

臺9線南迴公路 安朔草埔段隧道工程 特殊考量及施工挑戰

關鍵詞：隧道、豎井、綠色工法、防災

交通部公路總局／用地組／組長(西部濱海公路南區臨時工程處前處長)／藍維恭 ❶

交通部公路總局／西部濱海公路南區臨時工程處／副處長／蘇文崎 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／正工程師／林志權 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／正工程師／周坤賢 ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／副理／陳正勳 ❺

摘要 ABSTRACT

安朔草埔段隧道工程係『台9線南迴公路拓寬改善後續計畫(安朔至草埔段)新闢四車道工程』的關鍵工程，隧道長度約4.6公里，採雙孔單向車道設計，主隧道之行車淨空高為4.6公尺，每車道寬為3.5公尺，兩車道路幅兩側各留路肩及維修步道。本隧道除採新奧工法設計施工外，特別將世界先進國家最新的防災、綠能及永續工程設計理念導入，讓友善環境、減碳減廢之工法落實在設計與施工中。全生命週期之設計已考量將營運階段之優化管理機制先行規劃建構，建立完整詳實評估機制，提高結構體之耐久性，減少維修，以達延壽之目標。



壹、計畫概述

一、計畫緣起

台9線南迴公路為臺灣東部花東地區與南部高屏地區之主要通行運輸幹線，惟受限於地形條件，既有道路設計標準偏低、線形不佳、縱坡起伏大且路寬不足，加上高路堤及高邊坡多，易因災害受損而交通中斷，除生命財產損失外，亦對區域經濟及產業運輸造成重大影響，為配合國內產業東移、平衡區域發展等政策，遂積極推動本計畫。

二、計畫範圍

本計畫起自台東縣達仁鄉安朔村，至屏東縣獅子鄉草埔村，工程範圍為台9線安朔至草埔路段457k+000~472k+700(新樁號443k+

000~454k+006)，全長11.006 km，本文自台9線457k+000起算為里程0k+000。工作內容包括新闢路堤、橋梁、隧道及行控中心等工程。工程位置詳圖1，平縱斷面詳圖2。



圖1 工程位置圖



圖2 路線平縱斷面圖

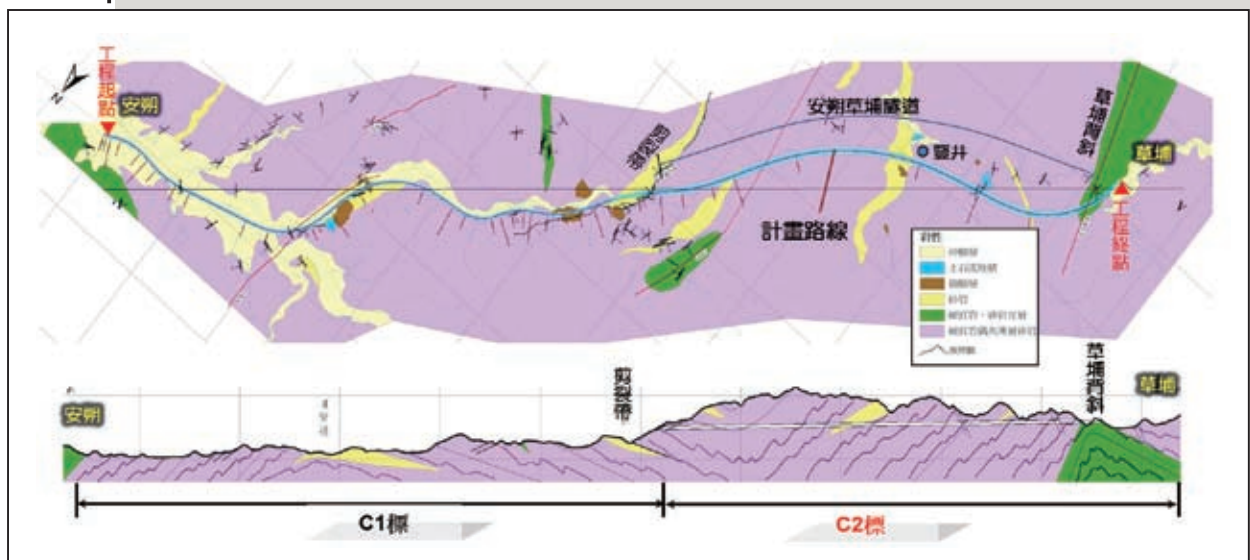


圖3 南迴公路安朔至草埔段地質平、剖面圖

貳、地形與地質

一、地形

本計畫路線自臺東縣達仁鄉安朔村沿安朔溪溪谷向西，海拔自安朔村30公尺升至壽卡約500公尺，再跨過縣界至屏東縣，沿楓港溪下降至海拔約290公尺之草埔村。沿線主要溪流為東側之安朔溪及西側之枋山溪與楓港溪。安朔溪之堆積作用較侵蝕作用盛行，目前屬行政院農業委員會水土保持局列管編號東縣DF090土石流溪流，屬中度潛勢。

二、地質

計畫區域之地層主要為潮州層、河階堆積層及現代沖積層。現代沖積層主要分布在安朔溪及其支流河床，河階堆積層主要分布在溪流兩岸的河階上，其組成材料以礫石夾砂為主。潮州層岩性單調，主要以板岩及硬頁岩為主，偶夾砂岩。計畫路線範圍內並無活動斷層構造通過，本區域主要之地質構造型態為褶皺；沿線緊密拖曳褶皺構造相當普遍，沿板岩劈理面之剪裂帶發育亦相當常見，地層較為破碎。根據岩層位態變化，本路線主要地質構造包括草埔背斜等(詳圖3)。

