

# 坪林隧道之規劃、設計、施工與地工技術

張文城

國道新建工程局第三區工程處

## 摘要

坪林隧道長達 12.9km，最大覆蓋深度達 720m，沿線地質構造複雜，岩盤破碎並蘊含豐富之地下水，有兩個直徑約 12m 之主坑及一個直徑約 5m 之導坑同時施工，故地工技術上之問題，需有審慎之考量與評估。本文先由規劃及設計階段，說明有關地工技術方面，規劃時需考量之基本原則及設計之重點，再與施工階段實際之結果比較，最後並提出若干之建議，以爲爾後推動類似重大工程時之參考。

**關鍵字：**全斷面隧道鑽掘機。

## GEOTECHNIQUES FOR PLANNING, DESIGN AND CONSTRUCTION IN PINGLIN TUNNEL

CHANG, WEN-CHERNG

National Expressway Engineering Bureau.

## ABSTRACT

The Pinglin Tunnel, including two main tubes with 12m in diameter and one pilot tube with 5m in diameter, is approximately 12.9km long. The maximum overburden is approximately 720m and the geological structure along the tunnel is very complicated with large amount of ground water. Therefore the geotechnical consideration is very important and should be carefully studied and evaluated. This paper is to introduce the key issues regarding geotechnical engineering during planning and design stages. The actual results during construction is also interpreted to compare with the anticipative condition in the planning and design stages.

**KEY WORDS :** tunnel boring machine.

## 一、前言

北宜高速公路連接台北市及宜蘭縣，為國內第一條穿越中央山脈之高速公路，由於經過崎嶇之山區，故公路主要山隧道及橋樑所組成，尤其其中之坪林隧道長度更達 12.9 公里，約佔北宜高速公路全長 31 公里之五分之二，為目前國內興建中最長之隧道，亦是世界第三長之公路隧道。

坪林隧道由台北縣之坪林鄉至宜蘭縣之頭城鎮，基於其長度甚長且預期其工程困難度甚高，故於規劃與設計階段，即投注大量之人力，並應用多項較國內以往特殊或先進之調查、設計與施工方法【如遙感探測 (Remote Sensing)，航照判釋，水力破裂法 (Hydraulic Fracturing) 當地應力量測，全斷面隧道鑽掘機 (Tunnel Boring Machine, TBM) 施工，預鑄混凝土環片設計採用高拉力鋼線 ( $F_y = 5,000\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 等】，以期能降低施工風險，控制工程經費，並充份掌握工程進度。

坪林隧道之導坑與主坑工程，分別於民國八十年七月及八十二年七月開工，承包商為榮民工程事業管理處，施工合約金額分別為新台幣一百八十五億及二十億，監造單位為中興工程顧問有限公司。

本文乃嘗試以地工技術的觀點，探討坪林隧道當初之規劃原則與設計重點，並由後續施工時實際之情形與遭遇之困難，回顧當初規劃、設計之精神及其適當性，以為爾後類似工程建設之參考。

## 二、規劃原則

### 2.1 地質調查

地質情況的充份掌握，為隧道工程最重要的工作，惟也是隧道工程中最困難的一部份，尤其是對於長隧道而言，其隧道的覆土厚度往往達數百公尺，甚至超過一千公尺以上，因此若欲藉由一般表面淺層之調查(如野外地質調查，折射法震測)或深度較深但為「點」的調查(如鑽探)，而推知隧道所通過深層地盤之地質情況，則無形中自然產生其預測結果之不確定性。

表一 坪林隧道規劃、設計階段地質調查主要工作項目

主要工作項目	說明
1. 遙感探測與航照判釋	了解大區域之工程地質，以為後續詳細調查計畫擬定之參考。
2. 野外地質調查	詳細了解隧道沿線地表之工程地質。
3. 折射法震測	了解隧道沿線地表下約 50 公尺範圍內地層及地質構造之震波波速。
4. 鑽探	詳細了解豎井及隧道沿線主要地層及地質構造之相關地質與地工資料。
5. 槽溝開挖	了解隧道沿線主要斷層之位置及相關地質與地工資料。
6. 橫坑探查	了解隧道洞口段之實際地質及開挖後岩體顯現之行爲。
7. 現地試驗	了解現場主要岩體及地質構造之力學行爲及當地應力，以為分析設計之依據。
8. 室內試驗	了解岩石之力學參數以為分析設計之依據。

坪林隧道長 12.9 公里，最大覆蓋深度約 720 公尺，並通過地質構造複雜之雪山山脈，因此規劃及設計甚至施工階段地質調查計劃之擬定，便需有周延之考量，以期調查工作能循序漸進，獲得良好之成果。表一為坪林隧道規劃及設計階段主要的地質調查工作項目(張文城，民國 81 年)，除一般傳統之野外地質調查、震測、

鑽探等調查方法外，並首次有系統的應用遙感探測與航照判釋之技術，以期能充份了解大區域之工程地質，而作為後續擬定詳細調查計劃之參考。此外亦於國內首次引進水力破裂法當地應力測量技術，期能了解隧道沿線當地應力之大小，以做為隧道支撐分析設計之依據 (Chang and Cheng, 1992)。

如前所述，地質調查應用於隧道工程，由於調查方法及技術之限制，調查成果常有相當程度之不確定性，故為進一步確實掌握隧道開挖後實際之地質情況，坪林隧道於施工階段，亦延續規劃、設計階段之調查成果，擬定若干之調查工作，以期能降低施工時之地質風險，其中配合 TBM 施工時施作之前進探測孔，其目的更是欲積極的事先了解 TBM 開挖面前方的地質情況，以做為後續施工之依據。

