

# 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

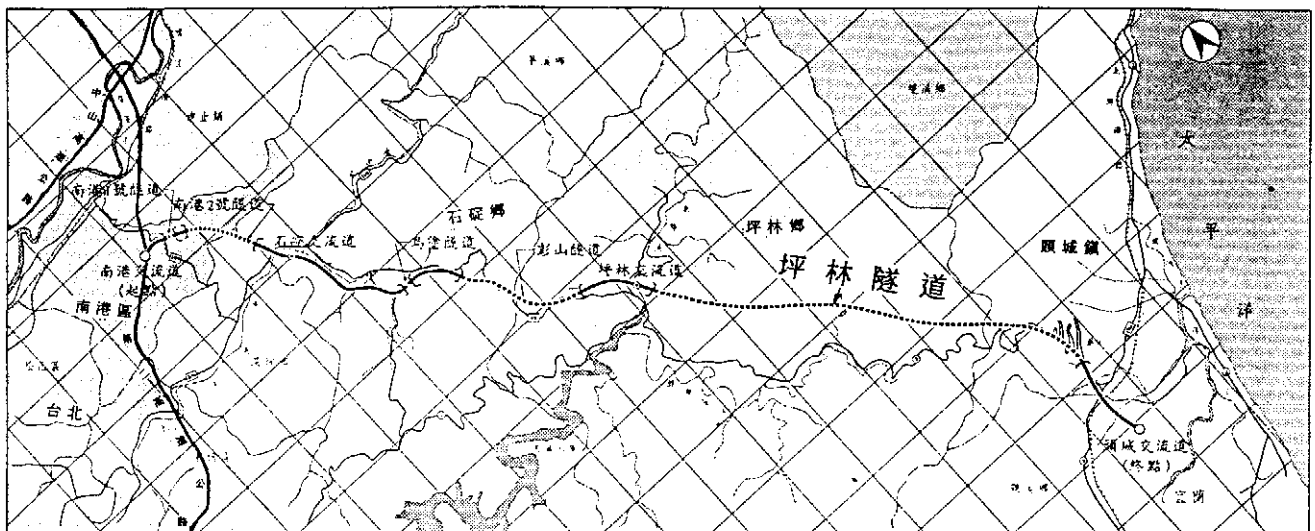
張文城  
國道新建工程局

## 摘要

坪林隧道長約13公里，為期事先了解地質情況，故於兩坪林主隧道間開挖一地質調查導坑，直徑約4.8公尺，採用全斷面隧道鑽掘機（TBM）工法施工。為求TBM能順利開挖，故開挖時對於開挖面前方地質之調查、判斷與處理相當重要。本文內容主要即在說明坪林隧道導坑工程所採用之地質調查方法及其成果，並概述TBM前方遭遇不良地質情況時之灌漿工作。

## 一、工程概述

為因應台北都會區之急遽發展，及促進東部區域之繁榮，且有鑑於台北與宜蘭間，因中央山脈之阻隔，交通至為不便，故政府乃決定著手興建北宜高速公路，以縮短台北與宜蘭間之行車時間，加速東部區域之開發與繁榮。北宜高速公路以台北市南港區為起



圖一 北宜高速公路路線圖

點，經石碇、坪林兩鄉而終止於宜蘭頭城鎮（如圖一），目前並計劃延伸至蘇澳港。自南港至頭城全線長約31公里，為雙向四車道之公路。由於穿越崎嶇之山區，因此隧道總長度達20公里，其中最長之坪林隧道長12.9公里，為目前東南亞最長之公路隧道。

坪林隧道西半段路段，岩性主要為砂岩、頁岩、硬頁岩及砂頁岩互層，岩性較佳，東半段路段則主要為硬頁岩及四稜砂岩，岩質較為破碎，惟新鮮之四稜砂岩，其單壓強度可達 $2,000\text{Kg}/\text{cm}^2$ 以上。本隧道最大之覆蓋層厚度超過七百公尺，預計將通過石槽、石碑、大金面、巴陵、上新與金盈等六條主要斷層。

