

# 國道隧道技術展望

蔡茂生

國道新建工程局設計組組長

## 一、前言

國道高速公路興建可概分為三個階段，最早期於興建中山高速公路時，由於路段行經西部平原區，因而全段僅有一座長 374 公尺之大業隧道，採用傳統工法施工；第二階段為第二高速公路時期，北部路段行經山區，因而隧道較多且長度較長，隧道斷面亦大，共設置 14 座隧道，主線隧道為三車道（開挖斷面約 120~150 平方公尺），其中新店隧道交流道匯入部分更設成四車道之超大斷面，面積達 230 平方公尺。而北宜高速公路自南港經石碇、坪林至頭城全線在山區蜿蜒通過，共設置隧道五座，總長度佔全長之 65%，其中雪山隧道長 12.9 公里更列為全球第五長之雙孔單向公路隧道，此階段施工採用新奧工法，雪山隧道則為國內首次採用全斷面隧道鑽掘機（TBM）。

接著第三階段陸續進行國道六號、東部國道及東西向八里五股段等工程（相關位置圖如圖一所示）。此一時期之隧道設計為因應變化複雜之地質構造而有更具彈性之開挖斷面配置與支撐型式，特別強調前進鑽探、先期排水、預先強化地層，同時採用多項較新式之材料及技術，加強對環境生態之保護。

各階段國道所設置之隧道統計如表一所示。

表一、隧道統計一覽表

	中山高速公路	二高、北宜	東部國道、國道六號等
主線總長 (km)	374.0	559.4	123.7
隧道總長(km)	0.96	80.3	90.1
隧道座數	2	39	34
隧道比例 (%)	0.27	14.4	72.8

註：隧道統計包含導坑、橫坑



圖一、國道後續隧道工程位置示意圖

## 二、第三階段國道隧道工程概要

### (一) 基本資料

國道蘇花段路線西依中央山脈，東傍太平洋，且北迴鐵路及台9線省道與本計畫約略平行，受地形限制，工程佈設以隧道為主，共設置11座，長達39.8公里，約佔路段全長46%，其中長度超過3公里者計有6座，最大覆蓋厚度約1,150公尺。為增闢施工期間之開挖面及通風功能需求，第6、7及9號隧道均佈設施工橫坑。

國道六號設置三座隧道長為4.2公里（單向），佔路段全長11%，最大覆蓋厚度約350公尺。

東西向快速公路八里新店線穿經觀音山西麓至五股鄉中坑部分設置觀音山隧道長約2,400公尺，隧道沿線最大岩覆約150公尺。

第三階段隧道基本資料彙整如表二。

表二、第三階段國道隧道基本資料

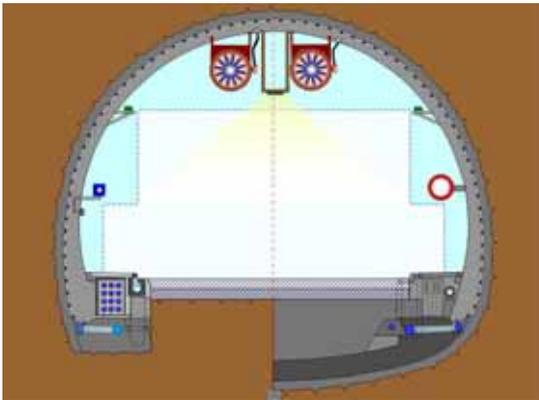
計畫路段	隧道名稱	主線平均長度 (m)	最大覆蓋厚度 (m)	地質概況	附註
國道東部公路蘇澳花蓮段	1	853	82	岩性以板岩為主，葉理發達，岩體分類以V類居多。九股山斷層通過本隧道。	
	2	1463	153	隧道沿線以板岩為主，局部為板岩與砂岩互層，岩體分類以第V類居多。蘇澳斷層通過本隧道。	
	2A	185	120	岩性以板岩為主，葉理發達，沿葉理面常有剪裂帶發育，岩體分類以VI類居多。	
	3	1234	213	岩性主要為板岩，局部為板岩與變質砂岩互層，岩體分類以V類居多。編號A、B兩斷層通過本隧道。	
	4	4338	517	岩性包括板岩、片岩、大理岩及角閃岩等，並有數條斷層通過，地質條件複雜。岩體分類以V、VI類為主。路線穿越大理岩及破碎帶須提防湧水問題。	
	5	5131	865	所穿經地層為角閃岩、片麻岩及石英片岩，須注意湧水地質危害。岩體分類以III~VI類居多。南澳斷層穿過本隧道。	
	5A	466	143	穿過地層為武塔片岩之黑色片岩夾砂質片岩，有數條沿片理發育之剪裂帶。	
	6	7626	510	岩性以片岩為主，局部夾大理岩薄層與燧石，施工時須注意沿片岩與大理岩面之湧水問題。岩體分類以III~V類居多。樟樹山斷層通過本隧道。	橫坑1座，長度為722m。

