

臺灣西南部中寮隧道北端口旗山斷層帶 構造特性研究

邱奕維¹、藺于鈞¹、黃文正^{1,2}、顏一勤³、波玫琳²、李元希⁴

摘要

國道三號中寮隧道通過旗山斷層，隧道持續損壞，水平及垂直地殼速度梯度在此皆有急遽變化。本研究藉隧道改善工程之便，對開挖面及其鄰近的露頭進行調查。結果顯示，旗山斷層上盤為晚中新世烏山層，下盤屬上新世古亭坑層，位態約為 N46°E, 59°S，斷層帶約 100~140 公尺寬，核心帶在下盤緊貼旗山斷層，寬約 6 公尺，同時可觀察到塑性變形剪切帶及脆性的高角度剪切破裂，剪切破裂帶截切塑性剪切帶，出現位置與隧道變形最劇烈處幾何空間上大致吻合；開挖面可見數處溢水，西南邊約兩公里的斷層跡上，亦有泥火山活躍。因此推斷：隧道口旗山斷層跡鄰近處之速度急遽變化，可能因下方含水軟化的古亭坑層泥岩受東南側相對較硬的烏山層往西推擠及重力載荷作用，而使此軟化泥岩及地下水往上流動，迫使上覆的泥岩層沿旗山斷層隆升所致，這也是中寮隧道損壞的主因。

關鍵詞：旗山斷層、中寮隧道、泥岩變形

前言

國道 3 號中寮隧道北端口，自西元 1999 年底開通以來隧道結構持續變形損壞（圖 1），北上及南下的路面，皆於變形最劇烈處呈現北側相對抬升的現象。此變形劇烈處鄰近旗山斷層跡，旗山斷層為南傾帶有走向滑移分量的逆移斷層（陳柏村，2005），其錯移性質與現今隧道的變形明顯不同。2011 至 2013 年中寮隧道北口鄰近處的水準及 GPS 移動站測量結果（張李群，2014），也顯示旗山斷層跡兩側的地殼變動速度差異顯著（圖 3）。然而，缺乏直接對應隧道結構損毀的地質證據及地下地質資料，致使隧道變形的原因仍眾說紛紜尚未明瞭。

-
1. 國立中央大學應用地質研究所
 2. 國立中央大學地球科學系
 3. 顏一勤應用地質技師事務所
 4. 國立中正大學地球與環境科學系

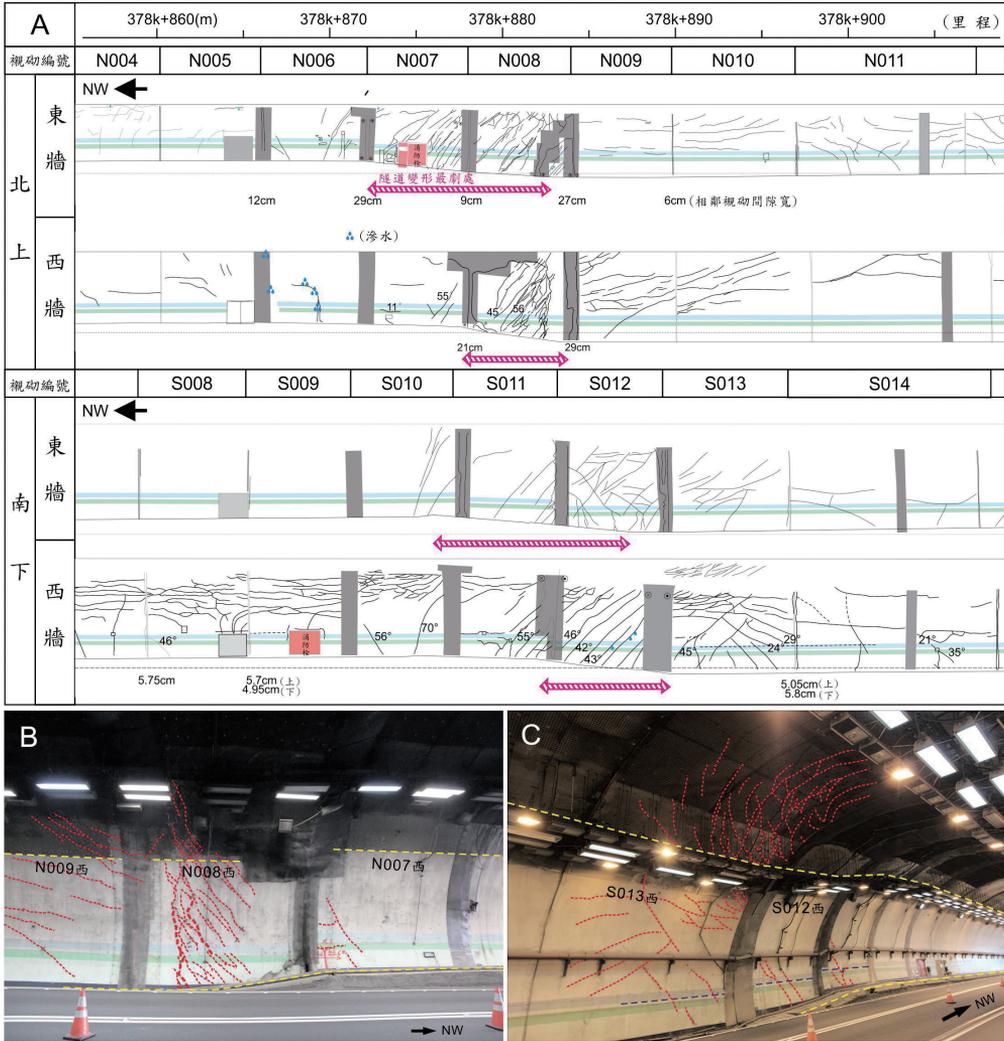


圖 1 隧道壁面結構毀損狀況。A：隧道壁面裂隙分布測繪結果圖，兩面西牆測繪圖，皆經鏡射處理。隧道變形最劇處高角度裂隙分佈密集，壁面視砌接合處也受到開張作用，壁面可發現滲水現象。(測繪時間為 2018 年 2 月)；B：北上東側隧道壁面裂隙分佈照，隧道結構變形最劇烈處，壁面的裂隙呈高角度，人行道明顯被抬升；C：南下西側隧道壁面裂隙分佈，人行道明顯被抬升。

西元 2017 年底中寮隧道改善工程，開始進行隧道壁拆除工程，工程期間隧道兩側的山壁出露大片的開挖面，本研究即藉此機會，對開挖面及其鄰近的露頭進行調查，詳盡記錄岩性變化及中視尺度的地質構造，並從蒐集到的地表露頭中的證據，配合區域地質，推斷隧道結構遭破壞、及本區地殼速度梯度急遽變化的可能原因，因此本研究的目的為：第一、詳盡記錄並分類開挖面中出露

