

# 全斷面隧道鑽掘機（TBM）之規劃、設計與施工

張文城

國道新建工程局第三區工程處處長

## 壹、前言

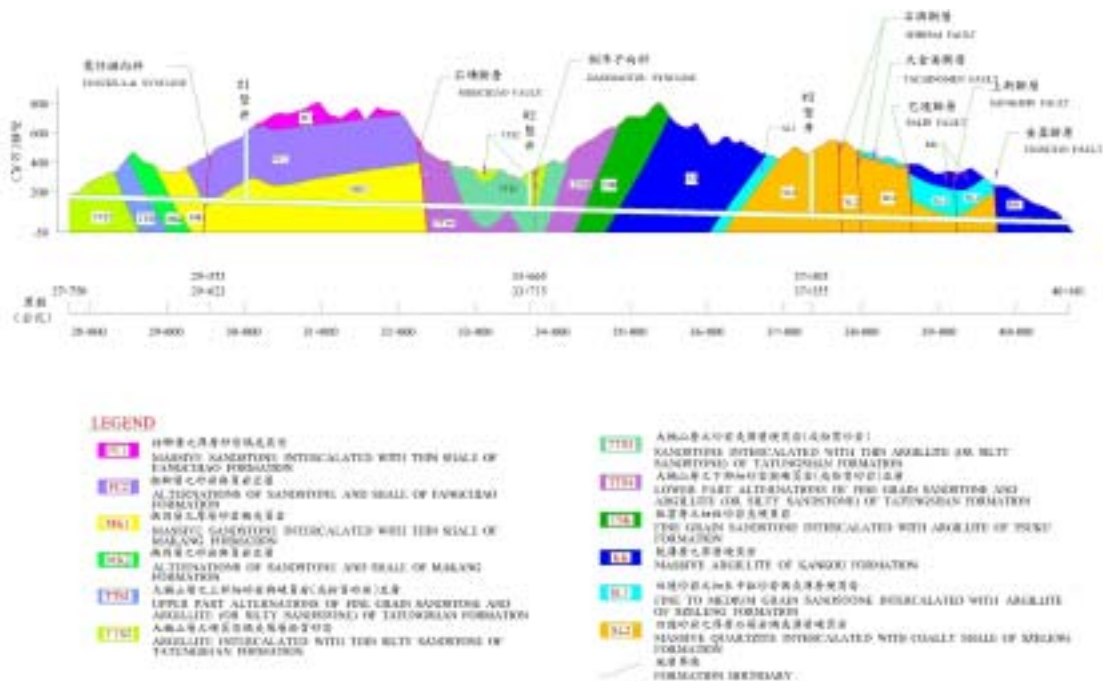
宜蘭地區由於山脈之阻隔，與台北都會區間僅能以行經崎嶇山區之台九線及濱海之台二線連絡，因台二及台九線之行車時間皆須九十分鐘以上，故宜蘭地區之發展乃受到相當程度之限制。因此為促進宜蘭甚至東部地區產業之升級與區域之繁榮與發展，並為環島高速公路網之先期工程，政府乃於民國八十年正式動工興建北宜高速公路。北宜高速公路由台北市之南港區經石碇鄉、坪林鄉至宜蘭縣之頭城鎮（如圖一），全長約 31 公里，為雙向四車道之公路隧道。由於北宜高速公路主要係穿越台灣北部崎嶇之山區，故工程主要為隧道之施工，隧道計有五處（雙向共十座），總長度約 20 公里，其中之坪林隧道更長達 12.9 公里，為目前東南亞最長之公路隧道。