計畫 路段	隧道名 稱	主線平 均長度 (m)	最大覆 蓋厚度 (m)	地質概況	附註
	7	4670	600	沿線主要岩性為片岩及大理岩，主要地質構造為鼓音斷層及谷風斷層，二斷層均沿片岩錯動造成岩體破碎並夾泥，岩體分類以Ⅲ~Ⅵ類居多。	橫坑 1 座，長度為 222 m。
	8	3784	1050	除南北洞口各約 400m 長之岩性為片麻岩外，沿線以大理岩偶夾片岩為主，岩體分類以Ⅱ~Ⅳ類居多。和中斷層通過本隧道北洞口。	
	9	10132	1150	沿線以片麻岩、大理岩及片岩為主，無明顯區域性地質構造線通過，岩體分類亦以Ⅱ~Ⅳ類居多。	兩座橫坑，長度為 236 m 與 350 m。
東西快八里五股段	觀音山 隧道	2478	150	觀音山隧道沿線穿越之大南灣層及觀音山層，主要岩性為砂泥層及礫石層，並有交互出現於開挖面之情形，礫石層為尚未固結、膠結疏鬆之砂土、礫石地層，觀音山層(粉砂岩)及大南灣層均具遇水軟化特性。	
國道六號南投段	國姓一 號隧道	2430	350	岩性以砂岩夾頁岩及砂頁岩互層為主，東西洞口附近分別有水流東斷層及馬鞍寮斷層通過，隧道中部為大橫坪山向斜，受地質構造影響岩性較為破碎。	
	國姓二 號隧道	507.5	110	主要岩性由塊狀灰黑色硬頁岩局部與中至粗粒灰色層狀砂岩互層所組成，受地質構造影響岩層以高角度傾向西側。	
	埔里隧 道	1284.5	110	岩性主要穿過石英砂岩、硬砂岩或碳質頁岩及礫岩三類岩體，隧道西洞口為陡峭岩坡無法施工進洞，故增闢一施工橫坑。	橫坑一座長約 85m

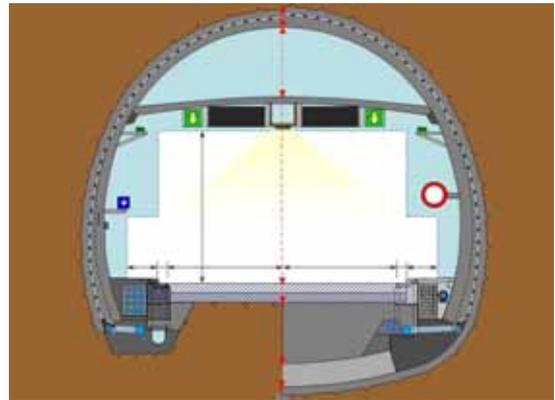
## (二) 隧道斷面及相關配置

第三階段隧道均為兩車道隧道斷面，每車道寬 3.65 公尺，行車淨空高 4.9 公尺，兩側路肩各 0.3 公尺；維修步道淨高 2.0 公尺，淨寬 1.0 公尺。隧道斷面之幾何形狀幾近橢圓形，並因地質因素分為有仰拱及無仰拱兩種斷面（如圖二所示）。國道蘇花段因部分隧道長度較長，考量通風之需求，隧道長度如超過 3 公里，頂拱處則增設通風管道。隧道之斷面如圖三所示。另維修步道下方設置電氣管溝，並視需要設置管線廊道因應機電設施空間需求。

主隧道每隔 350 公尺設置人行聯絡隧道一座，每隔 1.4 公里設置車行聯絡隧道一座，另設各式機房及輔助設施。



圖二、隧道標準斷面圖(短隧道)



圖三、長隧道標準斷面圖

### 三、第三階段隧道工程技術主要課題

#### (一)困難地質及對策

##### 1. 岩體評級

隧道施工須先依據開挖面出露之地層構造狀況予以評分，再分級採用適當之開挖斷面及支撐構件施工。為因台灣地層形成年代較年輕，地質構造特性與歐洲顯有不同，過去使用 RMR、Q 等系統之評分方式，運用上偶有難以評定者。行政院工程會乃委託顧問機構經數年研擬建立「台灣岩體分類與隧道支撐系統（簡稱 PCCR 系統）」，將台灣全區之地質材料，劃分為不同岩體類別(rock mass type)，藉以將適用於定量分類者及適用於定性分類者加以區別。經蒐集台灣地區各重大公共工程案例之岩石力學試驗成果，彙整得到台灣各地層之岩石力學性質概況後，再進一步參考地質年代、地質材料組成以及岩體弱面發育特性等因素，將台灣地層劃分為 A、B、C、D 四種岩類。第三階段國道隧道地質評分配合 PCCR 分類，如表三所示。

