

莫拉克風災台 18 線 71k+100 芙谷峩橋設計與施工

蔡宗成*、賴世寶**、陳致遠***

摘要

2009 年莫拉克颱風侵襲台灣，接連三天在中南部降下超過 2,500mm 的雨量，相當於以往一整年的平均雨量，造成山崩、土石流、淹水等嚴重災情。其中雨量最大、受災最嚴重區域位於台灣阿里山地區，豪雨重創台灣阿里山風景區進出道路，其中以阿里山公路(台 18 線)受創最為嚴重，於里程 71K+100 路段附近路基流失約 200 公尺，崩坍面積約 20ha，災情相當嚴重。

本文以阿里山公路 71K+100 路段厚層崩積層邊坡為例，依據地形、地質、水文等資料，詳細調查分析，提出最有效可行之整治對策及方法。本工址邊坡滑動之致災主因研判可能為連續豪雨、地表逕流、雨水入滲造成地下水位上升及土岩層強度泡水軟化而產生滑動。本工程受限地形及地質因素以橋梁方案辦理工程設計，除道路兩側護坡整治，坡面之排水及路面排水須做適當導排外，坡面以掛網植生之方式做為坡面保護，以防止坡面受雨水之沖刷淘空。

有關於 71K+100 處復建橋梁方案與跨徑配置之研選，除需考量於前述包括地形地貌、地質狀況、材料供應與運輸條件、施工架設條件、週遭環境景色及與台 18 線之銜接等因素與條件外，必須特別考量本工址崩塌區之特性及崩塌潛勢範圍。因此，本工址復建橋梁方案以採用半穿式鋼拱橋進行復建，橋梁兩側引道上邊坡以岩錨幕牆保護道路及邊坡。

由於該橋跨越陡峭山谷，施工便道及平台設置不易，工址並需隨時注意上邊坡崩塌區滑落鬆動土石，山區午後又常起霧或下雨，不但須克服天候更需挑戰惡劣的施工環境及在軟弱地質進行鋼橋吊裝，施工困難度及風險相對提高，在上級機關督導下及施工團隊發揮互助合作精神，逐一克服困難，順利重建一條防災、風雨無阻的阿里山觀光安全芙谷峩橋。

* 公路總局養路組組長、第五區養護工程處前處長

** 公路總局第五區養護工程處嘉太工務所主任

*** 公路總局第五區養護工程處嘉太工務所幫工程司

關鍵字：莫拉克颱風、阿里山公路、半穿式鋼拱橋。

一、前言

2009年8月8日莫拉克颱風來襲，台灣南部山區受到颱風引進外圍環流的豪大雨影響，阿里山地區之累積平均降雨量突破 2,500mm 如圖 1 所示，橫跨嘉義縣番路鄉、竹崎鄉、阿里山鄉之台 18 線道路多處山壁崩塌、路基淘空流失，其中 71k 附近受到大規模順向坡滑動或圓弧型滑動損毀，導致路基嚴重流失逾 200 公尺，坡面崩落後露出堅硬岩石層，緊急搶修係利用上邊坡山壁往內艱難的開鑿施作便道，作為本區的聯外替代道路如圖 2 所示災後台 18 線上述各路段以臨時便道維持通行，惟路基外不穩定崩積土，恐無法抵擋颱風季節豐沛雨量之沖刷與侵襲。由於台 18 線係通往奮起湖、阿里山、玉山等區域之重要道路，沿線居民均仰賴該道路進出與運送農產品，故須配合工程單位的要求，進行本路段的災害修復，以維持道路暢通，確保行車安全，發揮交通運輸功能。工程位置如圖 3 所示，位於石棹與十字路之間。災後航照及崩塌照片如圖 4 所示，崩塌面積約 20ha，除道路範圍為公路總局用地外，其餘土地皆為林務局公有地。

2009 莫拉克颱風 0805-0810 累積雨量

資料來源:中央氣象局

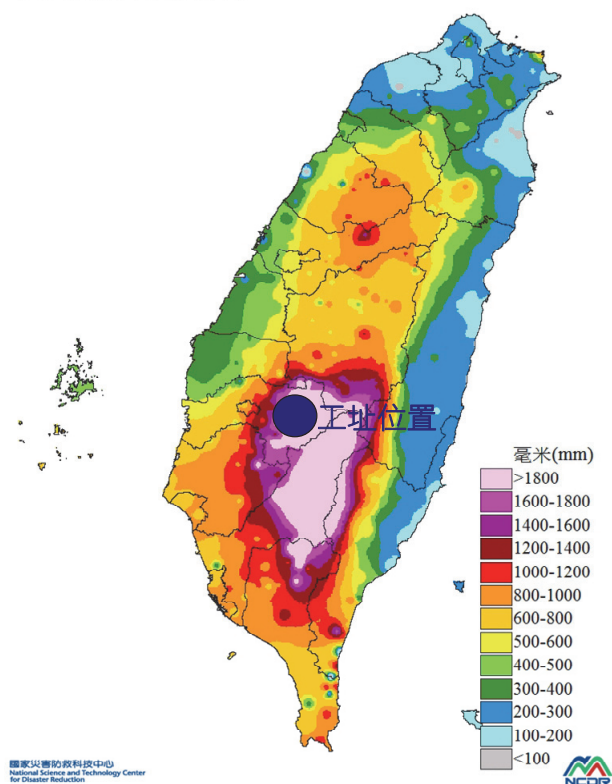


圖 1 莫拉克颱風累積雨量分佈圖(國家災害防救科技中心)



圖 2 台 18 線 71k+100 路基流失便道搶修中(由東往西拍攝)

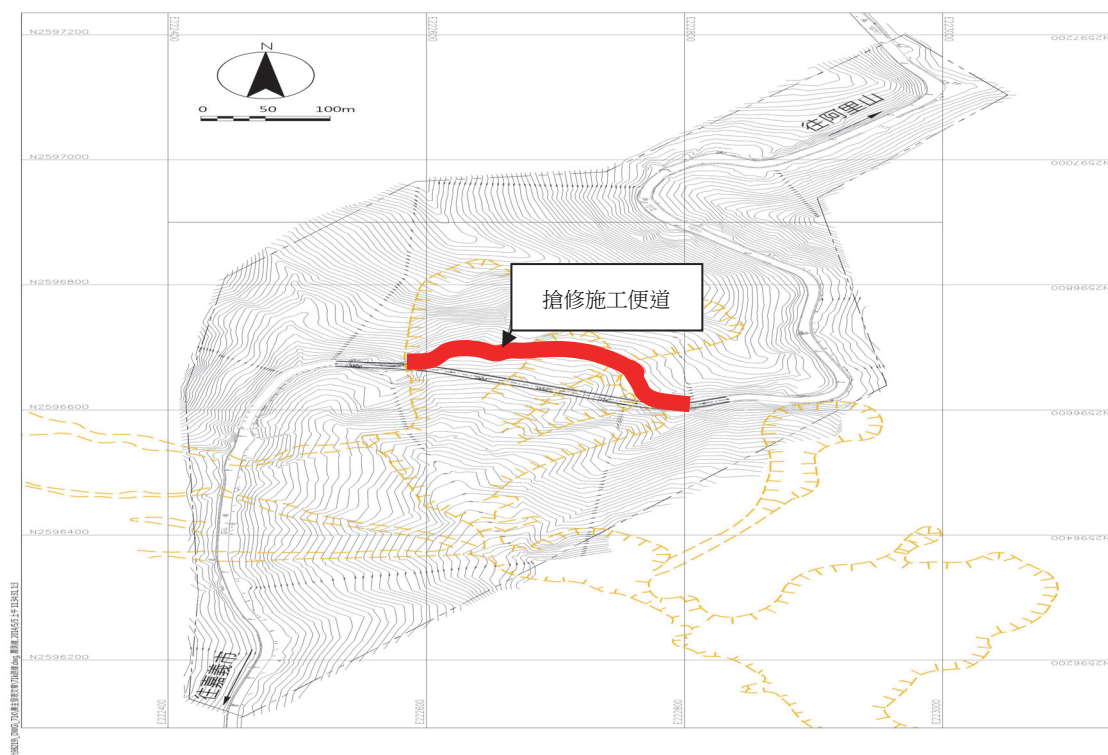


圖 3 台 18 線阿里山公路災害修復工程範圍圖

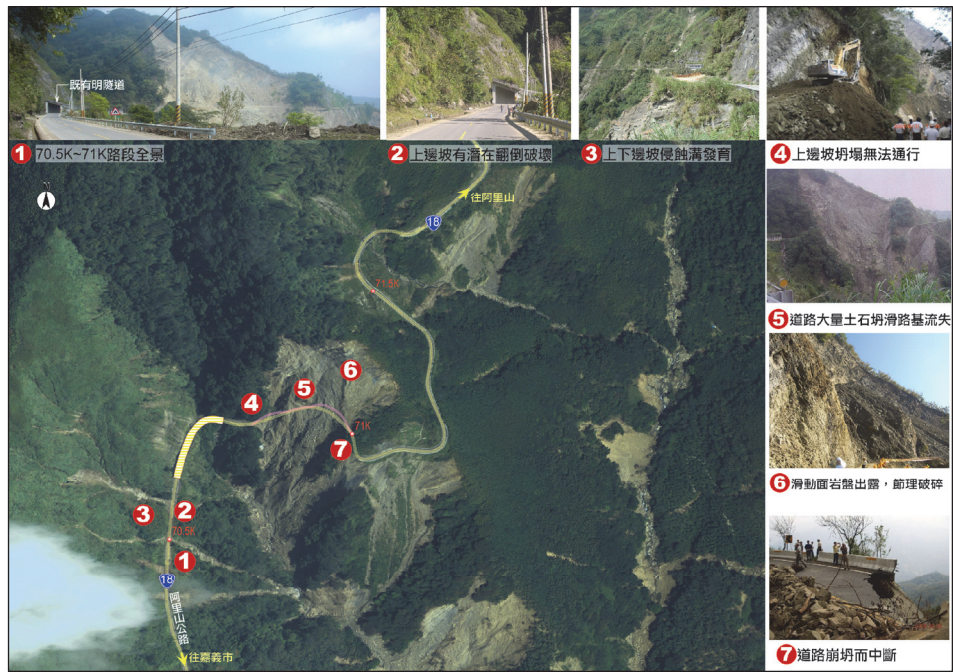


圖 4 阿里山公路 71.1k 附近崩坍災害現勘照片

二、地形與地質

2.1 計畫路線地形

依據經濟部中央地質調查所調查地形及地質，崩坍區里程 71k+100 路段海拔高程介於 1300~1650m 之間，地勢約呈東北往東南傾斜，為一東北高東南低之崩塌區地形，由於地勢較為陡峭，坡面土體受暴雨侵蝕後，導致淺層之崩塌，路基亦因此流失達約 200m，崩塌區內除有明顯之侵蝕溝外，坡趾處亦因向源侵蝕作用，致溝谷附近之崩塌地頗為發育。該崩塌區坡度、坡向圖如圖 5~6 所示，坡度大部份為 5 級坡到 7 級坡，主要坡向為南及東南。

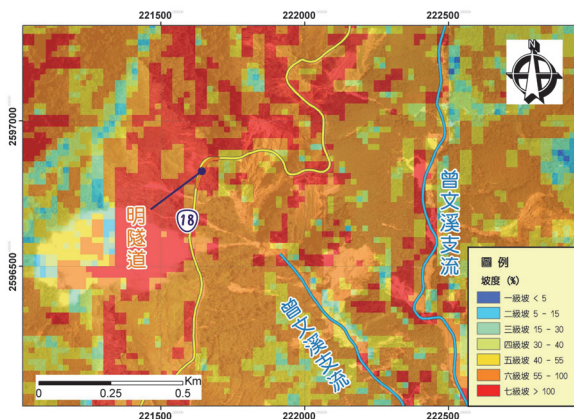


圖 5 工址坡度圖

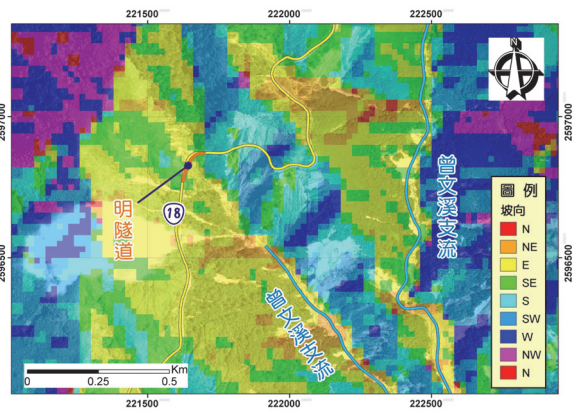


圖 6 工址坡向圖

2.2 區域地質

本路段地質平、剖面圖如圖 7 所示，由既有文獻資料及配合現場地表地質勘查結果，該處地層主要是崩積層、南莊層之砂岩及砂頁岩互層。顯示本計畫崩塌區出露之地層主要為第三紀中新世南莊層，岩性以厚層砂岩與砂頁岩互層、中至薄層砂頁岩互層所構成，新鮮岩體呈淺青灰色及灰色，砂頁岩互層含植物碎片，層面間富有白色雲母碎片該地層特性如表 1 所示。

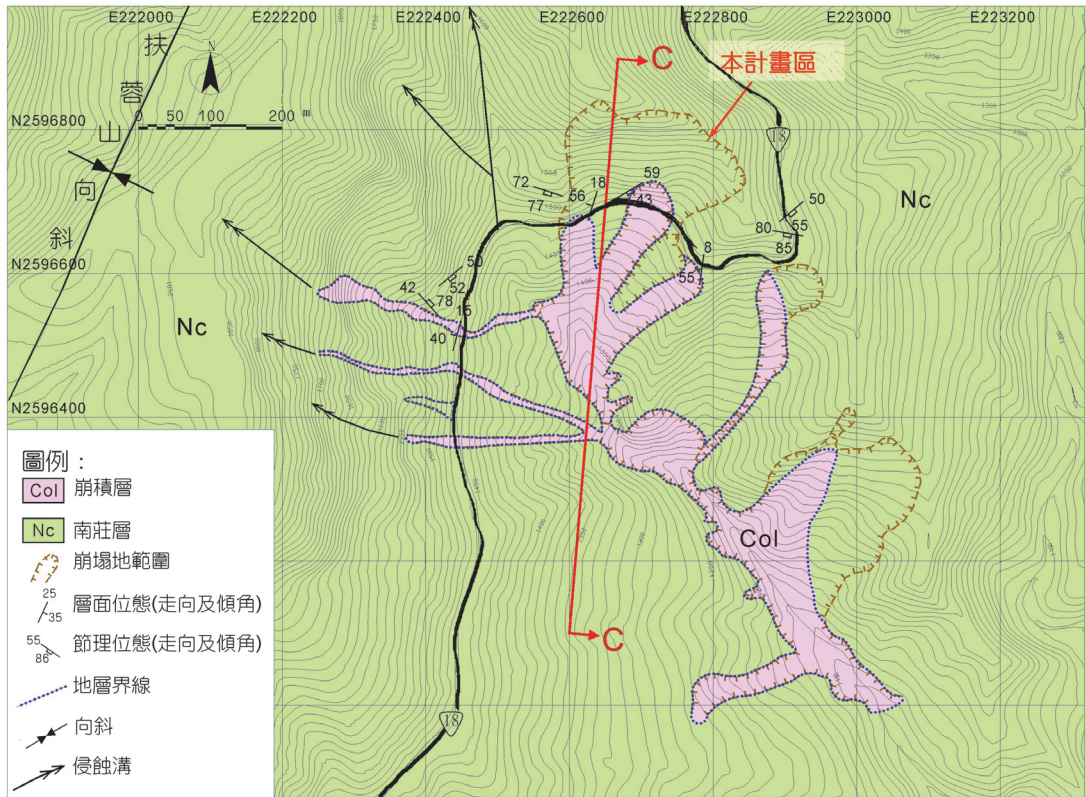
2.3 地質構造

根據經濟部中央地質調查所劉憲德等(2000 年)調查研究資料，顯示扶蓉山向斜構造則通過 71k+100 崩塌區之西北側，該條向斜構造並未直通過崩塌區，由野外地表地質調查結果顯示，本斷層之破碎帶出露於崩坍區範圍，其材料為良好之阻水層，因此不利邊坡之穩定。地表地質調查結果展繪如圖 7 所示。

