

## 技術短文

# 從花東縱谷地質談花東線鐵路隧道工程

## Concerning of Eastern Longitudinal Valley Geology and the Tunnel Engineering for Hualian-Taidong Railway

薛文城\* 張本聖\*\*

### 一、前言

花東縱谷位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊碰撞縫合帶上，地勢狹長平坦，終年青山綠水景色怡人，又稱臺灣後花園。但因位於多颱風、多地震地帶，且縱谷上三大主要河川花蓮溪、秀姑巒溪及卑南溪交織成綿密樹枝狀水系，這幾年天然災害不斷發生，東部多處地區降下刷新歷史紀錄的雨量，上游段河床坡陡流急，沖蝕劇烈，引發下游河床泥砂淤積嚴重。

由於花東縱谷地區先天地質條件的影響，及近年來全球氣候變遷異常，工程建設安全係數必須提高，加上東部地區交通不便、人才(力)難求與資源需從西部地區轉運之困難，及地方要求建設需融合東部的人文景觀特色，對於工程路線位置的選定、施工工法的選擇與民眾訴求等，是政府建構東部地區快捷、安全、綠色的鐵路大眾運輸系統規劃設計與施工考量的重要議題。

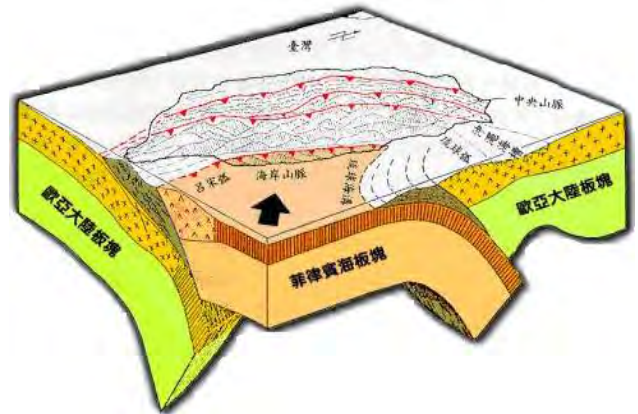
### 二、花東縱谷地質概述

花東縱谷北起木瓜溪南側，南至臺東市北界，共跨越花蓮縣的秀林鄉、壽豐鄉、鳳林鎮、光復鄉、萬榮鄉、瑞穗鄉、卓溪鄉、玉里鎮、富里鄉及臺東縣的池上鄉、關山鎮、鹿野鄉、海端鄉、卑南鄉、延平鄉等共十五個鄉鎮，面積廣達138,368公頃。

#### (一)地形與地質

花東縱谷位於中央山脈與海岸山脈交界的平坦谷地，為菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊兩互相運動的板塊交界碰撞縫合帶，在大地構造上屬弧陸碰撞之縫合帶，是一沿花東縱谷斷層之平

谷，長約150 km，寬度不到7 km(平均為3~6 km)，海拔在400 m以下。臺灣板塊碰撞構造型示意圖詳圖一。



圖一 台灣板塊碰撞構造型示意圖(摘自台灣地質概論增訂二版，何春蓀，1986)

花東縱谷位於臺灣地質分區之中央山脈東翼地質亞區與海岸山脈地質區間，縱谷主要分布現代沖積層(Q4)，兩側岩層為更新世階地堆積層(Q3)及更新世舞鶴礫岩(Q0)，部份為中生代大南澳片岩—玉里層(PM)、始新世畢祿山層(EP)、中新世利吉層(PI)等。花東縱谷區地表為由現代陸相階地與沖積層，主要為未固結泥、砂和礫石堆積，其厚度各地不一。

貫穿本區之花東縱谷斷層，其性質為向東傾的逆衝斷層、兼具左移性質。因板塊擠壓仍持續活動中，目前縱谷中地震頻繁，顯示地質構造活動旺盛，但斷層線大多被現代沖積層所覆蓋而未露出地表。依據地質調查所公布之台灣活動斷層分布圖顯示，鄰近本計畫花東線鐵路之活動斷層包括米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層及利吉斷層。台灣地震斷層分布圖詳圖二。

\* 交通部鐵路改建工程局東部工程處施工課

\*\* 中興工程顧問股份有限公司花東線鐵路電氣化工程處



圖二 台灣地震斷層分布圖(中央地質調查所, 2010)

縱谷西側中央山脈山麓帶形成成串之錐形沖積扇地形，約佔縱谷總面積之半。由於三大水系沖刷與切割，因此形成瀑布、峽谷、河階、惡地等不同的地質地形，自然景觀豐富而獨特。流經中央山脈與海岸山脈間的花蓮溪，沖積出一片肥田沃土。切穿海岸山脈的秀姑巒溪向東奔流，造就驚心動魄的峽谷景觀，吸引許多遊客到

