

地工技術

南迴鐵路長大隧道特殊處理案例

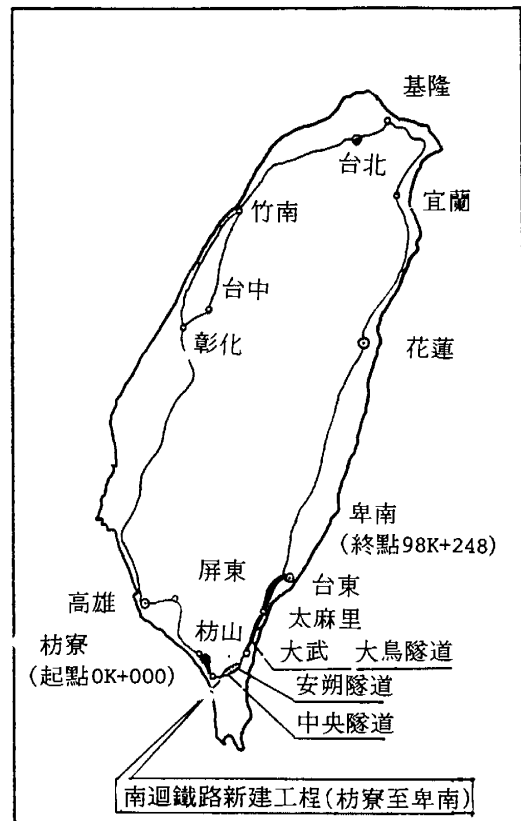
*王錦洋

一、前言

南迴鐵路為台灣省環島鐵路系統之最後一環，起自屏東枋寮，向南經枋山後折向東，穿越中央山脈南段，再轉折向北，經大武、太麻里、至台東卑南而止（圖一）。路線總長98.248KM，全線隧道共34座，共長39.047KM。其中長度超過1,000M之長大隧道計11座，長為31.845KM，約佔隧道總長度之81.56%。

本工程前期規劃及設計係以傳統工法 (American Steel Support Method，簡稱ASSM) 的側壁導坑及底設導坑工法施工。但由於本工程施工位址於台灣南端中新世 (Miocene) 地層中，因受板塊擠壓與變質作用，沿線地質複雜多變且地下水脈充沛，施工過程中遭遇不少抽心擠壓、岩盤滑動及大量湧水等現象，隧道開挖工作至為艱辛。為期減少施工困難、提高工程安全、及提升國內隧道工程技術，主辦單位台灣省政府交通處南迴鐵路工程處經縝密研討後乃毅然決定將各雙線隧道及單線隧道中之金崙、大鳥、與多良二號等共5座隧道改採新奧工法 (New Austrian Tunneling Method，簡稱NATM) 施工，其餘則仍採傳統工法施工。

本工程之隧道工程自民國七十三年三月十五日正式展開施工迄今已歷時六年有餘。目前雖同時採用傳統工法與新奧工法併行。惟由於國內引進新奧工法為時尚短，且南迴工區之地質惡劣、變異頻繁，開工以來已發生數以百計大小不等，狀況互異之地質災害，施工人員幾至窮於應付之地步。幸每經多方集思



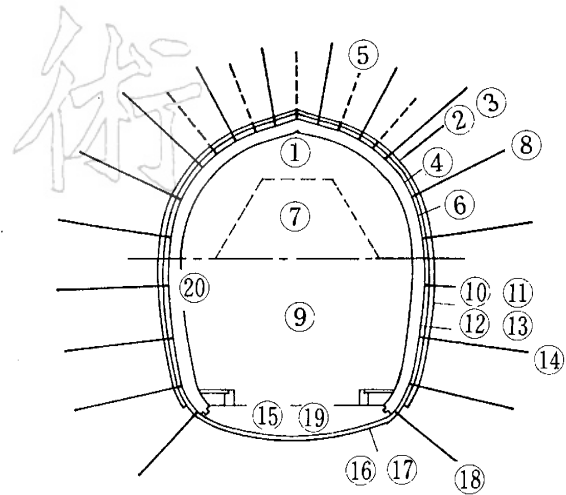
圖一 南迴鐵路新建工程與台灣環島鐵路系統

研討，運用各種經驗與方法，終能突破施工困境並因而獲取不少極為可貴之經驗。筆者有幸能於後期參與施工，並經歷多次特殊處理，通過艱困之施工區段，深感新興工法對於惡劣地質或仍有不足之處，有時尚需配合傳統工法，如此將更能靈活而有效地解決實際困難而有助於隧道施工之順利進行。

本文擬以中央隧道東口之排水迂迴導坑，安朔隧道東口之斷層帶重建，及大鳥隧道北口之排水導坑等特殊處理之法為例，就地質資料之收集、研判、預防對策、施工過程、及工法成敗予以探討，以供國內今後大量地下工程有關設計與施工參考，更期有助於營建工程技術之提升。

二、施工斷面

南迴鐵路隧道工程採新興工法施工部份設計之開挖斷面依事先經地球物理震波探測所得之震波速度判定岩盤地質之優劣及滲水程度而訂定雙線隧道之A、B、C、D、E等五種與單線隧道之A、B、C、D等四種不同之施工斷面（表一至表三）。各種斷面之施工作業程序稍有差異（圖二、圖三）。惟依據工程合同規定，施工單位於施工期間應聘僱隧道地質工程師及地工技術工程師（Geotechnical Engineer）等專業人員駐在現場分別從事開挖之地質記錄、岩體評分與隧道施工安全監測等工作，並將所得結果進行統計分析，適時提供資料回饋以供檢核原設計之適切性。實際上，施工斷面係於現場依據CSIR岩體分



- ① 上半斷面環狀開挖。
- ② 上半斷面拱部 $\phi 5 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ③ 上半斷面拱部 5cm 為 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 噴凝土。
- ④ 上半斷面 MU21U 型鋼支保組立。
- ⑤ 上半斷面 $\phi 25 \text{mm} L=3 \text{M}$ 上仰前進岩栓或 $\phi 25 \text{mm}$ 以上鋼筋。
- ⑥ 上半斷面 10cm 厚 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 噴凝土。
- ⑦ 上半斷面土心開挖。
- ⑧ 上半斷面岩栓按裝。
- ⑨ 下半斷面開挖。
- ⑩ 下半斷面側壁 $\phi 5 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑪ 下半斷面側壁 5cm 厚 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 噴凝土。
- ⑫ 下半斷面側壁 MU21U 型鋼支保組立。
- ⑬ 下半斷面側壁 10cm 厚 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 噴凝土。
- ⑭ 下半斷面岩栓按裝。
- ⑮ 仰拱開挖。
- ⑯ 仰拱 $\phi 5 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑰ 仰拱 15cm 厚 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 噴凝土。
- ⑱ 仰拱岩栓按裝。
- ⑲ 仰拱 $175 \text{kg}/\text{cm}^2$ 混凝土澆置。
- ⑳ 側壁及頂拱 $210 \text{kg}/\text{cm}^2$ 混凝土襯砌。

註：1. 遇地質惡劣時得於開挖面設臨時噴凝土封面。
2. 岩栓位置、長度、數量，視地質狀況按實作數量給價。

圖二 南迴鐵路 NATM 單線隧道 A 種斷面施工作業程序

類之RMR 值與岩體等級而訂定。可謂充分做到了" 邊做邊設計" (Design as you go) 之原則。

本工程施工所經之地質狀況普遍欠佳，遭遇地質特殊惡劣區段時，施工備受困擾。蓋地質特殊惡劣區段多係同時面對岩層破碎（甚或軟弱夾泥），及大量湧水（異常水壓）等兩大問題。如僅

遭遇岩層破碎軟弱夾泥等自承強度不足之狀況時，新奧工法尚勉可應付，如再伴隨有湧水（多為被壓水而呈高壓、大量噴湧）狀況則每肇致開挖面嚴重塌陷之施工災害，雖經業主與施工單位密切協調以尋解決之道，惟多未能於三、五天之短時間內迅予克服；對工期之延滯莫此為甚。

