

隧道鑽掘機(T B M)施工特點

黃道元

國道新建工程局第三區工程處頭城工務所副主任

摘 要

隧道鑽掘機 (Tunnel Boring Machine, 簡稱 T B M) 工法, 人類利用此種隧道開挖方法已經有一段極長之時間, 在國外不僅施工實績極佳, 且亦廣泛用於長隧道之開挖, 雪山隧道長達 12.9 公里, 係國道 5 號高速公路 (北宜高速公路) 關鍵性之工程, 設計時考量環境保護因素、工程進度、費用及技術可行性等, 決定使用並引進 T B M 工法, 雖然在施工中遭遇大量之地下水及堅硬破碎之地質情況下, 使工程進度一度延滯, 部分區段受限於地質或工期之因素改採鑽炸法施工, 使 T B M 工法在雪山隧道沒有發揮設計階段預期之效果, 然經過 13 年的努力, 在一群無名英雄的努力下, 依舊克服困難, 完成貫通通車之目標, 使得台北宜蘭間之行車時間縮短至 40 分鐘。本文謹就雪山隧道施工引進之雙盾身 T B M, 加以介紹及討論。

一、 前言

國道 5 號之雪山隧道長 12.9 公里, 不僅是目前國內最長之公路隧道, 也是目前亞洲最長, 世界第 5 之公路隧道, 同時也是北宜高速公路之關鍵工程。設計規劃階段綜合國內外專家意見, 就雪山隧道的地質條件、環境保護因素、隧道規模、勞工市場、經濟因素、施工期程考量下, 認為採 T B M (Tunnel Boring Machine) 較採用傳統鑽炸法施工, 具有時間及經濟上之優勢, 故引進世界上長隧道快速開挖之 T B M, 並期許此一工法能在國內達到技術移轉之目的, 提升國內隧道施工之技術, 加上目前國人生活日趨富裕, 從事辛勞工作之隧道施工人員越來越缺乏之情況下, 未來隧道開挖使用自動化之機械方法施工, 亦為目前或未來隧道工程發展之必然趨勢。目前國外運用 T B M 施工之案例甚多如英法海底隧道等, 國內除雪山隧道採用 T B M 施工外, 台電公司亦有多個工地引進 T B M 工法施工, 如士林發電計畫、碧海發電計畫等, 故 T B M 應用於國內外長隧道施工之案例有與日俱增之趨勢。

雪山隧道於設計階段時，預估導坑 T B M 開挖進度：15m/日，主坑 T B M 開挖進度約 20m/日。然後續雪山隧道施工過程中確實因地質等因素，無法達到預期之目標，惟導坑 T B M 仍於 92 年 4 月 25 日創下最佳單日進度 24.73 公尺，92 年 5 月創下最佳月進度 400.8 公尺；主坑 T B M 亦於 91 年 12 月 5 日創下最佳單日進度 17.9 公尺，93 年 3 月創下最佳月進度 360.1 公尺。此種進度在雪山隧道含豐富地下水及堅硬破碎之地質條件下，亦值得所有參與雪山隧道施工之工作夥伴驕傲。

二、 T B M 之施工

(一) T B M 之種類

T B M 為適用於各種不同地質特性及隧道斷面及功能需求，各 T B M 製造廠商有多種不同之設計，一般可區分為適用於軟岩之潛盾機，及硬岩之 T B M。依機械設計亦可區分為密閉式、開放式、單盾式及雙盾式等機種。

開放型 T B M 用於地質條件較佳，預期無膨脹性或擠壓性地質或無大量湧水的隧道。密閉型 T B M 用於地質變化較大，存在膨脹性或擠壓性地質或大量湧水的隧道。密閉型 T B M 機身外周以鋼製盾殼包覆，以防止遭遇周圍岩盤鬆動時損及人員機械，一般多配合混凝土環片作為支撐，盾殼又分單節盾殼(single shield)、雙節或伸縮式盾殼(double shield or telescopic shield)。

