

地工技術

山區近接隧道之設計及施工案例探討

邵厚潔* 李民政** 李怡德** 林敬智**

一、前言

台 9 線蘇花公路因地質、地理、氣候環境條件不良，長期以來常因邊坡崩坍而影響通車安全，為提昇蘇澳花蓮間公路運輸效能及兼顧東部地區整體永續發展，交通部公路總局(以下簡稱公路總局)乃推動「台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫(以下簡稱蘇花改)」，期能帶給東部居民一條安全回家的路。

蘇澳隧道及東岳隧道位於計畫中蘇澳—東澳路段(詳圖一)，為雙孔各單向行車隧道，配合前後平面線形，採「眼鏡型隧道」佈置，是台灣地區少見之近接山岳隧道案例。

兩座隧道係採用臺灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR 系統)(張等人，2003)進行岩體分類及支撐設計；初期支撐系統以鋼線網噴凝土、岩栓及鋼支保為主，並搭配輔助工法進行隧道開挖；全線隧道設置二次混凝土襯砌。另

為貫徹新奧工法「施工中設計(On-going Design)」之精神，配合隧道現場施工情形及計測資料，再進行回饋及檢核兩隧道之數值分析參數，並視需要進行後續開挖支撐設計之檢討及整體安全評估。

二、地質概況

依據經濟部中央地質調查地質圖顯示，蘇花改蘇澳—東澳路段通過中央山脈東翼及脊梁山脈地質區。地層走向約略呈東-西或西北西-東南東走向，向南傾斜。本區各主要地層(蘇澳層、南蘇澳層及東澳片岩等)間多以斷層接觸相接。沿線區域地質如圖二所示。

蘇澳隧道長約 254 公尺，最大覆蓋約 40 公尺，其地質剖面圖如圖三所示，主要岩性為板岩，偶夾薄層變質砂岩，劈理發達。(中興工程顧問股份有限公司，2012a)東岳隧道長



圖一 蘇澳隧道及東岳隧道位置圖



圖二 蘇澳隧道及東岳隧道沿線區域地質圖

* 交通部公路總局蘇花公路改善工程處

**中興工程顧問股份有限公司

度約 215 公尺，最大覆蓋約 35 公尺，其地質剖面圖如圖四所示，主要岩性為片岩，片理發達。兩座隧道圍岩易沿劈理或片理開裂，整體岩盤風化程度較高，裂面多有銹染，局部有小規模剪裂帶存在。(中興工程顧問股份有限公司，2011)

兩座隧道高程大多位於地下水水位面以下，但因覆蓋不高，隧道上方水頭不大，隧道施工期間之地下水狀況主要為滴水潮濕。

三、隧道岩體分類

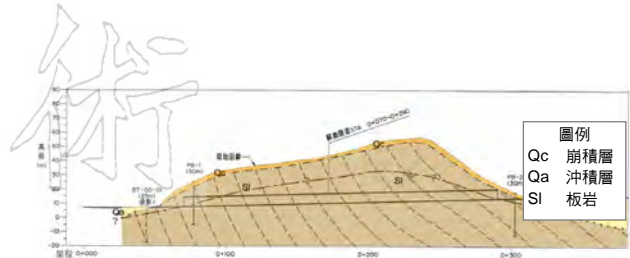
針對兩座隧道之沿線地質狀況，係採工程會建置之「臺灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR 系統)」進行岩體分類。PCCR 系統中包含適用於臺灣地質狀況之岩體評級方法與準則，以及各級岩體之參考開挖支撐。

兩座隧道所經過之蘇澳板岩及東澳片岩層為變質岩，均屬 PCCR 系統中定義之 A 岩類。依工程地質鑽探報告書(中興工程顧問股份有限公司，2012b)結果推估，兩座隧道之岩體分類及其百分比如表一及表二所示，主要分布於 AIV~AVI 岩類，以 AV 類岩盤佔比最高，分別達 53.2%及 50.2%，AIV 類次之，分別達 26.6%及 25.1%。