以經費而言，坪林隧道於規劃設計階段之地質調查工作，總計約花費一億元，而施工階段亦編列有約八仟伍佰萬元之經費，合計約佔總工程費之 1%，大致上應已充份反映一般隧道工程建設應有之地質調查規模。

圖一為坪林隧道沿線地質剖面圖，此為規劃設計階段地質調查最主要成果之一。由圖一及規劃設計階段地質調查成果可獲得若干重要之工程地質訊息，包括：

1. 主要岩性及其分佈範圍：包括砂岩、頁岩、硬頁岩、四稜砂岩及此等岩石材料之互層，大致上東半段(頭城端)主要為硬頁岩及四稜砂岩，西半段(坪林端)則主要為砂岩、頁岩、硬頁岩及其互層。

2. 主要地質構造：包括金盈、上新、巴陵、大金面、石牌及石槽等主要斷層及倒吊子向斜軸、鶯子瀨向斜軸與里程 39K 處未命名之向斜軸等地質構造。

3. 岩體破碎程度：依 Deere 之岩體分類(Deere, 1964)，坪林隧道東口約 4 公里路段屬差(Poor)至極差(Very Poor)之岩盤，而其餘路段則屬良(Fair)至佳(Good)之岩盤，若依 Bieniawski 之 RMR 岩體分類(Bieniawski, 1973)，則東口約 4 公里其 RMR 值主要介於 10 ~ 40 間，其餘路段其 RMR 值則主要介於 40 ~ 80 間。

4. 地下水：地下水水源、水量、水壓的評估為隧道地質調查中最困難的項目，尤其是坪林隧道 300 公尺覆土深度以上的路段超過 10 公里，最深的覆土深度達 720 公尺，更增加其地下水評估的困難度。規劃、設計階段主要係依據淺層及某些定點的調查成果(如鑽孔岩心的破碎程度，鑽孔之地下水位高程、透水試驗等)粗略評估隧道施工期間沿線累積之地下水量及前述主要斷層構造附近之透水係數。至於詳細之水源、水壓及異常湧水的位置與水量則受限於調查技術，尚需於施工中再做進一步詳細之調查。

## 2.2 輔助坑道需要性之評估

為期對於坪林隧道之地質、施工方法、工期及施工成本等能有更精確之掌推，輔助坑道需要性之評估為規劃階段重要之一環。針對坪林隧道之特性，評估之主要項目包括豎井、導坑及施工橫坑等。

### 2.2.1 豎井

通風為長隧道，尤其是公路隧道建設必要考慮之重點，以期確保用路人有足夠之新鮮空氣。一般長隧道為滿足通風需要，除利用車行之主坑道本身為通風廊道外，尚需設置若干輔助坑道，以滿足通風之需求，而豎井通常即為較經濟而可行方案之一。

規劃階段對於豎井需要性及可及性的評估重點，主要為豎井設置數量、總長

度及豎井口施工之可及性等, 而評估之依據除通風的要求外, 地形為另一重要之影響因素。

坪林隧道於路線評選階段, 針對豎井之評估曾研擬數種不同方案, 最後主要基於總長度最短之考量, 而決定設置三處豎井(詳如圖一), 深度分別為 325m、286m 及 430m。

### 2.2.2 導坑

由於地質調查已事先了解坪林隧道之地質甚為複雜, 且長度亦達 12.9km, 故於大斷面之車輛通行主坑(斷面積約  $140\text{ m}^2$ ) 施工前, 是否應以小斷面之前進導坑(Pilot Tunnel)先行施工, 亦應有詳細之評估。針對坪林隧道之特性, 設置導坑主要可有如下之優點:

1. 事先充份了解地質情況, 以降低主坑施工風險。
2. 了解開挖後實際岩體行為, 以回饋於主坑之設計與施工。

3. 預先排除地下水, 以利後續主坑之施工。

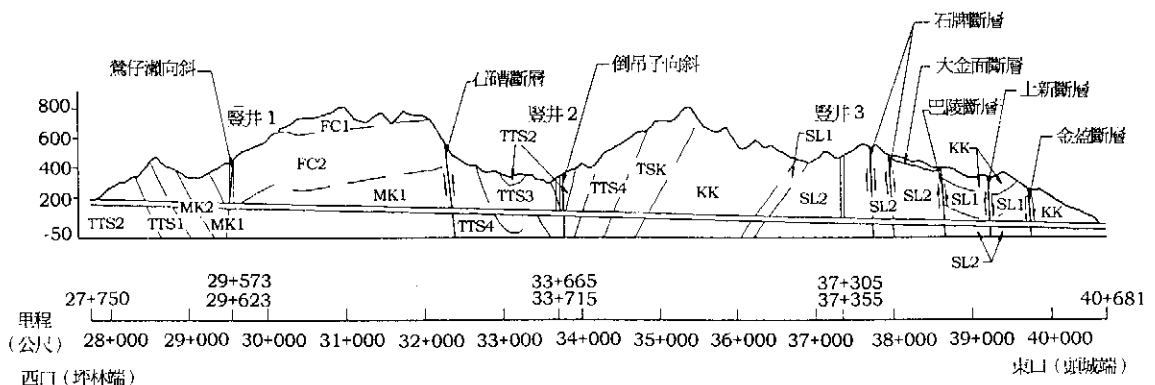
4. 做為通風之輔助廊道。

5. 做為預先處理主坑不良地質路段之通道。

6. 做為完工後之主坑維修與緊急逃生通道。

而導坑設置最主要之缺點為增加該部份之工程費用(按導坑發包之實際金額約 20 億元), 不過因導坑所提供之施工經驗及預先之地質了解與處理, 應可降低後續主坑之施工風險, 進而節省主坑實際之施工費用, 故對於整體工程費用而言, 是否會因導坑之設置而增加, 仍有研討之空間。