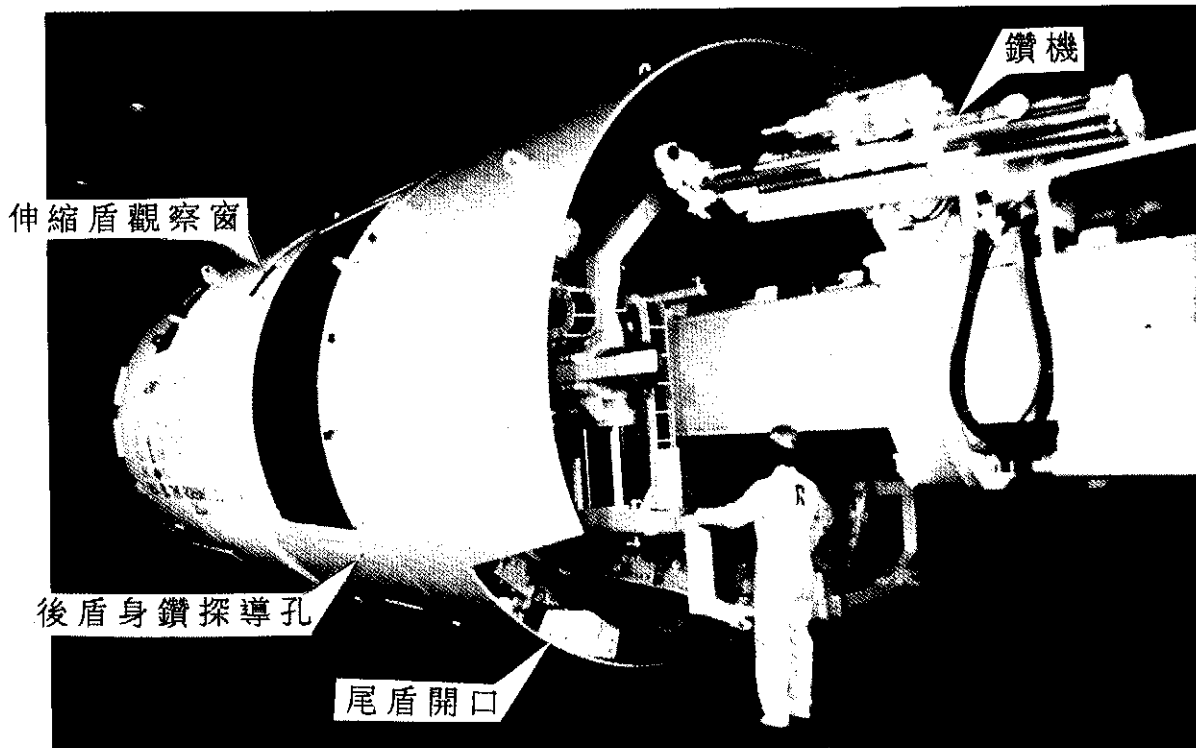
為求縮短工期，減少環境污染，降低勞工需求壓力及提昇國內之隧道施工技術，本工程乃於國內首次引進全斷面隧道鑽掘機（TBM）。坪林隧道主坑將採用兩部TBM，由頭城端之兩個洞口同時向坪林施工。此外，為確保坪林隧道主坑施工時之安全，在二主坑間設置一地質調查導坑，該導坑約略與主坑平行，長度與主坑相同，直徑為4.8公尺，亦採用TBM施工，以期事先了解地質狀況，並預為處理不良之地質路段。坪林隧道導坑之TBM係採用雙盾身之型式（如圖二），開挖後於盾尾進行支撐工作，支撐系統視地質情況分為預鑄混凝土環片及NATM支撐兩種。