本計畫於規劃設計階段，為考量工程之施工特性，已完成一系列廣泛之地質調查工作，尤其是坪林隧道，除一般之地表震測、鑽探，現地與室內試驗及野外地質調查等工作外，更於三處通風豎井之預地位置施作深度最深達 500 公尺之深孔鑽探，並配合相關之當地應力量測，此外坪林隧道之頭城端，亦曾開挖長度 150 公尺之探查坑，以期對坪林隧道頭城端不佳之地質情況，事先能有更充份之了解。圖二為坪林隧道沿線之地質剖面圖，由圖中顯示坪林隧道西半部（坪林端）主要之岩性為砂岩及硬頁岩，而東半部（頭城端）主要則為硬頁岩及四稜砂岩，其中四稜石英砂岩之單壓強度最高達  $3000\text{kg}/\text{cm}^2$  以上。地質構造上，穿越坪林隧道之斷層主要則分布在頭城端約 3 公里的範圍內，其斷層泥厚度可能超過 50 公尺以上，另根據地質調查之成果推估，該頭城端 3 公里之岩盤相當破碎且含豐富之地下水，其餘路段岩體品質則尚佳。

堅硬而破碎之岩盤，伴隨豐富之地下水與斷層群，對於隧道施工而言，相對的增加了許多的困難與風險。



圖一、北宜高速公路路線圖



圖二、坪林隧道沿線地質剖面圖

## 貳、TBM 之規劃與設計

本計劃之坪林隧道長 12.9 公里，根據目前國內一般隧道工程採用之鑽炸法施工方式，每月之開挖進度約 50 公尺，故若由隧道兩頭同時施工，則單單開挖工作便需十年左右方能貫通坪林隧道。若為縮短工期，於隧道兩端之外，再於隧道中間路段增加工作面為一可行之方法，惟由於受地形之限制，沿線中途缺少設置

中間施工橫坑之地點，僅能勉強覓得一處，然因其坡度達 11.8%，且長度亦達二至三公里，故經濟上不太可行。另利用豎井出碴以增加工作面，亦為一可行之方法，惟坪林隧道之豎井最大之深度達 500 公尺，且皆位於深山內，運輸道路甚為不便，故此法在實際應用上有其困難之處。此外坪林隧道之西口及豎井皆位於翡翠水庫之水源保護區內，由西口及豎井之大量出碴，亦將對水源區之環保造成極大之壓力。故綜合前述之評估，為求縮短工期，減少環境污染並進而提昇國內隧道之施工技術，乃考量於國內首次引進全斷面隧道鑽掘機（TBM）。

為評估隧道鑽掘機於本計劃之適用性，有以下幾點因素，須特別考量。

- 1.掘進速率。
- 2.斷層或破碎帶。
- 3.高膨脹性或擠壓性之地盤。
- 4.高壓地下水。

TBM 之鑽掘速率主要與岩石之硬度與單壓強度有關，因此對坪林隧道沿線之岩性與其分佈範圍之調查，及室內之單壓強度與硬度試驗，為評估 TBM 可行性之首要工作。根據規劃設計階段地質調查及試驗的結果評估，TBM 於坪林隧道東口端較堅硬而破碎的岩盤，其掘進速度約為 150 250m/月，而西口端較好的岩盤，掘進速度則約為 400 600m/月，此外再考量於斷層帶特殊處理所需之時間（預估進度為 60m/月），全線之平均掘進速率約為 350m/月。關於斷層、破碎帶、高膨脹性或擠壓性之地盤，則係利用野外地質調查、鑽探、震測等方法進行調查。根據目前調查結果，沿線應無高膨脹性或擠壓性之岩盤，而主要斷層則有六條，此斷層帶 TBM 通過時，預期將遭遇相當之困難與施工風險，故設計階段時，係考量採用灌漿或傳統鑽炸法挖除等輔助工法，以利 TBM 之掘進。至於高壓地下水，則為調查中最困難之項目，蓋影響地下水分佈範圍之因素甚多，諸如地形、斷層、節理、雨量等，規劃設計階段之調查，僅止於淺層或某些定點，故對於隧道通過之深層地下水狀況甚難評估。因此對於高壓地下水之克服，有以下幾點對策：

- 1.隧道由頭城向坪林方向開挖，此為上坡前進，因此當遭遇大量地下水時，湧水可因重力自然排出洞外，不致在隧道內積蓄而淹沒 TBM。
- 2.每輪開挖時，於 TBM 削刀頭向前鑽設探查孔，以了解開挖

