

圖一 中央山脈和平溪以北地區地質圖



照片一 蘇澳層，板岩偶夾薄層變質砂岩。蘇澳豆腐岬海濱



照片二 南蘇澳層，板岩(下方)夾變質輝綠岩(上方)。臺灣石粉產業道路

脈(照片二)。板岩中發育良好的板劈理，大略呈東西走向。本層由蘇澳南方海岸向西延伸，經南蘇澳山、小帽山至南澳北溪中游。

3.3 東澳片岩

以石英雲母片岩為主，分為三種主要的岩性組合：第一種出露於烏岩角以北，岩性以雲母片岩為主，含薄層綠泥石片岩與變質燧石層，夾2層各厚約50至70公尺以及數層厚度數公尺的大理岩(照片三)。第二種出露於烏岩角附近，岩性為變質燧石層偶夾透鏡狀綠泥石片岩，但向西延伸變質燧石層的厚度逐漸變薄。第三種出露於烏岩角至東澳漁港之間，岩性以石英雲母片岩為主(照片四)，偶夾薄層綠泥石片岩。此外，本層中出露兩個角閃岩體：北邊的岩體由烏岩角海岸向西北延伸至西帽山，呈條帶狀分布；岩體長約7公里，寬約200至1,000公尺。角閃岩的主要礦物為普通角閃石、斜長石、黝簾石與斜黝簾石等，產狀為綠至深綠色、塊狀、且具發育良好的片理。南邊的角閃岩體位於楓樹山正北方約2.5公里處。



照片三 東澳片岩，雲母片岩與綠泥石片岩夾白色大理岩。烏岩角北方蘇花公路



照片四 東澳片岩，綠泥石片岩與雲母片岩有發育良好的片理。烏岩角西方蘇花公路

3.4 楓樹山角閃岩

以角閃岩與角閃石片岩為主，主要礦物為普通角閃石、斜長石、黝簾石與斜黝簾石等。野外有三種不同的產狀：一種有發育良好的片理，綠色至深綠色的普通角閃石的長度有時超過1公分；一種為塊狀、片理不明顯，礦物顆粒小，呈黃綠色至灰綠色；另一種為礦物顆粒小，顏色呈暗綠色，具發育良好的片理。此三種角閃岩常呈互層之形式(照片五)，在粉鳥林地區最為明顯。根據以往的調查結果，角閃岩的原岩可能為輝長岩或玄武岩。本岩體分布於東澳村與南澳村之間，形成一長16公里，寬約1,000至1,500公尺，呈東西向帶狀分布，由粉鳥林海岸向西經楓樹山至南澳北溪中游。

3.5 源頭山片麻岩

原岩為花岡閃長岩，其與圍岩接觸部份因變質成片麻岩，顯現片麻岩理，但岩體中央部位保留火成岩特徵。片麻岩為淡灰色中至粗粒，主要的礦物組成為長石、白雲母、黑雲母與石英。片



照片五 楓樹山角閃岩，三種不同產狀的種角閃岩。
東澳粉鳥林海濱

麻岩中的片理較不明顯，長石顆粒較大且含量多於石英，而片狀礦物含量少，構成的劈理不連續。由肉眼可分出三種不同種類的片麻岩：包括(1)葉狀黑雲母片麻岩，石英極少，由斜長石及雲母條帶所構成；(2)花岡岩類片麻岩，雲母為不規則的晶體，片麻岩理不顯著，仍保留火成岩結構；(3)群聚狀黑雲母片麻岩，黑雲母成粗片狀，岩石顆粒較上兩種為粗。源頭山片麻岩呈東西方向延伸，自烏石鼻海岸向西延伸至鹿皮山附近，在南澳北溪剖面最連續。

在片麻岩與南澳嶺片岩的接觸帶，出露許多角閃岩捕獲岩塊(照片六)，以南澳北溪的河谷出露最多。捕獲岩塊是岩漿在侵入圍岩時所抓到的岩塊，其大小不一，外形以角狀或次角狀為主。岩塊內有明顯的葉理，多為黑白相間，葉理有平行排列者，亦有褶皺者，葉理的位態並不與圍岩的葉理面平行，岩塊外形的長軸則大多平行於片麻岩的片理。捕獲岩塊與圍岩間常可看到反應帶，反應帶內通常有兩種產物，一種為黑雲母或黑雲母環，另一種則為淡色岩，淡色岩為粗粒並顯現偉晶岩組構。

源頭山片麻岩內含有偉晶岩脈與變質輝綠岩脈，岩脈厚度為數公分至數十公分，長度則為數公尺至十數公尺。偉晶岩的主要成分為石英、斜長石、紋長石、正長石與白雲母，偶含電氣石與石榴子石等次要礦物。變質輝綠岩脈，厚度為數十公分至數公尺，外形呈平板狀。岩脈內礦物大多為細至中粒，主要成分為斜長石、綠簾石、榍石、綠泥石與方解石。



照片六 源頭山片麻岩，淡灰至淡棕色片麻岩夾灰黑色角閃岩捕獲岩塊。南澳北溪。



照片七 武塔片岩，由右至左為雲母片岩、綠泥片岩、石英片岩與雲母片岩。南澳溪出口南方海濱

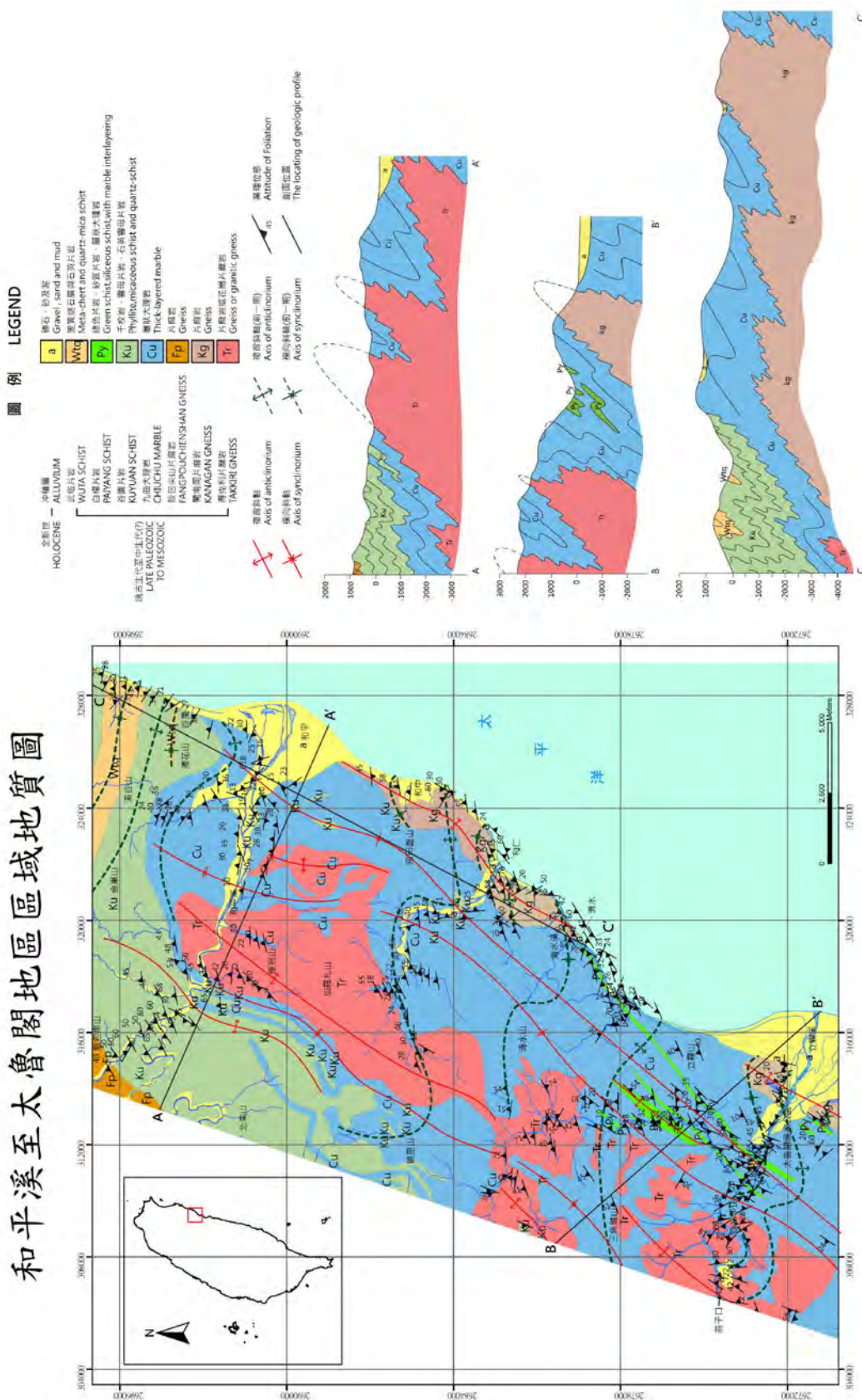


照片八 飯包尖山片麻岩。金洋村西方南澳南溪河谷

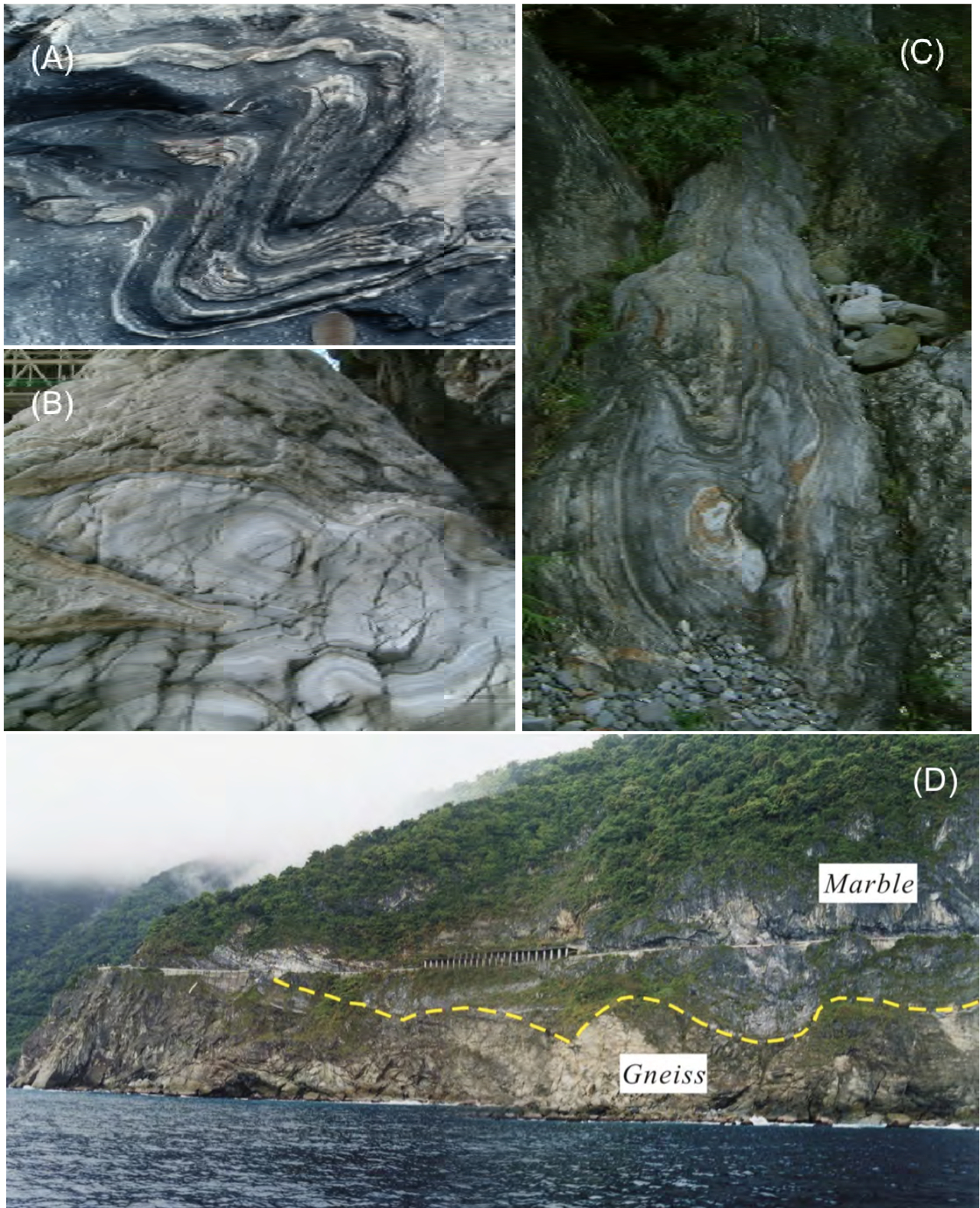
3.6 南澳嶺片岩

以石英片岩或石英長石片岩為主，偶夾雲母片岩。主要的組成礦物為石英、長石、白雲母、石墨等。由於雲母類礦物較少，野外不容易與正片麻岩區分，但片理發育較好。本層呈東西方向帶狀分布，由南澳嶺向西經南澳北溪至鹿皮山。蘇花公路上有較好的露頭。

和平溪至太魯閣地區區域地質圖



圖一 中央山脈東翼和平溪至太魯閣地區區域地質圖與剖面圖

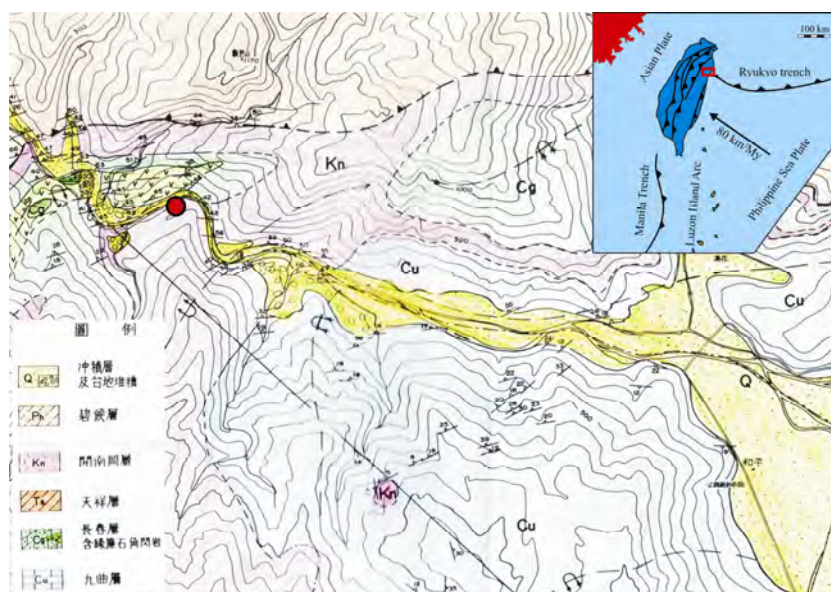


(A)圖為九曲大理岩中的第三型褶皺干涉圖像，(B)圖為九曲大理岩與開南岡片麻岩之第一型褶皺干涉圖像，(C)圖為長春停車場下方片麻岩與大理岩穿插出露之第一型褶皺干涉圖像，(D)圖則為由海上遠望蘇花公路小清水段出露剖面，拍照方向為西南方。照片中可清楚看到大理岩覆蓋於片麻岩之上，並發育東西走向之褶皺構造。

圖三 本研究區域的褶皺干涉露頭照片

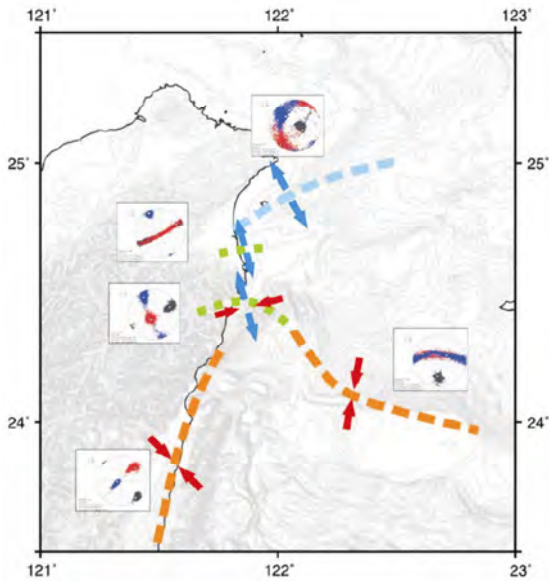
海岸平原、西部麓山帶、中央山脈(雪山山脈與脊樑山脈)、花東縱谷與海岸山脈(Ho, 1986)。同時，由於斜向聚合作用來自東邊，臺灣造山帶的熱流量與變形強度由西向東逐漸增加(Yen, 1967; Ho, 1986; Lee and Cheng, 1986; Tsao et al., 1993, 1998; Chen and Wang, 1995; Yui, 2005; Beysaac et al., 2007; Chi and Reeds, 2007)。現今臺灣造山帶的地層分布，除了脊樑山脈東翼為古生代—中生代大南澳變質雜岩基盤(包含黑色片岩、綠色片岩、矽質片岩、大理岩、片麻岩、變質花崗岩、角閃岩、蛇紋岩與變質基性岩)，由其岩性分布的差異可分為西側太魯閣帶與東側玉里帶(Yen, 1963)，其他部分原為第三紀以來的沉積蓋層，之後受到弧陸碰撞的影響，西部麓山帶成為未變質的褶皺逆衝帶，雪山山脈與脊樑山脈因受到較高的溫壓作用，形成不同程度的變質岩，從硬頁岩、板岩到片岩。而海岸山脈為呂宋島弧的向北延伸，所以，花東縱谷為菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的交界(Ho, 1988)。詳細而言，區域葉理面於脊樑山脈一般呈現東北走向，大致平行山脈方向，而其傾沒方向從西邊的向東傾斜到東邊的向西傾斜，呈一扇狀構造(Stanley et al., 1981; Faure et al., 1991; Clark et al., 1992)。但是，由於斜向碰撞點的關係，葉理面走向於蘇澳到和平之間，由東西走向逐漸轉為東北—西南走向(Lu and Malavieille, 1994)。