## 二、地質調查

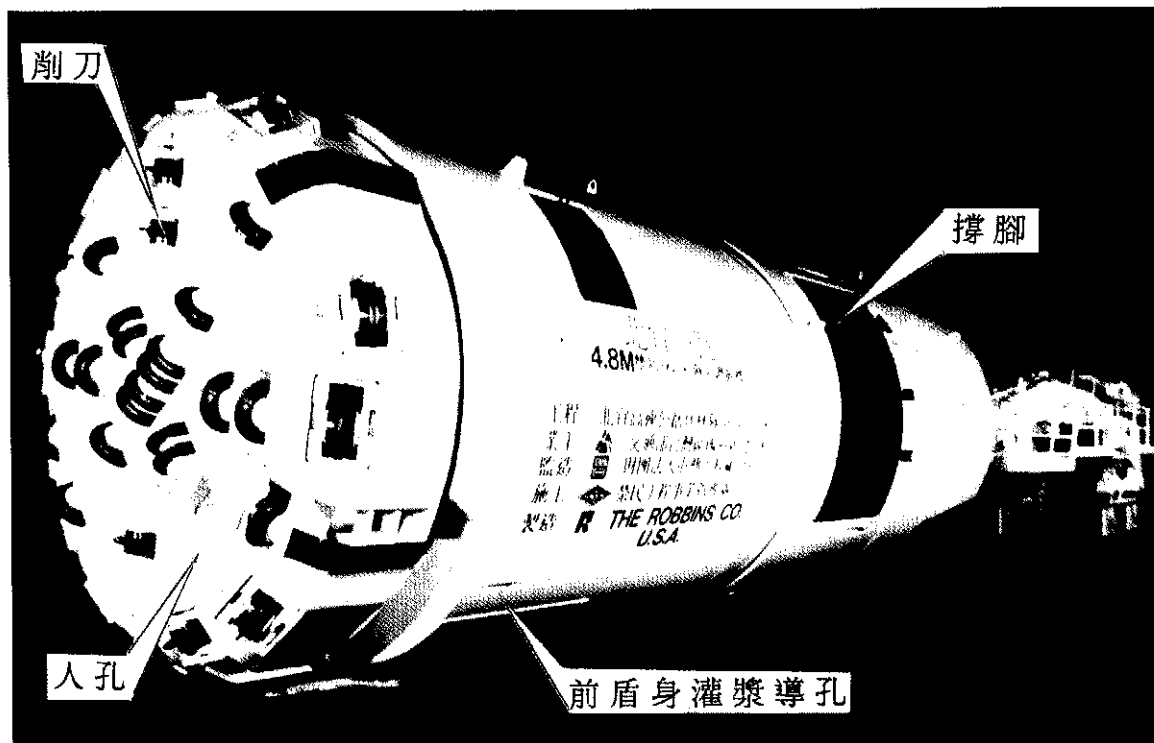
### 2.1 鑽探

北宜高速公路於規劃設計階段已進行相當程度之地質調查工作（其費用約佔總工程費之0.5%，[1]），因此對於大區域之工程地質已有充份之了解。唯若欲設計一TBM，使其功能能儘量應付各種不同之地質情況，則其從設計、製造、組立乃至現場調整及操作，勢必更趨於複雜及困難，因此一般TBM設計及施工時，對於各種地質情況，未必能完全克服。為求TBM能順利開挖，故開挖時對於開挖面前方地質之調查，判斷與處理便相當重要。為達前述之目的，坪林隧道導坑TBM施工時，即規定於TBM開挖時，須於TBM前方進行不取岩心之前進探測工作，每次探測孔之孔深至少為30公尺，且已探測之深度需經常維持在開挖面前方10公尺以上。至於取心探查則視不取心探查結果再視情況決定是否施作。為執行前述之探測工作，TBM於尾盾即設置有兩部鑽機（如圖二所示），鑽孔時成果則記錄於前進探查記錄表上（如圖三）。本工程於施工初期，由於地質、設備及操作技術之因素，施鑽成果不盡理想，為完成30公尺之不取心鑽孔，常須花費一天以上的時間。鑽孔時所遭遇之困難，除一般因塌孔、鑽頭偏移、迴水率過低等所造成者外，主要尚包括：

(1)鑽機對孔不易：由於鑽機需經過TBM後盾身預留之鑽探導孔（如圖二）施鑽，該導孔與水平軸之夾角僅約 $6^\circ$ ，孔徑為80mm，且長達2.1m，故施鑽時鑽機需緊貼於盾



圖二 (a) 坪林隧道導坑 TBM (後視)



圖二 (b) 坪林隧道導坑 TBM (側視)

殼上，對孔不易且鑽桿偏移時極易使鑽桿（或套管）僅貼於導孔，造成施鑽時阻力增加及拆桿之困難。

(2)鑽機及鑽桿固定（穩定）不易：由於鑽機係置於一迴轉架上（如圖二），且鑽機之重量相當大，故施鑽過程中（尤其是兩部鑽機同時施鑽時），極不易維持於原來之位置，故不易使鑽桿保持直線鑽進。此外鑽機與導坑孔間之鑽桿最大時約有2公尺長係為懸空狀態，鑽桿之穩定性差，此亦造成施鑽極大之困難。