面前方含水情形，必要時並可兼做排水孔，以降低開挖面之地下水壓。

此外，為確保坪林隧道主坑採用 TBM 施工時之安全，最重要之工作項目，為在兩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，直徑則為 4.8 公尺。以地質觀點而言，該導坑最主要之功能為：

1. 在主隧道開挖前，提供詳細之地質，地下水等資料。
2. 由導坑改良主坑之地質（如斷層帶之灌漿或挖除），以提高主坑之開挖速率，並降低地質風險。

由於坪林隧道主坑已決定採用 TBM 施工，為使主坑 TBM 開挖前能有學習 TBM 施工經驗之機會，導坑乃決定採用 TBM 施工，唯為兼顧導坑原有地質調查之功能，導坑 TBM 開挖後之支撐工，乃分別採用預鑄混凝土環片及 NATM 支撐兩種。圖三為導坑 TBM 剖面圖，該 TBM 係由美國 Robbins 公司製造，為雙盾身(Double Shield)之型式，直徑 4.8m，主機長 10.8m，若含支援系統全長達 188m，採用電動式馬達，總重量（含機身及支援系統）為 720T。此外為配合 TBM 開挖時能事先進行機頭前方之鑽孔探查(Probe Drilling)，於 TBM 尾盾附近之環座上裝設有兩部鑽機（該鑽機可於環座上移動），以進行相關之取心及不取心鑽探。

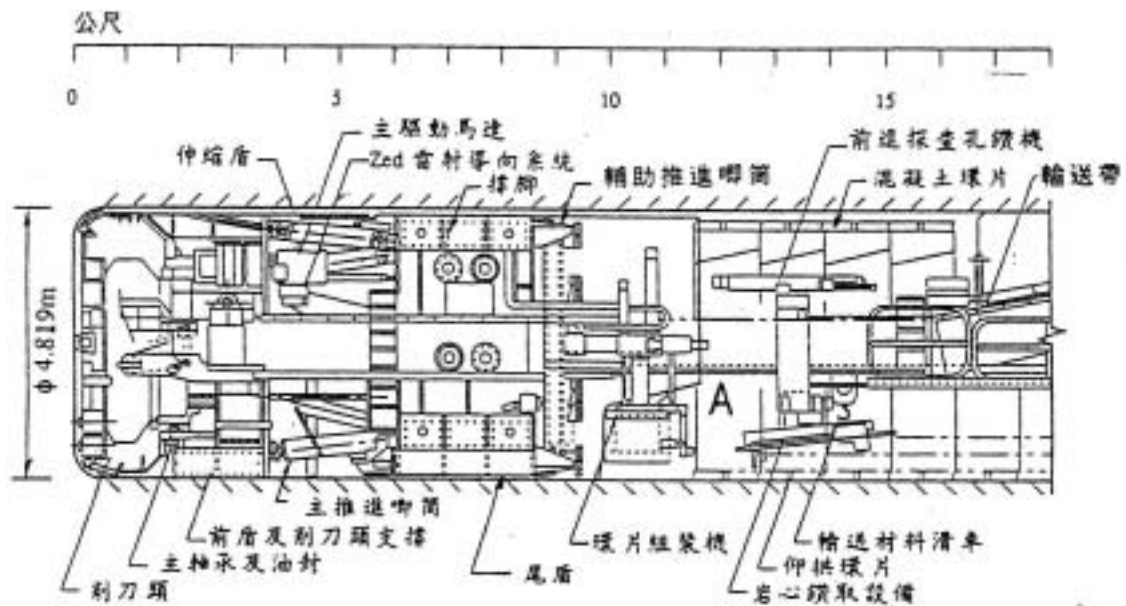
由於導坑以 TBM 開挖後迄今，施工上遭遇相當多之困難，故導坑 TBM 設備本身，考慮實際施工之地質情況，已做了若干調整，主要之修改項目包括：