經綜合評估後基於前述工程需求之必要性, 最後決定設置一直徑約 5 公尺之地質調查導坑。至於導坑設置之位置亦為評估重點之一, 大致上導坑之位置主要可分為兩種情況, 第一種為將導坑設置於主



#### LEGEND

FC1 枋寮層之厚層砂岩偶夾頁岩

FC2 枋寮層之砂岩與頁岩互層

MK1 媽閣層之厚層砂岩偶夾頁岩

MK2 媽閣層之砂岩與頁岩互層

TTS1 大桶山層之上部細砂岩與硬頁岩(或粉質砂岩)互層

TTS2 大桶山層之硬頁岩偶夾薄層粉質砂岩

TTS3 大桶山層之砂岩夾薄層硬頁岩(或粉質砂岩)

TTS4 大桶山層之下部細砂岩與硬頁岩(或粉質砂岩)互層

TSK 粗粒層之細粒砂岩夾硬頁岩

KK 乾溝層之厚層硬頁岩

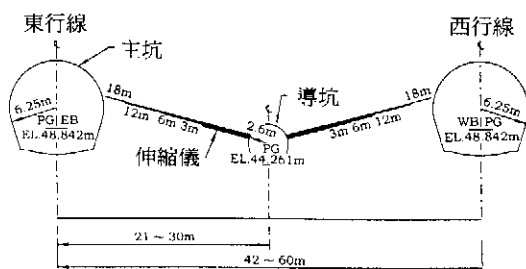
SL1 四稜砂岩之細至中粒砂岩偶夾薄層硬頁岩

SL2 四稜砂岩之厚層石英岩偶夾薄層硬頁岩

/ 地層界線

圖一 坪林隧道沿線地質剖面圖

坑之開挖斷面內，第二種為設置於主坑之開挖斷面外，而於兩主坑之中間位置。前述兩種情況各有其優缺點，第一種情況最主要之優點為工程費較低，最主要之缺點為導坑將因後續主坑之施工而被挖除，故完工後無導坑可用。而第二種情況，最主要之優點為完工後仍有導坑可供做緊急逃生及主坑維修通道等功能使用，而最主要之缺點則為工程費用較高。此外，主坑施工方法亦將影響導坑位置之決定，蓋主坑若採用 TBM 方法施工時，因第一種情況導坑係位於主坑之斷面內，故導坑開挖時施作之支撐工（如鋼肋、岩栓等）將對後續主坑 TBM 施工造成極大之障礙，進而影響主坑之施工工期與成本。由於前述二種情況之工程費用，經評估後差異不大，且主坑最後決定以 TBM 方法施工，故導坑之設置乃決定採用第二種情況，即將導坑設置於主坑之斷面外，而位於兩主坑之中間（如圖二所示）。



圖二 坪林隧道主坑與導坑相關位置圖

### 2.2.3 施工橫坑

以國內目前採用傳統鑽炸法施工之隧道之實際成果評估，其開挖進度一般平均約為 50m/月，以此計算長度 12.9km 坪林隧道之施工工期，若僅能由隧道兩個洞口施工，則約需十年方能貫通。因此是否可增加隧道施工之工作面以縮短工期，為評估施工方法之重要依據。

一般增加隧道工作面之方法為開闢施工橫坑(含斜坑)，或利用豎井與導坑(假設導坑開挖面領先主坑開挖面足夠之距離)等。前述之通風豎井因深度過深，且地處偏僻之山區內，故以此增加主坑施工工作面之效益不高。而若欲利用導坑增闢主坑之工作面時，則為滿足主坑出碴及通風之需求，導坑之開挖斷面需要再加大，增加導坑施工費用及困難度，而當開挖深度愈深，由於材料、機具、人員及碴料進出將愈頻繁，施工之效率將愈低，故利用導坑增闢主坑開挖工作面之效益亦不高。因此另闢施工橫坑便成為增加主坑工作面之重要方法。

施工橫坑評估之主要原則為距離短、坡度小並使增闢之主坑工作面能有適當之開挖長度(即避免增闢之主坑工作面，一邊挖很長但另一邊挖很短)。由於地形之限制，坪林隧道於規劃、設計階段經詳細評估後，僅能覓得一處適當之施工橫坑，以基本設計階段為例，其評估後之施工橫坑約位於坪林隧道中途之位置，長度約 2km，坡度為 8%，據此以做為爾後評估施工方法及工期時之依據。

## 三、設計重點

### 3.1 坑道之配置

主要包括主、導坑之間距及兩主坑間之人行與車行連絡坑道間距之決定。通常兩隧道間之距離愈近，則施工時相互影響之程度愈大，其支撐系統便需考慮額外之補強，而兩隧道之距離愈遠，則隧道之開挖便可視為單一隧道而進行設計。不過對於坪林隧道而言，當主坑間之距離加大時，其連絡兩主坑之人行及車行坑道之長