為改善前述施鑽過程所遭遇之困難，除改善鑽機之穩定性，增加鑽機之能量及功能外，導孔亦由原來之80m/m擴大為94m/m，目前施鑽效率已略有提昇，大改上可維持5~6m/時之施鑽效率。

由於不取心之前進探查，僅能由迴水及岩屑之觀察對地質做概略之判斷，受個人經驗及主觀意識之影響甚大，況且為完成30公尺之前進探查孔須花費數小時，甚至一日以上之時間，尤其是地質愈差，所花時間愈多，而TBM在此惡劣地質下停機過久，所必須承擔之風險亦相對提高。此外，若地質情況較佳時，TBM應可順利開挖快速前進，故是否仍須花費數小時時間進行前進探查，似有研究之必要。理論上，TBM於設計時應已考量地質資料使TBM可順利通過大部份之路段，因此根據前述之說明，TBM施工時是否全線皆須進行規則性之不取心前進探查，或是僅於地質情況較特殊處（如斷層、瓦斯及大量湧水段）方進行不取心（或取心探查），應有進一步研討之必要。

## 2.2開挖面之地質記錄

坪林隧道導坑主要功能之一為預先了解地質情況，以提高主坑施工之安全性，而導坑以TBM施工時，若以環片支撐，則因環片係於盾殼內安裝，故僅有尾盾仰拱開口部份及伸縮盾觀察窗可看到局部出露之岩盤（如圖二），若單由此局部出露之岩盤，欲獲得完整可信之地質記錄似嫌不足，因此導坑TBM在設計支撐構件時，除採用環片支撐外，亦採用NATM之支撐構件，即由出露之岩盤依岩體分類評分之結果，以岩栓、噴凝土及鋼支保之組合分為五種支撐等級，而岩體評分及地質記錄（地質記錄表格如圖四所示）則於TBM通過後，於尾盾後之岩盤出露時完成，並確定其支撐類別。

本工程採用TBM施工至今，由於岩盤大部份皆處於較差之地質情況，故截至目前為止仍全部採用環片之支撐，地質資料則反而主要由因施工需要而於導坑旁所開挖之迂迴隧道（By Pass Tunnel）之開挖面之地質記錄所獲得。由於TBM施工所強調者為快速開挖推進，根據目前之施工記錄，TBM開挖一輪進1.2m所需之時間約為30~60分鐘，因此若欲於此短時間內同時完成支撐工作，則其支撐構件所需之材料必須有系統且迅速的運送至開挖地點，因此爾後若TBM施工實際需使用NATM支撐時，是否可如當初預期由尾盾通過後出露之岩盤（約1.2m寬之圓環），順利進行地質記錄，並確定岩體評分等級以

工程名稱：坪林隧道導坑工程

一次 前進探查孔紀錄表(全斷面鑽掘機法)