花蓮和平地區位於臺灣東北部的脊樑山脈，正好處於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊隱沒反轉的轉折帶(圖一右上方插圖)，演化史複雜。和平地區的岩層，西部一部分為板岩帶，其餘部分皆為大南澳片岩的太魯閣帶。和平地區地質構造之年代由東向西遞減，由東部之古生代晚期至中生代之地層向西演化成為中新世及現代之地層。由於和平地區位於現今隱沒反轉的轉折帶，新生代受弧陸碰撞與隱沒反轉作用，造山演化史複雜，曾歷經擠壓碰撞，由向西的逆衝擠壓轉成向東的背衝褶皺，形成扇狀構造(焦中輝, 1991)，之後，受到隱沒反轉與弧後張裂，逐漸形成張裂構造。同時，由於碰撞點以北的南北擠壓關係，和平以北的葉理面為東西走向。藉由區域震源機制的應力反演，其結果顯示現今花蓮以南仍處於西北—東南向的碰撞擠壓，花蓮至蘇澳之間為東西向擠壓與南北向拉張的走向滑移應力場，而蘭陽平原中央為西北—東南向拉張的正斷層應力場(圖二，黃信樺, 2007)。同時，於花蓮以北的地區，GPS分析結果也顯示為西南方向的位移場(Yu et al., 1997; Rau et al., 2008)。綜合地質演化史、現今應力場與速度場之研究結果顯示和平地區處於活動碰撞與碰撞後期的轉換帶，現今的應力場多為東西向擠壓與南北向拉張的走向滑移應力場。



右上方插圖為臺灣地體構造圖，紅色區塊標示花蓮和平區。紅色圓點標記井場位置

圖一 花蓮和平溪地質圖(焦中輝, 1991)



取自黃信樺(2007)區域震源機制的應力反演結果，紅色箭頭為擠壓方向，藍色箭頭為拉張方向。投影圖中黑點為最大主應力，紅點為次要主應力，藍點為最小主應力。

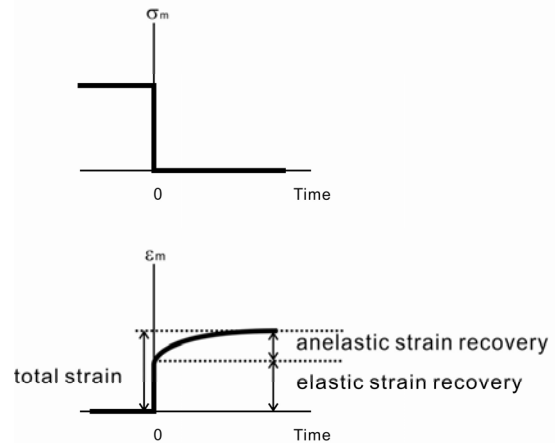
圖二 臺灣東北部的應力分布圖(黃信樺，2007)

三、非彈性應變回復原理與量測方式

首先，說明ASR原理。ASR全名是非彈性應變回復法(Anelastic Strain Recovery, ASR)。當岩芯被取到地表時，岩芯會因為解壓而發生應變回復。應變回復的方向與岩芯於地下所承受的應力方向有關，而應變回復大小與岩芯於地下所承受的應力大小以及材料勁度有密切的關係(式1)，因此可以藉由量測岩芯的應變回復來估計岩芯於地下所承受的應力方向與大小。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \dots\dots\dots(1)$$

應變回復可分為彈性應變回復(elastic strain recover)與非彈性應變回復(anelastic strain recover)，彈性應變回復會在岩心進入岩心筒的瞬間完全釋放，非彈性應變回復會隨時間逐漸釋放(圖三)，因此只能量測到非彈性應變回復(Matsuki, 2008)。且因非彈性應變量與總應變回復量之間為一固定比例(Voight, 1968)，故能透過量測非彈性應變來預估總應變量。一般而言，非彈性應變規模取決於量測時間長短，現地應力大小與材料的勁度(stiffness)。應力釋放後，非彈性應變皆小於彈性應變。因此，明顯地，



圖三 應變回復示意圖。當應力釋放，彈性應變瞬時釋放完畢，非彈性應變會隨著時間而逐漸釋放

非彈性應變回復法較適用於高應力的狀況，例如地下深處，或勁度相對較小的岩石，例如軟弱的岩石。

仔細來說，對於均質黏彈性材料，當現地應力、水壓與溫度隨時間釋放而改變，其黏彈性回復變形可分為兩部分：剪力與體積變形模式(Matsuki, 1991)。隨著時間延長，剪力($Jas(t)$)與體積($Jav(t)$)變形模式的非彈性回復柔量可分別定義為

$$e_{ij}(t) = Jas(t)S_{ij} \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_m(t) = Jav(t)(\sigma_m - p_f) + \alpha_T \Delta T(t) \dots\dots\dots(3)$$

其中 S_{ij} 為偏差應力， σ_m 為平均應力， $e_{ij}(t)$ 非彈性偏差應變， $\epsilon_m(t)$ 為非彈性平均應變， p_f 為孔隙水壓， α_T 為岩石的熱膨脹係數， $\Delta T(t)$ 為表溫度改變量。利用線性黏彈性對等原理，對給定的XYZ三軸，其方向餘弦為l, m, n的非彈性法向應變(anelastic normal strain)為

$$\begin{aligned} \epsilon_a = & (1/3)[(3l^2 - 1)\sigma_{xx} + (3m^2 - 1)\sigma_{yy} \\ & + (3n^2 - 1)\sigma_{zz} + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} \\ & + 6nl\tau_{zx}]Jas(t) + (\sigma_m - p_f)Jav(t) \\ & + \alpha_T \Delta T(t) \end{aligned} \dots\dots\dots(4)$$

此方程式說明非彈性應變回復取決於現地應力張量，非彈性柔量，孔隙水壓，溫度變化量與熱膨脹係數，因此提供了ASR的理論基礎。如果知道孔隙水壓、熱膨脹係數、溫度變化量與非彈性柔量，量取至少六個不同方向的非彈性法向應變，則三維的現地應力張量將可以計算獲得。

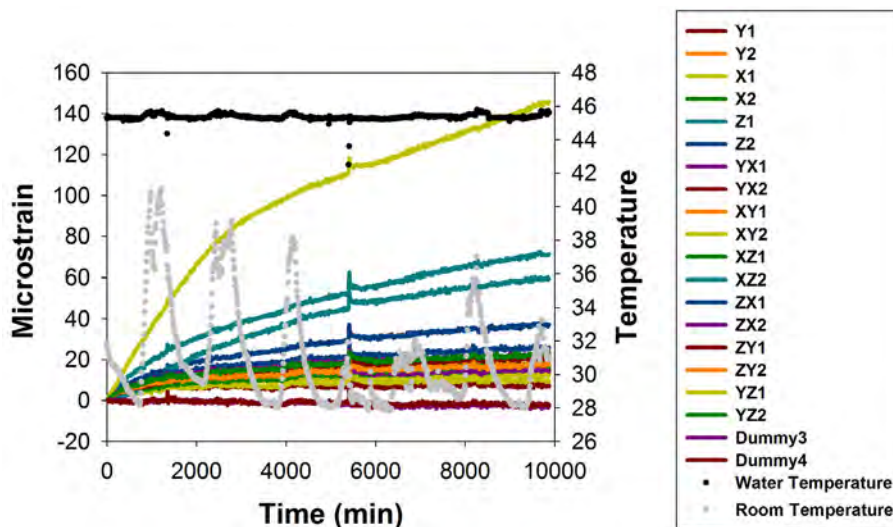
本。為了盡可能記錄到較早且較完整的非彈性應變回復曲線，ASR實驗使用剛鑽取的岩芯進行量測，但如果4個樣本中最早開始進行量測樣本的應變回復量未達到穩定狀態，將延後進行下一組的ASR實驗，直至最早量測樣本的應變回復達到穩定狀態，才將最早的樣本卸除，放入剛鑽取的岩芯樣本，進行新一組的ASR實驗，其結果將導致樣本的深度間距增加。氣溫、恆溫槽水溫與變質花崗岩空白對比樣本的應變變化也同時量測，以利後續分析時校正使用。為監測系統是否飄移現象，選取先前隧道開挖但未風化之變質花崗岩岩渣作為空白對比樣本，且為了避免溫度變化效應，此空白對比樣本也置於同一恆溫水槽內。氣溫與恆溫槽水溫是利用白金熱感應式溫度計進行量測(解析度 0.1°C ，精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)。數位應變資料與溫度資料是藉由16位元類比數位轉換器連接到資料擷取器，這些資料每10分鐘量測11次，記錄其平均值。通常，岩芯不到1小時即可回收到地表，之後大約花3小時將樣本黏貼應變計、密封與連接至資料擷取器，所以，大約在岩芯應力開始釋放之後4小時，開始記錄非彈性應變回復資料。一般而言，應力釋放之後，非彈性應變回復大約需要幾週才會釋放完。但是，對於現地應力分析，不需要完整的非彈性應變回復曲線，只要回復應變達到穩定且應變規模足夠進行分析即可。

$$\sigma_i = e_i(t)/Jas(t) + \varepsilon_m(t)/Jav(t) + p_f \dots\dots(6)$$

四、實驗數據分析與結果

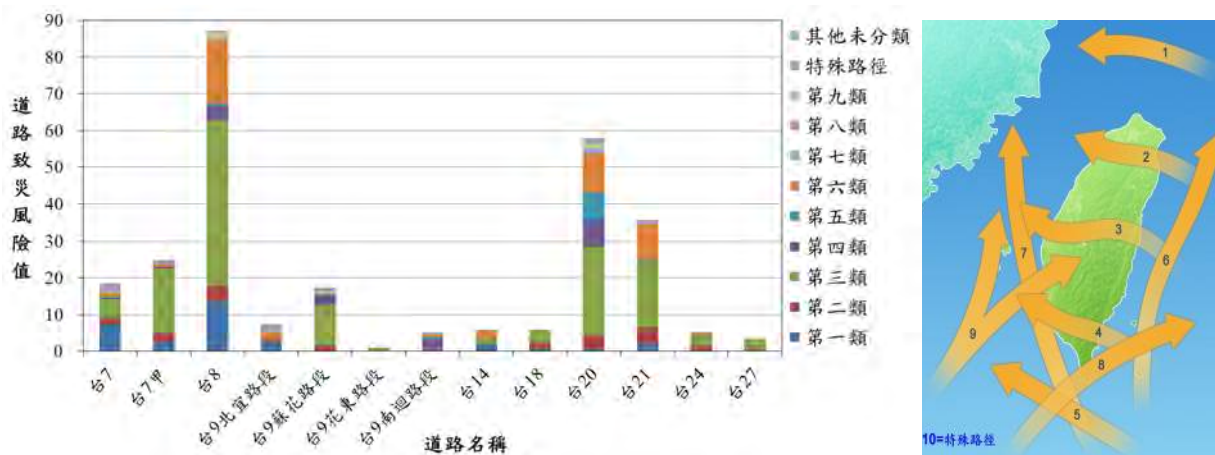
利用此井場的岩芯，我們進行了10個ASR實驗。此論文主要目的在介紹如何利用ASR實驗方法決定三維現地應力，因此，本文僅就一個樣本做說明並探討其結果。接下來，我們將利用530.39-530.60 m的ASR樣本為例，說明分析方法與三維應力場評估結果。此樣本的數據如圖七，量測時間近乎7天，除了5500 min處，因電壓不穩造成訊號異常，其他時間的數據皆屬正常。同時，恆溫水槽效用良好，可將水溫變化控制在 0.13°C 以內，所以不需要進行溫度校正。空白對照組樣本數據沒有明顯飄移的現象(<5 microstrains)，所以，也不需要進行飄移校正，因此供後續分析的數據如圖八。

從圖八可以明顯看出，隨著時間增加，此ASR樣本所有方向的非彈性應變都是向外膨脹的，所有曲線都是平滑並有類似的趨勢，同時其回復量增加率隨著時間增加而逐漸降低，而且於近7天的量測時間，其回復量達到近乎穩定狀態。另一方面，於不同方向上的應變規模有所不同，其數值介於 $6\sim 140$ microstrains。雖然其應變回復量遠小於臺灣沈積岩200-500 microstrains的回復量(Lin et al., 2007)，但因本岩芯為變質花崗岩，而前人實驗結果(Matsuki, 2008)顯示花崗岩剪力與體積非彈性回復柔量遠小於一般沈積岩的非彈性回復柔量，如此可以預期變質花崗岩的非彈性回復柔量

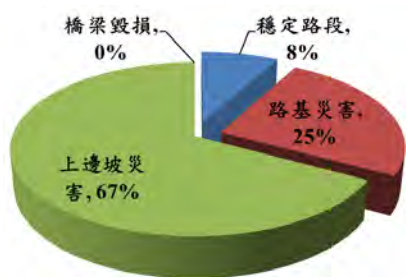


18個應變計數據、2個空白對照應變計數據、水溫與氣溫的時間數據

圖七 ASR原始數據



圖一 不同颱風路徑對山區省道致災的風險值(修改自陳韻如等，2011)



圖二 台14甲線及台8線東段2001-2011年間易致災路段的主要災害類型統計(劉世桐，2009；傅立祥，2011)

2.1 台14甲線

圖三(a)為台14甲線里程32.8-41.6k間地層分佈與主要地質構造，主要的地層為大禹嶺層與廬山層，大禹嶺層岩性以板岩、千枚岩與變質砂岩為主，廬山層以板岩、薄砂岩與板岩互層為主。公路沿線附近劈理呈北偏東走向，向東南傾斜，因而與立霧溪上游塔次基里溪東南向邊坡形成順向坡。圖三(b)為2001-2011年間災害修復位置、修復經費與次數統計資料。路基災害常發生於里程33.7k、34.0-34.3k、34.5-34.8k、36.3-37.3k、38.8-40.0k、40.3-40.5k、40.8-41.0k、41.3-41.7k等處；另按洛韶工務段巡查紀錄，本養護路段在里程33.2k、33.7k、34.6-34.8k、38.6k、39.2k、39.8k、41.3-41.7k等處路面裂縫、路拱變形以及路側構造物錯動等情形仍持續發生，顯示里程36.3-37.3k路段經災修養護，近年已趨於穩定。路基災害與公路下邊坡的岩體滑動與岩屑崩滑有關，且為持續進行的潛移型態。經災修養護後，除里程41.3-41.7k外，其餘路段

下邊坡之岩體滑動與岩屑崩滑，或其對公路之影響自2001年後已有趨緩。比對災修資料與巡查紀錄獲知，里程34.6k(克難關附近)、38.6-39k(落鷹山莊附近)、40-40.6k及41.3-41.7k(大禹嶺東南側)，均有潛勢崩場地，這些路段已納編入中長期改善計畫逐年改善。

公路上邊坡災修位置分布在里程39.1k、40.8-41.3k等處。按洛韶工務段巡查紀錄，里程34.6k、41.3-41.7k處路段落石有加劇趨勢，該位置與前述路基災害潛勢崩場地對應，顯示該處公路上、下邊坡皆在崩塌範圍內，係受立霧溪上游塔次基里溪向源侵蝕(Turowski et al., 2008; 吳東錦，2009; Damien et al., 2011)影響所致。

2.2 台8線東段

圖四(a)為台8線公路東段里程111.9-190.0k地層分佈與主要地質構造，主要的地層包括大禹嶺層、黑岩山層、碧綠層、天長大理岩層、白楊片岩層、谷園片岩層、得克利片麻岩層與九曲大理岩層等，大禹嶺層岩性以板岩、千枚岩與變質砂岩為主，黑岩山層主要為板岩、千枚岩、變質砂岩與大理岩，碧綠層以千枚岩、變質砂岩與變質燧石為主，天長大理岩層主要為透鏡狀大理岩體，白楊片岩層主要為綠色片岩、矽質片岩與層狀大理岩，谷園片岩層以千枚岩、雲母片岩與石英雲母片岩為主，得克利片麻岩層主要為片麻岩及花崗片麻岩，九曲大理岩層主要為厚層大理岩。地層走向主要為東北向，因複向斜與複背斜構造發達，傾斜向東或向西皆有之。