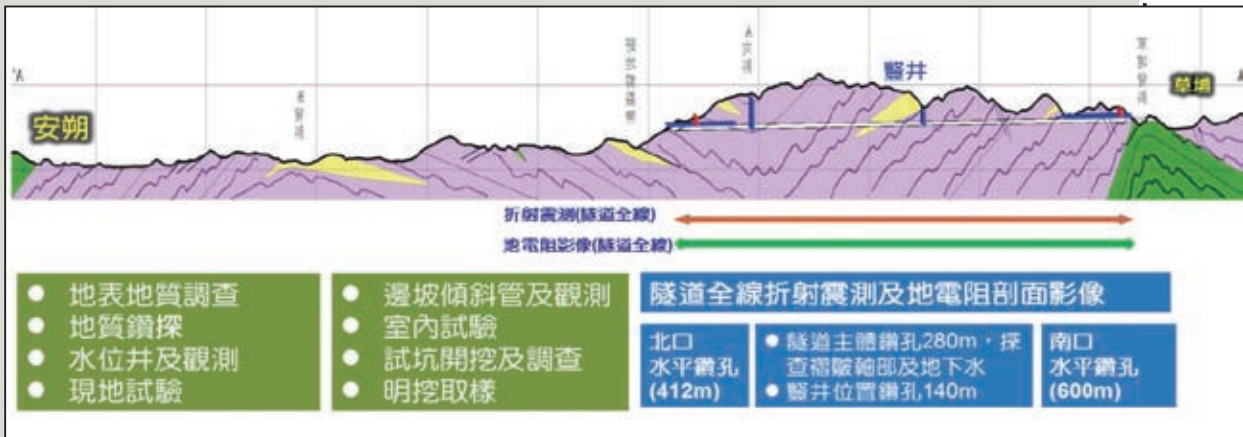


圖4 設計階段地質調查內容

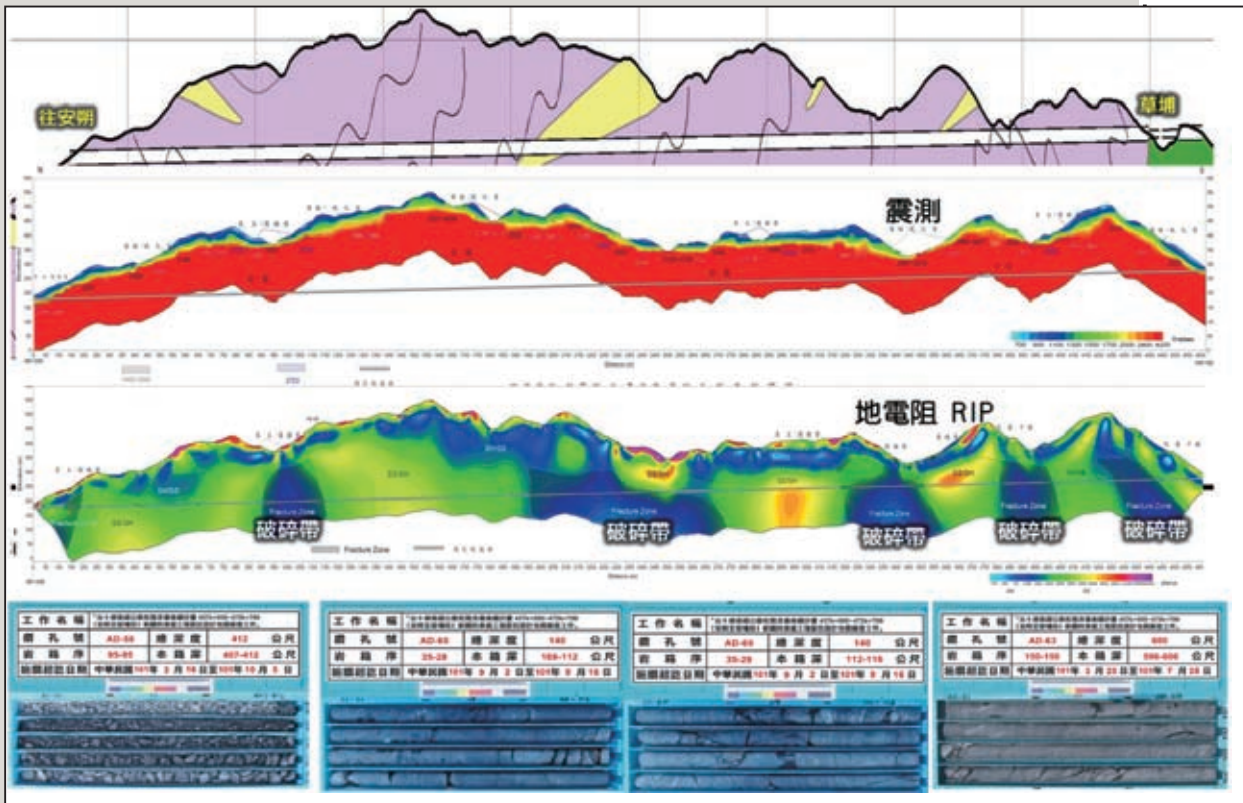


圖5 主隧道沿線地球物理探測成果

本計畫工程地質探查工作內容，詳如圖4，包含地表地質調查、鑽探與試驗及取樣、開挖調查、室內試驗、地球物理探測，其中於隧道及豎井之地球物理探測結果如圖5及圖6所示。由地電阻試驗推估的地層界面及水位面如圖中黑色及白色虛線所示，其中電阻率越低表示頁岩(硬頁岩)含量越高，電阻率越高表示砂岩(變質砂岩)含量越高。由地球物理探測成果顯示在

