

# 大地工程發展史

## 山岳隧道～鐵路篇 (下)

李佳翰\*

承167期(山岳隧道～鐵路篇(中))

### 五、21世紀鐵路隧道

#### 5.1 東部鐵路改善計畫

北迴雙軌工程計畫自蘇澳新站至花蓮新站全長約80km，其主要工作內容包含：1. 土木工程：車站改善12站、大橋18座全長約5.5km、隧道13座全長為33.9km，如圖三十三所示，其餘為路基、橋涵；2. 軌道工程；3. 電務工程。計畫經費約為307億元，為整個「東改計畫」最關鍵之區段，而其中又以隧道之施工為北迴雙線通車之關鍵工程。本計畫自1991年7月開始籌劃先期作業，1992年12月正式開工，2004年12月全部完成(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2005)。

##### 5.1.1 隧道施工方法

地質情況之不同影響開挖及鑽孔機具之選擇，基於北迴與南迴鐵路當年隧道施工累積之經驗及所蒐集之地質調查資料始決定採用鑽炸工法或機械開挖工法，詳見表九(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2005)。

1. 機械開挖—新蘇澳一、二、三、四號及新東澳隧道：大多鄰近舊線且覆蓋層較淺、地質破碎，決定採機械開挖配合新奧工法支撐系統，以增加施工之安全性。

2. 鑽炸工法—新永春、新南澳、新武塔、新觀音(鑽炸與機械開挖併用)、新和平、新和仁、新清水、新崇德等隧道：均採鑽炸施工，以全斷面或上半先進工法，再配合特殊處理及輔助工法俾提高隧道施工安全。

##### 5.1.2 工程特色

1. 洞口設計配合地貌減少明挖施工段：根據南、北迴鐵路隧道洞口施工經驗，常因地



圖三十三 北迴鐵路雙軌化主要工程示意圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2005)

形、地質之條件惡劣與洞口明挖段施工，而造成洞門鄰近邊坡發生坡面崩壞或坍塌，使施工進洞困難，甚或花費大量時間與經費以處理邊坡保護，有鑑於此，在北迴雙線隧道選線時即儘量選擇地質較佳區段，以與坡面直交方式進入，並於洞門設計時往外延伸增加隧道長度，以減少或避免開挖已趨穩定之邊坡坡腳，並以支撐及地質改良等保護措施，後期更以水平管幕工法進洞，以避免破壞地形，期能節省邊坡整治保護費用。

2. 依岩體分類訂定超挖、多餘襯砌及超噴噴凝土厚度：由於不同等級之岩盤其開挖輪進不同，造成無可避免超挖之範圍亦不相同，東改計畫後期設計之隧道工程即針對超挖、超襯、超噴之厚度，依岩體分類等級分別訂定，亦即無可避免之超挖厚度需另以額外之襯砌與超噴噴凝土

\* 聯合大地工程顧問股份有限公司

表九 北迴鐵路雙軌化工程隧道工法一覽表(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2005)

項次	北迴線舊有隧道		原規曲		新規劃隧道		施工方法
	名稱	長度(m)	名稱	長度(m)	名稱	長度(m)	
1	—	—	—	—	蘇澳一號	180	均採機械開挖配合 新澳工法支撐系統
	蘇澳一號	199	蘇澳一號	260	蘇澳二號	729	
2	蘇澳二號	113	蘇澳二號	115	蘇澳三號	330	
3	蘇澳三號	206	蘇澳三號	200			
4	蘇澳四號	239			蘇澳四號	255	
5	永春	4020	新永春	4010	新永春	1460	鑽炸工法 NATM全斷面工法
6	東澳	167	新東澳	180	新東澳 (雙股三線)	155	機械開挖 NATM上半先進工法
7	南澳	5286	新南澳	5250	新南澳	5340	NATM鑽炸全斷面開挖
8	武塔一號	345			新武塔 (雙線)	1620	NATM鑽炸施工
9	武塔二號	185					
10	觀音	7740	新觀音	7808	新觀音(雙線) 北橫坑 南橫坑	10307	NATM鑽炸施工上半先進或全 斷面開挖，配合管幕與垂直線地 等輔助工法，配合南北二座橫坑 以增加開挖工作面
11	鼓音	401	新谷風	2445		378	
12	谷風	1959				409	
13	和平	2970	新和平	2947	新和平(雙線)	3095	NATM鑽炸全斷面工法
14	和仁	2411	新和仁	2411	新和仁	2532	
15	清水	2106	新清水	2156	新清水	2210	
16	崇德	2682	新崇德一號	2682	新崇德	2687.69	
17			新崇德二號	350			
合計	單線:30,950M		單線:30,814M		單線:18,728M 雙線:15,209.5M 合計:33,937.5M		

填補，並給予計價，祈使施工廠商因可依各類地質檢測變形成果，確實辦理檢討回饋而調整改進其開挖技術，以減少超挖，進而提昇爆破技術，獲取最大之經濟利益，對隧道之施工品質提昇及降低施工成本均有大幅助益。

3. 應用隧道內震波探測法TSP：由於規劃設計階段無法有效取得完整確實的地質資料，為期儘早瞭解開挖面後方之地質情況及可能遭遇之地質問題，特別於隧道預算內編列有隧道內震波探測法(tunnel seismic prediction, TSP, 圖三十四(a))工作項目，並佐以前進探查孔及水文試驗期能預為採取適當對策因應，確保隧道開挖之順利進行，以減少因地質條件變化未能掌握機先而引發之施工中災害。