圖四(b)為台8線東段里程111.9-190.0k路段2001-2011年間災害修復位置、修復經費與次數統計資料。路基災修位置分布在里程112-117k、123-128k、133-136k、149-151k、155k、163k、168k等處。另按洛韶工務段巡查紀錄，本養護路段在里程112k、115-119k、120.5k、124-128k、143k、147k、149-150k及154.3k等處路面裂縫、路拱變形、路側構造物錯動等情形仍持續發生，顯示這些路段下邊坡之岩體滑動與岩屑崩滑以潛移型態持續進行。其中里程115-119k路段已分別辦理116.7k與119k等兩處地質探查及整治委託設計，里程120.5k與124-128k路段於2011年辦理改善，其餘路段則納編入中長期改善計畫逐年改善。

公路上邊坡災害位置主要分布在里程130-138k、146-150k、154-158k、161-166k、168k及177-186k等處，其中里程170-186k路段以落石型態為主，與林銘郎(1992)之研究結果相近；其餘路段則多為岩體滑動或岩屑崩滑的型態。其中里程168k(白楊步道入口)及178.5k(燕子

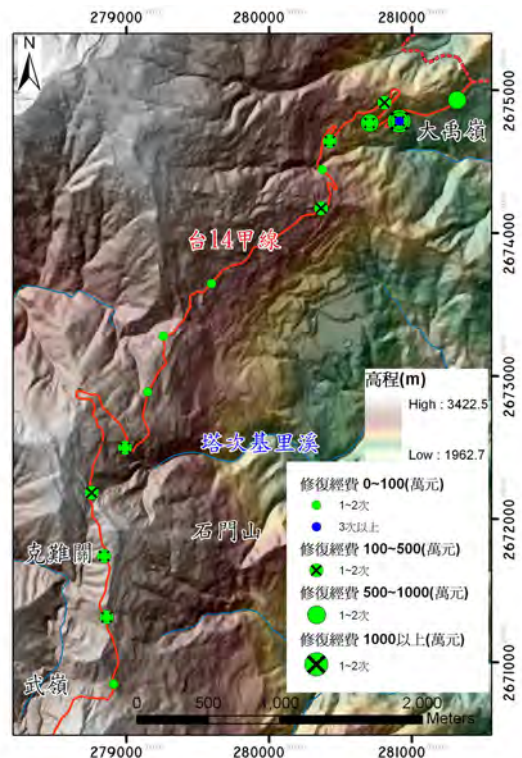
口東端)兩處分別於2009年10月9日、2011年10月7日發生6萬與2萬立方公尺規模之崩坍，已辦理168 k明隧道復建工程與178.5k災修工程；另外里程116.7k與124-128k路段於2011年辦理改善中，其餘路段亦已納入中長期改善計畫。

三、IRI值與路基災害之相關性

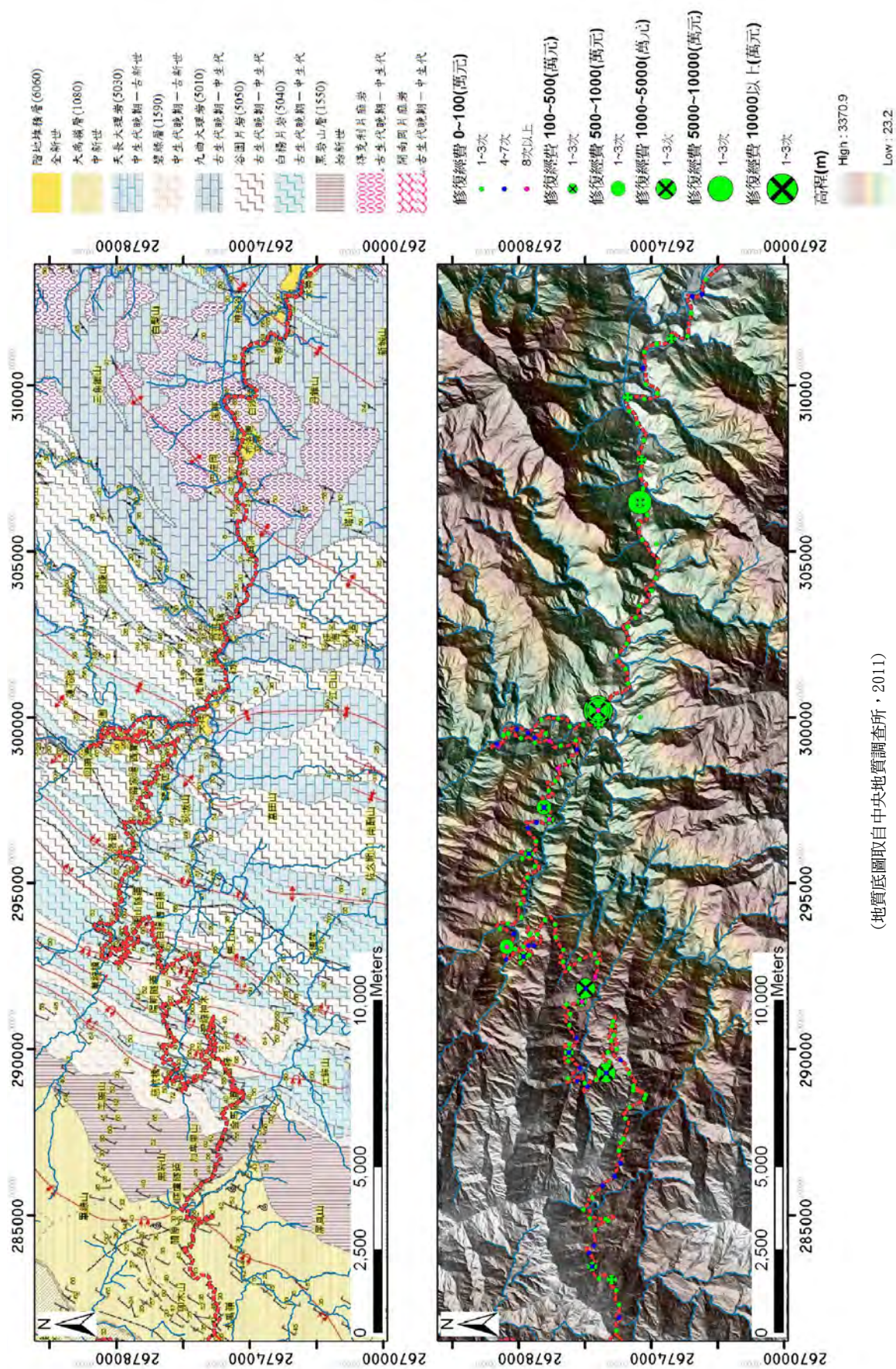
公路總局為有效管控鋪面、彎道、超高等改善經費之應用，自2007年3月起每年皆採路面檢測車檢測轄管路面雙向各一次。檢測所得數據包括國際糙度指標(International Roughness Index, IRI)及車轍深度，分別可代表鋪面縱、橫向之平坦度，並以1 km為分析單元，針對IRI及車轍深度檢測結果逐段進行分析、探討其分布情形並進行排序，列出平坦度較差路段，供養護單位擬訂年度養護計畫之參考(公路總局材料試驗所，2007)。



(地質底圖取自中央地質調查所，2011)



圖三 台14甲線里程32.8-41.6k附近(a)地質圖(左圖)、(b)地形與2001-2011年災害修復統計資料(右圖)



(地質底圖取自中央地質調查所·2011)

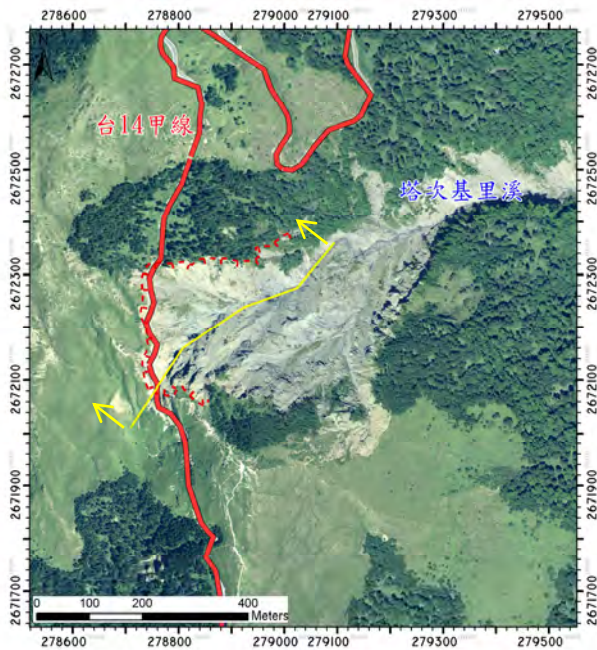
圖四 台8線里程32.8-41.6k附近(a)地質圖(上圖)、(b)地形與2001-2011年災害修復統計資料(下圖)



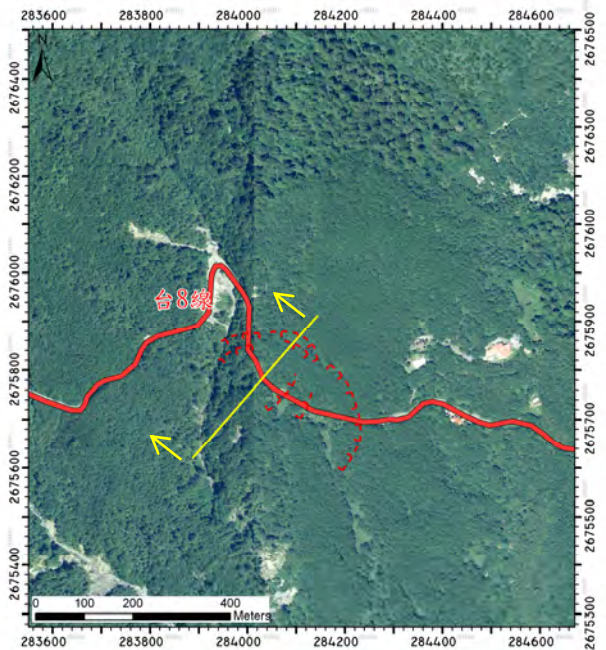
(a) 照片



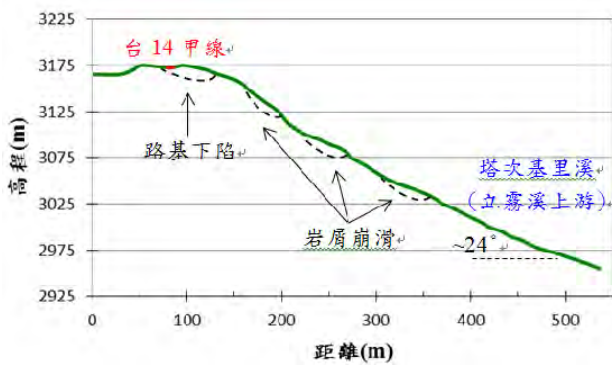
(a) 照片



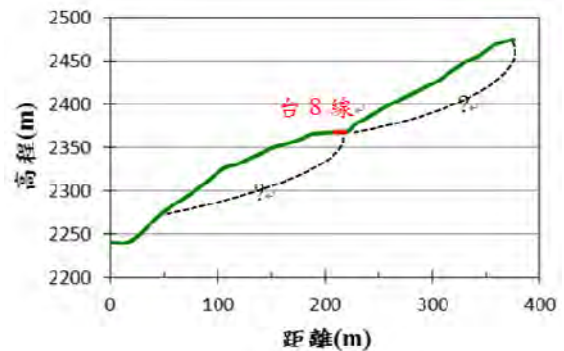
(b) 平面圖



(b) 平面圖



(c) 剖面圖



(c) 剖面圖

圖九 台14甲線里程34.6k附近，因板劈理形成順向坡復受塔次基里溪向源侵蝕影響，路基位於潛勢崩塌地，經常發生路基災害

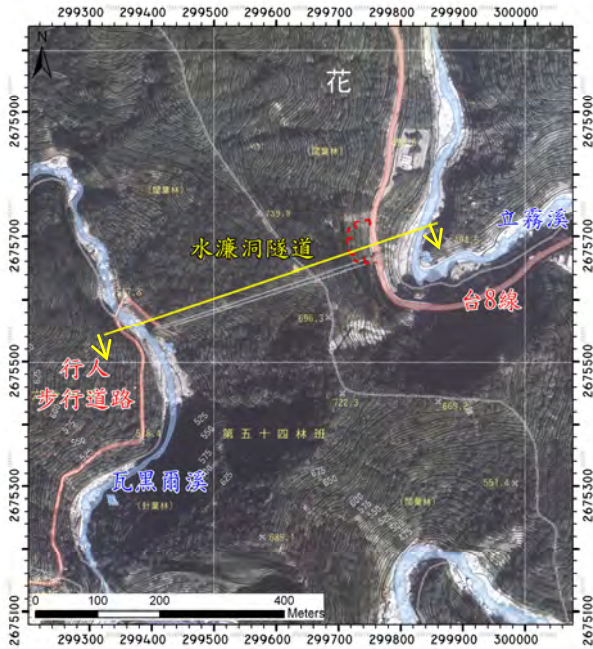
圖十 台8線里程116.7k附近，因板劈理形成順向坡復受塔次基里溪向源侵蝕影響，路基位於潛勢崩塌地內持續下陷