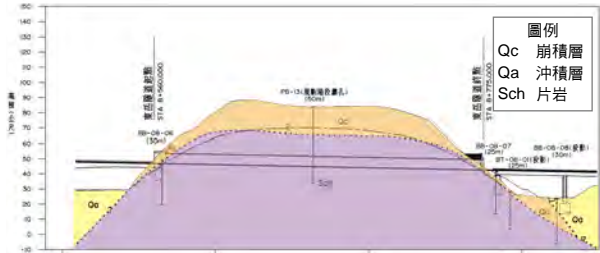
四、隧道標準斷面

蘇澳隧道及東岳隧道為雙孔各單向行車隧道，隧道行車空間淨高 4.6 公尺，佈置雙車道(南下、北上各兩車道)，各車道寬度 3.5 公尺，雙車道路幅之內側路肩 0.3 公尺，外側路肩 0.5 公尺，隧道行車淨空間寬度 7.8 公尺。隧道兩側另設 1.0 公尺寬，2.0 公尺高之維修步道，其下方設置電氣管溝，隧道兩側下方於襯砌外並設置盲溝，排除隧道周圍之地下水。

兩隧道因配合前後的平面線型，需採「近接隧道」佈置。並配合地質、土工條件及結構力學上須有較佳應力分佈之考慮，隧道設計為兩個近接之有仰拱，形狀近似馬蹄型斷面之「眼鏡型隧道」佈置，透過先行開挖中央導坑並設置支撐系統，以期降低個別隧道近接施工之交互影響。南下、北上線隧道中心距約 14 公尺。隧道標準斷面圖如圖五所示。



圖三 蘇澳隧道縱剖面圖



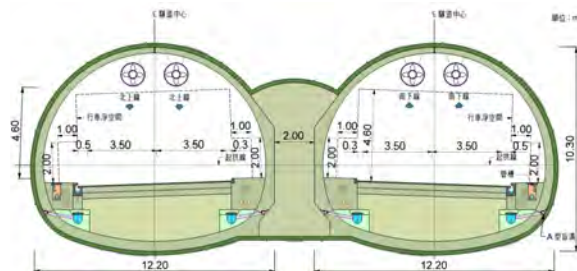
圖四 東岳隧道縱剖面圖

表一 蘇澳隧道沿線推估岩體分類表

PCCR岩體級別	A _I	A _{II}	A _{III}	A _{IV}	A _V	A _{VI}	洞口段	合計
推估比例(%)	0	0	0	26.6	53.2	8.8	11.4	100

表二 東岳隧道沿線推估岩體分類表

PCCR岩體級別	A _I	A _{II}	A _{III}	A _{IV}	A _V	A _{VI}	洞口段	合計
推估比例(%)	0	0	0	25.1	50.2	8.4	16.3	100



圖五 隧道標準斷面圖

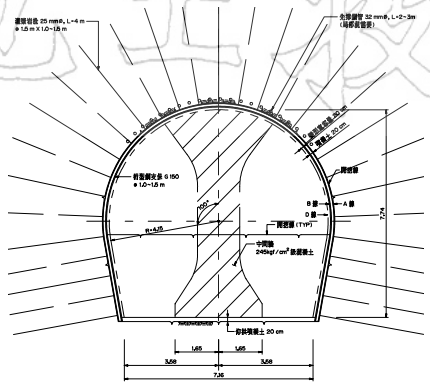
五、隧道開挖支撐及結構設計分析

考量隧道長度及開挖體積，中央導坑開挖支撐不分級，採兩階開挖。開挖支撐系統如圖六及表三所示。主隧道之開挖支撐分兩級，第 I 級每側隧道分三階開挖，第 II 級每側隧道除亦分三階開挖外，並再增設土心，提升開挖面穩定性。開挖支撐系統如圖七及表四所示。

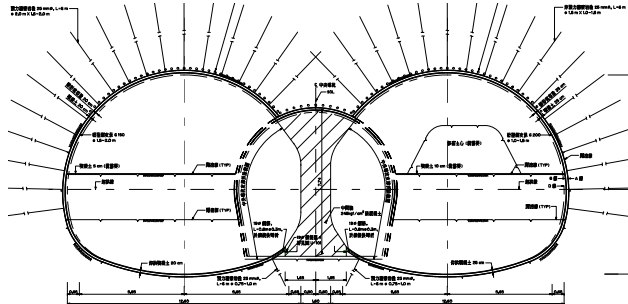
為確保隧道安全，茲配合隧道開挖支撐順序(請參閱圖八)，採 Phase2 程式進行開挖支撐數值分析，並據以評估隧道之變形寬容量及支撐系統。