孔號：\_\_\_\_\_

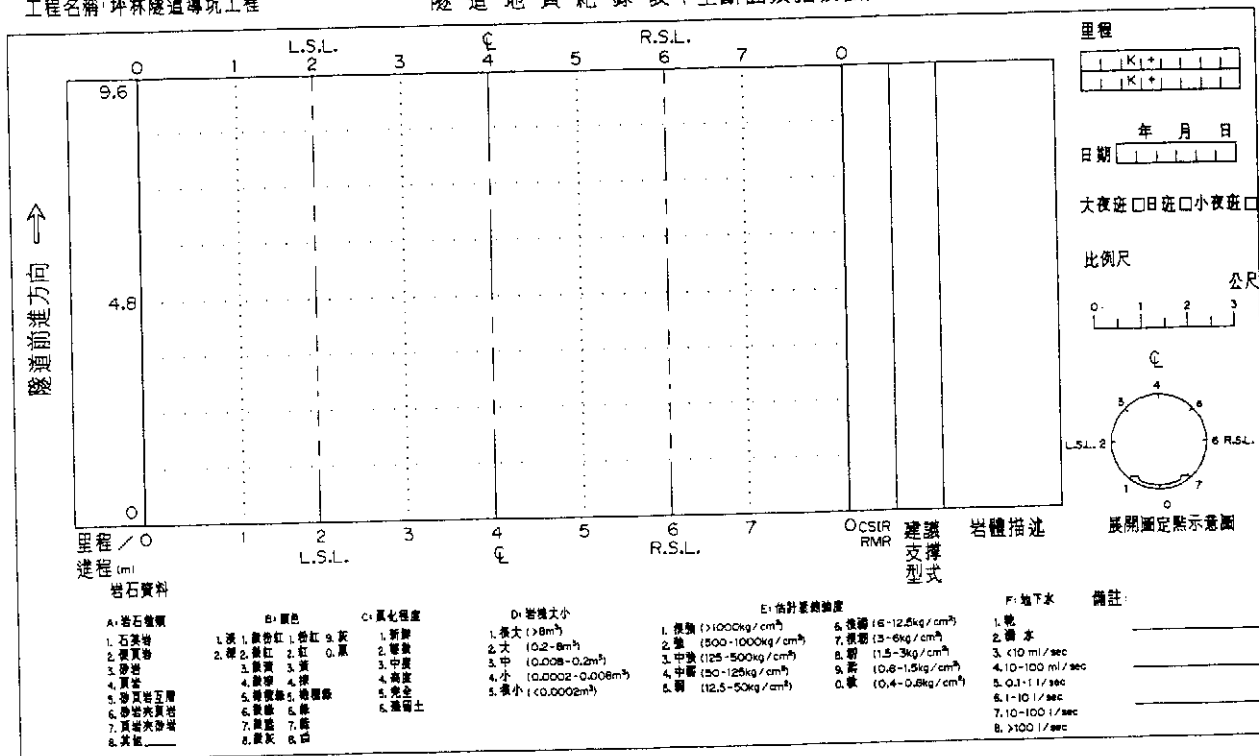
|   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 孔口里程  | 孔位    | 日期    | 開始時間  | 結束時間  |
| 鑽探方式 <input type="checkbox"/> 不取岩心 <input type="checkbox"/> 取岩心 | 孔徑    | 公厘    | 預定孔深  | 公尺    |
| 深度 / 里程 (m)   | 0 K+  | 5 K+  | 10 K+ | 15 K+ |
| 岩性  | 20 K+ | 25 K+ | 30 K+ |       |
| 各段鑽孔時間(分)   |       |       |       |       |
| 坍孔描述  |       |       |       |       |
| 迴水描述  |       |       |       |       |
| 岩層描述  |       |       |       |       |
| 岩體強度  |       |       |       |       |
| 岩心品質指標 (%)  |       |       |       |       |
| 含泥程度  |       |       |       |       |
| 湧水率 (l/sec)   |       |       |       |       |
| 岩體等級初評  |       |       |       |       |
| 建議支撐類別  |       |       |       |       |
| 備註  |       |       |       |       |

圖三 前進探查記錄表

工程名稱：坪林隧道導坑工程

隧道地質紀錄表(全斷面鑽掘機法)

編號：\_\_\_\_\_



圖四 隧道地質記錄表

為支撐施工之依據，仍有待進一步之確認。

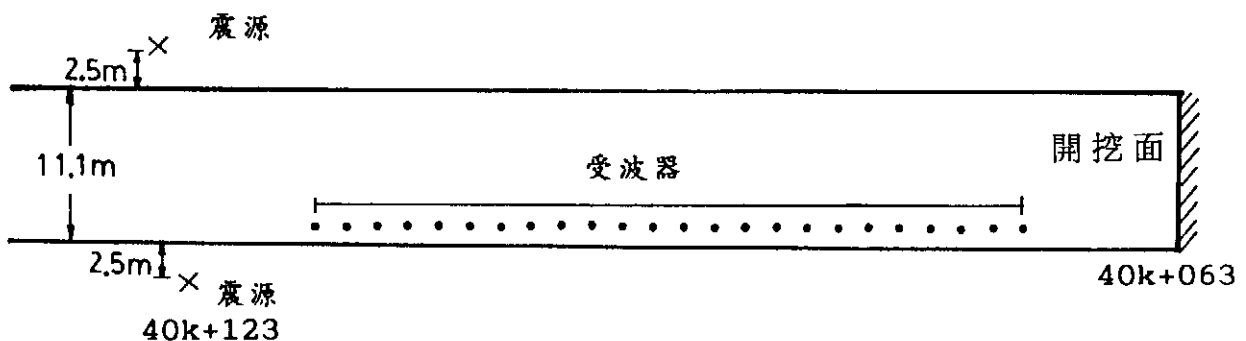
### 2.3 震測

TBM 施工時對於前方地質情況之了解有其必要，尤其是特殊不良之地質情況。前已述及一般傳統之前進鑽探方法，不但費時，且常無法完整掌握前方之地質情況，尤其是地質情況不佳時，TBM 更需承擔停機等待之施工風險，因此若能以地球物理探測之方法，迅速、廣泛的初略了解TBM 前方之地質情況，則應不失為一折衷之方案。