4. 使用隧道斷面收方儀使斷面收方自動化：隧道施工採用鑽炸工法，開挖後必須進行斷面收方，以了解隧道開炸情況，是否有超挖或有內空斷面不足之現象，作為下一環開炸佈孔之參考及計價之依據。東改局為了施工管理便利與提昇施工品質及配合國內隧道自動化趨勢，率先購置一部Profiler 4000斷面收方儀附掛於原有之DIOR 3002S光波測距儀上，組成隧道斷面自動收方儀。故有效運用收方技

術，作為改善開炸施工之品質，不但可節省超挖所需之填補成本，並可縮短開挖之循環時間，對於縮短工期相當有助益。

5. 地質軟弱段採用水平管幕工法：水平管幕工法(圖三十四(b))係於隧道洞口或隧道內於遭遇堆積層、剪裂帶或斷層破碎帶等，無法以正常開挖方法通過時或於施工中地質調查預測可能遭遇上述之地質情況時，以管幕鋼管群作為前進開挖面頂拱水平支撐保護之支撐材料，其施工方式係沿頂拱線外側以水平管幕鑽孔機具，鑽設一系列規則間距之鑽孔後插入鋼管再施予灌漿，以填充孔隙，使其在開挖線外形成一保護層，使頂拱開挖面因加勁補強後趨於穩定，然後才進行開挖工作，每次輪進12m，開挖9m，比傳統開挖縮短輪進距離或縮小開挖斷面分段開挖鑽灌之效率快，且擾動地層最小，其工法特性屬「先保護後開挖」之作用，除可有效維持開挖面穩定，亦可保障施工人員與機具之安全。

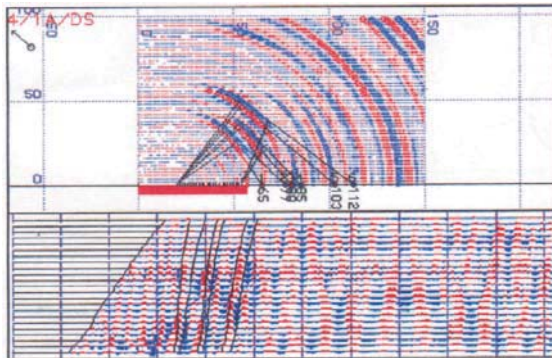
由於新觀音隧道北口屬滑動地層，隧道軸線與坡面成斜交之斜交型坡面，其通過地質全為堆積層且覆蓋層厚度約僅20~60m，頂拱薄弱、造成拱作用應力差，週邊並有滑動帶及偏

壓，在洞口設計及工法選擇時即審慎考量於施工性、可靠性均最有效之水平管幕輔助工法，而在施工階段承商更採用義大利產製之隧道管幕專屬機PG-125施作，其成效非常良好，將可提供爾後工法選擇之借鏡，目前此工法已陸續在其他隧道設計時被推廣採用。

6. 以垂直縫地工法補強洞口淺覆蓋層：垂直縫地工法(圖三十四(c))乃為隧道開挖前，從隧道上部地表鑽一系統佈設之鑽孔，該孔內埋設鋼管並填充水泥漿，藉這些在地中不同長度之棒狀鋼管補強材料，改善岩盤之剪力強度，以阻止隧道開挖可能引起之洞口近邊坡之崩坍及滑動。

新觀音隧道南洞口位置上側緊鄰蘇花公路，下側則與既有北迴鐵路平行且經研判為一廣大之滑動地形，其地質則為崩積層及未固結之河床礫石構成。若隧道開挖時無法有效控制地層滑動，將影響現有鐵公路交通至鉅。為此於規劃設計時除深入了解地形與地質外並研討有效應付地層滑動等對策工法，最後決定採用垂直縫地工法並輔以監測工作作為輔助工法，經施作後已順利安全通過此特殊地質與地形區段。

7. 洞門配合地貌向外延伸：洞口選擇常因選線關係無法位於地質較佳區段而位在不安定地盤，且於洞內施作時易影響鄰近邊坡之穩定性，造成進洞工作面之延誤而影響工進，



(a) TSP



(b) 管幕工法



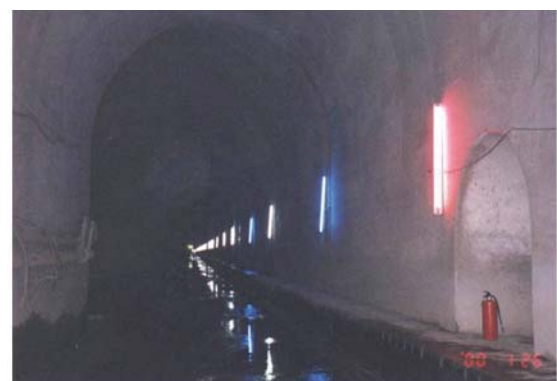
(c) 垂直縫地工法



(d) 熱瀝青灌漿



(e) 鋼纖維噴凝土



(f) 顏色辨別

圖三十四 北迴鐵路雙軌化工程各項特色示意圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2005)

經配合地貌將洞口往外延伸，減少或避免開挖坡腳，再配合加勁土回填覆蓋植生之方式設計，各隧道之進洞施工均尚稱順利，免除了邊坡整治保護之困擾並可滿足洞口景觀、水土保持及綠化之要求。

8. 引進熱瀝青灌漿工法突破高壓湧水區段：新永春隧道南口工作面，於1998年10月發生巨量湧水崩塌災變，湧水量曾高達 $80\text{m}^3/\text{min}$ ，累積崩塌土石 $22,000\text{m}^3$ 且持續湧水不斷，水量仍持續維持 $25\sim 30\text{m}^3/\text{min}$ 流量，實為國內外隧道工程罕見之災害案例。根據後續補充地質調查之長距離水平鑽探顯示湧水區段主要位於大理岩層，寬度自西側之70m向東側逐漸縮減並分為兩段，分別為15m與25m，此湧水帶具有高水量(最大約 $80\text{m}^3/\text{min}$ )與高水壓(最大約 $50\text{ kg/cm}^2$ )之特性。而突破高壓湧水區段之輔助工法乃採排水隧道排水與灌漿阻水同時併行。首先鑽設大口徑排水管洩降隧道20m外之水壓，配合排水隧道排水，輔以熱瀝青灌漿(圖三十四(d))於隧道近處(15m範圍內)，有效阻隔地下水，提供開挖施工的基本條件。於開挖時以「遠排近灌」、「先撐後挖」、「隨挖隨襯」之理念，再考量相關處理措施，而終能於開挖施工時順利突破。此案例為熱瀝青灌漿工法於國內首度引用在交通隧道施工中遭遇巨量湧水之成功處理案例。