表一 南迴鐵路沿線長大隧道震波速度與岩體分類判定準則

岩體等級	以震波判定之岩體分類			CSIR岩體分類	
	P波速度(km/sec)	RQD(%)	節理間距(cm)	CSIR岩體等級	RMR值
A	5-5.5	>90	50-100	I	81-100
B	4-5	70-90	30-70	II	61-80
C	3-4	10-70	50	III	41-60
D	2-3	<10	<50	IV	21-40
E	<2	-	<50	V	≤ 20

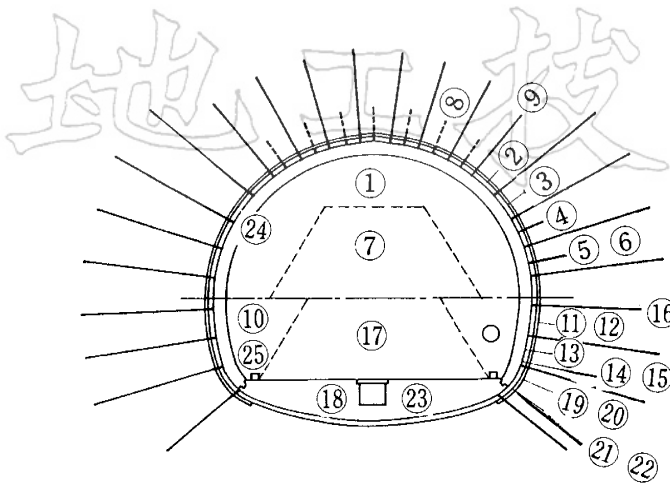
*依日本道路公團之岩體分類表修正。

表二 南迴鐵路單線隧道 NATM 工法設計標準

RMR值	開挖工法斷面	循環進度(m)	炸藥使用量(kg)	鋼絲網(mm)	噴凝土厚度(cm)	岩栓 ϕ 25mm			鋼支保	襯砌厚度(cm)
						上仰	垂直方向			
100~80	D	1.8	1.0~1.5	ϕ 5 \times 100 \times 100	10	M \times 支	M \times 支	M \times 支		30
							2.5 \times 8	3 \times 4		
80~60	C	1.5	0.6~1.4	ϕ 5 \times 100 \times 100	15		2.5 \times 8	3 \times 4	H-100 \times 100 \times 6 \times 8	30
60~40	B	1.2	0.3~0.7	ϕ 5 \times 100 \times 100	15		2.5 \times 6	3 \times 8	Mu 29	30
<40	A	1.0	0.2~0.5	ϕ 5 \times 100 \times 100	15	3 \times 5	2.5 \times 8	3 \times 10	Mu 29	30

表三 南迴鐵路雙線隧道 NATM 工法設計標準

RMR值	開挖工法斷面	循環進度(m)	炸藥使用量(kg)	鋼絲網(mm)	噴凝土厚度(cm)	岩栓 ϕ 25mm			鋼支保	襯砌厚度(cm)
						上仰	垂直方向			
100~90	E	2.0	0.8~1.2	ϕ 6 \times 100 \times 100	10	M \times 支	M \times 支	M \times 支		30
							3 \times 8	4 \times 4		
90~70	D	1.80	0.5~1.0	ϕ 6 \times 100 \times 100	15、10		3 \times 8	4 \times 6	H-125 \times 125 \times 65 \times 9	30
70~50	C	1.50	0.3~0.6	ϕ 6 \times 100 \times 100	15		3 \times 10	4 \times 6	H-150 \times 150 \times 7 \times 10	30
50~25	B	1.20	0.2~0.5	ϕ 6 \times 100 \times 100	15	3 \times 7	3 \times 12	4 \times 6	H-150 \times 150 \times 7 \times 10	35
<25	A	1.0	0.2~0.3	ϕ 6 \times 100 \times 100	20	3 \times 7	3 \times 12	4 \times 10	H-150 \times 150	35



- ① 上半断面環狀開挖。
- ② 上半断面拱部 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ③ 10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ④ 上半断面H-150×150鋼支保組立。(或MU21)
- ⑤ 上半断面 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑥ 10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ⑦ 上半断面土心開挖。
- ⑧ D29前進鋼筋按裝。(或 $\phi 38$ mm前進導管)
- ⑨ 上半断面垂直方向岩栓按裝。
- ⑩ 下半断面側壁開挖。
- ⑪ 下半断面側壁 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑫ 下半断面側壁10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ⑬ 下半断面H-150×150鋼支保組立。(或MU21)
- ⑭ 側壁 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑮ 側壁10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ⑯ 下半断面側壁岩栓按裝。
- ⑰ 下半断面土心開挖。
- ⑱ 仰拱開挖。
- ⑲ 仰拱側壁 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ⑳ 仰拱側壁10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ㉑ 仰拱 $\phi 6 \times 100 \times 100$ 鋼絲網鋪設。
- ㉒ 仰拱10cm厚 210kg/cm² 噴凝土。
- ㉓ 仰拱175kg/cm² 混凝土。
- ㉔ 側壁及拱圈210kg/cm² 襯砌混凝土。
- ㉕ 擋渣牆施工。

註：1. 遇地質惡劣時得於開挖面噴漿保護(5cm)。
 2. 使用材料依地質情況而定材料數量。
 3. 遇地質惡劣得以採用前進導管($\phi 42$ mm ± 6 mm)

圖三 南迴鐵路NATM雙線隧道A種断面施工
 作業順序圖

三、中央隧道東口之迂迴 排水導坑

3.1 概述

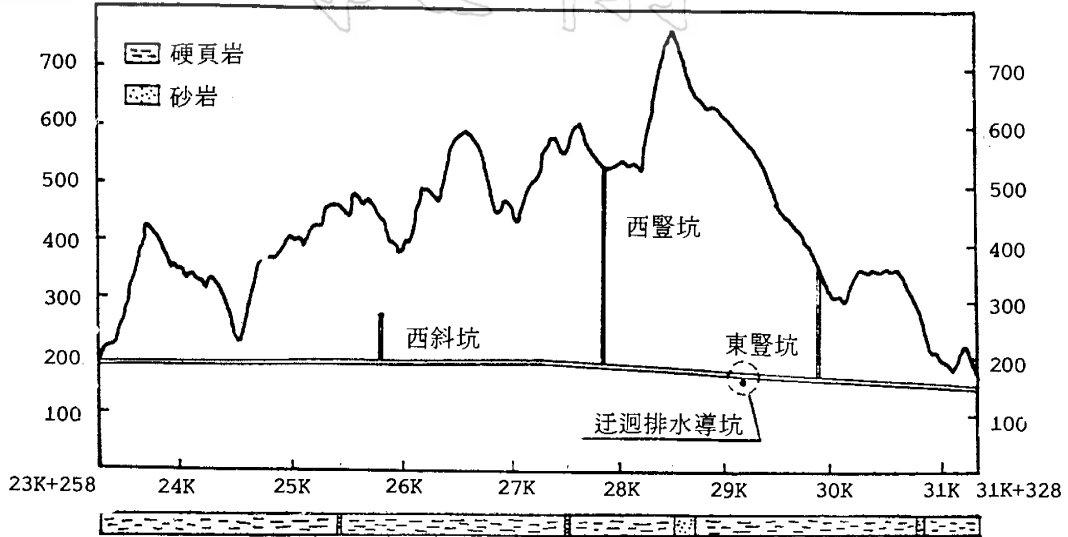
中央隧道全長8070M(西起23K+258、東止 31K+328)為目前台灣境內鐵公路交通隧道中之最長者。本隧道東口於78年 1月 3日進行29K+159.8 上半断面開挖時,突於開挖面發生異常湧水現象,湧水量多達 2噸/分鐘,並挾帶泥漿與細粒岩屑沖出,致發生高達8 公尺之抽心,雖經緊急施以噴凝土封面,鑽排水孔、及打設鋼軌支撐等仍無法穩住,致使已完成之H150*150鋼支保24對(#645至#668)遭受擠壓變形,噴凝土嚴重龜裂,情況十分危急,開挖工作被迫暫停,施工人員並立即採取緊急因應措施以防繼續惡化。