本數值分析的基本假設如下：

1. 以二向度平面應變行為模擬。



圖六 隧道中央導坑開挖支撐圖



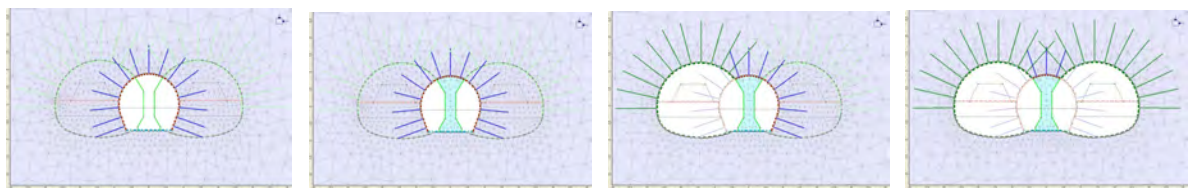
圖七 主隧道開挖支撐圖

表三 隧道中央導坑開挖支撐表

支撐等級	I (含斷層破碎帶)
開挖順序	<p>二階開挖(視需要)</p>
岩體評分(RMR)	0~40
變形寬容量(cm)	20
輪 進	1.0~1.5m
灌漿岩柱	C&W, 非預力, 25mm ϕ , L=4.0m @1.5m x 1.0~1.5m
噴 凝 土	C, W & I:20cm
鋼 線 網	C, W & I:2-5mm ϕ (100x100)
桁型鋼支保 (H型鋼支保)	G150(H150) @1.0~1.5m
先撐鋼管	先撐鋼管, 32mm ϕ , L=2.0~3.0m 局部視需要
管幕鋼管	先撐管幕鋼管, 100mm ϕ , L=12.0m 局部視需要

表四 主隧道開挖支撐表

支撐等級	I	II (含斷層破碎帶)
開挖順序	<p>六階開挖(視需要)</p>	<p>八階開挖(視需要)</p>
岩體評分(RMR)	21~40	0~20
變形寬容量(cm)	20	35
輪 進	1.5~2.0m	1.0~1.5m
灌漿岩柱	C&W, 預力, 25mm ϕ , L=6.0m @2.0m x 1.5~2.0m	C&W, 非預力, 25mm ϕ , L=6.0m @1.5m x 1.0~1.5m
噴 凝 土	C, W & I:20cm F & T1:5cm, 視需要	C, W & I:20cm F & T1:10cm, 視需要
鋼 線 網	C, W & I:2-5mm ϕ (100x100)	C, W & I:2-5mm ϕ (100x100)
桁型鋼支保 (H型鋼支保)	G150(H150) @2.0~2.0m	G200(H200) @1.0~1.5m
先撐鋼管	先撐鋼管, 32mm ϕ , L=2.0~3.0m 局部視需要	先撐鋼管, 32mm ϕ , L=2.0~3.0m @0.3~0.5mx1.0~1.5m
管幕鋼管	—	先撐管幕鋼管, 100mm ϕ , L=12.0m 局部視需要



(1)先進行中央導坑之開挖及支撐 (2)澆置中間牆 (3)進行一側隧道分階開挖及支撐 (4)另一側隧道分階開挖及支撐

圖八 隧道開挖支撐順序示意圖

2. 不考慮時間因素，忽略潛變之影響。
3. 岩體強度及變形參數之推估係根據 Hoek Brown 破壞準則(Hoek et al., 2002)由岩心之單壓強度 σ_c 、地質強度指標 GSI 等參數推求摩爾-庫倫強度參數 c ， ϕ ，楊氏模數 E 值。
4. 岩體及支撐材料之應力-應變關係為完全彈塑性。
5. 以梁元素模擬鋼線網噴凝土、拉桿模擬岩栓行為。

分析時首先進行中央導坑之開挖及支撐。完成後澆置中間牆，並將變位歸零。接著進行一側主隧道之分階開挖及支撐，再進行另一側隧道之分階開挖及支撐，直到最後一階。

分析結果顯示上述開挖方式，可減低個別隧道近接開挖施工之交互影響。並根據隧道頂拱、側壁之最大變形量設定隧道變形寬容量，如表五所示。理論上岩栓長度應大於塑性區厚度，本分析結果亦符合，如表六所示。