的中視尺度構造，以推演其先後形成順序；第二、探討中視構造分布與隧道壁變形之關聯；第三、綜合本研究觀察的現象及區域地質，探討此區地表速度梯度急遽變化及隧道變形的可能原因。

區域地質背景

地形及地層

本調查區位於台灣西部麓山帶之最南端(見圖 2 左上角的台灣大地構造圖)，地形呈東高西低，西側為新化丘陵的南端，東側為西部上衝斷層山地的南端(林朝榮, 1957)，於中寮隧道北口西側的丘陵以惡地地形為主，東側緊鄰中寮山，為山地地形，東西兩側之不同地形型態高程變化十分顯著(圖 4)，約有 150 公尺之差，分界處約略為旗山斷層跡的位置(林啟文等人, 2009)，旗山斷層上盤(東側的山地)出露的地層時代為中新世晚期至上新世；旗山斷層下盤(西側丘陵地)出露的地層時代為中新世晚期至更新世。

於調查區內緊鄰旗山斷層的地層，分別為西側的古亭坑層，及東側的烏山層(圖 2)。烏山層(Sun, 1965)分布於旗山斷層上盤(東側)中寮山至深水，岩性以厚層灰色細粒砂岩與暗色頁岩互層，及砂質頁岩夾砂頁岩薄互層為主，本層下部為旗山斷層所截切，上部與蓋子寮頁岩為整合接觸(林啟文, 2013)。古亭坑層(烏居敬造, 1932)分布於旗山斷層上盤(西側)，遍及相當廣的地區，岩性以厚層暗灰色泥岩為主，偶夾薄層砂岩(林啟文, 2013)。

地質構造與泥火山

臺灣西南部的構造大致呈東北-西南走向(圖 2)，在本研究區附近的主要構造有旗山斷層，及其西北側約 500 公尺處的車瓜林斷層，旗山斷層為一向東傾斜的逆移兼具左移分量的斷層(陳柏村, 2005)，北邊起於旗山鎮的南側，呈東北-西南走向，經過中寮山的西緣，南段延伸至燕巢區深水村至大社，此段被全新世的沖積層所覆蓋(陳柏村等, 2009)。

車瓜林斷層為一向東傾斜的逆滑斷層，由高雄內門區往南延伸至半天寮，呈北北東走向，再往南經大廊亭山至燕巢區的崎溜，車瓜林斷層大廊亭山以南，兩側皆為古亭坑層，以厚層泥岩為主，偶夾薄層砂岩，斷層兩側薄砂岩層則明顯不同(林啟文等, 2012)。