3.2 隧道內之地質狀況

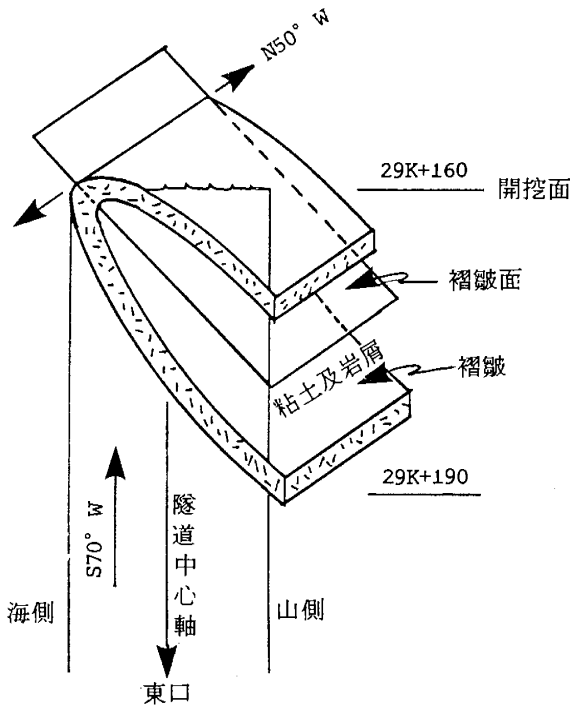
中央隧道東口之岩層係以硬頁岩為主,偶夾變質砂岩或粘土,剪動帶或小規模之斷層偶有出現(圖四),根據現場地質記錄詳加研判可以發現,隧道自29K+190 起即遭逢一褶皺,可能延伸至29K+160,前後長約30M,此一區段為褶皺之一翼(limb),其岩質為粘土層夾岩屑。在褶皺形成之時,岩盤經構造運動產生大量岩屑及夾泥或孔隙,又因地下水滲入,於透水性較差之粘土層上方積存而形成水胞(Water Pocket)。再由褶皺與隧道軸之關係圖(圖五)可以看出,自29K+190 處山側即開始出現粘土層及岩屑並造成該側易於崩塌

而致開挖困難，而海側岩盤尚可。隨後該褶皺帶漸向海側延伸，導致海側於29

K+160 附近發生嚴重抽心擠壓、鋼支保受損，開挖工作因而中斷。



圖四 中央隧道中心線地質圖

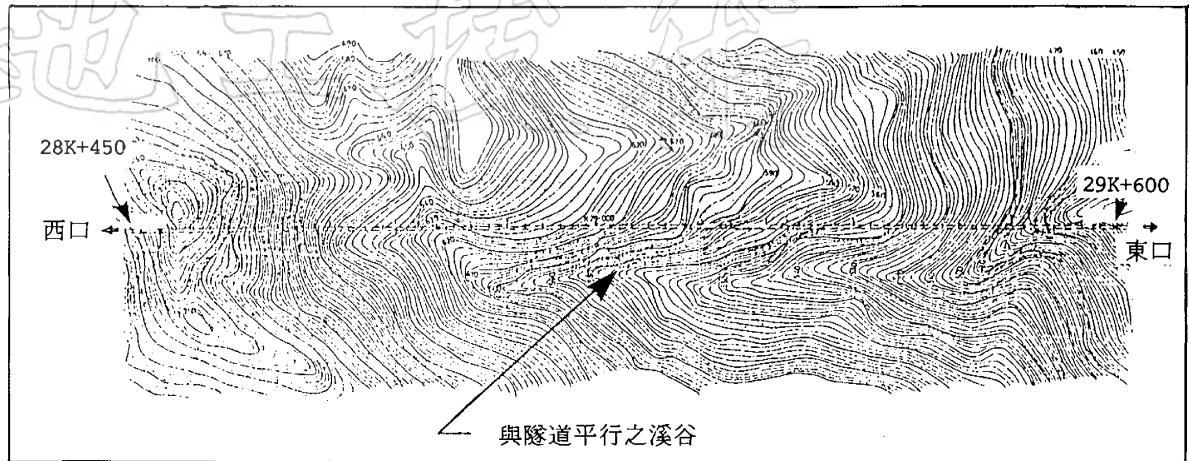


圖五 中央隧道東 29K 160~29K 190段褶皺與隧道軸之關係

3.3 野外地質狀況

本隧道東口之開挖自30K+060 處出現湧水問題後隨即持續不斷遭受湧水之困擾。為求確切瞭解湧水之原因以尋求解決之道，因此決定進一步施行野外地質調查詳細踏勘野外地形及地質情況。

野外踏勘自中央隧道東豎坑（30K+298）處朝西進行。發現之事實為隧道海側有一溪谷與之平行，溪谷之岩層以輕至中度風化之硬頁岩為主，偶有變質砂岩出現。岩層之劈理走向有兩組；一為 N70° E 向東傾斜 70°，約與隧道軸平行，另一為 N30° W 向東傾斜約 50°，約與隧道軸垂直，顯示此一區域之岩層經歷地質構造作用，擾動相當厲害，其劈理間距約為 5 ~ 7cm，裂隙極為發達；且自地形圖（圖六）研判，此一區域



圖六 中央隧道東口 28K+450~29K+600地形圖

集水面積廣大，因而造成隧道開挖時大量湧水。此一湧水現象極可能隨溪谷往西與隧道平行延伸長約350公尺，直至溪谷越過達相當距離後方停止。

3.4 特殊處理及施工經過

(a) 緊急支撐

1. 噴凝土封面——為提高開挖面岩盤之自承強度，將開挖面預留之土心及已移位變形之開挖面再度緊急施以噴凝土封面。
2. 鑽設洩水孔——為導出蘊藏於岩層間之地下水，以降低水壓、鑽設洩水孔，予以排出。
3. 鋼支保加固——因岩體鬆動範圍擴大岩壓驟增，為抑制鋼支保之扭曲變形，乃立即以 H125×125 型鋼作為垂直支承。

經上述緊急支撐處理後，雖然確保了鋼支保未遭全面彎折損毀，然由其中數支型鋼發生挫彎之情形，可見鬆動岩體所形成壓力之大（圖七）。

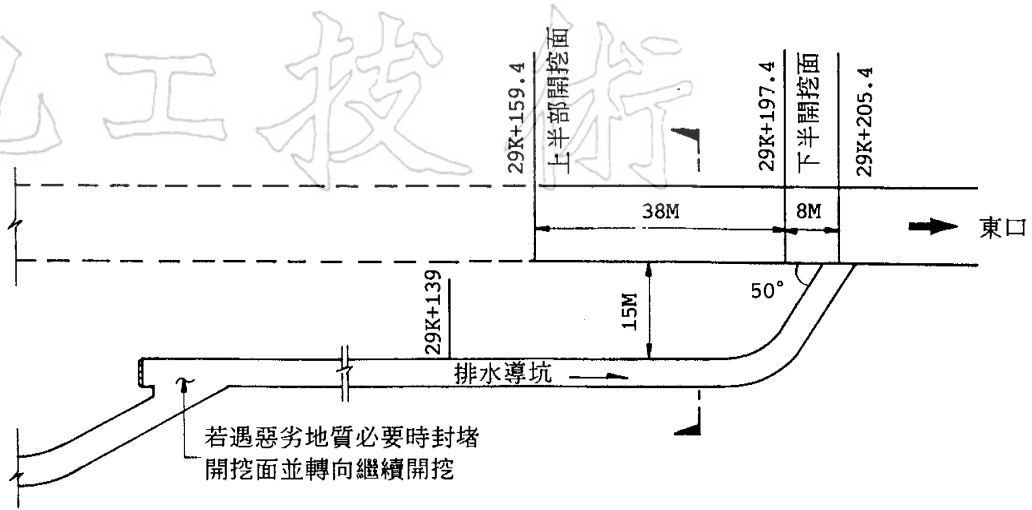
(b) 迂迴排水導坑

1. 為求有效疏導隧道內部大量湧水並進行變形區段之化學及固結灌漿改良地質，以利開挖及變形鋼支保修改抽換作業，決定於海側以傳統工法開鑿迂迴排水導坑（圖八）。由於開鑿導坑必須避免干擾隧道本坑之工作進行及影響隧道開挖面之穩定性，幾經斟酌考量選定下半斷面已經完成之29K+205 附近海側側壁地質較好處為導坑之入口。導坑與隧道本坑保持相當之淨距以免因岩體鬆動而互相影響其穩定及安全。