由現場量測之不連續面位態經由立體投影等位線圖，進行立體投影圖解法進行穩定分析結果如圖 8，顯示本崩塌區除存在崩積層之圓弧形破壞外，岩體內之不連續面亦可能存在潛在平面滑動之順向坡問題、楔型破壞及翻倒破壞(岩塊掉落)等不穩定問題。因此，道路路線修復或改線，需考量上述地質構造問題外，亦需針對此潛在不穩定之工程地質問題進行審慎之評估，以達道路坍塌治標及治本之功效。

表 1 本崩塌區之地層分布特性

時間	地層	地質特性說明	分布或出露區域	露頭照片
全新世	崩積層 (Col)	主要為崩落之未固結砂、粉土、粘土及夾雜大小不一之岩塊等疏鬆材料所組成。	於本區崩坍坡面	
中新世	南莊層 (Nc)	岩性以厚層砂岩與砂頁岩互層、中至薄層砂頁岩互層所構成，新鮮岩體呈淺青灰色及灰色，砂頁岩互層含植物碎片，層面間富有白色雲母碎片。	本地層出露於 71k 附近之崩塌區。	



地質平面圖

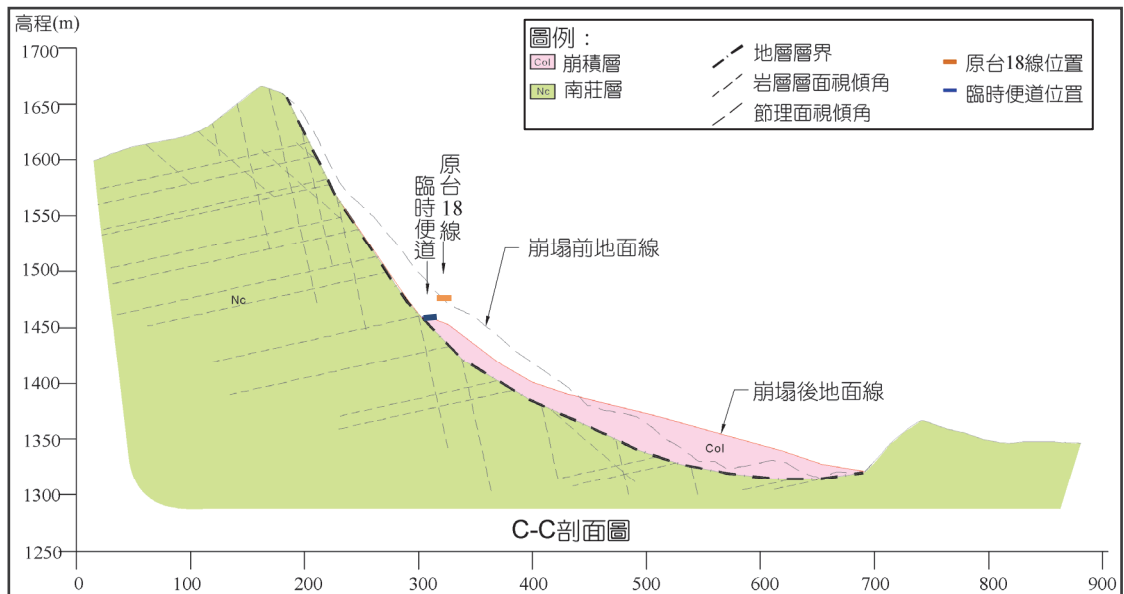
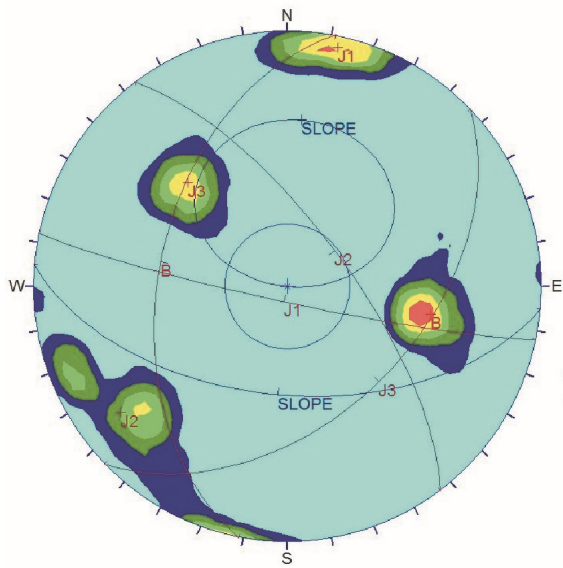


圖7 本工址路段地質平、剖面圖

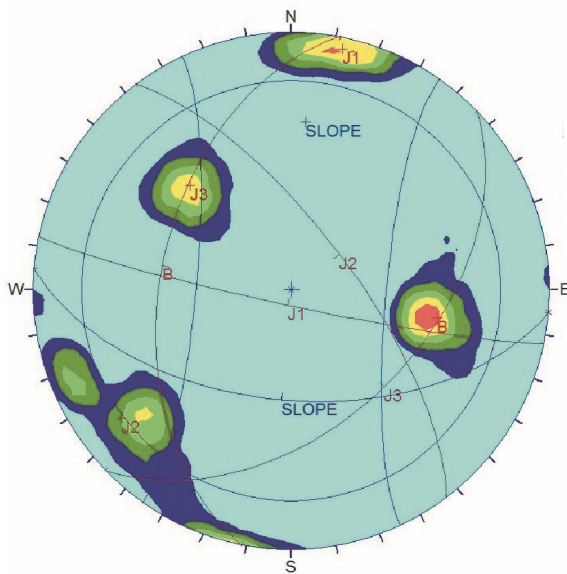


Orientations

	ID	Dip/Direction
邊坡坡度/坡向	1	55 / 185
層面位態(B)	1 m	48 / 281
節理位態(J1)	2 m	85 / 192
節理位態(J2)	3 m	71 / 053
節理位態(J3)	4 m	47 / 136

岩層層面傾向與邊坡坡向呈斜交逆向坡地層，有利邊坡之穩定。

Equal Area
Lower Hemisphere
71 Poles
71 Entries



Orientations

	ID	Dip/Direction
邊坡坡度/坡向	1	55 / 185
層面位態(B)	1 m	48 / 281
節理位態(J1)	2 m	85 / 192
節理位態(J2)	3 m	71 / 053
節理位態(J3)	4 m	47 / 136

1. 層面(B)與部分節理(J3)交切有潛在楔型破壞不穩定問題。
2. 節理(J1)有潛在翻倒破壞不穩定問題。

Equal Area
Lower Hemisphere
71 Poles
71 Entries

圖 8 崩塌區立體投影圖解法分析圖

2.4 地質探查成果

地質探查工作包括地質鑽探 9 孔及地球物理探勘工作，包括震測探測 1,400 公尺，鑽孔及地物探測平面位置如圖 9 所示，依地質震測探測成果所示資料研判工址測線 CE-1 之震測結果，大致呈現二或三層速度結構，速度層剖面及對應地質解釋如圖 10 所示，並分述如次：

第一層：波速 500-1000m/sec，厚度約 0.0-12.0m，相當於覆蓋層(表土、乾燥鬆散崩積層)。

第二層：波速 1000-2000m/sec，厚度約 5.0~25.0m 相當於風化或崩積層。

第三層：波速 2400-3400m/sec，相當於岩盤。在測線距離 180-400 公尺速度 2400~2600 m/sec，為較風化或劈理裂隙發達岩盤。

依地層剖面圖如圖 11 所示顯示西側橋台及橋墩位置岩盤業已出露，條件良好；東側橋台及橋墩的崩積層薄，但為順向坡，下邊坡為砂頁岩薄互層。

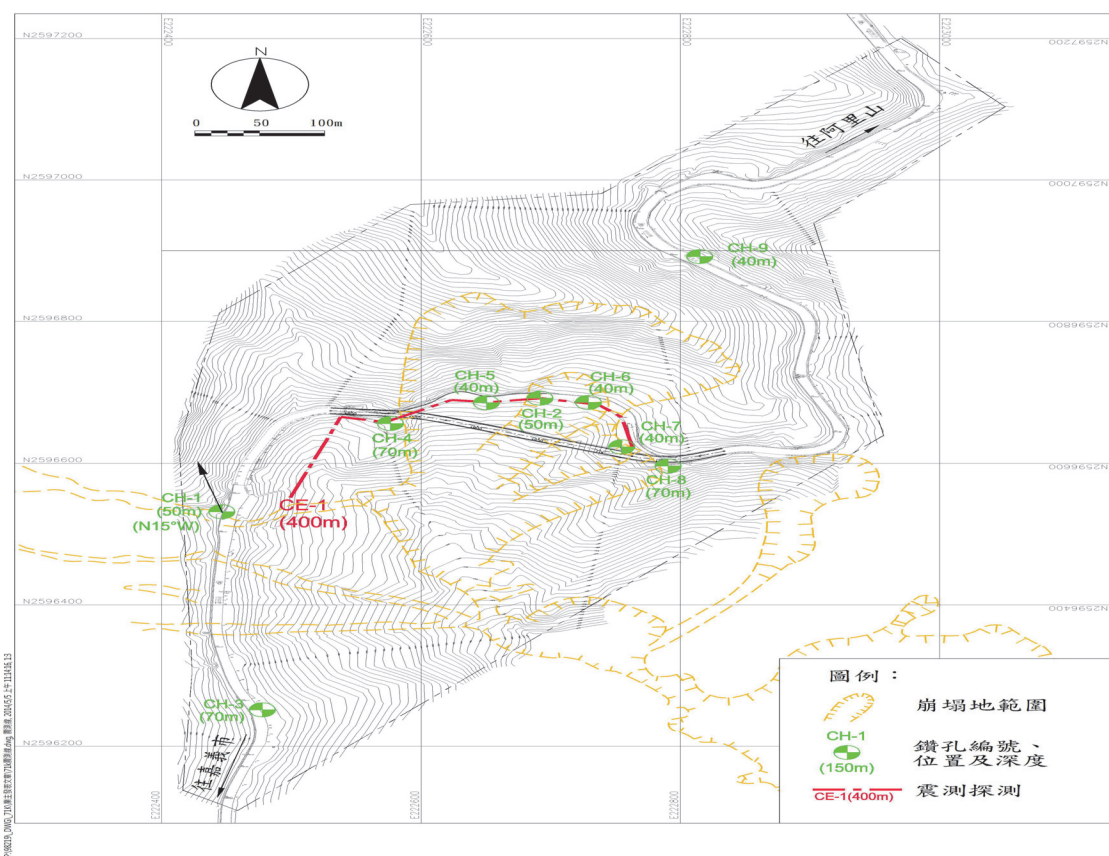


圖9 鑽孔及地物測線配置平面圖

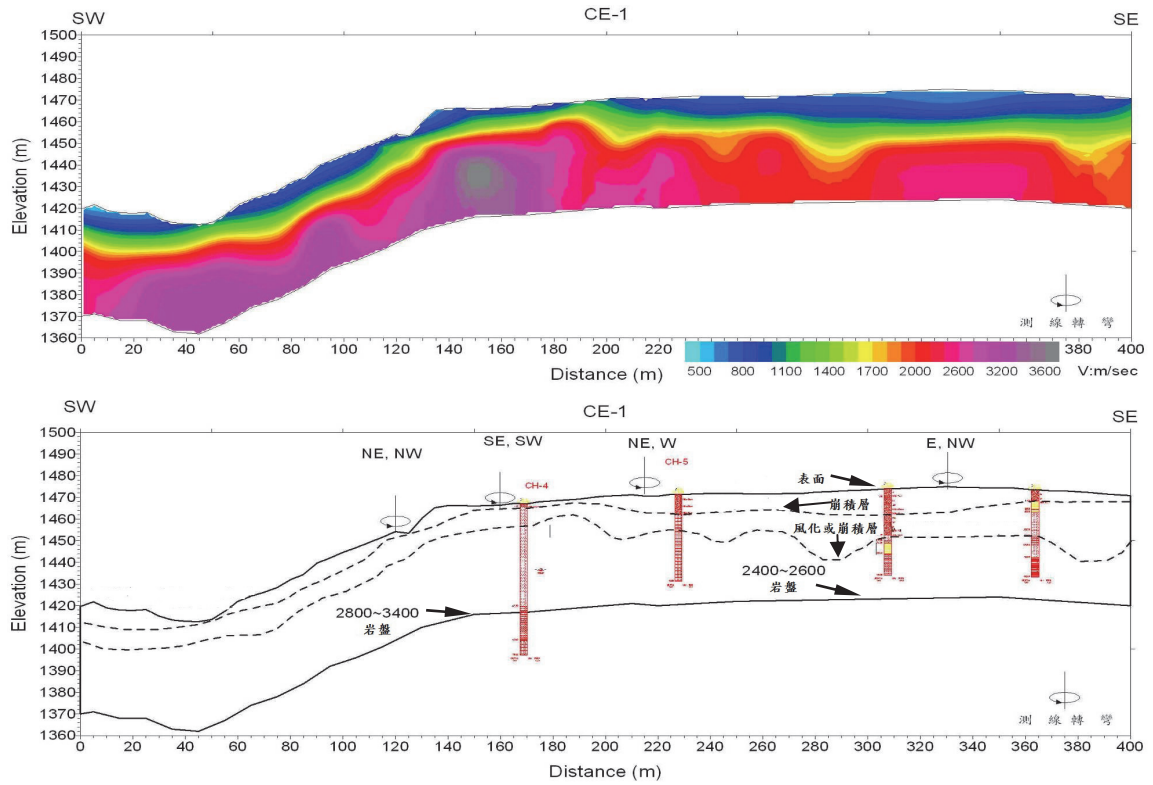


圖10 折射震測探測成果

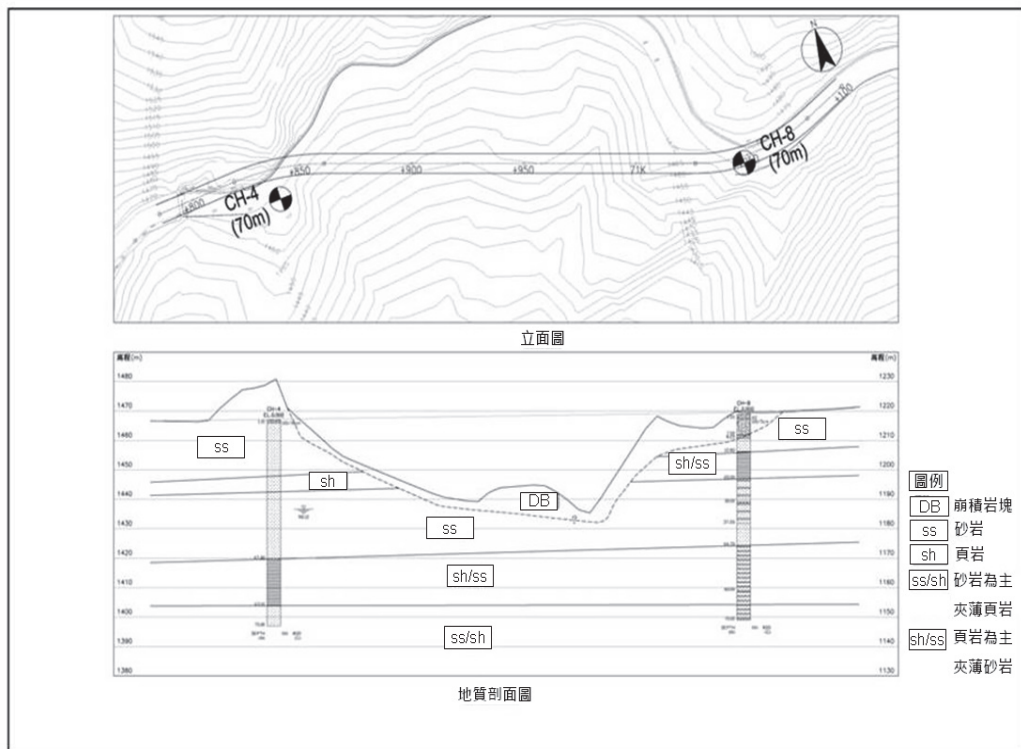


圖 11 於里程 71k 處地層剖面圖

三、水文、排水及橋梁設計

3.1 水文

因台 18 線 3 處大崩坍地較靠近小公田雨量站，故本計畫統一採用小公田雨量站，以鄰近台 18 線里程約 46k 處，位於番路鄉公興村公興國小附近，隸屬於水利署之小公田雨量站(標高約 760m)為代表。統計小公田雨量站最近十年(1999~2008)之資料顯示，年平均雨量高達約 3630.4mm，每年受梅雨及颱風季節影響，降雨量集中於五月~九月，月平均雨量介於約 400~900mm 之間，佔全年平均雨量 85.68%，以七月平均雨量達 885.9mm 為最大。