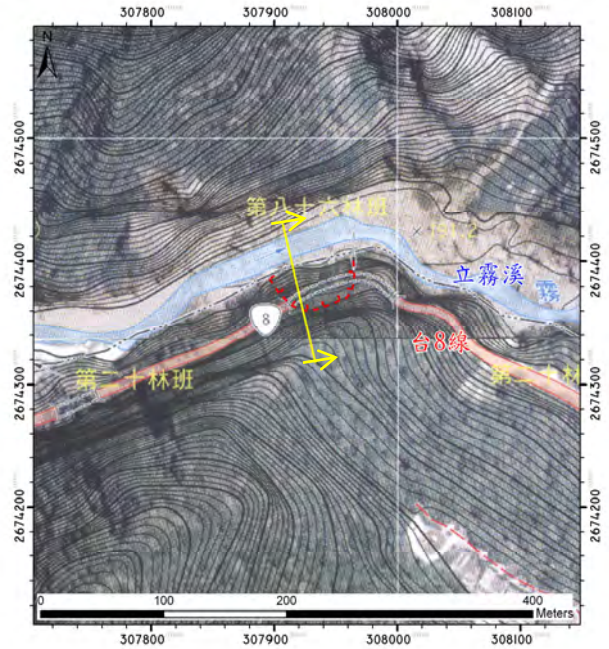
(a) 照片



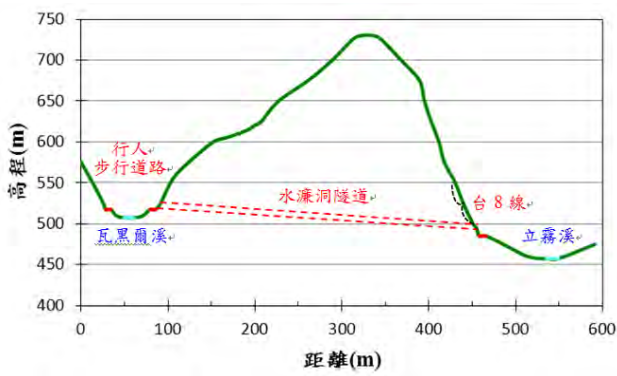
(a) 照片



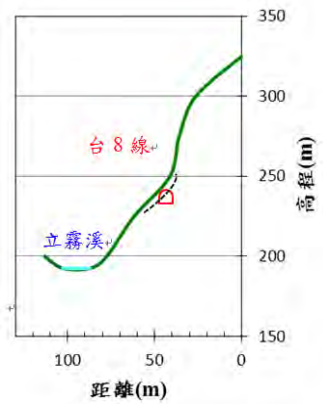
(b) 平面圖



(b) 平面圖



(c) 剖面圖



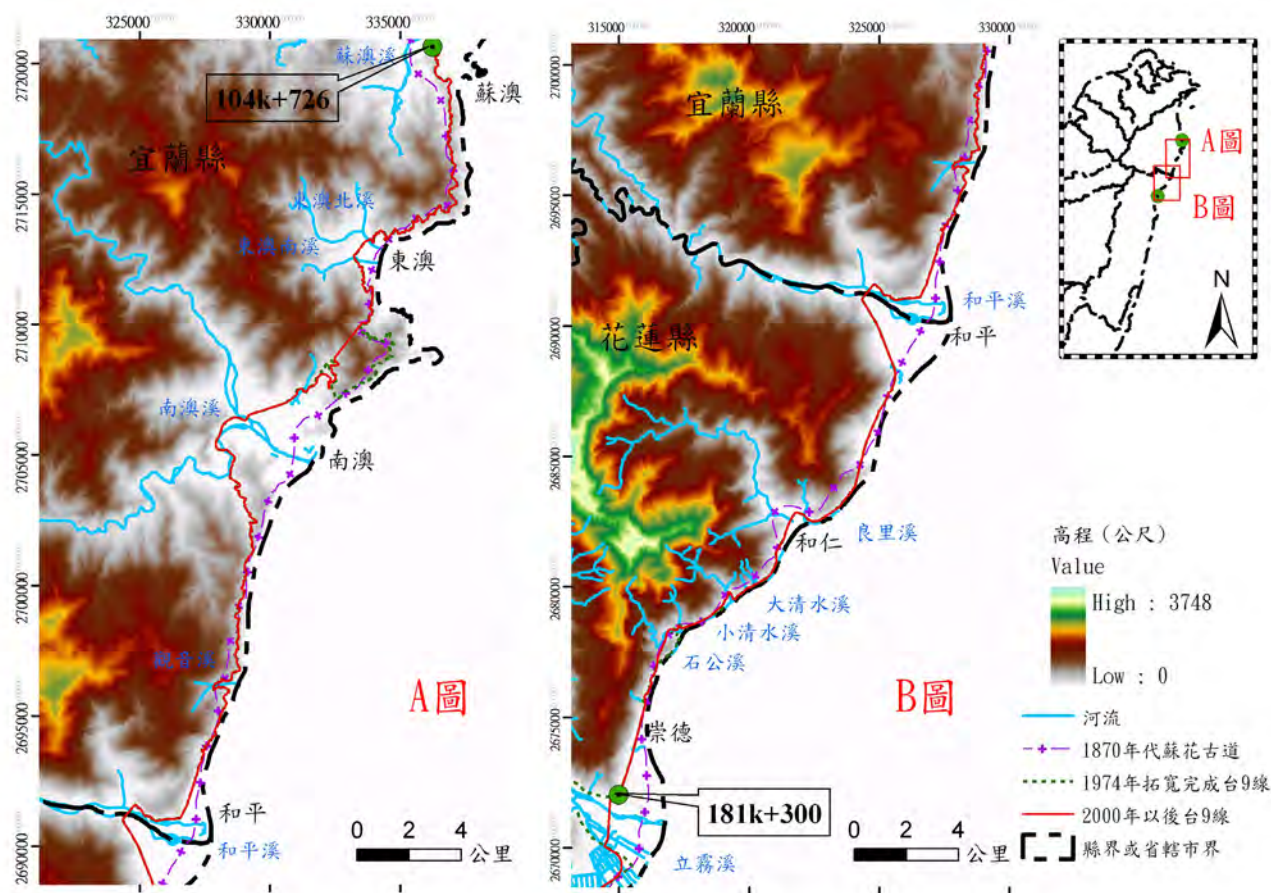
(c) 剖面圖

圖十一 台8線里程168k附近明隧道因落石坍方而壓毀損壞

圖十二 台8線里程178.5k附近隧道因上邊坡傾覆而壓毀損壞

表一 蘇花公路修築紀要

時間(西元)	修築紀要	備註
1874-1876	清同治三年修築蘇澳-崇德段人行步道、路寬約1 m，路線沿稜線而上，攀升至山頂再盤繞而下至山麓	
1916~	日治時期修築東海步道，僅能徒步通行	
1927-1932	日治時期修築臨海道路，全長100.5 km，小型車輛可通行	
1945-1955	台灣省公路局接管蘇花公路，初期以恢復道路通行為首要目標，清除坍方、整理路面為主要工作 1947年完成烏石鼻隧道、1950年舊和平隧道 1949年起推動路線改善，以路面寬度3.5 m，最小半徑15 m、可行駛大客車為目標 公路局行銷宣傳「蘇花道上，懸崖壁立，藍天碧海，車若騰雲」，1953年東部魯谷幽峽及清水斷崖入選「台灣新八景」，蘇花公路聲名遠播	
1955-1974	1955年起退除役官兵轉業任職公路局，分派駐在沿線道班房擔任養護工作 為解除單向管制、緩和邊坡崩坍對通行之影響，開始辦理短期專案改善工程，1956年崇德隧道、1971年和平隧道、1972年和中隧道、1973年和中隧道南段 1961年台灣銀行壹圓紙幣選用象鼻隧道景觀(現今和平隧道外側)	
1974-1980	蘇澳-東澳路段就原路拓寬為路基寬8 m、路面7 m雙車道，解除單向行車管制	
1980-1990	1983年新澳隧道(舊)完工，東澳-南澳段解除單向行車管制 1985-1990年辦理南澳-太魯閣段拓寬改善計畫，1990年完成漢本、和仁、仁清、和清、大清水、13號、錦文、清水、崇德隧道，1990年10月25日蘇花公路全線解除單向行車管制	1980年2月1日北迴鐵路通車
1995-2000	錦文、清水、崇德、仁清、和清、大清水隧道辦理照明工程 1996年跨越和平溪之大濁水橋改建完成，淨寬15 m 1997年新澳隧道左線雙線隧道完工 2000年匯德隧道完工	清水隧道移交太管處
2002	太魯閣大橋完工	



圖二 蘇花公路歷年路線之變化

定的緩坡地，因坡趾受海浪淘刷，在極端氣候事件衝擊下或豪雨期間，地表水快速滲入坡體形成高額水壓，經常造成大規模的破壞，造成路基災害與崩塌等養路問題。

2010年10月梅姬颱風侵台期間，因與東北季風產生共伴效應致使移動速度緩慢，並帶來豪雨，蘇澳雨量站10月21日測得設站70年來最大時雨量181.5 mm，24小時累積雨量939 mm，颱風事件總雨量1195 mm，造成本路段路基流失7處、邊坡坍方36處，其中里程112k+800處路基流失約50 m、114k+500處路基流失約30 m、坍方兩處分別約1,200與1,350 m³、115k+900處路基流失約60 m、坍方約10,000 m³以及116k+100處路基流失約70 m。這些路段之崩塌造成了26名旅客罹難、5名受傷之重大災情(圖五)，並阻斷公路25天(公路總局第四區養護工程處，2010)。本路段雖已緊急搶通，然公路兩側邊坡坡面仍殘留大量的土石、山溝出口處亦有大量土方堆積，穩定性欠佳，有待刷坡與保護。為因應全球氣候變遷極端氣候事件帶來的潛在危害，公路總局除積極推動「蘇花公路山區路段改善計畫」於此路段改線採隧道通過的中長期對策外，第四區養護工程處已針對蘇花公路研擬一系列短期養護因應對策，包括設置沿線監測系統、即時影像監控系統(CCTV)、可變資訊電子告示看板(CMS)、區域行動服務系統(LBS)、增設臨時避險明隧道、

緊急電話、增加預置搶災機具進駐點、預置管制哨與保全機制，期待透過監測與預警性封路措施，確保過往人車之安全。

4.2 小清水至板下(174k-176k)路段

蘇花公路和平至崇德間路段沿線多懸崖峭壁，包括北段的和仁至清水、中段的清水至小清水、以及南段的小清水至板下路段，現有公路採密集的隧道群通過，昔日清水斷崖險峻地勢不復可見，魯谷幽峽壯麗景觀亦難有感受，實則為基於行車安全考量，路線經過多次改線的結果(照片十一)。小清水至板下間歷年的路線變化(圖六、圖七)，即為公路沿線工程地質特性影響路線穩定與服務品質典型的案例之一。



A處為匯德隧道南口、B處為已廢棄清水隧道南口，C處為1974年拓寬完成台9線路基，D處為清水斷崖

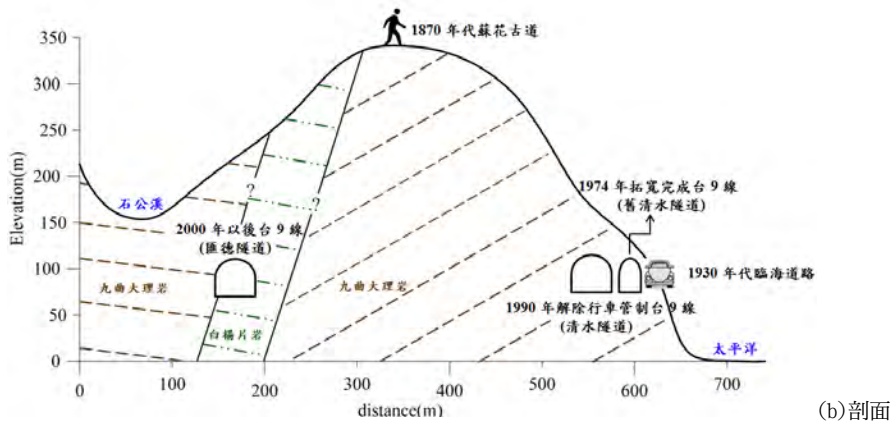
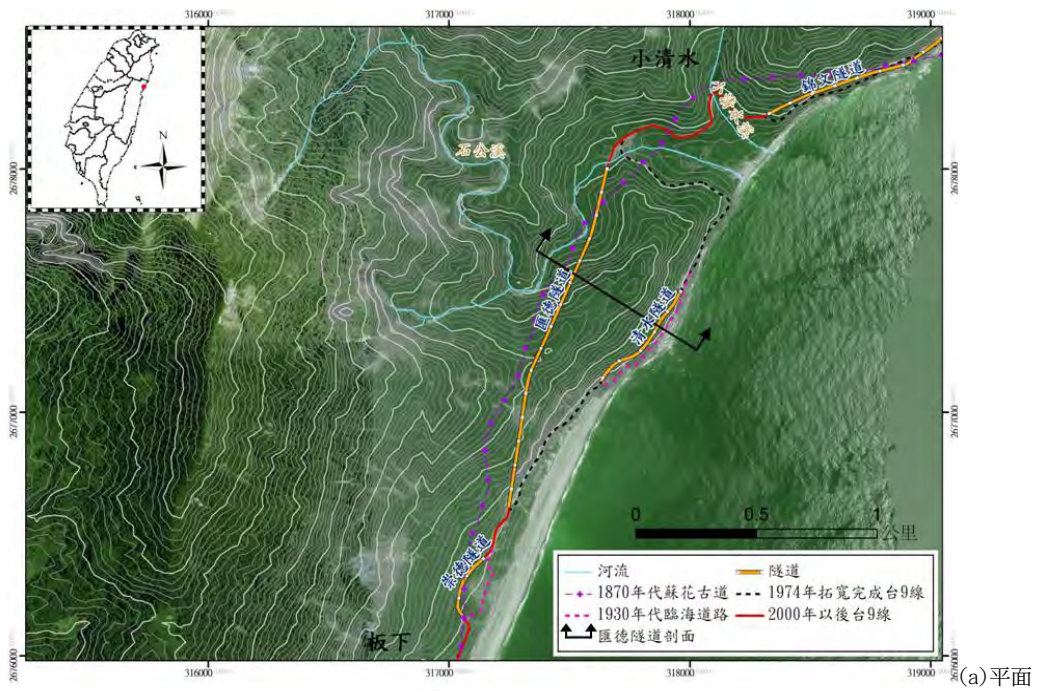
照片十一 小清水附近景觀



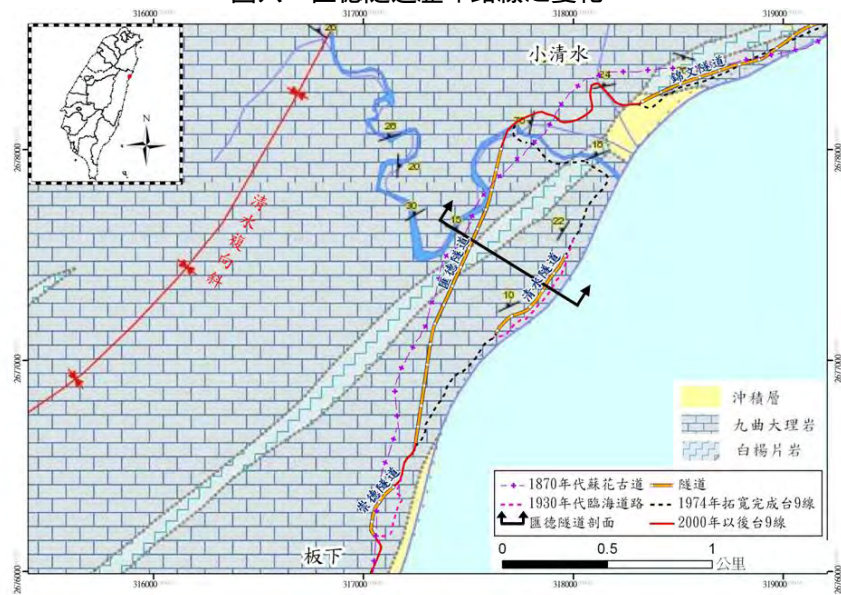
(a)災前

(b)災後

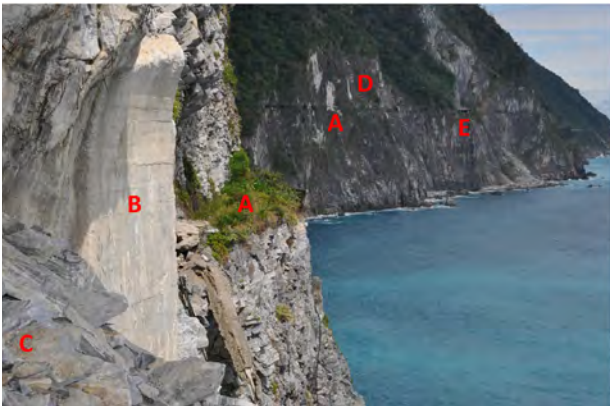
圖五 台9線里程114k+500、115k+900及116k+100附近梅姬颱風前後衛星影像比較 (成功大學全球觀測與資料分析中心提供)



圖六 匯德隧道歷年路線之變化



圖七 匯德隧道附近地質概況(地質圖底圖取自中央地質調查所, 2011)



A處為1930年代臨海道路路跡，B處為舊清水隧道襯砌殘垣，C處為崩落於舊清水隧道的土石，D處為清水斷崖，E處為大清水隧道南口

照片十二 小清水路段眺望清水斷岸，照片自己廢棄清水隧道（1990年完工）與舊清水隧道（1970年代完工）交會處向東北方向拍攝



照片十三 清水隧道（已廢棄）北口與解壓節理（虛線標示於照片中位置略右側）

1980年以前蘇花公路小清水至板下路段仍按1930年代完成的臨海道路，緊臨崖壁而行（圖6b），以大理岩為主的邊坡坡度超過70°，多組節理切割岩體造成經常性的岩楔滑落與落石現象。1990年清水隧道完工路線小幅度向山（西）側內移，且路面拓寬為雙車道。然因清水隧道靠近崖壁興建，邊坡解壓節理發達，加上邊趾長期受海浪沖刷，1995年檢查時發現隧道襯砌出現多處平行隧道軸向的張力裂縫，1996年發生多次地震，造成隧道襯砌多處損壞（陳福勝等，1996；黃燦輝等，1999）。1997年新闢匯德隧道，路線再向山側內移最大約500 m，於2000年完工後改線至目前路線（照片十二至照片十四）。

匯德隧道施工過程地質資料顯示，本路段之大理岩單軸壓縮強度超過100 MPa，除洞口段



照片十四 清水隧道（已廢棄）南口與1974年拓寬完成台9線路跡（A處）



照片十五 清水隧道（已廢棄）襯砌裂縫（虛線標示）與1996年地震掉落之未襯砌段隧道（A處）

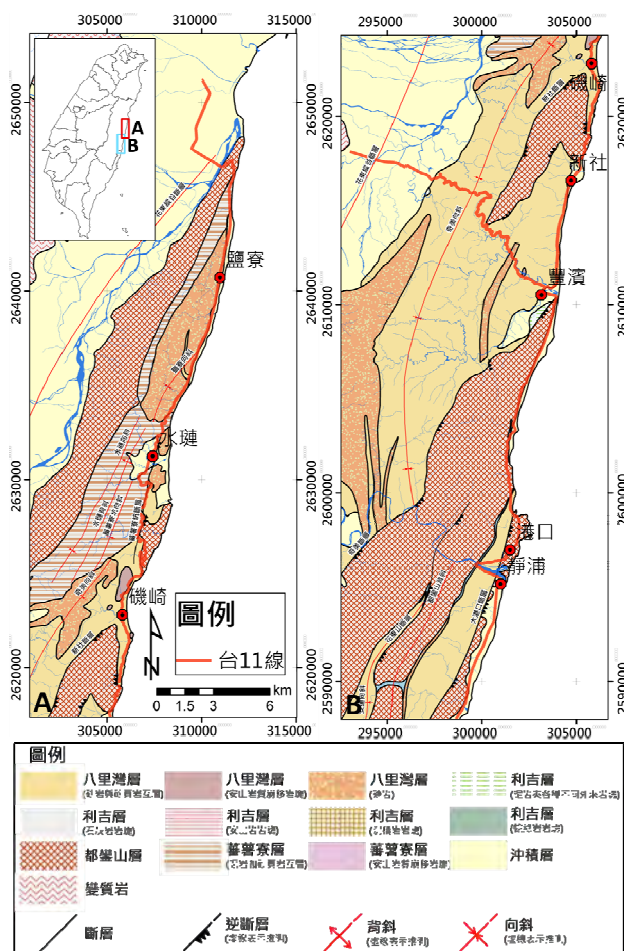
外，全線有82%隧道長度的岩石品質指標介於70-80之間，岩體分類多屬第II類，平均開挖進度每日達2.57 m，顯示岩體工程特性相當良好。此等堅硬岩體在高陡邊坡解壓節理與海浪沖刷的雙重影響下，建成僅15年的清水隧道即發生未襯砌段落盤與鋼筋混凝土襯砌裂縫（照片十五），迥異於中橫公路台8線相似的地形地質條件以及路線配置下的隧道結構，新建成的匯德隧道歷經10餘年結構亦相當穩定，顯見深入瞭解公路沿線工程地質特性與環境條件，審慎地規劃改線與配置結構對於公路養路與維護作業的重大影響。