瑞穗泛舟。斷層、台地、溫泉是南段的特殊地質景觀，舞鶴的優質茶園、果園，以及泉質極佳的瑞穗、安通溫泉等，都是膾炙人口的休閒好去處。

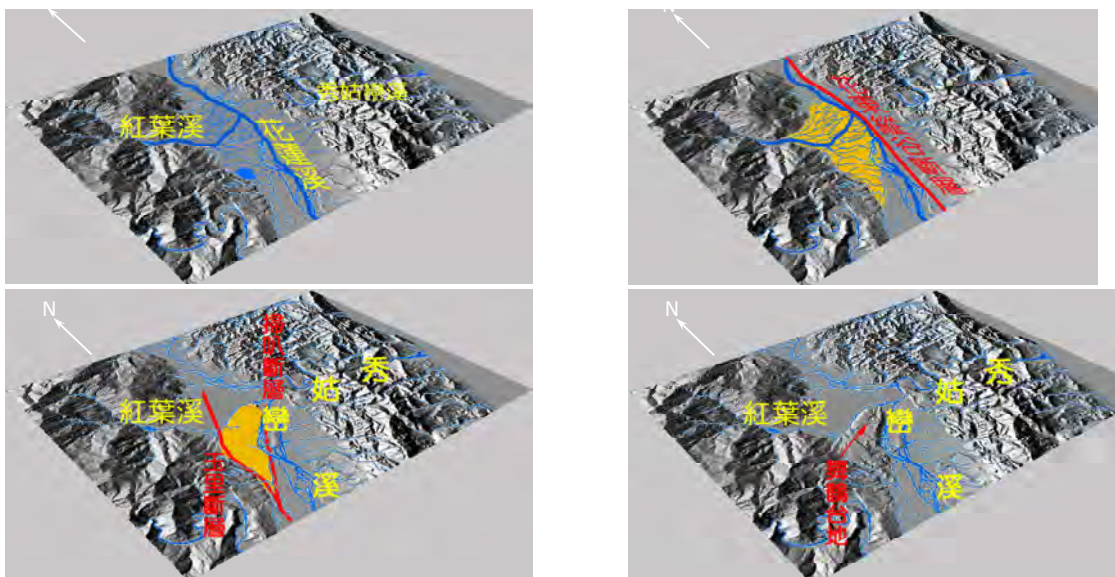
舞鶴台地原屬紅葉溪與花蓮溪交會處之泛濫沖積平原，密布著埤湖與河道，後因斷層活動，地殼抬昇，使紅葉溪口沖積扇之礫石層掩蓋了原沖積平原，也形成了現今的舞鶴台地，詳圖三。突出於花東縱谷的舞鶴台地是秀姑巒溪河川襲奪下切之階地，詳照片一。

(二)河川水系

花東縱谷平原主要以河床沖積層堆積。在狹長的谷地裡，有花蓮溪、秀姑巒溪和卑南溪等東部三大河川水系，均屬於中央管河川，其上游發源自西側中央山脈，高山峻嶺、坡陡流急、沖蝕劇烈，出山谷後流路呈瓣狀，河床寬廣、砂石大量淤積形成沖積扇，即為花東線鐵路沿線人口聚集較多之花東縱谷平原區。



照片一 突出於花東縱谷的舞鶴台地是秀姑巒溪河川襲奪下切之階地



圖三 舞鶴台地成因示意圖(依左上→右上→左下→右下順序)

三大水系循縱谷方向南北奔流，以池上附近古沖積扇分界，為谷內分水嶺。縱谷兩側可見半錐型的沖積扇，縱谷中的河階數目由南向北遞減，瑞穗以北幾乎沒有河階，而南段可達4-5階，這是因為北邊上升比南邊慢或是南段河流之下切力較旺盛所形成。

瑞穗以北為花蓮溪水系，花蓮溪由北向南之支流分別為木瓜溪、壽豐溪、萬里溪、馬鞍溪及光復溪。各支流上游山地集水區坡陡且地質鬆軟，故崩坍地多，加以近些年來大量開採礦石，每遇颱風上游挾帶砂石下移，淤積於中下游河段，造成河床年年淤高，花東線鐵路跨越(或穿越)各支流處多為上昇型河川，尤以壽豐溪最為嚴重。