實務上，地球物理應用於隧道內前方地質之探測，目前仍在研究階段。本工程曾先後兩次於坪林隧道主坑及導坑內進行反射法震測，以了解TBM 前方之地質。圖五為坪林隧道主坑進行反射法震測時之測線佈置圖。震源約在開挖面後方60公尺處，24個受波器則置於開挖面與震源之間。由主坑及導坑開挖後實際之地質與震測所預測者比對之結果顯示，利用震測以預測前方之地質，仍有待判釋經驗之累積以提高其準確性。

TBM 開挖時是否順利，受地質因素之影響甚大，為避免TBM 受困，應密切注意之地質因素主要包括破碎帶（斷層）之位置，厚度及含水層之位置。目前於隧道內採用震測法以判釋前方之地質，主要遭遇之困難包括(1)速度變化及反射面位態之資料無法準確推估，造成推估破碎帶之位置及厚度與實際無法吻合，及(2)如何由震測剖面所見之反射訊號，來判斷其是否為破碎帶，或僅為一普通地層岩性之不連續面。尤其是如何由反射訊號來推估含水層之位置，更有待進一步判釋經驗之累積。

由於以震測法來探測隧道開挖面前方之地層構造，有前述之困難尚待克服，因此在尚未累積足夠之判釋經驗前，似乎無法完成取代前進鑽探之功能，不過因震測可迅速的獲得開挖面前方一、二百公尺的震測剖面，此為鑽探所遠不及者，故震測法應仍有進一步推廣之價值。



圖五 坪林隧道主坑道震測線配置圖

## 三、灌漿

### 3.1 TBM 內灌漿作業

當由前進探查得知TBM 開挖面前方有破碎帶時，其應變方法之一即為進行灌漿作業。由TBM 內進行灌漿作業時，可藉由後盾身之鑽探導孔或前盾身之灌漿導孔進行（如圖二），惟前盾身之灌漿導孔，由於作業空間之限制，鑽機無法到達以進行鑽孔作業，因此僅能於TBM 盾身周圍施灌漿液，若欲於TBM 前方進行灌漿作業，則須利用後盾身之鑽探導孔進行。當欲藉由前述之後盾身鑽探導孔進行灌漿作業時，必須特別考量以下兩點：

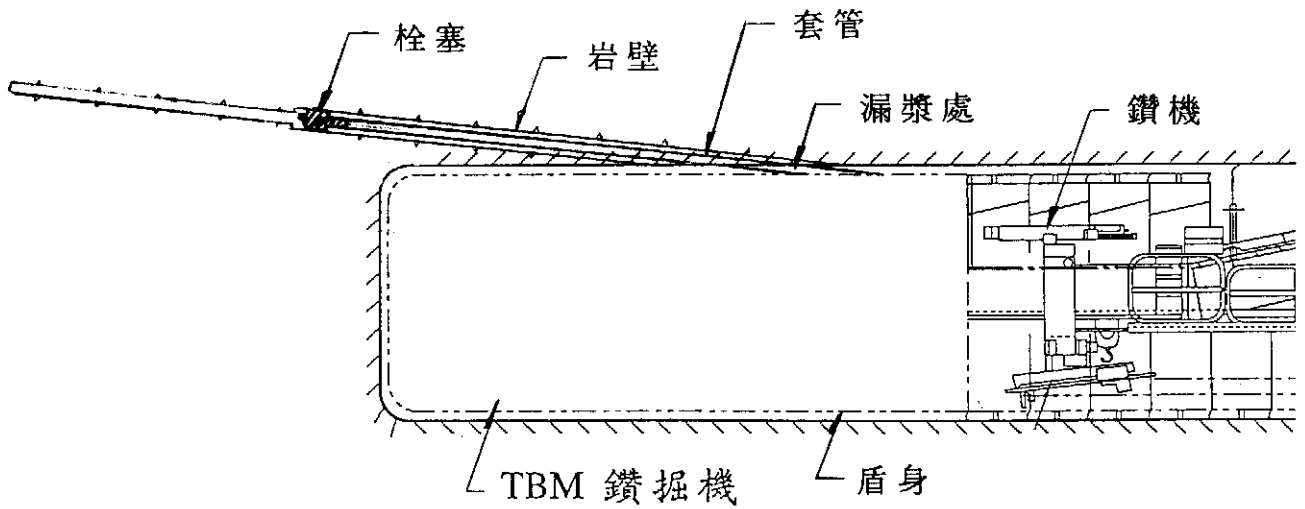
(1)導孔與水平軸夾角為 $6^\circ$ ，即每前進10公尺時鑽孔與水平軸之垂直距離約為1公尺。由於導孔之孔口至TBM 機頭的距離約為10公尺，故當鑽孔鑽至TBM 機頭前方20公尺（即離導孔孔口處30公尺）時鑽孔與水平軸之垂直距離已達3公尺，此為佈孔考慮灌漿範圍時，所需特別注意者。