單節盾殼與主機連成一體，T B M 前進時盾殼及支撐安裝設備亦隨同移動，所以安裝環片時需要停止前進。雙盾殼 T B M 為多採套筒式的兩節盾殼所組成，前節盾殼隨同切削轉盤的挖掘前進而移動，後節盾殼則用以頂撐岩壁成支壓於環片支撐上以提供前節盾殼之推進反力，俟完成一單元長度鑽掘後於後節盾殼組立環片，俟環片裝妥後即完成一作業循環。

(二) 雪山隧道 T B M 之選擇

由於 T B M 之掘進速率主要與岩石之硬度與單壓強度有關，依據規劃設計階段所作之地質調查，雪山隧道沿線之地質，大部分為硬度 400~1200kg/cm² 之砂岩與硬頁岩，因此必需採用硬岩 T B M，隧道沿線經過之主要斷層共計 6 條，其中 5 處斷層集中位於南口段約 3 公里範圍內，其他未發現之剪裂帶或小斷層則不計其數，岩層之節理發達，富含豐富之地下水，隧道覆蓋層最高達 700 餘公尺，預期隧道開挖過程中頂拱與側壁岩塊崩落在所難免，為確保施工安全，故採用有盾殼保護之 T B M。另外雙盾身 T B M 可於 T B M 掘進時同時組裝環片，較單盾身

TBM獲得更快速之開挖速度，當地層支撐力不足時，可採單盾身方式施工，且雙盾式TBM施工時彈性較大，對不良地質支應變性較單盾式TBM為佳，轉向能力亦較單盾式TBM為佳，故兼顧施工安全與工期要求之情況下，最後決定採用硬岩雙盾身TBM。