度亦加長，將增加此部份之工程費用，而隧道出洞口後之用地問題也將因隧道間之距離加大而增加其困難度。此外根據力學分析結果，一般隧道開挖後其周圍地盤將因解壓而造成應力重新分佈，惟當超過約二至三倍隧道直徑之距離後，其應力已幾乎收斂至隧道開挖前之初始應力(Initial Stress)狀態。綜合前述之考量因素後，因坪林隧道主坑之直徑約為 12m，直徑之 2.5 倍為 30m，故坪林隧道兩主坑間之距離(中心至中心)乃定為 60m，同時為減少隧道出洞口後開放路段之用地問題，而將兩主坑間之距離於洞口處縮減為 42m。

由於導坑係設置於兩主坑之間，故導坑與主坑間之影響亦必需加以評估，此部份設計階段係以岩柱(Rock Pillar)之觀念進行分析，即將開挖後原本作用於主坑及導坑之垂直應力，轉移至主坑與導坑間未開挖之岩盤上，以評估岩盤之支撐力是否足夠。根據設計階段調查與試驗所得之力學參數評估後之結果，導坑應不致受後續主坑之開挖而有明顯之損壞，惟仍應於施工階段進行詳細之監測工作，以確實掌握開挖後，岩體及隧道支撐實際顯現之行爲。

關於兩主坑間人行及車行連絡坑道之距離，主要係根據行車安全之需求而決定，原則上人行連絡坑道間距為 350m，車行連絡坑道間距為 1400m，惟為考量主坑開挖後局部地質之影響，乃於細設圖內加註：「若地質情況惡劣，車行連絡坑道得移動 100m，而人行連絡坑道得移動 50m」。

### 3.2 施工方法

由於受地形限制，為增闢主坑施工工作面之施工橫坑不易覓得，而由國外之施工經驗得知，採用 TBM 時之施工進度一般可達 400m ~ 600m/月，故乃有進

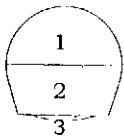
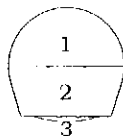
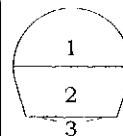
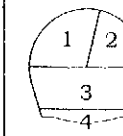
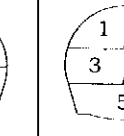
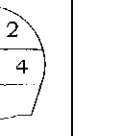
一步評估以 TBM 工法施工之可行性。

TBM 工法可行性的評估，主要係根據地質條件(張文城，民國 85 年 a)，而 TBM 工法的決定，尚需考量與鑽炸法在工期與費用上的差異及環境污染，人力需求等因素加以綜合評估。大致上在可行性研究與路線評選階段，顧問之建議較傾向採用鑽炸法之施工方式，而基本設計及細部設計階段，經進一步之地質調查及各方面之詳細評估後，則傾向於採用 TBM 施工，唯對於東口端(頭城端)較破碎之岩盤，部份專家顧問對於 TBM 工法之適用性，採較為保留之態度。因此綜合評估後，最後導坑及主坑皆決定採用 TBM 之施工方式，並利用 TBM 製造期間(約需一至二年)，先行以鑽炸法施工，以通過部份較差之地質路段，降低施工風險。至於 TBM 本身則採用雙盾身(Double Shield)之設計，同時因坪林端洞口緊臨北勢溪，腹地狹小，且坪林位置較高，故為考量 TBM 組裝所需用地及地下水排除等問題，而決定三部 TBM (主坑兩部，直徑約 11.7m，導坑一部，直徑約 4.8m)皆由頭城端往高處之坪林方向施工。

### 3.3 支撐系統

坪林隧道之支撐系統主要分成兩種，第一種為配合鑽炸法施工並採用新奧工法(NATM)精神而設計之支撐系統，包括岩栓、噴凝土、鋼線網、鋼肋、支撐鋼管等。支撐構件主要係以 Bieniawski 岩體分類法之 RMR 值分成六類後(詳如圖三)，再利用數值分析方法，檢核各類支撐之力學行爲。

第二種支撐則為配合 TBM 施工所設計之預鑄混凝土環片，導坑開挖後每環由四片環片所組成，環片之寬度為 1.2m，

支撐等級	I	II	III	IV	V	VI
開挖順序	 3 階視需要	 3 階視需要	 3 階視需要	 4 階視需要	 5 階視需要	 5 階視需要
輪進	≤ 3.0m	≤ 3.0m	≤ 2.5m	1.5 ~ 2.0m	1.0 ~ 1.5m	0.8 ~ 1.0m
岩栓	C : 25mm φ, L = 4.0m 局部視需要	C : 25mm φ, L = 4.0m 2.0m × 2.0m	C & W : 25mm φ L = 4.0m 2.0m × 2.0m	C & W : 25mm φ, L = 6.0m 2.0m × 1.5m ~ 2.0m	C & W : 25mm φ, L = 6.0m 2.0m × 1.0m ~ 1.5m	—————
噴凝土	C : 5cm W : 5cm	C : 10cm W : 5cm	C : 15cm W : 15cm	C : 15cm W : 15cm I : 15cm	C : 15cm W : 15cm I : 15cm F : 5cm, 視需要	C : 25cm W : 25cm I : 25cm F & T1 : 15cm, 視需要
鋼線網	—————	C : 1.5 mm φ (100 × 100)	C & W : 1.5 mm φ (100 × 100)	C, W & I : 1.5 mm φ (100 × 100)	C, W & I : 2.5 mm φ (100 × 100)	C, W & I : 1.5 mm φ (100 × 100) F & T1 : 1.5 mm φ (100 × 100) 視需要
鋼筋	—————	—————	—————	H100 × 100 × 6 × 8 ρ 1.0 ~ 1.5m	H100 × 100 × 6 × 8 ρ 1.0 ~ 1.5m	H100 × 100 × 7 × 10 ρ 0.8 ~ 1.0m
支撐鋼管	—————	—————	—————	32mm φ, L=2.3 ~ 3.0m, 局部視需要	32mm φ, L=2.3 ~ 3.0m, 局部視需要	32mm φ, L=2.3 ~ 3.0m, ρ 0.3 ~ 0.5m × 0.8 ~ 1.0m