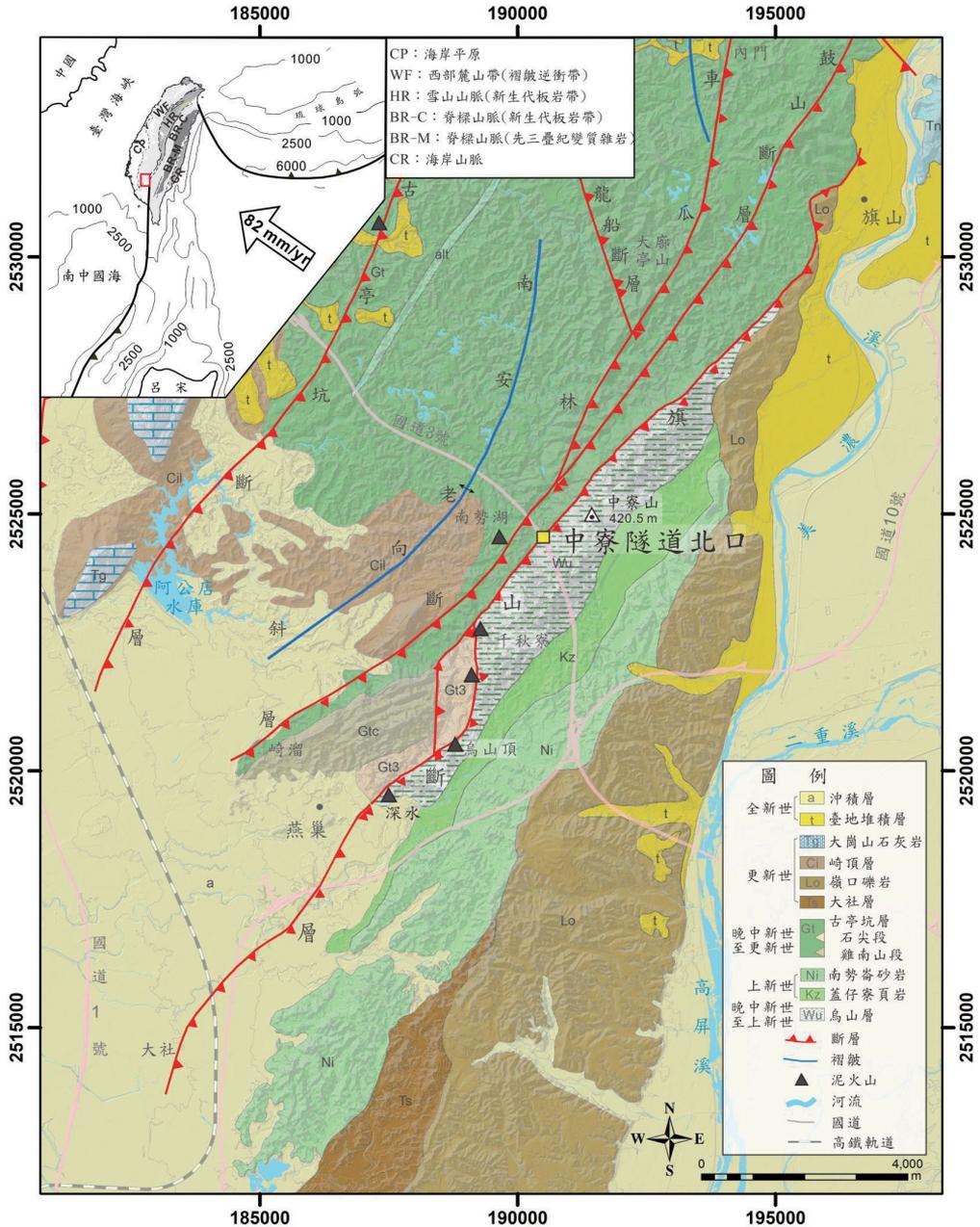


圖 2 臺灣西南部旗山斷層區域地質圖。旗山斷層附近的構造呈東北-西南走向，旗山斷層沿線多處泥火山活動活躍（底圖參考：林啟文等人，2009；林啟文，2013）。

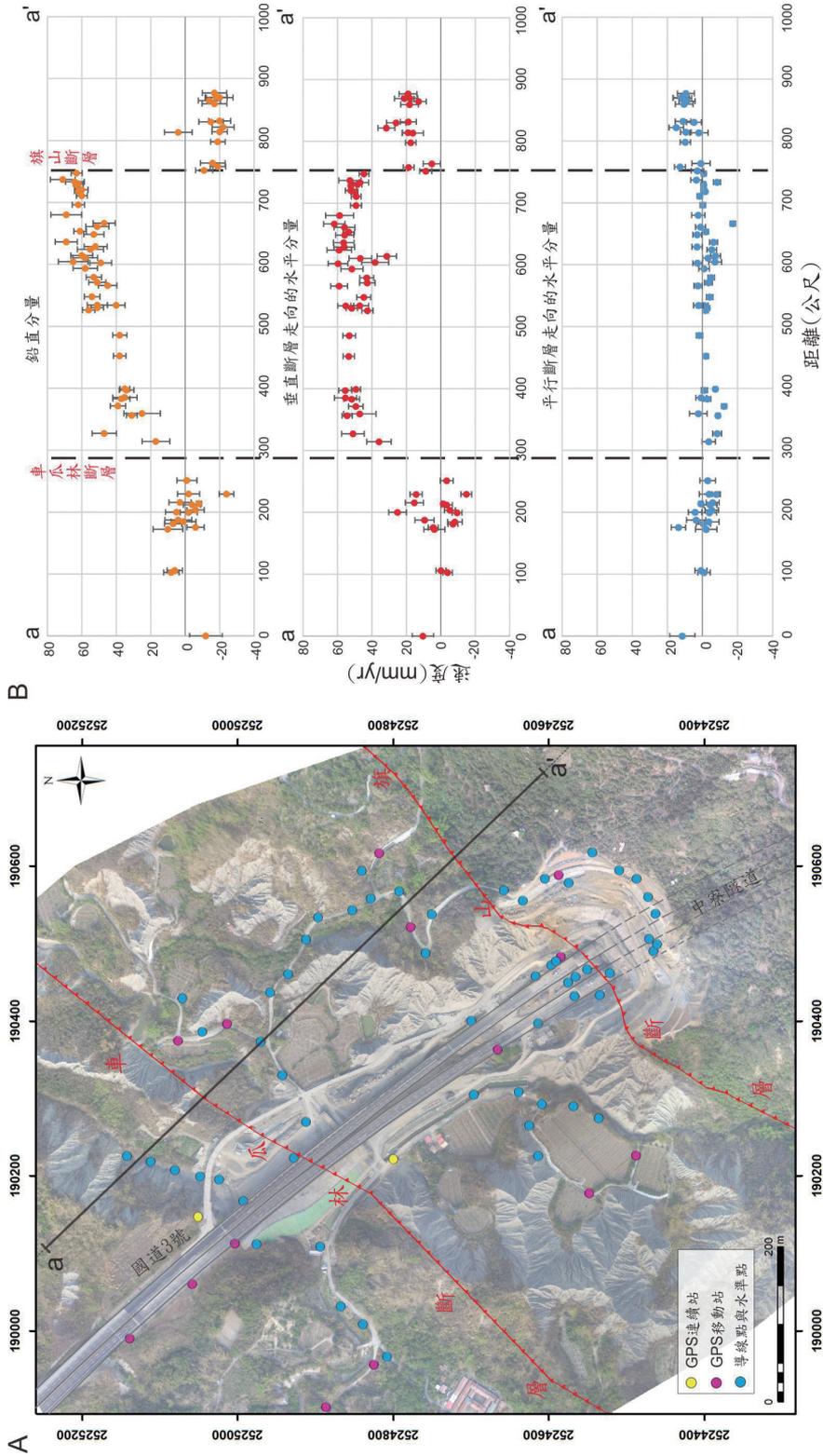


圖 3 中寮隧道附近地體運動速度場 (資料出處：張李群，2014)。A：GPS 及水準測點的分布圖；B：速度分量分析結果圖。



圖 4 中寮隧道北口附近空照。東南側的山地地形與西北側的丘陵地形間高程差異十分明顯。

中寮隧道鄰近處有不少已被報導的泥火山，分布的位置如隧道北端口西側約 500 公尺處的南勢湖地區，及西南側旗山斷層跡沿線從約 2 公里至 5 公里處的千秋寮、烏山頂及深水等地區（圖 2）。宋國城與陳力（2006）指出以上列舉的幾個區域之泥火山活動十分活躍，維持每分鐘至每小時不等的噴發週期。

GPS 觀測及水準測量資料分析

Ching *et al.*（2007）的 1995~2005 年台灣西南部高屏地區的區域性 GPS 測量資料，顯示跨旗山斷層的速度場剖面呈區域水平擠壓。Ching *et al.*（2011）的 2000~2008 年 GPS 連續站鉛直速度及水準測量結果，顯示旗山斷層東側上盤相對為下降側，西側下盤相對為抬升側。張李群（2014）報導 2011~2013 年中寮隧道北口鄰近處局部區域之水準及 GPS 移動站測量結果，指出車瓜林斷層西北側、車瓜林斷層與旗山斷層間、旗山斷層東南側的地塊，其鉛直速度分別為 16~42 mm/yr、41~103 mm/yr 及 3~18 mm/yr；水平速度分別為 42~76 mm/yr 朝西運動、75~105 mm/yr 朝西北方運動、及 59~88 mm/yr 朝西運動。

本研究利用張李群（2014）的資料，扣除車瓜林斷層西北側速度的平均值，再投影到垂直斷層走向的水平切線上，結果顯示跨斷層跡的鉛直速度差異約有 80 mm/yr，東南側為相對降側（斷層上盤），水平速度垂直斷層走向的分量差異約有 25 mm/yr，呈現伸張現象，平行斷層走向的分量差異亦有 10 mm/yr，為右移性質（圖 3）。此結果與從野外露頭證據（陳柏村，2005）推論的旗山斷層之錯移性質，全然不同。

綜合以上資訊，無論是區域性或局部性的 GPS 觀測與跨斷層的水準測量結果，皆顯示旗山斷層的上盤相對下盤近年來持續抬升；區域性 GPS 的水平速度場，顯示整體上旗山斷層兩側的地塊呈現水平擠壓，然而近斷層密集的 GPS 觀測網，卻顯示旗山斷層鄰近處，呈現水平伸張現象，且車瓜林斷層與旗山斷層間的地塊，無論是鉛直或水平的速度皆異常的高。