(2)由於TBM 開挖後岩壁與盾殼間留有空隙，而鑽孔後因作業人員無法通達盾身外部至岩壁孔口處進行孔口封堵工作，故漿液便極易由岩壁之孔口處流先（如圖六），此點為灌漿進行時應特別注意者。

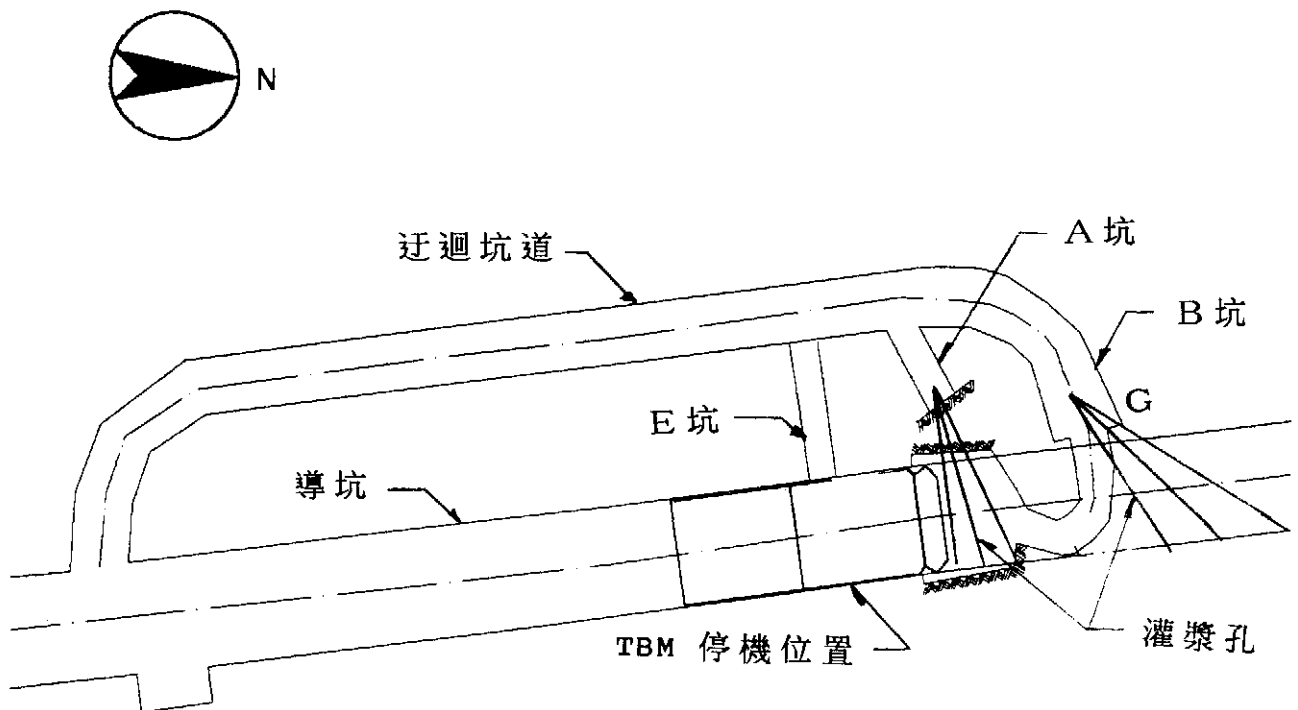
一般實務上於普通灌漿壓力下（例 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ），大致上以灌漿之有效範圍約為灌漿點周圍2~3公尺為原則，以進行佈孔工作。由於前述(1)之限制，因此當於TBM 內進行灌漿作業時，灌漿孔之深度便不宜超過機頭前方20~30公尺。此外由於有(2)之限制，故如何於灌漿孔內有效的封堵漿液，便成為由TBM 內進行灌漿作業時成敗之關鍵。本工程曾於TBM 內進行幾次灌漿工作，不過成效皆不甚理想，其主要原因便是無法有效封堵漿液以進行壓力灌漿。目前根據施工經驗，比較可行有效的封堵漿液方式，大致上如圖六所示，即先以鑽桿配合套管鑽至適當之深度後，改僅以鑽桿鑽至預定灌漿之深度，而後退出鑽桿，套管則留於孔內並退出約50公分，最後將栓塞（Packer）置入孔內，栓塞之位置係一半於套管內，一半於套管外，如此當栓塞膨脹後，可使栓塞同時緊貼於岩壁及套管，以達到有效封堵漿液之目的。