1. 於 TBM 機頭進渣口加裝鋼柵，以控制渣料進入削刀頭的數量，減少 TBM 輸送帶因負荷過大而無法運轉。
2. 於削刀頭周緣進渣口之突出部份加焊斜板，以減少削刀頭轉動時之磨擦阻力。
3. 於削刀頭頂部加焊 120° 之防護鐵罩，以減少削刀頭頂部直接承受上方抽坍岩盤所產生之土壓力，並防止渣料卡死削刀頭，以減少 TBM 受夾之機率。
4. 鑽機能量及機座穩定性之改善，以提昇鑽探之施工效率。
5. 更換削刀頭驅動馬達之轉子及減速齒輪以增加削刀頭之轉動扭矩，加強 TBM 於不良地質狀況時之脫困能力。

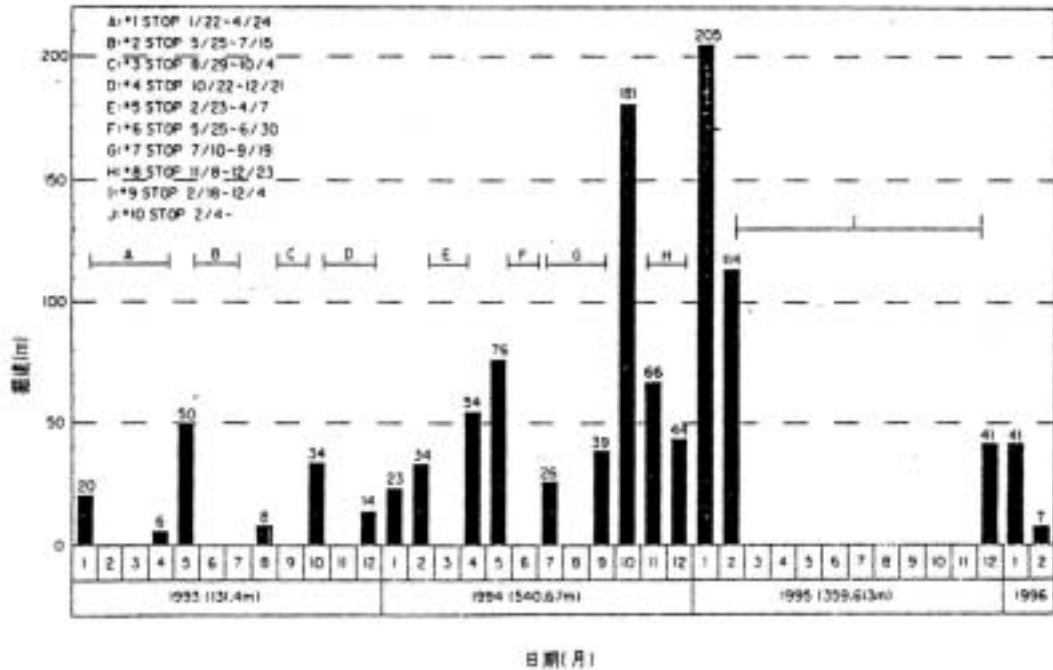
至於主坑 TBM 之設計，因已有前述導坑 TBM 之施工經驗可資借鏡，故與導坑 TBM 之設計亦有若干之差異，主要之項目包括：

1. 於 TBM 機頭進渣口裝設可開閉之自動柵門，以控制進渣料。

- 2.減少削刀頭於前盾盾殼突出之尺寸，由導坑之 120cm 減為 90cm，以減少削刀頭轉動之阻力。
- 3.鑽機裝設於固定之支座上，以增加鑽機之穩定性以提昇鑽探之成效。
- 4.削刀頭之外緣削刀(Gage Cutter)可調整擴挖 10cm，即開挖直徑增加 20cm，以使 TBM 開挖時能配合不同地質情況時，岩體之變形特性，調整其開挖直徑，並可減小 TBM 於軟弱地盤開挖時之沉陷可能。
- 5.主驅動馬達由導坑之電動式改為油壓式。