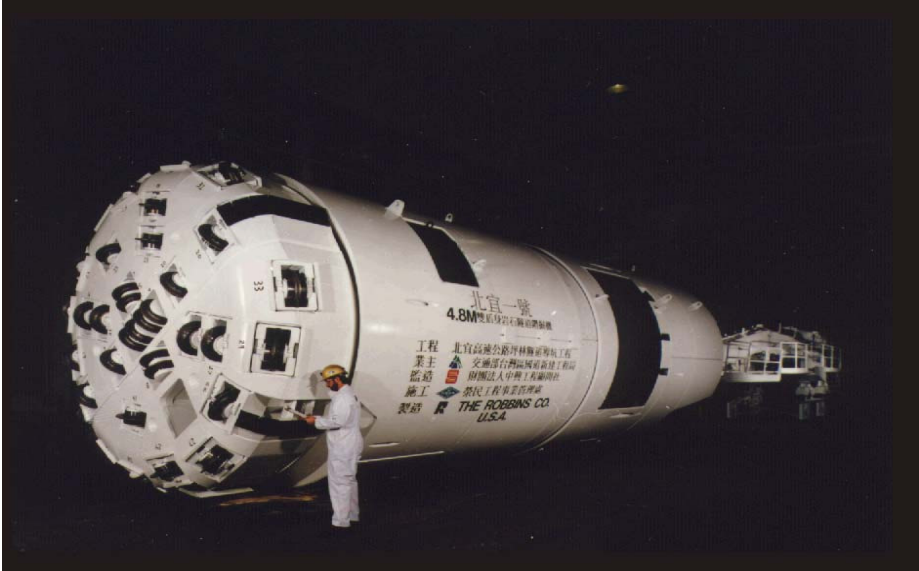


圖 1 北宜一號 雪山隧道導坑 TBM

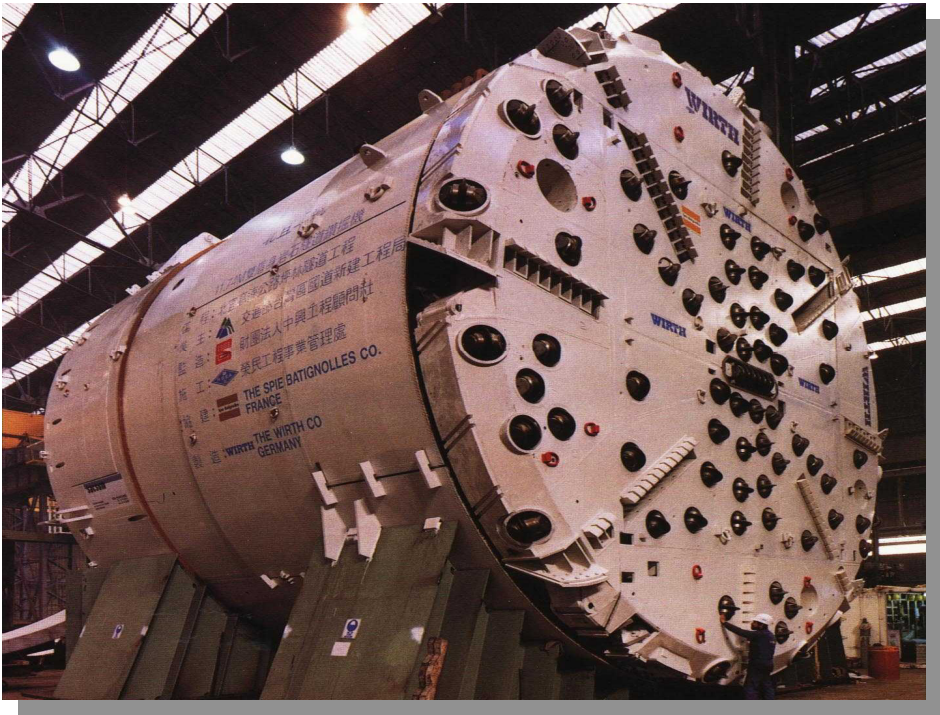


圖 2 北宜二、三號 雪山隧道主坑 TBM

(三) 雙盾式 TBM 之開挖方式

T B M係以切削轉盤(Cuffehead)進行連續之旋轉切削前方地層，前節盾殼隨同切削轉盤的挖掘前進而移動，在地質條件較佳時，可以撐座側撐於岩盤以提供所需的反作用力，並以伸縮唧筒向前推進開挖，而尾盾經復歸(Re-Set)所騰出之空間能在開挖之同時組裝預鑄環片倘若遇到岩盤鬆軟地帶，撐座無法撐住岩盤時，則可改用單盾身模式開挖。屆時先將伸縮盾閉合，再以環片唧筒所推動壓力環頂住組裝好之環片向前推進開挖。俟開挖完成一單元長度鉗掘後利用機身後側裝設之環片組裝機於後節盾殼組立環片，俟環片裝妥後即完成一作業。另開挖出來之碴料則搭配出碴系統，立即將開挖碴料利用火車運出隧道。

