原 則為經過多數的地質資料與垂直於主要的構造線,例如斷層跡或褶皺 軸,在岩層走向與剖面不垂直的情況下,則需注意視傾角的問題,在 剖面經過資料較少的區域時也可透過資料投影的方式解決。

由於本研究區域內的岩層位態在小區域內便有明顯的變化,因此本研究使用急折法(Kink method)進行剖面的繪製,以圖 23 為例,先畫出選取位置的地形剖面,將地層傾角放於剖面之上(圖 23a),假設岩層為等厚的條件下,欲畫出 Sh 地層需將鄰近的地層傾角 B、C畫於岩層邊界的 XY上,其延伸線將交會於點 L,之後畫出通過點 L的位態 B、C之分角線(圖 23b), Sh 地層便可用分角線做為轉折點進行繪製(Marshak & Mitra, 1988)。

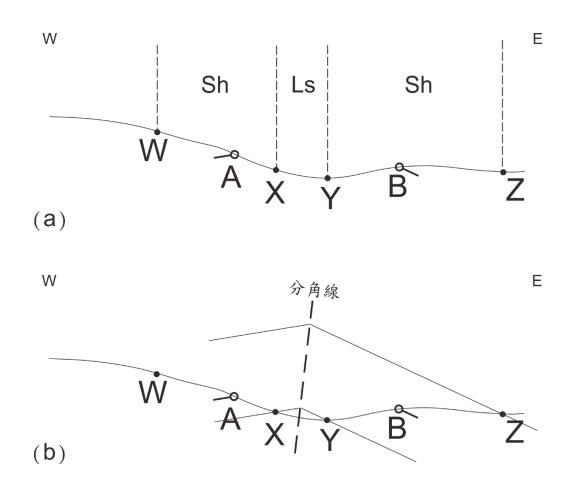


圖 23 急折法繪製步驟示意圖。(a)繪製地形剖面並將地質資料放上; (b)岩層位態之分角線將通過點 L。(改繪自 Marshak & Mitra, 1988)。

4-3 隧道裂隙測繪方法

本次研究的研究目的之一為探討隧道的破壞是否與斷層的上下 盤活動有關,除了隧道周遭的地質考察外,本研究亦須針對隧道的裂 隙進行細節的測繪,以了解裂隙在隧道中的分布,由於中寮隧道毀壞 至今經歷十年有餘的修補,許多的裂隙已被水泥所填充,但仍有一些 裂縫持續的生成。

本研究利用攝影測量技術(詳情請見附錄一),沿著隧道拍攝重疊率高的照片(約每公尺一張相片),但在沒有地面或壁面控制點的情況下,本研究藉由修正照片的透鏡畸變與手動設置特徵點(Manual point,如圖 24)的方式來減少模型的變形,拍攝隧道的長度,北上出口端約長 145 公尺與南下入口端約長 135 公尺。

然後以此模型製作出的隧道口至毀壞嚴重處襯壁兩側的正射影像,以正射影像為底圖進行隧道裂隙的描繪,來了解裂隙的側向延伸、傾向及傾角,還有隧道大致的變形形貌。



圖 24 隧道襯砌上可辨識之特徵點範例圖。

五、研究成果

5-1 中寮隧道北端 UAV 測繪結果

隨著工程進度的進行,本研究對測區進行多次的航拍作業,最後選擇民國 107 年 3 月時所製作的正射影像進行地質圖的繪製作業,本研究設置了 9 個地面控制點與 2 個檢核點,合計 11 個測量點(圖 27),以 VBS-RTK 進行量測,本研究使用的大地座標系統為二度分帶TWD97,測量結果如表 4 所示,鉛直方向的方均根值(V RMS)為0.003 ~ 0.014公尺,水平方向的方均根值(H RMS)為0.002 ~ 0.008公尺,以上所述之測量精度為儀器測量精度(Precision)。

起飛點以及返航點設置於中寮山上的蓮花亭(位於控制點 G08 附近),既可減少 UAV 抬升高度所消耗的能量亦可避免航高不足而撞山的問題,但是中寮山做為田寮、旗山、燕巢區內的至高點之一,其上設置了許多無線電視與廣播電台的發射基地台,在進行航拍任務時,曾受到電磁波訊號的干擾而暫時性的失去圖傳訊號,是以本研究將飛行的航高定在 80 公尺左右,在考慮地形的高程差後,最高航高可達280 公尺,測區面積達 1.36 平方公里,平均的地面解析度(GSD)可達8.64 cm/pixel,而 PIX4D 軟體所判斷的控制點座標與實際量測的控制點座標,其差異量如表 5 所示。

根據黃華尉等(2012)的自行研究報告中指出,在台灣地區內 VBS-RTK 的測量點與水準點之測量準度(accuracy)可達約 2 公分等級,而檢核點與數值模型上同一點的最大差異量為 0.24 公尺,經評估本研究認為此 UAV 的測繪成果在可接受的範圍內,圖 25、圖 26 為本研究所製作之中寮隧道北端正射影像。

表 4 民國 107 年 3 月 28 日 VBS-RTK 測量成果

(座標系統:二度分帶 TWD97; GCP:地面控制點; Check:檢核點)

點號	類型	東 [m]	北 [m]	正高	Н	V
<i>™□ </i>			, , (m)	[m]	RMS(m)	RMS(m)
G07	GCP	189812.318	2524264.14	143.565	0.005	0.007
G06	GCP	189881.537	2524709.899	103.311	0.005	0.007
G01	Check	190354.491	2524952.667	101.287	0.002	0.003
G02	GCP	190382.413	2525077.347	99.735	0.002	0.004
G14	GCP	190534.296	2524895.802	123.626	0.002	0.003
G03	GCP	190749.117	2524766.005	163.980	0.003	0.005
G16	GCP	190363.252	2524667.121	113.862	0.003	0.007
G17	Check	190395.142	2524621.706	114.445	0.002	0.005
G08.1	GCP	190573.730	2524028.694	298.313	0.008	0.014
G08	GCP	190792.592	2524230.730	319.326	0.002	0.004

註: m = meter,公尺; HRMS = Horizontal Root Mean Square,水平 方均根值; VRMS = Vertical Root Mean Square,鉛直方均根值。

表 5 檢核點與模型差異量

檢核點	東 [m]	北 [m]	正高 [m]
G01	-0.140	0.097	-0.240
G17	-0.050	-0.083	-0.094



圖 25 民國 106 年 12 月所製作之隧道北端正射影像。

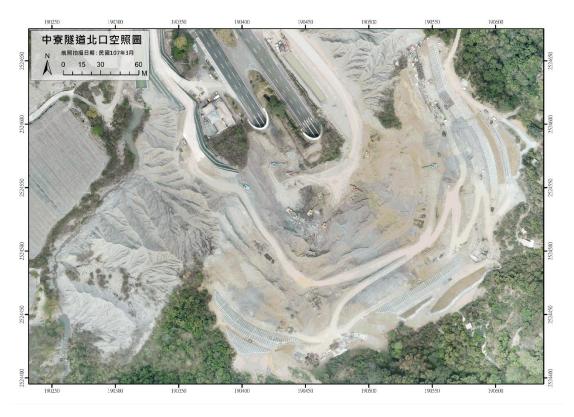


圖 26 民國 107 年 3 月所製作之隧道北端正射影像。

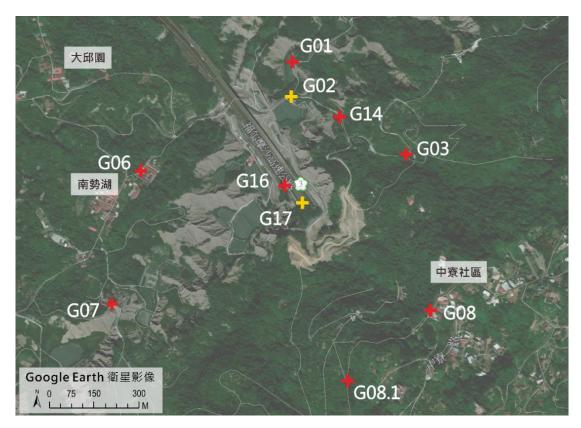


圖 27 中寮隧道北端地面控制點與檢合點的相對位置。控制點以紅色十字表示,檢合點以黃色十字表示,影像圖取自 Google Earth。

5-2 地質調查結果

本小節將以自製的正射影像為底圖(圖 28),說明本研究的調查結果,本研究將調查的範圍分為隧道口開挖面、國道 3 號以東、國道 3 號以西,其中隧道開挖面又分為東側、中央與西側來進行調查(圖 29)。

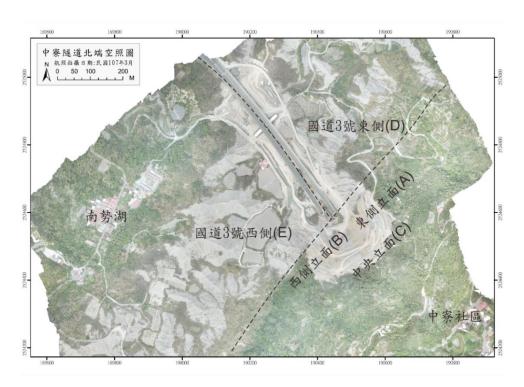


圖 28 中寮隧道北端地質調查分區說明圖。



圖 29 隧道口開挖面航空側拍圖。

5-2-1 東側立面調查(A)

本研究將東側立面的上階分為六個露頭點,由左到右分別是 A1 到 A6,位置參考圖 30,露頭 A1 內本研究可以發現圖 31 的左側以 青灰色的泥岩為主,中間為灰黑色的斷層泥,右側以棕褐與灰白色的砂岩為主,根據前人所定義的旗山斷層,斷層上盤為砂岩,於黑色的斷層泥中,本研究發現其中夾雜著灰白色的細粒砂岩顆粒(圖 32),說明砂岩與泥岩有受到斷層剪切作用而混合的現象,測量其剪切面位態大約呈347°/72°N,本研究在與斷層泥相接的上盤砂岩中,發現砂岩層多受剪裂而難以分辨完整的層面(圖 33)。

在距離斷層泥約 3~5 公尺處的露頭 A2 內,可觀察到厚層灰白色的細粒砂岩,受風化後顏色呈棕褐色(圖 34),質地堅硬以地質槌敲擊數次才可毀壞,此區內可觀察到明顯的層面呈051°/33°S,在層面之間有受到剪切作用的砂岩夾雜其中(圖 35),本研究亦有觀察到剪動面有分岔的現象(圖 36)。

露頭 A3 從顏色上可以看到露頭左部與右部有不連續的現象,露頭左部為厚層砂岩夾薄層砂頁互層,右部為灰黑色砂頁互層,互層中的砂岩部分受到地下水影響而呈棕褐色(圖 37),靠近觀察顏色的交界後,可以看出砂岩被斷層所截切(圖 38),但由於並無發現明顯可對比的指準層,所以無法判斷此剪切面的剪動方向,剪切面位態呈288°/71°N、304°/47N。

在露頭 A4 由砂頁互層所組成,從遠端觀察,可以看到左上與右下的岩層呈交角不整合,左上的岩層位態為040°/32°E,右下岩層位態為040°/41°S,靠近觀察後發現兩岩層的接觸面呈類似於糜嶺岩的流動狀構造(圖 39),大致上可以看出為逆衝的剪動帶。

露頭 A5 為砂頁互層(圖 40),與露頭 A4 相比頁岩比例較砂岩高,於露頭的下半部可以觀察到向北傾裂隙,但由於露頭中並無明顯的指準層,可以指示層位之間是否有錯動,且位於露頭的上方也出現了向南傾的裂隙,因此本研究判斷此露頭之裂隙為節理,露頭 A5 的岩層位態為042°/30°E。在東側立面的露頭 A6,可以看到塊狀的灰白色細粒砂岩有被斷層泥包圍的現象(圖 41)。