9. 襯砌採垂直泵澆置：以往南迴及東改初期隧道襯砌，廠商仍依循傳統工法施工方式採水平施灌，造成頂拱襯砌厚度不足或採補灌混凝土，經於「隧道施工規範」要求襯砌混凝土以採由下往上垂直泵澆置，除使兩邊側壁混凝土均以同速升高，避免鋼模移動或變形外，襯砌工作因無封板及收管問題，頂拱襯砌厚度已無不足現象，成效堪稱良好。

10. 應用鋼纖維噴凝土：考量國內承商一般作業能力，原設計支撐除列有一般噴凝土及鋼線網項目外，為提昇隧道施工水準，於合約工作項目中另編列有鋼纖維噴凝土之項目，俾利承商因應機具能力及意願後選擇採用。如新南澳隧道承商採行濕式噴凝土技術熟練後，採行鋼纖維噴凝土(圖三十四(e))施作，每一工作循環時間可節省1-2小時，對隧道開挖進度助益甚鉅。

11. 棄渣之利用：為有效利用開挖渣料資

源，避免造成污染，於規劃時配合隧道施工時程回填於就近之路基及站場，多餘渣料經多方覓尋於隧道群中央地段即南澳地區設置棄渣場，經與水利單位協調配合南澳地區水道治理計畫於台九線138k+000~500側澳尾溪之間由東改局提供堤防構造經費，完成後之低窪地則提供工程渣料回填，完工後將產生新生地，可謂雙贏策略。

12. 橫向連絡坑：針對新和仁、新南澳隧道之單線長大隧道且緊鄰舊線隧道，基於目前舊隧道內通風品質極為不佳、廢氣充斥，影響工作人員健康，且為考量於北迴雙線完成後之維修、通風及避難等需求，於新舊線間每600~800m設置連絡坑一處，除平時對隧道內空氣品質改善大有助益外，相信爾後對隧道內發生意外緊急事故，亦能發揮疏散及搶救逃生之功能。

13. 新線施工時於鄰近之舊隧道設置監測系統以確保安全：北迴雙線隧道路線因受既有站場位置及線形因素之限制，新永春、新南澳隧道北口、新蘇澳五號隧道南口等相鄰舊隧道僅十數公尺，為避免因新隧道施工，影響原有隧道安全，而造成交通災害發生，特別委請專業顧問公司於舊隧道內，設計安裝自動監測及警報系統，銜接於兩端車站期能適時提出預警以維護大眾行車安全。

14. 隧道內照明以顏色區別其功能：在隧道施工時之照明以不同顏色日光燈來區別其功能(圖三十四(f))，例如在新南澳隧道因屬單線隧道斷面小，故於大型避車洞兩端採用綠色日光燈，以利施工車輛司機提前確認可供錯車位置，以減少錯車等候時間之浪費；另於每間隔200m，採用紅色日光燈，使施工人員了解於該處有消防及急救設備，以備不時之需，其餘一般處所照明則仍採用白色。本項創意於後續之長大隧道施工均已陸續採用。

## 5.2 花東線鐵路雙軌化計畫

花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫，該計畫期程由2009年3月至2018年7月竣工。全部工程經費為新臺幣254.29億元，範圍始於花蓮車站，止於知本車站，全長162.4km。計畫內容包含：1. 全線電氣化162.4km，4處

瓶頸路段雙軌化及曲線改善工程；2. 新建雙軌隧道4座(包括新溪口隧道、新光復隧道、新自強隧道、新山里隧道，詳表十)，橋梁改建3座，站場軌道改善；3. 關山及月美路段截彎取直與曲線路段改善，如圖三十五所示(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)。

### 5.2.1 新自強隧道

1. 基本資料：新自強隧道總長約2,667m，位於舊自強隧道西側，為單孔雙向隧道。隧道沿線岩盤屬中央山脈變質岩，以黑色片岩及綠色片岩為主。岩層自北往南有覆蓋層、崙山層板岩、舞鶴礫岩、崙山層板岩、古崩積層(沉泥層)、玉里層片岩等，詳見圖三十六，地質狀況多變複雜。

鑽掘段隧道標準斷面為三心圓雙軌隧道(圖三十七)，開挖斷面積為99~106m<sup>2</sup>，襯砌厚度為30~45cm，配防裂鋼筋。開挖支撐則依據岩體性質、地下水、地質構造、大地應力、斷層破碎帶、覆土厚度、計測結果及其他岩體行為等因素，及岩體類別予以評定各類型岩體開挖及支撐型式(表十一)(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)。

#### 2. 沉泥段

(1) 遭遇之困難：新自強隧道自2010年1月開工後，在一般地質區段隧道開挖進度順利，曾有一個月開挖100m之紀錄，惟於2011年4月進入沉泥層後，隧道變形增大，而隧道開挖面亦因流泥湧入發生抽坍情事，2011年6月隧道曾發生高達150cm之擠壓變形(圖三十八)，使開挖完成之隧道完全損壞，另於2011年7月因抽坍導致隧道上方地表沉陷，雖經修挖仍再度擠壓變形，開挖作業嚴重受阻。