圖三 坪林隧道主坑鑽炸段岩類分類與標準支撐圖

岩體分類及支撐等級關係表

岩體分類	RMR	支撐等級	預估變形量(cm)
I	100 ~ 81	I	0
II	80 ~ 61	II	0
III	60 ~ 41	III	5
IV	40 ~ 21	IV	5
V	20 ~ 11	V	10
VI	10 ~ 0	VI	15

厚度為 18cm，並採用竹節鋼筋。主坑每環則由六片環片所組成，環片之寬度為 1.5m，厚度為 35cm，同時為考量主坑施工時，環片所需之數量極大(預估最大約 312 片/日)，故為配合環片之鋼筋籠，能使用自動化之焊接及組立系統，乃採用高拉力鋼線網( $F_y=5,000\text{kg}/\text{cm}^2$ )，以提高生產速率，並可節省工程費用。

此外由於導坑設置之最主要目的為了解沿線之地質情況，故導坑於 TBM 之施工路段，除採用環片支撐外，仍採用新奧工法之支撐系統，以便於導坑或後續主坑施工時，能隨時進一步了解地質情況。

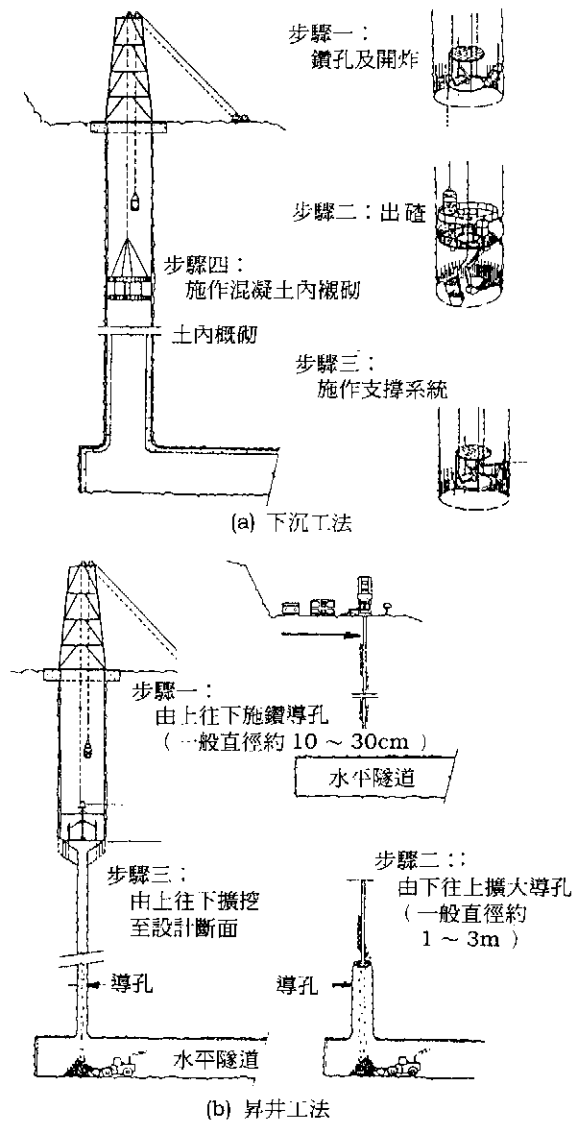
### 3.4 豎井

根據通風之需求，豎井需有進氣井將新鮮空氣送入隧道內及排氣井將隧道內累積之混濁空氣排出隧道外。由空氣需求量計算結果，若進氣井及排氣井獨立施作時，其開挖直徑約需 8m ~ 9m(細設階段豎井斷面最後縮減為 7.0m ~ 7.5m)方可滿足需求，而若將進氣井及排氣井合併成一斷面較大之通風井，中間再以隔牆分離新鮮空氣及混濁空氣，則通風井之直徑將達 12m 以上。以施工觀點而言，豎井之斷面愈小，則施工時作業之空間愈小，故工作效率可能會較差，而以設計及力學之觀點而言，豎井之直徑愈小，則開挖後之穩定性愈佳，而若以完工後維護之觀點而

言, 採用大斷面並有隔牆之豎井, 其維護較為困難, 此外隔牆於施工時, 亦必需有足夠之氣密性, 以避免新鮮空氣及凝結空氣產生對流, 此「氣密性」之考量亦將增加施工之困難度及工程費用。綜合評估前述兩個小斷面及一個大斷面豎井於設計、施工、維護階段可能之影響後, 因採用小斷面時, 其直徑已達 8m ~ 9m, 對於施工效率之影響應有限, 故最後乃決定採用兩個斷面較小之豎井, 即進氣井及排氣井分開獨立施工, 至於排氣井與進氣井的距離, 則定為 50m(中心至中心), 以避免開挖後彼此產生力學上不良之影響。