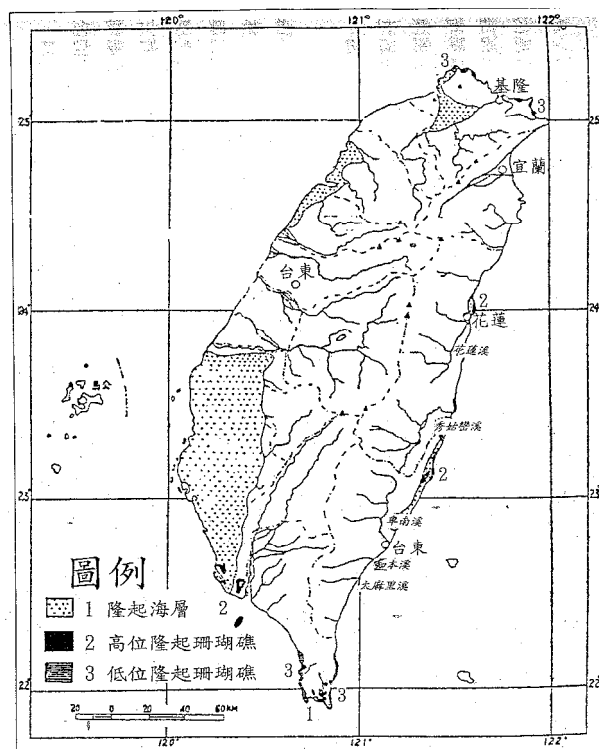
瑞穗至池上為秀姑巒溪水系，秀姑巒溪由北向南之支流分別為：富源溪、紅葉溪、豐坪溪、卓溪及樂樂溪。秀姑巒溪上游段因始出山谷，未脫野溪河性，流路不穩，經常有洪災發生，經歷年之整治，漸趨穩定；中游段變化主要受野溪注入影響，玉里大橋下游，河寬加大，類似沖積平原河道；下游段流路彎曲，但河道尚稱穩定；秀姑巒溪為唯一切穿海岸山脈東流之河川。

池上以南為卑南溪水系，卑南溪上游主流新武呂溪與支流大崙溪、鹿寮溪、鹿野溪等均發源於中央山脈東麓，主流出中央山脈之關山後，向東流至池上，受海岸山脈阻擋而折向南，流貫花東縱谷，最後在台東市北郊向東注入太平洋。台灣東部三大河川水系詳圖四。花東縱谷三大溪流詳照片二。

### 三、花東線鐵路電氣化工程概述

#### (一)計畫緣起

臺鐵西部幹線、宜蘭線及北迴線均已完成電氣化工程，而花東線(除花蓮車站外)仍為單軌非電氣化區間，目前列車使用柴油動力機車牽引行駛，無法滿足旅運需求。政府為配合區域計畫及觀光發展政策，提供花東地區便捷鐵路運輸系統，並縮短行車時間，增加運輸能量，遂推動「花東線鐵路電氣化新建工程」計畫，以及既有鐵路電氣化與相關改善工程，以期提昇運輸效率與服務品質，建構鐵路電氣化環島路網。



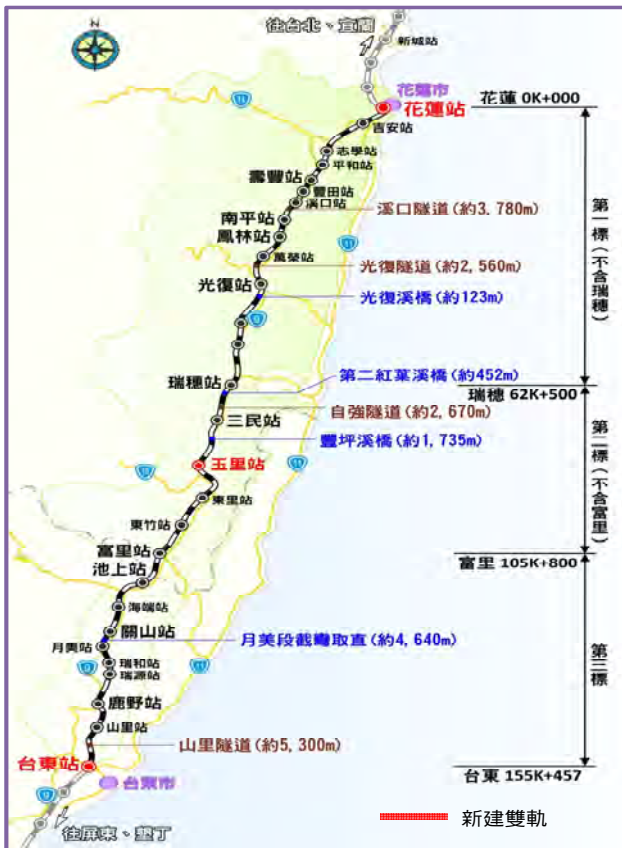
圖四 台灣東部三大河川水系(花蓮溪、秀姑巒溪、卑南溪)，修改自台灣地質，陳培源，2006)



照片二 花東縱谷三大溪流

#### (二)工程概述

花東線鐵路蜿蜒於花東縱谷區內，北起花蓮站，南至臺東新站止。路線全長約155.5 km，計有28個車站(如圖五)，其中一等站有3個(花蓮、玉里及臺東)，三等站有19個，其餘6個為招呼站。