新自強隧道於遭遇沉泥段後，即嘗試以多項輔助工法進行補強，惟成果有限，無法有效



圖三十五 花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫主要工程示意圖(交通部鐵道局，2019)

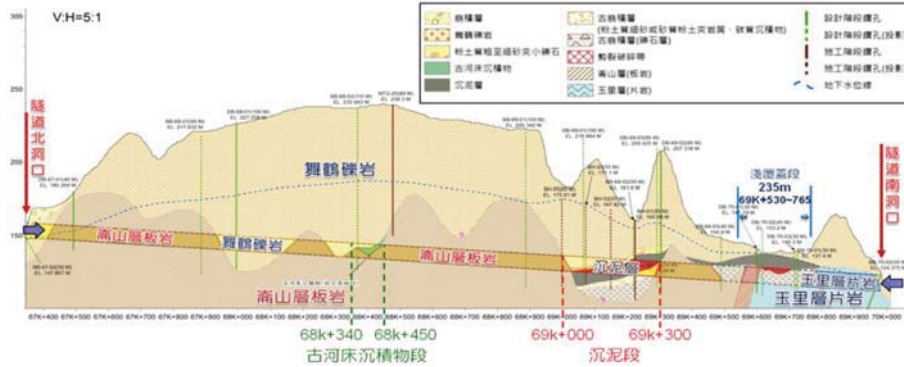
控制抽坍、擠壓變形、噴凝土受壓破裂等狀況。探究其原因在於，新自強隧道之上半斷面開挖寬約12m，高約6m，開挖支撐作業之輪進時間較長。而所遭遇之沉泥層最厚達10~12m，沉泥層為單壓強度低，遇水弱化明顯之高敏感性細顆粒黏性土壤，其受開挖解壓及擾動影響所生裂紋易使地下水侵入而弱化，甚至變成泥漿流失，弱化後之沉泥亦使得隧道周圍之鬆動區域擴大導致無法形成拱效應，致使支撐承受過大應力，進而導致開挖面附近產生擠壓、鏡面擠出，並伴隨發生噴凝土開裂、支保腳沉陷、鋼支保挫屈等狀況(圖三十八)。

#### (2) 因應對策

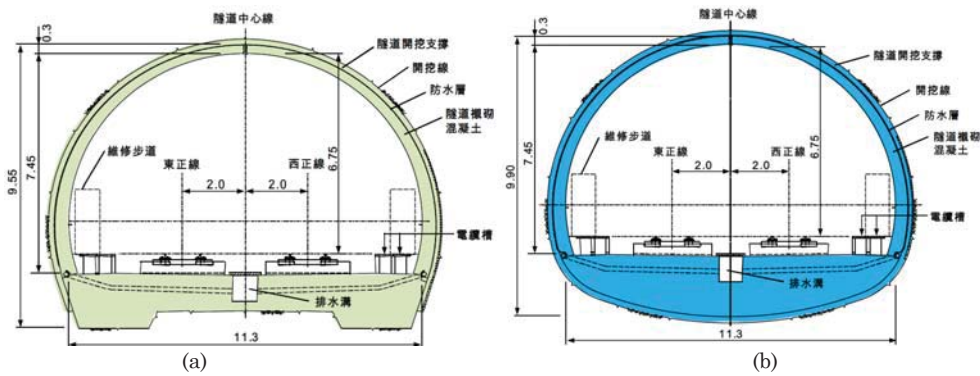
(a) 中導坑工法：為增加隧道穩定性，

表十 花東鐵路雙軌化工程隧道一覽表(薛，2014)

隧道名稱	隧道開挖方式	說明	設計長度(m)
新溪口隧道	明挖覆蓋為主，局部鑽掘	過河隧道，穿越壽豐溪	3,780(含出土段640)
新光復隧道	明挖覆蓋為主，局部鑽掘	過河隧道，穿越馬太鞍溪	2,560(含出土段220)
新自強隧道	鑽掘為主	山岳隧道，位於舞鶴台地	2,667
新山里隧道	鑽掘為主，局部明挖覆蓋	山岳隧道，卑南溪右岸坡地	5,300



圖三十六 新自強隧道地質剖面圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)



圖三十七 新自強隧道標準斷面圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)

表十一 新自強隧道開挖支撐表(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)