圖 30 中寮隧道北端東側立面遠觀圖。本研究將東側上階露頭分為六個部分來說明。

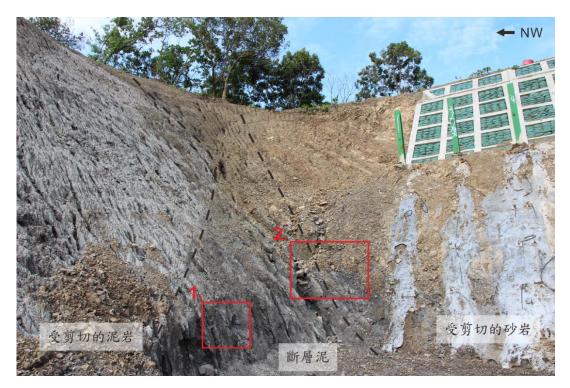


圖 31 開挖面東側的旗山斷層交界。露頭 A1,由顏色來區分可以清楚的分為三個區塊,分別為青灰色的受剪切作用的泥岩、灰黑色的斷層泥、青灰色與棕褐色的砂岩。



圖 32 斷層泥中的細粒砂岩顆粒。露頭 A1 近照 1。



圖 33 破碎的灰白色細粒砂岩。露頭 A1 近照 2,岩層因受剪切作用影響而難以看出層面。



圖 34 砂岩中的剪切面。露頭 A2, 距離泥岩與砂岩的交界約 10 公尺, 岩性為灰白色的厚層細粒砂岩, 受到風化後呈棕褐色。



圖 35 砂岩層間的薄層剪切帶。露頭 A2 近照 P1,在厚層砂岩的層面之間,可以觀察到層間的薄層剪切帶,如紅色虛線所示。



圖 36 砂岩層間分岔的薄層剪切帶。露頭 A2 近照 P2。

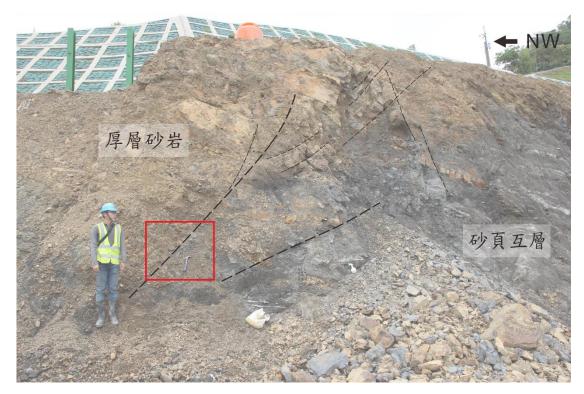


圖 37 傾向西北方的剪切面。位於露頭 A3,照片的左側為棕褐色的砂岩,右側為灰色砂頁互層,黑色虛線為剪切面。



圖 38 岩層中的剪切面近照。位置同圖 37 之紅框,棕褐色的砂岩與灰色砂頁互層之間被剪切面所截切,如紅色箭頭所指,剪切面位態呈 288°/71°N。





圖 39 岩層呈斷層接觸。位於露頭 A4。(a)由砂頁互層所組成,右上與左下的岩層,右上位態為022°/28°E,左下為043°/41°S;(b)紅框內之放大圖,位態不同的岩層邊界呈斷層接觸,斷層帶中的岩石呈角礫狀。



圖 40 砂頁互層。位於露頭 A5,頁岩的比例較露頭 A4高,層間可以 觀察到裂隙,但無指準層可比較。

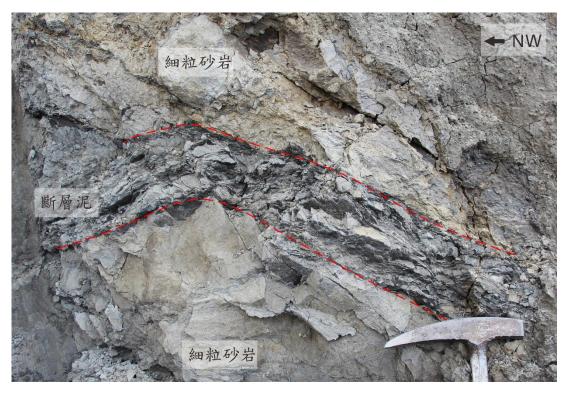


圖 41 東側立面下階的斷層泥。位於露頭 A6, 灰白色的細粒砂岩有被斷層泥包圍的現象。

5-2-2 西側立面調查(B)

由於西側的開挖面在斷層帶的部分出露狀況良好,全長約90公尺,調查時較少施工,故本研究可以進行連續且完整的地質調查,本研究將此立面依照 Sibson (1977)、Choi et al. (2016)對於斷層帶岩石的分類,以南下中階全景圖作為底圖,將立面區分為受剪切作用較少的圍岩帶、受剪切面作用的斷層影響帶(Damage zone)以及由斷層泥與斷層角礫岩所組成的斷層剪切帶,本研究將調查所得到的層面傾角與調查點位置繪於圖42之中。

露頭 B1 在圍岩帶與旗山斷層上盤影響帶的邊界(圖 43),厚砂夾薄頁岩層受到剪裂的現象不明顯,經量測後砂岩的位態為055°/65°S,在離斷層較近的砂頁互層中,裂隙的間距較厚砂夾薄頁岩層密集,在砂頁互層與細粒砂岩層的交界露頭 B2 的位置,灰白色細粒砂岩層已受到剪切作用而產生較密的裂隙,裂隙並無特定方向的分布,裂隙之間的間距約在一公分左右(圖 44)。

露頭 B3 觀察到的斷層泥與斷層角礫岩帶寬約 3~4 公尺,從圖 45 中可以看到斷層泥中夾雜許多角礫狀的小石塊,由於雨水的差異 侵蝕,使得斷層泥中較大塊的石塊顯露出來,圖 45 左邊的岩層位態 與斷層泥的邊界大致上平行,位態為 054°/66°S,本研究以剪切帶 D 稱呼此斷層角礫岩帶。在砂岩之中亦可以觀察到受剪切作用而產生的 裂隙,裂隙中有些許的斷層泥夾雜其中(圖 46),觀察斷層泥中變形的 細粒砂岩,其剪切方向為正移形式。

露頭 B4 在斷層上盤的斷層影響帶之中,岩性分布大致可以對比中間立面下階的岩層,以厚層砂岩為主偶夾砂頁互層,岩層受到剪裂的程度較小,裂隙多以節理為主(圖 47),砂岩中斷層上盤影響帶的寬度約 50 公尺。

在露頭 B5 本研究觀察到斷層泥與斷層角礫岩帶(圖 48),寬度約8公尺,在斷層帶中可以看到棕褐色的水從岩層中流出且水帶有淡淡的硫磺味,在同屬於斷層帶 B 的露頭 B6 中,本研究可以清楚的看到類似於糜嶺岩中受剪動的流動狀構造,其剪切方向為正移形式(圖 49),斷層帶 B 主要由角礫岩與斷層泥所組成,而且再向西北方走約 5 公尺,即出現厚層的泥岩剪切帶,同樣本研究在西側立面上階的露頭 B7 處也有看到砂岩與泥岩的交界(圖 50),因此本研究判定斷層帶 B 為旗山斷層主斷層帶所在的位置。

在斷層下盤的斷層影響帶之中,岩性以青灰色泥岩為主,帶寬約70公尺,從外觀上本研究發現此區的岩層位態並不明顯,從露頭外觀上可以看到許多的裂隙以及黑色條帶,泥岩中的裂隙大致有平行黑色條帶的現象,而且該裂隙並非只存在於表面,而是深入岩壁之中,側向延續性良好(圖 51),以刮刀刮開後,可發現黑色泥岩中可看到許多被拉長呈透鏡狀青灰色泥岩(圖 52),是以判斷黑色泥岩為斷層泥。在部分的泥岩之中,可以觀察到保存良好斷層擦痕(圖 53),位態為055°/62°S rake 72°S,但由於斷層擦痕呈現線狀且擦痕面較為平整,並無法明顯的分辨出斷層為正移或逆移形式。

本研究將在旗山主斷層帶與斷層影響帶所量到的剪切面位態,進行大圓投影分析(圖 54),本研究將斷層面位態分為三類,50°~60°、70°以上以及少部分的20~40°,50°~60°佔了較大的一部分可能是主要的滑動面。

露頭 B9 在西側立面的下階,即位於隧道 S013 的西側,露頭上岩石由灰白色細粒砂岩與砂頁互層所組成,層面位態為027°/54°E,細粒砂岩中可觀察到許多節理,節理的位態為011°/51°W,經投影圓

分析後發現兩面理的夾角約 80°,因此本研究判斷裂隙可能為砂岩受到擠壓而產生(圖 56)。在露頭 B9 右側約 3 公尺左右,可以發現有斷層泥的出現,斷層泥之中可以看到被截斷的泥岩,其剪切方向為正移形式(圖 57)。

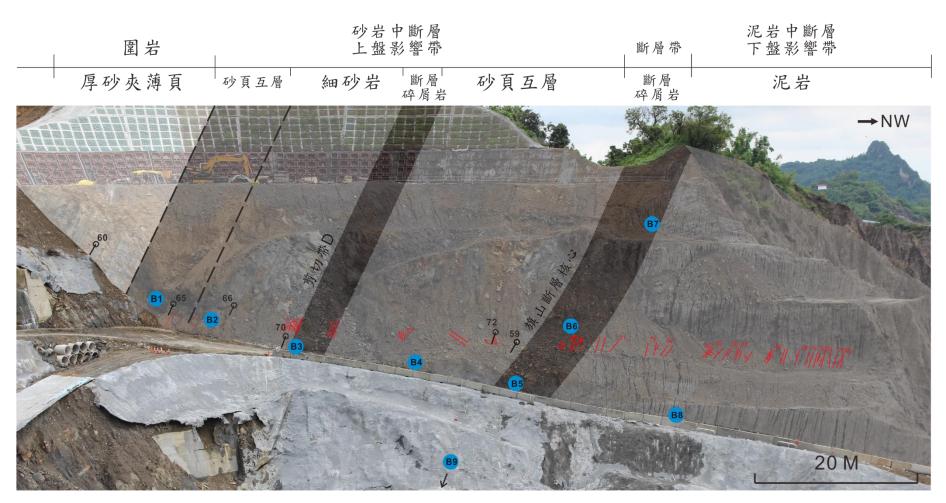


圖 42 中寮隧道北端西側立面遠觀圖。紅線表示剪切面,藍圓表示露頭號碼。

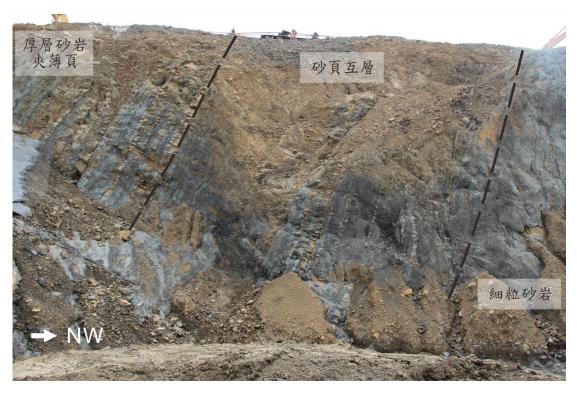




圖 44 破碎狀的砂岩。位於露頭 B2,厚層細粒砂岩中,裂隙間距約一公分左右,鉛筆長度約 15 公分。



圖 45 斷層泥與斷層角礫岩。位於斷層上盤影響帶的剪切帶 D 中的露頭 B3 處。



圖 46 砂岩中夾雜薄層的斷層泥。



圖 47 旗山斷層上盤斷層影響帶。位於露頭 B4 處,岩性為厚層砂岩夾薄層頁岩。



圖 48 旗山斷層核心的斷層泥與斷層角礫岩。位於斷層帶 B 的露頭 B5。



圖 49 糜嶺岩狀的斷層泥。位於露頭 B6,在斷層帶 B 中本研究可以 觀察到條帶狀的斷層泥,其中可看到灰白色的細粒砂岩顆粒。



圖 50 西側立面上階的旗山斷層交界。位於露頭 B7。



圖 51 下盤斷層影響帶中的黑色條帶。位於露頭 B8,黑色條帶位置如紅色箭頭所標示。



圖 52 黑色條帶中的剪切面組構。靠近觀察露頭 B8 的黑色條帶並以 刮刀刮開,可發現黑色的條帶中有剪切面的組構,且剪切的方向平行 於泥岩中的裂隙。



圖 53 泥岩中的斷層擦痕。

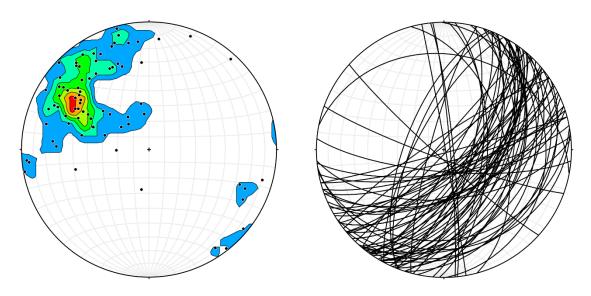


圖 54 旗山斷層帶剪切面之投影圓分析。N = 77。

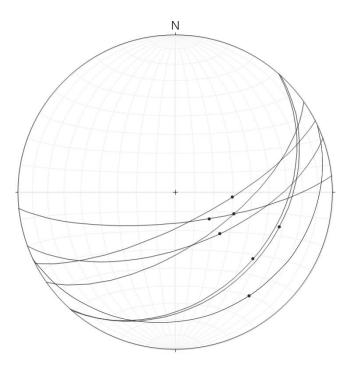


圖 55 斷層擦痕位態。



圖 56 露頭 B9 的砂頁互層。西側立面下階之厚層砂岩夾砂頁互層。



圖 57 隧道旁的剪切面。位於露頭 B9 右側約 3 公尺,在照片中可以看到被截斷的泥岩以及流動狀的斷層泥。

5-2-3 中間立面調查(C)