表三、國道後續隧道工程 PCCR 岩體分類表

	和新段九號隧道	觀音山隧道	南投支線隧道
A 岩類	A 大理岩、片麻岩		A 白冷層、水里坑層
B 岩類			
C 岩類		C II (S) 軟岩 大南灣層、觀音山層、林口 層鬆砂層	
D 岩類		D II (G) 林口礫石層 粗顆粒含量 > 75%	G I、G II、G III 頭料山層火炎山相
		D II (M) 林口礫石層 粗顆粒含量 50% - 75%	

## 2. 觀音山隧道之設計施工

觀音山隧道地質因屬膠結不良之砂泥岩，其間又夾雜有礫石，地下水位高，因此岩體分類及設計施工均具有相當特殊性。

### (1) 岩體分級

依 PCCR 系統所建議之岩體分類原則分級如下：

- A. 係依上半斷面剛開挖暴露之岩體情況決定，「粗顆粒含量」以上半斷面開挖面積中粗顆粒總面積所佔比例判斷之。
- B. 「大南灣層」及「觀音山層」均以鬆砂層或砂泥互層為主，偶夾薄礫層，但不影響岩體行為，故均屬 C II (S) 類別。
- C. 「複合地質斷面」係指上半斷面由兩種不同主要岩性組成，其岩體分類依頂拱出露之岩性決定；頂拱出露砂層之斷面屬 C II (S) 類別，施作 III 級支撐；頂拱出露礫石層之斷面屬 D II (M) 類別，施作 II 級支撐。

依上所述，觀音山隧道沿線地質係屬 C II (S)、D II (G) 及 D II (M)，其岩體分類標準如表四。

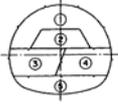
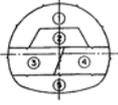
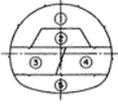
### (2) 隧道支撐設計

以經驗法與案例類比法為主，數值分析法為輔，並配合岩體分類結果擬定對應支撐，進而依據調查或推估所得之岩體參數進行數值分析，檢核各種支撐構件之受力情形，以及隧道周圍岩體之塑性區大小，並進行必要之修正。（支撐設計如表五）

表四 觀音山隧道 C、D 岩類之岩體分級標準表

岩體級別		分級標準	
		膠結程度	地質材料組成
C 岩類	C II (S)	膠結程度不佳或疏鬆 (大拇指可壓出凹痕)	砂含量>50%
D 岩類	D II (G)	膠結程度良好或尚可 (需以地質鎚方能將塊石或礫石敲落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之 含量>75%或相互接觸
	D II (M)		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之 含量 50% ~ 75%或相互不接觸

表五 觀音山隧道支撐設計

支撐等級	I	II	III
岩體分類	DII (G) (林口礫岩) 顆粒(大於 4 號篩)之含量>75%	DII (M) (林口礫岩) 顆粒(大於 4 號篩)之含量 50%~75%	CII (S) (軟岩) 疏鬆砂層，黏結程度不佳 (大南灣層, 觀音山層, 林口 層鬆砂層)
開挖程序	 五階開挖(視需要)	 五階開挖(視需要)	 五階開挖(視需要)
輪進長度	1.2~1.5	1.0~1.2	0.8~1.0
鋼纖維噴凝土 (cm)	C、W&I：16 F&TI：8 (視需要)	C、W&I：20 F&TI：12 (視需要)	C、W&I：24 F&TI：12 (視需要)
桁型鋼支保 (H 型鋼支保)	桁型鋼支保 G125 @ 1.2~1.5 (H 型鋼支保 H125@1.2~1.5)	桁型鋼支保 G150 @ 1.0~1.2 (H 型鋼支保 H150@1.0~1.2)	桁型鋼支保 G200 @ 0.8~1.0 (H 型鋼支保 H200@0.8~1.0)
灌漿岩栓 (非預力)	C&W：φ=25mm，4m@2.0× 1.2~1.5	C&W：φ=25mm，4m@2.0× 1.0~1.2	C&W：φ=25mm，6m@2.0×0.8~1.0
預拱保護工	C：先撐鋼管，32mm φ，L=2~3m (視需要)	C：先撐鋼管，32mm φ， L=2~3m@0.3~0.5m×1.0~1.2m	C：先撐鋼管，32mm φ，L=2~3m@0.3~0.5m×0.8~1.0m
輔助工法 (視需要)	臨時仰拱閉合、開挖面噴凝土、固結灌漿(水泥漿液)、固結灌漿(容液型化學藥液)、上半斷面基腳加勁(基腳加勁岩栓、繫梁或鋼支保翼腳)、管幕鋼管		