關於豎井之支撐系統, 原則上亦採用新奧工法之支撐構件, 包括: 岩栓、噴凝土、鋼線網、鋼筋及支撐鋼管等, 不過由於豎井施工時人員、材料與設備的進出, 皆需仰賴吊裝設備, 效率及安全性皆遠較水平隧道之施工為差, 因此支撐系統乃考量以噴凝土配合岩栓或噴凝土配合鋼筋之型式為主, 原則上於同一開挖輪進, 不同時採用噴凝土, 岩栓及鋼筋三種支撐構件。

由於坪林隧道之豎井, 最深達四百多公尺, 且根據地質調查結果, 可能存在多處之剪裂破碎帶, 並蘊含豐富之地下水, 因此對於施工方法的評估便有其必要性。一般豎井之施工方法大致上可分為下沉工法(Sinking Method)及昇井工法(Raising Method)兩種, 圖四為兩種施工方法之示意圖。基本上下沉工法, 係由上往下一次全斷面開挖, 渣料需利用吊桶由豎井口運出, 此外若遭遇大量地下湧水時, 尚需有足夠能量之抽水設備, 將地下水由開挖面抽至豎井外。昇井工法則需先有一水平隧道到達豎井設計之井底位置, 再鑽一較豎井設計直徑為小之導孔(一般約 1m ~ 3m), 最後再自上往下一次擴挖至豎井



圖四 豎井施工方法及步驟示意圖

設計斷面, 由於此時水平隧道已先行到達豎井底部, 故開挖之渣料可利用重力經由導孔掉入水平隧道, 而由水平隧道運出, 此外地下水亦可藉由重力由導孔經水平隧道排除。下沉工法及昇井工法之優缺點大致上可說明如下:

1. 下沉工法之渣料需由下往上運出豎井, 安全性及效率較差, 尤其是深度愈深時愈明顯, 而昇井工法之渣料雖可經導孔



由水平隧道運出，但施工過程渣料可能會有堵塞導孔之情形，此時清除導孔堵塞工作之困難度與安全性便需有特殊之考量。

2. 下沉工法之地下水需由下往上抽除，當湧水量過大或豎井深度過深時，此項工作之困難度將甚高，甚至無法處理而將豎井之開挖面淹沒，故採用下沉工法時，事先探知地下水之位置與水量，並以隔幕灌漿之方式，將地下水阻隔於豎井開挖面之外為甚為重要工作之一。採用昇井工法時，地下水則可藉由導孔自然排出，而排除對豎井開挖面的施工影響，惟地下水豐富的地層其岩盤通常甚為破碎，故導孔在該區段可能極易崩坍，而使導孔的斷面擴大，進而影響後續豎井之施工及其岩盤之安定性，故採用昇井工法時，對於導孔孔壁的穩定，尤其是在破碎岩盤區段，便需有特殊之考量。

3. 採用昇井工法時，豎井底部需先開挖一水平隧道，以坪林隧道而言，即導坑需先到達豎井底部預定之位置，否則便無法採用此種工法。

坪林隧道豎井之施工經考量前述兩種施工方法之特性與優缺點，並參考實際調查後之地質情況綜合評估後，認為昇井工法應為較有利之施工方式，惟為考量施工單位之專業能力與經驗，開挖後的實際地質情況及導坑是否可如期到達豎井之井底位置等因素後，決定兩種施工方法皆可採用，而由施工單位做最佳之建議。

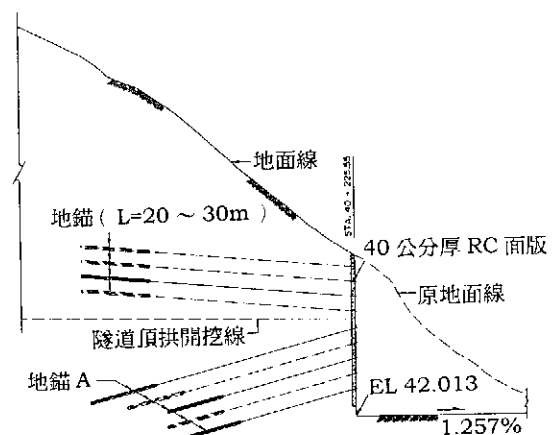
## 四、施工

### 4.1 洞口段

坪林隧道於洞口處，兩主坑斷面中心點間之距離僅有 42m，兩主坑中間位置

並設置有一導坑，主坑側壁與導坑側壁實際上僅餘約 12m 之距離，故洞口施工時的穩定性便需特別注意。由於坪林端洞口處之岩盤由地質調查得知屬巨塊之砂岩，且無順向坡之問題，而風化層亦僅有 2 ~ 5 公尺，故洞口開挖時，採用 1 : 5 (H:V) 之邊坡坡面，而保護坡面之岩栓及噴凝土則於開挖後，根據實際地質情況視需要而施作。至於頭城端洞口處之岩盤，則因風化層深達 10 ~ 30 公尺，因此必須配合地錨之施作以穩定邊坡。