空拍影像處理

本研究使用 Pix4Dmapper 影像匹配軟體進行影像處理，生成正射影像及地表數值模型（DSM），做為資料展示底圖及旗山斷層與剪切帶幾何形貌描繪用。空拍流程以無人飛掛載相機，完成隧道附近各期的開挖狀況拍攝，本研究使用的空照拍攝日期為 2018 年 4 月 29 日。將拍攝影像及地面控制點坐標加入軟體匹配計算。生成正射影像與地表數值模型的流程分為三個步驟：分別為點雲初

始化、點雲密集化及正射影像、地表數值模型鑲嵌，最後再使用地表數值模型解算隧道口附近的地形等高線。本研究正射影像及地表數值模型，共計使用 294 張空拍相片及 6 個地面控制點進行運算，影像的地面取樣率 (GSD) 為 11.2 公分，地面控制點的 RMS 標準差值為 8.2 公分。

開挖面調查結果

隧道口的縱向開挖面 (平行國道 3 號)，往東南連續延伸至少有 200 公尺以上，以泥岩組成的惡地地形之邊界明顯可見於開挖面上 (圖 4)，比鄰的岩體為砂頁岩互層，兩者以斷層關係相接觸，即旗山主斷層。斷層的西北側 (下盤) 岩性以塊狀厚層泥岩為主，偶夾薄層砂岩，層態走向北北東至北東皆向東南傾，屬於古亭坑層；斷層的東南側 (上盤) 岩性以厚層至中層砂岩偶夾薄層頁岩或砂頁岩互層為主，層態為東北-西南走向，皆向東南傾，屬於烏山層 (圖 5)。橫向開挖面最寬處也有 200 公尺，與岩層走向約略平行，有助於兩側縱向開挖面岩層的比對。此外，旗山主斷層的上下盤，亦可觀察到 3 道延續性佳且相對較寬的剪切帶、高傾角剪切裂隙組及其他的變形現象，分佈的範圍亦即本文稱之的旗山斷層帶 (fault zone)。以下依序介紹旗山斷層帶野外的構造特徵。

旗山斷層帶

一個完整的斷層帶通常會包含受強烈剪切的斷層核心帶 (fault core)，及核心帶兩側受剪裂的斷層破壞帶 (fault damage zone) (Storti *et al.*, 2003)。斷層核心帶中除常見的斷層泥 (fault gouge) 和斷層角礫 (fault breccia) 外，也可能出現具錯動量的不連續面，即斷層面 (fault surface)；斷層破壞帶中的岩層破裂，無或錯動量小，層面通常可追跡。本研究推估旗山斷層帶寬度為 100~140 公尺 (圖 6)，其中包含斷層核心帶及斷層破壞帶，特別是斷層核心帶的南界為斷層面，同時也是明顯的岩性改變界面 (較老的烏山層逆衝至較年輕的古亭坑層的界面)，此界面本文以旗山主斷層稱之。以下先說明及定義旗山主斷層，再分述旗山斷層帶中的其他構造。

主斷層

旗山主斷層的位置即旗山斷層帶中具有最大錯距量的不連續面，同時也是烏山層與古亭坑層在本區的岩性界面，圖 7 為旗山主斷層的露頭，斷層的位置為開挖面中，由泥岩區往東南追跡時，泥質岩 (argillaceous rock) 與第一道連

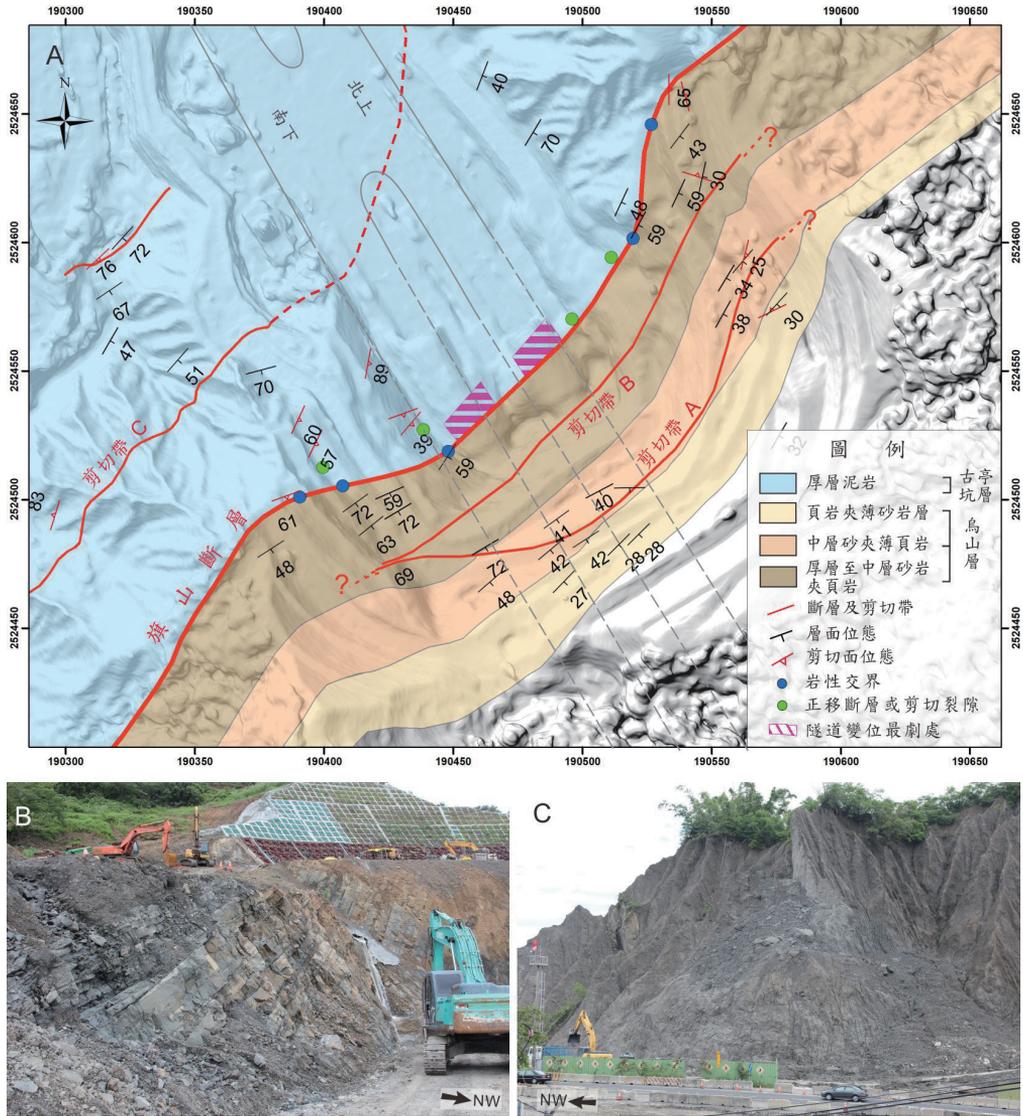


圖 5 中寮隧道附近的岩性分佈。A：中寮隧道北口細部調查地質圖，西北側為古亭坑層，東南側為烏山層。B：隧道口附近烏山層野外露頭樣貌，岩性為厚砂岩層偶夾薄層頁岩或砂頁岩層互層。C：隧道口附近古亭坑層野外露頭樣貌，岩性為厚層泥岩。