圖五 本計畫涵蓋範圍

本計畫預定於5年(民國98年至102年)內執行細部設計、工程招標、用地取得、土建軌道機電施工，完成電氣化工程，7年全計畫完成。本計畫主管機關為交通部鐵路改建工程局，主辦機關為交通部鐵路改建工程局東部工程處，設計單位為中興工程顧問股份有限公司，監造單位原為交通部鐵路改建工程局東部工程處自辦，民國99年6月起由中興工程顧問股份有限公司協助監造工作，民國100年6月起正式委託中興工程顧問股份有限公司監造。本計畫原規劃經費為150億元，並預計於102年底完成電氣化通車，民國101年1月通過修正預算增加百億工程經費。

### (三)計畫工程項目與內容

考量計畫沿線地質環境、河川沖刷及防洪要求等因素、局部路段進行河底隧道、山岳隧道的新建及老舊橋梁改建，同時因應鐵路行車安全及營運需求，並配合花東縱谷自然景觀特色，一併進行局部瓶頸路段雙軌化、曲線改善、站場改善及景觀綠美化等相關改善工程。本計畫之工程項目和內容如表一。

表一 本計畫之工程項目和內容

工程項目	工程內容
新建雙軌隧道	溪口隧道、光復隧道、自強隧道、山里隧道
新建橋梁	光復溪橋、第二紅葉溪橋、豐坪溪橋
雙軌改善區段	1.壽豐站~南平站(12.7 km) 2.鳳林站~光復站(11.3 km) 3.瑞穗站~三民站(9.4 km) 4.山里站~臺東站(7.7 km)
機電工程	變電站工程、電車線工程、號誌系統、電訊工程
曲線改善	1.月美段截彎取直 2.曲線半徑<1000 m路線改善

### (四)新建隧道

花東鐵路沿線既有單軌隧道空間狹窄，無法容納電氣化改善空間需求，因此採新建雙軌隧道方式改善，新建隧道共四座：溪口、光復、自強、山里(如表二)，以避免形成瓶頸區段，新隧道與既有隧道相鄰約30~40 m，部份新建隧道工程為河底隧道(交通部鐵路改建工程局，2008、2010)。

表二 本計畫沿線之新建隧道

隧道名稱	隧道開挖方式	說明	設計長度(m)
溪口隧道	明挖覆蓋為主，局部鑽掘	過河隧道，穿越壽豐溪	3,780 (含出土段640)
光復隧道	明挖覆蓋為主，局部鑽掘	過河隧道，穿越馬太鞍溪	2,560 (含出土段220)
自強隧道	鑽掘為主	山岳隧道，位於舞鶴台地	2,667
山里隧道	鑽掘為主，局部明挖覆蓋	山岳隧道，卑南溪右岸坡地	5,199

## 四、花東線鐵路新建隧道設計與施工

南非RMR系統與挪威Q系統為現今台灣隧道工程最常用之岩體分類系統，但實際使用上，因台灣地質年代輕，位於板塊衝撞帶，地質條件與原岩體分類起源地大不相同，且卵礫石層及砂土層等岩層，亦超出目前岩體分類系統範圍。鑒於上述，行動院公共工程委員會民國88年推出「台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立」計畫，該計畫91年底建置完成「台灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR-system)」(張吉佐等，2002、2004)，可面對台灣多變的地質，提出合適之岩體分類與隧道支撐形式。本花東線鐵路電氣化新建隧道即依據鐵路電化標準斷面，依據PCCR岩體分類與隧道支撐系統進行隧道開挖與支撐設計。

### (一)溪口隧道

溪口隧道(如圖六)地質為沖積礫石層，礫石或巨礫夾含粗砂，透水性極佳。隧道沿線穿越豐田圳沉砂池、壽豐溪及兆豐農場等重點地段，覆土最深僅約10 m。綜合考量沿線之覆土深度、斷面大小、地質條件、施工風險、國內施工案例、工程預算及規模等因素，隧道開挖以明挖覆蓋工法為主，部分有特殊考量之區段，如穿越堤防段(北段約75 m，南段約85 m)，考量穿越堤防下方地質條件較差地層，則採用有圓弧形仰拱設計之鑽掘隧道工法通過，頂拱襯砌厚度為80 cm。其防水設計為鋪設全周式防水膜，防水層由一層內側防水膜及一層外側非織物組成，且防水層底部不設置盲溝。穿越壽豐溪段，採自然邊坡開挖及二階段圍堰施工。