支撐等級	I	II	III	IV	V
岩體級別	A <sub>n</sub> (崙山層/玉里層)	A <sub>n</sub> (崙山層/玉里層) D <sub>n</sub> (舞鶴礫岩)	A <sub>n</sub> (崙山層/玉里層) D <sub>n</sub> (舞鶴礫岩)	A <sub>n</sub> (崙山層/玉里層)	C <sub>m</sub> (沉泥層)
開挖程序	 四階開挖(視需要)	 四階開挖(視需要)	 四階開挖(視需要)	 四階開挖(視需要)	 四階開挖(視需要)
輪進長度(m)	1.5~2.0	1.2~1.5	1.0~1.2	0.8~1.2	0.8~1.2
鋼纖維噴凝土 (cm)	C&W : 12	C, W & I : 16 F & TI : 8(視需要)	C, W & I : 16 F & TI : 8(視需要)	C, W & I : 20 F & I : 12(視需要)	C, W & I : 24 F & I : 12(視需要)
桁型鋼支撐	G100@1.5~2.0	G125@1.2~1.5	G125@1.0~1.2	G150@0.8~1.2	2-G150@0.8~1.2
H型鋼支撐	H100@1.5~2.0	H125@1.2~1.5	H125@1.0~1.2	H150@0.8~1.2	2H150@0.8~1.2
岩 栓	灌漿岩栓 C&W : φ=25mm 4m@1.5~2.0x1.5~2.0	灌漿岩栓(A岩類)或 自鑽式岩栓(D岩類) C&W : φ=25mm 4m@1.5~2.0x1.2~1.5	灌漿岩栓(A岩類)或 自鑽式岩栓(D岩類) C : φ=25mm 4m@1.5~2.0x1.0~1.2 W : φ=25mm 6m@1.5~2.0x1.0~1.2	灌漿岩栓 C : φ=25mm 4m@1.0~1.5x0.8~1.2 W : φ=25mm 6m@1.0~1.5x0.8~1.2	—
預拱保護工	—	C: 先撐鋼管, 32mmφ, L=2~3m(視需要)	C: 先撐鋼管, 32mmφ, L=2~3m @0.3~0.5m x 1.0~1.2m	C: 先撐鋼管, 32mmφ, L=2~3m @0.3~0.5m x 0.8~1.2m	C: 先撐鋼管(或鋼矢板) 32mmφ, L=2~3m @0.3~0.5m x 0.8~1.2m
輔助工法 (視需要)	• 保留土心 • 臨時仰拱閉合 • 短台階開挖工法	• 側導坑開挖工法(GT-8086) • 地下水處理(GT-8096, 8097) • 鋼支撐基腳加勁(GT-8099)	• 地質改良(GT-8095) • 聚胺酯灌漿先撐工法(GT-8100) • 管幕開挖工法(GT8098)	• 地質改良(GT-8095) • 聚胺酯灌漿先撐工法(GT-8100) • 管幕開挖工法(GT8098)	• 地質改良(GT-8095) • 聚胺酯灌漿先撐工法(GT-8100) • 管幕開挖工法(GT8098)

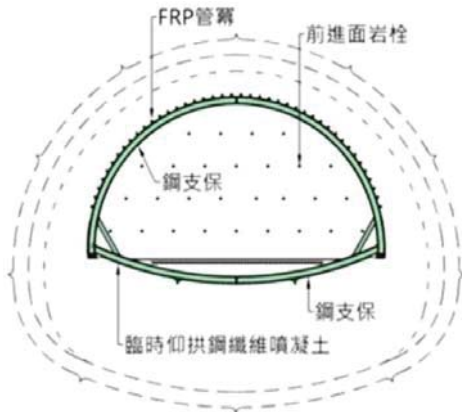


圖三十八 新自強隧道沉泥層區頂拱大量變形及遭遇困難示意圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)

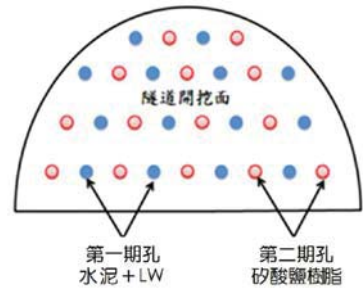
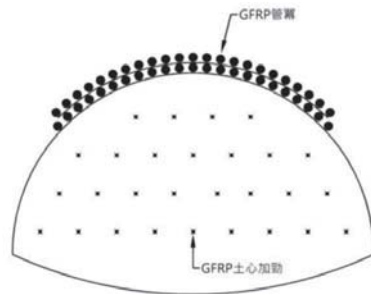
新自強隧道以較小開挖斷面之中導坑工法先進施工(圖三十九), 取代原先之上半斷面或側導坑開挖, 主要考量:(1)避免大斷面開挖抽坍;(2)容許變形先期發生;(3)進行前進地質探查;(4)增加主隧道施工穩定性;(5)兼顧施工性。

(b) 開挖面預加固: 沉泥層之自立性甚

差, 在開挖支撐作業未完成前, 隧道開挖面已產生大量擠壓變形。為增加開挖面之穩定性, 國內首度於新自強隧道之前進開挖面及下半斷面系統性打設易切削之玻璃纖維灌漿管, 並配合灌注矽酸鹽樹脂及LW等複合式漿材進行地質改良作業(圖四十)。

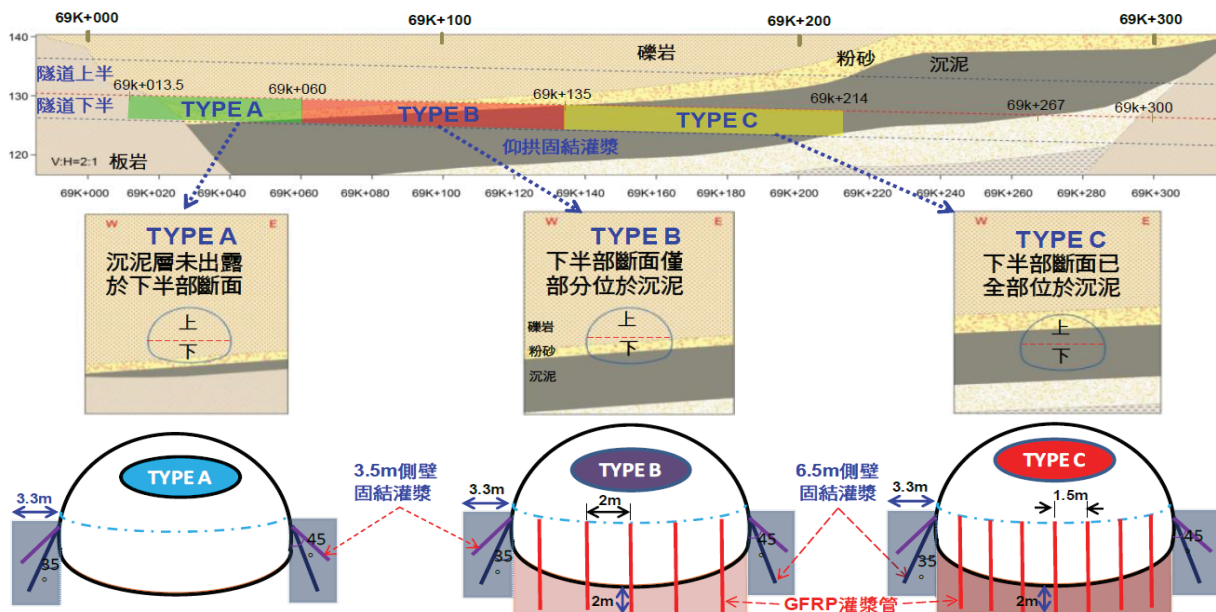


圖三十九 新自強隧道沉泥層中導坑工法(交通部鐵路改建工程局東部工程處, 2018)