豎井處附近淺層(深度<50m)為較風化或破碎之硬頁岩，深度大於50m後之地層為劈理或裂隙略發達之砂岩/硬頁岩層段，地下水位高且豐沛。

在主隧道北口水平鑽探過程中，於前進至412公尺時有湧水現象產生，湧水量約為72m³/hr，已列入設計特殊考量。

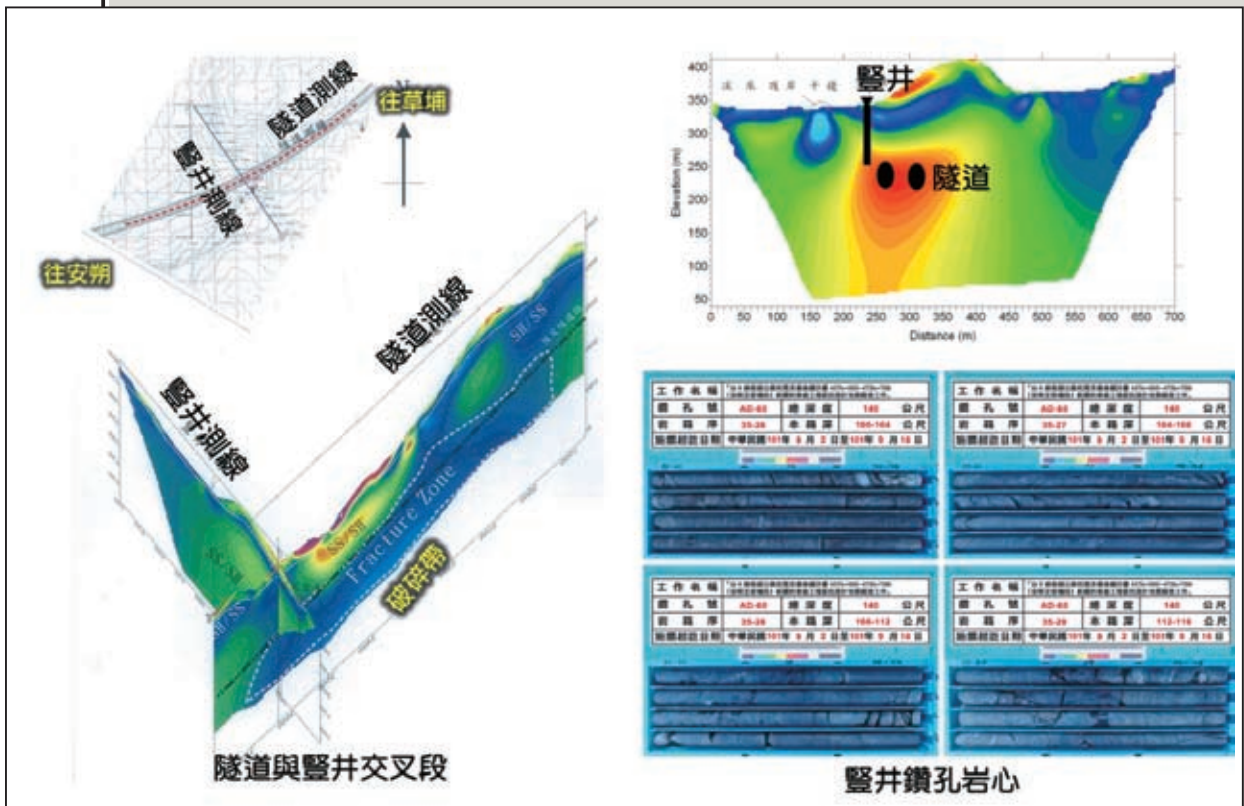


圖6 豎井區段地電阻影像剖面

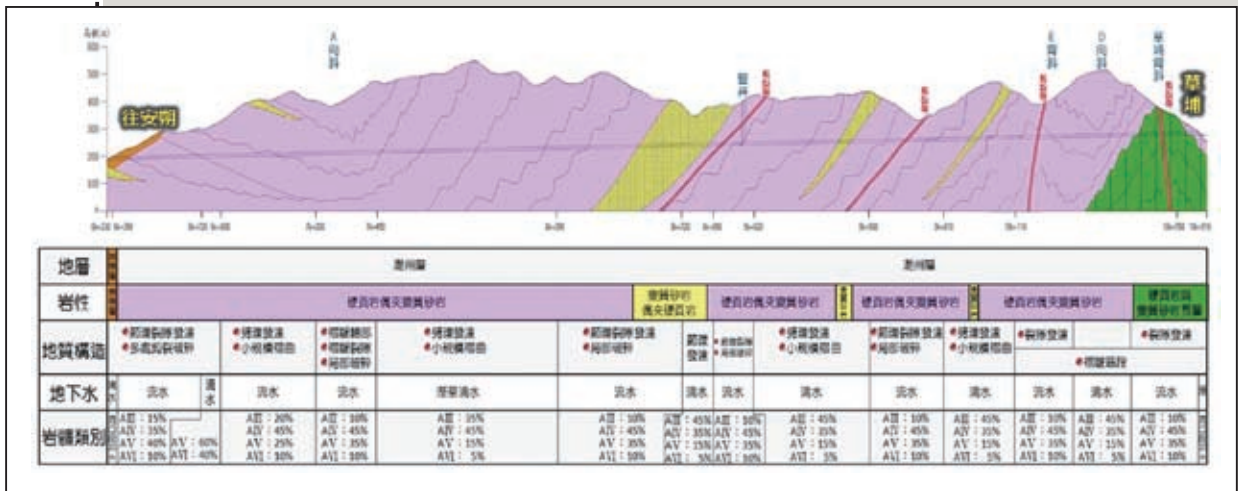


圖7 安朔草埔隧道設計階段岩體分類

依臺灣岩體分類與隧道支撐系統—PCCR系統隧道沿線地質以脊樑山脈之變質岩及亞變質岩為主，除洞口段及特殊地質段外，歸屬A岩類。綜整地質調查成果，將隧道沿線之岩體依岩性、地質構造及地下水等工程特性進行分類如圖7所示，作為隧道開挖初期支撐設計分析之依據。