由於隧道變形容許值極不易掌握，且隧道常因地質分佈複雜或地質構造等因素而破

壞，故仍有賴現地地質調查，及實際開挖計測資料之驗證。

表五 隧道各級支撐變形量

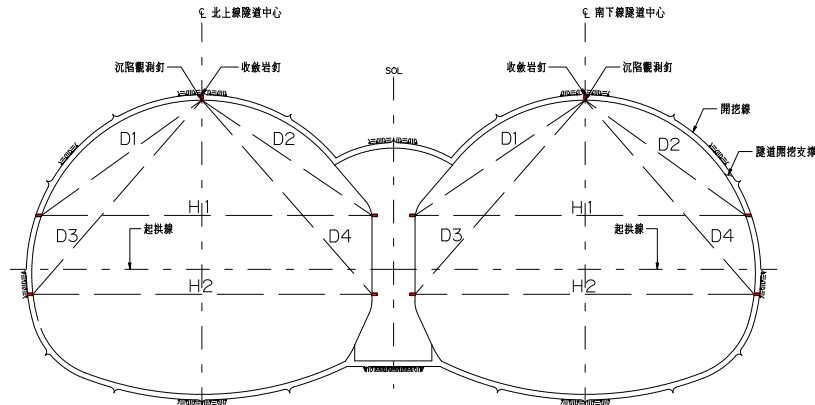
支撐類別	中央導坑 第 I 級	主隧道 第 I 級	主隧道 第 II 級
計算變形(cm)	16.0	16.5	32.5
變形寬容量(cm)	20.0	20.0	35.0

表六 隧道各級支撐塑性區厚與岩栓長度

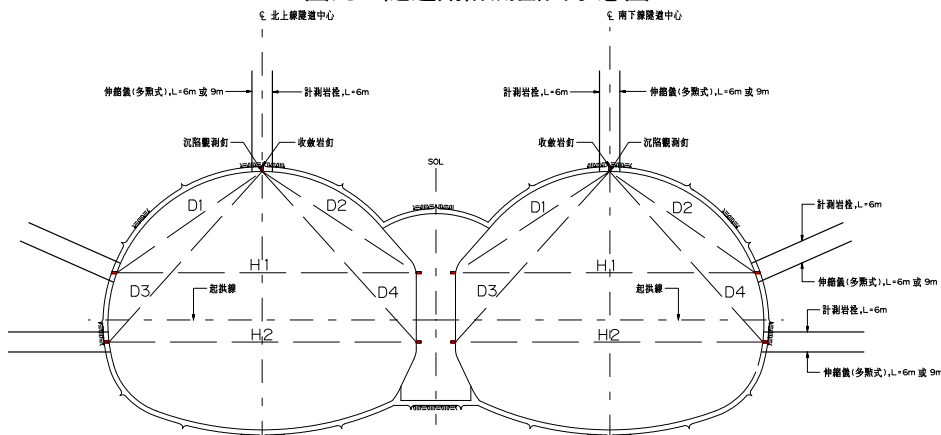
支撐類別	中央導坑 第 I 級	主隧道 第 I 級	主隧道 第 II 級
塑性區厚(m)	3.0	2.0	4.0
岩栓長度(m)	4.0	6.0	6.0

六、隧道開挖計測資料

兩座隧道隧道施工期間之計測佈置分成主計測斷面及副計測斷面兩種。副計測斷面裝設收斂岩釘及沈陷觀測釘等計測儀器，如圖九所示；主計測斷面則再加裝電子伸縮儀及計測岩栓，如圖十所示。工地每週彙整計測週報資料，並據以進行檢核及整體安全評估。



圖九 隧道副計測斷面示意圖



圖十 隧道主計測斷面示意圖

因東岳隧道已完成主隧道開挖作業，資料較蘇澳隧道完整，故以下以東岳隧道為例，針對計測資料加以說明。根據東岳隧道計測週報資料，各斷面開挖變位於襯砌結構作業前均已趨於穩定；隧道第 I 級及第 II 級開挖支撐中，地中變位最大之計測斷面分別為南下線 CS-007(Sta.8+663.0(S))及南下線 CS-003 (Sta.8+593.0(S))。

比對計測斷面 CS-007 變位資料，主隧道頂部最大沈陷量約 8cm，最大收斂變位發生於 $\Delta H1$ 約 12cm。比對計測斷面 CS-003 變位資料，主隧道頂部最大沈陷量約 24cm，最大收斂變位發生於 $\Delta D2$ 約 12cm。東岳隧道之各點開挖變位及淨空變形均未超過警戒值或行動值，且與數值分析結果大致相符。

綜上所述，原設計分析採用之參數、基本假設、開挖支撐規劃及施工時機應屬適當。故於後續開挖支撐施工仍維持原設計規劃。

七、施工情形

蘇澳隧道及東岳隧道沿線節理發達，風化程度較高，局部有小規模剪裂帶。岩體開挖後易解壓鬆動，故開挖支撐除設計永久性之鋼線網噴凝土、岩栓及鋼支保外，尚需視情形搭配輔助工法，包括先撐鋼管/管幕及灌漿作業等，以確保開挖作業之穩定性。