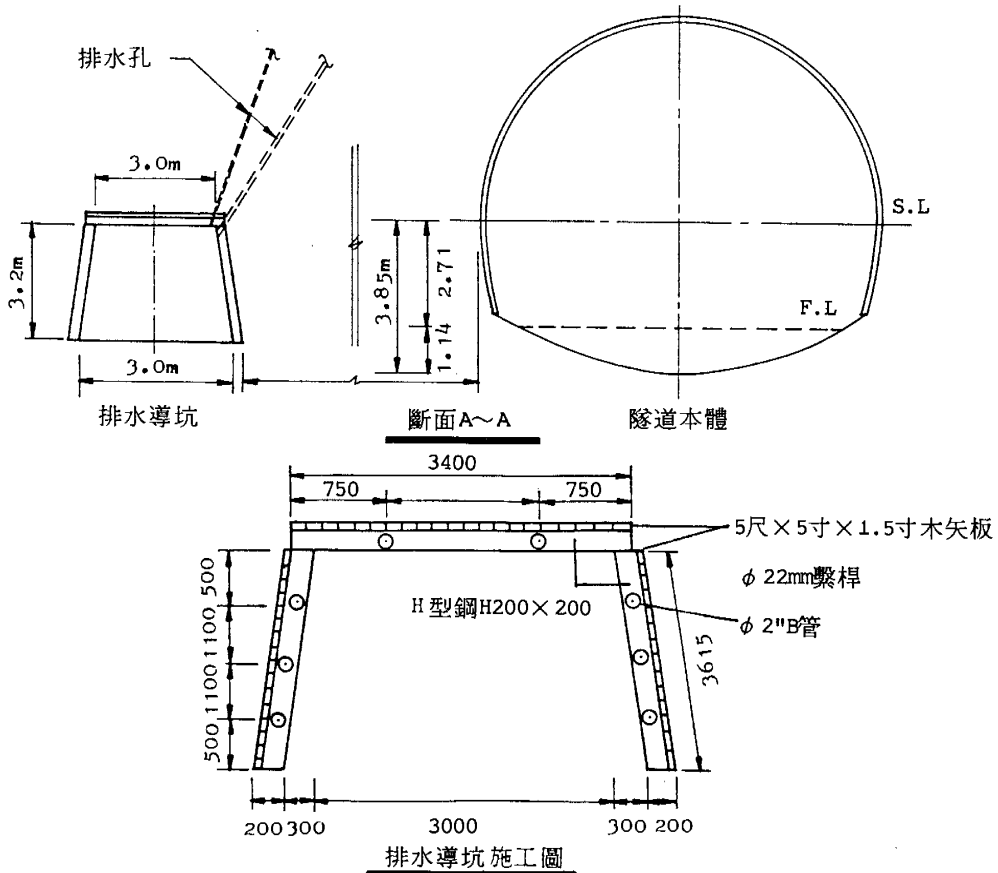
圖七 中央隧道東口 29K+159.8上半斷面鋼支保嚴重擠壓

地工技



排水導坑平面位置示意圖

說明：預定開挖長度為67公尺（29K+200.40~139.40深入上半開挖面20M）並視開挖面岩質及湧水狀況予以調整。



圖八 中央隧道東口29K+205.4處迂迴排水導坑施工圖

當導坑開挖進行約10公尺時，入口交會處之噴凝土發生嚴重龜裂，經於該處架設一對補強門型鋼支保、四周以25cm厚噴凝土加鋪雙層鋼絲網，加打 25mm×6M 岩栓計28支，以及水泥砂漿固結灌漿等予以補強後始告穩定。

導坑開挖初期即有少量湧水出現，進行至第41對鋼支保時因湧水量驟增，第37至41對鋼支保受強烈擠壓而向坑口傾斜，當即以 H125×125 型鋼加強支保腳之橫向支撐外並再於該區段斷面內架設第二層鋼支保以為補強，同時決定縮小斷面繼續開挖前進。開挖工作推進至第51對鋼支架 (STA.0+056) 時，第46對鋼支保之右側大量湧水並挾雜粘土岩屑沖出 (圖九)，將開挖面堵塞並往坑口延伸長達15公尺，開挖工作至此已甚難推進而隧道本坑湧水亦已大量減少至勉可施工程度，判定導坑已收預期之效，乃決定將開挖面封閉，鋼支保予以補強後，排水導坑之開挖暫停施工。

(c) 灌漿處理

為封堵擠壓區段之地下湧水及滲水，迂迴導坑開挖之同時於隧道本體 29K + 172.5~29K+168段進行化學灌漿，隨後並於29K+170.2~29K+159.8段實施固結灌漿以改良地質，有關灌漿作業所採用之配比如圖十及圖十一。

(d) 鋼支保抽換

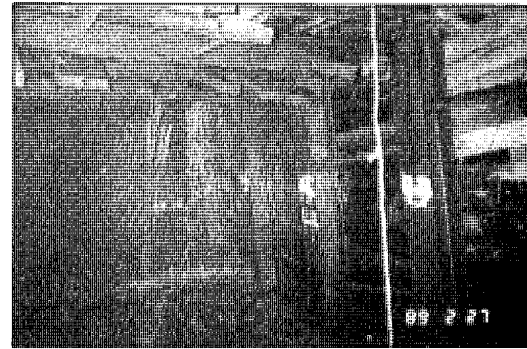
灌漿處理完成後隨即以 H200×200 鋼支保進行抽換架設，抽換工作係以人工環狀開挖緩慢逐對前進，支保間距縮短為 0.8~1.2 公尺，噴凝土首層10cm 厚並加鋪6m/m×100×100 鋼絲網後再施噴第二層厚15cm，並立即進行岩栓之鑽孔及

裝設，至於開挖斷面則提高原設計淨空 30cm以確保受壓變形後仍有足夠之混凝土襯砌厚度。此外，每隔 5~7 公尺裝設收斂岩釘一組，每日觀測開挖面之變形量加強監控預為因應。

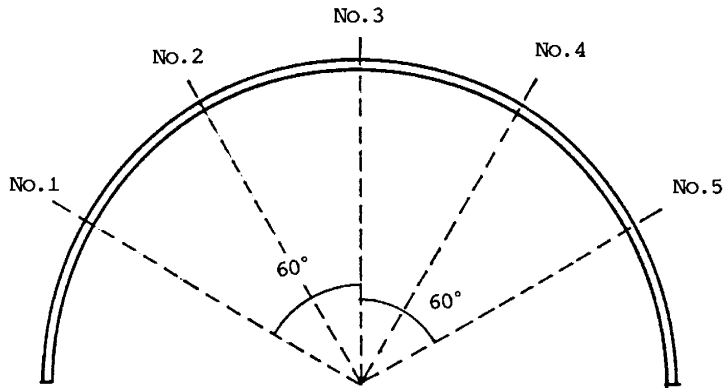
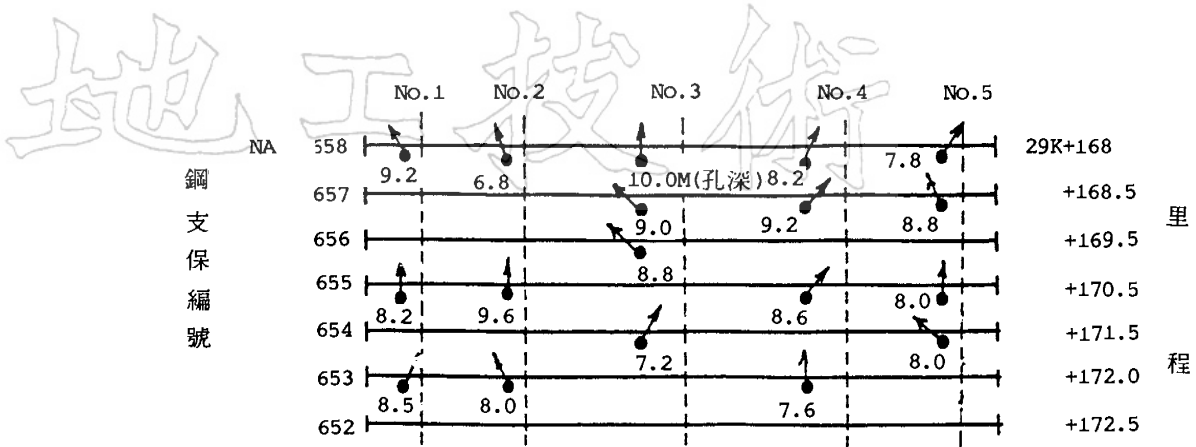
3.5 成效檢討