依據小公田雨量站統計資料顯示，最大時雨量為 80.5mm，連續 24 小時最大累計雨量達 1125.5mm(發生於 8 月 8 日 6 時至 8 月 9 日 6 時)，而四日累積總雨量達 1354.5mm，如圖 12 所示時雨量分佈。如此連續高累積雨量之降雨型態，造成本計畫山區土石鬆軟，再加上地表逕流加劇侵蝕坑溝，以致釀成坡面崩塌及路基流失等災害。根據水利署初步針對此次莫拉克颱風降雨量的頻率分析，隸屬八掌溪流域之小公田雨量站，連續 24 小時最大累積雨量已超出 200 年頻率。

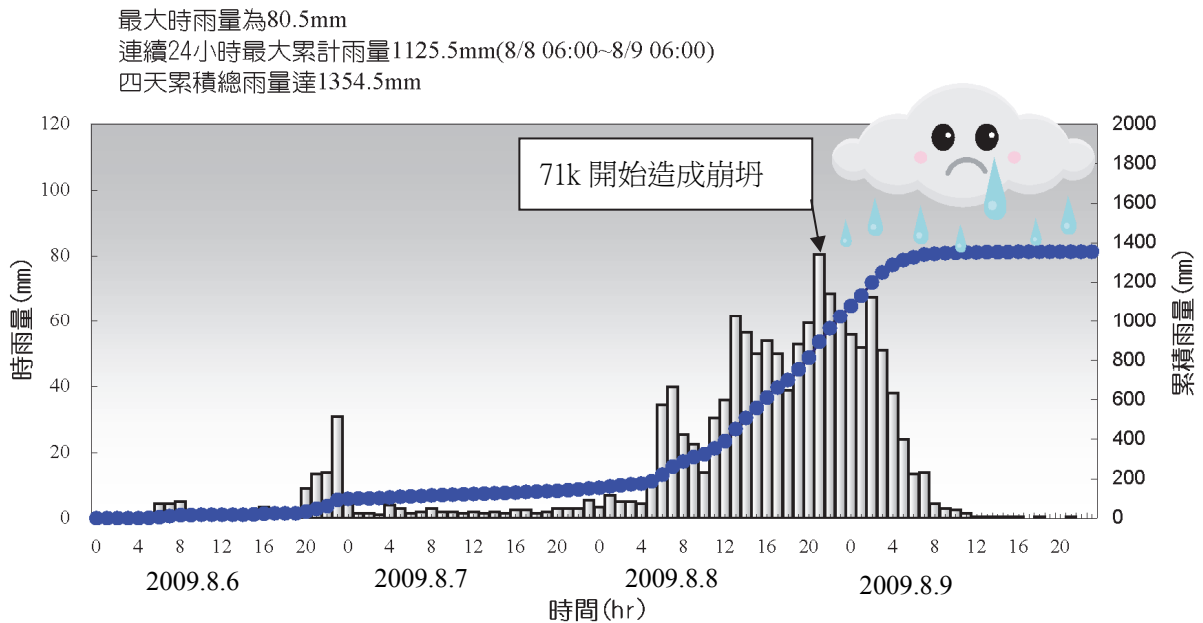


圖 12 莫拉克颱風期間(2009.8.6~2009.8.9)小公田雨量站時雨量分佈

3.2 排水設計

71k+100 路段，係位於曾文溪流域集水區範圍山稜線之邊緣，集水面積不大，惟受上、下邊坡地質破碎因素影響，遭受此次連續之高累積雨量，導致土石鬆軟、坡面崩塌

及路基流失，臨時道路以土溝、涵管方式導排，下邊坡崩塌範圍大，並延伸至曾文溪谷地。

本計畫屬道路災害復建工程，主要之排水工程設計，包括道路側溝，坡面橫、縱向截水溝等，因屬崩塌地坑溝治理性質，故依據「水土保持技術規範」野溪治理之標準，採用 50 年降雨頻率計算。坡面縱向截水溝主要沿坡面既存之沖蝕溝做佈置及治理，本工程設置有 4 道縱向排水截水溝，配合坡面橫向截水溝，以導排坡面水。於通行臨時便道佈設集水井及橫向排水管涵，分散雨水逕流，穿越道路路堤後安全排導至下游新設之潛壩。

3.3 道路復建方案橋梁研選及設計考量

本項災害復建工程選定方案係採半穿式鋼拱橋跨越主要崩塌區，其平、縱斷面如圖 13，茲就復建方案評估歷程、考量因素略述如下。

表 2 為各方案比較表，方案一路工方案路線與既有便道相近，且於 71k 附近上邊坡崩積層厚達 20~30m 左右，需進一步評估其整治工法，方案二隧道方案於 70k+395 之前需以路堤填築以提高道路高程以銜接隧道洞口，其工期將達 24 個月，將不符 100 年 12 月底通車之目標，方案三橋梁方案之東西兩側橋台(墩)皆座落於岩盤上，只需針對其上、下邊坡之護坡進一步處理，雖工期初估約需 18 個月左右，惟若施工順利亦有可能提前完成預期，可符 100 年 12 月底之通車時程，本方案應屬較可行之方案。

表 2 71k+100 路段各方案比較表

說明	方案一 路工方案	方案二 隧道方案	方案三 橋梁方案
運輸需求及居民進出需求	佳	中	中
生態保護	中	佳	佳
復育及防災	中	佳	佳
復建工期(月)	16	18~19	16~24
復建經費(億元)	2.6	3.4~2.6	4.7~3.2

本復建工程為能盡量減低道路之受災風險，避免於地質敏感區落墩，宜採用大跨徑橋梁，以跨越崩塌區。經由綜整工址之崩塌區範圍、地形地貌、初步地質研判、材料供應與運輸條件、施工架設條件及與現有台 18 線之銜接等因素，本工址之復建橋梁方案需考量下列因素與條件：

- 1、崩塌範圍大，適宜落墩之距離約達 300m
- 2、可設置橋墩之位置距離預定道路路面高度約 50~60m。
- 3、運輸距離長，且設置預拌混凝土廠困難，宜盡量減少混凝土之使用量。
- 4、崩塌區具深谷之地貌，橋型需考量施工與吊裝架設條件。

- 5、為減少基礎施工對現有地質擾動及傳遞至地層之力量，同時提升橋梁之抗災能力，宜儘量減輕上部結構之靜載重。
- 6、為縮短工期，以符民意之期待，宜採用施工快速之橋型與工法。
- 7、工址位於山巒疊翠、山色優美之地區，橋型選擇宜簡單、輕巧，融入周遭景色為佳。

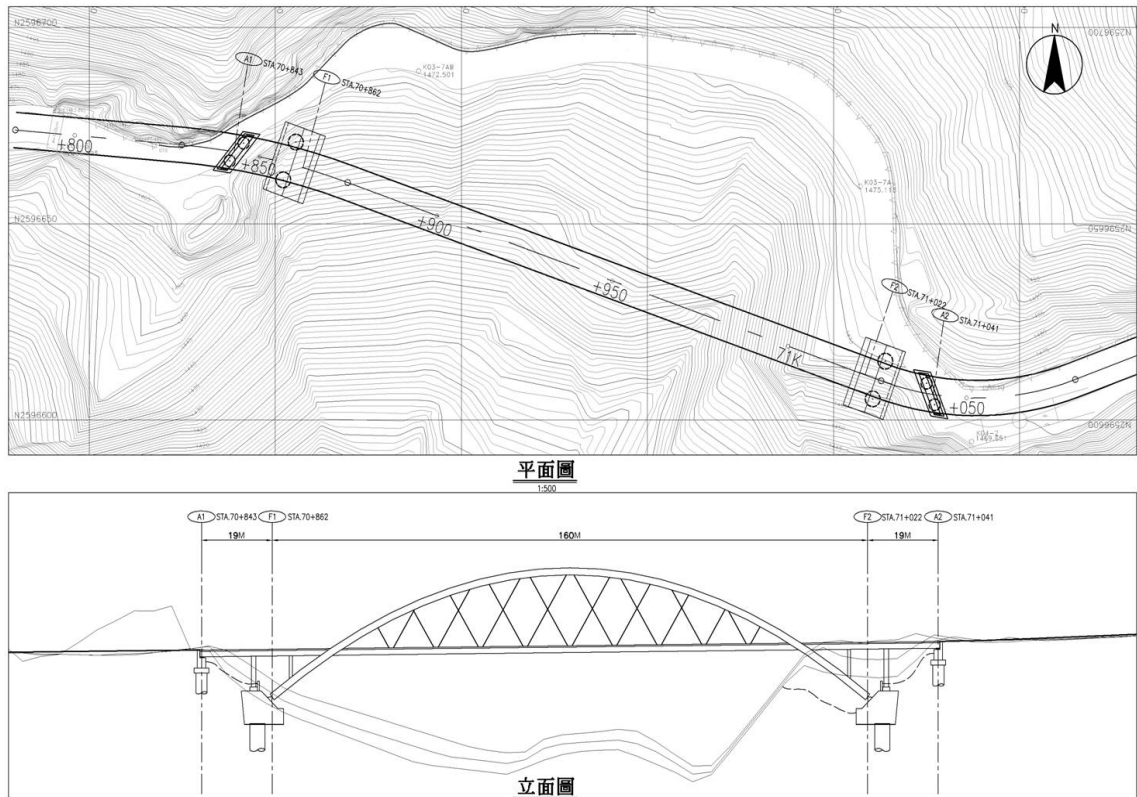


圖 13 71K+100 平、縱面配置圖

綜合考量上述各項因素與施工條件，初步檢討研析，有關於 71K+100 處復建橋梁方案與跨徑配置之研選，除需考量於前述包括地形地貌、地質狀況、材料供應與運輸條件、施工架設條件、週遭環境景色及與台 18 線之銜接等因素與條件外，必須特別考量本工址崩塌區之特性及崩塌潛勢範圍。由於克服運輸與吊裝架設條件之困難，仍為本工址復建工程之首要課題。而鋼構造構件輕巧，不僅可減少結構量體，並可依據運輸與施工條件需求，規劃節塊尺寸大小。除可大幅降低地震慣性力及現場易於吊裝架設外，且鋼構造在工廠內製作，品質容易掌握，施工迅速。

因此，本工址復建橋梁方案以採用鋼橋為宜，而配合橋梁方案路線、地形地貌及地質等條件，計研擬半穿式鋼拱橋及 π 型鋼橋等二種橋梁型式，平、立面配置分別如圖 14 及 15 所示，圖 16 為電腦合成透視圖，完工後如圖 17 所示。初步檢討，各種橋型方

案之施工工法可採用塔吊方式架設，而各橋梁方案結構概要及特性簡述如下。

1、橋梁方案 A：半穿式鋼拱橋

- (1)上部結構採用鋼箱型梁，拱跨徑 160m，拱高約 32m，全長 198m，橋面全寬 9m。並採用鋼箱型拱肋支撐上部結構；橋面採用 RC 橋面板。
- (2)半穿式鋼拱橋優美的拱弧搭配吊桿以懸吊橋面，結構外型線條顯得相當優雅簡淨，本橋型常見於跨越山谷、溪流。

2、橋梁方案 B： π 型鋼橋

- (1)上部結構採用兩個鋼箱梁，下部結構橋墩採用鋼箱型斜撐柱，橋墩直接跨越土石崩塌區，並有效降低橋墩高度。本橋型常見於跨越山谷、溪流，造型簡單優美簡潔。
- (2)本方案主橋跨徑配置為 $45\text{m}+75\text{m}+45\text{m}+30\text{m}=195\text{m}$ ，橋面全寬 9m。最後考量工期及施工性等因素，以橋梁方案 A 半穿式鋼拱橋為最終設計方案。

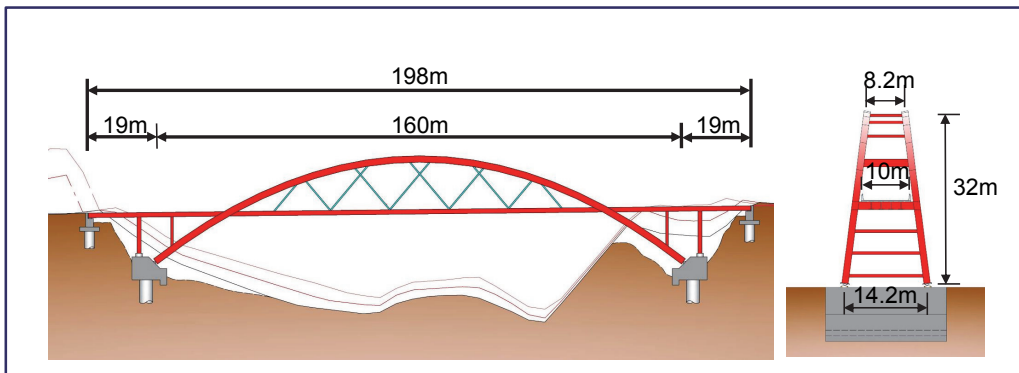


圖 14 半穿式鋼拱橋

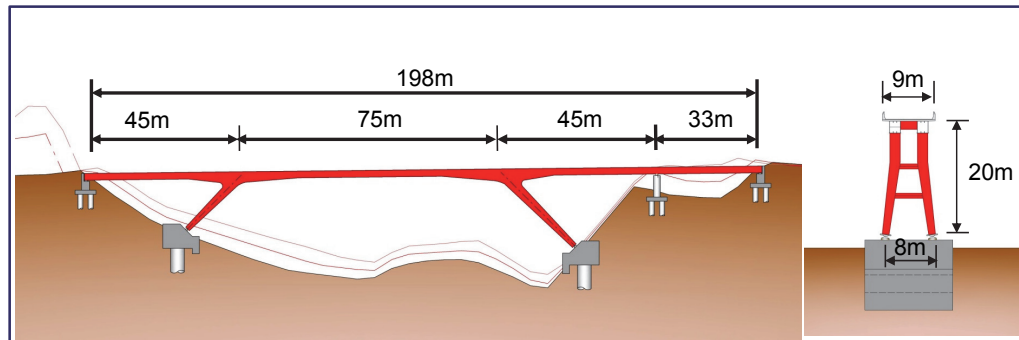


圖 15 π 型鋼橋



圖 16 電腦合成透視圖



圖 17 芙谷峨橋施工前、後相片

因此 71k+100 路段既有便道路寬及道路線形需再作適度調整平順以符道路設計標準，上邊坡除落石防護網及坡面植生外，仍需作坡面上危岩或裂縫之調查及相關導排水之規劃設計並針對下邊坡作適當之整治，本工址復建橋梁方案以採用鋼橋並以半穿式鋼拱橋設計，拱跨徑 160m、拱高約 32m、全長 198m，橋面淨寬 9m，由鋼箱型梁及鋼箱型拱肋支撐 RC 橋面版如圖 14 所示。橋台及基座以井筒式基礎施作(直徑 4M，深度有 10M 及 15M)，井基基礎設置較好岩盤上面，有效減少下部結構施築及吊裝架設之困難度，以避開上邊坡坍方之影響，確保橋梁長期安全。該標不僅工程規模大，又因地形陡峭危險，隨時要注意右側上邊坡落石及左側下邊坡深不可測之懸崖且多為崩坍之崩積土，下雨容易造成土方流失，在施工困難度及風險相對提高。另外包括上邊坡削山、掛網植生、縱向排水溝、岩錨幕牆及潛壩等工項如圖 18 所示。