露頭 C1 位於中間立面的中階,為頁岩夾薄砂層與厚砂夾薄頁岩層的邊界(圖 58),從外觀上可以看出顏色上的差異,且由於岩層經過挖土機的挖掘,與砂岩層相比頁岩層上留下明顯的挖掘痕跡。

露頭 C2 為中間立面的下階部分(圖 59),大致上可以看出岩性以厚層灰白色砂岩為主,其中夾著薄層的砂頁互層,從遠方觀察,可以看出砂岩層之中存在許多的節理面,但由於無法靠近觀察所以難以判斷是否受到斷層作用影響。



圖 58 厚層砂岩夾薄頁岩與頁岩夾薄砂層的交界。位於中間立面的中階, 背包大小約一公尺, 照片面向東南方拍攝。

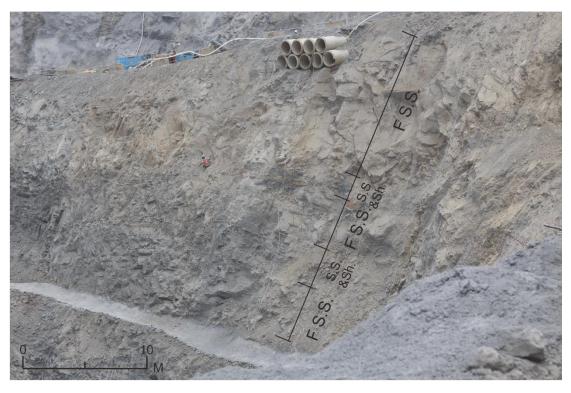


圖 59 中間立面的下階。厚層灰白色砂岩夾砂頁互層,照片面向東南方拍攝。

5-2-4 國道 3 號以東地質調查(D)

露頭 D1 位在厚層的泥岩層,本研究在泥岩層中看到連續性不錯的黑色條帶(圖 61),本研究以刮刀刮開後可以看到剪切狀的紋理(圖 62),斷層邊界的位態為 051°/54°S,本研究命名為剪切帶 C。

在露頭 D2 的位置,有一透鏡狀的厚層細粒砂岩層(圖 63),砂岩層的位態為 016°/79°S,在岩層中可以發現沉積構造的粒級層,從圖 64a 中可以發現岩層中的顆粒向右由粗變細,再加上圖 64b 中河道侵蝕面凹向右方,皆與岩層的傾向相同,本研究認為該砂岩層並未倒轉。

在露頭 D3,本研究運用空拍影像所製作的三維數值模型,可以在模型之中黑色的條帶(圖 65 a),其側向的延續性十分清楚,在本研究野外的調查之中也可觀察到黑色條帶(圖 65 b),黑色條帶的位態為010°/70°E與位態為325°/50°E的棕褐色岩層呈斜交關係,因此本研究判斷黑色條帶為斷層剪切面,並命名為剪切面(Fracture)A、B。

在露頭 D4 可以發現保存良好位受斷層擾動的厚層泥岩夾薄層細粒砂岩層(圖 66),位態為338°/39°E。

在露頭 D5 的位置,本研究發現了遭到變形的橢圓形水管,本研究認為可以用於指示水泥牆變形的形態(圖 67),由於在一旁也有未變形的圓形水管,因此本研究假設水管在無受外力的原始狀態下為圓形,橢圓形水管的長軸方向傾向西北方且與地面夾約30°,顯示此水管可能受到了一斜向方向的推擠作用(圖 67a),本研究也可以觀察到牆上的裂隙有上寬下窄的特性(圖 67b),可能表示該地存在由下而上的推擠之應力或邊坡潛移滑動。

在露頭 D6 中可以看到黑色的斷層剪切帶(圖 68),位態為 023°/68°E,在黑色剪切面中可以找到被變形的細粒砂岩或顆粒(圖 69)。

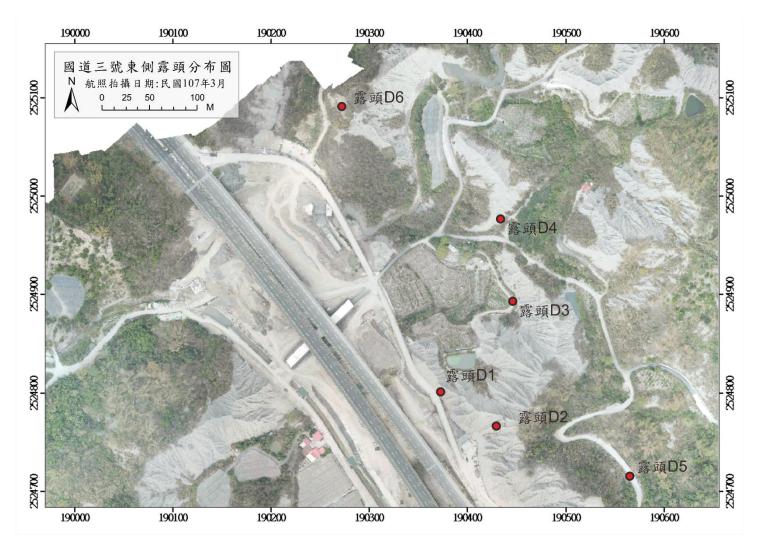


圖 60 國道三號東側露頭調查點位置圖。



圖 61 剪切帶 C。位於露頭 D1,紅色箭頭所指為黑色剪切面,剪切面 位態為 $051^{\circ}/54^{\circ}S$ 。



圖 62 剪切帶 C 之近照。圖 61 紅框之放大圖,可以看到青灰色的泥岩中夾著較深色的剪切狀紋理。



圖 63 厚層透鏡狀砂岩。位於露頭 D2,岩層厚度約3公尺,砂岩層位 態為 016°/79°S,照片面向正北拍攝。



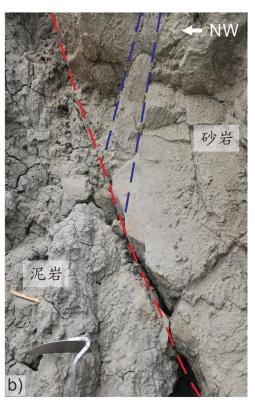


圖 64 厚層透鏡狀砂岩之近照。位於露頭 D2。(a)粒級層,黃棕色顆粒 向右由粗變細,與岩層傾向相同;(b)紅虛線為河道侵蝕面,藍線為層 面,侵蝕面凹向右方。





圖 65 泥岩中的黑色剪切帶。位於露頭 D3。(a)為運用空拍影像所製成的 3D 模型影像;(b)為紅框內之野外調查圖,紅箭頭所指為黑色的剪切面。



圖 66 厚層泥岩夾薄層細粒砂岩。位於露頭 D4,面向西北方拍攝。



圖 67 山間小路的人造物變形。位於露頭 D5。(a)受斜向的應力擠壓 而變形的水管;(b)因向上擠壓而開裂的裂縫。



圖 68 泥岩層中的厚層黑色剪切帶。位於龍船斷層帶內的露頭 D6。

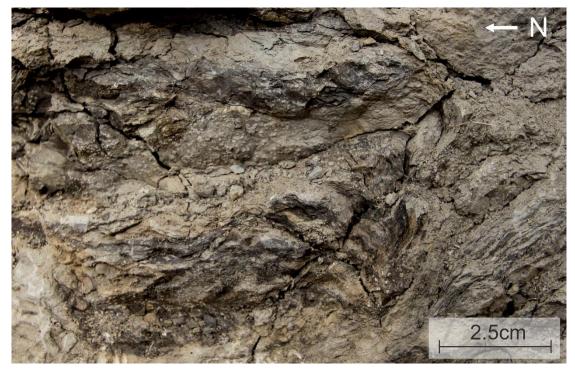


圖 69 黑色剪切帶的近照。位於露頭 D6, 黑色剪切面裡面含有被變形的砂岩。

5-2-5 國道 3 號以西地質調查(E)

在國道三號以西的區域,本研究所進行的調查項目有岩層位態的量測和黑色剪切帶的延伸性調查,總共可分為 E1 到 E7 共 7 個露頭調查點(圖 70)。

在田寮溪的支流當中,沿著田寮溪溯溪而上,在露頭 E1 可以看到厚層的黑色剪切帶寬約 2 公尺,剪切面位態為046°/76°S,剪切带中可以觀察到受剪切作用而變形的細粒砂岩層(圖 71),同樣本研究在露頭 E2 可以找到厚層的黑色剪切帶,厚度約 2~3 公尺,剪切帶中可以發現碳酸鈣的沉積(圖 72),斷層與泥岩的邊界為 066°/84°S,本研究將該剪切帶命名為剪切帶 B。

在露頭 E3 可以看到厚層的細粒砂岩高角度岩層(圖 73),層間並無法觀察到明顯的沉積構造,岩層位態為067°/83°S,在距離露頭 E1 西北方約 70 公尺處的露頭 E4,本研究可以發現細粒砂岩質的低角度岩層(圖 74),位態為008°/34°S,露頭 E4 岩層的位態與露頭 E1 有明顯的不同,因此本研究判斷是受到剪切帶 B 的影響。

在露頭 E5、E6 可以發現正移斷層,露頭 E5 可以明顯的看到薄層的細粒砂岩被斷層面所截斷(圖 75),岩層位態為260°/79°N,在裂隙之中本研究可以觀察到碳酸鈣的礦物結晶,位態為198°/83°W錯距約70公分,在露頭 E6之中,本研究可以看到明顯的拖曳構造(圖 76),錯動面的左邊為下盤,錯動面位態為080°/70°S,在這兩個露頭所觀察到的正移斷層傾向相反。

旗山斷層除了旗山主斷層外還包括一些分支斷層(陳柏村,2005), 本研究利用 UAV 空拍所製作的 3D 模型可清楚的看到許多顏色不同 於青灰色露頭的黑色條帶(圖 77),這些黑色的條帶本研究不只可以從 空拍影像上看到,本研究亦可以在野外調查時清楚的描繪出延續性好的黑色條帶,圖 78 所示為剪切帶 C 的側向延續情形。

在露頭 E7 的位置,本研究發現有側向延伸大約 67 公尺的厚層斷層帶(圖 79、圖 80),斷層帶中以泥岩為主,顏色上為黑色與青灰色泥岩相間出現,岩石的組構以流動狀構造為主,本研究將剪切面的位態進行投影圓分析(圖 81),發現大約有 4 組主要的剪切面,分別是059°/50°S、020°/50°S、099°/43°S、054°/76°S,雖然因為量測數據的不足,無法得知哪個面為主要的剪切面。根據前人研究對於龍船斷層在南勢湖地區的描述以及前人所繪製的斷層位置,本研究判斷此斷層帶屬於龍船斷層帶(可參考 5-2-6 斷層剪切帶分布,圖 82)。

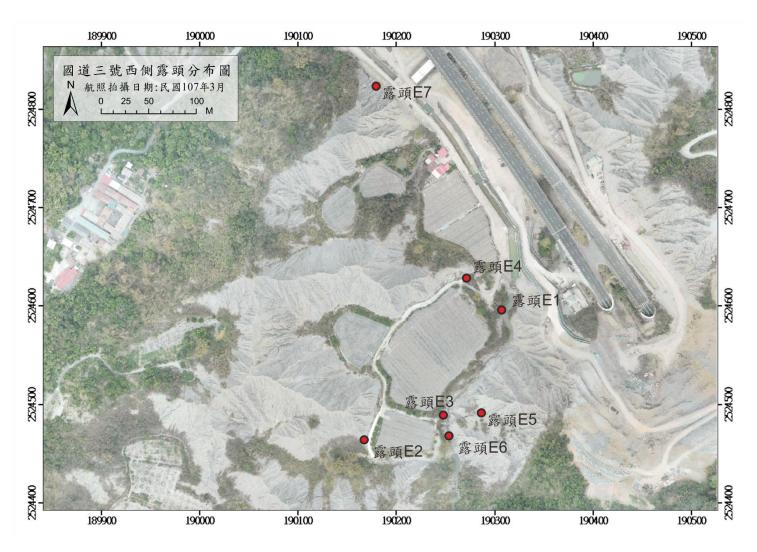


圖 70 國道三號西側露頭調查點位置圖。



圖 71 泥岩中的斷層剪切帶近照。位於露頭 E1,可以看到被變形後的細粒砂岩,斷層位態為046°/76°S。



圖 72 泥岩層中的黑色剪切帶。位於剪切帶 B 的露頭 E2,剪切帶中可以看到碳酸鈣的沉積,如紅色箭頭所指,斷層與泥岩的邊界為 $066^{\circ}/84^{\circ}S$ 。