東岳隧道所屬「東澳東岳段新建工程」，業於 2012 年 9 月開工，於 2013 年 9 月開始進行隧道開挖作業，開挖輪進期間雖歷經數次抽坍，現場採用噴凝土封面、水泥漿液灌漿、聚胺酯樹脂灌漿及排水鑽孔等搶修作業處理，隧道仍提前於 2014 年 12 月 8 日全線開挖貫通，並已於 4 月 12 日完成隧道全線仰拱混凝土澆置作業。隧道施工照片如圖十一~圖十七所示。東岳隧道依實際開挖判定之岩體分類百分比如表七所示，與工程地質鑽探報告書之岩體分類百分比相近，以 AV 類岩盤佔比最高，AIV 類次之。

表七 東岳隧道沿線實際岩體分類表

PCCR 岩體級別	A I	A II	A III	A IV	A V	A VI	洞口段	合計
實際比例 (%)	0	0	0	15.7	65.6	13.6	5.2	100

八、結論與建議

1. 蘇澳隧道及東岳隧道為雙孔各單向行車隧道，因配合前後的平面線型，採近接隧道設計。兩隧道根據空間需求並配合地質、地工條件及結構力學上須有較佳應力分佈之考慮，隧道設計為有仰拱並靠近之兩個近似馬蹄型斷面，採「眼鏡型隧道」佈置。

蘇澳隧道所屬「蘇澳永樂段新建工程」於 2013 年 4 月開工，其中央導坑於 2014 年 9 月開始進行開挖，並於 2014 年 12 月 23 日貫通，現正進行北口段中間牆澆置作業及南口北上線主隧道開挖作業。

2. 根據實際隧道施工情形及隧道計測資料，開挖支撐及襯砌施工大致符合預期，且印證透過先行開挖中央導坑並設置支撐系統，可有效消弭個別隧道近接開挖施工之交互影響，計測斷面各點變位及淨空變形均未超過警戒值或行動值，且與數值分析結果大致相符。故原設計分析採用之參數及開挖支撐規劃應屬適當。

3. 本案以 PCCR 系統建議之岩盤分類與支撐工關係，進行支撐設計，再於施工階段採用計測回饋分析等措施，適時檢討支撐工及施作時機，並採取合宜之處置對策，使兩座隧道均能順利施工。

參考文獻

- 中興工程顧問股份有限公司 (2011)，「台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫東澳東岳段新建工程綜合規劃報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
- 中興工程顧問股份有限公司 (2012a)，「台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫蘇澳永樂段及東澳隧道新建工程暨蘇澳東澳段機電照明工程綜合規劃報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
- 中興工程顧問股份有限公司 (2012b)，「台九線蘇花公路蘇澳東澳段工程委託地質探查服務工作工程地質鑽探報告書」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
- 張吉佐、侯秉承、李民政、李怡德、張博翔 (2003)，「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)」，行政院公共工程委員會，臺北。
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). "Hoek- Brown failure criterion - 2002 Edition", Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 267-273.

地工技術



圖十一 東岳隧道北洞口中央導坑岩栓鑽設



圖十五 東岳隧道南下線SS-T172開挖貫通



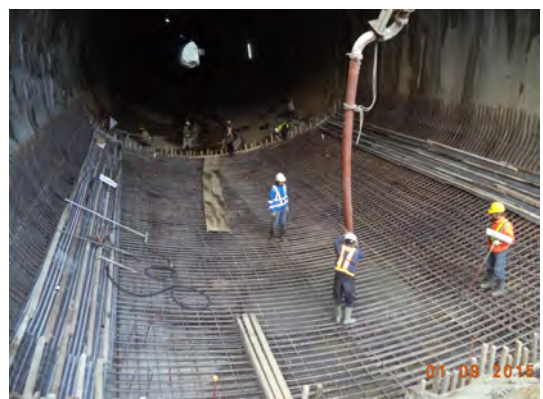
圖十二 東岳隧道北口中央導坑(S164環)開挖貫通



圖十六 南下線仰拱噴凝土



圖十三 東岳隧道中央導坑中間牆鋼筋組立



圖十七 東岳隧道南下線仰拱第一模混凝土澆置



圖十四 東岳隧道北洞口南下線開挖