圖三、坪林隧道導坑 TBM 剖面圖



圖四、坪林隧道導坑 TBM 掘進進度統計

### 參、TBM 施工

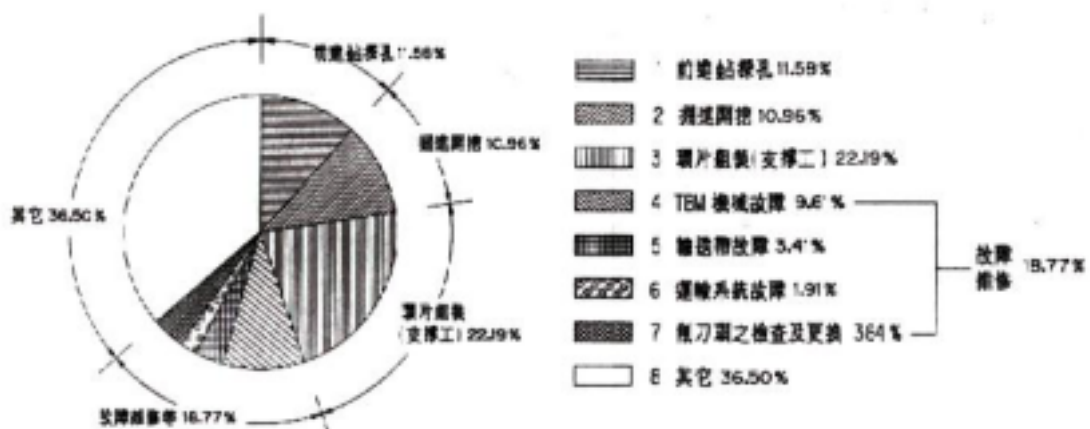
坪林隧道自民國八十年七月正式開工後，利用 TBM 設計、製造期間，至八十一年七月止共計以傳統鑽炸法開挖 522 公尺，開挖進度約為 42m/月。其後 TBM 運抵工地，經組裝測試後，於八十二年元月五日推進至開挖面，正式開始 TBM 之開挖工作。迄八十五年二月止，共計以 TBM 開挖 1080m，平均開挖進度約為 29m/月。

由鑽炸法及 TBM 開挖之地質資料顯示，金盈斷層及上新斷層皆於設計階段推估之里程附近出現。岩性方面亦與設計階段推估相吻合，即東洞口至金盈斷層間主要為硬頁岩，而金盈斷層往坪林方向，岩性則轉為四稜砂岩，至於岩體之破碎程度實際開挖後，顯示較設計時所預估者略差，以岩體評分(Rock Mass Rating)而言，設計時預估主要為 IV(RMR=20-40)，V(RMR=10-20)類岩體為主，開挖後實際上則係以第 IV、V、VI(RMR=0-10)類岩體為主。

導坑 TBM 開挖之 1080m 期間，總計有十次 TBM 因開挖面前方塌方，而導致 TBM 之削刀頭被卡住無法轉動，或因機頭有大量之地下水湧入(最高達 0.18CMS)，致使 TBM 無法正常操作，故須由 TBM 後方開挖迂迴隧道(Bypass Tunnel)，至機頭前方進行處理，以協助 TBM 恢復運轉。圖四為導坑 TBM 開挖之月進度掘進率，圖中亦顯示歷次 TBM 受困無法運轉之處理時間。由圖中顯示，最佳之掘進率為 205m/月，若以單日而言，最佳之進度為 17m/月。圖

五為 TBM 開挖期間，各分項工作作業時間統計。由圖中顯示，屬於開挖前用以了解 TBM 前方地質情況之前進探查，約佔 12%，開挖工作約佔 11%，不過若以開挖碼錶總時數為準（當削刀頭開始掘進且推進壓力達 500psi 時，碼錶開始自動記錄），則開挖工作約佔 7%，開挖後支撐所需之環片組裝約佔 22%，至於其他 TBM 故障、維修或相關之配分工作合計佔 55%。由開挖時各分項工作所佔百分比分析，TBM 實際開挖工作所佔時間略嫌偏低，仍有提昇改善之空間。