續砂岩的界面，此界面（斷層）東南側（上盤）的岩性以厚砂岩層夾薄砂岩與頁岩互層為主，西北側（下盤）則為受到強烈剪切變形的泥質岩（斷層泥）。本研究將隧道兩側各階層開挖面的旗山主斷層位置點標記在空照底圖中，並配合 Pix4D 軟體解算的地表數值模型及高程資訊（等高線），即可推算出此主斷層的位態，約為 $N46^{\circ}E/59^{\circ}S$ ，其走向約略與國道方向垂直。

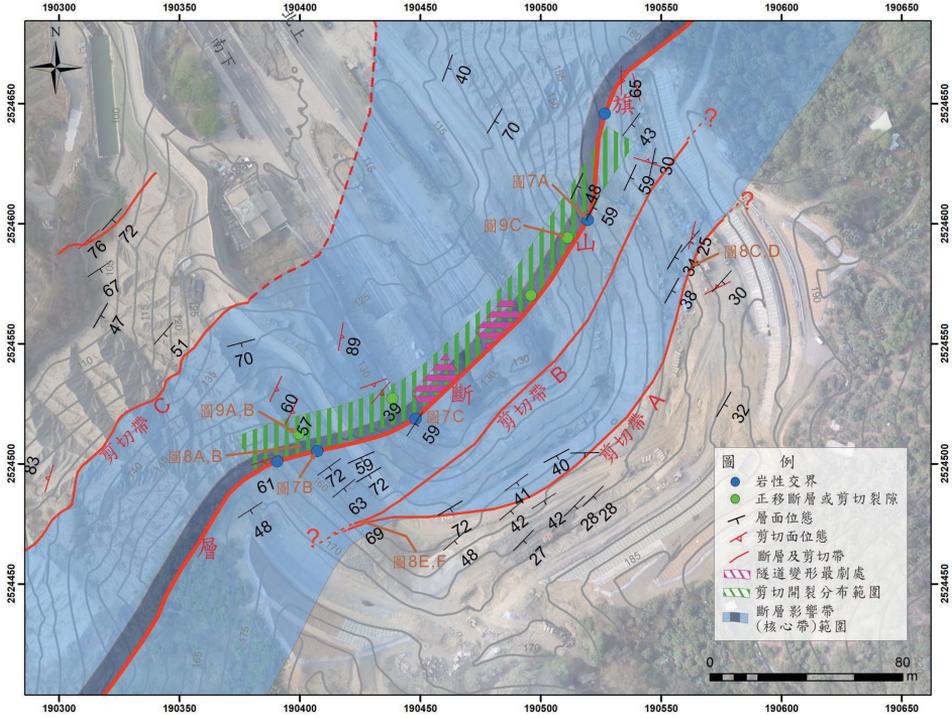


圖 6 中寮隧道北口旗山斷層帶構造分布圖。

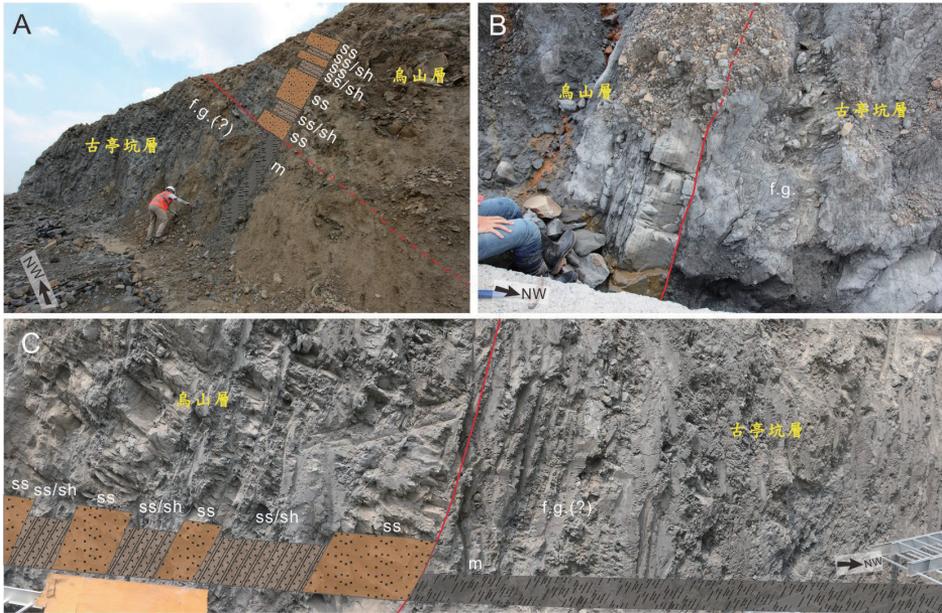


圖 7 旗山斷層之野外照片 (ss：砂岩；sh：頁岩；m：泥岩；f.g.：斷層泥)。A：開挖面東側旗山斷層露頭；B：開挖面西側旗山斷層露頭；C：開挖面東側緊鄰隧道旁的旗山斷層露頭。

斷層核心帶

核心帶位在旗山主斷層的西北側（下盤），緊貼著主斷層，寬約 6 公尺。核心帶內的岩層受強烈的剪切變形，已發展出葉理狀（foliated），在野外露頭上呈現黑色與淺灰色的條帶重複平行排列之現象，這些條帶的基質為剪切泥（sheared mud），其間存在有相對較硬的剪碎小岩塊，產狀類似旋轉斑晶狀的塑性變形特徵，如圖 8A。