圖 73 高角度岩層。位於田寮溪中的露頭 E3,位態為067°/83°S。



圖 74 低角度泥岩層。位於露頭 E4,岩層位態為008°/34°S。



圖 75 泥岩層中的正移斷層。位於露頭 E5,受斷層錯動的薄層砂岩, 錯距約 70 公分,於裂隙之中可觀察到碳酸鈣的礦物結晶。



圖 76 泥岩層中的正移斷層。位於露頭 E6,岩層有經過拖曳而呈凹向上的現象,因此判斷該剪切面為正斷層,錯動面的左側為上盤。



圖 77 國道西側露頭的 3D 模型。模型上可以看到剪切帶 A 的黑色條帶,紅色箭頭所指為條帶所在位置。



圖 78 側向延伸良好的剪切带 C。紅箭頭所指的範圍內為剪切帶所在的位置,照片面向東北方拍攝。



圖 79 泥岩中的黑色剪切面。位於龍船斷層帶的露頭 E7,黑色剪切面呈現流動狀。



圖 80 龍船斷層帶中的黑色剪切面近照。露頭 E7 近照。

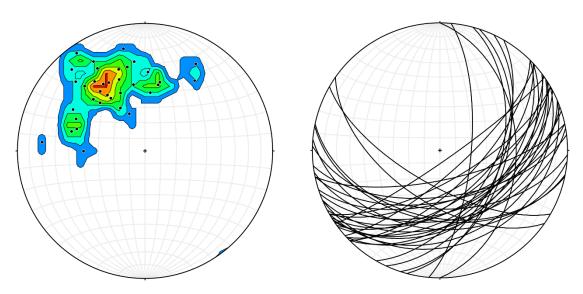


圖 81 龍船斷層帶裂隙投影圓分析。N = 35。

5-2-6 地質圖繪製

斷層剪切帶分布

將野外蒐集到的斷層位態資料搭配中寮隧道北端的 3D 模型與正射影像,繪製出小比例尺與大比例尺的斷層帶分佈圖(圖 82、圖 83),本研究將斷層帶區分為三個部分,旗山斷層帶、剪切帶 A、B、C、D以及龍船斷層帶,根據調查的結果,旗山斷層帶的斷層核心(Fault core)寬度約 8 公尺,換算成真厚約 6 公尺,將厚層泥岩與砂岩層的交界以及斷層角礫岩所在的露頭點連線後,旗山斷層大約的位態為042°/48°S,雖然與投影圓分析的結果不同,但是繪製地質圖時還是以開挖面的露頭連線為主。旗山斷層影響帶的部分,旗山斷層的剪切帶 A 的位置大致與斷層影響帶的下邊界相同,下盤的斷層影響帶厚度比上盤的來的厚,上盤約有 45 公尺,下盤約有 60 公尺,調查結果顯示,剪切帶 A、B 與 C 皆可在國道三號高架橋的兩側找到相對應的剪切帶,調查結果剪切帶 A 和 B 向東北方的延伸情況良好,而剪切帶 C 向西南方的延續性較佳,剪切帶 D 出露於旗山斷層的上盤影響帶中真厚約 3 公尺,但在開挖的東側立面中並未發現。

關於龍船斷層的調查部分,在泥岩之中由於沒有指準層,本研究無法判斷層位的落差,在無定年的情況下,本研究無法得知斷層的上下盤是否有年代上的差異,因此本研究比較前人研究的斷層跡,並藉由觀察剪切帶的組構以及剪切帶的影響範圍判斷,在南勢湖地區,龍船斷層約在距離旗山主斷層帶300公尺的位置,但並未找到斷層下界的位置,經換算後龍船斷層帶的真厚最少有67公尺。

中寮隧道北端地質圖

本研究整理野外的調查結果後,將岩層與剪切面的位態資料置於本研究製作的地形陰影圖上,UAV攝影測量所得的數值地形可達1米等級,但圖中的等高線為方便辨識,等高線的間距為5米。地質圖中岩性以旗山斷層為界,上盤以砂岩和砂頁互層為主,大致上可分為頁岩層夾薄砂岩(Unit A)、厚層砂岩夾薄頁岩(Unit B)和厚層砂岩與砂頁互層(Unit C),旗山斷層下盤以泥岩夾薄層風暴砂岩為主,在剪切帶 A 的上下盤以及剪切帶 B 的上下盤其岩層岩性變化不大,故同屬Unit D(圖 84),但岩層的位態在剪切帶 B 的上下盤有明顯的變化。

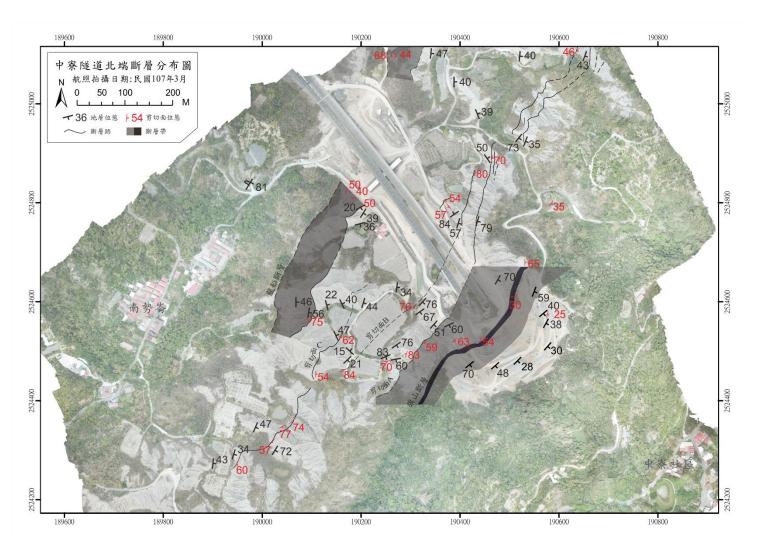


圖 82 中寮隧道北端斷層分布圖。

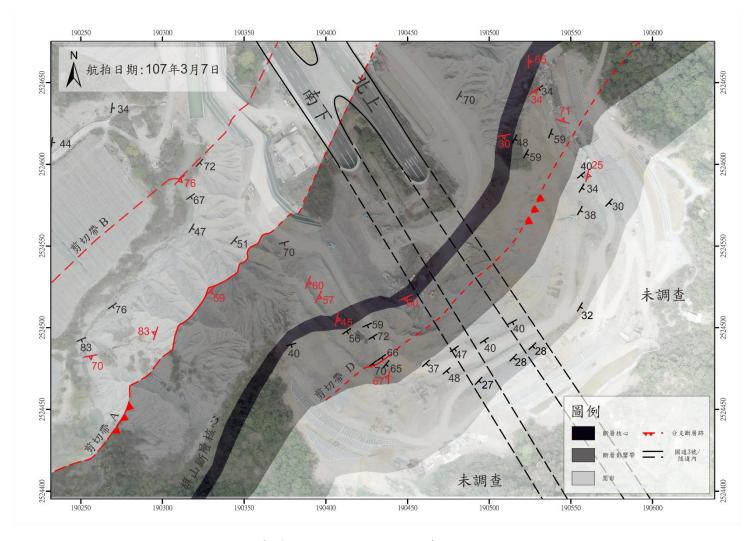


圖 83 中寮隧道北端斷層分布放大圖。

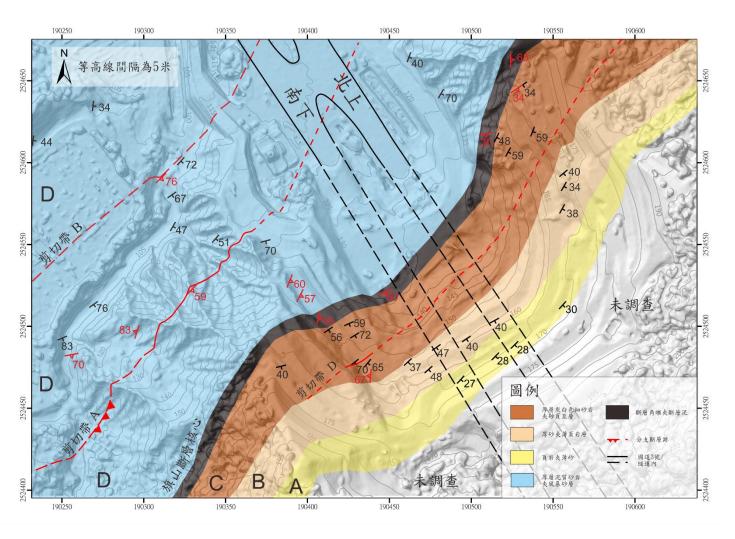


圖 84 中寮隧道北端地質圖。

5-3 隧道裂隙測繪成果

中寮隧道整體來說有稍微的彎曲,但是由於本研究主要著眼於隧道的北端,長度約140公尺的範圍內,故本研究認為該長度在南下隧道入口、北上出口兩側的牆壁大致呈現平行且同樣朝向西北方向,在描述壁面的部分,本研究統一以面向西北方來判斷左側與右側,以中寮隧道北端洞口的襯砌為N001與S001,北上隧道出口的位置約在國道三號378K+825公尺處,南下隧道入口的位置約在378K+795公尺處,兩隧道口位置大約相差30公尺。

中寮隧道裂隙與壁面之間的相對關係,主要可歸納為縱向裂隙、 垂直裂隙、斜向裂隙、地面裂隙、環向施工縫(Construction joint)的開 裂以及消防設施的毀壞,但由於隧道內光源不佳,再加上行車安全考 量無法使用閃光燈,因此對於隧道頂拱的觀察部分較難進行完整的測 繪。

本研究利用影像測繪技術來製作隧道的正射影像,照片的拍攝日期為民國 107 年 2 月 08 日。影像完成後將隧道的抬升情形、裂隙的延伸狀況、裂縫是否有開口、消防設施的毀壞狀況和隧道壁面是否滲水紀錄下來。隧道中滲水的原因為襯砌上防水膜的破裂,導致雨水下滲岩層時會滲入隧道之中,故隧道的滲水與否也是個隧道襯砌破裂的指標。

5-3-1 隧道的變形與襯砌裂隙

在中寮隧道北端北上隧道口,約 N005 至 N009 的位置處隧道擁有最大的變形量,在北端南下隧道口,最大的變形位置在 S009 至 S013處,本研究簡稱其為隧道毀壞嚴重處。為了估算裂隙與隧道毀壞的位置,本研究利用皮尺來量測水平移動的距離,經過比對國道 3 號378K+880 公尺處大約等於北上隧道的 N007 與 N008 的交界,而378K+899 公尺處大約等於南下隧道的 S013 與 S014 的交界。

在測量維修步道的累積抬升量方面,本研究以皮尺量測隧道中未變形的人造物,再比較正射影像中被抬升的變形步道與人造物的相對大小,來估算累積的抬升量,由西到東分別為南下左側(Southbound left)約 104.6 公分、南下右側(Southbound right)約 84.9 公分、北上左側(Northbound left)約 108.5 公分、北上右側(Northbound right)約 103.7公分,除了南下右側外,步道的累積抬升量約在 105 公分左右並無太大差異。

在北上隧道中本研究發現 N001 至 N005 襯砌上的裂隙多數有傾向東南方的現象,從 N006 開始出現有裂隙傾向西北方的現象,同樣的在南下隧道的 S010 左側也可以看到,在同一襯砌上也有出現傾向不同方向的裂隙延伸至維修步道(圖 85),此現象可能指示了在 N006 與 S010 下方有一向上推擠之塊體或地質構造。

在 N007 至 N010 中大部分的裂隙為向北傾,維修步道與裂隙的 夾角在60~70°之間。

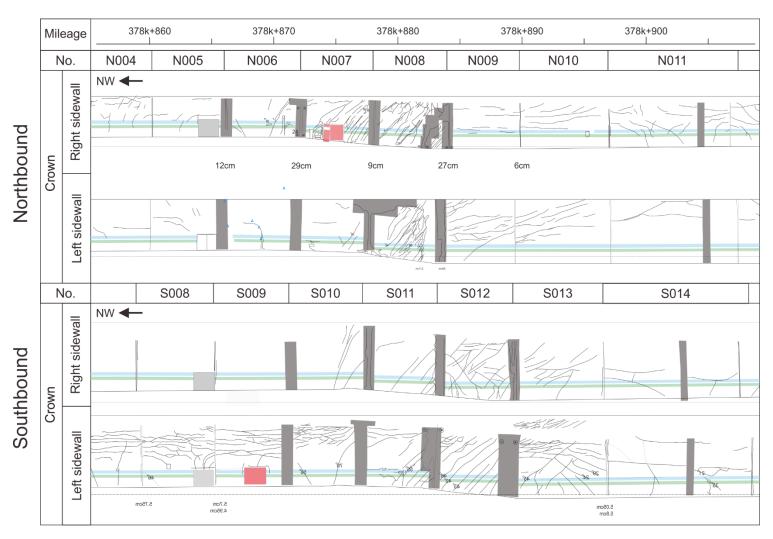


圖 85 中寮隧道北端北上、南下損壞嚴重區域測繪比較圖。

5-3-2 現地觀察

(1)北上端

在 N005 與 N006 的施工縫,在隧道襯砌的左側有明顯的水痕(圖 86)以及襯砌油漆剝落的現象,顯示此處之防水膜已有裂隙產生。

在 N007 的右側,本研究可以看到消防栓的外在鐵箱以及襯砌都有被破壞,在消防栓與襯砌的交界,消防栓有被不均匀的彎曲的現象 (圖 87),可能指示了消防栓有受到由下而上的擠壓,進而在消防栓下方產生應力集中而毀壞。