圖五為坪林隧道頭城端主坑原設計之洞口邊坡穩定措施，原設計時之構想為洞口處先以長度約 20m ~ 30m 之地錨(每根地錨之承载力為 30t ~ 60t)全面性穩定後，隧道再開挖進洞。不過現場實際施工時，施工單位評估為完成前述之穩定措施，至少需半年以上之時間，故為爭取工期，乃決定於施作較簡易之岩栓(長度 3 m ~ 6m)等措施後，兩主坑即先行先後開挖進洞(此時導坑已開挖約 500m)。兩主坑開挖進洞後初期，邊坡即產生明顯的移動，根據埋設於邊坡上之地表觀測點測



圖五 坪林隧道東洞口原設計支撐剖面圖

得,其最大之水平滑動量約達 50cm(張文城,民國 84 年),為防止邊坡持續產生滑動而破壞,並避免進一步危及隧道洞口段之穩定性,乃於兩主坑隧道開挖之同時,進行多項之補強措施,包括原設計岩錨之施作、隧道洞口段灌漿補強及洞口處堆置砂包等。根據前述之傾斜儀及其後增設監測系統(如地表觀測點,隧道頂拱沉陷觀測點)量測之結果顯示,該洞口於採取前述之補強措施後已再次趨於穩定。照片一為該洞口完工後之實景。



照片一 坪林隧道東洞口保護工完成後實景

由坪林隧道頭城端洞口段之施工經驗得知,二個直徑 12m 之主隧道,距離 42m,中間再加一直徑約 5m 之導坑而於風化層厚度達 10 ~ 30 公尺,而覆蓋層僅有 2 至 3 公尺之條件下,直接開挖進洞是可行的,唯為考慮洞口段邊坡及隧道之穩定性,保護措施(如岩錨)應於進洞前先行施作,而若基於爭取工期之考量,隧道需先行進洞,則隧道進洞後,亦應儘速進行必需之保護及額外之補強措施,以確保施工之安全。

#### 4.2 頭城端鑽炸段

為配合 TBM 製造所需等待之時間,並挖除坪林隧道頭城端部份地質較差

之路段,導坑及主坑於頭城端分別預定以鑽炸法開挖約 1,000m 及 800m。根據實際開挖後之地質顯示,其岩盤為破碎之硬頁岩,與設計階段調查所得之結果相同,至於岩盤之破碎程度,開挖後主要為 IV、V、VI 類岩盤,較設計階段預估主要為 IV、V 類岩盤略差。由於導坑先行開挖且斷面較小,故導坑以鑽炸法施工時,並未發生特殊之施工狀況,但因開挖進度較預期者為慢,故於開挖 522m 後即停止,而改以 TBM 工法施工。

導坑鑽炸法完成,並以 TBM 工法施工後,主坑方以鑽炸法開始施工,而受主坑開挖之影響,即發生導坑鑽炸段噴凝土嚴重龜裂,鋼筋挫曲, TBM 段環片破裂等現象,而主坑本身大部份路段亦發生鋼筋挫曲,噴凝土龜裂甚至岩盤坍方等情形。根據主、導坑監測之結果,導坑因後續主坑開挖所導致之變形量甚至有超過導坑本身開挖時所產生之總變形量之現象,而主坑本身開挖所產生之變形量(不包括因局部地質弱帶而產生坍方之位置),最大亦超過 45cm(頂拱沉陷)。造成此種現象之可能原因可歸納為以下幾點:

1. 實際岩盤之地質情況較設計階段調查所得者略差。

2. 實際岩盤顯現之力學行為,較設計階段所採用之設計參數預測者為差,致使原設計之標準支撐工之支撐力可能不足。

3. 導坑 TBM 工法施工段,因遭遇相當大之困難(張文城,民國 83 年),致使 TBM 之機頭無法轉動而受困後,需於導坑旁再開挖迂迴坑道(斷面約為 2m × 2m,長度約 30m ~ 60m),繞至 TBM 機頭前,以協助 TBM 脫困,此等迂迴坑之開挖,更增加了主、導間岩盤之不穩定性。

4.其他施工因素，主要包括超挖，開挖後仰拱未及時閉合及補強措施施作之時機太晚等。

前述因主坑開挖而導致主、導間岩盤及支撐工不穩定之現象，經採行各種補強措施後(如加設岩栓，將岩栓長度由6m加長為9m，加噴噴凝土、鋼肋由H100×100提高為H150×150甚至H200×200及灌漿等)已漸趨穩定，至於導致此種現象真正的原因及最後長期的補強穩定措施，則仍待進一步綜合地質、設計及施工因素，並佐以監測成果加以評估後予以確認。

### 4.3 TBM工法施工

導坑以鑽炸法完成522m後，即改以TBM工法施工，而TBM施工之前三年僅完成約一公里之開挖，較設計階段預定之進度落後許多。落後之原因係TBM機頭因周圍岩盤坍方掩埋機頭，致使機頭無法轉動而受困(張文城，民國85年b)。在TBM開挖之前一公里共計發生十次受困之事件，每次受困皆由導坑旁開挖一小断面之迂迴坑，繞至機頭前方將機頭清出，恢復機頭轉動而脫困。每次處理時間少則一至二個月，最長曾達九個半月。

造成TBM受困之原因，可從施工者之技術與經驗，TBM設備本身之適用性及地質之適應性三方而探討。經施工階段邀請多方面之專家與學者評估後，正、反方面各有定見。以地質觀點而言，導坑TBM施工的前一公里，大致上於設計預定之里程通過了金盈斷層(先後受困兩次)及上新斷層(未受困)，而通過金盈斷層前岩性主要為破碎之硬頁岩，通過金盈斷層後主要為破碎之石英砂岩，此亦與設計階段預期者大致吻合。金盈斷層前約300m之