五、結論

蘇花古道開拓迄今將近150年，可通行車輛的臨海道路修築亦有80年的歷史，蘇花公路在先天環境極為不利的條件下持續扮演東台灣對外聯絡動脈的角色。公路沿線多為斷崖地形，板塊

石灰岩與蛇綠岩等各種岩性之角礫狀岩塊，泥岩中可見緻密的鱗片狀面理組構，顯示曾受強烈的剪切作用。

堆積物固結過程常伴隨海底崩塌與滑坡作用，因此地層中常見軟質沉積形變韌性構造，如縮脹、串腸及緊密褶皺等(鄧屬予等，2002)。且因弧陸碰撞作用持續進行，這些原生韌性構造和次生斷層、節理和剪切面等脆性構造同層共生，造成海岸山脈沉積岩層鮮明的特性－完整性差、膠結不良、含泥量高、組織鬆散、質地軟弱。



圖二 台11線公路北段地層分佈與主要地質構造

三、公路建設歷程

台11線公路縱跨花蓮、台東兩縣，自1965年開始建造，迄今已將近半世紀。公路修築歷程可大致分為3個時期(台灣省公路局，1999)：

3.1 草創期－海岸道路(1965-1968年)

台灣光復後政府積極致力於公路建設，1962

年公路普查後，決定增闢「東部產業道路」，又稱為「海岸道路」，此乃台11線公路之前身。自1965年起開始建造，並於1968年7月建成通車，北起花蓮縣木瓜溪北岸(花蓮大橋)，沿太平洋岸向南至台東縣大港口，與原有大港口至台東公路相連，構成台東花蓮間第二通道，全長70.5 km。

3.2 第一次改善(1968-1984年)

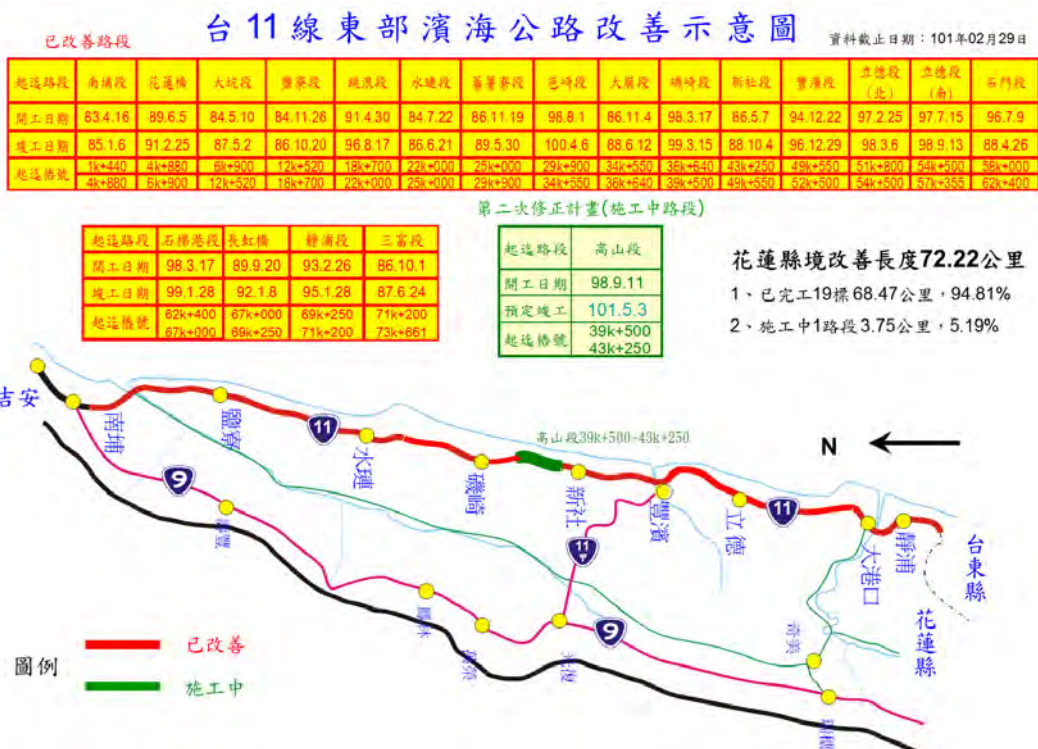
海岸道路闢建完成後，1975年依「台灣省各級公路橋隧涵洞編號要點」編號為11，並於1977年納入台灣地區公路路網計畫七大系統(高速、環島、橫貫、縱貫、濱海、聯絡、快速公路系統)，台11線、台11乙線與台2、台15、台17以及台26線等6線組成濱海公路系統，因此台11線公路常被稱為「東部濱海公路」。公路所經東部海岸山脈山巒疊翠，太平洋波瀾壯闊，景色迤邐，深具觀光價值。1978年7月至1984年6月分二期辦理拓寬改善，將「產業道路」晉升為省道等級。第一次改善完成後多數路段均能維持6.0-7.5 m路寬，惟沿線仍有多處因地形險峻、地質惡劣等因素，路線存在視距不良、急彎(10處，最小半徑僅14 m)、陡坡(15處，最大10.5%)、曲折等不利行車處，並時有崩坍阻斷道路的維護問題(圖三)。

3.3 第二次改善(1990年以後)

1980年代後期為加速東部區域開發，並因應花東海岸觀光旅遊之需，遂推動「台11線東部濱海公路改善計畫」，隨後列入「國家建設六年計畫」中執行。原訂於1993-1998年度辦理，惟推動執行過程涉及環保、景觀、古蹟、邊坡、水保等因素，屢受外界及環保團體抗爭，質疑其必要性及計畫內容，因此配合觀光局東部海岸風景區管理處辦理之「台11線景觀路廊及遊憩據點串聯整體規劃」計畫一併檢討設計原則。修正執行期程延至2012年(圖四)，修正計畫目標除滿足交通需求外，更朝向維護東部海岸景觀並提昇遊憩品質、土方開挖減少、降低環境與生態衝擊等方向進行，期待透過細膩的規劃設計表達公路強調永續、景觀、人本之全新觀念。

「台11線東部濱海公路改善計畫」暨其修正計畫中數個地質、環境敏感路段及其處理包括：

1. 跳浪段共3處：包括里程19.0-19.2k、19.2k附近15號橋、15號橋至21.8k附近路段皆位



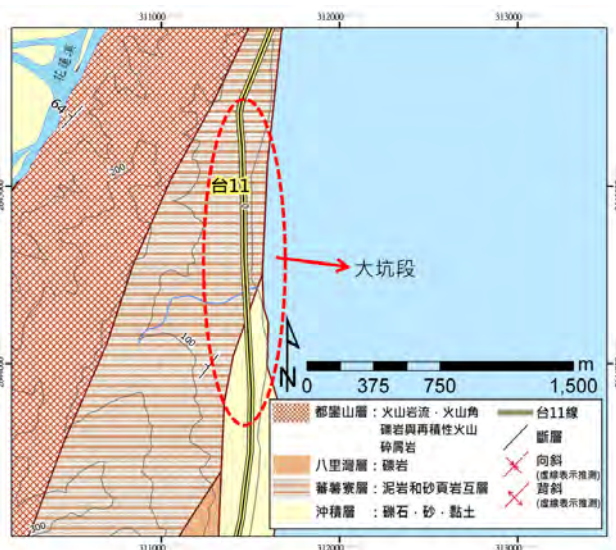
圖四 台11線東部濱海公路改善計畫示意圖(2012年版)

四、地工案例

4.1 大坑段(里程6k+900-12k+520)

大坑段(圖一)位於花蓮鹽寮附近，公路路基緊臨太平洋，除里程7k+800至8k+230區間外，其餘路段因海岸灘崖較低，出露的岩性為蕃薯寮層砂頁岩與泥岩(圖五)，遇水後易膨脹軟化而崩坍，颱風及東北季風造成之暴潮直接撲打海崖，路基直接受到海浪沖刷侵蝕威脅，並危及行車安全。許民陽等(1998)報導花東海岸北段自1970年代至1990年代後退約30-40 m，其中鹽寮大坑附近(里程8-9k)年平均後退率約2.5 m，鹽寮國小(里程13k)年平均後退率約5-10 m；另依據公路局1996-1997年之施工測量，海洋公園附近(里程9k附近)年平均後退率約6 m。

1994年台11線公路改善初期，公路局即規劃利用本路段剩餘土石方進行海岸保護，採用柔性地工加勁擋土結構配合植生綠化，融合週遭環境，兼顧水土保持與海岸景觀，並達成國土保育的永續發展目的。填土區在既有消坡塊岸(西)側設計二階加勁擋土牆，採地工格網分層回包，最外層包覆植生包以利坡面植生綠化，總長2,146

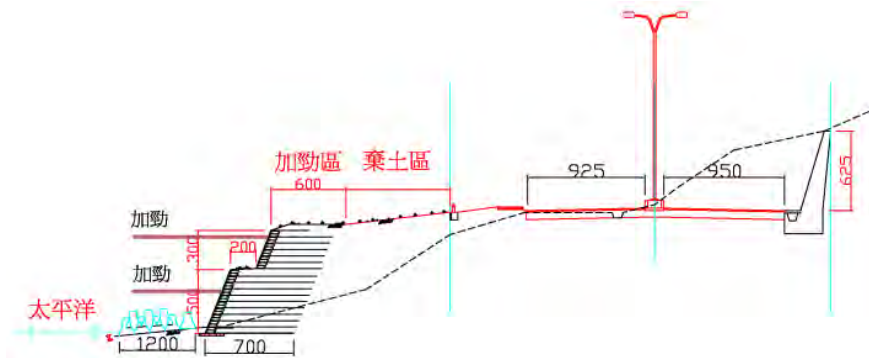


圖五 大坑段邊坡附近地形與地質概況

m路段總計收納100,144 m³剩餘土石方。圖六為大坑段改善前後照片，圖七為典型的改善剖面設計。利用地工格網加勁土壤功能同時包覆土壤，避免遇水極易弱軟化的砂頁岩、泥岩與土壤流失，不僅緩和海岸後退速率，兼有植生綠化美觀以及提供海岸動物、昆蟲等棲息的濱海生態環境，為早年海岸管理與營建剩餘土石方相關法令尚未健全時期的理想方案之一。



圖六 大坑段改善前(左)、後(右)照片



圖七 大坑段改善設計剖面例(數字為尺寸, 單位: cm)

4.2 跳浪段三號(水璉)隧道南洞口段(里程21k+680~+728)

跳浪段位於壽豐鄉水璉附近，因沿岸多峭壁，海浪衝擊下呈現「陡崖跳浪」景觀而得名。三號隧道南洞口位於花蓮縣壽豐鄉水璉村北方約二公里，台11線里程21k+728附近，屬海岸山脈東側，水璉尾山山麓地帶，在地質上屬菲律賓海板塊之北緣，三號隧道北洞口與隧道北段的地層為八里灣層水璉礫岩，至接近南洞口段轉變為砂頁岩互層，再至南洞口邊坡所見則為蕃薯寮層的灰黑色頁岩夾灰色砂岩，洞口附近岩層具節理、局部破碎、膠結差、易受風化影響，工程特性不良(圖八)。

三號隧道南洞口工作面自2002年底進洞，隧道前進方向與邊坡幾近平行，左(西)側為陡峭山嶺，右(東)側幾無覆蓋，邊坡上方覆有崩積層，砂頁岩互層與頁岩之層面明顯，呈破碎狀，因地表水滲入造成弱軟化現象與黏土化作用，2003年遭逢柯吉拉、杜鵑颱風連續豪雨及偏壓現象影響後，致洞口邊坡護坡噴凝土滑落，邊坡失穩擠壓

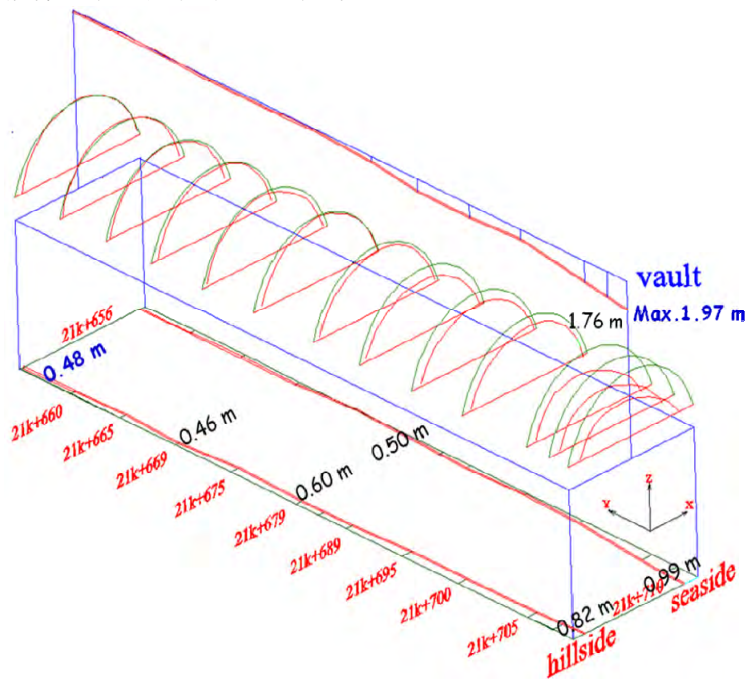
隧道往海側偏移並造成嚴重變形，土壓力不均勻致隧道因偏壓而滑動；之後經歷數個強颱風豪雨連續影響致變形量擴大，迄2004年底側向收斂變形約達1.8 m、頂拱下陷超過1.9 m(圖九)，隧道施工格外艱辛(王泰典等，2007a；Wang et al., 2007)。



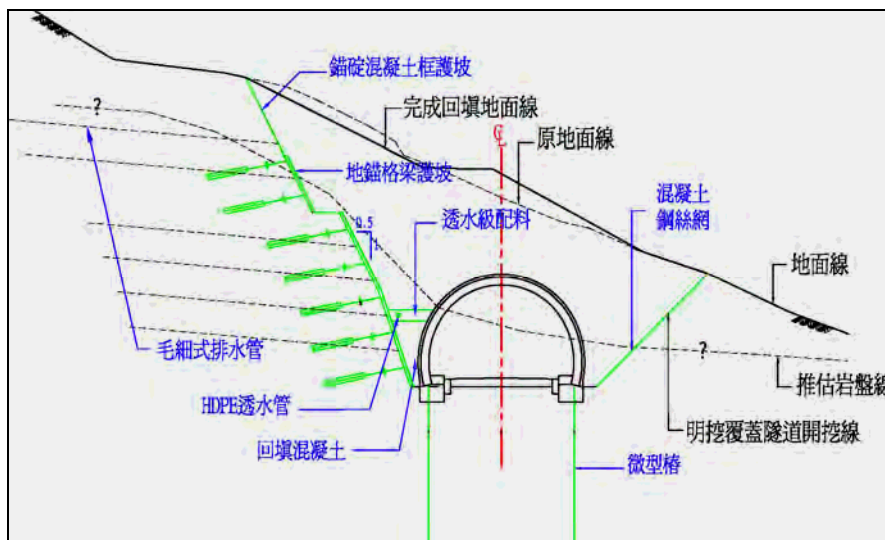
圖八 跳浪段邊坡附近地形與地質概況

經研判三號隧道南洞口段變形係因泥質頁岩含有具膨脹性黏土，吸水易膨脹鬆散崩落，地下水積存於透水性差的頁岩層上，作用於隧道支撐上的土壓力因而升高，隧道擠壓與邊坡滑移繼而相互惡化，以致異常變形。克服對策包括地下水處理、外部穩定(邊坡整治)與內部穩定(隧道結構及外支撐補強)等。洞口邊坡及隧道洞口段地下水處理採用毛細式排水管，可避免崩積層中的粉土及細料阻塞。坡面整治部分疏導隧道上方山溝水流，收集地表逕流減少入滲地下水量；並採用垂直縫地工法與地錨格樑護坡，加強洞口邊坡外

部穩定。另外，考慮洞口段土岩材料自持性差，強度低，改採明挖覆蓋工法，明挖覆蓋段(21k+705~+728)襯砌基腳底部打設微型樁加強基礎承載並輔助側向穩定。隧道鄰接洞口段約55 m(21k+650~+705)範圍側壁增設地錨加固、並進行補噴噴凝土及補打岩栓等措施，加強隧道之穩定性(圖十)。透過前述補強措施，隧道內部淨空變位明顯趨緩，岩盤變位及岩栓軸力等量測值小幅或無明顯變化，有效克服了此不良地質區段的隧道施工困難(圖十一)。