關於坪林隧道主坑之施工，以東行線上半斷面開挖（開挖面積約為  $48m^2$ ）為例，於民國八十二年七月開始以鑽炸法開挖進洞，利用 TBM 設



註：1. 本圖為 TBM 於運轉狀態中，各項作業時間所佔之百分比，不含受困時間。  
 2. 其它項目包含：送料拌料，尾輪調整，推進支撐系統，制動，剎車，可收材料，組裝及換裝材料等延宕時間。  
 3. 自 62.C1.C5-85.02.D4 共計變更 1079.8m 組裝環片 893 環。

圖五、坪林隧道導坑 TBM 掘進分項時間統計

計、製造、運輸、組裝期間，至八十四年三月止，總計以鑽炸法完成 724m，其後經評估為使主坑 TBM 開始開挖之初，人員、機具、設備能有適當之適應與學習階段(Learning Period)，儘量避免地質上之干擾，而導致 TBM 施工之困難，故於八十四年十一月再以鑽炸法開挖 100m，以通過金盈斷層帶。至八十五年三月止，總計以鑽炸法完成約 835m 之開挖，平均進度約為 35m/月。由於導坑以 TBM 施工時，遭遇相當大之困難，前後已有十次受困之經驗，其中有七次之受困位於目前主坑以鑽炸法開挖之區段內，而其餘三次之受困地段，因主坑尚未開挖，而必須於往後以 TBM 開挖通過，因此利用已開挖之導坑，於主坑相對於導坑受困之位置，預先進行地質改良（如灌漿或斷層泥挖除）為必要之工作，以確保主坑 TBM 開挖之順利。



## 肆、TBM 施工遭遇之困難與因應措施

導坑 TBM 施工迄今，遭遇相當多之困難，致施工進度一直不甚理想，其中部份之困難，可隨施工者經驗之累積而予減輕或克服，如環片組裝不平順，TBM 開挖時方向偏差過大等問題，而部份之困難，係導因於地質或 TBM 設備本身之限制，致施工時，仍須以其他調查或輔助工法，或設備本身的修改，方足以克服，以下係針對此類之困難，提出進一步之說明。

### 一、開挖

當岩盤之強度足以使 TBM 尾盾之撐腳(Gripper)推出頂住岩盤，而提供足夠之摩擦力，使前盾能藉由主推進唧筒之推進而進行開挖時(參考圖三)，此時尾盾於開挖時，並未隨前盾向前移動，故於開挖之同時，可於尾盾同時進行環片組裝之工作，以提昇 TBM 掘進速率，此為雙盾身 TBM 與單盾身 TBM 功能上最主要之差別。目前導坑 TBM 施工時，此部份之功能尚未能充份發揮，故當 TBM 通過較惡劣之地質時，增加了開挖通過所需之時間，即增加了 TBM 於惡劣地質區段內停留之時間，無形中使 TBM 的施工風險增加許多。導坑 TBM 施工時，無法充份發揮雙盾身開挖功能，主要的原因可歸納以下幾點：

1. 岩盤破碎時，大量細粒料掉落於伸縮盾上，開挖一輪進（即  $1.2m$ ，此為環片每環之寬度）後，尾盾回收時伸縮盾因細粒料之堆積，致使尾盾無法一次回收  $1.2m$  之長度，因此無法進行環片之組裝工作。
2. 當前盾一次開挖  $1.2m$  時，於惡劣地質段施工，機頭（即前盾）常有沉陷的現象發生，使得前、後盾產生彎折之現象，未能維持在同一軸線上，增加了施工之困難。
3. 伸縮盾主推進唧筒（共 12 支）設計最大之伸長量為  $132cm$ ，施工時，每支唧筒之伸長量可能會不同，故為改量操作之安全係數，可能無法一次開挖  $120cm$ 。
4. 當地質情況惡劣時，通常會伴隨大量之地下水湧入，此時部份地下水將隨渣料由輸送帶後送，由於輸送帶剛好在環片之組裝區（如圖三之 A 區）向上爬升，故隨渣料後送之地下水將於 A 區產生大量回流，使施工人員無法進行環片組裝工作。