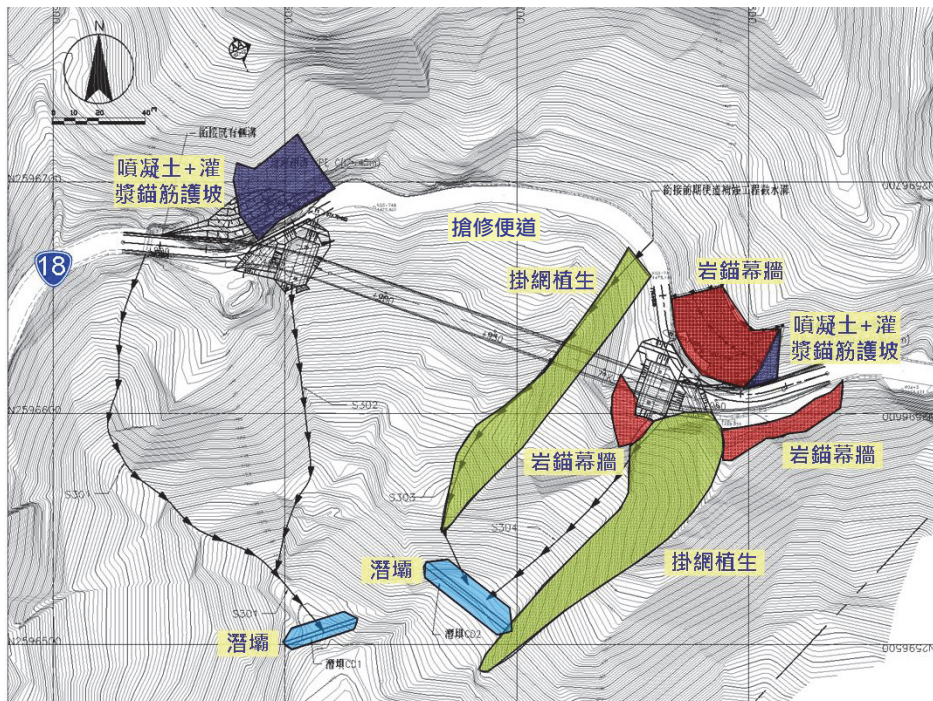


圖 18 台 18 線 71k+100 施工平面圖

四、工程施工

莫拉克 88 風災後，考量台 18 線為阿里山地區主要交通要道，復建工程時效性及免影響地方觀光產業發展，阿里山工務段將台 18 線復建工程分成 19 件標案辦理，其中受創嚴重之 37K+500~40K+100、59K+100 附近及 71K+100 附近三處大規模崩坍委由顧問公司分 3 標辦理設計，其餘 16 件標案則由該段自行辦理設計。由於阿里山工務段尚須辦理縣道部分之災修工程，一下子多出這麼多標案，以該段的人力實難負荷，因此將該委託設計之 3 標工程於發包後交由嘉太工務所負責監造事宜。

4.1 井基及基座施工

本工程於 99 年 5 月 16 日開工，新橋復建井基施作之初，雖西側橋台及基座位置岩盤業已出露，條件良好，惟岩盤堅硬，因井基直徑僅 4 公尺，較大之破碎機無法進入井基下施作，僅能以 15P 馬力的破碎機來降挖井基深度，有時一天降挖深度不到 15 公分，惟有採用 24 小時施作來趕工，再加上山區多雨及多霧，有時只聽到破碎機降挖之聲音，看不到任何施工機械身影，歷經四個月才將 A1 橋台及 F1 基座降挖至設計高程。原設想已有 A1 端井基施作之經驗，施工速度可以加快，惟東側橋台及基座的崩積層薄，但為順向坡，下邊坡為砂頁岩薄互層，在 A2 井基降挖過程因上邊坡為砂頁岩薄互層順向坡，降挖快到設計高度時造成上邊坡岩盤滑落，土方將井基整個覆蓋，又要重新施作。經施工團隊日夜趕工下，終於將 A2 橋台井基完成。但開始要施作 F2 基座井基降挖至施工之地面線時，再次造成上邊坡 3~4M 厚之岩盤滑落，經與顧問公司討論後需先行施作邊坡保護再降挖，當邊坡保護完成後要降挖至預定高度時，又適逢颱風豪雨季節，於 100 年 6 月 16 日至 8 月底二個半月中總共下 53 天雨，造成岩盤節理裂縫擴大，也再次造成上邊坡 3~4M 厚之岩盤滑落如圖 19 所示，這次就以地錨配合 H 型鋼方式來保護邊坡如圖 20 所示，終於在 101 年 1 月初將 A2 橋台及 F2 基座完成，惟時間已延宕六個月。



圖19 F2基座上邊坡3~4M厚之岩盤滑落



圖20 F2基座上邊坡以地錨配合H型鋼方式來保護邊坡

4.2橋梁吊裝施工

本工程橋樑吊裝施工最大的困難在於地形陡峭，施作鋼橋吊裝臨時支撐，因考量該臨時支撐位置大部份均屬崩積土，特別要求承包商施作 150CM 全套管基樁，長度依實地鑽探來施作。惟承包商要將重達 60T 的吊車及全套管機具送到預定吊裝便道上，就遇到困難，因要從現通行阿里山公路到達陡峭施工便道上高差達 30 公尺，承包商就以打設施工構台方式讓吊車及施工機具到達如圖 21 所示，惟此方式又施工三個月。正當順利從 A1 及 A2 端開始吊裝時，於 101 年 3 月 30 日承包商吊裝時不慎部份鋼梁掉落於下邊坡，該鋼梁重新施作需要 3 個月時間，另鑑於本次工安事故檢討要求承包商再增加臨時支撐及更換專業吊裝廠商，在專業廠商進駐以後終於在 101 年 7 月 2 日開始吊裝鋼梁，於 7 月 28 日將鋼拱橋平面鋼梁吊裝閉合，9 月 13 日完成鋼橋上拱肋合攏吊裝。



圖21 承包商打設施工鋼構台方式讓吊車及施工機具到達吊裝便道

4.3 鋼梁吊裝修正施工

(一) 鋼梁上拱肋吊裝原則之修正問題

經過工安事故後之檢討，為降低吊裝時之風險，施工廠商依業主之強力要求修正原定之吊裝計畫，增加吊裝時之上、下臨時支撐數量，下支撐由原計畫之 4 處，於現場適當處再增加 2 處，而上支撐亦由 2 處亦增加為 4 處如圖 22 所示；但拱肋吊裝時吊車仍配置站立於水平主梁(或稱弦梁)之構件上作業如圖 23 所示，對於吊裝作業之風險管控依然存在隱憂，因此 101 年 6 月 7 日由公路總局許副總工程司阿明召開的鋼梁吊裝檢討會議中，決議不同意現行的吊裝方式，請施工廠商改用其他安全的吊裝模式。

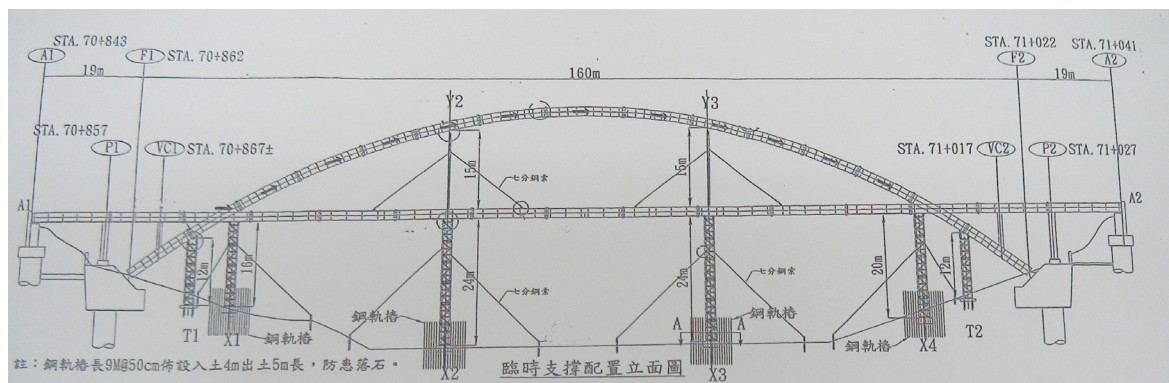


圖 22 原吊裝計畫臨時支撐配置圖

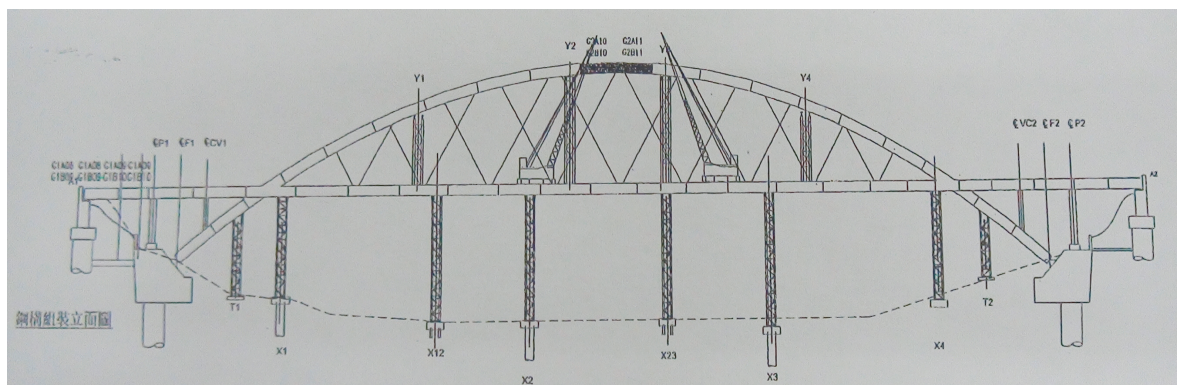


圖 23 工安事件後吊裝計畫臨時支撐修正配置圖

(二) 更換較具專業的工班解決吊裝安全性問題

由於業主對鋼橋拱肋吊裝模式的堅持，施工廠商在吊裝風險評估與對工進影響的權衡之下，檢討現行的吊裝方法確有不妥之處，而工班的專業度亦屢受質疑，又經歷吊裝工安事故的教訓，終於決定撤換現有吊裝工班，另請對鋼拱橋吊裝專業度較佳的工班進

場施作。

(三) 修正吊裝計畫採行較安全吊裝模式

當新的施工團隊進場後提出修正版本的吊裝計畫，其修正的內容如下：

1. 水平主梁吊裝時，設置 6 處臨時支撐，吊裝時依支撐之間距，構件以 2 或 3 個節塊進行吊裝，以增加吊裝次數減少吊裝時節塊重量來降低吊裝風險。
2. 配合工地現場土建之施工誤差，產生之閉合節塊實際長度須於主梁吊裝最後階段，現場精確量測回饋鋼構廠商配合製作，為爭取時效請鋼構廠商先行預估，並修改閉合節塊之長度較實際稍長，俟現場回饋數據後立即處理，再送工地安裝。
3. 拱肋吊裝時，亦增設臨時支撐為 6 處，吊裝時吊車配置於地面，站立之位置須精確計算配合內，外兩側主梁與橫梁之預留空間，拱肋構件以 2 個節塊進行吊裝，降低吊裝風險如圖 24 所示，而拱肋之閉合節塊處理方式，則同本節第 2 項之說明。

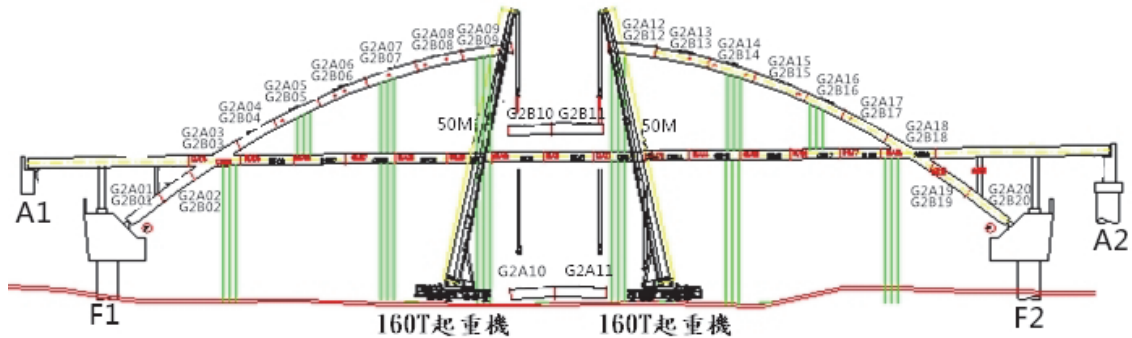


圖 24 核定版吊裝計畫臨時支撐配置及吊裝工法示意圖

(四) 鋼橋主梁及拱肋吊裝巡查及工進修正

當新的施工團隊於 6 月底進駐工地後，立即對已安裝的構件，積極展開測量以了解其誤差情況，並研擬改善對策；另外對吊裝空間妥善規劃，吊裝前及吊裝過程中，在公路總局新工組「技術顧問作業小組」亦多所參與，實際吊裝期程自 7 月 9 日主梁吊裝至 9 月 13 日拱肋閉合止，歷經 3 個月餘，期間雖幾次豪雨影響數度修正工進，所幸均能確保吊裝之安全性。茲將各階段實際吊裝完成日程列表於後(詳如表 3、4、如圖 25)，拱肋吊裝完成現況如圖 26 所示，施工及完工照片彙整如表 5 及表 6。

表 3 主梁各節塊完成吊裝日期

吊裝次數	節塊編號	吊裝完成日期
第 1 次	G1B06- G1B08	7/9
第 2 次	G1A05- G1A07	7/11
第 3 次	G1B09- G1B10	7/13
第 4 次	G1A08- G1A09	7/13
第 5 次	G1B11- G1B13	7/15
第 6 次	G1B15- G1B18	7/17
第 7 次	G1A10- G1A12	7/21
第 8 次	G1A14- G1A17	7/23
第 9 次	G1B14*	7/26
第 10 次	G1A13*	7/28

註：*為閉合節塊

表 4 拱肋各節塊完成吊裝日期

吊裝次數	節塊編號	吊裝完成日期
第 1 次	G2A04、B04、A17、B17	8/9
第 2 次	G2A05、B05、A16、B16	8/15
第 3 次	G2A06-A07、B06-B07	8/19
第 4 次	G2A08-A09、B08-B09	8/22
第 5 次	G2A14-A15、B14-B15	9/03
第 6 次	G2B12- B13	9/05
第 7 次	G2A12- A13	9/08
第 8 次	G2B10*-B11	9/11
第 9 次	G2A10*-A11	9/13