圖九 跳浪段三號隧道南洞口段變形情況，外側綠色線為2002年底開挖後剖面，內側紅色線為2004年底量測剖面



圖十 跳浪段三號隧道南洞口段整治對策

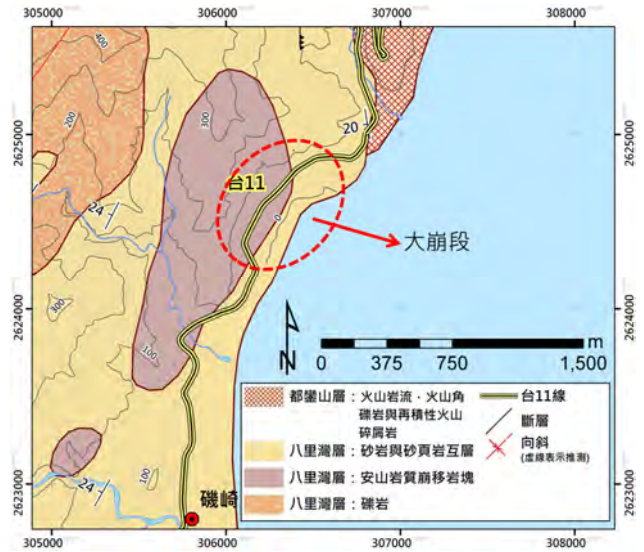
跳浪段隧道洞門設計亦展現對生態、自然以及人文課題的多元重視，三號隧道南洞門設計萃取花蓮阿美族文化的精雕細鑿，呈羽冠及耳飾狀變化，如圖十一所示。

4.3 大崩段(里程35 k+000附近)

大崩段位於花蓮縣豐濱鄉芭崎至磯崎間，沿線地層包括都鑾山層及八里灣層。1989年至1998年期間邊坡坍塌、落石及泥流災害多達14次，曾



圖十一 跳浪段三號隧道南洞門口段改善前(上)、後(中、下)照片



圖十二 大崩段邊坡附近地形與地質概況

為台11線坍塌最頻繁、規模最大的路段之一，素有「台11線之瘤」之惡名。公路穿越一長約300 m，寬約200 m之崩場地，崩塌範圍土石混雜，膠結情況甚差，邊坡時動時停，兼有淺層岩屑崩滑與深層岩體滑動特徵，並具潛移特性，穩定性極低。

崩場地附近都鑾山層直接崩移覆蓋於八里灣層之上(圖十二)。都鑾山層以凝灰岩為主，偶有安山岩或安山岩質崩積岩塊出現，主要出露於公路開挖邊坡處，呈塊狀，膠結性不佳，孔隙率大，風化速率極快。八里灣層由砂頁岩互層、礫岩及泥岩組成，於工址附近以灰黑色泥岩為主，受剪裂作用呈現高度破碎、遇水後即消散破碎呈片狀，泥岩中偶夾少許薄層砂岩，亦可見明顯的剪裂作用(宋聖榮等，1994)。崩場地北側路段有蕃薯寮坑斷層出露與崩積岩塊堆積，南側路段上邊坡岩塊為塊狀安山岩塊與含多組節理的凝灰岩層，下伏易風化侵蝕之砂質泥岩層。此一地質條件造成崩場地附近上陡下緩的地形，公路邊坡飽受巨塊落石、崩塌、地滑與泥流等威脅，傳統採用各種形式擋土牆配合上方緩坡植生的處理方式，多因排水設施阻塞、泥流成患、深層地滑與路基流失等問題，以致成效不彰。

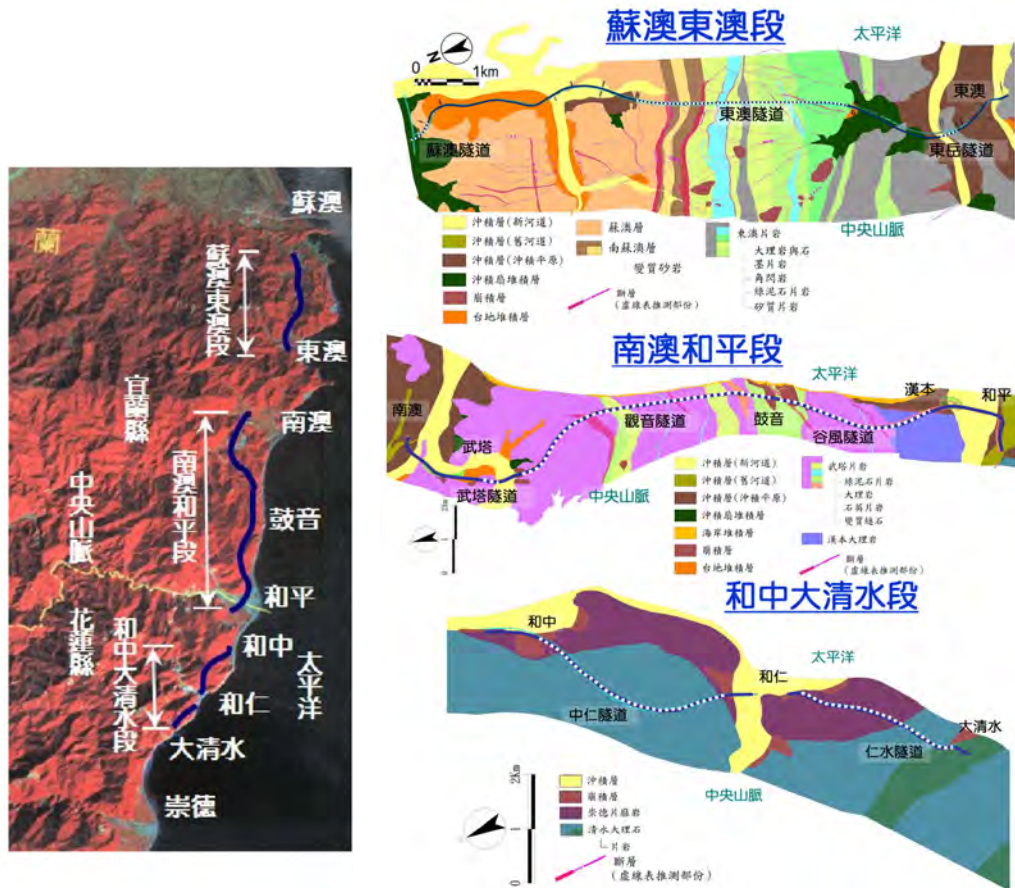
本工址主要之工程問題為公路上方邊坡落石、公路兩側邊坡滑移與公路下方海岸的侵蝕。距公路約80-100 m西(山)側，凝灰岩體出露於一高陡邊坡，岩體因數組節理切割而成塊狀，邊坡

境永續」與「社會公義」原則，公路總局爰積極推動「臺9線蘇花公路山區路段改善計畫」(以下簡稱「本計畫」)，改善臺9線蘇花公路危險路段，提升公路安全穩定服務，滿足民眾行的安全之基本需求，帶動花東地區的觀光產業及社經發展，提昇花蓮、宜蘭生活圈與臺北都會區間之可及性。本計畫研究範圍北起蘇澳，往南經東澳、南澳、觀音、谷風、漢本、和平、和仁、清水至崇德，全長約77公里，計畫範圍詳圖一。

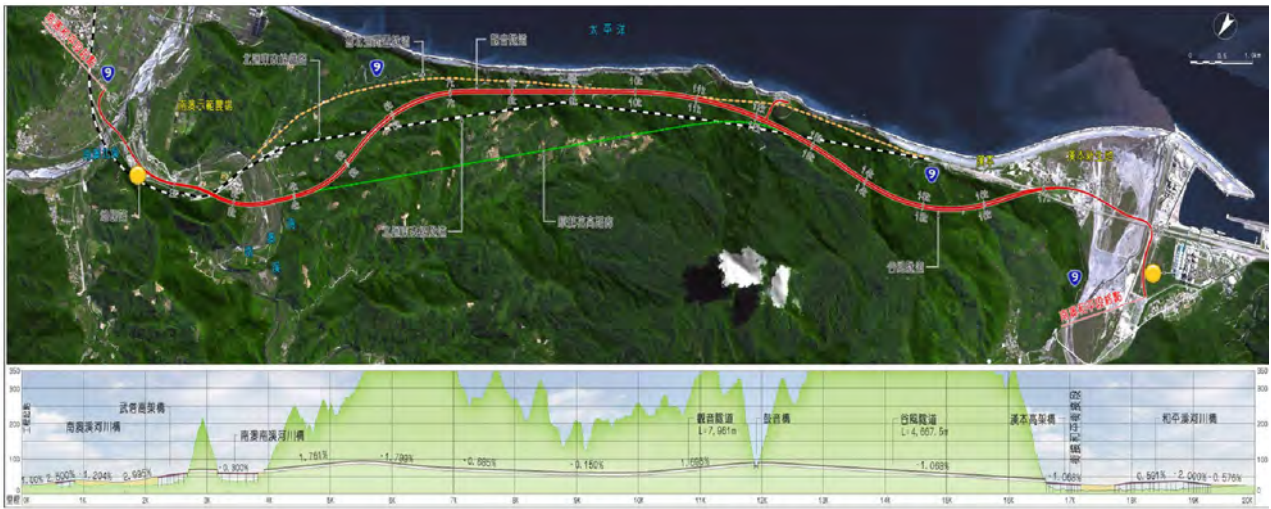
考量花東國土區域願景與環境之敏感性，於區域公共建設及相關配套措施仍需規劃推動之前提，本計畫推動係以安全可靠服務為基礎目標，以路段災損阻斷及交通肇事頻率高路段進行改善，先行推動蘇澳至東澳段、南澳至和平段及和中至大清水段，兼具工程減量、環境友善及強化公路抗災性原則。

依臺9線蘇花公路山區路段坍方及交通阻斷統計資料顯示，南澳和平間落石坍方災害及交通阻斷頻繁，對於臺9線行車安全及通行服務造成重大影響，為維持花蓮地區對外維生需求，提供

基本安全穩定之交通服務需求，南澳和平路段爰列為本計畫優先推動改善之路段。優先路段北起南澳鄉，南至和平溪和平工業區臺9線外環道路，路線全長約28公里，如圖二。本計畫規劃後分為A、B及C等設計標，其範圍分別為蘇澳-東澳、南澳-和平路段(優先設計路段)及和中-大清水段。全線可行性研究與規劃、環境影響評估等及B標設計由台灣世曦顧問公司辦理，A標與C標設計由中興顧問公司辦理。本計畫於99年11月9日環保署召開第200次環境影響評估委員會，決議本案有條件通過環境影響評估審查，99年12月16日行政院核定建設計畫，從此台9線蘇花公路山區路段改善計畫即進入設計施工階段。本計畫並依環評結論，將東澳及中仁隧道採雙孔施作、實施因環境因素之停工機制、建立施工前及營運後之航測資料、隧道內自動與非自動之空氣品質監測、成立監督小組、進行環境監測計畫及11項指標生物研究案等(交通部公路總局，2010a，2010b，2010c，2011a，2011b，2011c)。



圖一 計畫範圍



圖二 優先路段(南澳和平段)平面及縱斷面

二、隧道規劃

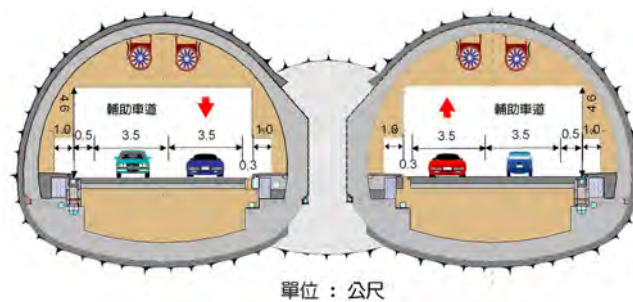
本計畫規劃階段隧道基本資料如表一。蘇澳隧道考量地形條件及路線間距，採用眼鏡式隧道如圖三。觀音隧道基於施工通風及增闢工作面之考量，新設二座施工橫坑銜接北迴鐵路觀音隧道及主隧道。南澳和平段隧道斷面配合通風系統規劃兩種斷面模式，點排式通風系統適用於長隧道(如觀音隧道、谷風隧道)；縱流式通風系統適用於短隧道(如武塔隧道)，如圖四~圖五。和中-大清水段中仁隧道採用雙孔雙向隧道，仁水隧道部

分路段及南洞口位於太魯閣國家公園範圍內，則規劃為單孔雙向隧道。

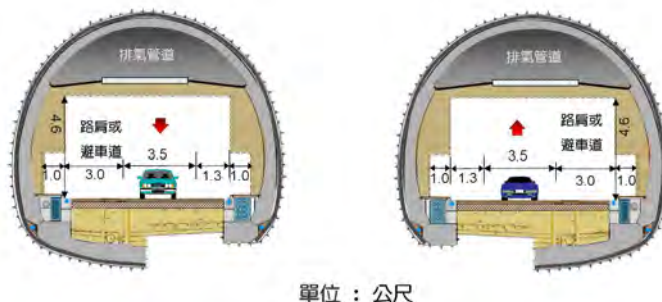
表一 本計畫規劃階段隧道基本資料

標別	隧道名稱	長度(m)	備註
A	蘇澳	約 240(設計中)	雙孔雙向
	東澳	約 3320(設計中)	雙孔雙向
	東岳	約 205(設計中)	雙孔雙向
B	武塔	458.6(北上線)	雙孔雙向
	觀音	7960.95(北上線)	雙孔雙向
	谷風	4589.15(北上線)	雙孔雙向
C	中仁	約 3,790(設計中)	雙孔雙向
	仁水	約 2,885(設計中)	單孔雙向

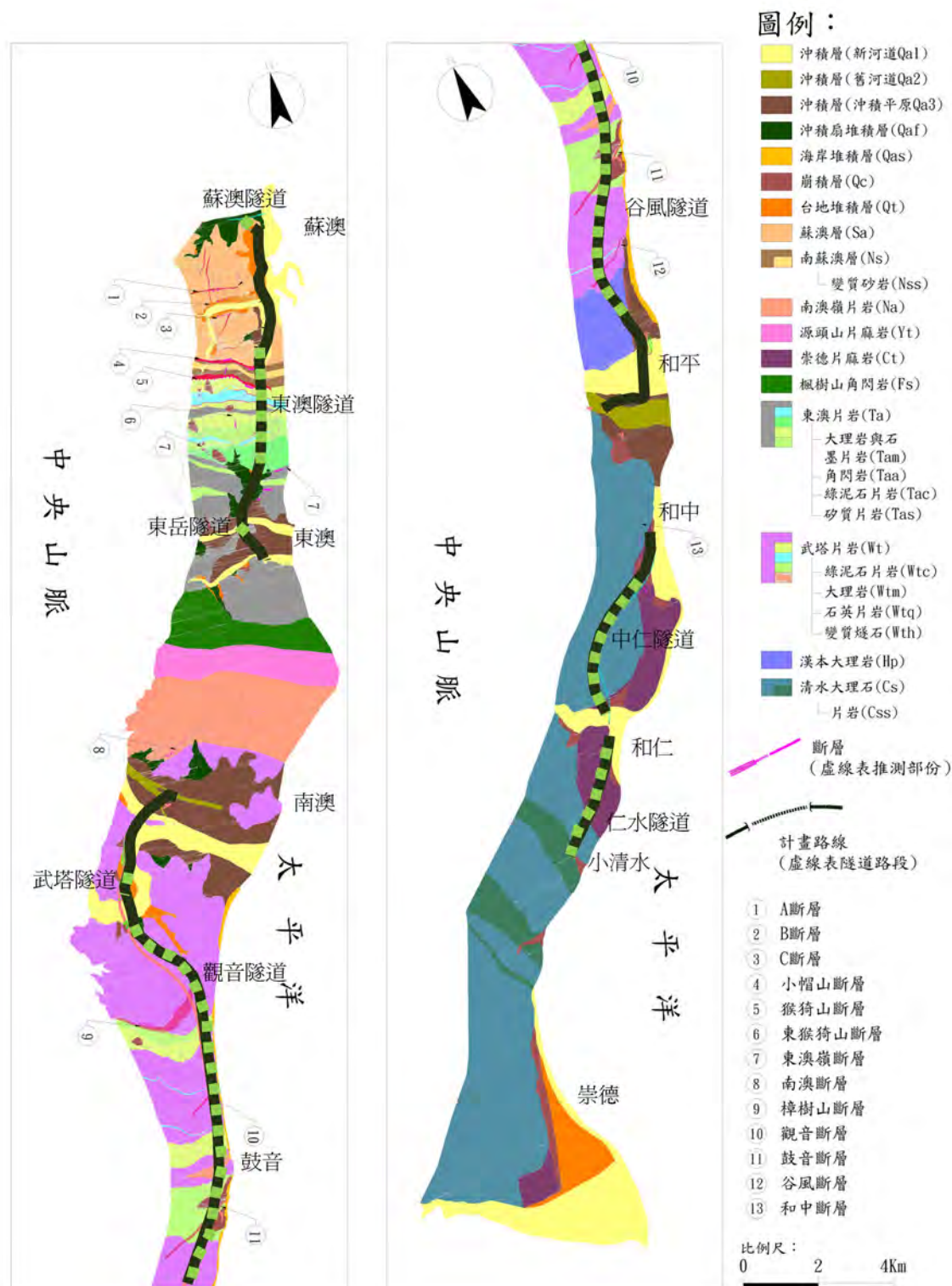
註：A標與C標所屬隧道迄今設計中，隧道長度將因應設計結果調整。



圖三 規劃階段蘇澳隧道標準斷面圖



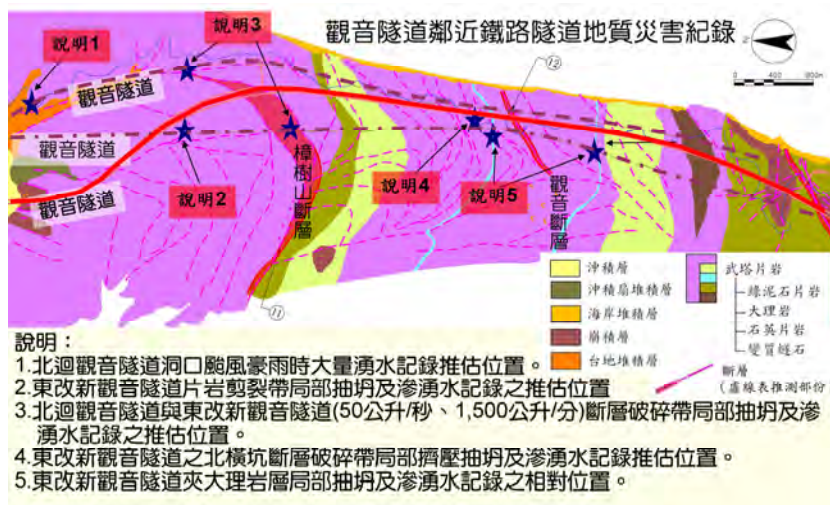
圖四 南澳和平段隧道標準斷面(點排式通風)