參、隧道工程

一、主隧道

(一) 隧道斷面及相關設施配置

本計畫隧道長度為北上線4602.5公



圖8 主隧道、機房及輔助機房標準斷面圖

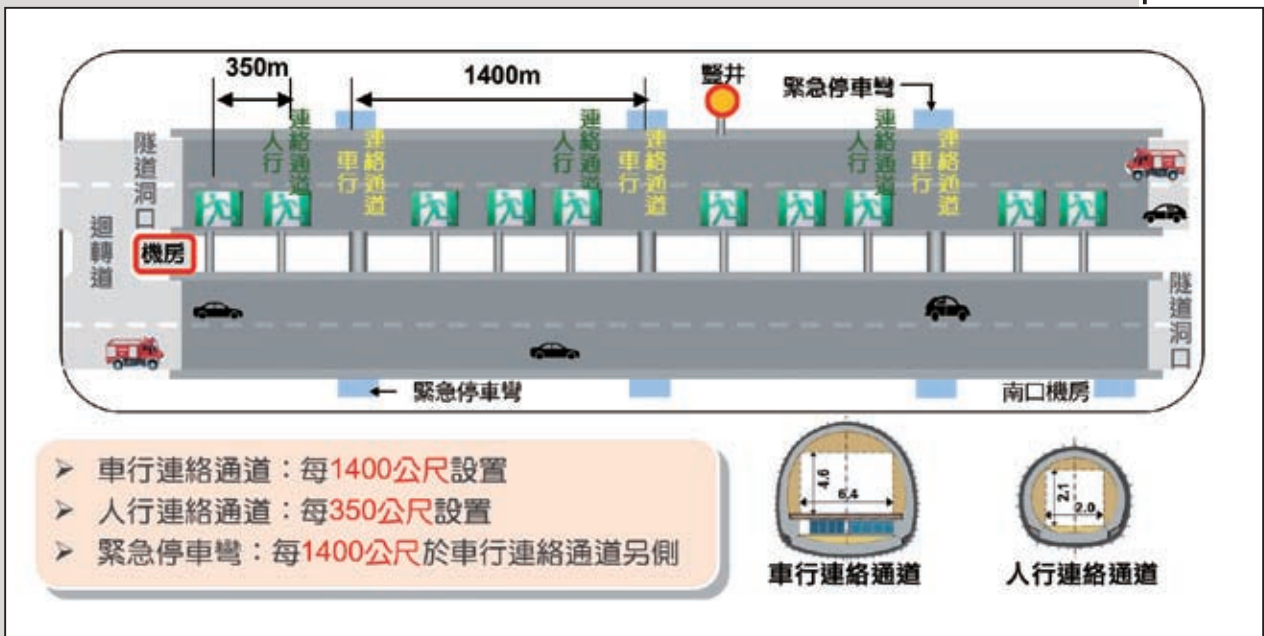


圖9 緊急停車彎及連絡通道配置圖

尺、南下線4617.5公尺，採新奧工法設計施工，隧道以雙孔單向車道設計。主隧道行車淨空高為4.6公尺，每車道寬3.5公尺，車道兩側各留路肩寬0.3公尺。維修步道採15公分高之低步道配置，人行空間寬1.0公尺、高2.0公尺。其它服務主隧道之設施尚包括連絡通道、機房、輔助機房等，標準斷面如圖8所示。