硬頁岩路段，TBM計受困七次，受困時機頭位置皆有一剪裂破碎帶，厚度約數十公分，但通常幾乎都沒有明顯之地下水存在。金盈斷層後約700m之石英砂岩則共計受困三次，每次受困機頭位置皆有一明顯厚達數公尺甚至十公尺以上之破碎帶存在，並伴隨大量之地下水湧入(最高曾達186l/sec)，惟此等造成受困疑似斷層之構造及異常大量湧水之位置，受限於調查技術，設計階段並未發現，施工階段雖亦曾施作前進探測孔及反射法震測，惟仍受限於地質構造之複雜性，或解析研判尚未累積足夠之經驗，或調查技術本身的限制，故事先亦未能完全掌握TBM開挖面前方之地質情況。

關於TBM施工時詳細受困之原因，機具之改善，遭遇之困難及受困之處理方式，可參考(張文城，民國83年及85年a,b)等相關文章之說明。

由於導坑TBM開挖遭遇相當大的困難，致使後續主坑TBM的施工亦受到影響，例如於導坑TBM受困處，經由導坑進行該路段主坑之地質處理，以利爾後主坑TBM能順利通過，所耗費之時間與費用，亦遠較當初設計階段預期者高出許多。不過可以確定的是，導坑原先設置之主要目的，即為事先充份了解地質情況，以降低後續主坑TBM之施工風險與成本，是故導坑遭遇的困難愈多，表示設置導坑並採用TBM之施工應可肯定。

## 五、結論與建議

對於坪林隧道而言，土工技術之應用，於規劃、設計及施工階段，皆扮演至為重要之角色，尤其是規劃及設計階段，

充份之調查與地質情況的掌握，實為爾後工程是否能有效控制成本及掌握工期之先決條件。

以洞口段而言，避開原本不穩定之邊坡坍方區域，將可使施工風險明顯降低，此外隧道洞口邊坡保護措施通常是必需的，若欲縮短工期而於施作保護工之前先行開挖進洞，則除事先可行性的評估為必要工作之外，施工時相關監測作業的佈置及隧道開挖同時，邊坡相關保護與補強措施的儘速施作亦至為重要，以避免為提早開挖進洞而衍生其他更複雜之技術問題。

以鑽炸段而言，主坑開挖後對於主、導坑周圍之岩盤及其支撐工所造成明顯之影響，正表示多孔隧道併行開挖時，無論是設計或施工者，對於隧道間之互制行為，皆應有所了解，並預謀適切因應之道。

以 TBM 段而言，規劃、設計階段的地質調查工作，因技術上的限制，可能無法完全掌握實際地質情況，尤其是影響 TBM 施工成敗甚巨之地下水水量、水壓與水源。不過規劃、設計階段對於施工階段之地質調查工作如能預先妥適及充份之研擬並訂定(如於隧道每一固定距離施作約 300m 長之長距離水平鑽孔或施作其他地球物理調查工作等)，則對於開挖面前方之地質當更能有效而準確之掌握並預做因應，以降低施工風險。此外，對於長隧道工程而言工期常常是重大工程最無法掌握與為人所詬病者，也常常使工程遭遇困難時，技術性與非技術性因素彼此糾纏不清。因此工程師如何秉持其專業、經驗與良知，合理的訂定工期，實為吾人認為欲使工程回歸技術領導最重要之正本清源之道。

## 參考文獻

- 張文城(民國 81 年)，「北宜高速公路工址調查技術」，現代營建，第 25 ~ 32 頁。
- 張文城(民國 83 年)，「北宜高速公路坪林隧道導坑工程 TBM 施工灌漿及地質調查工作概述」，岩盤工程研討會，中央大學，第 59 ~ 67 頁。
- 張文城(民國 84 年)，「隧道洞口開挖穩定問題之個案分析」，第六屆大地工程學術研討會，第 903 ~ 912 頁。
- 張文城(民國 85 年 a)，「全斷面隧道鑽掘機(TBM)之規劃、設計與施工」，岩石隧道施工技術研討會，第 145 ~ 156 頁。
- 張文城(民國 85 年 b)，「全斷面隧道鑽掘機(TBM)於破碎及湧水帶施工之探討」，現代營建，199 期，第 11 ~ 17 頁。
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973), "Engineering Classification of Rock Masses", *Transaction, South African Institution of Civil Engineers, Vol.5, No.12.*
- CHANG, W.C. AND CHENG, W.C. (1992), "In Situ Stress Measurements and Their Application for Tunnel Design in Northern Taiwan", *ISRM Symposium, Eurock '92, Thomas Telford, London, pp. 257-262.*
- DEERE, D. U. (1964), "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose", *Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol.1, No.1.*
- OU, C. D. AND CHANG, W. C., (1996) "Behavior of Rock Mass During Excavation of a Twin Tube Roadway Tunnel with Pilot Tunnel in Metamorphic Rock Formation", *ISRM Symposium, Eurock '96, pp. 1033-1039.*

本文之討論意見將在後期刊出，請您將意見於兩個月內寄交本刊編輯委員會。

85 年 7 月 18 日 收稿  
85 年 8 月 21 日 修改  
85 年 8 月 23 日 接受