(a) 本次特殊處理主要為開鑿迂迴排水導坑56公尺灌漿、及變形鋼支保抽換，耽延工期116 天。

(b) 排水導坑充分發揮疏導隧道本坑內大量湧水之功能而使其他處理工作得以順利進行可惜的是因岩質惡劣及湧水而未能再繼續推進，被迫封面暫停開挖，否則當更能發揮其排水與探查地質之作用。



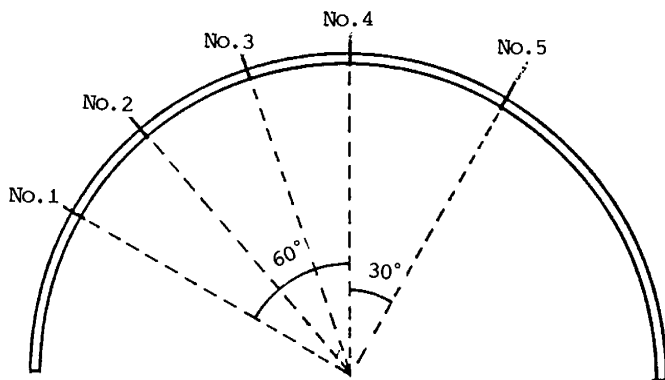
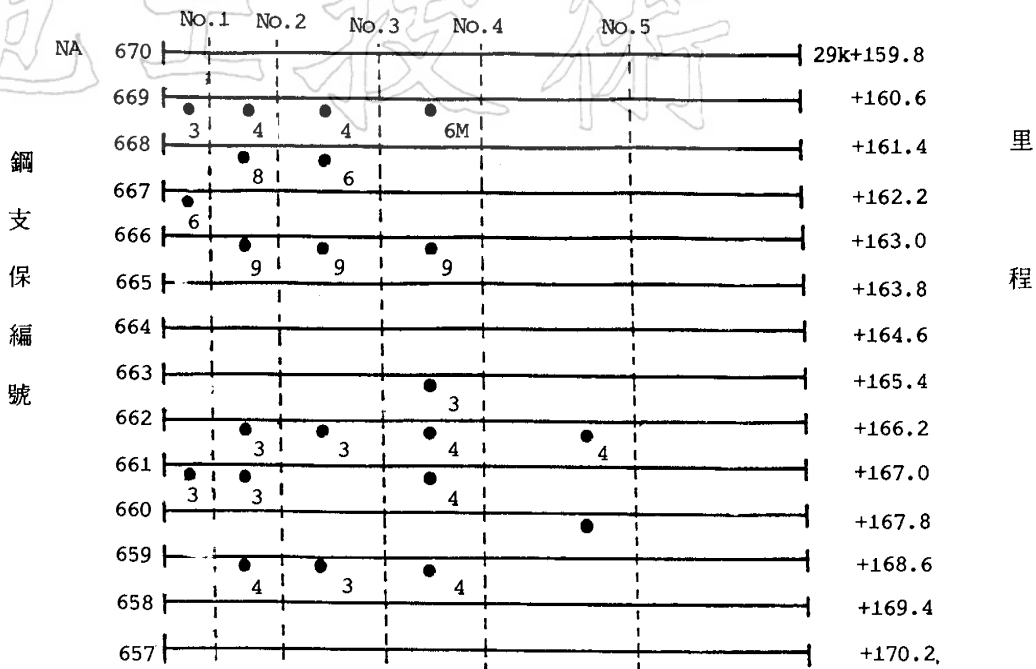
圖九 中央隧道東口迂迴排水導坑第46對鋼支保處大量湧水及岩屑沖出情形



混合比例 A : B	A 溶液		B 溶液		凝結時間 (秒)	灌漿壓力 (kg/Cm ²)
	水泥 (kg)	水 (l)	#3水玻璃 (l)	水 (l)		
1 : 1	100	50	40	40	40	0.5~11.0
	100	100	65	65	45	
	100	150	90	90	55	
	100	200	115	115	75	

圖十 中央隧道東口 29K 172.5~29K 168段化學灌漿鑽孔配置、深度、配比及壓力

地工技術



說明	材料	配合比例 C:F:S	水泥 c(kg)	飛灰 F(kg)	細砂 S(kg)	水 (kg)	灌漿壓力 (kg/Cm ²)
比重			3.15	2.12	2.58	1.0	1.0~20.0
No. 1 配比		1:0.4	100	40	-	70~150	
No. 2 配比		1:0.4:1	100	40	100	100~150	
No. 3 配比		1:0.4:2	100	40	200	100~200	

圖十一 中央隧道東口 29K 170.2~29K 159.8段固結灌漿

四、安朔隧道東口之斷層帶重建

4.1 概述

安朔隧道全長5483公尺，東洞口之里程為37k+640，係於民國七十三年三月十五日正式開工向西開挖。安朔隧道中心線地質如圖十二，其中36K+548.6至36K+460.9段為民國76年2~5月間依岩體類別以A、B、C三種斷面完成上半斷面開挖工作，下半斷面則僅開挖至36K+487.1時，五月下旬經現場檢測發現鋼支保有受力扭彎變形及沉陷之現象，其淨空變形量漸增並已超過設計容許變形量，雖以增設加長之岩栓及加噴噴凝土仍未能予以制止或減緩，經檢討認為必須拆除鋼支保、噴凝土、及岩栓等支撐系統後再予重建，乃立即停止開挖前進著手重建，該段重建工作至民國七十六年九月初始告完成。

4.2 沈陷變形原因與地質研判

根據聯合大地工程顧問股份有限公司現場地質師所做本區段開挖地質記錄綜合如下：

岩性：軟弱之斷層泥及破碎硬頁岩，劈理發達，受應力作用生成剪裂帶及小褶皺。

單壓強度 (MPA)：20~25

岩石品質指標 (RQD)：10

節理間距 (cm)：<5

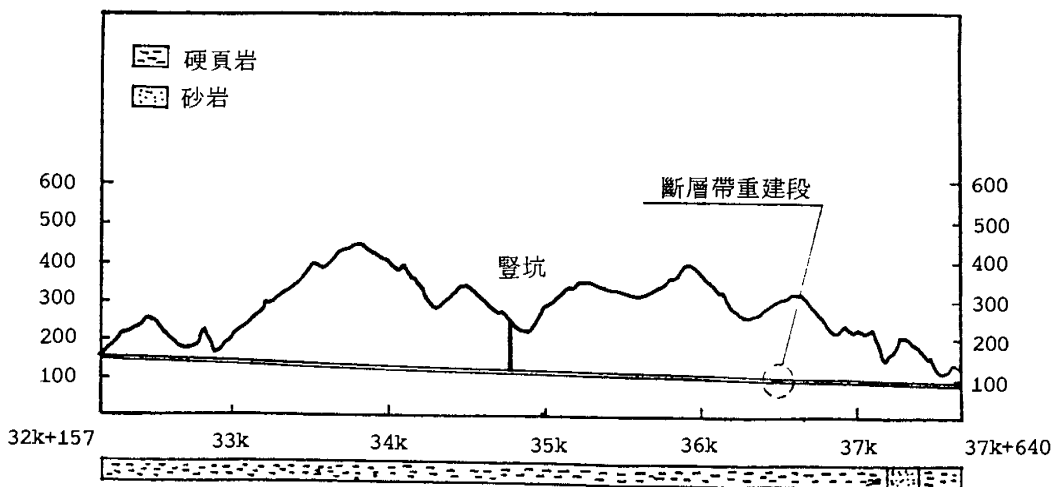
節理狀況：軟泥>5mm厚，節理開口>5mm，連續節理

地下水狀況：微濕

岩體評分 (RMR)：7~16

岩體等級：CSIR V

事實上，安朔隧道東口自36K+515起即已遭遇一寬廣之斷層帶，其岩體均為含高粘土質之斷層泥與極破碎之岩塊，岩質不僅異常軟弱且似有吸水後膨脹之現象，偶而可見擦痕 (Slickenside)