(a) 前進開挖面預加固工法

(b) 地盤改良作業分期鑽灌示意圖



(c) 下半斷面預加固模式

圖四十 新自強隧道開挖面預加固工法(交通部鐵路改建工程局東部工程處, 2018)

(c) 短台階工法：國內首度於新自強隧道系統性採用短台階降挖工法，亦即於下半斷面每輪台階開挖後，迅速進行永久仰拱支撐工閉合，台階開挖面與仰拱閉合相距僅1~2m (圖四十一)，有效減少沉泥段沉陷變形量，大幅提高惡劣地質降挖安全性。

(d) 複合式漿材地盤改良：為減少隧道滲水、改善沉泥層自立強度及固結隧道周圍地層，進而形成支撐拱效應，新自強隧道廣泛使用灌漿輔助工法進行地盤改良，包括地表改良灌漿、隧道內固結灌漿、止水灌漿及開挖面預加固等。其中，在灌漿材之選擇方面，大致可分為三階段(圖四十二)：(1)第一階段：配合台階工法採水泥系漿材進行地盤改良；(2)第二階段：改採聚胺酯樹脂PU漿材進行地盤改良；(3)第三階段：採複合式漿材灌注進行地盤改良，亦即以水泥系及化學藥液(矽酸鈉、矽酸鹽樹脂等)互相搭配使用。

(e) 其它輔助工法：為提昇隧道開挖之穩定性，新自強隧道尚採行多項補助工法，包括地表地盤改良、錐霧固結灌漿、雙層先撐管幕(圖四十(a))、臨時仰拱閉合(圖四十三(a))與側壁補強鋼管(圖四十三(b))等。

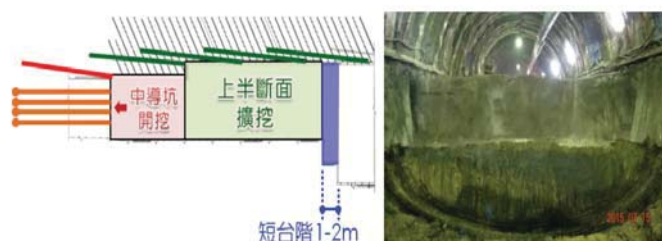
(f) 襯砌結構配筋檢討：為確保新自強隧

道沉泥層段結構之長期穩定性，襯砌結構配筋亦配合檢討修正。

### 5.2.2 新山里隧道

新山里隧道工程全長5,300m，為計畫內最長隧道。隧道沿線除洞口及淺覆蓋段，地質屬第四紀卑南山礫岩，以厚層礫岩層為主。隧道為一雙軌鐵路隧道，位於舊山里隧道群西側平行佈置，新、舊線隧道中心線間距約30~40m。隧道段東側緊鄰卑南溪河床，故於卑南溪西岸高灘地闢建施工便道，增闢工作面(許等人，2018)。

1. 隧道地質：山里隧道沿線所經之卑南山礫岩(圖四十四)主要由來自臺東縱谷西邊中央山脈變質岩區膠結不佳的礫石及砂、泥組成，礫石材料主要為變質砂岩、石英片岩、結晶石灰岩、變質基性火成岩等，岩體常夾有裂隙，滲透係數k值較大(透水試驗結果k值約 $1.1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ )，含水量高時易軟化。依行政院公共工程委員會「台灣地區隧道岩體分類系統(PCCR)」，隧道沿線屬D I至D III岩類。卑南山礫岩層位於利吉層上方，並受卑南山斷層與花東縱谷斷層影響，岩層中存在較多剪裂面，致使礫岩層原已膠結部份受到擾動而多鬆散，開挖時易掉落。



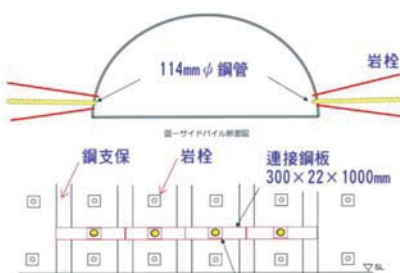
圖四十一 新自強隧道短台階開挖及仰拱閉合(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)



圖四十二 新自強隧道沉泥層區段工法演進圖(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)