註：*為閉合節塊

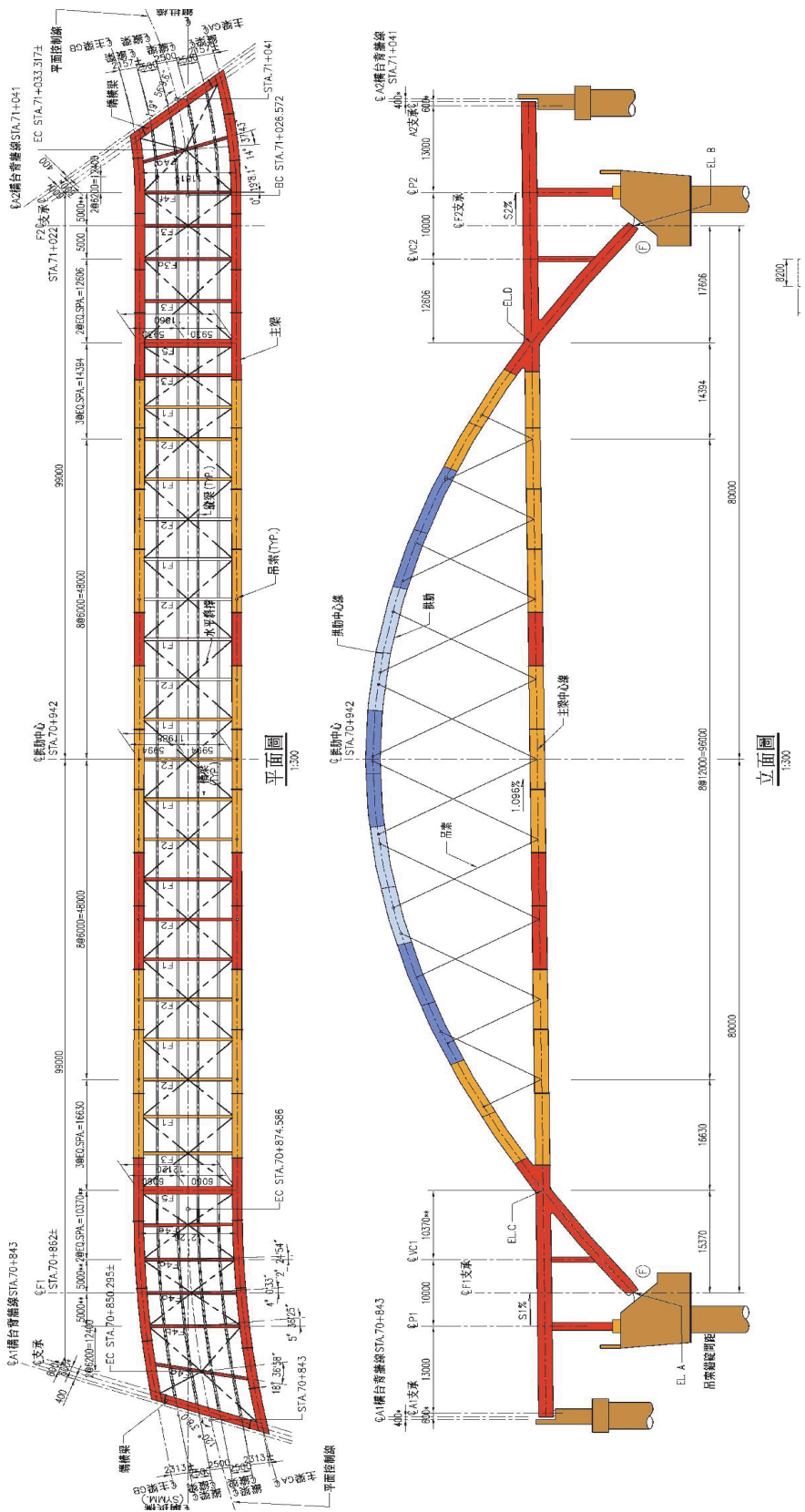


圖25 鋼拱橋吊裝完成示意圖

表5 台18線71K+100 施工照片一



A1 井基引孔降控



F2 井基降挖施工



A1-F1 橋台及基座施工



A2-F2 橋台及基座施工



臨時支撐基樁施工



平面鋼梁吊裝



鋼梁上拱肋吊梁施工



鋼梁吊裝施工鳥瞰圖

表6 台18線71K+100施工照片二



上拱肋鋼梁閉合吊裝



鋼拱橋吊索施工



鋼拱橋吊索施工完成



完工現況



完工鳥瞰圖



完工鳥瞰圖



從169線達邦往台18線71k+100鳥瞰圖



完工通車現況



圖 26 鋼拱橋吊裝完成現況

4.4 山野芙蓉綻放 國際觀光亮點

本案工程由五工處嘉太工務所辦理監造，惟本所僅 5 位工程人員，要負起 6.5 億元監造工作，另外要辦理二標剛竣工之驗收結算，讓工程司頓時倍感壓力沈重，惟為加速莫拉克風災台 18 線重建工作，本所就發揮團隊及克服萬難、使命必達精神，達到上級交付的任務。每當監造單位施工技術遇到困難，上級單位及台灣世曦工程顧問股份有限公司都馬上給予協助解決，在這期間總共召開 30 次趕工協調會及各單位上級長官都到工地視察，要求在兼顧施工安全及工程品質下，加緊施工，為阿里山公路增添一座景觀大橋。本件標案係行政院重建會推動之「再造大阿里山風華計畫」中列管的重大工程之一，除每週追蹤進度外，每月另召開專案協調會議積極管控；目標比照 921 集集大地震災後日月潭重建一般，要將阿里山地區重建為國際知名觀光亮點。其中最重要的工作是投入 18.7 億元修復並強化阿里山地區台 18 及 21 線兩條主要對外連絡道路。

由於該橋跨越陡峭山谷，施工便道及平台設置不易，工址並需隨時注意上邊坡崩塌區滑落鬆動土石，山區午後又常起霧或下雨，不但須克服天候更需挑戰惡劣的施工環境及在軟弱地質進行鋼橋吊裝，施工困難度及風險相對提高。所幸一路走來，在行政院重建會、交通部督導，及公路總局暨所屬施工團隊發揮互助合作精神，逐一克服困難，並通過 101 年 610 水災、泰利、蘇拉、天秤颱風考驗，芙谷峯橋並於 102 年 1 月 15 日開放通車，來往車輛將由臨時便道改走新橋，工程於 102 年 2 月 8 日完工，重建一條防災、風雨無阻的阿里山觀光安全大道，除能提供當地居民安全舒適的聯絡交通外，更將成為該地區的嶄新地標。

本工程原係平面道路因風災關係，另新建一座半穿越式鋼拱橋，係跨山谷而未跨越溪河工程，且橋梁所在地屬行政院核定之山地原住民鄉，考量當地特殊地方人文與族群特色，包含鋼梁顏色及橋名均洽詢阿里山鄉公所建議，其中橋名經洽詢嘉義縣阿里山鄉公所建議以鄒族語音 FKUO 命名為「芙谷峩橋」，其命名由來係「芙谷芙谷峩」為阿里山區鄒族原住民族之地名，意味著滿山遍野的「芙谷峩」樹，其國語學名為「山芙蓉樹」。「山芙蓉樹」亦為鄒族原住民之吉祥樹種，樹皮纖維硬實，將樹皮纖維染成紅色與山豬獠牙製成男臂飾配戴，可驅惡避邪，護身祈福。

阿里山是台灣最著名的觀光勝地，也是大陸地區民眾來台旅遊必遊景點，再造大阿里山風華計畫，在政府各部門積極推動下，已有顯著成效，101 年 1-12 月大阿里山地區遊客達 393 萬人次；阿里山遊樂園區 101 年預定目標 170 萬人次，統計至 12 月底止已達 208 萬餘人次，旅遊人潮已逐漸回流中。

伍、建議

本工程為莫拉克風災修復工程，位處台 18 線阿里山公路路段，頗受全國矚目；風災發生後施工環境極為險惡，又遭遇得標之施工廠商並非以橋工見長，以致於在處理工程問題之決策上方向偏差，導致施工問題層出不窮，進度落後。建議日後類似山區災修工程於招標時訂定廠商資格及相關工作經驗，以慎選優良廠商，避免災修時程延宕。

參考文獻

1. 中華顧問工程司(2009)，” 2009 莫拉克颱風八八水災橋梁勘災紀實”。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2009)，八八水災工程災害網站，
<http://www.ceci.com.tw/morakot2/>。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2010)，莫拉克風災台 18 線 37K+500~40K+100 附近災害修復工程設計原則報告。
4. 交通部運輸研究所(2009)，公路防災資訊系統網站，<http://bobe.thb.gov.tw/>。
5. 林銘郎、吳文隆、周坤賢、楊智堯、王景平(2008)，” 台灣坡地災害地理區位類型及整治案例探討”，中華技術第 77 期，P.42-53。
6. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2012)，台 18 線 71K+100 芙谷峩橋工地吊裝協助紀要，吳榮林。

三維分析技術應用於公路隧道施工鄰近區域水資源 環境影響研究

林廷彥*、蕭富元**、高憲彰***、彭詩容****

摘要

近年來臺灣氣候變遷劇烈，水資源供應之穩定性亦受影響，降雨豐枯變化極端化，公路隧道施工與鄰近水資源環境影響互動關係日益受到關注。理論公式解析及二維平面分析實無法適用複雜多變之山區水文地質狀況，而隨電腦科技與相關技術之進步，三維數值分析已逐漸廣泛應用於複雜狀況之地下水流問題探討與水資源評估。本文乃介紹廣泛應用於地下水模擬之 MODFLOW 有限差分法，說明模式基本原理及三維模式建立程序、並以臺灣東部變質岩區之複雜水文地質條件為例，利用三維數值分析技術，探討公路隧道施工可能對鄰近區域水資源環境之影響。本文所提方法技術與經驗可提供臺灣未來公路隧道興建與水資源環境保護溝通之參考。

關鍵字：公路隧道、水文地質、三維數值分析、水資源環境。

一、前言

台灣降雨量豐沛，平均年降雨量達 2500 公厘，約為世界平均降雨量之 2.6 倍(鍾侑達等, 2009)^[13]。但由於台灣之河川普遍河身短、坡度大且水流湍急，地表水不易蓄留，加上人口密集，導致每人所分配之水量僅約世界平均值之 1/7 左右，因此被聯合國列為水資源貧乏地區。國家災害防救治中心所出版之臺灣氣候變遷科學報告(2011)^[10]進一步指出：臺灣百年來之年平均降雨量變化不明顯，但降雨日數則呈現逐漸減少之趨勢(如圖 1 所示)，且大豪雨日數(日雨量大於 200mm)有逐漸增加現象。上述情形意謂臺灣近年來之降雨型態呈現年降雨總量變化不大，但降雨集中於短時間內且降雨強度增加，此種

* 交通部公路總局蘇花公路改善工程處設計科 科長

** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 高級研究員

*** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 資深研究員

**** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 助理研究員

降雨特性除易釀成各種災害外，並進而影響水資源供應之穩定性。

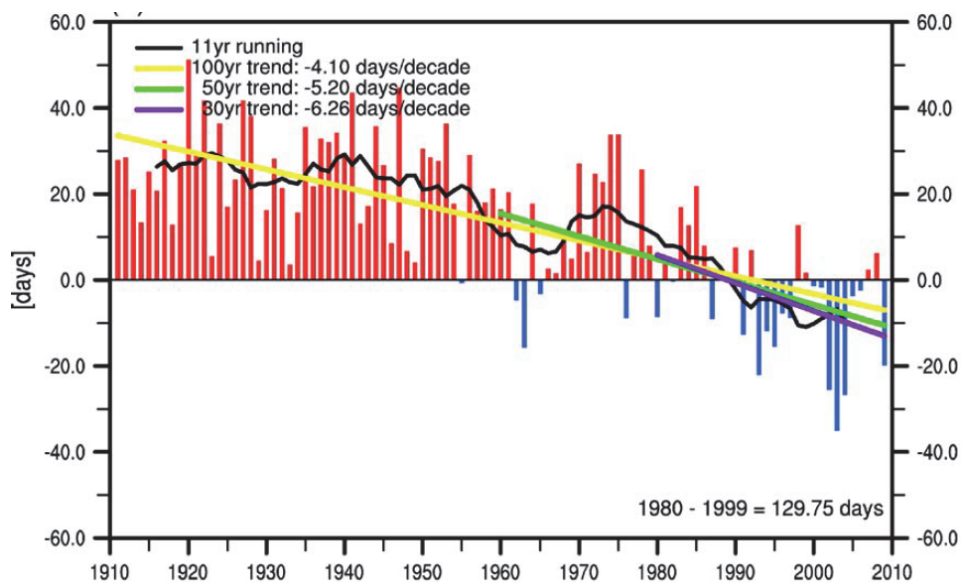


圖 1 臺灣年總降雨日數(日雨量 $\geq 0.1\text{mm}$)變化趨勢圖(摘自許晃雄等, 2011^[10])

面臨氣候變遷劇烈影響之臺灣，各地區水資源供應穩定性之改變，常引發民眾將枯水期之水資源短缺問題歸咎於鄰近工程施工，尤其在隧道施工過程如發生突發性短期或長期出水時，更易引發相關之聯想，例如國道5號雪山隧道及東部鐵路新永春隧道等案例。而區域水資源環境變化究竟係肇因於氣候變遷影響？抑或確實為鄰近工程施工影響？問題原因之釐清，實需輔以科學量化數據與分析結果加以佐證，否則易流於空談爭論，無法取得共識。

在隧道工區及鄰近範圍設置各項觀測儀器，如隧道洞口量水堰、地下水位觀測井、河川流量站及雨量觀測站等，長期觀測隧道施工前、中、後之水文地質變化情形，為評估工程施工對鄰近區域水資源環境影響之最直接方法。惟區域水資源環境影響評估所探討之範圍常涉及整個集水區，面積廣大，儀器設置位置與數量實無法涵蓋全部區域，因此仍需透過結合其他分析技術(如理論解析、水文地質類比或數值分析等)，將儀器觀測所得到之單點資料，延伸至線狀及平面資料，甚或進一步擴充至地下三度空間情形，以研判區域地下水文變化情形。傳統之地下水滲流分析技術，多僅用理論公式解析或以垂直隧道軸線之二維簡化剖面進行數值分析，然而由於公路隧道多穿越地形陡峭之山區，臺灣山區之水文地質條件複雜，各種水文地質單元(包括含水層、侷限含水層及不透水層等)其性質變化與空間分布遠較平原地區複雜，使用理論公式解析需將問題簡化假設以便求解，故常無法描述山區複雜之水文地質狀況，且理論解析法多僅用於水井力學(例如評估隧道施工出水量)，並不適用於區域水資源環境變化研究(Anderson, 2000)^[1]；另二維數值分析法則對於所有岩層之延伸關係、岩層介面、褶皺軸面、甚至斷層破裂面等

係僅以一條粗略線段或點表示，無法反應地層異質性、異向性及地質構造分佈等情形，且二維平面分析無法獲知區域地下水流場變化情形。基本上，理論解析法及二維數值分析法一般較適用於平原地區之規律層狀水文地質狀況，而對於水文地質條件變異複雜之山岳地區則仍應採用三維分析技術(Kitterod et al., 2000)^[4]。近年來由於電腦運算能力及相關技術之快速發展，三維數值分析已逐漸應用於各種複雜水文地質狀況之地下水問題探討，包括地下水資源評估(Ben-Itzhak and Gvirtzman, 2005^[2]； Yang et al., 2008^[7])及地下水污染研究(Wycisk et al., 2009^[6])等。目前可採用之三維數值分析方法甚多，例如MODFLOW、PLASM、SUTRA、MODPATH等(Fetter, 2011)^[3]，各種方法各自有其適用性與特點，本文乃介紹廣泛應用於地下水流模擬之MODFLOW有限差分法，說明模式基本原理及三維水文地質模式建立程序，並以臺灣東部變質岩區之複雜水文地質條件為例，利用三維數值分析技術，探討公路隧道施工可能對鄰近區域水資源環境之影響研究，本文所提方法技術與經驗可提供臺灣未來公路隧道興建與水資源環境保護溝通橋梁之參考。

二、模式分析基本原理

MODFLOW有限差分法係由美國地質調查所(U.S.G.S; United States Geological Survey) McDonald & Harbaugh(1988)^[5]所初步發展，歷經超過25年持續之更新與驗證，其正確性及功能性已普遍獲世界各國產官學界之認可，為可靠之地下水模式分析工具。MODFLOW可模擬分析穩態或暫態、受壓或非受壓含水層等各種情形之地下水流問題。除了地下水系統本身之外，外來水力荷載改變(如抽水井抽水、區域補注、蒸發、河床水位變動及區域排水等)影響亦可納入模式分析。