(二) 連絡通道與緊急停車彎

兩線隧道間每隔350公尺設置一處人行

連絡通道，每隔1.4公里設置一處車行連絡通道。緊急停車彎設置在車行連絡通道的相對側處，寬度為3公尺，長度60公尺，如圖9所示。

二、豎井

豎井主要為施工空間及營運階段通風用途，為減少施工及營運階段對環境影響，將原規劃豎井位置移至台9線附近，再以橫坑銜接主隧道，如圖10所示。通風豎井採圓形斷面，

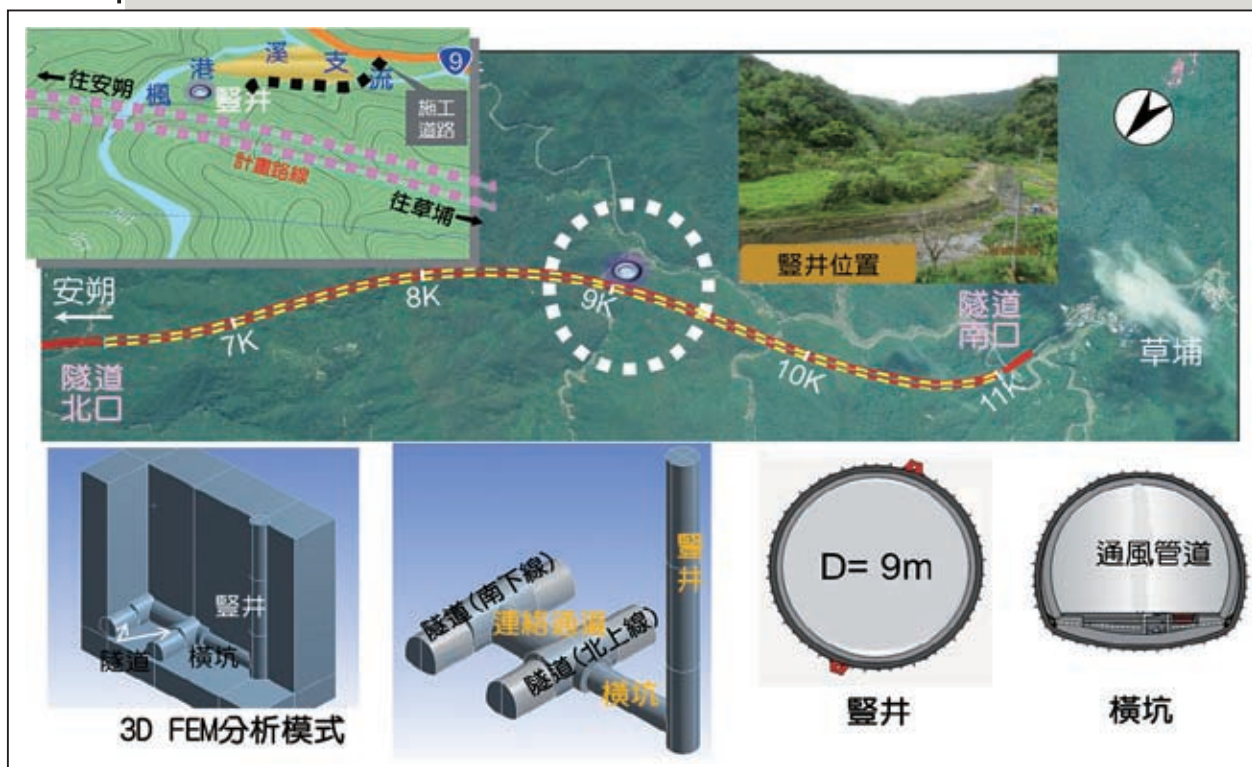


圖10 通風豎井與橫坑示意圖

綜合考量施工及通風需求，豎井開挖直徑為10.5m，完工後內徑為9m，通風功能已考量隧道於正常、壅塞及緊急事故等營運時段之需求。

三、隧道初期支撐

初期支撐設計與隧道/豎井開挖工法有關，隧道/豎井開挖工法係依隧道地質條件、長度、斷面大小、使用機械種類與施工方式等來選擇可行之開挖方式，隧道開挖支撐如圖11所示。隧道及豎井採二向度分析，主隧道、橫坑、通風管道及豎井等複雜地下交叉段則依需要採用簡化二向度分析或三向度分析。

四、混凝土襯砌與防水設計

隧道開挖後採用半剛性支撐，岩盤已達新的平衡應力，惟隧道尚有部分地下水壓、岩體長期岩壓、岩栓之老化及其它無法預知之因素

等，故為顧及隧道安全與增進通風效果，並為維持較佳觀瞻等需要，全線均設鋼筋混凝土襯砌，再視地質及附屬設施等需要配筋補強。

五、施工階段監測系統

本隧道監測項目包括開挖斷面伸縮變化之量測、頂拱(仰拱)之沉陷(隆起)量之觀測、地層位移變形之量測、岩體內變形及應力鬆弛範圍之量測等。監測儀器包括收斂岩釘或三維變形觀測點、伸縮儀、沉陷觀測釘、計測岩栓、傾斜儀及其它附屬監測設備。

肆、隧道工程特殊考量

一、綠色環境及綠色工法

本工程位於山區，沿溪谷配置，生態資源

岩體分類	I	II	III	IV	V	VI 斷層破碎帶	洞口段
開挖步驟							
岩體評分 (RMF)	91~100	61~80	41~60	21~40	11~20	0~10	洞口段 不列入岩體評分
上半斷面	≤4.0m	≤3.0m	≤2.5m	≤2.0m	≤1.5m	≤1.0m	≤1.2m
噴凝土+鋼絨網 或 鋼絨網噴凝土	鋼絨網噴凝土， $\phi=40\text{cm}$ (7~8) (視需要)	鋼絨網噴凝土， $\phi=80\text{cm}$ (7~8)	鋼絨網噴凝土， $\phi=120\text{cm}$ (7~8)	鋼絨網噴凝土， $\phi=160\text{cm}$	鋼絨網噴凝土， $\phi=200\text{cm}$	噴凝土 $\phi=30\text{cm}$ +2層鋼絨網 $50\times100\times100\text{mm}$ 或鋼絨網噴凝土 $\phi=240\text{cm}$	鋼絨網噴凝土， $\phi=200\text{cm}$
鋼支撐	-	-	桁型鋼支撐G100 或 H型鋼支撐H100x100	桁型鋼支撐G100 或 H型鋼支撐H100x100	桁型鋼支撐G125 或 H型鋼支撐H125x125	H型鋼支撐H150x150	H型鋼支撐H150x150
岩 栓	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m) 局部、線路帶	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m)	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m)	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m)	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m/8m)	深埋岩栓(32mm ϕ) 或深埋岩栓(預力， 25mm ϕ ，L=4m/8m)	深埋岩栓 (預力，25mm ϕ ，L=4m/8m)
仰 拱	-	-	-	設仰拱，視需要	設仰拱	設仰拱	設仰拱，視需要
先撐鋼管 或 管幕鋼管	-	-	-	$\phi 32\text{mm}$ 先撐鋼管， L=3m@40cm~50cm， 線路帶	$\phi 32\text{mm}$ 先撐鋼管， L=3m@30cm~40cm	先撐管幕管 $\phi 100\text{mm}$ ， L=12m@30cm~40cm或 $\phi 32\text{mm}$ 先撐鋼管， L=3m@30cm~40cm 或先撐管幕管 $\phi 100\text{mm}$ ， L=12m@30cm~40cm	$\phi 32\text{mm}$ 先撐鋼管， L=3m@30cm~40cm 或先撐管幕管 $\phi 100\text{mm}$ ， L=12m@30cm~40cm