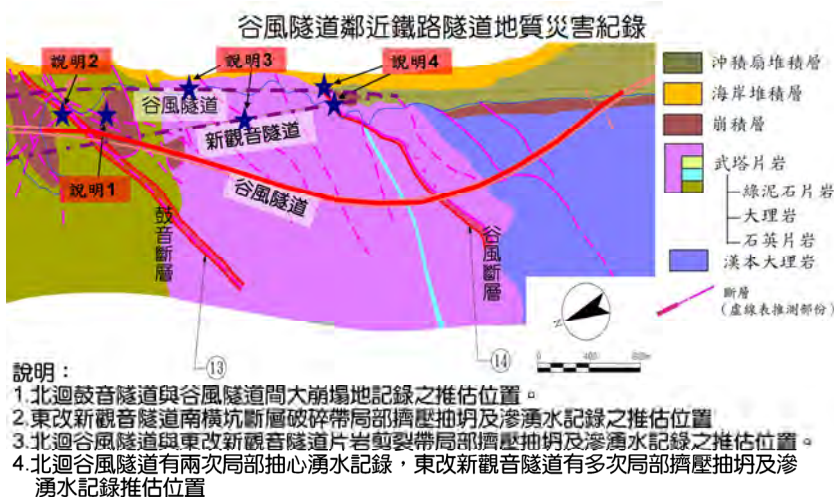
圖六 區域地質及斷層位置圖

規劃及優先設計路段地質調查項目如表三，地質調查工作包含既有鐵路隧道排水量定期量測分析，每月一次人工量測，共一年；新永春隧

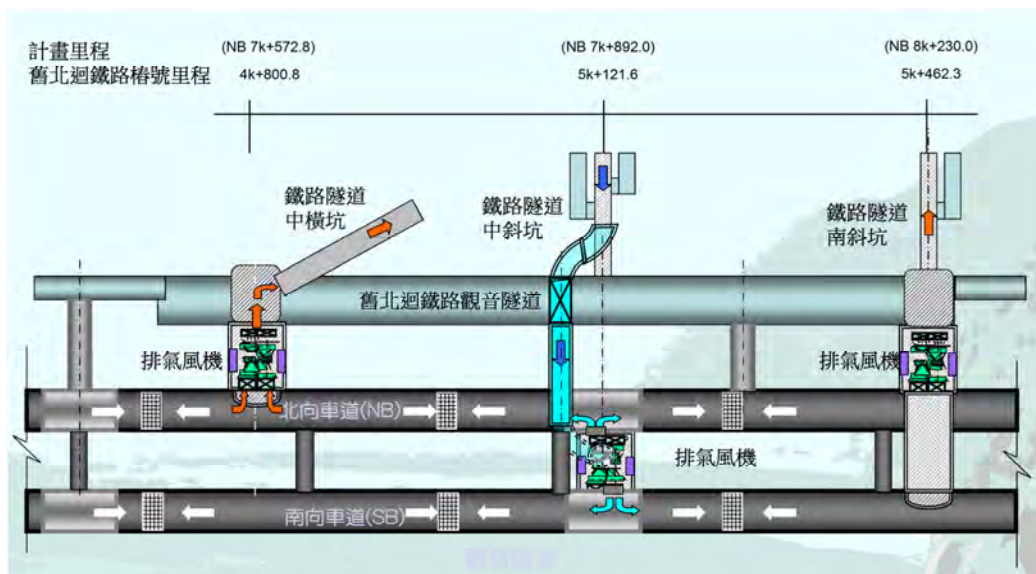
道與新觀音隧道北口與南口採自動量測，由鐵路新觀音隧道洞口排水量與雨量關係，顯示雨量與隧道滲湧水關係密切。



圖七 觀音隧道鄰近鐵路隧道地質災害紀錄位置



圖八 谷風隧道鄰近鐵路隧道地質災害紀錄位置



圖九 利用鐵路隧道雙軌區段及橫坑/斜坑為地下通風機房及通風管道佈設平面

側向不連續，可能有受擾動之跡象；東側上部屬砂、礫為主之沖積層，電阻率約為 $40\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ ，係河道堆積所形成；東側下方為局部電阻率 $80\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 之電阻層分佈，可能為利吉層中之外來岩塊。池上斷層帶西緣(主斷層帶)之斷層面約呈 $60\sim 80$ 度向東傾斜，沖積層超覆其上。測線位置 270 公尺處為現今池上斷層潛移面，船仔山西側地形崖應為斷層線崖，為潛移面活動後受侵蝕後退至現今位置(圖四a，圖四b)。

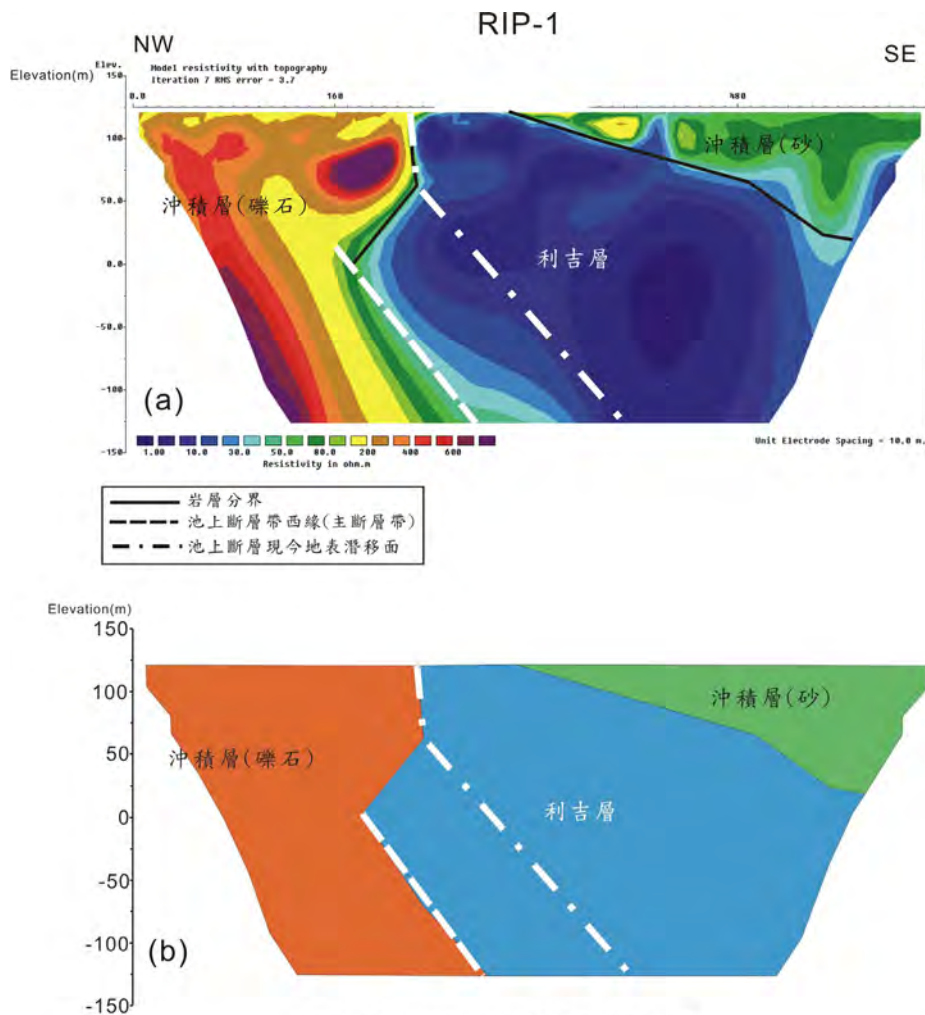
3.RIP-3

RIP-3長度為 1270 公尺，位於RIP-2之西南側(圖一)。探測結果顯示測線位置 1210 公尺處為近地表利吉層與沖積層交界，東側為利吉層，電阻率約為 $1\sim 30\ \Omega\cdot\text{m}$ ，西側可分為三層，上層及下層為礫石為主的沖積層，電阻率約為 $400\sim 800$

$\Omega\cdot\text{m}$ ，中層則為砂、礫為主的沖積層，電阻率約為 $100\sim 400\ \Omega\cdot\text{m}$ 。潛移面在地表淺部($0\sim 100$ 公尺深)角度接近垂直(圖五a，圖五b)。

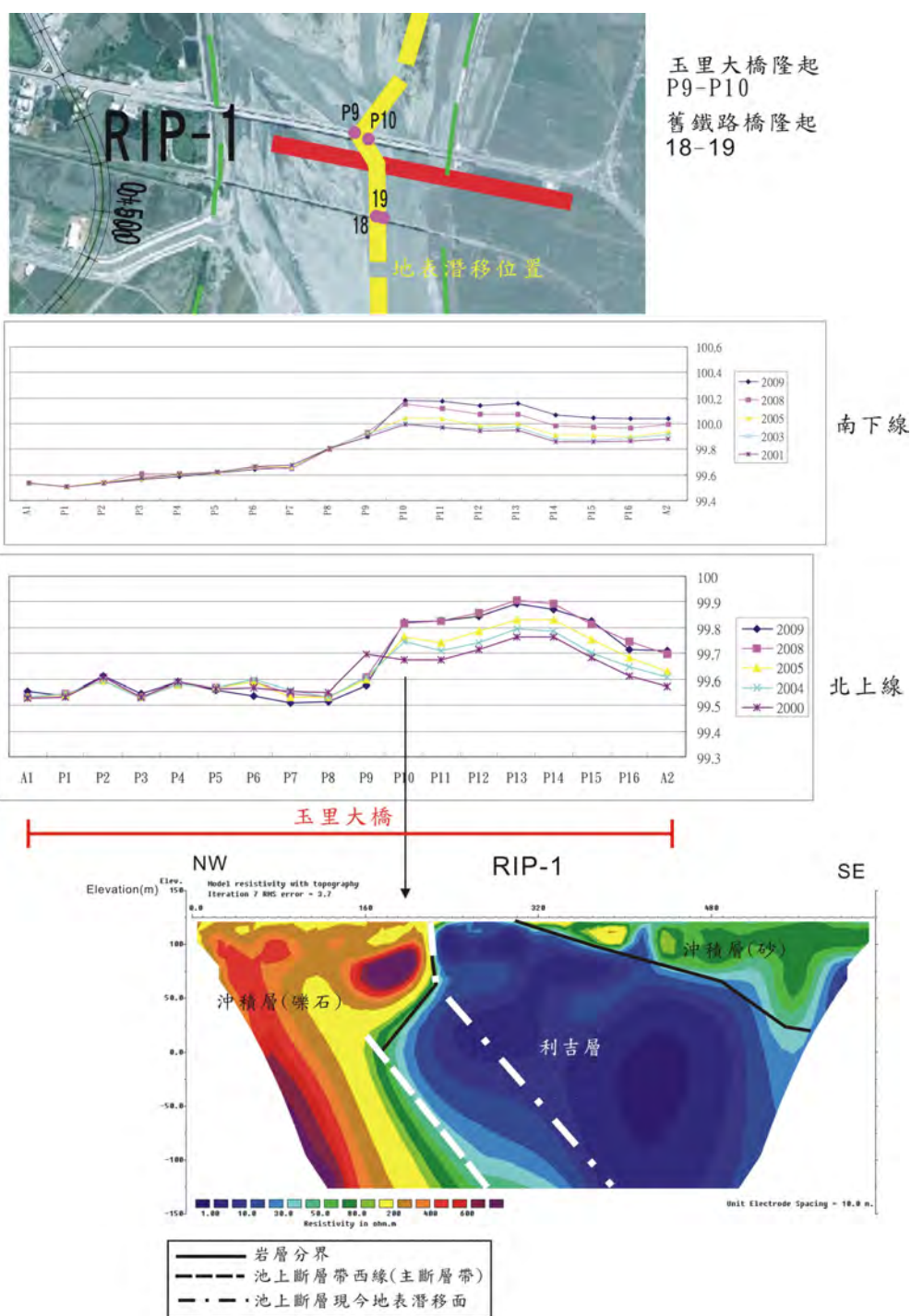
4.RIP-4

RIP-4長度為 870 公尺，在RIP-3的南側。探測結果顯示測線位置 470 公尺、地表下深度 230 公尺以下為利吉層與沖積層交界為池上斷層帶西緣(主斷層帶)位置，其東側為利吉層，電阻率約為 $10\sim 60\ \Omega\cdot\text{m}$ ，西側可分為三層，上層及下層為礫石為主的沖積層，電阻率約為 $400\sim 800\ \Omega\cdot\text{m}$ ，中層則為砂、礫為主的沖積層，電阻率約為 $100\sim 400\ \Omega\cdot\text{m}$ (圖六a，圖六b)。測線位置 $80\sim 160$ 公尺間淺層電阻率呈低($<30\ \Omega\cdot\text{m}$)、高($>600\ \Omega\cdot\text{m}$)、低($<30\ \Omega\cdot\text{m}$)側向分布，高電阻為鐵路高架橋座之影響，低電阻為水溝鋼筋之影響。



(a)RIP解釋結果。(b)RIP地層示意圖。

圖二 RIP-1地電阻影像剖面探測結果



圖三 RIP-1與水準測量比對

五、討論與結論

1. 池上斷層在玉里地區東側為利吉層，電阻率為1~30 Ω·m，層西側為沖積層分佈，電阻率為100~800 Ω·m。斷層帶呈60~80度向東傾斜，西緣有沖積層超覆其上。

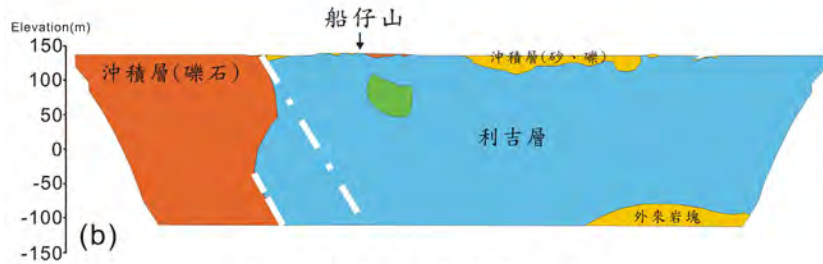
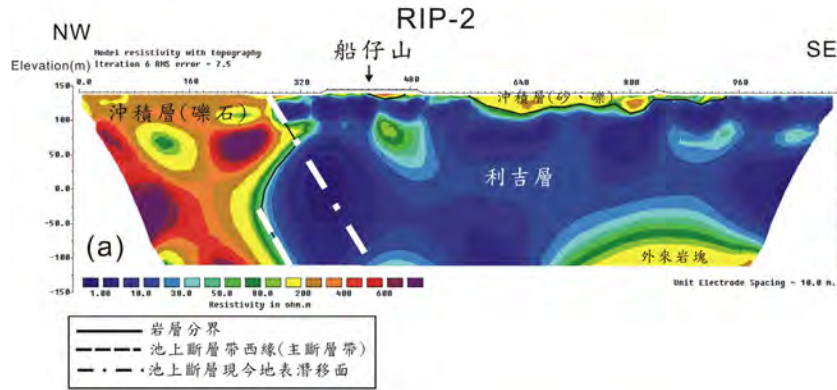
2. 現今池上斷層潛移面的位置(圖七)位於