以往壽豐溪上游山區過度伐木及挖採白雲石礦引致山崩頻繁，造成河床嚴重淤積及氾濫成災，加上隧道南口上方之平林圳因淤積而致洪水溢流，灌入鐵路河底隧道南洞口，洪流從南洞口往北沖達豐田。根據壽豐溪重現期100年洪峰流量之水理分析結果顯示，花東線鐵路溪口隧道工址上游之壽豐溪洪水已含高濃度輸砂量，洪水攜帶砂礫容量幾乎達到飽和(中興工程顧問股份有限公司，2011a)。細部設計擬定隧道增長為3,780 m(含出土段640 m)，於明挖覆蓋河底隧道頂部回填土石以恢復原有河床，並設置保護工，可避免壽豐溪之河床遭到沖刷。

### (二)光復隧道

光復隧道(如圖七)地質為沖積礫石層，以礫石或巨礫夾含粗砂為主，透水性極佳。隧道沿線穿越鳳林遊憩區、馬太鞍溪及隧道南洞口與台九線重疊段等地區，覆土最深達約15 m。與溪口隧道相同，綜合考量上述等因素，隧道開挖以明挖覆蓋工法為主，部分有特殊考量之區段，如穿越堤防段(北段約170 m，南段約120 m)，則採用與溪口隧道相同設計之鑽掘隧道工法通過。頂拱襯砌厚度為80 cm。其防水設計亦同溪口隧道。穿越馬太鞍溪段，亦採自然邊坡開挖及二階段圍堰施工。馬太鞍溪底床主要為粒徑20-270 mm之石礫，砂含量20%-60%，上游段溪底傾向刷深。根據馬太鞍溪重現期100年洪峰流量之水理分析結果及改變上游輸砂入流量之分析結果顯示，河底隧道頂部河床沖刷深度與流量大小有關，但大致不因上