為排除前述之現象，導坑本身曾於伸縮盾區之盾殼上開口，以減少渣料之堆積，並以人工方式於開挖之同時，於伸縮盾上沖水，將細粒料沖走，唯成效有限。至於主坑之 TBM 則係於伸縮盾內，裝設自動高壓沖水設備，以排除細粒料堆積於伸縮盾上，同



時在輸送帶的最前端（即削刀頭內）加裝漏水柵，避免地下水隨同渣料由輸送帶後送。不過，因主坑 TBM 尚未施工，此部份之成效仍有待印證。

## 二、地質調查

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 - TBM，使其功能能儘量應付各種不同之地質情況，則從設計、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。由於受限於 TBM 本身構造及空間之限制，同時為兼顧維持 TBM 之施工效率，雙盾身 TBM 於施工期間能採用之地質調查方式，大致上有以下幾種[2]：

1. 前進探查（含取心及不取心）。
2. 由開挖渣料研判。
3. 由盾身部份開口觀察出露之岩盤。
4. 震測。

由於地質、設備及操作技術等之因素，尤其是鑽機本身穩定性的問題，前進探查常需花費很長的時間，表一為歷次 TBM 受困位置所施作前進探查孔之施鑽時間統計表，由表中顯示為完成二、三十公尺之探查孔，常需花數拾小時甚至更長之時間，對於 TBM 之施工效率，產生甚大之影響。

表一、坪林隧道導坑工程前進探查孔鉆設情形統計表

次數	鑽孔孔口里程	取心或不取心	鑽孔長度(m)	花費時間(hr)
1	40K+152	不取心	1 4	1 8
2	40K+105	不取心	2 8	1 6
3	40K+090	不取心	2 9	2 5
4	39K+997	不取心	3 6	4 5
5	39K+868	不取心	3 8	8
6	39K+835	不取心	3 0	6
7	39K+835	取心	3 9	1 7 3
8	39K+540	不取心	3 0	1 1
9	39K+198	取心	3 8	5 2 8

對於 TBM 前方未開挖地質之了解，除前述之前進探查為較直

接之方式外，其餘皆屬於間接之方式，故特別需藉由長期之調查與施工經驗之累積，方足以有較可靠之研判，而前進探查又有前述之困難，因此對於 TBM 前方未開挖地質之了解，仍有待更進一步之集思廣益，以降低 TBM 之施工風險。

### 三、灌漿

當由前述之地質調查方式，了解 TBM 開挖面前方之地質情況不佳時，進一步便需對該區段之地質做處理，以利 TBM 之通過。灌漿為地質處理中最常採用方法之一，配合 TBM 之灌漿作業，除一般灌漿工作所應注意者外，尚有以下幾點需特別考量[2]：

1. 灌漿前 TBM 機身四周需先以低強度之灌漿材料予以保護，以免後續之灌漿，將 TBM 灌死，使 TBM 無法正常運作。
2. 由 TBM 內施作之灌漿工作，因 TBM 盾身之阻擋，無法於灌漿孔之孔口進行堵漏之工作，故對於灌漿時之防漏工作需有特殊之考量。
3. 由於受 TBM 空間之限制，故僅能於 TBM 內之若干固定點施鑽灌漿孔（導坑 TBM 有 12 孔，主坑有 25 孔），且灌漿孔之方向亦受到限制（導坑鑽孔與水平軸之夾角為  $6^{\circ}$ ，主坑為  $7.5^{\circ}$   $14^{\circ}$ ，但每孔僅能有一固定之角度），因此灌漿佈孔工作受到極大之限制。

前述之考量事項，其中(1)及(2)將影響灌漿之效率，即灌漿所需時間，可能將較一般之灌漿工作為長，而(2)及(3)將影響灌漿之效果，尤其是(3)之限制，縱使每孔灌漿皆能順利且適時完成，但僅由有限之灌漿孔，是否可達到應有之固結效果，使 TBM 開挖時能順利通過，實仍有研議之空間。