池上斷層條帶地質圖(北幅)(林啟文等，2009)所推測之池上斷層位置之西側，其走向於本次調查範圍北側略呈南北向，於船仔山附近略向西轉折，大致沿溪谷東岸分佈，至RIP-3東側可能向東轉折，略成南北向。船仔山西側地形崖應為斷層線崖，係潛移面活動後受侵蝕後退至現今位置。

3. 池上斷層帶西緣主斷層帶上超覆最厚達

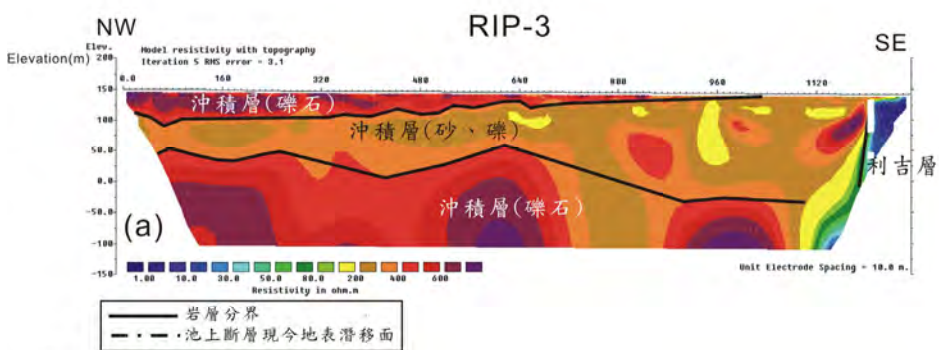
一百多公尺之沖積層。根據玉里大橋水準測量結果，在潛移面以西並無明顯變動，研判斷層帶西緣(主斷層帶)現今並無活動，但在沖積層中可能有擾動之跡象；現今潛移面沿著近地表沖積層與利吉層之界面滑動，水準測量結果在潛移面以東抬升量大致皆相同，顯示其潛移是沿著另一面移動。

4. 斷層西側之沖積層約自高程0公尺上下向東開始堆積，堆積厚度可達125~150公尺，沖積層與利吉層之交界的傾角大致向西傾斜，與斷層帶西緣傾斜向東傾恰相反，推論為河流逐漸東移影響所致，並造成沖積層超覆於斷層帶上以及斷層潛移面移至現今地表位置。



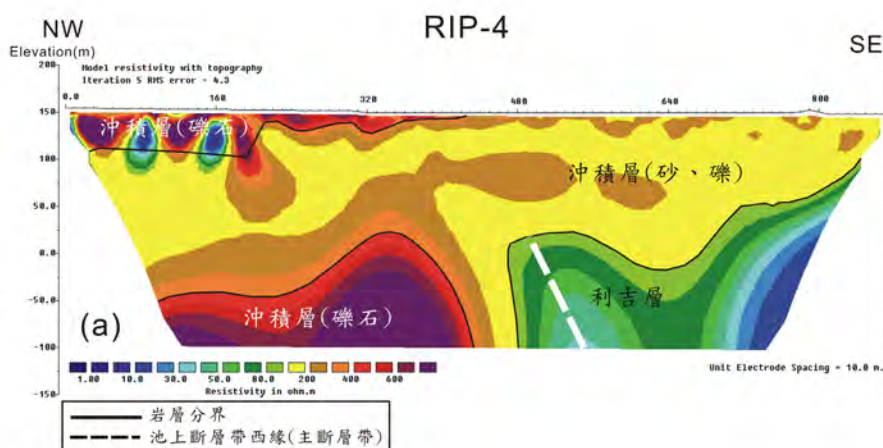
(a) RIP 解釋結果 (b) RIP 地層顯示圖

圖四 RIP-2地電阻影像剖面探測結果



(a) RIP 解釋結果 (b) RIP 地層顯示圖

圖五 RIP-3地電阻影像剖面探測結果



(a) RIP 解釋結果

(b) RIP 地層顯示圖

圖六 RIP-4地電阻影像剖面探測結果



圖七 池上斷層地表潛移面位置圖

誌 謝

本文承交通部公路總局之經費支援，得以完成，謹此深致謝意。

參考文獻

- 王源、楊昭男、陳文山 (1992)，五萬分之一台灣地質圖-玉里圖幅，經濟部中央地質調查所。
- 王源、陳文山 (1993)，十萬分之一海岸山脈(南幅)，經濟部中央地質調查所。
- 朱曜國 (2007)，池上斷層的古地震研究，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，110頁。
- 李建成 (2006)，「花東縱谷上之池上斷層：世界上位速率最快的活斷層之一」，中央研究院週報第1085期。
- 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，第二十三號。
- 陳文山 (1993)，「岸山脈地區花東縱谷斷層的活動性淺」海談，地工技術，第44期，第52-57頁。
- 陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權睿、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、時同聲、盧詩丁



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。

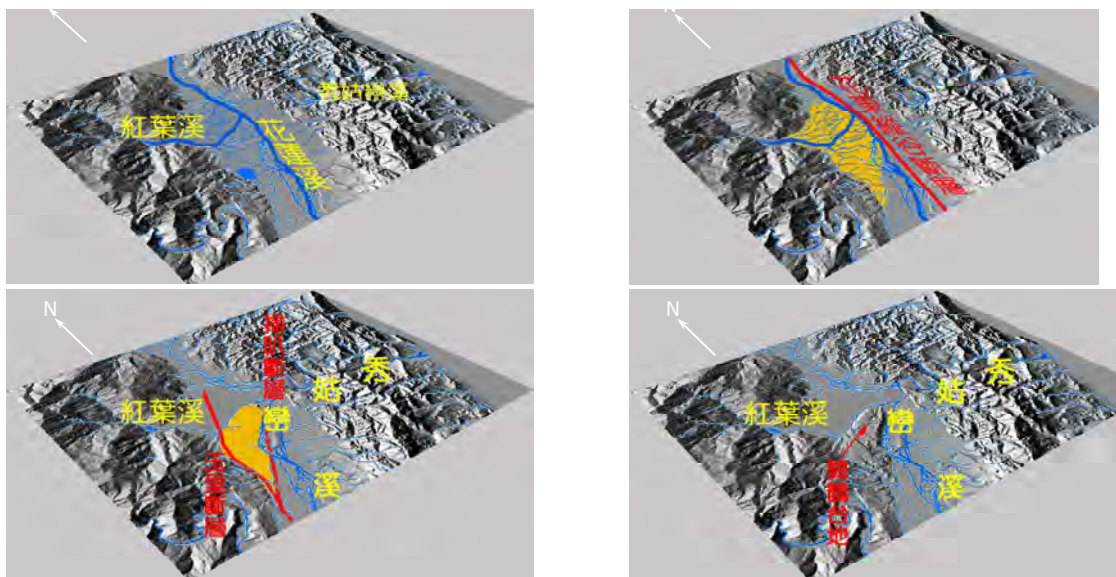
舞鶴台地原屬紅葉溪與花蓮溪交會處之泛濫沖積平原，密布著埤湖與河道，後因斷層活動，地殼抬昇，使紅葉溪口沖積扇之礫石層掩蓋了原沖積平原，也形成了現今的舞鶴台地，詳圖三。突出於花東縱谷的舞鶴台地是秀姑巒溪河川襲奪下切之階地，詳照片一。

(二)河川水系

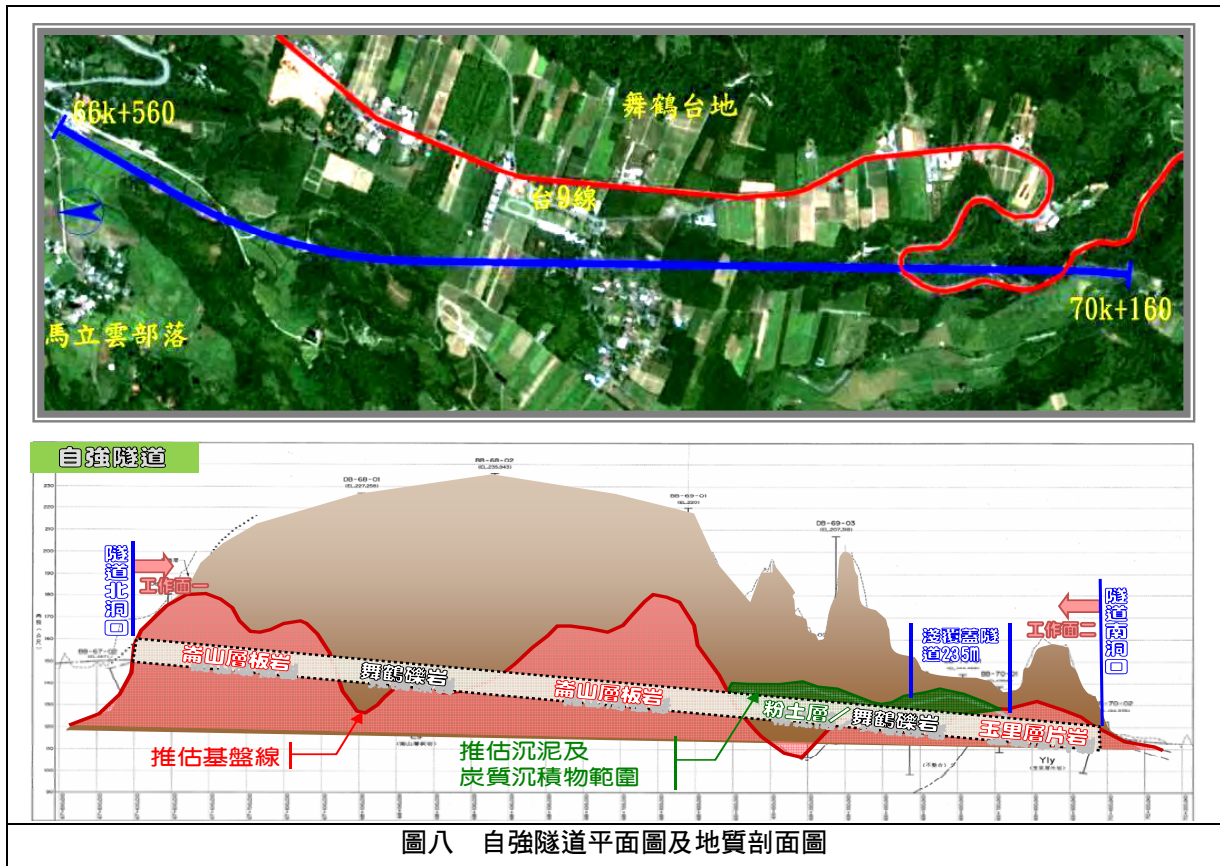
花東縱谷平原主要以河床沖積層堆積。在狹長的谷地裡，有花蓮溪、秀姑巒溪和卑南溪等東部三大河川水系，均屬於中央管河川，其上游發源自西側中央山脈，高山峻嶺、坡陡流急、沖蝕劇烈，出山谷後流路呈瓣狀，河床寬廣、砂石大量淤積形成沖積扇，即為花東線鐵路沿線人口聚集較多之花東縱谷平原區。



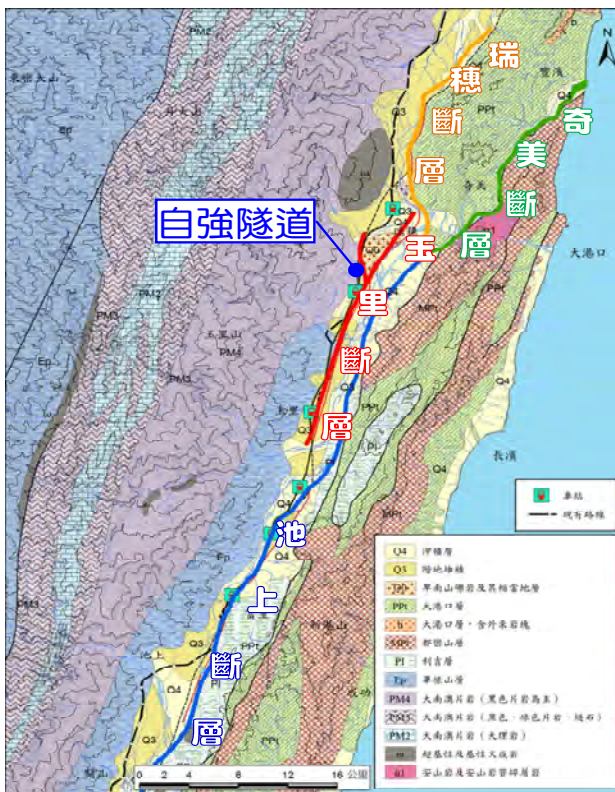
照片一 突出於花東縱谷的舞鶴台地是秀姑巒溪河川襲奪下切之階地



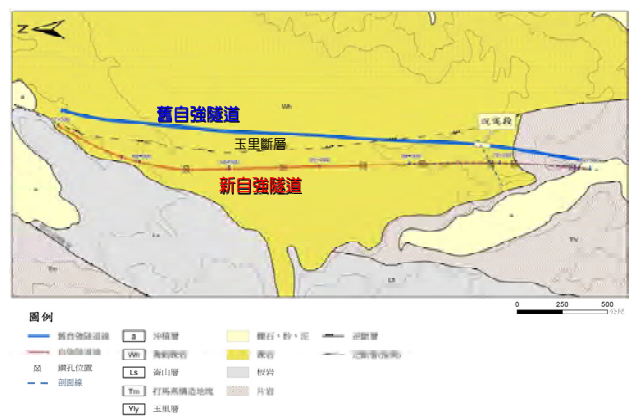
圖三 舞鶴台地成因示意圖(依左上→右上→左下→右下順序)



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

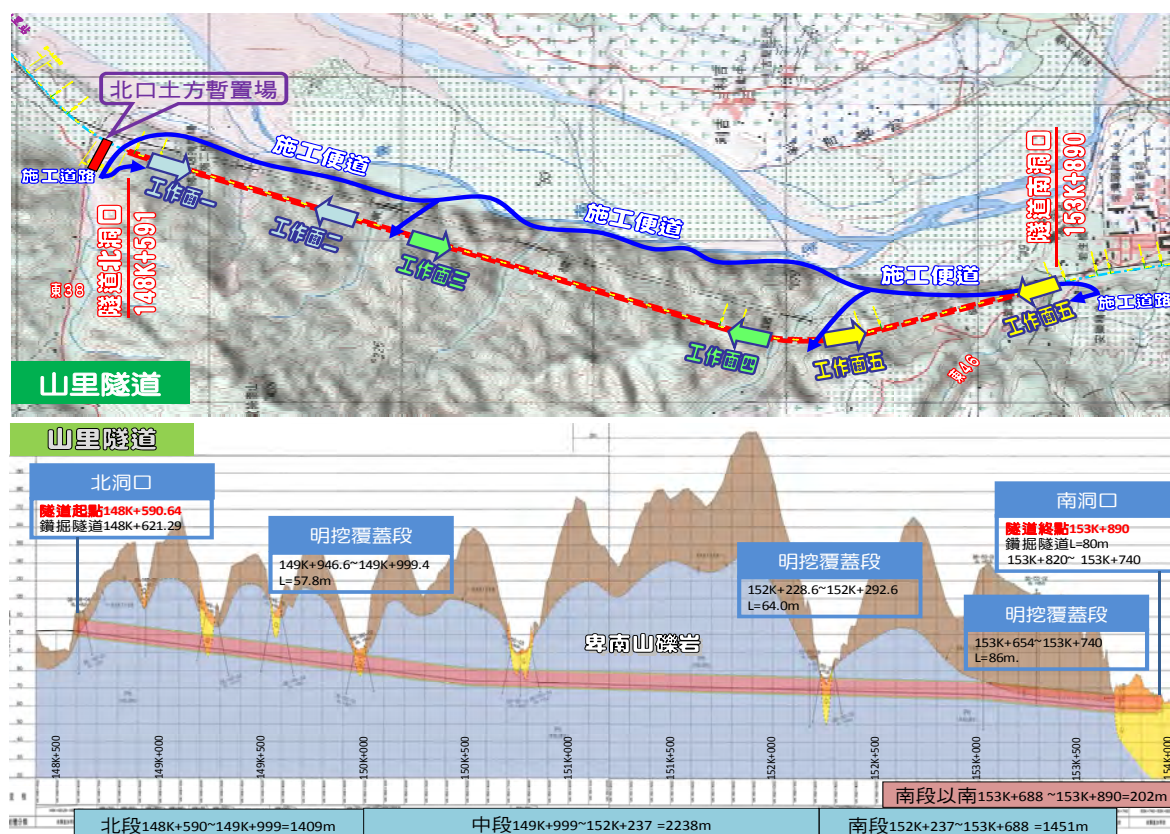
業，主要為固結隧道頂拱上方6 m範圍形成岩拱。另採多項輔助工法，於擠壓變形量較嚴重區段改採H200型鋼支保、加噴噴凝土厚度、自鑽式岩栓、上半斷面基腳擴挖回填等方式支撐補強，以便有效抑制下半斷面洞台開挖再次擠壓變形或沉陷問題，目前隧道已恢復施工加緊趕工進。

(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_I~D_{III}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