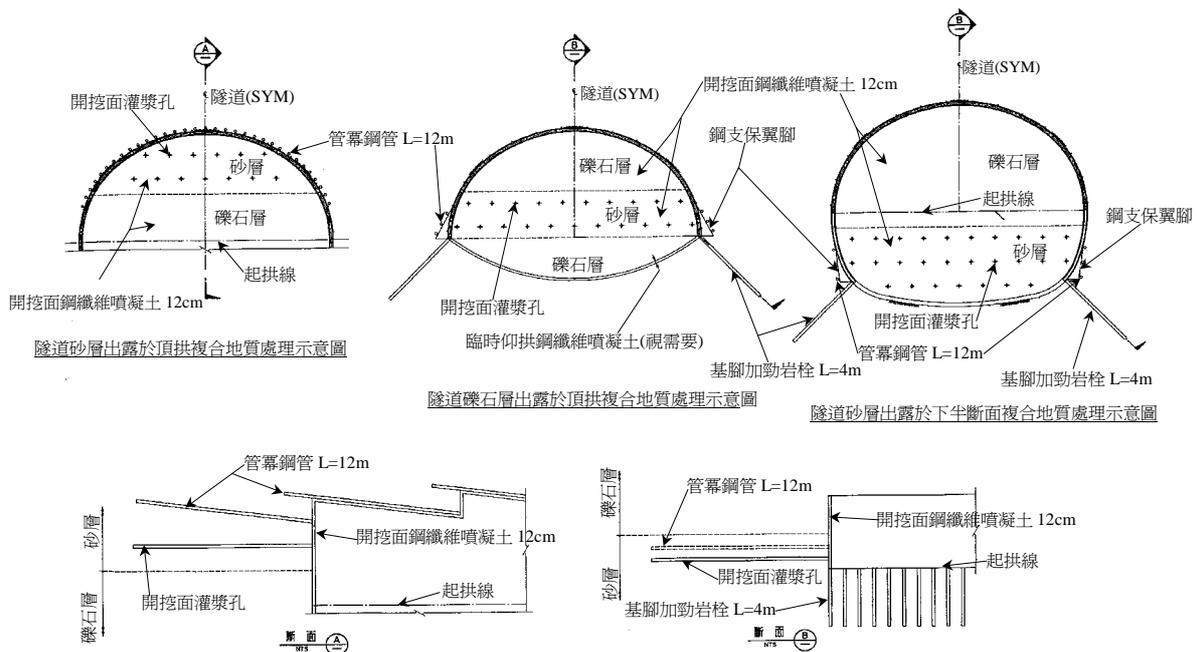
### (3) 地下水處理

由水位觀測井與水壓計觀測，推估隧道沿線地下水大致隨地形起伏而變化，除兩隧道洞口外，絕大部分路段均高於隧道高程。大南灣層無水時自立性尚可，遇水則易軟化。於林口層時，全段位於地下水位之下。

隧道通過林口層與大南灣層及林口層與觀音山層界面段時，可能存有兩側高低水壓，應進行開挖面前進探查，並進行必要之預排。

隧道於觀音山層時全段位於地下水位之下，由於岩質膠結差，具遇水時自立性急速降低之特性，需注意湧水及頂拱抽坍問題。

經評估決定以降壓排水為主，止水工法為輔以克服地下水問題。採用之輔助工法包括鑽設前進排水孔及環向排水孔，並視現地狀況併用水泥漿液、溶液型化學藥液、水泥皂土漿液或 L.W.漿液灌漿。



圖四、觀音山隧道複合斷面處理示意圖

(4) 複合地質斷面處理對策（參照圖四）

複合地質斷面係指上半斷面由兩種不同主要岩性組成之斷面，需視現地需要採用先撐工法、開挖面保護工法或鋼支保基腳加勁工法等輔助工法，以確保隧道穩定。各輔助工法之使用時機如表六。

A. 砂層出露於頂拱之處理對策

先將地下水預排至可施工之狀況，施作管幕鋼管以確保頂拱之穩定性，必要時可於開挖面施噴噴凝土，甚或於砂層出露部位鑽設灌漿管進行固結灌漿以強化地盤，提昇開挖面之自立性。