灌漿作業之成敗，除前述能有效而迅速的進行鑽孔及灌漿工作使漿液不致漏失外，如何配合適當之灌漿材料及灌漿壓力，使漿液能有效的填充於岩盤之孔隙內，亦為一重要關鍵。由於目前TBM 開挖之路段，其岩質主要為硬頁岩，其縫隙常為泥質之細料所填充，而硬頁岩本身亦為緻密之泥質材料所組成，因此於硬頁岩內進行灌漿工作，是否可達到預期理想之效果，仍有待現場實際作業之驗證。

### 3.2 迂迴坑內之灌漿作業



圖六 TBM 盾身內向外灌漿示意圖



圖七 坪林隧道導坑迂迴坑及灌漿佈置圖



本工程施工期間，TBM 曾先後發生數次受困之情形，即TBM 由於岩盤之鬆弛崩落，導致機頭無法轉動進行開挖工作。為使TBM 能脫困，採用之方法為於導坑旁邊開挖一迂迴坑道至機頭前方，將機頭周圍鬆弛之岩盤挖除後，再恢復開挖工作。圖七為導坑 TBM 第一次受困時，開挖之迂迴坑道位置圖。由於TBM 受困時，機頭前方及周圍之岩盤已嚴重鬆弛，故在將其挖除之前，必須於迂迴坑內之適當位置先進行灌漿固結工作，以確保施工安全。如圖七所示，先由機頭前方削刀間之空隙及前盾身灌漿導孔施灌低強度之漿液，環繞於TBM 盾身四周，以保護TBM 盾身，使TBM 不致因後續固結灌漿時遭固結灌漿之漿液咬死，無法推進，然後當迂迴坑道開挖至G點後，再分別於A坑及B坑進行 TBM 機頭周圍及前方鬆弛岩盤之固結灌漿，由於此時灌漿作業係於迂迴坑道內進行，已無前述由TBM 內進行灌漿作業時，鑽探導孔及岩壁孔口封漿之問題，故其灌漿作業與一般之灌漿作業並無多大差別，因此本文便不再多加贅述。

#### 四、結論

坪林隧道導坑採用TBM 施工兩年來已累積相當程度之施工經驗，雖然TBM 的施工進度一直未如預期理想，鑽探、灌漿等工作，也仍需藉由實際施工時遭遇之困難，來不斷的加以改善。不過當初在規劃設計階段決定於兩主坑間設置一導坑且採TBM 施工，便是希望能藉由導坑獲得足夠之施工經驗，以回饋於主坑TBM 之施工。由於導坑開工之日期較主坑提早兩年，因此目前導坑施工發生困難時克服之經驗，乃有足夠之時間得以反應於主坑TBM 之設計，故若以此一觀點來考量，則導坑遭遇當初規劃、設計時預期外之困難，對於整體工程之推動與完成，反而更有其正面的價值。目前主坑TBM 預定於八十四年上半年開始開挖推進，希望藉由導坑之施工經驗，群策群力，使主坑TBM 之施工能順利推展，圓滿完成北宜高速公路之建設工程。

#### 五、參考文獻

##### (1) 期刊

張文城，「北宜高速公路之工址調查技術」，現代營建，中華民國八十一年八月版，第25～32頁（1992）。