### 四、破碎地盤及湧水帶

對於破碎地盤或湧水帶，若能藉由地質調查事先查知，而做適當之處理，則對於 TBM 之開挖應無大礙，唯實務上，地質調查有前述之困難及不確定性存在，故 TBM 仍有必須在破碎帶或湧水帶內施工之風險存在。在 TBM 施工的歷次受困中，皆是因 TBM 機頭開挖進入碎碎帶，或因機頭突然有大量地下水湧入，而導致 TBM 無法正常操作而受困。因此對於 TBM 於破碎及湧水帶內之施工，勢必預先要能有所因應包括：

1. 超挖為破碎帶內施工經常產生之現象，其衍生之施工問題包括開挖方向不易控制，機頭容易產生沉陷，環片組裝不易平順，每輪進進渣量超過設計數量等。這些問題皆將增加施工之困難，延長每輪進開挖之時間，而增加施工之風險。因應之道除可因施工經驗之累積，而減低其影響程度外，其他如備用渣車的調度，開挖速度的控制等，皆需有特別之考量。

2. 進渣速率過大而導致 TBM 無法正常運轉，為另一個重要的影響。蓋進渣量過大除可能因來不及出渣而使渣料堆積削刀頭內，增加削刀頭轉動之負荷外，渣料若突然大量掉落輸送帶上，將使輸送帶無法運轉，進而導致機頭亦連帶無法轉動，而被迫必須停機處理，增加 TBM 受困之風險。為克服此一問題，可採取之對策包括：控制渣料進入機頭之速率（如於進渣口加裝自動柵門），控制渣料進入輸送帶之速率，增加輸送帶之輸送能量，增加輸送帶之馬力等。
3. TBM 若遭遇異常大量地下水湧入時，因本工程係由低處（頭城端）往高處（坪林端）開挖，故理論上地下水應可藉由重力自然流出洞外，唯實際上，因水量過大（導坑最高曾達 186l/sec），故水由機頭經前盾、伸縮盾、尾盾再往後利用仰拱之排水廊道排出前，因受 TBM 本身設備之阻隔，或隨湧水帶入之泥砂之阻礙，伸縮盾處之水位常遠較尾盾為高，甚至淹沒位於伸縮盾區內之主驅動馬達，而導致 TBM 必須被迫停機，俟水位下降後方能繼續開挖，此外若湧水夾帶大量泥砂進入尾盾區，亦將使環片無法進行組裝工作。目前為克服此一問題，主坑 TBM 已於盾身內裝設抽水馬達（抽水能量 110l/sec），以加速 TBM 機身內積水之排除，而這也是當 TBM 開挖遭遇大量地下水湧入時，所能採取唯一之方法。因此若欲排除 TBM 遭遇湧水時施工之困擾，最好的方式是在 TBM 尚未到達該湧水區段時，先予調查得知並加以處理（如鑽排水孔）。唯如前所述，地下水的調查是相當困難的，長距離的鑽探（如 300m 以上）為直接且較為可靠之方式，但亦常需耗費龐大之時間與費用，其應用時機與地點更須有周延之考量。

## 伍、結論

一件工程的成功，往往需要工程人員群策群力，再接再厲，也往往需要由失敗中累積施工經驗。目前坪林隧道導坑 TBM 施工遭遇相當大的困難與挑戰為不爭的事實，無論是地質、設備或施工者的管理能力與經驗，皆深深的影響了工程的成敗，唯因導坑施工在前，故導坑遭遇愈大的困難，愈顯示出當初決定採用導坑，並先行施工的決策是正確的。目前最重要的工作是全力以赴，使導坑 TBM 施工早日能脫離困境，並做為主坑 TBM 施工之借鏡，以使工程得以順利完成。

## 陸、參考文獻

- 1.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，第 25 32 頁。
- 2.張文城，“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，中華民國十二月，第 59 67 頁。

- 圖一、北宜高速公路路線圖
- 圖二、坪林隧道沿線地質剖面圖
- 圖三、坪林隧道導坑 TBM 剖面圖
- 圖四、坪林隧道導坑 TBM 掘進進度統計
- 圖五、坪林隧道導坑 TBM 掘進分項時間統計
- 圖六、坪林隧道導坑地下水量歷時曲線

主推進唧筒

輔助推進唧筒

尾盾

混凝土環片

輸送帶