B. 礫石層出露於頂拱之處理對策

先預排地下水至可施工之狀況，並視現地狀況施作鋼支保翼腳或基腳加勁岩栓，必要時得於鋼支保基腳外側施作管幕鋼管加以保護，或施作上半臨時仰拱，將支撐系統閉合；此外為增加開挖面之自立性，可於開挖面施噴噴凝土，或於砂層出露部位鑽設灌漿管進行固結灌漿以強化地盤。

表六 觀音山隧道複合斷面輔助工法之使用時機

輔助工法		使用時機
先撐工法	管幕鋼管	適用於膠結程度不良、自立性較差之軟弱地盤，可視需要加以選用或併用之
	支撐鋼棒	
開挖面保護工法	噴凝土	開挖面自立性較差或有抽心顧慮時，配合先撐保護工視需要採用之
	岩栓	
鋼支保基腳加勁工法	鋼支保翼腳	適用於鋼支保腳附近地盤支承力不足，發生底部下陷與下陷引起的地盤鬆弛，而損及隧道的穩定時使用之
	上半臨時仰拱	
	基腳加勁岩栓	

## (二) 地下湧水

### 1. 地下水調查技術

由於第二階段興建雪山隧道過程遭遇湧水大幅影響開挖進度，另東部鐵路改善工程之新永春隧道亦因湧水而被迫改道，因此第三階段國道於隧道地質調查時特別重視湧水調查，實施包括：地質資料蒐集、地表地質調查、航照判釋、折射震測、鑽探、鑽孔透水試驗及岩石試驗、現地及室內試驗、地電阻影像法，及開挖過程進行的隧道內震波探測法等調查，以進一步掌握地質構造、岩層與土層特性及地下水分佈狀況，擬定適當對策。

### 2. 東部國道四號隧道地下水對策

國道蘇花段四號隧道附近因東部鐵路改善計畫之新永春隧道施工過程曾發生大量湧水事故，故自民國 87 年進行規劃起長達近 7 年之研究，將路線調整到新永春隧道東側（圖五），自原來的中央山脈山區外移至東澳嶺山區，

集水面積大為減小，並利用大自然屏障（即東猴椅山斷層帶形成東澳北溪支流之谷地地形導引地表水流及其斷層泥形成之不透水層區隔兩側地下水系）阻隔湧水之路徑。未來隧道開挖，僅於穿越局部儲水或具水包之大理石岩層方可能有地下水流出，大幅降低地下水危害程度，施工費用較低，施工工期預估可由 68 個月降至 53 個月，隧道長度由 5650 公尺縮短至 4245 公尺。

施工時除加強前進探查及導排必要時採用水泥系及符合 CNS 規定之 3 號水玻璃為主之藥液灌漿止水，內襯砌設置防水膜，可有效抑制地下水之入滲，對區域性之地下水脈影響有限。



圖五、東部國道四號隧道路線調整圖

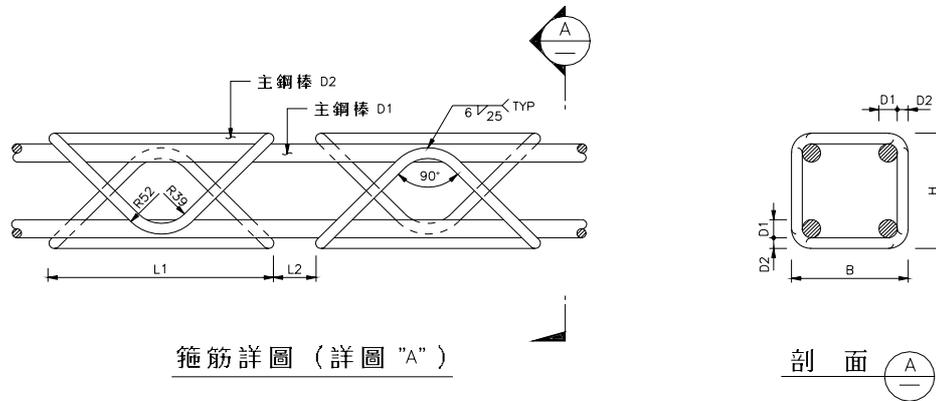
### (三) 支撐設計

隧道支撐設計之理念係運用噴凝土、岩釘、鋼支保等輔助隧道外週之岩體形成支撐拱圈，監測圍岩與支撐構件之應力應變狀況，以及時加強支撐系統。第三階段國道隧道支撐設計對張剛支保及噴凝土、岩釘等之採用將更具彈性，分別說明如下：