在 N008 左側的裂隙,本研究看到了未被填補的裂隙 A(圖 88), 顯示該裂隙是近期所形成,裂隙 A 屬於垂直裂隙,大約延伸至隧道的 肩部但並未形成環狀裂隙,縫隙最寬大約有 2.7 公分為張裂所形成的 裂隙,在裂隙 A 的右側有許多的斜向裂隙,但大部分的裂隙有停止於 裂隙 A 的現象,經過量測,北上隧道 N008 左側步道的坡度大約在8° 左右。

從較遠的距離來觀察隧道被毀壞嚴重的部分(圖 89),本研究可以看到 N009、N008、 N007 和 N006 襯砌之間皆有相對的位移,環向施工縫皆已被錯位,可以看出 N006 到 N008 襯砌整體來說皆有相對被抬升的現象,從圖 7 本研究可以看出來,隧道的襯砌也有被抬升的現象,而非只有地板的部分有被抬起。

在 N011 的襯砌上非接縫的位置,本研究看到隧道的左右兩側與頂拱皆有被鐵板所固定,本研究認為有環狀裂隙的產生(圖 90)。位於 N014 到 N015,有少許的裂隙在頂拱產生(圖 91),所造成的頂拱毀壞程度不大。



圖 86 N006 左側的滲水位置。可觀察到地下水入滲至隧道內所留下的水痕。



圖 87 N007 右側的裂隙。襯砌有明顯受到擠壓的痕跡,消防栓亦因受到來自下方的擠壓而產生拱彎變形(如藍框內所示)。



圖 88 N008 左側的裂隙。可以看到未填補的開裂裂隙,且此襯砌的斜向裂隙大部分停止於垂直裂隙 A。



圖 89 N006 至 N009 被抬升的襯砌。位於 N006 至 N009, 隧道的襯砌 也有被抬升的現象,而非只有地板的部分有被抬起。



圖 90 N011 的環向裂隙。大圖位於襯砌的左側、小圖位於襯砌的右側, 裂隙與環向施工縫平行且在隧道的兩側與頂拱皆有補強。



圖 91 N014 到 N015 頂拱的縱向裂隙。所造成的頂拱毀壞不明顯。

(2)南下端

在 S012 至 S013 的左側,本研究可以看到裂隙產生於 S012 與 S013 的交界且沿伸至頂拱(圖 92),裂隙呈現放射狀的分布,本研究 認為裂隙可能是由於隧道毀壞處的中段襯砌(S011、S012)被抬起,並 擠壓 S013 的頂拱與肩部所導致。

在 S011 的襯砌上,本研究可以觀察到襯砌的裂隙有經過牆壁上的儀器盒邊緣(圖 93),還有裂隙的上半部有一點覆蓋下半部的現象,以及儀器盒有受到拱彎(Buckling)的現象,從拱彎的方向本研究可以推測應力的方向為垂直地表的方向。

在大約 S010 至 S011 的地方,本研究可以看到南下隧道的步道,由於受到抬升或者側向推擠作用而抬起(圖 94),在靠近洞口的步道,被抬升的高度較為一致,靠近一點來看(圖 95),本研究可以看到在靠近塑膠水管的位置,步道的隆起在兩邊都有,黑色箭頭所指的裂縫可以發現,裂縫有一些覆蓋下方水泥的現象。在 S011 襯砌的右側,本研究在裂隙的延伸線上,發現露出的水泥中有顆粒受剪切後,斷面十分平整,故本研究判斷該裂隙為剪力裂隙(圖 96)。

在 S010 至 S011 之間的路面曾經出現裂痕,但在本研究進入隧道調查時,並未發現柏油路面有毀壞的現象,因此只能從照片來觀察路面(圖 97),從照片中本研究可以看到裂隙延伸的方向大致垂直於車子行徑的方向。

隧道的頂拱有產生縱向的裂隙,在 S003、S006~S007 皆有發現,但是毀壞頂拱的情形並不如 S013 來的嚴重(圖 98)。在 S014 的襯砌本研究可以看到鐵板的補強位於襯砌的左側、右側與頂拱上,顯示此處有環狀裂隙的生成(圖 99)。



圖 92 S010 至 S013 左側的裂隙。紅色箭頭所指為直接產生於隧道肩部的裂隙。

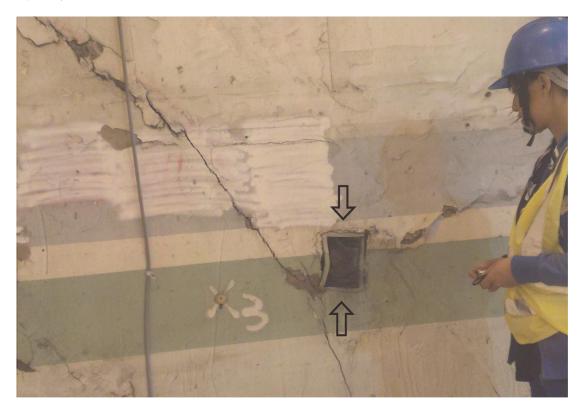


圖 93 S011 左側受壓的鐵盒。位置同圖 102 紅框內,由拱彎的鐵製儀器盒可以看出應力的擠壓方向為垂直地表,如黑色箭頭所示。



圖 94 S010 至 S012 右側的裂隙。可以看到在 S012 處右側的牆壁產生出共軛狀的裂隙。



圖 95 S010 右側的步道。黑色空心箭頭所指位置上方水泥有覆蓋下方的現象。



圖 96 S011 右側的剪力裂隙。由被剪切的顆粒以及不寬的縫隙,判斷此剪力裂隙。



圖 97 道路上填補前之裂隙。位置大約位於 S010 與 S011 之間。 (本照片由台灣世曦提供)



圖 98 S006 至 S007 在頂拱的裂隙。



圖 99 S014 的環向裂隙。裂隙與環向施工縫平行且在隧道的兩側與頂 拱皆有以鐵板補強。

六、討論

6-1 隧道毀壞形貌與周遭地質關係之探討

比較過去與現在的照片後,可以發現十幾年間隧道的抬升側位於靠近出口處,南下隧道約378.9公里處,2004年時雖然路面與牆壁已產生裂痕,但步道尚未被抬起,2013年時北上隧道約378K+860處,步道已經有被抬起的現象(圖100),為了釐清隧道抬升的原因,本小節將結合隧道變位的資料來討論隧道外的地質狀況與隧道變形的現地情形。

(1)地質條件相關討論

本次研究中發現到,在旗山斷層的上盤與下盤皆有出現受斷層剪切作用的影響帶,斷層上盤的影響帶有比斷層下盤窄的現象,在斷層上盤的影響帶中以砂岩與砂頁互層為主。

根據旗山斷層的定義,本研究將旗山斷層斷層核心的位置訂於厚層泥岩與砂岩層的交界,然後根據本研究的調查,旗山斷層屬於含右移分量的逆衝斷層。在本研究將隧道破壞與斷層位置疊合正射影像後,發現到隧道路面被抬升的位置(或是隧道毀壞嚴重處)與旗山斷層的斷層核心位置有所重疊 (圖 101)。在襯砌 N011 與 S014 的位置,本研究觀察到環型裂縫的存在,而且該裂縫與旗山斷層上盤的剪切帶 D 位置有近乎重疊的現象。

在旗山斷層核心以及旗山斷層上盤影響帶中有發現正移形式的 剪切作用,顯示隧道毀壞的模式與野外露頭的運動有關。

(2)與隧道變位資料比較

參考由台灣世曦所提供的隧道調查報告,他們使用光達3維雷射掃描儀來獲取隧道的三維模形,進一步進行隧道的變位分析,施測時間為2017年8月與12月,斷面所在的位置在隧道毀壞嚴重處的附近,圖102a1到圖102a4為北上隧道的斷面,位置分別在378K+863、883、903、923公尺處,圖102b1到圖102b4為南下隧道的斷面,位置分別在378K+871、891、911、931公尺處,斷面所面向的方向為里程增加的方向,也就是隧道斷面面向東南方。

從隧道變位的斷面來看,四個月的期間,北上隧道毀壞嚴重處的兩側皆有內縮的現象但幅度皆不大,斷面 2 的西側肩部有些微的塌陷, 東側有些微的膨脹,斷面 3 可以看到隧道拱形底部的部分有西高東低的現象,應該是由於被抬升的維修步道有不均勻抬升的現象,斷面 4 的兩側肩部皆有些微的向內縮,斷面 5 有明顯的塌縮,最大量位於頂拱有 45 公厘,前 3 個斷面的頂拱與地面距離約 7.7 公尺,斷面 5 約為 6.83 公尺。

在南下隧道,斷面4的兩側肩部有稍微的向外膨脹,斷面5沒有明顯的變化,斷面6有明顯的受到壓縮,最大內縮量位於西側的肩部有33公厘,斷面7有稍微的受到壓縮,4個斷面的頂拱與地面距離分別為約7.4公尺、約7.0公尺、約6.7公尺和約7.1公尺。

繼張李群 (2014)的研究後,中寮隧道內以及周遭地區還是有持續受到抬升的現象,在比較隧道毀壞嚴重處附近的隧道變位情形後可以發現,在北上隧道的斷面 2 到 4 以及南下隧道的斷面 4、5 的隧道變位不大,表示隧道在 378K+863~378K+903 公尺左右的隧道襯砌有被抬升但壓縮量小的現象,在北上隧道的斷面 5 與南下隧道的斷面 6,也就是大約在 378K+911~378K+923 公尺左右隧道襯砌有明顯的內

縮現象,在南下隧道的斷面7,大約在378K+931公尺處的隧道變位 又回到相對穩定的狀態。

將隧道變位資料對比本研究地質調查的結果,本研究認為隧道 378K+911~378K+923 公尺間隧道內縮的現象可能與隧道頂拱上方的 荷重有關,如本小節在地質條件的討論,隧道毀壞嚴重處的位置大約 與旗山斷層主斷層的位置有重疊,約在 378K+860~378K+891 公尺的位置,也就是說內縮的現象大約出現在旗山斷層上盤的位置,由厚層 砂岩夾薄頁岩所組成,因此本研究認為位於斷層下盤泥岩中,隧道的可移動性較大、隧道變位較小,反之,位於斷層上盤的部分有可移動性較小、隧道變位較大的現象。

(3)隧道裂隙成因之討論

從隧道現地的觀察中,本研究觀察到襯砌在垂直地表方向有被擠壓的痕跡,顯示隧道並非與隧道外的岩層同時的被抬起,而是由隧道下方的結構物或地質構造向上頂起所造成。在靠近隧道北端出口處,被抬起的步道並沒有形成第二次的隆起,因此本研究推測隧道是被均勻的抬起。在N006與S010襯砌的位置,裂隙呈現輻射狀分布,判斷為路面向上抬升而擠壓襯砌所產生。

本研究所觀察的 140 公尺內, 裂隙的種類以斜向裂隙與縱向裂隙為主,多數的裂隙發展於路面或著環狀施工縫, 少部分的裂隙發展於消防栓, 隧道觀砌的剝落出現在隧道毀壞嚴重處的頂拱處(S012~S013), 整體而言隧道觀砌並沒有受到明顯的錯動, 而是以路面抬升所造成的破壞為主。

隧道的路面被抬升的位置,也就是隧道毀壞嚴重處與旗山斷層的斷層核心的位置有重疊,在旗山斷層上盤剪切帶 D 的位置,同樣可以對應到位於 S014、N011 的環狀裂隙,故本研究認為隧道的抬升與破壞和斷層帶有關。



圖 100 過去與現在隧道毀壞處的比較。(a)(b)南下隧道約 378.9 公里處,黑色箭頭所指為同一位置;(c)(d)北上隧道約 378K+860處,紅色箭頭所指為同一位置。