註：封面噴凝土、封面岩栓、排水鑽孔、迂迴坑、止水灌漿、地盤改良、岩錨、導坑工法、臨時仰拱及擴大基腳等，皆視需要辦理

圖11 安朔草埔隧道開挖支撐圖

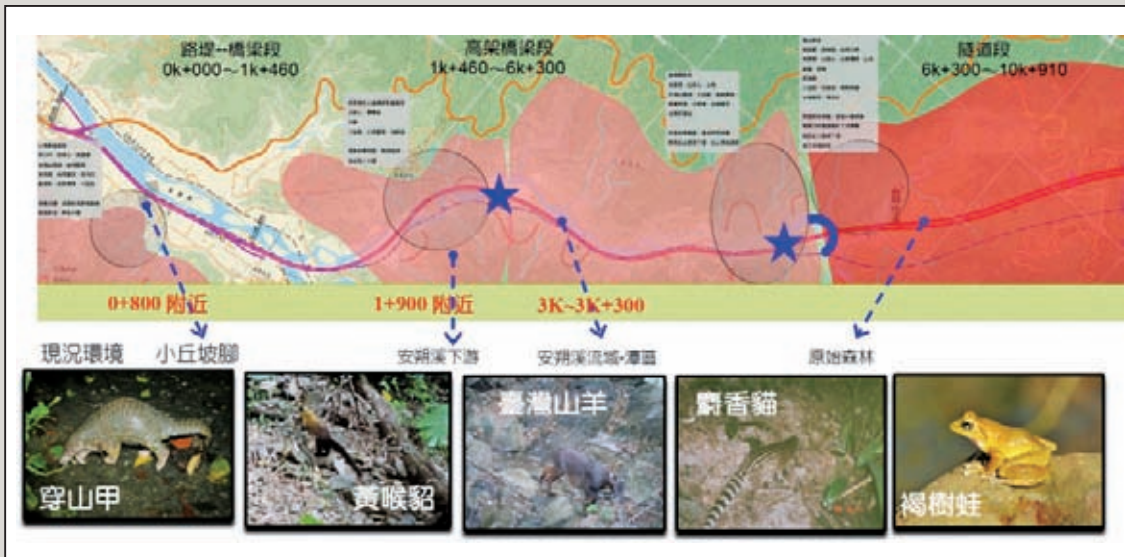


圖12 綠色環境動物調查

豐富，從調查、規劃、設計至施工均考量避開生態敏感區域，妥善規劃施工動線，以降低對環境之衝擊。具體作法如下：

- (一) 採24小時全天候紅外線攝影觀察及夜間勘查，調查生物路徑如圖12所示。
- (二) 溪流交匯或鄰水域等生態敏感區採施工便橋，降低生態衝擊。
- (三) 施工便道沿線設置動物穿越通道。

隧道洞口及施工便道規劃迴避「大樹及稀有植物」；「潛勢小苗」施工前先行移植，保護原生苗木，落實保留在地物種多樣性。隧道洞口附近則加強植栽綠化，延伸道路綠帶範圍，提升綠覆率。

綠色工法作法如下：

1. 土石方回收再利用

將隧道開挖產出之適用土方，運用在本計畫隧道仰拱回填、填築路堤及東部海岸人工養灘，以達到土石方回收再利用之目標。

2. 縮短隧道豎井長度

隧道路線設計長度由原規劃之5公里長縮短為4.6公里，豎井深度由原規劃的140公尺縮短為110公尺，減少土方開挖量。

3. 減緩隧道縱坡

車輛於隧道內爬坡，引擎負荷大，廢氣排放多，溫度亦隨之升高，增加隧道通風機電系統負擔，將隧道內縱坡由原規劃階段之3.0%調降為2.0%，可有效減廢且符合世界潮流。

4. 提高襯砌混凝土強度減少開挖量

隧道開挖以鑽炸為主、機械修挖為輔，減少對圍岩之擾動及超挖量。以全能工班作業縮短工期均為友善環境、減廢之工法。此外襯砌混凝土強度由245kg/cm²提高至280kg/cm²可減少襯砌厚度，減少材料、開挖量及土石方運送，達隧道節能減碳之目的，如圖13所示。

二、褶皺密集地質施工考量

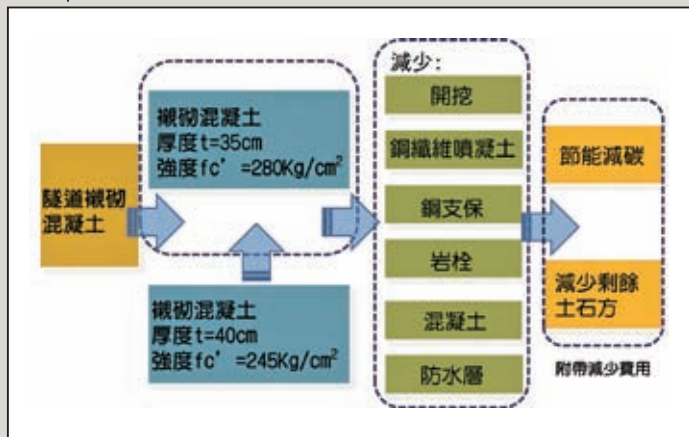


圖13 襯砌混凝土強度提高之效益

本隧道地質主要受褶皺作用，其軸部易形成破碎帶(背斜軸)或蓄積地下水(向斜軸)，隧道施工時易遭遇湧水及抽坍等現象。處理對策考量如下：

(一) 湧水之對策工法

路線可能遭遇之地下水問題，施工時藉助排水鑽孔來預先掌握地下水情況。湧水處理之對策可分為湧水之排除與阻止兩方式。本工程豎井開挖遭遇大量湧水，其處理工法採用化學灌漿工法，施工照片如圖14所示。