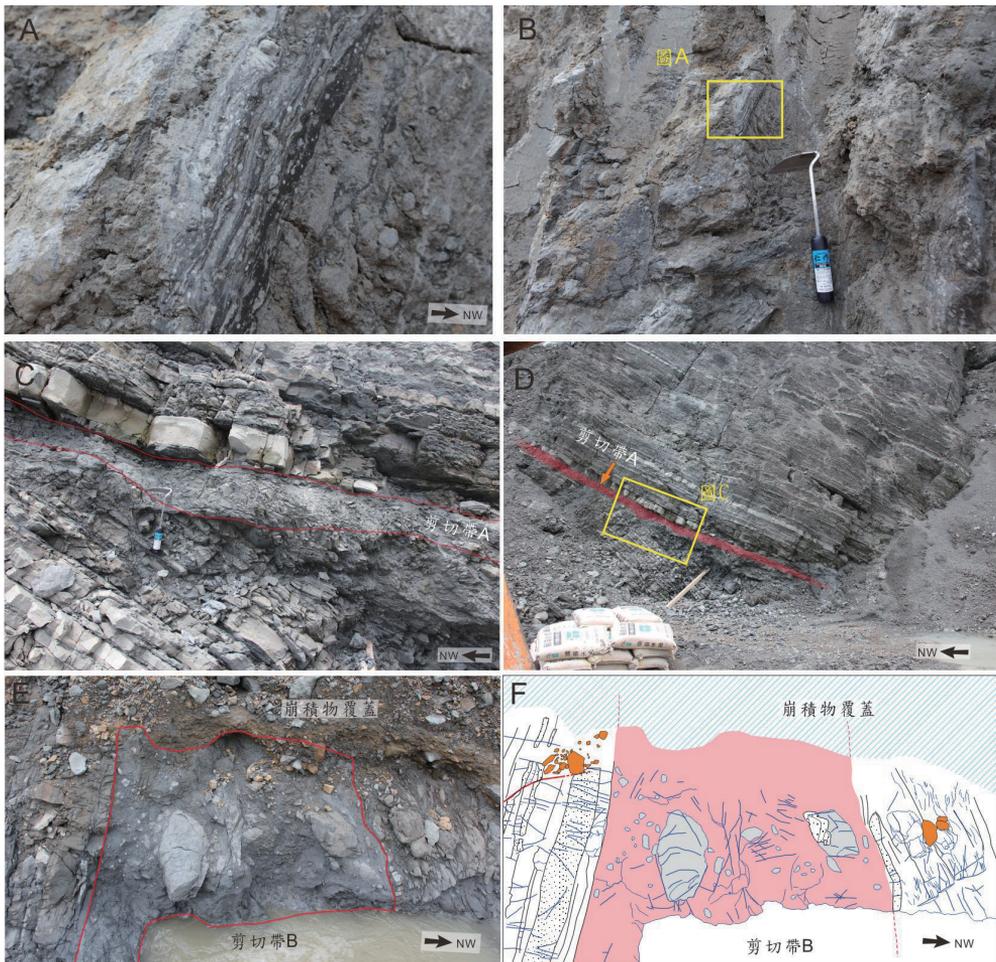


圖 8 旗山斷層帶之核心帶及剪切帶的野外照片。A：核心帶內密集的剪切泥及旋轉斑晶狀塑性變形特徵；B：核心帶遠照，岩性以受剪切的深色泥岩為主；C：剪切帶 A 近照，剪切帶內岩層成角礫狀；D：剪切帶 A 遠照，剪切帶兩側岩層位態明顯不同；E：剪切帶 B 露頭，剪切帶約 3 公尺寬；F：圖 E 的素描照，剪切帶（紅色區塊）為受剪切的泥岩為主，偶夾角礫狀的砂岩塊，兩側砂岩裂隙密集分佈，呈破碎狀。

斷層破壞帶

旗山斷層破壞帶分布於斷層核心帶兩側，上盤寬度約 30 公尺，下盤寬度約 70~100 公尺。破壞帶中，上盤（烏山層）的砂岩層為一組至兩組的破裂面截切，呈破碎狀，下盤古亭坑層的泥岩偶可見深色泥質的塑性變形剪切帶，寬度約數公厘到一兩公分最常見，延伸性不佳，通常數十公分長。然而，旗山斷層帶中，可追蹤到至少 3 條剪切帶（圖 6），延伸性佳，可追跡數十公尺，分別以剪切帶 A、B 及 C 稱之，部分的剪切帶兩側的岩層以具明顯錯移的證據，亦屬旗山斷層分支斷層。剪切帶 A 位於烏山層中，大致上為旗山斷層帶的東南界，剪切帶兩側岩性皆為薄層砂岩與頁岩互層，岩層位態於剪切帶兩側差異明顯，屬於一支斷層，剪切帶約 30 度向南傾斜，寬度約為 25 公分，內部已受強烈變形，呈角礫狀（圖 8C、D），其上盤岩層層序完整。剪切帶 B 位於剪切帶 A 與主斷層間，基質為泥，含角礫狀的泥岩或砂岩碎塊（圖 8E、F），寬度約 3~4 公尺，兩側岩性為中層至厚層砂岩夾薄層泥岩，岩層中裂隙分佈密集，呈破碎狀，層面仍可追跡約 65 度向南傾斜。剪切帶 C 位於古亭坑層，同時為旗山斷層帶的西北界，產狀為厚層泥岩中的一道黑色條帶，此條帶約數十公分寬。

高傾角剪切裂隙與正移斷層

高傾角剪切裂隙的分布緊貼著旗山主斷層，出現於其西北側（下盤）20 公尺的範圍內，大部分呈幾公分寬的開張，在開挖面上的延伸通常數公尺長，其一的剪切裂隙露頭如圖 9A 所示，具明顯開口，呈東北-西南走向，60~70 度向東南傾，裂隙面上可見擦痕（slickenslide），為一組密集平行的擦痕線（slickenlines），擦痕線的傾斜角度（rake）約為 85°SW（圖 9B）。開挖面中也發現了數道正移斷層，正移斷層截切過薄層砂岩及深色塑性變形的剪切泥（圖 9C），出現的位置約為旗山斷層西北側 10 公尺的位置。

隧道壁裂隙測繪結果

原隧道北端的洞口（改善工程施工前）北上與南下，分別約在國道三號 378K+825m 及 795m 處，2018 年 4 月底的改善工程已將隧道拆除至接近隧道變形最劇烈的位置（378K+880m），如圖 4 中間的照片及圖 10 所示。於隧道變形最劇烈處，馬路兩側的人行道呈現明顯的斜坡狀（圖 1B、1C），西北側相對隆升，隧道壁則出現密集的裂隙且呈傾斜狀，傾角多呈 45~70 度的高角度，部分