MODFLOW係以多種模組或副程式群為架構，描述密度恆定之地下水在孔隙介質中流動情形，以二維、三維飽和地下水流控制偏微分方程式表示，考量質量平衡關係及達西定律推導控制方程式，並利用體心式有限差分法(block centered finite difference approach)之計算方式求解。目前已有數種迭代運算技巧可進行求解，包括強制隱式法(strongly implicit procedure; SIP)、片式連續鬆弛法(slice-successive over-relaxation; SSOR)、預置共軛梯度法(Preconditioned Conjugate Gradient2; PCG2)等，可用於模擬各水文地質單元之地下水水頭流向、流速、水位分佈及隨時間變化情形，為目前最普遍使用之地下水流場模擬程式。其控制方程式之偏微分方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中， K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分別為多孔介質體於 x 、 y 、 z 方向之水力傳導係數； S_s 為比貯水率； h 為水頭； W 為淨源匯量， $W>0$ 為淨流入、 $W<0$ 為淨流出； t 為時間。

模式分析可搭配內建之GIS模組、CAD模組及Image模組，並透過三維數值地形、地形等高線、衛星或航空照片等資料，建構研究區之三維有限差分網格。依據每個網格之水文地質特性，設定為均質、非均質以及等向性、非等向性等類型之含水層，如圖2所示，並給定各個網格之水文地質參數，進行三維地下水流動問題求解，探討研究區範圍之地下水流況，並可評估水力荷載改變(如隧道開挖)所造成之水文環境影響。

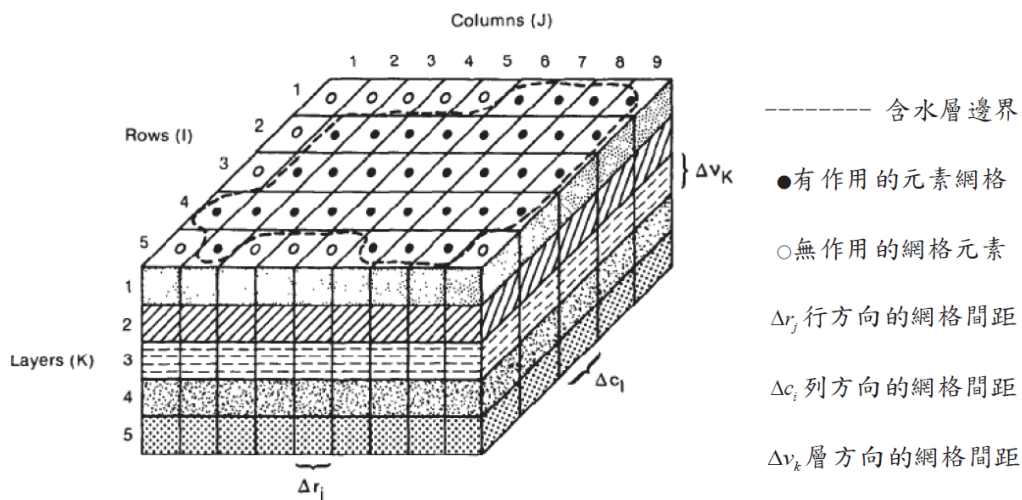


圖 2 MODFLOW 網格化含水層示意圖(摘自 Mcdonald & Harbaugh, 1988)

三、水文地質概念模型建構

水文地質概念模型係由水文地質觀點出發，透過含水層之分區、分層及地下水流動平衡等觀念，將複雜之隧道周圍環境簡化為一理想化之三維概念模型。模型由若干個水文地層單元所組成，經劃定分析範圍後，模型內地下水之流進與流出量根據水收支平衡原理達到穩定平衡狀態。待概念模型勾勒完成後，後續再透過數值程式輸入邊界條件及初始條件求解地下水流動控制方程式，即可求得模型內地下水水頭之空間分佈隨時間之變化情形。模型建構主要步驟包括研究範圍劃定、地形與地質資料整合、邊界條件設定、水文地質單元分區與分層劃分、數值模型建置等，分別概述如下：

(1)研究範圍劃定：

水文地質概念模型建構首先需劃定欲研究之區域範圍。以隧道工程為例，研究區範圍之劃定主要乃參考隧道沿線鄰近區域之水文地質狀況，包括地表水系、地層及地質構造分布等，將隧道沿線劃分出適當之子集水區作為分析範圍，進一步引入地形及水系等邊界條件，基本上盡量採用山脊稜線、河川等自然邊界，以建構研究區域之代表性水文地質概念模型。

(2)地形資料整合：

研究區範圍劃定後，進一步需蒐集研究區範圍之地形圖及高精度數位地形(DTM)資

料，以作為基本地形立體模型架構建立之依據。並根據所蒐集之資料將山脊及工程結構物(如隧道)等數化為數值高程模型(Digital Elevation Model；簡稱DEM)，除可進行相關地形分析外，更能藉以評估岩體內常時地下水受重力作用所形成之三維空間分佈狀態。

(3)地質資料整合：

研究區地質資料之整合，主要乃蒐集彙整既有之地質圖幅、鑽探調查、地表踏勘等資料，以掌握研究區之地質狀況與空間分布情形，作為水文地質單元分區與分層劃分依據，並進一步將地質資訊數化，據以建立三維水文地質概念模型。

(4)邊界條件設定：

水文地質概念模型內地下水之穩態流場主要由邊界條件所控制，而地下水之暫態流場則受概念模型初始條件之影響較大，若某時段內水文荷載(例如隧道施工出水)效應延伸擴展至邊界時，則邊界條件亦將影響此暫態流場。

隧道施工滲流影響分析常採用之邊界條件包括：特定水頭邊界(Specific-head Boundary)、特定流量邊界(Neumann Boundary)、溪流邊界(Stream Boundary)及地表水補注邊界(Surface Recharge Boundary)等。其中，溪流河口水位高程可視為地下水典型之特定水頭邊界，合理之定水頭值可設定為溪流水位高程；若僅考量重力作用對地下水流場之影響，則山脊稜線位置常視為區隔兩個地下水系統之界線，在稜線上彼此無側向流通，故山脊稜線可視為側向零流量之邊界，如圖3所示；至於溪流邊界在水文地質及地下水流場所扮演之角色，為地表水與地下水兩者之間互動之水體，可進行後續河水與地下水互動行為評估；而地表入滲邊界條件為數值模型用來反應降雨扣除地表逕流後經由地表垂直入滲至地下含水層之補注邊界機制。

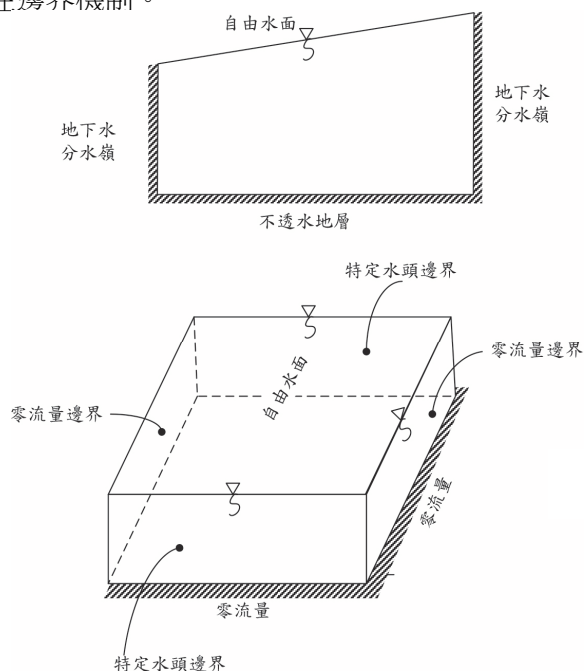


圖3 典型水文地質模型之邊界條件設定示意圖

(5)水文地質單元分區與分層劃分：

水文地質單元分區係為釐定地下水之水文地質邊界，包括含水層邊界、地下水分水線及地質構造邊界等；而水文地質單元分層則為釐定研究區範圍主要之含水層與阻水層。

其中水文地質單元分區主要依據為：(1)含水層邊界：地下水含水層厚度常隨地形起伏變化而變薄或變厚，其在接近邊界時常變薄而終於自然消失，消失處即為含水層之邊界；(2)地下水分水線：含水層在地形高處時之地下水頭常亦較高，降雨由地表滲入形成地下水，而在地下水分水線兩側之地下水則背向流動，若此種流動途徑經常不變，則地下水分水線亦可視為邊界；(3)地質構造邊界：因大地應力作用，岩層發生斷裂及移動造成斷層破碎帶，而斷層帶常可截斷含水層之側向延伸，若斷層本身不透水，或斷層另一側為不透水，均可形成含水層之邊界。

至於水文地質單元之分層劃分則需從區域性之尺度來考量，亦即各層應有相當之厚度，若細分太多層次，在觀測及管理上亦不可行。故在分層時需掌握區域性主要岩性之分層結構，而將次要之細節捨棄，並考慮區域性地下水觀測與管理之便利性，將系統做合適之切割和劃分，以釐定出水文地質架構。一般水文地質單元之分層原主要包括：(1)利用厚層並延長較佳之岩層(如大理岩、片岩等)作為分層依據；(2)互相連通且滲透性相近之含水層(aquifer)可視為同一層；(3)薄層或延展不佳之層次則略去不計；(4)地質構造常因岩層受到大地應力擠壓造成斷層破碎帶，而成為較佳之儲水層或剪裂泥阻水層，應獨立視為接近垂直之高角度分層。

(6)數值模型建置：

根據前述研究區範圍劃定、地形與地質資料彙整、邊界條件設定及水文地質單元分區與分層劃分等步驟，勾勒出足以代表研究區之水文地質概念模型，進一步透過數值化過程將其轉為數值模型網格。數值模型網格之佈置原則以能精確且有效的代表研究範圍之水文地質與地下水水文狀況為主要考量，同時應儘可能兼顧網格數量減少化以縮短運算時間。

四、變質岩公路隧道案例分析

現正推動中之台9線蘇花公路山區路段改善計畫共有8座長度不等之隧道，其中位在蘇澳至東澳間之東澳隧道穿越水文地質條件極為複雜之變質岩山區，該區地下水資源豐沛，隧道施工可能遭遇滲湧水問題。本文乃以東澳隧道為例，蒐集隧道鄰近區域之三維數值地形、河川水系、集水區範圍、地下水位分佈、地質構造等資料，同時考量自然邊界條件及水文年乾濕季循環之地下水有效補注量等因素，建構東澳隧道鄰近區域之三維水文地質模型，並進一步透過模式分析隧道施工可能之出水量區段與地下水流場變化情形，進而評估隧道施工對鄰近區域水資源環境之影響。案例分析評估結果詳述如下：

4.1 研究區域概述

東澳隧道於臺鐵永樂車站附近向南貫穿猴椅山與東澳嶺間相連之山脊，兩山嶺標高分別為633.3公尺及820.7公尺，隧道沿線最大岩覆深度約514公尺，隧道南洞口位在東澳北溪北支流處。隧道全長約3.32公里，為雙孔單向單車道隧道，地理位置如圖4所示。

(1)區域地質：

東澳隧道通過中央山脈東翼及脊梁山脈地質區，沿線經過之地層，自北而南分別為現代沖積層、新生代第三紀之蘇澳層、南蘇澳層，以及古生代晚期至中生代之東澳片岩，參見圖5。東澳片岩以黑色片岩、綠色片岩及矽質片岩為主，並夾有大理岩與角閃岩體。區域性地層延伸約略呈東-西或西北西-東南東走向，並向南傾斜。依據地調所地質圖資顯示，本研究區內之蘇澳層與南蘇澳層，以及南蘇澳層與東澳片岩間均係斷層之接觸關係。惟孫荔珍(1982)^[11]曾在部分南蘇澳層之底部發現有疑似基底礫岩出露，研判其與下伏之東澳片岩可能為不整合接觸關係。

(2)地質構造：

隧道所在區域接近板塊碰撞帶，在長期地殼變動與板塊相互碰撞擠壓過程中，本區岩層歷經多次區域變質與構造變形作用，形成本區所出露之板岩、硬頁岩與變質雜岩，以及地層內複雜之褶皺與剪切變形構造。

隧道路線沿線主要所遭遇之地質構造為區域性逆斷層及局部性之橫移斷層構造，以及由較小尺度褶皺構造組合而成的大尺度複向斜構造。主要之區域性逆斷層有小帽山斷層及猴椅山斷層，兩斷層於計畫區內均呈西北西-東南東方向延伸，並通過東澳隧道之北段，斷層面均向南傾斜。小帽山斷層通過圳頭溪中游，斷層北側地層屬蘇澳層，斷層南側為南蘇澳層。猴椅山斷層位於小帽山斷層南側，通過圳頭坑附近，斷層南側地層為東澳片岩，斷層北側地層為南蘇澳層。兩斷層破碎帶影響寬度約100~200公尺。橫移斷層則主要分布於東澳隧道東、西兩側，分別呈北北東-南南西走向與南-北走向，往南延伸至東澳隧道以南逐漸聚合，隧道東側之橫移斷層帶，局部有斷層密集帶，可能對東澳隧道南段之鄰近區段造成影響。

(3)河川水系：

本區屬中央山脈北段，以小帽山、西帽山、東澳嶺及南蘇澳山連結之嶺線為主要分水嶺，北側為蘇澳河流域，南側為東澳河流域。蘇澳溪發源於蘇澳港溪南方標高960 m之西帽山，流經蘇澳市區注入蘇澳港，流域面積29.65 km²，主流長8.83 km，集水區範圍為臺灣北區石灰石礦源之一，上游水流湍急，地形陡峭，土石坍塌流失，大量土石受暴雨夾帶堆積至下游，除影響下游通水斷面外，亦造成泥沙淤積於蘇澳港，影響港區有效水深之維持；另東澳河流域則包括東澳北溪及東澳南溪兩大支流，東澳北溪主流長約6.7 km，流域面積20.81 km²，上游發源於中央山脈之大白山，蜿蜒向東南延伸，東澳南溪則起源於楓樹山往東延伸，總長約4.4 km，流域面積11.08 km²。東澳北溪及東澳南溪

上游除部分石灰石礦區與運輸道路外，林相大致完整。

(4)氣象資料：

根據氣象局雨量站資料顯示，蘇澳地區之年平均降雨量約介於3,800~4,600 mm間，另東澳嶺地區之年平均降雨量約介於4,800~5,800 mm間(2012年更測得7004 mm之年降雨量)，本區為蘇花地區雨量最高之區域。進一步蒐集參考蘇澳河流域之蘇澳站降雨頻率分析結果(財團法人中興顧問社，2012^[12])，以200年重現期為例，1小時降雨量為238.6 mm；24小時降雨量為1438.1 mm；48小時降雨量為1765.2 mm；72小時降雨量為1855.9 mm。

(5)水文地質特性：

有關本研究區內各種代表性岩層之透水性質，本文乃蒐集隧道設計階段所辦理之岩盤滲漏試驗結果，結果顯示本區綠色片岩之滲透係數(Hydraulic conductivity, K)約為 $0.12\sim 25.9\times 10^{-7}$ (m/sec)、黑色片岩滲透係數約為 $0.6\sim 16.9\times 10^{-7}$ (m/sec)、矽質片岩滲透係數約為 $33.9\sim 45.5\times 10^{-7}$ (m/sec)、大理岩滲透係數約為 $0.32\sim 7.79\times 10^{-7}$ (m/sec)、片麻岩滲透係數約為 $0.10\sim 18.6\times 10^{-7}$ (m/sec)、角閃岩滲透係數約為 $11.5\sim 13.7\times 10^{-7}$ (m/sec)，參見圖6。基本上研究區變質岩之透水性不高，地下水之主要流通管道應為斷層破碎帶、岩性界面及岩盤中張力裂隙。

(6)地下水位資料：

為瞭解研究區之初始地下水位背景資料，乃蒐集相關工程計畫在不同規設階段所鑽設之地下水位觀測井資料，包括東部鐵路改善計畫、國道東部高速公路、蘇花改可行性研究及蘇花改細設等計畫在不同階段所辦理之地質探查孔地下水位資料，共計302孔地下水位資料。地下水流場之分佈與地形及地質構造相關，匯集降雨之水系型態與流域面積，因流域內之河谷、沖積扇等不同地形，具不同之地下水蘊藏特徵，圖7為所蒐集之鑽孔孔位高程與地下水位高程關係圖，結果顯示研究區域之地下水位與地形高程有相當高之關聯性，回歸結果參見如下式，此關係式可作為評估計畫區初始地下水位分佈與流向之參考。

$$GW = 0.8513 \times E - 6.6074 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中之GW為地下水位高程；E為地表高程。