圖十二 安朔隧道中心線地質圖

之存在。由於岩質軟弱、岩體一直有扭曲現象，推測應有強裂之擠壓應力存在，因此開挖後鋼支保即不斷沉陷變形，觀測其頂拱沉陷變形量有逾一公尺者，變形情況之嚴重由此可見一斑。

4.3 施工方法及順序

(詳如圖十三)：

(a) 36K+505.3 ~ 36K+488.3 及 36K + 548.6 ~ 36K+539.3 兩段之下半斷面仰拱以30公分厚之210kg/cm² 噴凝土與 6mm ×100×100鋼絲網兩層予以閉合，並鑽設 25mm×6公尺長岩栓以穩定開挖面周圍岩體預防情況繼續惡化。

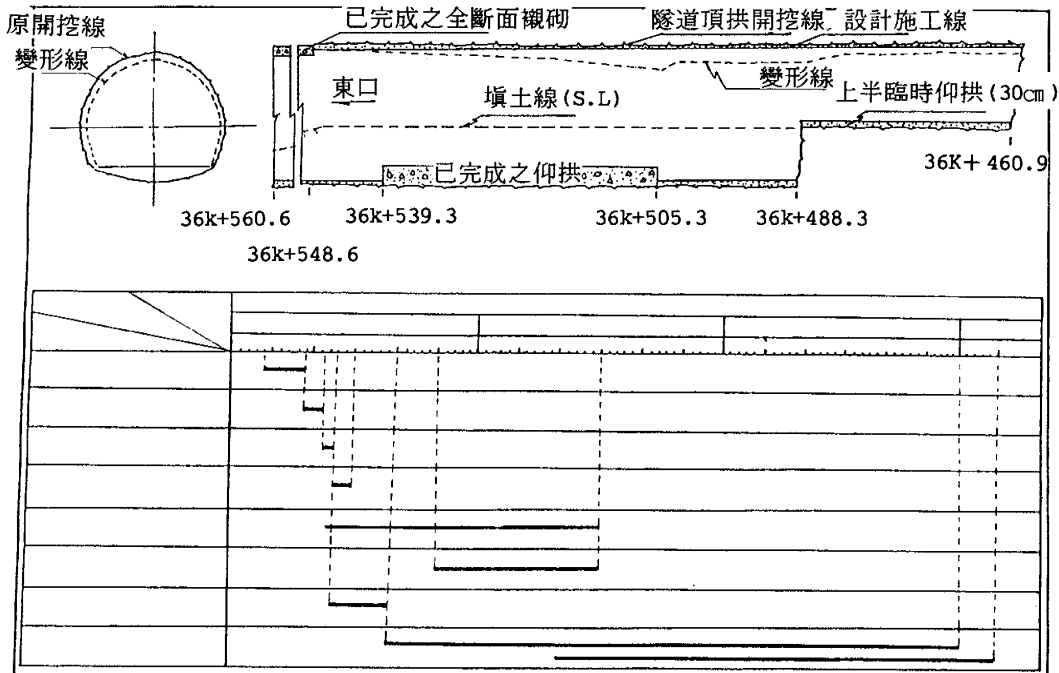
(b) 將 36K+488.3~36K+460.9 上半斷面底部以20公分厚之210kg/cm² 噴凝土、1層3mm×50×50 鋼絲網施做臨時仰拱

提早閉合以利應力重新分配並防應力集中造成之過度變形。

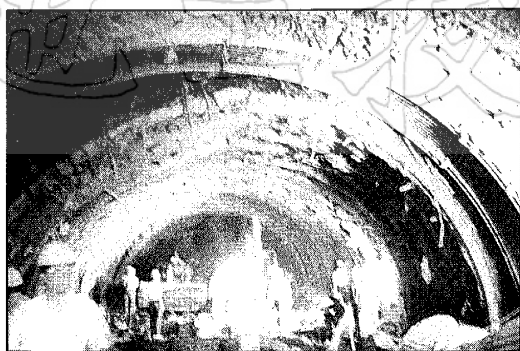
(c) 自洞外載運石料級配回填36K + 548.6 ~ 36K+488.3 段，填高至原設計起拱線，以防止側壁擠壓並供做重建用之工作平台。

(d) 自 36K+488.3與36K+548.6 兩處分組同時向西進行上半斷面之修挖重建工作，其方式為將原有支撐系統逐對鑿除，鑿除作業則係採環狀開挖並隨挖隨噴（噴凝土封面）以確保修挖面之穩定與施工安全，修挖重建進度極為緩慢（圖十四、十五）。原設計施工與重建變更之支撐系統比較如表五。

(e) 36K+548.6 處上半斷面修挖重建進行達20公尺長時，下半斷面始接著跟進修建。



圖十三 安朔隧道東口 36K+548.6~36K+460.9段間重建工程示意圖縱斷面及實際進度表



圖十四 安朔隧道東口 36K 548.6~36K 460.9段斷層帶重建之現場施工情形



圖十五 安朔隧道東口斷層帶重建於上半斷面左側修挖後所見極度破碎之硬頁岩塊

表五 安朔隧道東口 36K 548.6~36K 460.9變形重建段支撐系統比較

里程	支撐系統	原施工				重建變更				
		斷面	鋼支保	210kg/cm ² 噴凝土(cm)	φ 25mm 岩栓 (m×支)	容許 變形量 (cm)	鋼支保	210kg/cm ² 噴凝土 (cm)	φ 25mm 岩栓 (m×支)	上半斷面 臨時 仰拱 (cm)
36K+548.6~36K+539.2	C	H150×150@1.8m	15	3	15	Mu29@1.0m	25	6×5 9×8	-	40
36K+539.2~36K+530.0	C	H150×150@1.5m	15		15	Mu29@1.0m	25	6×5 9×8	-	40
36K+530.0~36K+515.0	B	H150×150@1.5m	15	3×8 5×14	15	Mu29@1.0m	25	6×7 9×8	-	40
36K+515.0~36K+481.3	A	H150×150@1.2m	20	3×8 5×14	20	Mu29@1.0m	25	5×7 9×8	-	40
36K+481.3~36K+460.9	A	H150×150@1.0m	20	3×8 5×14	20	Mu29@1.0m	25	6×7 9×8	30	40

4.4 成效檢討

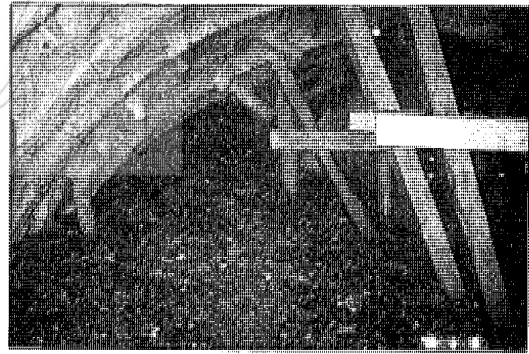
1. 本次特殊處理自76年 6月 5日起正式展開，由於現場施工人員戮力趕趕終能於同年 9月 5日完成，前後計92天，重建期間隧道開挖工作全面停頓，影響工程進展至鉅。
2. U型鋼支保由於容許發生某種程度之伸縮致較之H型鋼支保更具柔性而適用於岩質軟弱地段，故本次特殊處理以之取代原設計之H型鋼支保可謂相當恰當。建議以後遭遇類似地質情況應可優先考慮使用。