圖六 溪口隧道示意圖



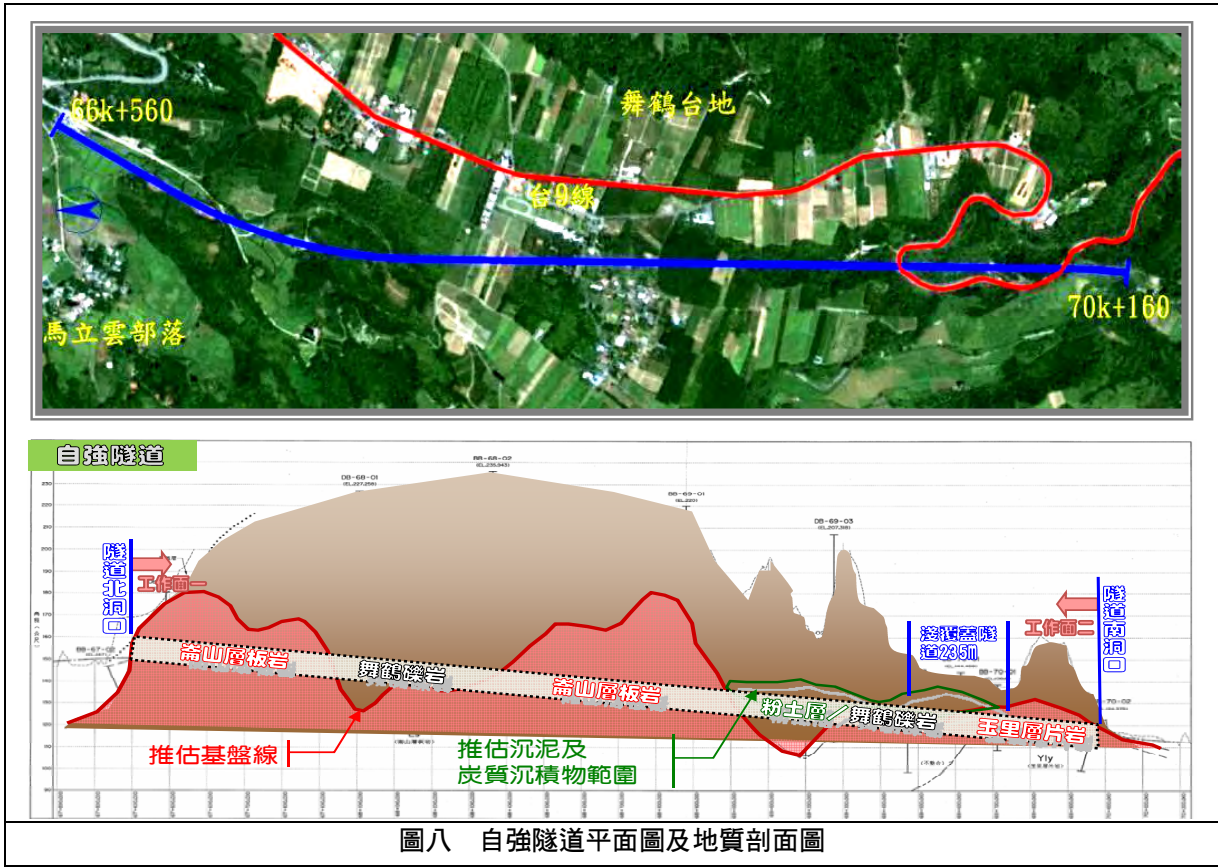
圖七 光復隧道示意圖

游來砂量多寡而改變。明挖覆蓋施工完成之光復河底隧道頂部回填土石以恢復原有河床，將不致於衍生河床淘刷問題(中興工程顧問股份有限公司，2011b)。

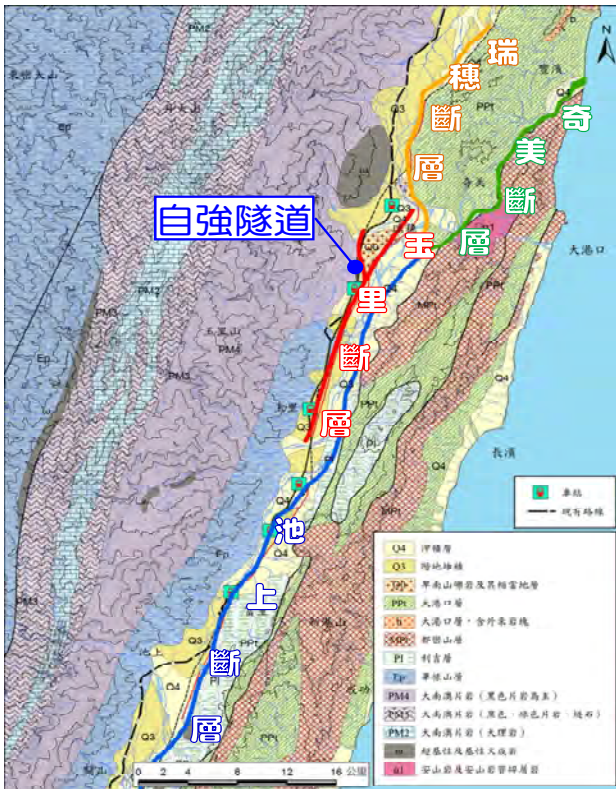
### (三)自強隧道

自強隧道(如圖八)屬山岳隧道，配合擴建雙軌，於既有自強隧道西側新建隧道長約2,667 m。隧道沿線地質屬中央山脈變質岩，以黑色片岩及綠色片岩為主。隧道遭遇岩層自北往南有覆蓋層、崙山層板岩、舞鶴礫岩、崙山層板岩、古崩積層(沉泥層)、玉里層片岩等。即主要地層包括PCCR之：(1)現代沖積層—C岩類；(2)晚更新世舞鶴礫岩—D岩類；(3)中生代大南澳片岩—A岩類。由此可知，地質狀況多變複雜。依PCCR-system岩體分類與隧道支撐系統設計，一般岩盤分為A、B岩類，軟弱岩盤分為C、D岩類，特殊地盤如擠壓或湧水等。自強隧道崙山層板岩或玉里層片岩等為A岩類，設計岩體類別分為A<sub>II</sub>~A<sub>VI</sub>四級，對應I~IV級支撐；舞鶴礫岩為D岩類，設計岩體類別分為D<sub>II</sub>~D<sub>III</sub>二級，對應II與III級支撐；古崩積層(沉泥層)為C岩類，設計岩體類別為C<sub>III</sub>級，對應V級支撐。

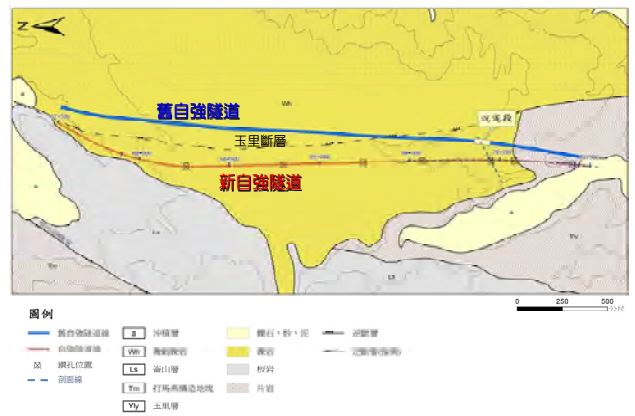
此外，本隧道鄰近玉里斷層，該斷層係為一左移斷層並兼具逆移分量，呈北北東走向，由瑞



圖八 自強隧道平面圖及地質剖面圖



圖九 自強隧道區域地質圖(地質圖底圖取自中央地質調查所, 2012)