(7)河川基流分析：

河川流量可大致區分為基本流量及直接逕流量，而由於山岳地區地下水較少人為抽水、灌溉或補注，故可將枯水期之河川基流量作為山區地下水補注量推估參考(李振誥等，2002^[9])。惟因研究區之圳頭溪及東澳北溪現階段無足夠之流量觀測資料(一般需10年以上之觀測資料)可供進行基流分析，故乃蒐集鄰近南澳溪之河川基流分析結果，如表1所示，以作為本區地下水補注量參考。

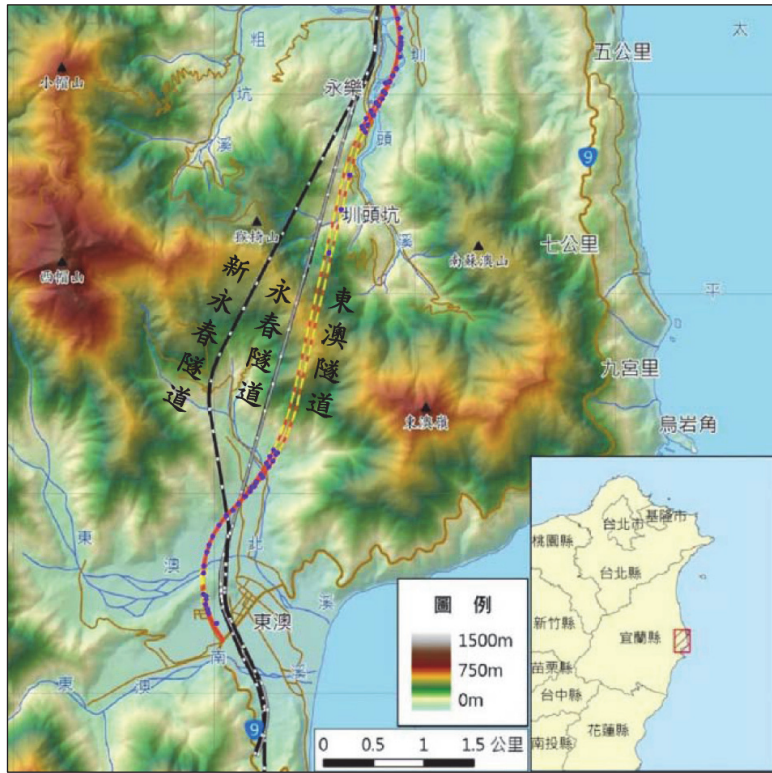


圖 4 東澳隧道平面位置與地形圖

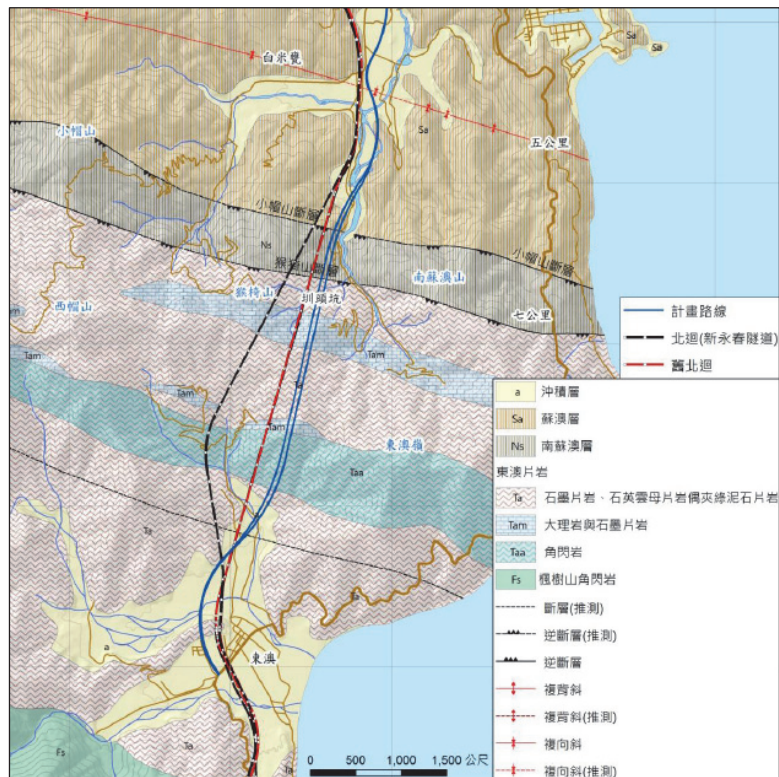


圖 5 東澳隧道區域地質圖

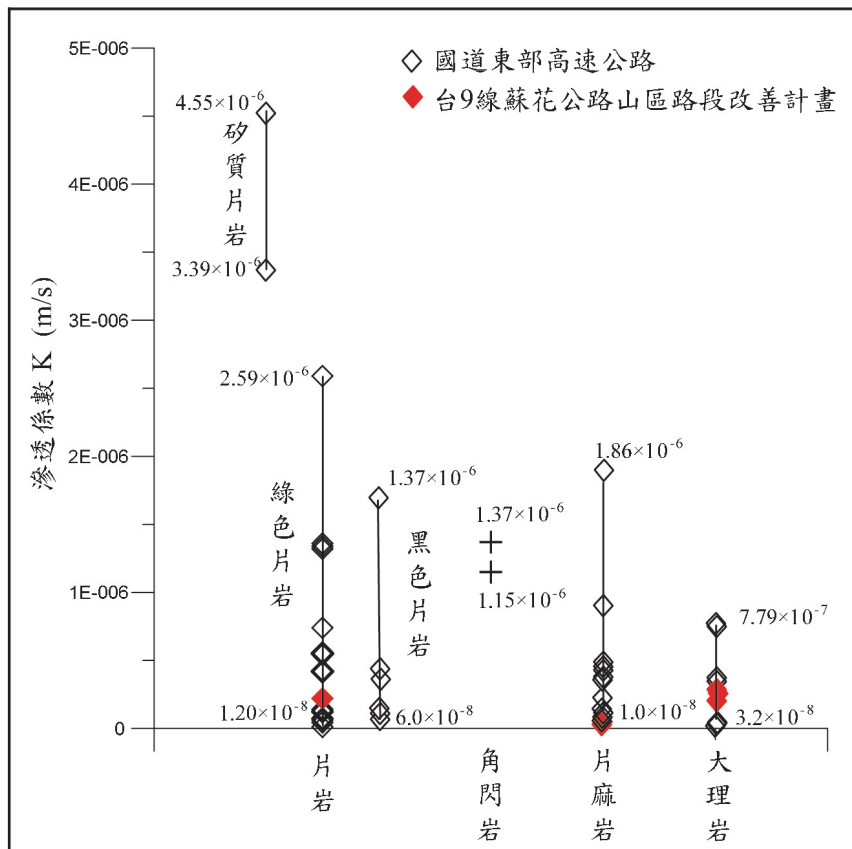


圖 6 研究區代表性岩層滲透係數彙整圖

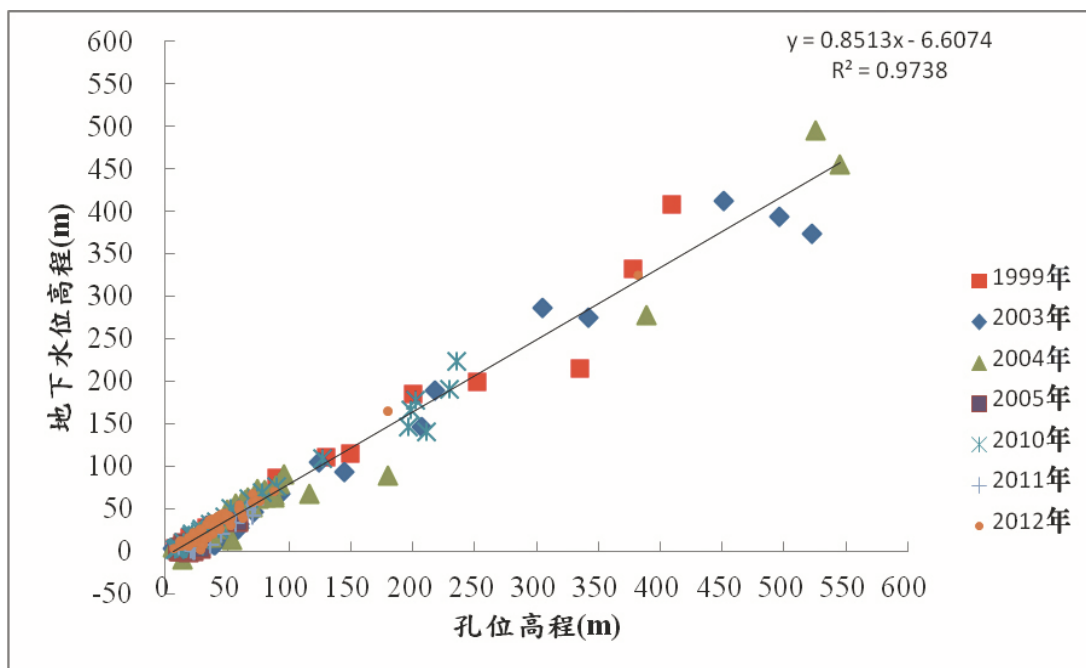


圖 7 研究區之鑽孔地形高程與地下水位關係圖

表 1 研究區鄰近流量站之基流分析結果彙整表(摘自財團法人中興顧問社，2012)

流域	南澳溪	南澳溪
站號	2510H006	2510H004
站名	南澳橋	澳尾橋
河川流量年均深度(cm)	285.47	240.17
基流量年均深度(cm)	220.93	129.68
基流指數(%)	77.39	54
穩定基流量年均深度(cm)	115.12	41.14
穩定基流指數(%)	40.33	17.13

4.2 三維水文地質模型建置、率定與分析

(1)模型建置：

綜合上述隧道沿線之地表水系、地層及地質構造分布，並結合高精度地表數值高程資料(5m×5m DEM)，將東澳隧道沿線劃分出適當之子集水區作為分析範圍，劃定後之研究範圍如圖8所示。並再引入地形及水系等邊界條件，將北側、西側與東側之山脊稜線設定側向零流量之邊界，並將北側之蘇澳溪與南側之東澳北溪設定為研究範圍之溪流邊界，另根據前述所蒐集之水文資料及基流分析成果，將地下水有效補注量透過地表水補注邊界予以輸入模型內。進一步依據研究區內之岩性、地質構造、水文地質特性及現地試驗等結果，進行水文地質單元之劃分，初步將研究區域劃分為以下數類水文地質單元，分別為S1(板岩、板岩與變質砂岩互層)、S2(變質砂岩、變質灰綠岩)、Sch(黑色片岩、綠色片岩、矽質片岩)、M(低透水性大理岩)、M2(高透水性大理岩)、M3(中透水性大理岩)、A(角閃岩)、Q1(新河道沖積層、台地堆積層)、Q2(舊河道沖積層)、F1(小帽山斷層)、F2(猴椅山斷層)、F3(層間破碎帶)、F4(東猴椅山斷層)、F5(東澳嶺破碎密集帶)。

東澳隧道鄰近區域區域之三維水文地質概念模型建置結果如圖9所示。圖10則為進一步檢核三維水文地質概念模型，乃透過分析軟體將三維模型沿隧道軸線切出縱剖面圖，經與隧道沿線縱剖面圖比對後，可確認兩者之一致性及其代表性。

(2)模型率定：

東澳隧道西側已完工營運之2座北迴鐵路隧道(永春隧道及新永春隧道)在施工期間均曾遭遇斷層破碎帶與湧水等困難，特別是在斷層、破碎帶或是大理岩溶洞等區段。因永春、新永春隧道已存在於模式研究範圍內，對東澳隧道而言，可視為已存在之排水廊道，且持續有洞口量水資料可供參考，故乃將此兩座隧道所觀測到之出水量納入模型初始率定之依據；另研究區內尚有3孔地下水位觀測井之觀測資料亦可供率定使用。

進行模式率定時，先將永春隧道及新永春隧道設定為具有源進及流出之封閉式排水

設施(DRN模組)，並考量隧道沿線高程變化，將前述洞口水量觀測值按集水長度及坡度等條件輸入模式。另採蘇澳、東澳及東澳嶺地區之平均降雨量作為地表補注依據。相關設定完成後，再透過反覆人工校調方式反推模式之代表性參數，以使得各地下水位觀測井所處位置之模式分析水位與實測水位相近，率定結果誤差約在 ± 5 m內，顯示所建立之水文地質概念模型具有相當之代表性與準確度。經模式率定後之最適化參數配置如表2所示。

(3) 施工前地下水流況分析：

研究區在東澳隧道施工前之地下水總水頭分布情形及地下水流況如圖11所示。圖11(a)顯示水文地質模型範圍內之地下水可概分為兩個水系，包括北側蘇澳溪及南側東澳北溪。其中，蘇澳溪集水區之地下水位高程由西、南側向東北角隅遞減；東澳北溪集水區之地下水位高程則由東、西兩側向南方遞減。此為隨地形分布之重力流趨勢，以山脊稜線為地下水水系之分水嶺，並沿著透水性相對較佳的地質構造朝已開通之隧道或溪流處流動，此亦為山岳地區地下水流動之特有現象。

至於地下水流向部分(參見圖 11(b))，蘇澳溪集水區主要自西側及南側向東北角隅流動；東澳北溪集水區則由東、西兩側向南流動。但集水區中央鄰近永春隧道及新永春隧道處，局部地下水有往垂直兩條隧道軸線之方向流動之現象。且模型西側因有東猴椅山斷層阻擋來自西側之地下水，而東側有東澳嶺密集破碎帶，將來自東澳嶺地區之地下水引流至東澳北溪支流。