五、大鳥隧道北口之排水導坑

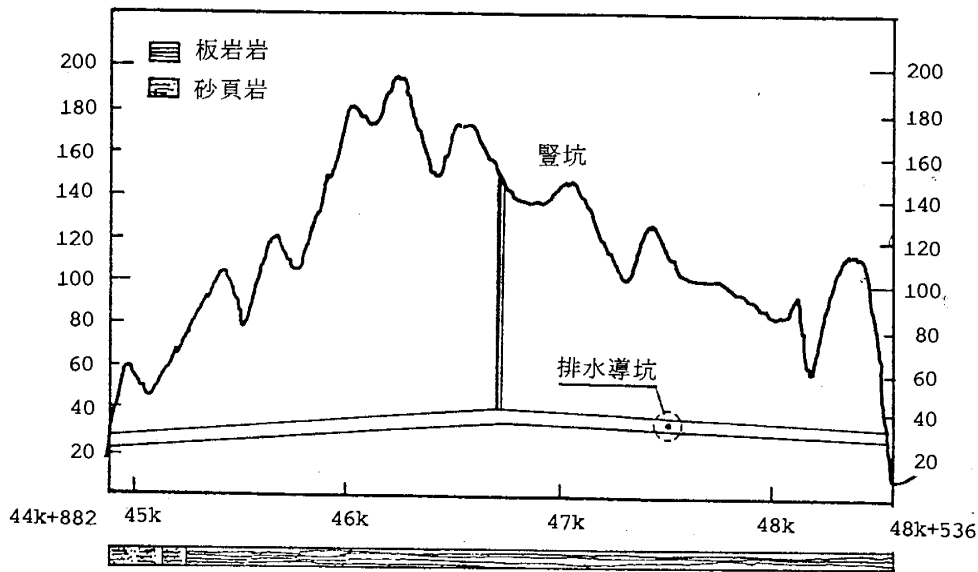
5.1 概述

大鳥隧道全長3654公尺（南起44K+882北至48K+536），為單線中第二長大之隧道其中心線地質如圖十六。北口上半斷面之開挖工作於七十七年五月四日向南推進至47K+582.2時發生巨量湧水及岩盤抽心，造成開挖面10對鋼支保彎曲變形。嗣經實施固結灌漿改良地質並進行抽換重建。惟當重建工作進行至第

5 對鋼支保時，再度遭遇大量湧水挾帶極度破碎之岩塊沖出（圖十七），導致重建完成之 3 對鋼支保嚴重擠壓變形。鑒於崩塌面湧水量甚大無法以灌漿處理方式予以克服，乃決定於設計断面內開鑿排水導坑先行舒減水壓後再行進一步之突破。



圖十七 大鳥隧道北口 47K 589.2大量湧水挾帶極度破碎之岩塊



(裂隙發達之板岩夾破碎帶及湧水段)

圖十六 大鳥隧道中心線地質圖

5.2 地質概要

本區段岩性因強烈之地質構造作用而顯現多變之特性，根據現場開挖地質記錄分析如下：

里程：47K+589~47K+529

岩性：軟化硬頁岩及剪裂泥，偶有團塊狀粘土出現。

單壓強度 (MPA)：1~40，大部份介於15~20

岩石品質指標 (RQD)：10~20

節理間距 (cm)：<5

節理狀況：具擦痕，夾泥<5mm厚開口<5mm或軟泥>5mm厚開口>5mm，連續節理。

地下水狀況：大部份為中度以下水壓少數為微濕或嚴重湧水

岩體評分 (RMR)：5~20

岩體等級：CSIR V

劈理：第1組斜向海側，第2組近乎水平，第3組斜向山側，三組劈理交錯出現，出現頻率約為7~10公尺。

5.3 處理對策

(a) 首先將崩塌面施以噴凝土（厚約 5～10公分）封面以防止繼續坍塌，然後在導坑洞口預定地點前進約 4m 左右實施開挖面固結灌漿以加強未受破壞地段之穩定與安全。

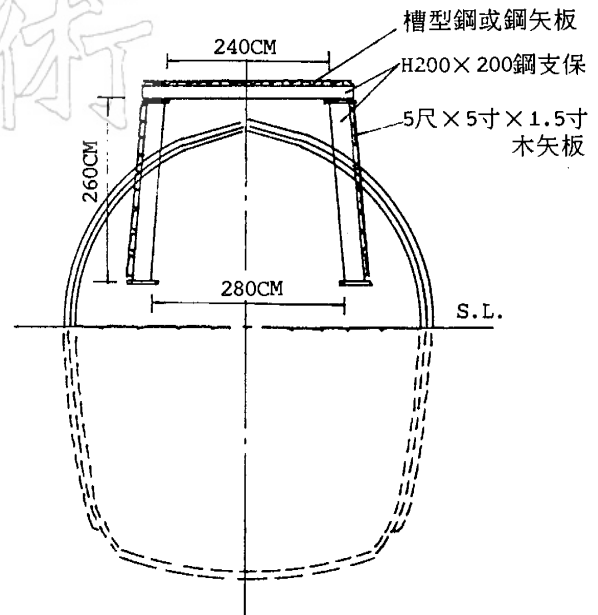
(b) 開鑿排水導坑（圖十八）：選定導坑洞口地點後即於上半斷面隧道中心起拱線位置架設 3 組 H200×200 梯形假支保並以砂包堆砌於其兩側及頂端以防被擠壓倒塌，然後即以人工開挖方式以間距 1m 架設 H200×200 鋼支保配以木矢板逐次緩慢開鑿並爬升至頂拱上端之預定位置後再水平推進。排水導坑之施工長度以 30 公尺為一階段，到達預定長度即暫告停（圖十九）。

(c) 第一階段排水導坑開鑿完成並俟崩塌面水壓降低後即自 47K+592.2 處開始修挖，拆除導坑鋼支保並同時組立 H125×125 新設之鋼支保及施噴噴凝土、鑽設岩栓等，如此交互循序前進至導坑最後約 5 公尺左右暫停。

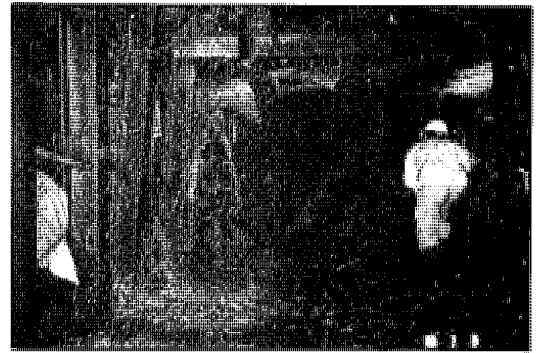
(d) 第二階段排水導坑開鑿至 16 公尺時因岩質轉佳乃決定停止開鑿並隨即接續進行尚未完成之上半開挖。

5.4 成效檢討

本次特殊處理中完成排水導坑開挖 46 公尺。雖然達到導水之目的，但因地質極度惡劣且湧水量奇大（約 7 噸/分鐘）而導坑係位於原設計施工斷面內，對於隨後之上半開挖平添不少困擾。今後遇到類似情況如工期足夠寬裕或情況容許應可考慮開鑿迂迴排水導坑以減少對



圖十八 大鳥隧道北口 47K+589~47K+529段排水導坑斷面示意圖



圖十九 大鳥隧道北口 47K+589.21 水導坑內湧水情形

本坑開挖工作之耽延及干擾。惟如迂迴導坑不做為永久導水設施時，事後必須設法予以回填。

地工技術

六、檢討

隧道開挖於遭遇岩層破碎軟弱且大量湧水之惡劣地段時常常發生過載岩壓及土石沖流等情事，導致開挖面嚴重抽心或已完成之鋼支保受壓扭曲變形、甚至隧道塌毀難以收拾之境況，施工人員對其莫不避之唯恐不及。惟一旦遇上即須勇敢冷靜面對事實而澈底瞭解問題癥結所在，尋求有效而可行之突破措施方為解決之道。

國內隧道工程之傳統工法大多採用側壁導坑或底設導坑施工，於導坑先進時已發揮導水及探查地質之雙重作用。而新奧工法一般均以上下斷面長（短）階或全斷面施工，一旦遭遇地質惡劣地段時，很難以加厚噴凝土、增加岩栓支數或長度之方式硬行強闖，故似較傳統工法更須借助其他輔助措施以解決困難，東線鐵路拓寬計劃之自強隧道及正施工中之南迴鐵路新建工程長大隧道即為明顯之例證。