(二) 剪裂破碎帶之對策工法

隧道施工遭遇斷層破碎帶，可能發生因地下水沿破碎帶湧出，或者造成隧道開挖後變形程度過大之情形。隧道開挖前採用長距離前進探查孔、隧道震波探測(TSP)等，確認隧道開挖面前方斷層破碎帶位置與影響範圍及滲水潛能；並以排水工法、阻水工法(化學灌漿、水泥系灌漿或兩法併用)預先減輕或避免湧水之影響，再搭配管幕工法或地盤改良等措施因應。本工程於南口南下線遭遇破碎帶開挖面抽坍，採灌漿地改方式克服，施工照片如圖15所示。



圖14 豎井止水灌漿



南口南下線遇破碎帶開挖面抽坍

南口南下線抽坍區灌漿地質改良

圖15 開挖面抽坍與灌漿地質改良



隧道北洞口邊坡格梁護坡

隧道北洞口管幕工法施工

圖16 隧道洞口邊坡保護

三、隧道洞口段穩定之因應對策

地質鑽探結果顯示，隧道北洞口地質較

差，洞口邊坡以地錨格梁護坡先行穩定後，隧道頂部以管幕鋼管先行支撐再進行隧道鑽掘，如圖16所示。

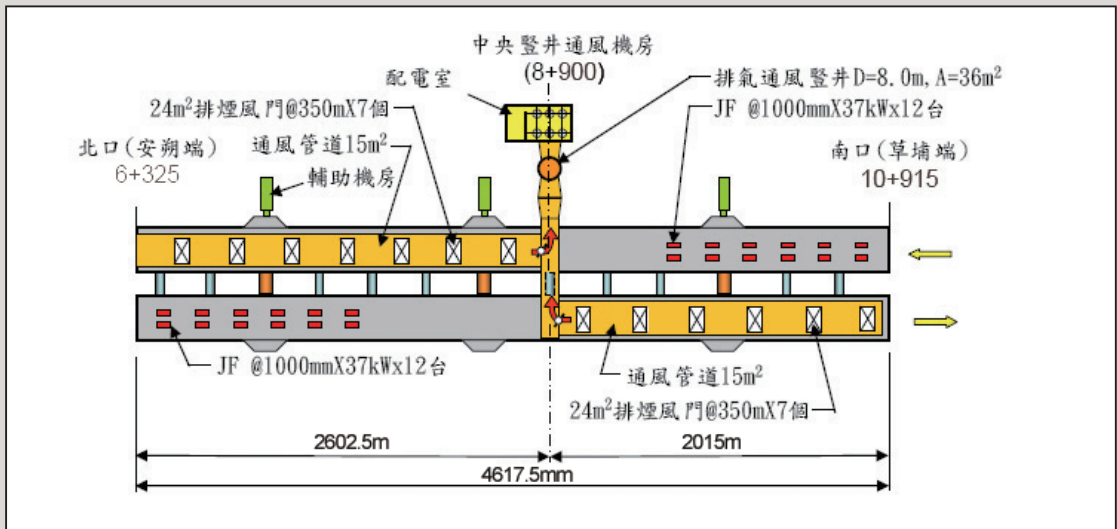


圖17 草埔隧道通風示意圖

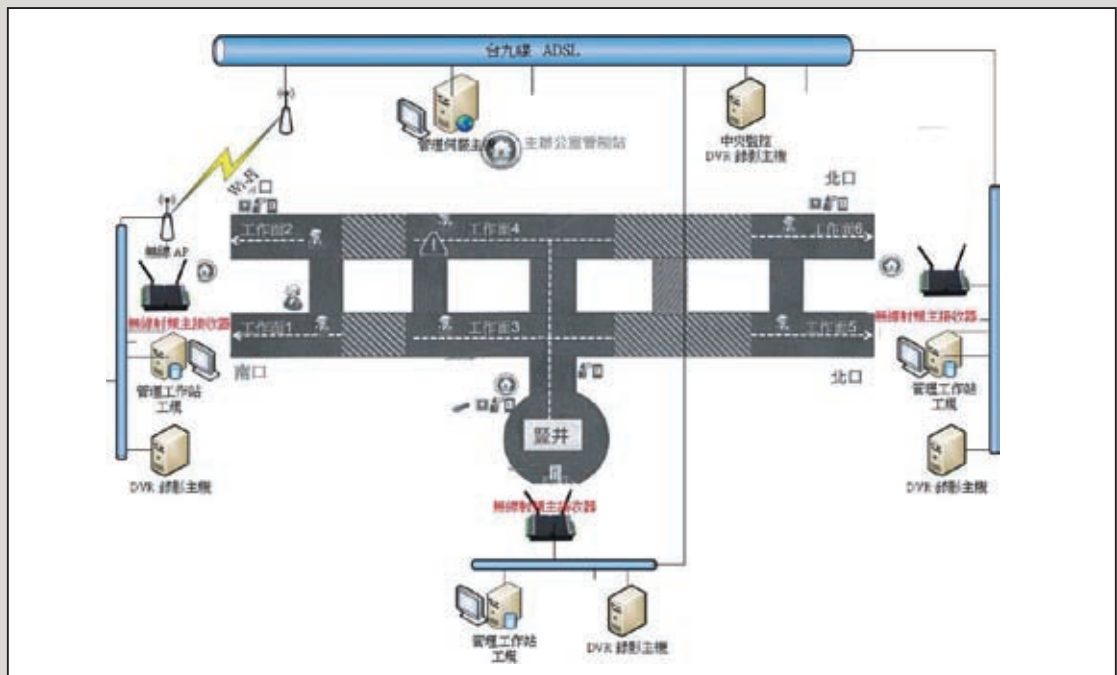


圖18 隧道內主動式人員車輛機具管理系統 (RFID)