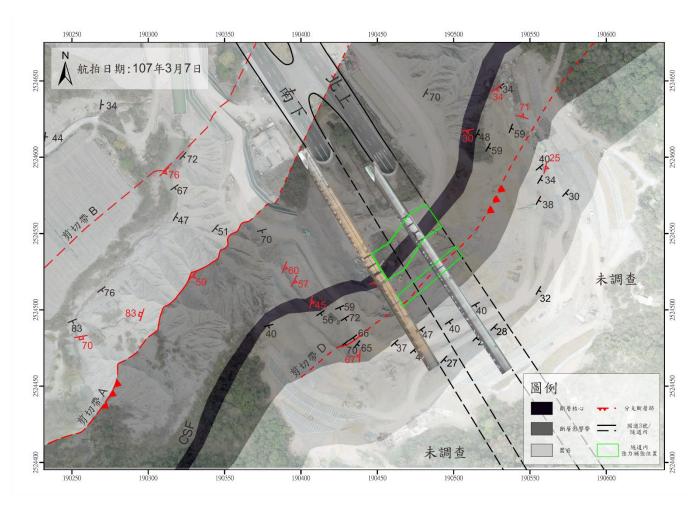


圖 101 隧道毀壞嚴重處與斷層分布比較圖。底圖為旗山斷層影響圖,綠框所示為隧道毀壞嚴重處(上)以及環狀裂隙 (下)的所在位置。

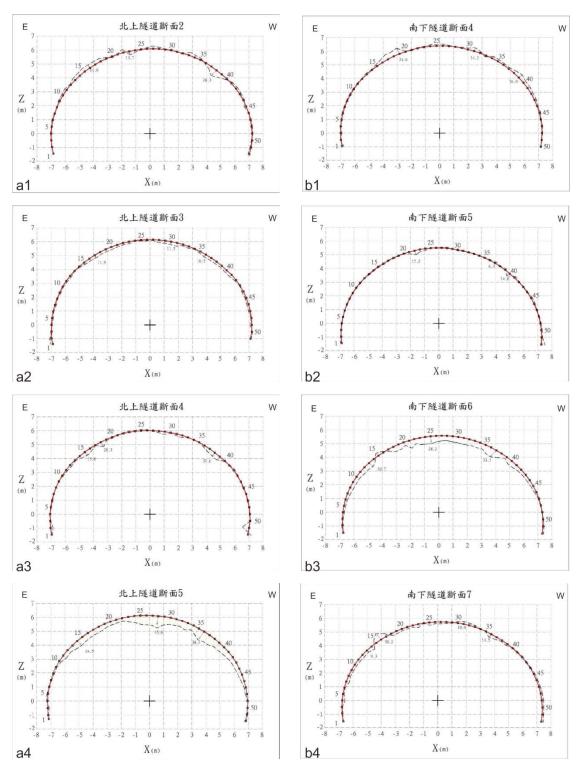


圖 102 隧道斷面比較圖。(a1)~(a4)北上隧道斷面 2 到 5,分別位於 378k+863、378k+883、378k+903 與 378k+923 處;(b1)~(b4)南下隧 道斷面 4 到 7,分別位於 378k+871、378k+891、378k+911 與 378k+931 處(圖引自台灣世曦未發表調查報告,2017)。

6-2 斷層剪切帶分布與地表速度場之關係

從地層的層位來看,晚中新世的烏山層沿著旗山斷層逆衝到早上新世的古亭坑層上,從年代與岩性上皆有明顯的不同,雖然在旗山斷層核心與旗山斷層上盤影響帶中亦有發現正移剪切作用的存在,但本研究決定參考層位的變化,將旗山斷層繪製為逆斷層。

本研究於隧道開挖面的西側切了一個 AA'的地質剖面,剖面位置請參考圖 103,由於此區域以斷層為主要的地質構造,本研究使用急折法繪製剖面 (圖 106),地形高程取自 107 年 05 月本研究所製作之 DSM。在 AA'剖面中可以看到旗山斷層的剪切帶 A、B 之間的岩層傾角,在剪切帶 B下盤的岩層傾角較緩,剪切帶 A 上盤的岩層傾角較陡,可能表示旗山斷層的分支在逆衝時,有階段性的使得岩層傾角度的增加,逆衝過程可能依照剪切帶 B、A 的順序進行。

張李群 (2014)對中寮隧道口地表的位移進行研究,張李群以澎湖 S01R 測站為基準進行靜態測量,再以測區內 GPS2 測點為對比進行水準及導線的量測(圖 103)。本研究為了方便觀測小區域的地表速度場與研究區域內地質構造的關聯,本研究去除了橋體的測量點,並以 龍船斷層下盤地塊為相對不動的點,將速度場改為以龍船斷層下盤的平均速度為基準(垂直斷層方向速度每年 35.8 公厘、平行斷層方向速度每年 41.7 公厘、鉛直方向速度每年 32 公厘),將速度場相減後投影至垂直與平行旗山斷層方向以及鉛直方向(圖 104),投影結果如圖 105 所示,縱軸為速度(mm/yr),橫軸為測量點投影到剖面後與 Q019 的距離(m),圖 105 中虛線分別表示龍船斷層下邊界與旗山斷層核心位置。

將水平速度與鉛直速度相加後疊合本研究所繪製的 AA'地質剖面,以速度場的資料來看, 龍船斷層的上下盤間為壓縮的應力環境,

旗山斷層的上下盤間為伸張的應力環境, 龍船斷層和旗山斷層之間的地塊, 在垂直斷層與鉛直的速度明顯高於兩側, 旗山斷層上盤的速度向量相對於龍船斷層下盤有側向擠壓與向下擠壓的分量, 旗山斷層上盤地塊相對的側向擠壓每年約 18 公厘, 但仍不足以造成兩斷層間的高抬升量與高位移量。

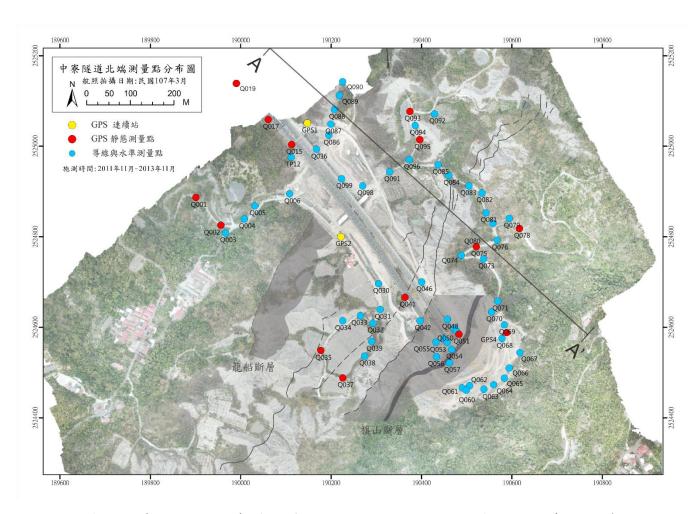


圖 103 中寮隧道北端測量點分布圖。黑色實線代表 AA'剖面的位置。測量點位置來自張李群 (2014)。

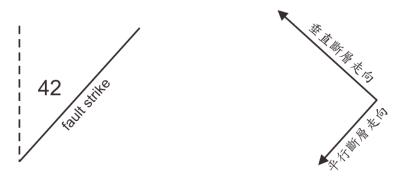


圖 104 水平速度投影到垂直與平行斷層走向示意圖。斷層走向為 042。

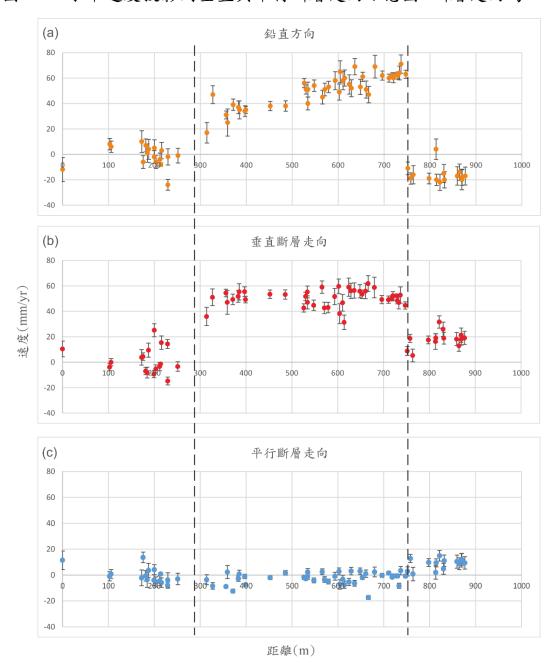


圖 105 速度各分量比較圖。(a)垂直於斷層走向;(b)平行於斷層走向; (c)鉛直於地表。測量資料來自於張李群 (2014)。

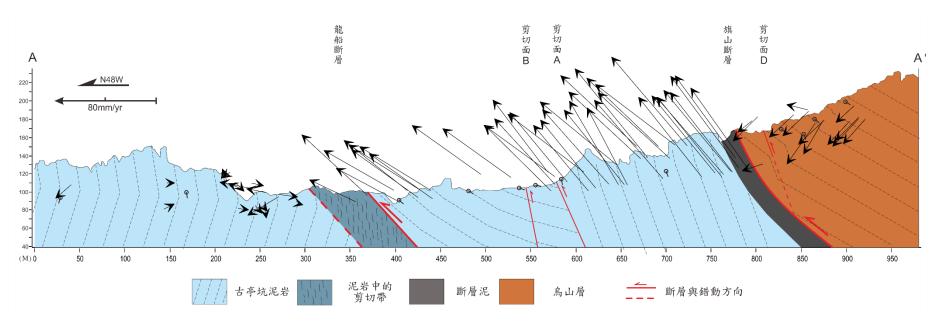


圖 106 AA'地質剖面疊合投影後之小區域地表速度場。

6-3 可能的地質模型

在台灣的西南外海所發現的泥貫入體影響範圍寬廣,形成海上綿延數公里且互相平行排列的背斜構造,而這些背斜構造被認為有延伸至陸地上之可能性(圖 107),例如壽山、鳳山背斜、中洲背斜、漯底山等(Sun et al., 2010; 黃偉倫, 1995; 莊惠如, 2006; 陳松春, 2013)。

在旗山斷層沿線的深水地區有許多的泥火山與泥盆,如新養女湖、 鳥山頂等,其中此地區的泥火山所噴出的氣體以微生物氣體 (Microbial gas)為主,為生物的殼體在經過高溫的熱熟成後轉變為諸如 甲烷的可燃性氣體,You et al. (2004)曾對旗山斷層附近泥火山噴出的 氣體進行分析,發現二氧化碳中的重氧同位素(O^{18})含量較高,You 認 為該現象可以用泥岩會在超過 60° C的環境下進行脫水作用 (Dehydration)來說明(圖 108)。

Sung et al. (2010)為了了解田寮地區地塊的變行行為,於中寮山、雞南山附近設置了 GPS 連續觀測站來觀測龍船斷層與旗山斷層之間地塊的運動(圖 109),並透過泥火山的排氣量來估計烏山頂泥火山的活動性,透過交叉相關性分析(Cross-correlation)發現兩斷層間的地塊活動性與泥火山的活動有高度的相關性。通過觀察地電阻剖面,Sung認為烏山頂泥火山下的泥漿庫有沿著旗山斷層向下延伸的現象(圖 110)。

本研究於旗山斷層下盤的泥岩中觀察到,受剪切作用的泥岩其顏色會從青灰色轉變為黑色,在 Casciello et al. (2011)的研究中,他們發現膨潤石在泥質的斷層剪切帶中有伊利石化且集中於剪切面的現象,經伊利石化的伊利石-膨潤石混層泥岩顏色會比一般的泥岩深,他們亦認為沿泥岩中剪切方向的塑性變形可能與膨潤石的脫水作用有關。

綜合前人研究所述,泥岩在受到深埋或斷層作用時會產生脫水的特性,在排水不良的情況下,泥岩的脫水會在岩層中產生超額孔細水壓,泥岩也容易因有效應力的下降而產生液化或著塑性應變,在解壓的狀態下,泥漿可能沿著裂隙噴出形成泥火山。

根據本研究對於中寮隧道北口鄰近區域斷層的分布與岩層的調查,本研究認為研究區域內的地質構造以斷層作用為主,隧道中所觀察到的裂隙分布與被擠壓而破壞的襯砌顯示,隧道的損毀源自於下方向上推擠的岩層所導致,在旗山斷層帶中亦有正移斷層的出現,顯示旗山斷層的下盤相對於上盤有抬升的現象,隧道毀壞處的位置與旗山斷層核心位置重合,顯示地層移動的邊界位於旗山斷層的核心。