圖十 自強隧道平面地質圖

穗鄉瑞良村向南延伸至玉里鎮客城里，全長約23 km。區域地質圖及平面地質圖詳圖九及圖十。自強隧道新建隧道位置於規劃設計時，均已考量避開斷層位置。

自強隧道遭遇的沉泥層即是古沖積平原之沉積物，預估遭遇沉泥層里程為69k+000~69k+300。根據既有自強隧道之施工經驗，隧道南段施工時遭遇沉泥段，受開挖擾動產生裂紋，致地下水入侵，軟化周圍土層，甚至變成泥漿流

失。採傳統工法施作，無法完全阻止沉泥流失，以致圍岩鬆動區域擴大，增加支保荷重，導致支撐擠壓隧道抽坍，而於1980年10月暫停施工。後引進新奧工法施工，以灌漿及先進支撐方式逐步處理前進，直至198年4月才順利貫通。

由於花東縱谷路幅有限，因此鐵路選線規劃無法避開此一困難沉泥段，由於本隧道斷面遠大於當初之舊自強隧道，經地質調查研判，新建自強隧道路線向西側調整，初步評估可降低遭遇沉泥段之範圍。

隧道南洞口處之原設計明挖覆蓋段約235 m 施工，以調整施工工法隧挖方式已順利通過。目前隧道南口開挖面已進入沉泥層，採用機械挖掘及上下半斷面分階開挖方式施作、並檢討調整剛性支撐系統(含擴挖基腳)、地盤改良灌漿及加強監測作業等對策處理之。雖已順利通過頂拱厚度較厚之沉泥層，惟因頂拱沉泥層厚度較薄，且上方舞鶴礫岩層因氣候異常長期豪大雨關係，致地下水飽和等多重因素之影響，隧道施工面臨挑戰。

經諮詢顧問建議與檢討評估，除於隧道內施作分層灌漿外，並於隧道地表位置施作灌漿作

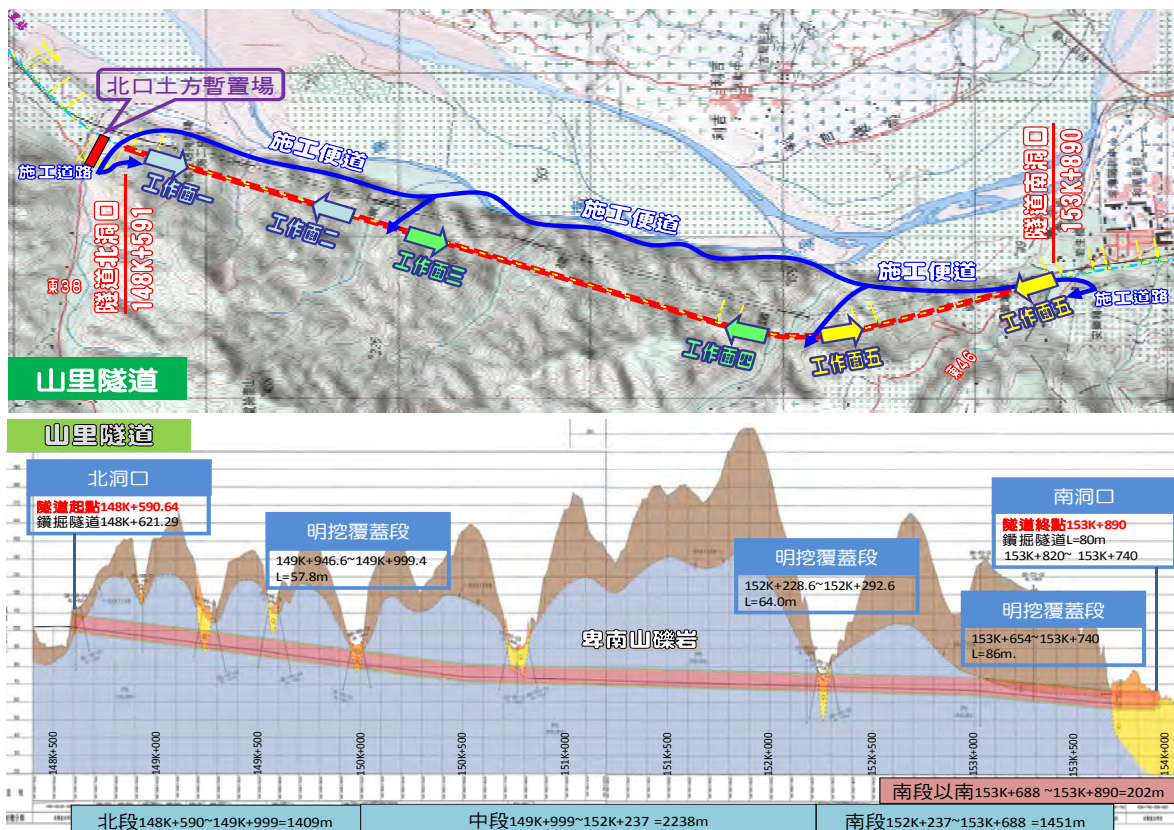
業，主要為固結隧道頂拱上方6 m範圍形成岩拱。另採多項輔助工法，於擠壓變形量較嚴重區段改採H200型鋼支保、加噴噴凝土厚度、自鑽式岩栓、上半斷面基腳擴挖回填等方式支撐補強，以便有效抑制下半斷面洞台開挖再次擠壓變形或沉陷問題，目前隧道已恢復施工加緊趕工進。