四、隧道通風系統之特殊考量

本隧道超過3000公尺屬甲級隧道，採用點排式與縱流式通風方式併用系統，其隧道全量的空氣概分三段處理，進隧道500m為第一段，可由隧道入口引入一部分供氣藉Jet Fan推送，中段3600m為排氣模式，廢氣由隧道中央豎井排除，部分推至隧道下游端即將隧道氣流以縱

流方式排出。點排式則當隧道發生火災時可切換為該方式藉由隧道頂天花開設之排煙口排除發生事故區之煙熱，以利用路人由兩端逃生。隧道通風示意圖詳圖17所示。

基於隧道南洞口空間狹小，並為減少對該洞口區段內動植物棲息環境之影響，南洞口機房設置於隧道內，以減少對環境之干擾。

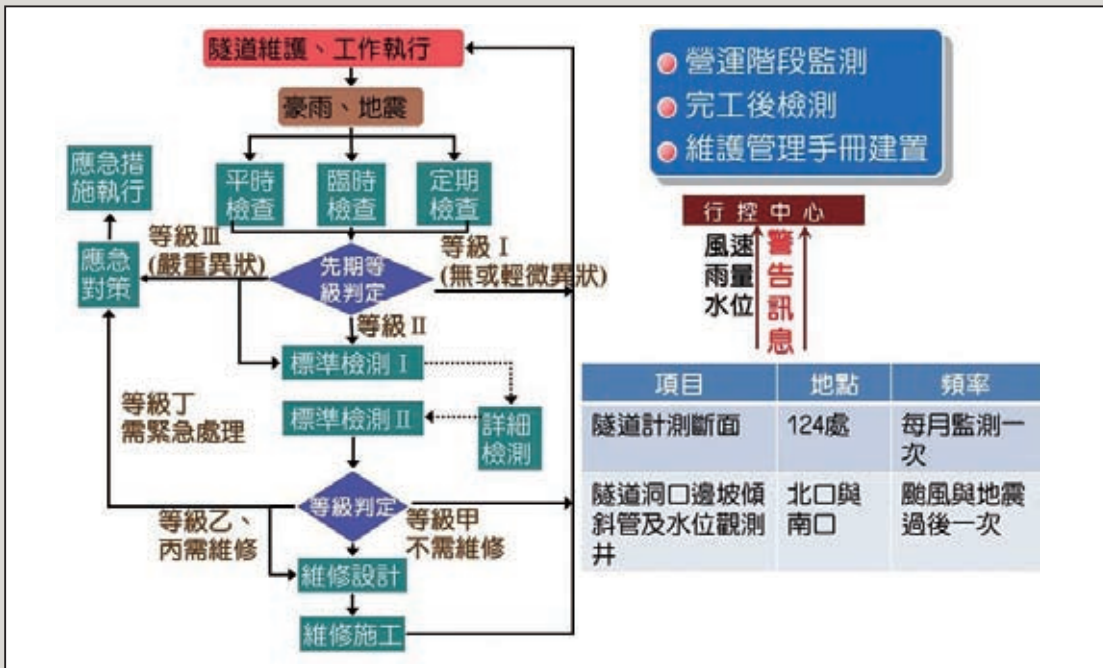


圖19 全生命週期隧道維護管理

五、隧道內主動式人員車輛機具管理系統

為提高工區人員、車輛及機具進出之安全管控；隧道施工區內均佈設無線射頻(RFID)辨識系統，透過RFID的讀取器及資料傳送器(或中繼站)，將配帶感應晶片之人員、車輛及機具之動、靜態資料傳送至設置監控崗哨或工務所之PC監控程式內，進行全方位之安全監控，詳如圖18所示。

六、全生命週期隧道維護管理

全生命週期觀點的隧道設計考量如下：隧道長期穩定之考量、斷面設計納入維修補強淨空餘裕、排水設施與襯砌設計水壓、重點斷面(區段)的長期監測設施及導入全生命週期之營運維護檢測監測，如圖19所示。

伍、結語

本工程考量山區環境，經由詳細調查、

妥善規劃、施工中確實執行，以降低對環境衝擊。本工程將原規劃豎井位置移至台9線附近，可減少施工及營運階段對環境影響。在友善環境設計與施工融合下，本工程於交通部103年度交通工程環境影響評估追蹤考核現場勘察計畫中榮獲全國第一名殊榮，如圖20所示。



圖20 103年度交通工程環境影響評估追蹤考核現場勘察計畫第一名

本隧道屬甲級隧道，採用點排式與縱流式併用通風系統，廢氣由隧道中央豎井排除，部分推至隧道下游端。當隧道發生火災時可切換為點排式藉由隧道頂隔板開設之排煙口排除發生事故區之煙熱。

本隧道工程穿越中央山脈，沿線施工將穿越地質破碎帶及湧水帶等惡劣地質，除於設計階段縝密規劃、預先研擬因應對策外，工程期間搭配施工地質調查及輔助工法方能克服困難，工程極具挑戰性。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2012)，
“台9線南迴公路拓寬改善後續計畫457k+000~472k+700(新樁號443k+000~454k+006)(安朔至草埔段)新闢四車道工程委託設計(含測量及地質探查)地質鑽探工程報告”。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2012)，
“台9線南迴公路拓寬改善後續計畫457k+000~472k+700(新樁號443k+000~454k+006)(安朔至草埔段)新闢四車道工程初步設計報告”。



3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2012) ,
“台9線南迴公路拓寬改善後續計畫457k+
000~472k+700(新樁號443k+000~454k
+006)(安朔至草埔段)新闢四車道工程細部
設計報告”。

4. 交通部(2003) , “公路隧道設計規範”。

5. 交通部(2010) , “公路隧道消防安全設備設
置規範”。