從大區域的速度場來看, 旗山斷層與龍船斷層之間的地塊為一個相對被擠壓的環境(圖 6), 因此本研究認為若以旗山斷層帶內的斷層泥為阻水層, 在厚層泥岩排水不易的環境下, 岩層中的孔隙水會在兩斷層之間的地塊中產生超額孔隙水壓, 使得岩層間的有效應力下降而產生塑性應變, 進而造成兩斷層間的地塊相對於龍船斷層下盤與旗山斷層上盤有較高位移量, 如圖 111 所示。

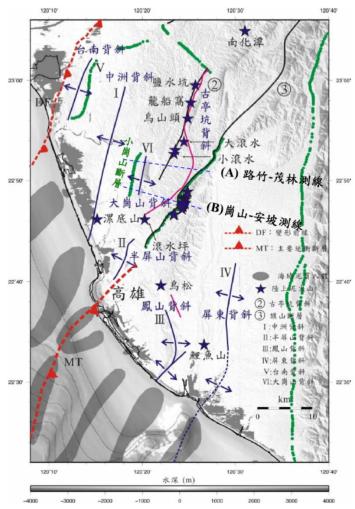


圖 107 臺灣南部陸上泥火山及背斜構造分布圖。(圖引自陳松春, 2013)。

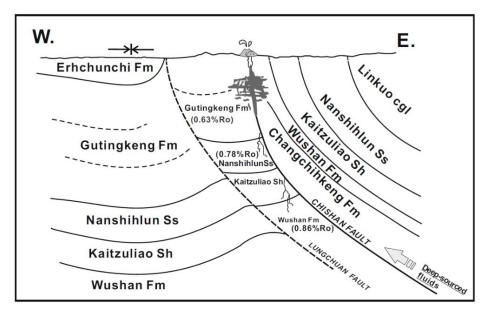


圖 108 烏山頂附近地質剖面圖(圖引自 Sun et al., 2010)。

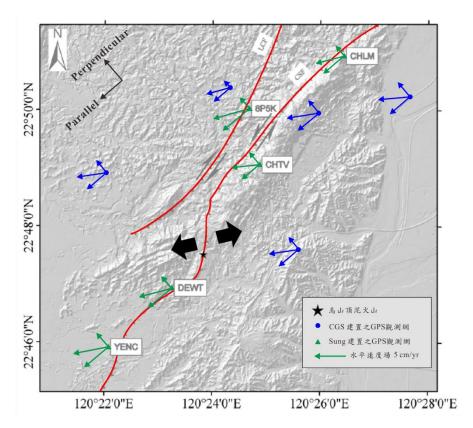


圖 109 旗山斷層附近的 GPS 速度場。星號表示烏山頂泥火山所在位置(改繪自 Sung et al., 2010)。

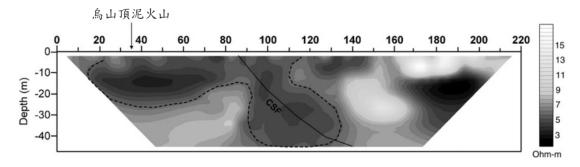


圖 110 烏山頂鄰近之地電阻剖面。剖面位置同圖 109 星號處,剖面長度為 220 公尺(圖引自 Sung et al., 2010)。

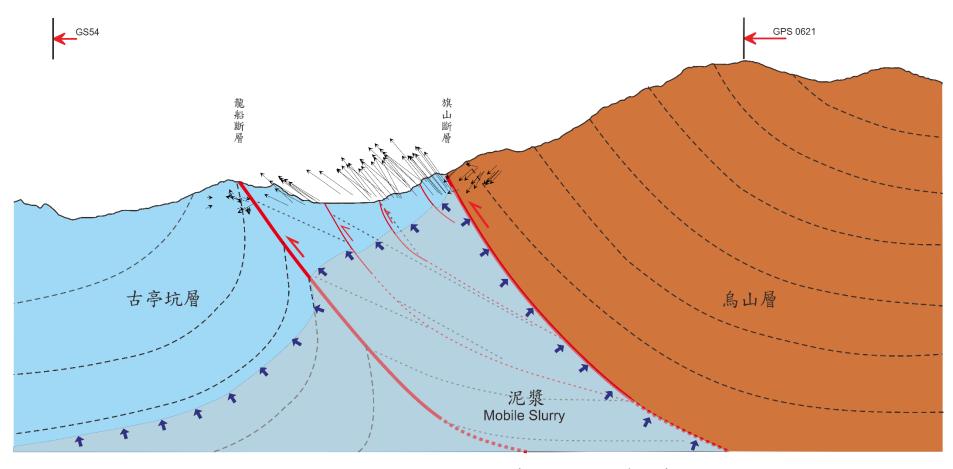


圖 111 龍船斷層與旗山斷層間泥漿向上推擠模式示意圖。

七、結論與建議

本研究經調查後研判,在高雄南勢湖地區旗山斷層帶的斷層核心厚度約6公尺,位態約為042°/48°S且斷層擦痕 rake 約為70°S,斷層影響帶的上盤厚度約有45公尺、下盤約有60公尺,在下盤影響帶中可發現三條由黑色斷層泥所組成的剪切帶,從岩層的分佈來看,岩層在越靠近旗山斷層核心有越陡的趨勢。龍船斷層的厚度至少有67公尺,斷層帶中以受剪切作用的斷層泥為主。

在 N007 與 S011 襯砌的位置有受到鉛直方向的擠壓而造成拱彎的消防栓存在,說明隧道毀壞處的前段曾經受到鉛直方向的擠壓應力,從隧道變位的資料來看,持續內縮的襯砌位於隧道毀壞處的後段,以及在 S013 的頂拱發現了放射狀的裂隙,顯示隧道毀壞處前段與中段襯砌在抬升後有向後方旋轉並擠壓 S013 的頂拱,故本研究認為隧道毀壞處裂隙的產生與路面的抬升以及襯砌的旋轉有關。

隧道中隧道毀壞嚴重處的所在位置與旗山斷層重疊,且 S013 襯砌中環狀裂隙的位置亦與旗山斷層上盤的剪切帶 D 位置重合,故本研究推測隧道的毀壞與斷層帶有關。

本研究認為以旗山斷層帶為阻水層,在厚層泥岩排水不易且在受擠壓的環境下,旗山斷層與龍船斷層之間的地塊中可能產生超額孔隙水壓,使得岩層間的有效應力下降而產生塑性應變或著泥岩的液化,進一步形成向上推擠的力量,造成兩斷層間地塊的高位移量。未來的研究方向建議可以利用大地電磁或地電阻探勘來研究該地塊下方是否有泥漿存在。

八、參考文獻

英文文獻

- Berg, S. S. and Skar, T., "Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah", Journal of Structural Geology, Vol. 27(10), pp. 1803-1822, 2005.
- Billi, A., Salvini, F. and Storti, F., "The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability", <u>Journal of Structural Geology</u>, **Vol. 25(11)**, pp. 1779-1794, 2003.
- 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.
- 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)", <u>Bollettino della Società Geologica Italiana</u>, **Vol. 1(2)**, pp. 659-667, 2002.
- Chen, Z., Shi, C., Li, T. and Yuan, Y., "Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes", Natural Hazards, Vol. 61(2), pp. 387-401, 2011.
- Chester, J. S., Chester, F. M. and Kronenberg, A. K., "Fracture surface energy of the Punchbowl fault, San Andreas system", <u>Nature</u>, **Vol. 437**(**7055**), pp. 133, 2005.
- Chiang, C. S., Yu, H. S. and Chou, Y. W., "Characteristics of the wedge-top depozone of the southern Taiwan foreland basin system", <u>Basin</u> Research, Vol. 16(1), pp. 65-78, 2004.

- Ching, K. E., Hsieh, M. L., Johnson, K. M., Chen, K. H., Rau, R. J. and Yang, M., "Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008", Journal of Geophysical Research, Vol. 116(B8), 2011.
- 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", <u>Earth-Science Reviews</u>, **Vol. 152**, pp. 70-87, 2016.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J. and Kluth, C. F., <u>Structural geology of rocks</u> and regions, John Wiley & Sons, 2011.
- Hu, J. C., Angelier, J. and Yu, S. B., "An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies", <u>Tectonophysics</u>, **Vol. 274**, pp. 145-169, 1997.
- Huang, S. T., Yang, K. M., Hung, J. H., Wu, J. C., Ting, H. H., Mei, W. W.,
 Hsu, S. H. and Lee, M., "Deformation front development at the northeast margin of the Tainan basin, Tainan–Kaohsiung area, Taiwan",
 Marine Geophysical Researches, Vol. 25(1-2), pp. 139-156, 2004.
- Kim, Y. S., Peacock, D. C. P. and Sanderson, D. J., "Fault damage zones", Journal of Structural Geology, Vol. 26(3), pp. 503-517, 2004.
- Lee, J. C., Chu, H. T., Angelier, J., Chan, Y. C., Hu, J. C., Lu, C. Y. and Rau, R. J., "Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw= 7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures", Journal of Structural Geology, Vol. 24(1), pp. 173-192, 2002.

- Lin, A., <u>Fossil earthquakes: The formation and preservation of</u> pseudotachylytes, Vol. 111, Springer, 2007.
- Maqbool, A. U. R., Moustafa, A. R., Dowidar, H. and Yousef, M., "Architecture of fault damage zones of normal faults, Gebel Ataqa area, Gulf of Suez rift, Egypt", Marine and Petroleum Geology, Vol. 77, pp. 43-53, 2016.
- Neuendorf, K. K., <u>Glossary of geology</u>, Springer Science & Business Media, 2005.
- Neumann, K. J., "Trends for digital aerial mapping cameras", <u>International</u>

 <u>Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial</u>

 Information Sciences, **Vol. 28**, pp. 551-554, 2008.
- Passchier, C. W. and Trouw, R. A., <u>Microtectonics</u>, Vol. 1, Springer Science & Business Media, 2005.
- 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", <u>Tectonophysics</u>, **Vol. 507(1-4)**, pp. 86-94, 2011.
- Roy, N. and Sarkar, R., "A Review of Seismic Damage of Mountain Tunnels and Probable Failure Mechanisms", <u>Geotechnical and Geological Engineering</u>, **Vol. 35(1)**, pp. 1-28, 2017.
- Sibson, R. H., "Fault rocks and fault mechanisms", <u>Journal of the Geological Society</u>, **Vol. 133(3)**, pp. 191-213, 1977.
- Sun, C. H., Chang, S. C., Kuo, C. L., Wu, J. C., Shao, P. H. and Oung, J. N., "Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry", <u>Journal of Asian Earth Sciences</u>, **Vol. 37(2)**, pp. 105-116, 2010.
- 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.

- Suppe, J., "Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan", Memoir of the Geological Society of China, Vol. 6, pp. 21-33, 1984.
- Topcon Position Systems, Inc., "Hiper V Operator's Manual", 2012.
- Wang, W. L., Wang, T. T., Su, J. J., Lin, C. H., Seng, C. R. and Huang, T.
 H., "Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake", <u>Tunnelling and Underground Space Technology</u>,
 Vol. 16, pp. 133-150, 2001.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A. and Wilkinson, B. E., <u>Elements of Photogrammetry: with applications in GIS</u>, Vol. 3, McGraw-Hill New York, 2000.
- Yashiro, K., KoJima, Y. and Shimizu, M., "Historical earthquake damage to tunnels in Japan in 2004 Niigataken earthquake", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 48(3), pp. 136-141, 2007.
- You, C. F., Gieskes, J. M., Lee, T., Yui, T. F. and Chen, H. W., "Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism", <u>Applied Geochemistry</u>, **Vol. 19(5)**, pp. 695-707, 2004.
- Yu, S. B., Chen, H. Y. and Kuo, L. C., "Velocity field of GPS stations in the Taiwan area", <u>Tectonophysics</u>, **Vol. 274(1-3)**, pp. 41-59, 1997.
- Yu, S. B., Kuo, L. C., Hsu, Y. J., Su, H. H., Liu, C. C., Hou, C. S., Lee, J. F., Lai, T. C., Liu, C. C. and Liu, C. L., "Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake", <u>Bulletin of the Seismological Society of America</u>, Vol. 91(5), pp. 995-1012, 2001.