(a) 臨時仰拱閉合

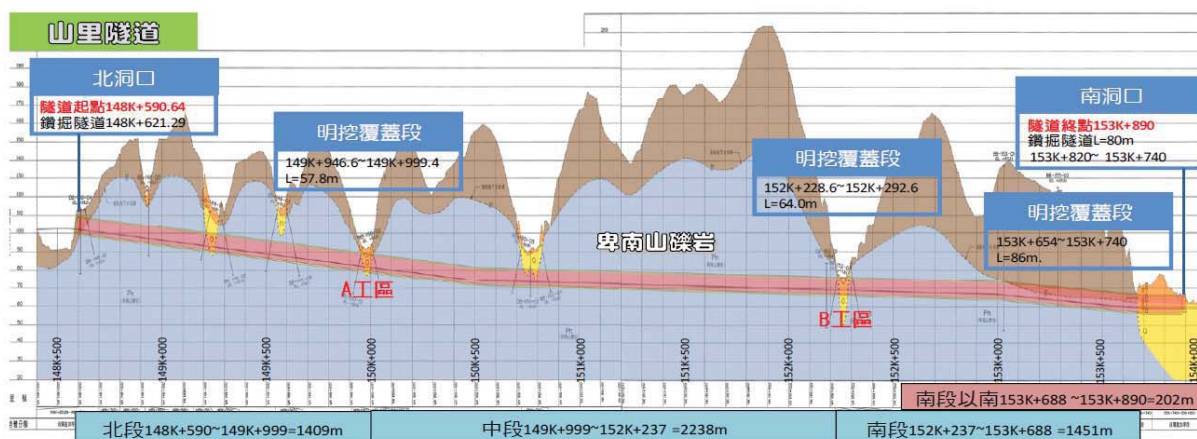


(b) 側壁補強鋼管

圖四十三 新自強隧道輔助工法(交通部鐵路改建工程局東部工程處，2018)







圖四十四 新山里隧道縱斷面圖(許等人, 2018)

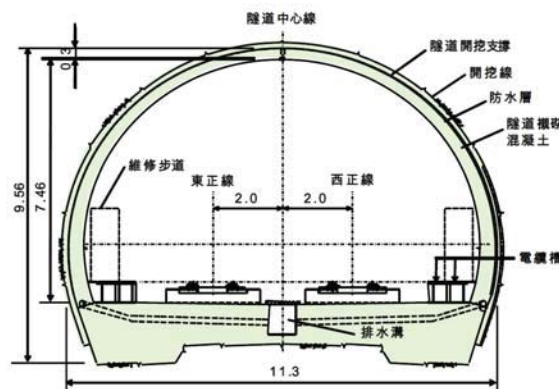
表十二 新山里隧道開挖支撐表(吳, 2014)

岩體類別		分類標準	支撐等級	變形寬容量(cm)
D岩類 卑南山礫岩	D <sub>I</sub>	膠結程度極佳(需以地質鎚用力敲方能將塊石或礫石敲落)	I	10
	D <sub>II</sub>	膠結程度良好或尚可(需以地質鎚方能將塊石或礫石敲落)	II	15
	D <sub>III</sub>	膠結程度不佳或疏鬆(以手即可將塊石或礫石剝落)	III	25
其他	E	淺覆蓋加厚段	IV	

2. 隧道設計：隧道開挖支撐系統採用新奧工法(NATM)之設計與施工理念，隧道沿線岩體區分為D<sub>I</sub>、D<sub>II</sub>及D<sub>III</sub>三類，並擬定對應之開挖支撐系統(表十二)。設計階段亦將鋼纖維噴凝土、桁型鋼支保等快捷工法納入隧道標準開挖支撐，以提昇隧道施工效率。山里隧道原規劃開闢南、北兩個開挖面，而為減少洞口開挖規模及擾動邊坡，南、北洞口採直接進洞方式開挖，並搭配管幕工法(AGF)等輔助工法先撐後挖方式分階施工。

早期台鐵雙軌隧道之淨寬約8.14m，再於兩側設避車洞，然避車洞壁龕應力集中不利施工開挖，且施作防水膜較易失敗，故山里隧道設計時不設置避車洞，改於兩側電纜槽上方增加維修步道，除有利於整體結構安全與隧道施工外，亦可保護隧道內之電車線、電訊與號誌行車設備，增加行車安全。隧道襯砌結構採排水隧道設計，斷面配合開挖型式分為無仰拱及有仰拱等兩種，頂拱襯砌厚度0.3m(圖四十五)。隧道斷面防水設計為隧道頂拱及側壁鋪設防水層，防水層底部設置縱向盲溝收集隧道外地下水。

3. 施工方式：針對隧道過河段A、B工區，兩處野溪上游地勢陡峭，每遇暴雨時洪流迅速宣洩並挾帶大量土石，為確保該區段於汛期之施工安全並提高施工效率，採用上半明挖

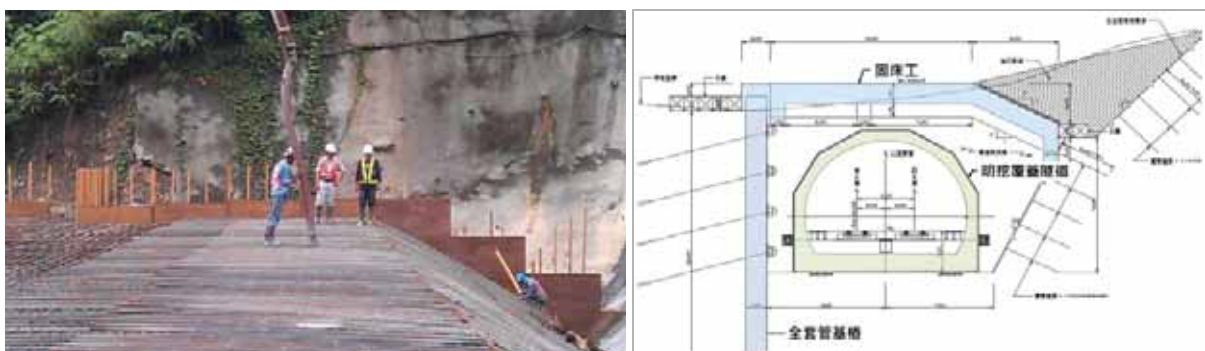


圖四十五 新山里隧道標準斷面圖(許等人, 2018)