新奧工法在世界各國雖已逐漸成為隧道施工之主流，惟對於下述地質情況迄至今日則尚無法充分適應：

1. 湧水量多時，尤其是在石灰石與粘土層等。
2. 含卵石的粘土，無法施噴噴凝土時。
3. 岩釘無法施打時。
4. 砂礫層。
5. 開挖面無法自立時。

故對於惡劣地段使用新奧工法施工時必須採取其他之補助工法始能有效因應。有關補助工法可因其目的之不同而

予分類為頂拱之安定、開挖面之安定、排水、與止水等四種（表六），惟通常均需二種或多種合併應用。社團法人日本隧道技術協會則依使用機械、設備、與材料之不同將新奧工法所用之補助工法分成A，B 兩大類別（表七、八）。

又惡劣地段之隧道施工通常進展緩滯，極為費工費時，有時雖僅短短數公尺之距離，卻往往耗時十天半月甚至長表達數月始能突破通過。究其主因為：

1. 隧道洞內作業空間極為有限，無法藉增加施工機具或投入大量人力之方式提昇施工速度。
2. 大量的湧水除增加抽排水工作外，亦使作業環境益形惡劣，減低人員及機具之工作效率。
3. 為確保開挖面穩定及施工安全，通常被迫採取以人工為主之開挖方式，其施工速率當然無法與機械作業相比擬。
4. 開挖時常須與其他補助工法如開鑿導坑、鑽設排水孔、打設前進鋼管、或灌漿處理等，除增加工作、互生干擾、使工作安排困難外，由於長期之進度遲緩，無形中給施工人員帶來精神上極大之負擔，對其士氣亦產生相當之打擊。故無論業主或施工單位對於惡劣地段所需採行之補助工法應建立共識、密切合作，以最迅速有效之方案，力求於最短時間內克服難題通過考驗。

七、結論

1. 新奧工法目前已漸為國內工程界所接受，惟由於台灣本島岩層分佈極為複雜、地質構造變動繁多，致隧道施工中遭遇破碎軟弱岩層及大量湧水之情事時有

表六 新奧工法之補助工法

目的	補助工法
頂拱之安定	縫地岩栓 (前進鋼筋, 或鋼管, 必要時灌漿) 鋼板樁 (鋼矢板、鋼軌或型鋼支撐)
開挖面之安定	開挖面噴凝土封面 (shotcrete sealing) 開挖面岩栓 環狀開挖 (ring cut) 預留土心
排水	排水孔 排水導坑 深井 點井
止水	藥液注入工法 壓氣工法 冷凍工法

表七 補助工法的分類 (一)

	工法	拱頂的安定	開挖面的安定	使用材料	工法說明	備考
※ 補助 工法 A	先進工法 (1) (Forpilling Method)	◎	○	岩釘 鋼管 鋼筋	鑽孔開炸前預先於頂拱開挖線外圍打設前進鋼筋或鋼管以減少坍落, 若利用鐵管注入化學藥液水泥漿等, 以補強開挖面時, 其打設角度約為 $10-30^{\circ}$ 。	
	先進工法 (2)	◎	○	鋼矢板 L型鋼	對於自立性較差的岩盤, 施噴噴凝土前可先沿著開挖面外緣打設L型鋼、鋼軌或鋼矢板以防止坍落。	
	斜打岩釘工法	○	○	岩釘	岩盤崩裂時可配合鋼支保使用以獲得支撐的功用及開挖面的安定。 打設的角度: 約 $45^{\circ}-70^{\circ}$	適用於當做支保之補強
	管幕工法 (Mini Pipe Roof)	◎	○	鐵管	在無粘著力的砂土質地層中打設鋼管, 以防止岩盤的鬆弛及坍落 管長: 5~7m 口徑: $\phi 45\text{m/m}$ 以下有時亦可注入藥液。	
	封面工法		◎	噴凝土	在開挖面施噴噴凝土以維開挖面之自立性	
	岩釘封面工法		◎	岩釘 玻璃纖維岩釘	用岩釘打設於開挖面以維開挖面的自立性	

※補助工法 A: 係指利用工地現有的設備、機具、材料等先行在鑽孔開炸前或完成鋼支保組立之前所能採取足以維持開挖面穩定性的工法。

表八 補助工法的分類(二)

工法	地表沈陷對策	開挖面安定對策	使用材料及機具、設備	工法說明	
※ 補 助 工 法 B	拔水工法		○	鑽設排水孔或開挖排水導坑	利用開挖面打設排水孔以降低水位及水壓，若遇大量湧水時，則以小斷面導坑排水。
	排水工法		○	點井或深井	可降低的水位約5~8m之工法，在隧道內外皆可使用，水井口徑：50m/m，若採用較深之點井時其口徑以300m/m為宜。
	壓氣工法		○	空壓機	利用氣壓止水並安定地層
	藥液注入工法	○	○	懸濁型、半懸濁型或溶液型、藥液	於岩層中注入藥劑來補強地層以防止沈陷及安定開挖面，依地層的狀況決定注入範圍及選擇注入材料。
	管幕工法	◎	○	鐵管鑽岩機	適合於防止坑口等及鬆軟地層之沈陷，依地層狀況以口徑100m/m~200m/m，長度以40~50m以下為最適當，在坑內施工時，依斷面來延長40~50m較為經濟
	凍結工法	○	○	冷媒	地盤予以凍結穩定後即可參與開挖施工。
	特殊鋼矢板推進工法	○	○	鋼矢板	水平縫地工法：以特殊的加工鋼矢板用千斤頂推進的方法
	垂直縫地工法	◎	◎	鋼筋水泥砂漿	隧道開挖前預先由地表面打設岩釘或鋼筋混凝土樁來防止沈陷及維持開挖面的自立性。
連續壁工法	○			排樁或地下連續壁	在隧道兩側（或單側）打設地下連續壁，以使隨開挖隧道而伴起地層鬆弛控制在限定範圍內

※補助工法B：係指一般施工採用之機械設備不足以應付而需使用其他機械設備以達到改善岩盤穩定開挖面，或防止地表下陷等目的之適當工法。

所聞。當以設計工法無法突破惡劣地段時，補助工法乃因之而生。由於補助工法通常不僅費工費時，且其成敗影響工程至為深遠，實不宜稍有輕忽。

2. 新奧工法所採補助工法，因其目的之不同而有所區別，故應於澈底瞭解工地地質情況、湧水來源及大小、現場作業環境、作業干擾程度、與可能產生之影響及後果等諸多因素分析比較後，做最佳之選擇，方能達到預期成效。

3. 本文所述三種特殊處理補助工法事前均經現場施工人員審慎研討後始予採行，經現場實施證明充分發揮預期效果，

乃能突破困難並使工程順利恢復進行，其成績應予肯定。

4. 國內地下工程在未來營建市場中將佔有相當之比重，相信類此補助工法之案例必然為數不少。為求互相交換心得並使成敗之經驗得以廣為流傳，應請實際參與設計及從事現場施工之工程人員敏於觀察並勤於記錄所見所聞，整理後為文發表，如此方可共期國內隧道工程技術之快速提昇。

地工技術

本文承聯合大地工程顧問股份有限公司提供現場開挖地質資料陳秀圓細心繪圖，及榮工處南迴鐵路施工處施清規、楊茆銘、黃勝安、鄭智雄等多位提供卓見與協助，謹申謝意。

參考文獻

陳朝和（民國 74 年）：“NATM設計與施工”，興志營造有限公司出版，民國74年1月。

交通部台灣區國道高速公路北部第二高速公路工程處（民國 77 年）：“NATM理論與實務”。

社團法人日本 トンネル 技術協會（昭和六十二年）：“第七回山岳トンネル 技術 シンポジウム—NATMの補助工法”。

林肇振（民國74年）“傳統工法與新奧工法在南迴鐵路隧道工程中規劃與設計之研討”，中國土木水利工程學會七十四年年會論文專集。