中文文獻

- 大疆創新科技有限公司, Mavic Pro 使用者手册, 2016。
- 中國石油股份有限公司,<u>台灣西部地質圖,臺南圖幅(1:100,000)</u>,中國石油股份有限公司,1989。
- 王儂和過靜珺,現代普通測量學,五南圖書出版股份有限公司,2003。
- 古兆禎,「臺灣地形發育與地殼運動之關係」,中國地質學會會刊,8, 102-105頁,1965。
- 吉田要,高雄州旗山油田調查報告,台灣總督府殖產局,1932。
- 吳榮章和梅文威,「高雄縣旗山至鳳山地區生物地層與古沉積環境研究」,經濟部中央地質調查所特刊,**6**,263-295頁,1992。
- 吳榮章和梅文威,「高雄縣旗山至鳳山地區新第三紀及第四紀地層之生物地層與古沉積環境」,<u>探採研究彙報</u>,**8**,58-75頁,1985。
- 宋國城,陳力和陳彥傑,「有關旗山斷層的一些新觀察」,<u>地質</u>,**23(3)**, 31-40頁,2004。
- 李佳翰,「山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究」,國立臺北科技大學, 博士論文,2013。
- 李德河,紀雲曜和田坤國,「泥岩之基本特性及泥岩邊坡保護措施」, 地工技術雜誌,48,35-47頁,1994。
- 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-旗山圖福,經濟部中央地質調查所,新北市中和區,2013。

- 林啟文,陳文山,劉彥求和陳柏村,「台灣東部與南部的活動斷層,二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書,旗山斷層」,經濟部中央地質調查所特刊,23,163-174頁,2009。
- 鳥居敬造,本間右京和淺岡隼太,「龍船附近地形及地質圖(1:15,000)」, 1930。
- 張吉佐和劉弘祥,<u>山岳隧道工程設計與實例手冊</u>,科技圖書股份有限公司,2001。
- 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」, 國立成功大學,碩士論文,2014。
- 莊惠如,「台灣西南海域泥貫入體分佈與構造活動之關係」,國立臺灣 大學,碩士論文,2006。
- 陳文山,台灣地質概論,中華民國地質學會,台北市,2016。
- 陳志雄,吳樂群和王源,「高雄地區旗山斷層兩側地層年代之探討」, 地質,**13**,37-56頁,1993。
- 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,博士論文,2013。
- 陳柏村,「旗山斷層南段變形特性研究」,國立成功大學,碩士論文, 2005。
- 陳柏村,林啟文,江婉綺,劉彥求和林慶偉,「台灣南部旗山斷層的構造特性研究」,經濟部中央地質調查所彙刊,22,63-98頁,2009。
- 黃偉倫,「台灣西南部海域泥貫入體之分佈與陸上諸背斜之關係及其 對沈積環境之影響」,國立台灣大學,碩士論文,1995。
- 黄華尉,湯凱佩,林文勇,劉至忠和鄭彩堂,<u>e-GPS即時動態定位系</u> 統座標轉換最佳化之研究,內政部國土測繪中心,2012。

- 葉家承,徐百輝,張子瑩,張陽郎,蘇文瑞和包正芬,「應用無人飛行 載具進行災害現場之調查—以高雄氣爆為例」,中國土木水利工程 學刊,27(3),223-229頁,2015。
- 趙荃敏,「利用大地測量及 PSInSAR 技術探討鳳山斷層之運動特性」, 國立成功大學,碩士論文,2016。
- 鄧屬予,臺灣地質系列第9號:臺灣的沉積岩,經濟部中央地質調查 所,臺北縣中和市,1997。
- 鄭宏祺,「臺灣西南部台南至屏東地區地質構造之研究」,國立中央大學,碩士論文,2000。
- 蘇柏軒,蕭宇伸,王傑民和陳樹群,「無人載具系統(UAS)航拍應於高精度製圖的可行性研究」,<u>社團法人中華水土保持學會 102 年度</u>年會,2013。
- 陳正勳,王泰典和黃燦輝,「山嶺隧道受震損害類型與原因之案例研究」,岩石力學與工程學報,**30**(1),45-57頁,2011。

附錄 A UAV 攝影測量原理

(1) 物與像的空間關係

數位相機透過玻璃透鏡組將地表物體所反射的可見光聚焦於傳感器之上,資料將會以 RBG 的形式輸出,反射光聚焦成像的空間稱為像空間(Image space),反射太陽光的地表物空間稱為物空間(Object space),透過針孔成像原理,本研究了解到物空間中的一點可以找到與之相對應的像空間中的一點,如圖 A1 中紅色框所示,UAV 攝影測量原理參考自 Wolf et al. (2000)。

(2)地面取樣距離

航高的選定除了安全的考量外還需考慮研究所需的地面取樣距離(Ground Sample Distance, GSD),其所代表的意義為相片中的一個像素(Pixel)實際上在物空間中所包含的大小,計算方法可用相似三角形法得到(Neumann, 2008)。

(3)相機內外方位參數

相機的內方位參數(Interior Orientation Parameters, IOPs)包含透視中心位置、焦距、透鏡畸變等。

相機的外方位參數(Exterior Orientation Parameters, EOPs)包含六個參數 $x \cdot y \cdot z \cdot \varphi \cdot \omega \cdot \kappa$,用以表示拍攝某張相片時相機在三維空間中的姿態, $x \cdot y \cdot z$ 表示相機的透視中心在空間中的位置, $\varphi \cdot \omega \cdot \kappa$ 表示相機在三維座標系中各軸的旋轉量,例如在 φ 和 $\omega = 0$ 時表示相機拍照時處於鉛直狀態。

在航空相片拍攝時,飛行載具所搭載的 GPS 與慣性量測單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)會負責紀錄每張相片的三維空間位置 與拍攝時的姿態。

(4)空中三角解算

假設在相片所涵蓋的物空間中,其中的任意點可以在相對應的像空間中找到對應的點(圖 A 2),且兩點會落在同一直線上,說明此狀態的等式稱為共線條件式(collinearity condition equation),而各個直線會交會於透視中心之上,也就是透鏡的位置(Lens position)。

假設物空間中的大地座標系統為 XYZ,於物空間中的點 A 以 (X_A,Y_A,Z_A) 表示,透視中心 L 的位置以 (X_L,Y_L,Z_L) 表示,其中航空照 片呈現傾斜(tilted),與三軸分別夾 φ 、 ω 、 κ 的旋轉量,假設透視中 心上與 XYZ 互相平行的座標系統為x'y'z',而未旋轉前垂直於航空照 片的座標系統為xyz,其關係可以一單位旋轉矩陣 M 表示:

 $m_{11} = \cos\varphi \cos\omega$

 $m_{12} = sin\omega \, sin\varphi \, cos\kappa + cos\omega \, sin\kappa$

 $m_{13} = -\cos\omega\sin\varphi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa$

 $m_{21} = -cos\varphi sin\kappa$

 $m_{22} = - sin\omega \sin\varphi \sin\kappa + cos\omega \cos\kappa$

 $m_{23} = \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa$

 $m_{31} = \sin \varphi$

 $m_{32} = -\sin\omega\cos\varphi$

 $m_{33} = \cos\omega \cos\varphi$

經旋轉過後的航空照片與透視中心、大地座標的相對關係如圖 A 2 所示,假設透視中心投影至相片中心的位置為 O ,而像空間中與 A 點相對應之 a 點和 O 點的 xyz 截距為 x'_a 、 y'_a 、 z'_a ,由相似三角形關係可得出下列關係式:

$$\frac{x'_{a}}{X_{A} - X_{L}} = \frac{y'_{a}}{Y_{A} - Y_{L}} = \frac{z'_{a}}{Z_{A} - Z_{L}}$$

亦可寫成

$$x'_{a} = \frac{X_{A} - X_{L}}{Z_{A} - Z_{L}} z'_{a}$$
, $y'_{a} = \frac{Y_{A} - Y_{L}}{Z_{A} - Z_{L}} z'_{a}$, $z'_{a} = \frac{Z_{A} - Z_{L}}{Z_{A} - Z_{L}} z'_{a}$

又因旋轉關係 x_a, y_a, z_a 可寫成方程式

$$\begin{aligned} x_a &= m_{11} x_a{'} + m_{12} y_a{'} + m_{13} z_a{'} \\ y_a &= m_{21} x_a{'} + m_{22} y_a{'} + m_{23} z_a{'} \\ z_a &= m_{31} x_a{'} + m_{32} y_a{'} + m_{33} z_a{'} \end{aligned}$$

將式(3)帶入式(4)的x'y'z'之中,並同除 $\frac{z'_a}{Z_a-Z_b}$ 可得:

$$\begin{aligned} x'_{a} &= \frac{m_{11}(X_{A} - X_{L}) + m_{12}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{13}(Z_{A} - Z_{L})}{m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})} z'_{a} \\ y'_{a} &= \frac{m_{21}(X_{A} - X_{L}) + m_{22}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{23}(Z_{A} - Z_{L})}{m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})} z'_{a} \end{aligned}$$

已知在像空間中 $z'_{\alpha} = -f$, $f = focal\ length$, 可得共線條件式:

$${x'}_a = -f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)}$$

$$y'_{a} = -f \frac{m_{21}(X_{A} - X_{L}) + m_{22}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{23}(Z_{A} - Z_{L})}{m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})}$$

已知相機外方位參數 X_L 、 Y_L 、 Z_L 、 φ 、 ω 、 κ 的情況下, $\chi x'_a$ 、 y'_a 為 a 點在x'y'座標上的截距,可由共線條件式得出 A 點位置 (X_A,Y_A,Z_A) 。

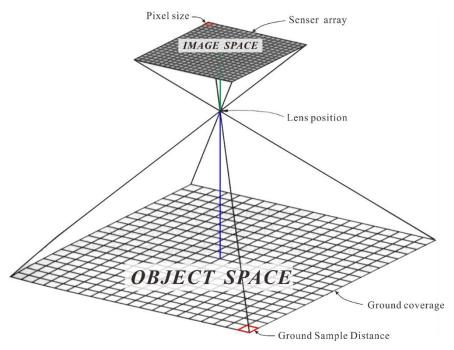


圖 A1 物空間與像空間關係之說明圖。綠色線的長度為焦距,藍色線的長度為航高,物空間中之方格大小等於地面取樣距離(GSD),像空間中之方格大小等於單一像素大小。

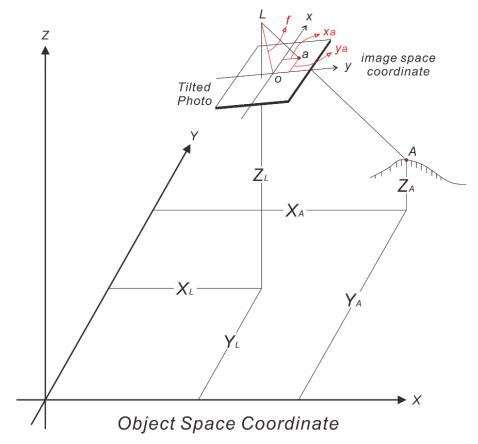


圖 A 2 空中三角測量原理示意圖。

附錄 B 即時動態定位方法

本研究使用即時動態定位系統(Virtual Reference Station RTK,以下簡稱 VRS-RTK)或稱電子化全球衛星即時動態定位系統(簡稱 e-GNSS)來進行地面控制點的測量作業,其優點在於單人單機即可進行作業且使用者無須架設固定站。

時至今日,內政部國土測繪中心已於全台包含外島地區設置了共78處衛星基站(圖B2),進行24小時的連續觀測,VRS-RTK的運作原理為將GPS接收器單點定位的大略座標透過網路上傳至國土測繪中心的處理中心,處理中心會藉由全台的連續觀測網資料內插出一個距離GPS接收器500公尺以內的虛擬RTK基站,再透過網路將符合GSM與NTRIP通訊協定的虛擬觀測資料回傳至GPS接收器,進一步進行RTK的觀測,由於VRS-RTK所進行的極短基線的觀測,所以於觀測網內並不受觀測距離限制(圖B3)。

本研究大地座標系統採用二度分帶 TWD97, GPS 接收器儀器選用 Topcon Hiper V 接收器(圖 B 1), 可同時接收 GPS 與 GLONASS 的 L1、L2 載波相位,在 VRS-RTK 的測量模式下,於大地座標系統上水平精度可達 10~20 公厘、高程精度可達 20~30 公厘 (摘寫自 Hiper V Operator's Manual, 2012),於手機網路可以到達的範圍內皆可使用。



圖 B 1TOPCON Hiper V 接收器。



圖 B 2 台灣本島及離島的 GPS 衛星連續觀測網位置分布圖 (圖引自內政部國土測繪中心,2012)。

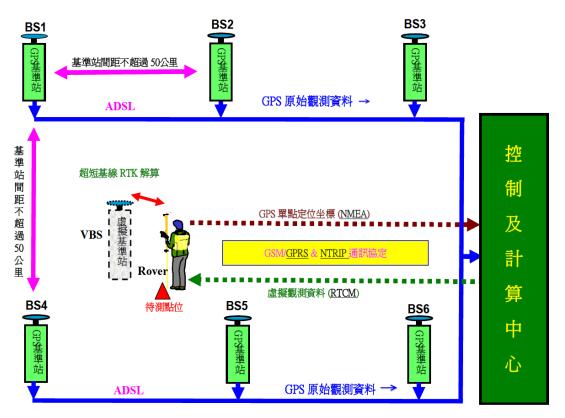


圖 B 3VBS-RTK(或 e-GNSS)運作原理示意圖(圖引自內政部國土測繪中心,2012)。