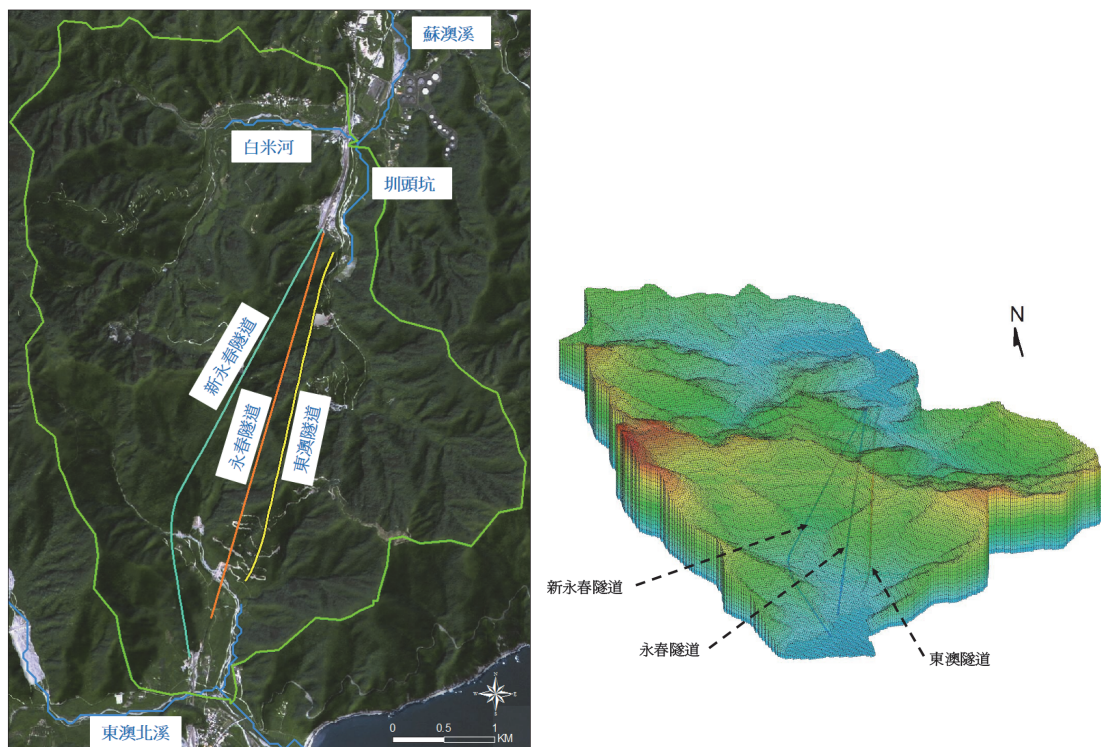


圖 8 東澳隧道研究範圍劃定及地形分佈圖

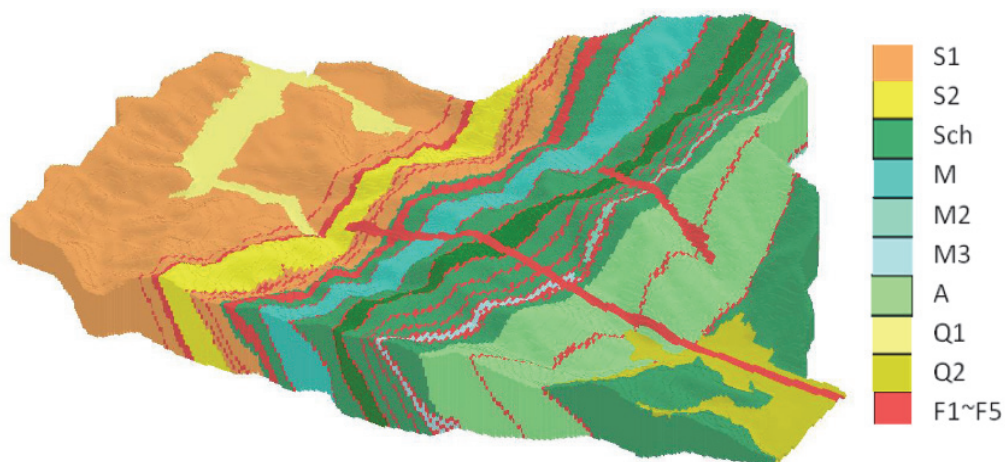


圖 9 東澳隧道鄰近區域三維概念模型與水文地質單元分區示意圖

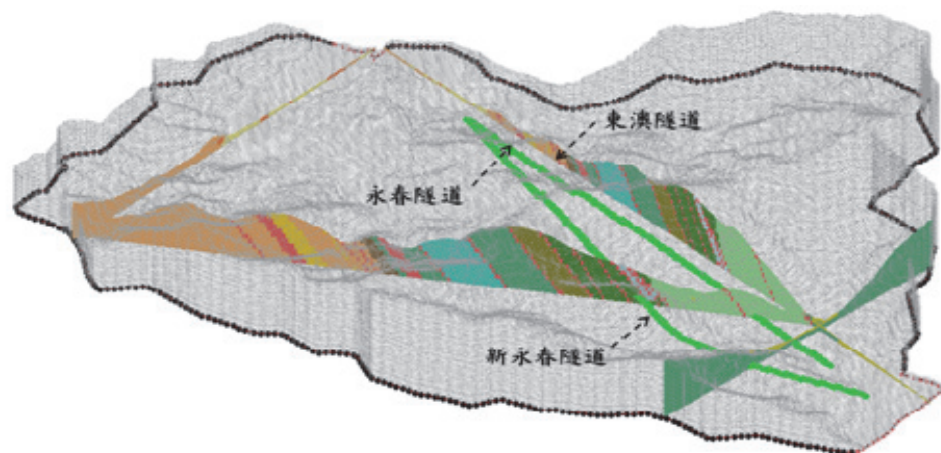
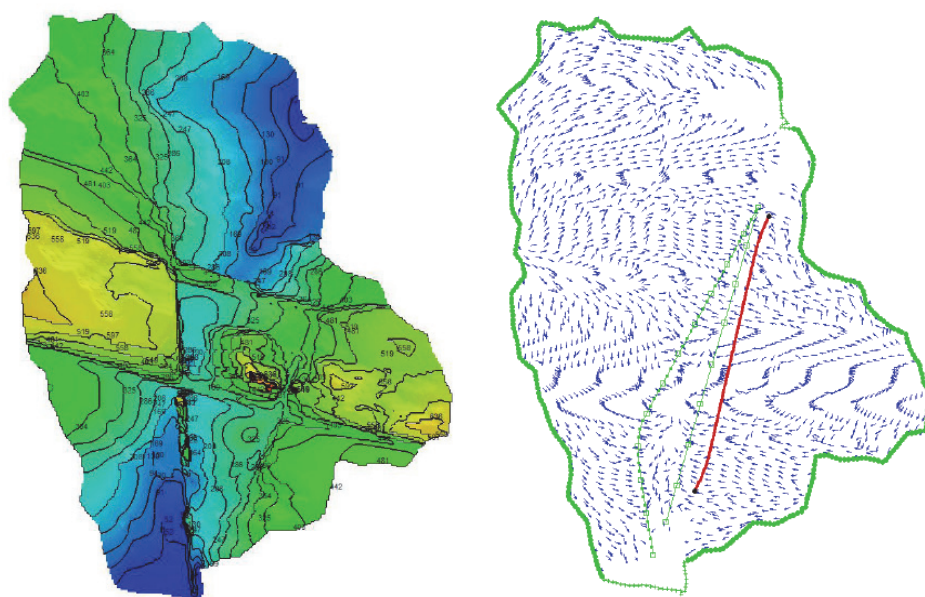


圖 10 東澳隧道鄰近區域三維水文地質模式之幾何空間檢視(隧道沿線縱剖面)

表 2 研究區代表性水文地質單元與其參數彙整表

水文地質單元名稱	地層	透水性	透水係數 K (m/sec)	比貯水係數 Ss(1/m)
S1	板層	M	3.0×10^{-7}	10^{-5}
	板層與變質砂岩互層	M	8.0×10^{-7}	10^{-5}
S2	變質砂岩	M	8.0×10^{-7}	10^{-5}
	變質灰綠岩	M	1.0×10^{-7}	10^{-5}
Sch	黑色片岩	M	9.98×10^{-7}	10^{-5}
	矽質片岩	M	5.29×10^{-7}	10^{-5}
	綠色片岩	M	2.34×10^{-7}	10^{-5}
M	大理岩	L	1.42×10^{-7}	10^{-4}
M2	大理岩 2	H	1.3×10^{-5}	10^{-4}
M3	大理岩 3	M	7.96×10^{-6}	10^{-4}
A	角閃岩	M	5.24×10^{-7}	10^{-5}
Q1	沖積層(新河道)	MH	2.0×10^{-5}	10^{-4}
	台地堆積層	MH	1.0×10^{-5}	10^{-4}
Q2	沖積層(舊河道)	MH	2.0×10^{-5}	10^{-4}
F1	小帽山斷層	L	3.0×10^{-8}	10^{-5}
F2	猴椅山斷層	L	3.0×10^{-8}	10^{-5}
F3	層間破碎帶	H	5.0×10^{-5}	10^{-4}
F4	東猴椅山斷層	L	3.0×10^{-8}	
F5	東澳嶺破碎密集帶	H	3.0×10^{-5}	



(a)總水頭分佈情形(單位公尺) (b)地下水流況(隧道高程之橫斷面)

圖 11 東澳隧道開挖前之地下水總水頭與流向分佈變化圖

4.3 隧道開挖對鄰近區域地下水環境影響評估

透過三維水文地質模式可評估隧道開挖對鄰近區域地層地下水流場變化影響。圖12為模擬東澳隧道開挖後之研究區範圍內地下水總水頭及地下水流況之分布變化情形(暫不考慮襯砌止水之極端保守狀況)。由圖中可知研究範圍地下水流場變化主要發生在隧道沿線左右各約40~45個網格(800公尺~900公尺)範圍內，隧道開挖導致地下水流場發生改變，地下水流況由開挖前隨地形分布之重力流動，轉變為受隧道開挖水頭洩降所產生之水力梯度影響，而由四周朝向隧道軸線方向流動。

另依據規劃階段之調查資料(臺灣世曦, 2010)^[8]研究區內在新永春及永春間可能存在位態為南北向/85°E 之東猴椅山斷層，其透水性低，將東澳山區分隔成東西兩側不同地下水系統，其中因永春及新永春隧道在經過北側大理岩段時，永春隧道順利通過並無異常現象，而新永春隧道卻產生湧水災變，東澳隧道則位在永春東側之水文地質條件較佳區域，研判西側高地下水頭之地下水受東猴椅山斷層阻隔無法流至東澳隧道，主要水源將來自東澳嶺及東側發育之東澳嶺破碎密集帶。由於現階段對於東猴椅山斷層之確實位置、寬度、延伸長度與透水性質仍無明確資料，故本文模式分析乃假定東猴椅山斷層具高阻水性且貫穿研究區南北，分析結果亦顯示東猴椅山斷層西側地下水流場受東澳隧道開挖影響甚微，隧道施工主要影響區為東猴椅山斷層東側區域，此結果與規劃階段之論述大致相符。惟由於變質岩區地質變化劇烈，上述地質構造之確實位置與特性仍存在相當程度之不確定性，本區所存在之區域性逆斷層及局部性之橫移斷層或破碎帶均可能影響局部地下水流場變化，實際結果仍待隧道施工時所揭露之地質資料與水文觀測結果進行率定與檢討修正。

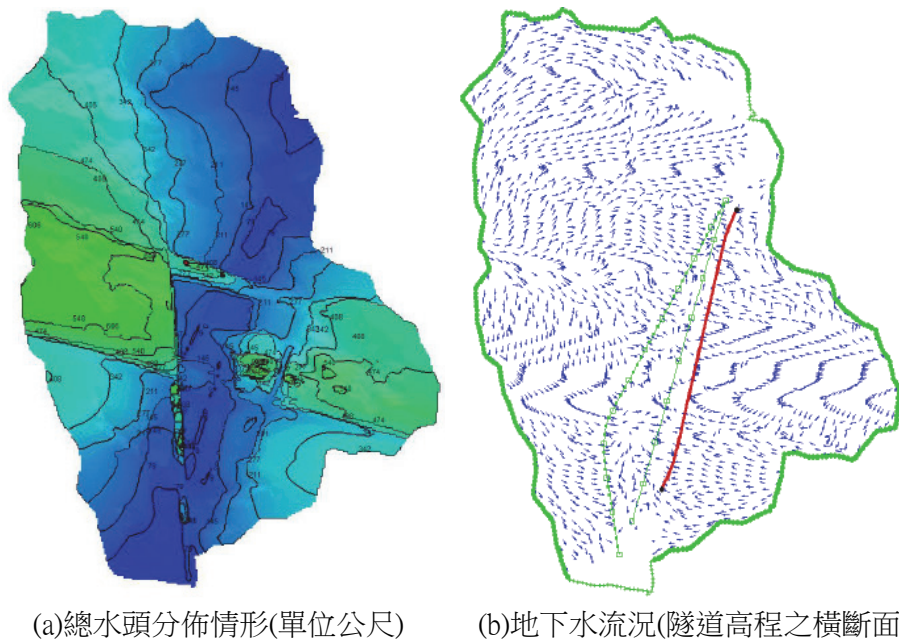


圖12 東澳隧道開挖後之地下水總水頭與流向分布變化圖

五、結語

近年來全球氣候變遷劇烈，臺灣年降雨量雖變化不大，但極端天氣發生之頻率與強度則有升高現象，豐水期與枯水期之水量差異亦有逐漸增加趨勢，影響水資源供應之穩定性。臺灣水庫興建數量已趨飽和，新的水資源開發極為不易，導致地下水資源保護與應用日益受到重視。未來公路工程之推動，勢必面臨水資源環保議題之討戰，主管機關除加強與民眾溝通外，實需再輔以充足之調查資料與可信之分析評估技術，以釐清工程興建與鄰近水資源環境影響關係。

臺灣山區地質多變，各種斷層破碎帶與褶皺構造均影響岩層之水文特性，導致山區水文地質條件複雜，適用於平原地區層狀且均質含水層之理論公式解析及二維分析方法，實無法確實描述山區複雜水文地層分布與特性，故其分析結果常引起許多質疑聲浪。由於電腦運算能力及相關技術之快速發展，三維數值分析已逐漸應用於各種複雜水文地質狀況之地下水問題探討。本文乃引入由美國地質調查所(U.S.G.S)所發展之MODFLOW地下水分析模式，並結合三維數值地形高程、水文地質調查與試驗等資料，據以建立隧道鄰近區域三維水文地質模型，進一步透過水平衡原理及地下水流動控制方程式，模擬研究區域內地下水流況，並推估隧道施工對鄰近區域地下水資源環境影響。三維水文地質模式若能結合詳實且長期之儀器觀測資料，持續進行模式之率定、檢討修正與驗證，將可更提升模式分析結果之準確性。此種三維分析技術之應用在國外已不乏案例，包括礦山開採過程與停採後對地下水資源環境影響評估，以及地下水庫開發與管理等課題；而臺灣過去在地下水領域方面之研究，較少深入山岳地區，而且工程進行亦多未將水文地質特別提列為工作項目，在氣候變遷劇烈及乾淨水資源匱乏之情況下，工程施工與鄰近區域水資源環境影響關係之研究勢必不可避免。

本文所提出之三維水文地質概念模型建構與分析技術，能應用於研判複雜水文地質條件下之隧道施工行為與地下水環境影響互動關係。未來對於重要公路隧道或公路邊坡若能建立其周圍區域之三維之水文地質模型，可藉以瞭解並降低水文地質環境對工程興建可能造成之施工風險，同時避免工程推動可能對鄰近區域地下水資源造成巨大之衝擊，在工程興建與環境保護間取得平衡，使臺灣未來公路工程邁向更優質化與科學化里程。

六、參考文獻

1. Anderson, M. P., and W.W. Woessner, "Applied Groundwater Modeling- Simulation of Flow and Advective Transport", Harcourt Asia Pte Ltd., 2000.
2. Ben-Itzhak, L.L. and H. Gvirtzman, "Groundwater Flow Along and Across Structural Folding:

- An example from the Judean Desert, Israel", *Journal of Hydrology*, Vol. 312, pp.51-69, 2005.
3. Fetter, C.W., "Applied Hydrogeology (Fourth Edition)", Prentice Hall, New Jersey, 2011.
 4. Kitterod, N.O., H. Colleuille, W.K. Wong and T.S. Pedersen, "Simulation of Groundwater Drainage into A Tunnel in Fractured Rock and Numerical Analysis of Leakage Remediation, Romeiksporten Tunnel, Norway", *Hydrogeology Journal*, Vol. 8, pp.480-493, 2000.
 5. McDonald M.G. and Harbaugh A.W., "A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", Book 6 Chapter A1 of *Techniques of Water Resources Investigation of USGS, U.S.A.*, 1988.
 6. Wycisk, P., T. Hubert, W. Gossel and C.H. Neumann, "High-resolution 3D Spatial Modeling for an Environmental Risk assessment of Abundant Mining and Industrial Megasites", *Computer & Geosciences*, Vol.35, pp.165-182, 2009.
 7. Yang, F. R., C.H. Lee, W.J. Kung and H.F. Yeh, "The Impact of Tunneling Construction on the Hydrogeological Environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project in Taiwan", *Engineering Geology*, Vol.103, pp.39-58, 2008.
 8. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫可行性研究與工程規劃暨優先路段工程設計工作-大地工程調查綜合評估報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處，2010。
 9. 李振誥、陳尉平、李如晃，「應用基流資料估計法推估臺灣地下水補注量」，*臺灣水利季刊*，第 50 卷，第 1 期，第 69-80 頁，2002。
 10. 許晃雄、陳正達、盧孟明、周佳、吳宜昭等，「臺灣氣候變遷科學報告」，行政院國家科學委員會，2011。
 11. 孫荔珍，「臺灣東北部蘇澳地區大南澳片岩與其上覆岩層之接觸關係」，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，1982。
 12. 財團法人中興工程顧問社，「臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫-水文地質模式檢測及區域水資源環境影響分析委託專業服務工作-101 年半年度分析評估報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處，2012。
 13. 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲，「臺灣區域降雨趨勢分析」，*農業工程學報*，第 55 卷，第 4 期，第 1-18 頁，2009。