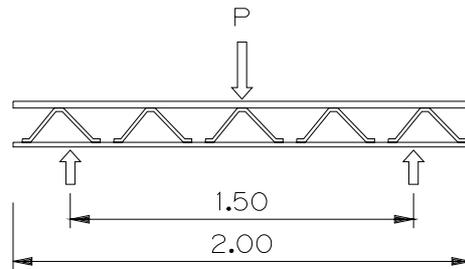
#### 1. 桁型支保

依使用需求將鋼支保分成 G 100、G 125、G 150 及 G 200 四種類型，桁型鋼支保（斷面示意如圖六）以主筋之極限承載力（ $P_u$ ）與極限塑性彎矩（ $M_p$ ）作為設計要件，另為確保設計斷面足夠，設計時須同時符合主筋與連接筋之最小單位長度重量規定。表六為桁型鋼支保之設計規格，其中  $P_u$  值與  $M_p$  值係取各類型支保相對應之 H 型鋼支保之  $P_u$  值與  $M_p$  值。桁型鋼支保與 H 型鋼支保之對照如表七所示。採用桁型鋼支保由於焊接品質十分重要，因而對桁型鋼支保需進行焊接點可靠性試驗（如圖七所示），以確認其製作品質符合要求。

承包商可依設計圖之規定，採用桁型鋼支保或 H 型鋼支保作為隧道支撐，同等級之桁型鋼支保或 H 型鋼支保均採相同之單價，並以相同之工作項目計價。



圖六、桁型鋼支保示意圖

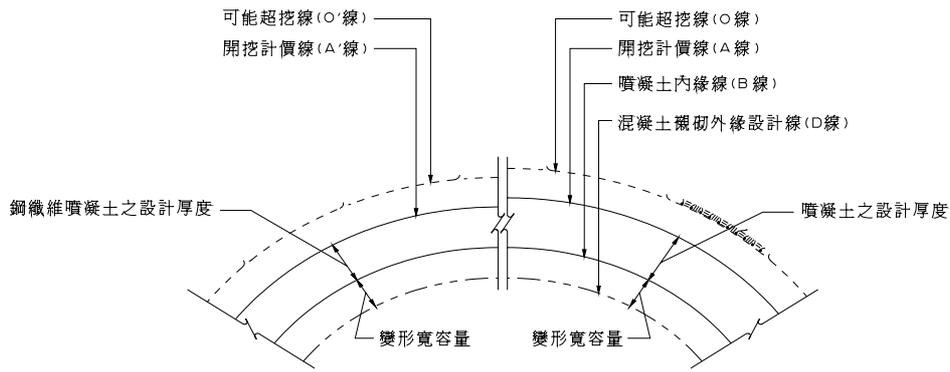


圖七、桁型鋼支保焊接點可靠性試驗示意圖

## 2. 鋼纖維噴凝土

鋼纖維噴凝土(Steel Fiber Reinforced Shotcrete，簡稱 SFRS)係將不連續且細短的鋼纖維加入噴凝土中，並將鋼纖維均勻散佈於噴凝土內，利用鋼纖維具備的高抗拉強度、高彈性模數及延展性，使噴凝土在承載外力時，增強其抗拉、抗龜裂的能力，以改善噴凝土易脆及低抗拉強度等兩項缺點。

第三階段隧道工程可以選用一般噴凝土及鋼線網之組合或直接採用鋼纖維噴凝土替代，其對應情形如圖八、表七所示。



圖八 鋼纖維噴凝土替代鋼線網噴凝土斷面示意圖

表七 鋼纖維噴凝土替代鋼線網噴凝土厚度對照表

噴凝土厚度(cm)	5	10	15	20	25	30
鋼線網層數	0	1	1	2	2	2
鋼纖維噴凝土厚度(cm)	4	8	12	16	20	24

### 3. 鋼線網替代鋼筋

隧道襯砌混凝土、天花板及其他隧道內結構所設計之鋼筋，均得以竹節鋼線網( $f_y=4,900\text{kgf/cm}^2$ )取代，惟須經工程司之同意，並不得增加費用及增加工期。鋼線網材質須符合 ASTM A497 及依規範第 03220 章規定辦理。竹節鋼線網之間距不得大於原設計鋼筋之間距。承包商須提送完整之結構計算書、施工計畫、施工詳圖及單價分析表等送工程司審核辦理。