圖 9 中寮隧道北口開挖面的高傾角剪切開裂及正移斷層。A：高傾角剪切開裂隙遠照，裂隙面可延伸數公尺；B：剪切裂隙截切過塑性變形剪切帶的剪切裂隙中高傾斜角度的擦痕；C：截切薄砂岩層及剪切帶的正移斷層。

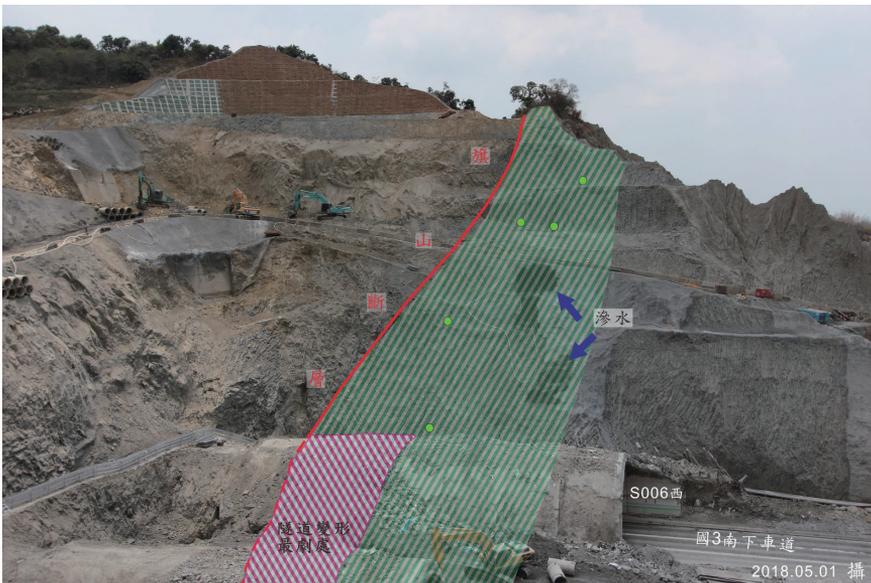


圖 10 高傾角剪切裂隙分布與隧道變形劇烈處之關係圖。青綠色點為野外觀察到高傾角剪切裂隙的位置，深綠色範圍則示意剪切裂隙分布範圍。

甚至近乎垂直且有開張的現象；劇烈處以外的範圍，若有裂隙大多呈水平狀，見圖 1A。此外，於調查期間，變形劇烈鄰近處之裂隙多有滲水的現象。

討論

中視尺度構造之形成順序及截切關係

出現在旗山斷層核心帶及鄰近處的正移斷層與高傾角剪切裂隙，皆為具有錯移量的不連續面，其存在反應岩體的脆性變形行為，相較於核心帶內強烈的剪切變形，發展出葉理狀 (foliated) 的剪切泥 (sheared mud)，所反映的塑性變形 (ductile deformation) 特徵，截然不同，且高傾角剪切裂隙近乎沿著甚至截切過剪切泥的葉理面。顯示旗山斷層核心帶的剪切泥屬於較早形成的構造，形成時岩體有較高的圍壓及溫度，可能形成時所在的深度較深，高傾角剪切裂隙屬於較晚期形成的構造，應為在較淺部形成的構造。此外，所觀察到的正移斷層及部分剪切裂隙近乎垂直，且延續性佳，也間接地透露這高傾角剪切 (分佈) 帶可能截切主斷層面，如圖 6 所示。

隧道裂隙與開挖面構造分布的關聯

中寮隧道北口開挖面上的高傾角剪切裂隙及正移斷層的分布範圍，於旗山主斷層西北側約 20 公尺的寬帶 (圖 6)；隧道內變形最劇烈處，以人行道明顯變形的單斜坡及傾斜密集裂隙的分佈之範圍粗估，約 5 到 15 公尺不等 (圖 1B、1C)。因施工之利，於近隧道內變形最劇烈處的隧道壁被開一窗口，以利管路得以進入隧道，本研究藉此窗口確認隧道壁兩側開挖面上岩性變化最明顯處 (亦旗山主斷層)，即為隧道中人行道單斜坡的坡腳位置，因此認為於開挖面觀察的高傾角剪切裂隙與正移斷層形成原因，與隧道結構受抬升的原因，為同一個機制造成，更進一步推測此一高傾角剪切裂隙分佈帶，與隧道口速度場急遽變化有關。

隧道結構變形的可能機制

由前面章節的野外調查描述，可彙整出幾項資訊：1. 開挖面中高傾角剪切裂隙屬於較晚期形成的構造；2. 高傾角剪切裂隙分布位置與隧道變形最劇烈處位置重合；3. 隧道變形最劇烈處壁面的裂隙也是呈高角度。從 GPS 觀測及水準測量資料，可以彙整出以下幾點：1. 鉛直方向速度呈現旗山斷層上盤較慢、下盤較快的趨勢；2. 區域性的 GPS 水平速度皆呈現旗山斷層上盤往西運動速度大於

下盤的趨勢；3. 局部性重點區域的大地測量，顯示於旗山斷層與車瓜林斷層間的鉛直方向與水平方向的速度，皆高於兩側的地塊。另外，高傾角剪切裂隙分布的範圍，在隧道改善工程施工期間，持續有滲水的現象（圖 10）。

綜合以上的資訊，本研究推測旗山斷層與車瓜林斷層間的地塊下方，可能存在大範圍的含水軟化泥岩或泥漿（slurry），此現象或許與鄰近處出現的泥火山系統有關（圖 2），再受東南側相對較硬的烏山層往西推擠及重力載荷，使此軟化泥岩及地下水往地表之自由面（往上）流動，致使地表淺部的古亭坑層之泥岩層沿旗山斷層隆升（圖 11），進而造成隧道口旗山斷層跡鄰近處速度急遽變化，速度以斷層核心帶附近最大，往西北移動速度漸趨緩，此機制也是中寮隧道損壞的主因。