(四)山里隧道

山里隧道(如圖十一)屬山岳隧道，配合擴建雙軌，於既有山里隧道西側新建隧道長約5,300 m。山里隧道沿線地質除洞口及淺覆蓋段外均屬卑南山礫岩，以厚層礫岩為主，膠結程度不一，偶夾薄層砂岩與泥岩，礫石粒徑較自強隧道為小，多為變質岩或砂岩，少部份為石灰岩及火成岩。

依PCCR-system岩體分類與隧道支撐系統設計，山里隧道卑南山礫岩為D岩類，設計岩體類別分為D<sub>I</sub>~D<sub>III</sub>三級，對應I~III級支撐；其他，岩體類別則為E級，對應IV級支撐。

根據農委會水保局資料顯示，原規劃之山里隧道南洞口落於土石流潛勢溪流警戒範圍內(編號東縣DF126土石流潛勢溪流)，為降低隧道洞口受土石流之影響，細部設計將幾個隧道高程降



圖十一 山里隧道平面圖及地質剖面圖

低(原先山里隧道包含一～七號隧道)，使成為一個長隧道，南洞口位置南移且隧道增長約1,040 m隧道(含假隧道)，使南洞口位置繼續延伸。

山里隧道段東側緊鄰卑南溪河床，若僅由北口及南口2處工作面施作，而不另闢工作面，則預估土建工期將無法滿足既定提前通車工期之目標。因此經實地勘查現地條件後，研擬可沿卑南溪西岸高灘地闢建施工便道，於侵蝕山溝淺覆蓋區增闢2處工作面，較有利於整體施工之配置。規劃之施工便道，以鋼棧橋跨溪方式連接至洞口動線，另以施工橫坑方式增加隧道施工工作面。

## 五、結語

花東縱谷地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊碰撞帶，88年921大地震對台灣土地造成重大的傷害，近年來全球氣候異常，雨量難測，造成土石流潛勢溪流劇增，花東縱谷上三大主要河川花蓮溪、秀姑巒溪及卑南溪，坡陡流急沖蝕劇烈嚴重淤積。這幾年東部多處地區降下刷新歷史紀錄的雨量，引發嚴重水患，常造成重大災情。

2009年12月19日於花蓮外海發生芮氏規模6.9之地震，及2010年3月4日於高雄甲仙發生芮氏規模6.4之地震，所引發之震度對於建物所帶來之破壞程度，亦值得警惕。特別是經過88水災後，台灣地形地貌已經明顯變化。對於隧道和跨河橋梁等新建工程，無論在設計和施工均應提高安全標準。

未來電氣化工程完成後，列車營運速度將由現行110 km/hr提昇為130 km/hr，可大幅縮短花東線行車時間。花東線鐵路電氣化計畫期程由7年改為5年，顯現施工管控的重要性與困難度。整個花東線鐵路電氣化計畫掌握了地質、水文，兼顧了自然景觀生態、地方文化特色，符合東部永續發展計畫「綠色運輸」之交通政策目標。

## 參考文獻

- 中央地質調查所 (2010)，.臺灣活動斷層分布圖，中央地質調查所出版。
- 中央地質調查所(2012)，地質資料整合查詢，<http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm>。

中興工程顧問股份有限公司 (2011a)，壽豐溪花東鐵路工址河床沖淤水理分析報告，交通部鐵路改建工程局。

中興工程顧問股份有限公司 (2011b)，.馬鞍溪花東鐵路工址河床沖淤水理分析報告，交通部鐵路改建工程局。

交通部鐵路改建工程局 (2008)，花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫綜合規劃報告，交通部鐵路改建工程局。

交通部鐵路改建工程局 (2010)，花東線鐵路整體服務效能提升計畫綜合規劃報告，交通部鐵路改建工程局。

何春蓀 (1986)，臺灣地質概論臺灣地質圖說明書增訂第二版，經濟部中央地質調查所出版。

張吉佐、侯秉承、李民政等 (2002)，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(第三期九十一年度)－工作項目D：台灣岩體分類與隧道支撐系統之建立，公共工程委員會。

張吉佐、侯秉承、李民政、李怡德、張博翔 (2004) 岩體分類RMR與Q法之延伸，地工技術，第99期，第15-22頁。

陳培源 (2006)，台灣地質，台灣省應用地質技師公會出版。