## (四) 洞口設計

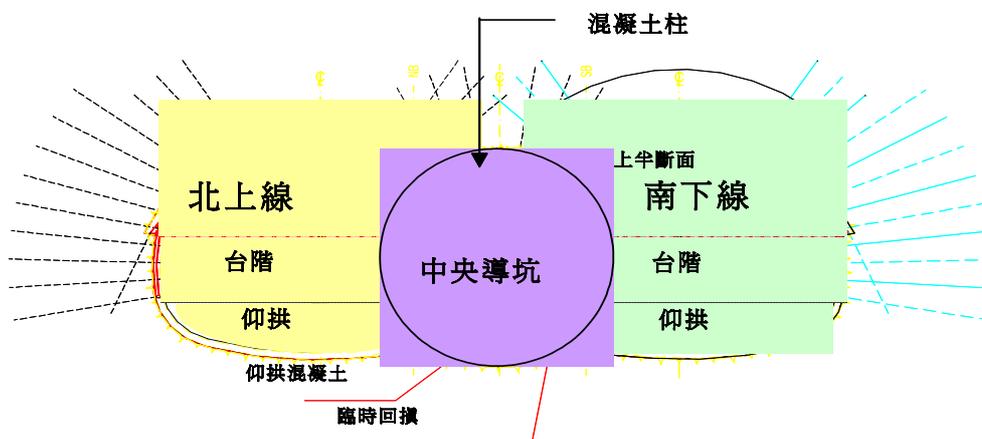
### 1. 近接隧道洞口施工

國道蘇花段一號隧道北洞口由於路線線形限制，且為減少洞口邊坡開挖造成生態環境破壞，使南下、北上雙向隧道於此區段須緊靠配置(兩隧道最接近之淨間距為 0.6 公尺)，此即俗稱眼鏡式隧道，如圖九所示。

施工時先開挖中央導坑，施作支撐柱，以強化偏壓之抵抗力後再進行單側隧道之進洞開挖，完成環體並加強基腳之穩定後進行另一側隧道開挖進洞工作。(如圖十所示)



圖九、眼鏡式隧道案例



圖十、東部國道一號隧道眼鏡式隧道開挖示意圖

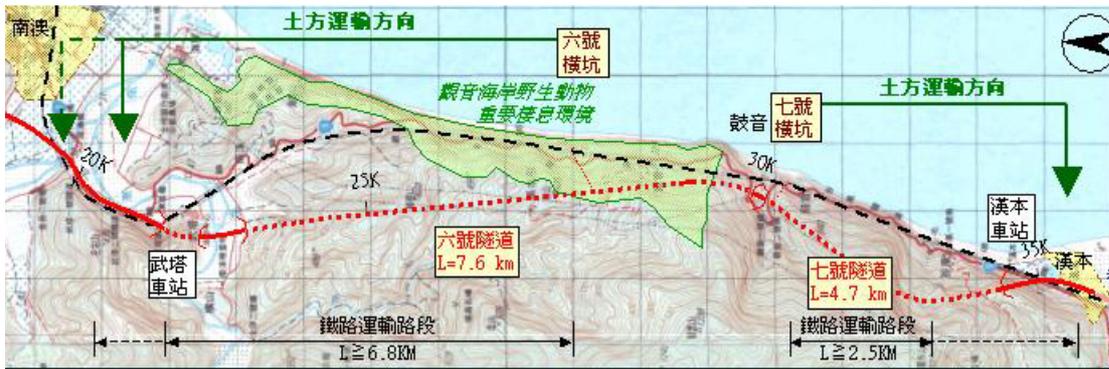
## 2. 落石評估與防治

東部國道及南投支線部分隧道洞口及邊坡有落石墜落之虞，經依石根華博士於 1988 年所發展之不連續變形分析法 (Discontinuous Deformation Analysis, DDA)，非常適合於不連續體領域之計算，如塊體運動、塊體旋轉及塊體間碰撞等，以落石分析成果為依據進行落石防護設計，包括：攔石台階、攔石溝、攔石柵、攔石網、攔石牆、假隧道等防護或阻隔方式。