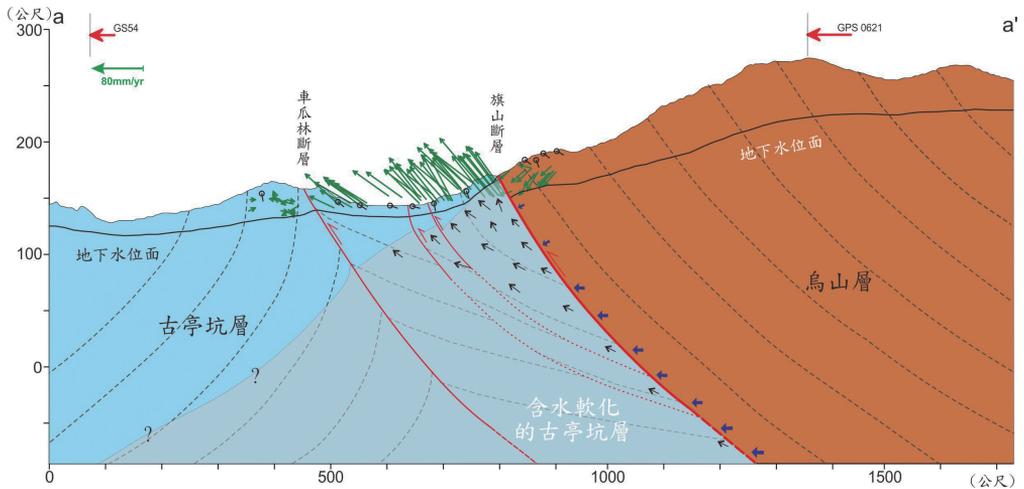


圖 11 中寮隧道北口旗山斷層與車瓜林斷層間地塊下方軟化泥岩向上頂升示意圖，藍色箭頭示意烏山層施於古亭坑層的大地應力，黑色箭頭示意軟化泥岩的流動方向，綠色箭頭為扣除車瓜林斷層下盤平均速度後的投影速度場（資料取自張李群，2014），紅色箭頭為以澎湖白沙為參考點的 GPS 投影水平速度（資料取自 Hu *et al.*, 2007）。

結論

結合空拍影像及開挖面的詳細調查結果，顯示本區旗山主斷層（錯位量最大的斷層接觸面）的位態約為 $N46^{\circ}E/59^{\circ}S$ ，旗山斷層核心帶寬度約 6 公尺，旗山斷層影響帶寬度約 100~140 公尺。旗山斷層核心帶中的剪切泥之葉理為高傾角的剪切裂隙截切，隧道變形最劇烈處與開挖面上高傾角剪切裂隙分佈位置約

略吻合，地面變形的單斜坡坡腳即為旗山主斷層通過處。開挖面上的正移斷層現象及高傾角剪切裂隙屬晚期或近期形成的脆性變形行為，為反映隧道口速度場急遽變化的地質表徵，可能是因為旗山斷層與車瓜林斷層間的地塊下方，存在軟化的泥岩體，因旗山斷層上盤往西推擠及重力荷載作用，迫使此軟化的泥岩往地表自由面的方向推擠，致使近地表的岩層沿原旗山斷層帶的弱帶隆升，造成隧道結構損壞。

誌謝

感謝科技部經費補助（計畫編號: MOST 106-2116-M-008-005）、世曦工程及地質力學研究室參與的成員於本研究調查期間的協助，使本研究野外資料可順利地蒐集。

參考文獻

- 宋國城、陳力（2006）從地形系統觀點探討泥火山地景敏感性。地理學報，第 44 期，第 39-53 頁。
- 林啟文（2013）旗山圖幅及說明書-五萬分之一臺灣地質圖及說明書，第 56 號。經濟部中央地質調查所出版，共 93 頁。
- 林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）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。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號。
- 林啟文、游鎮源、洪國騰、周稟珊（2012）台灣西南部台南-高雄泥岩區構造。經濟部中央地質調查所彙刊，第 25 號，第 143-174 頁。
- 林朝榮（1957）臺灣地形，台灣省通志稿。臺灣文獻委員會出版，第 1 卷，第 1 冊，共 424 頁。
- 張李群（2014）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。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，共 110 頁。
- 陳柏村（2005）旗山斷層南段變形特性研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 125 頁。
- 陳柏村、林啟文、江婉綺、劉彥求與林慶偉（2009）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，第 22 號，第 63-98 頁。
- 烏居敬造（1932）臺南州新化油田調查報告。臺灣總督府殖產局，第 609 號，共 29 頁。
- 蘭于鈞（2019）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。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 124 頁。
- Ching, K.E., Rau, R.J., Lee, J.C. and Hu, J.C. (2007) Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005. Earth and

Planetary Science Letters, 262, Nos.3-4, 601-619.

- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K. M., Chen, K.H., Rau, R.J. and Yang, M. (2011) Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. *Journal of Geophysical Research*, 116, Nos.B8.
- Hu, J.C., Hou, C.S., Shen, L.C., Chan, Y.C., Chen, R.F., Huang, C., Rau, R.J., Chen, K. H.H., Lin, C.W., Huang, M.H. and Nien, P.F. (2007) Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31, Nos.3, 287-302.
- Storti, F., Billi, A. and Salvini, F. (2003) Particle size distributions in natural carbonate fault rocks: insights for non-self-similar cataclasis. *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 173-186.
- Sun, S. C. (1965) Geology and petroleum potentialities of the Chingshui-Yuanlin area, Taiwan. *Pertol. Geol. Taiwan*, 4, 161-173.

Characteristics of the Chishan Fault Zone Exposed around the North End of Zhongliao Tunnel, Southwestern Taiwan

Yi-Wei Chiou¹, Yu-Chun Lin¹, Wen-Jeng Huang^{1,2}, I-Chin Yen³,

Maryline Le Beon² and Yuan-Hsi Lee⁴

ABSTRACT

The Zhongliao Tunnel of the National Freeway No.3, which passes through the Chishan fault zone, has been continuously deformed since the inauguration of the freeway. The gradients of horizontal and vertical crustal velocity along the tunnel have undergone abrupt change. Taking advantage of the tunnel improvement project, we investigated the excavation walls and outcrops around the tunnel. The attitude of the Chishan main fault is about N46°E/59°S, with the late Miocene Wushan Formation on its hanging wall and the Pliocene Gutinkeng Formation on its footwall. The width of the entire Chishan fault zone is about 100 to 140 meters in this region. A fault core of intense shear deformation with a width of 6 meters is attached to the Chishan main fault in its footwall. Ductile shear zones and brittle shear fractures are observed on the excavation walls within the fault zone. The shear fractures appear to cut the shear zones. The distribution zone of the shear fractures correlates with the location of the intense deformation in the tunnel. Several spots of water seepage are detected within the distribution zone as well. In addition, active mud volcanos have been identified 2 kilometers southwest of the tunnel on the Chishan fault trace. Based on these investigation findings, we infer that a broad extent of water-softened mud may exist beneath the region. The flow of the water-softened mud driven by the tectonic movement and gravitation load of the hanging-wall block results in the uplift of the overlying mudstone along the weak Chishan fault zone. It may be the same mechanism that causes the tunnel damage.

Key words: Chishan Fault, Zhongliao Tunnel, deformation of mudstone

1. Institute of Applied Geology, National Central University

2. Department of Earth Science, National Central University

3. YIC Geological Office

4. Department of Earth and Environmental Science, National Chung Cheng University