下半鑽掘之頂蓋工法(圖四十六)進行半半施工。考量過河段A、B工區之隧道覆蓋較淺，且受土石流潛勢威脅，故於該區段之隧道上方新建3處固床工(圖四十七)及攔砂壩工程，其中固床工下方以全套管基樁保護隧道結構，減少淺覆蓋處之沖刷，使行車更加安全。在隧道工法方面，為減少隧道開挖對鄰近地層及舊山里隧道之擾動，新山里隧道以機械鑽掘開挖方式(挖掘機及破碎機，圖四十八)進行開挖工作；另考量開挖斷面較大，開挖時以分階開挖工法施作。隧道開挖時，搭配進行施工中前進探查鑽孔以提高開挖面前方地質條件之掌握度，另配合現場地質師即時給予之建議進行施工，並佈設系統化之隧道監測系統以掌握地盤變化行為，進行On-going Design，預防隧道



圖四十六 新山里隧道頂蓋工法(許等人, 2018)



圖四十七 新山里隧道固床工(許等人, 2018)



圖四十八 新山里隧道機械開挖(許等人, 2018)

災變及提升施工安全。隧道上半斷面開挖施工期間曾遭遇6次抽坍，推估係因岩盤開挖解壓、地下水入滲致岩盤軟化等影響所致。

## 六、回顧與展望

藉由本文回顧台灣鐵路山岳隧道工程之發展，得以窺見先人之智慧與努力，從美國鋼支保工法(ASSM)到新奧工法(NATM)之開挖支撐理論；從圓鋏、手提式鑽機到鑽堡、TBM等先進之開挖工具；從相思木、米糠包到鋼支

保、噴凝土、岩栓等現代化之支撐材料；從底導坑、側導坑、上半斷面到全斷面、中導坑、半階式拱蓋工法之開挖方式；從木矢板到先撐鋼棒、管幕工法、前進面玻璃纖維岩栓等先撐工法；從紅磚、石材到混凝土、鋼筋混凝土等襯砌材質；此外，為因應遭遇各種特殊地質狀況，先後發展出高壓灌漿、錐體灌漿、冷凍工法、垂直縫地工法等；而灌漿材則有水泥漿、水玻璃漿、聚胺酯樹脂、矽酸鹽樹脂、熱瀝青等。

隨著岩石力學與隧道工程學的驗證、施工機械的進化、新材料與新工法的研發，未來鐵路山岳隧道將更長、更深、更加能克服總總的困難地質與挑戰。除此之外，隨著隧道數量增長與鐵路電氣化或雙軌化之需求，其安全維護管理與全生命週期考量之定期檢查、檢測與安全評估逐漸受到重視，國內許多鐵路山岳隧道也從傳統目視檢查進步至採用光達雷射掃描並搭配非破壞性檢測，適時予以加固補強甚至擴挖改建，以延長其使用壽命或轉換成觀光用之自行車隧道，達永續利用並延續其歷史之軌跡。

## 參考文獻

- 工程圖輯隊 (2020), <https://www.facebook.com/twinklecity/> (2020年3月24日)
- 中華民國隧道協會 (2009), 「台灣隧道工程發展史及案例彙編光碟版」。
- 北迴鐵路工程處 (1981), 「北迴鐵路工程輯要」, 台灣省政府交通處, 共300頁。
- 交通部鐵路改建工程局東部工程處 (2005), 「東部鐵路改善工程輯要」。
- 交通部鐵路改建工程局東部工程處 (2018), 「新自強隧道工程技術專輯」。
- 交通部鐵道局 (2019), 「花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫」 <https://www.rb.gov.tw/showpage.php?lmenuid=3&smenuid=83&tmenuid=131>(2020年3月24日)。
- 在地生活in三義 (2016), <https://www.livehere.com.tw> (2020年3月24日)
- 吳沐仁 (2014), 「新山里隧道施工規劃與礫岩開挖探討」, 鐵工局30週年工程實務論文集, 第109-116頁。
- 吳俊傑 (2004), 「台灣東部鐵路隧道選線資料蒐集與評估應用之研究」, 碩士論文, 中華大學土木工程學系。
- 李乾朗 (1991), 「獅球嶺清代鐵路隧道調查研究」, 中華民俗藝術基金會, 基隆市政府。
- 東線鐵路拓寬工程處 (1985), 「自強一、二號隧道工程施工專輯」, 臺灣鐵路管理局。
- 花蓮縣文化局 (2016), <https://www.hccc.gov.tw/>(2020年3月24日)。
- 南迴鐵路工程處 (1992), 「南迴鐵路工程 輯要」, 臺灣省政府交通處。
- 苗栗市公所 (2020), <https://www.mlcg.gov.tw/>(2020年3月24日)。
- 苗栗縣文化局 (2018), <https://www.mlc.gov.tw/>(2020年3月24日)。
- 健峰工程顧問股份有限公司 (2004), 「鐵路舊山線三義~后里間保存維修計畫橋梁隧道檢測(委託調查及規劃設計)工程」, 臺灣鐵路管理局。
- 許健宏、林敬智、李民政、李怡德 (2018), 「東部鐵路山里隧道工程概述」, *地工技術*, 第155期, 第109-113頁。
- 陳鴻麟 (2011), 「鐵路隧道」, 交通部臺灣鐵路管理局工務處。
- 黃荻昌 (2008), 「台灣鐵路發展經緯-從歷史軌跡看台灣鐵路成長」。
- 廖健竣 (2018), 「台灣鐵路局全線隧道一覽表」, 悠遊台灣鐵道, <http://www.travel-taiwan-rail.idv.tw/> (2020年3月24日)。
- 維基百科 (2020), <https://zh.wikipedia.org/wiki/>(2020年3月24日)。
- 聯合大地工程顧問股份有限公司 (2016), 「后豐九號隧道監測系統建置計畫委託技術服務成果報告書」, 臺中市政府觀光旅遊局。
- 薛文城 (2014), 「東部鐵路山岳隧道施工之回顧與傳承」, 鐵工局30週年工程實務論文集, 第50-65頁。