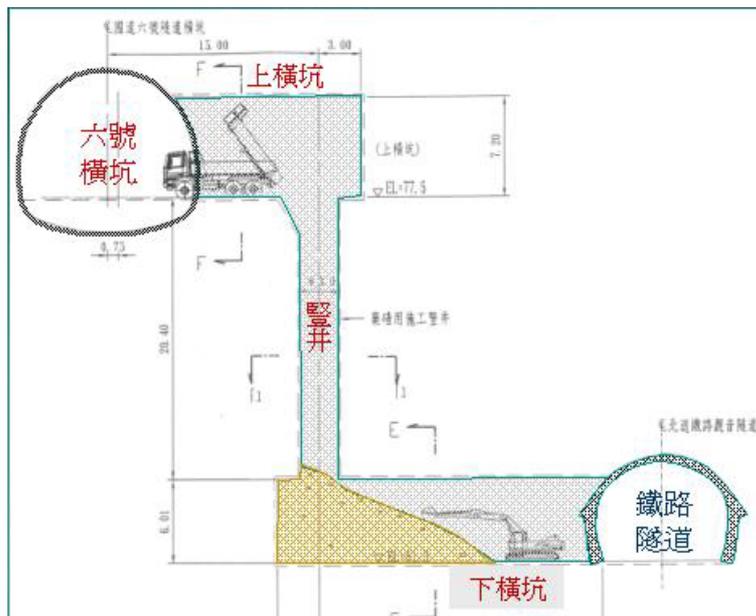
### (五) 環境維護

#### 1. 利用閒置鐵路運碴

為降低台九線交通量，東部國道之六、七號隧道考量採用台鐵武塔至南澳間舊北迴鐵路運碴，運輸方式示意如圖十一、十二所示，已洽得鐵路局同意。



圖十一、國道蘇花段六、七號隧道利用北迴舊線鐵路運碴示意圖（1）



圖十二、國道蘇花段六、七號隧道利用北迴舊線鐵路運碴示意圖（2）

## 2. 開挖碴料利用

東部國道八號及九號隧道沿線通過地層以大理岩為主，偶夾有片岩，局部路段將遭遇片麻岩。可作為路堤填築材料與級配料運用，並可作為混凝土骨材來源。

其餘隧道開挖碴料將作為路堤填築材料及隧道仰拱回填級配料之用。

## 3. 洞口景觀與壁面彩繪

隧道洞口儘量減少構造物量體，隧道機房依基地條件採內嵌於隧道內，外露部分則以植栽等予以綠美化，以環境協調為設計手段，環境融合為目標。

隧道壁面將設置適當之彩繪或以其他方式適度變化，以舒解通行長隧道的焦慮及倦怠感。

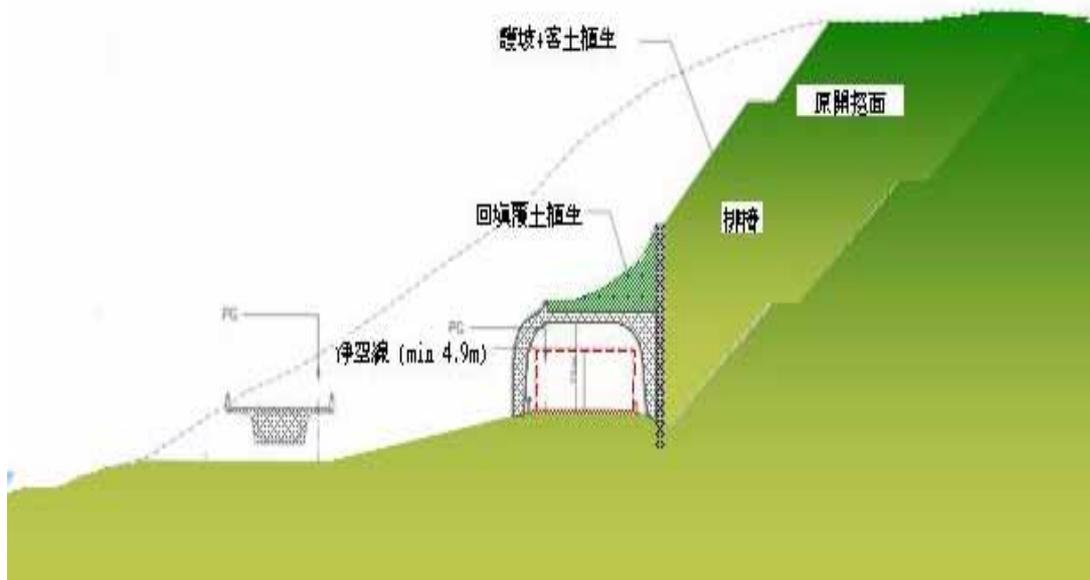
#### 4. 明隧道之利用

國道東部公路蘇澳和平段為減少土方開挖及避免大規模的開挖有三處原預定採多階開挖邊坡改採以部分修坡及加設明隧道方式通過（圖十三）。採用明隧道之地點分別為聖湖明隧道、東澳明隧道、東澳連絡道明隧道，計可減少土方開挖 13 萬方左右。

明隧道之施工步驟係先於山側坡腳處施築擋土排樁，並於其上施打預力鋼腱岩錨，待邊坡處理完成後再施作類似箱涵結構之明隧道，又考量照明與通風需求，明隧道以 RC 箱涵型式構築，底版上部側牆部份，於開挖側採為連續牆柱，而填方側則為鏤空牆柱，因此可以增加明隧道路段之景觀協調性（圖十四）。

#### 四、結語

第三階段等後續國道之隧道工程採用多向先進之設計理念及相關工法、材料，採用更彈性之合約執行方式，可因應地質狀況及時採用各種支撐設施及輔助之導水、止水強固設施，預期應可順利克服地質困難，融合環境景觀，提供高水準之隧道設施。



圖十三、明隧道之施工步驟



圖十四、明隧道路段之景觀協調性