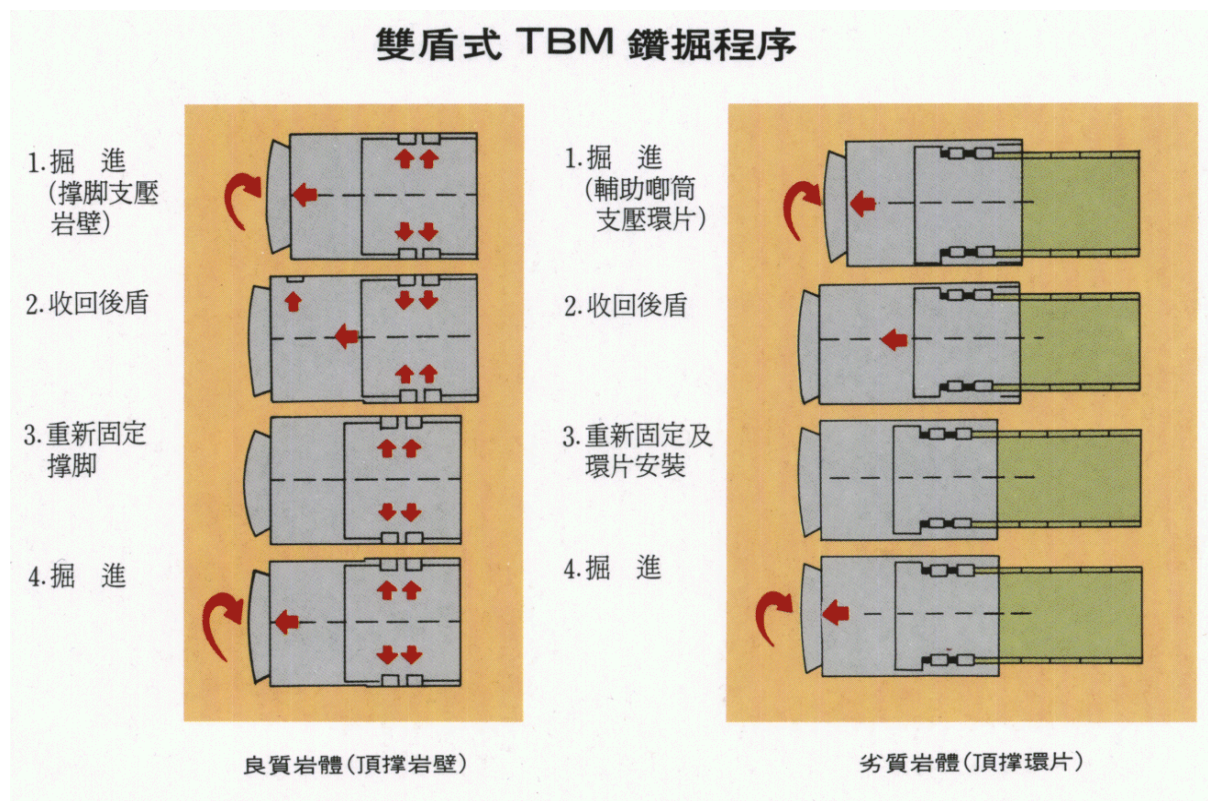


圖 3 雙盾式 T B M鑽掘程序

三、 T B M施工的特性

(一) T B M製造、組裝、發進

以雪山隧道為例，當承商與業主訂約後，依據規劃設計所獲的地質資料及契約所訂之設計要求，由承商經過評選擇定 T B M製造廠後，開始設計製造，至運輸至工地開始組裝，此一段時間約需一年以上之時間。在等待 T B M機具進場期間，為儘早開始展開隧道開挖之工進以縮短工期，以鑽炸法先行施工，如導坑 80

年 7 月開工，利用 T B M 製造、組裝期間，至 81 年 7 月共計以鑽炸法開挖 522 公尺，其後 T B M 運抵工地開始組裝、測試，於 81 年 12 月 1 日開始推進，81 年 12 月 22 日 T B M 推進抵達鑽炸法終止開挖面，並於 82 年 1 月 6 日正式掘進，開始 T B M 開挖之工作。

T B M 組裝係一耗時且繁雜的工作，從事前之規劃、前置作業、組裝平台之設置，組裝順序與過程等，均須由 T B M 專業施工人員，予以妥善規劃作業流程以利組裝工作進行。組裝之順序大致區分為 T B M 主機部份及後續支援系統部分，以雪山隧道為例，因考慮環保水資源保護，施工期的排水、洞口設施的腹地、運棄碴料等之因素，故主、導坑 T B M 均利用南洞口(頭城端)之腹地進行組裝作業，以主坑 T B M 組裝為例：

1. T B M 進場前需先完成工作組裝場地之準備工作，主坑 T B M 組裝台長約 80 公尺，寬 22 公尺，其中約有長 25 公尺左右，須設置仰拱供組裝 T B M 主機之用。T B M 主機組裝場地主要係以一部 200 噸門型吊車作為主要吊裝設備，其移動範圍約為 60 公尺，並設置適當之夜間照明，供夜間組裝之用，支援系統則於組裝區後方鋪設之兩條軌道上，利用吊車進行各單元之組裝工作再予連結以縮段組裝時間。
2. 另 T B M 主機及其支援系統應配合組裝時程，依序運抵組裝廠，在原製造廠技師之指導及協助下完成組裝工作，組裝完成後即進行相關之試車工作。



圖 4 主坑 T B M 組裝情形

T B M試車完畢並推進至開挖面前，須先拆除先前開挖鑽炸法時設置之通風及照明設備，同時施做發進座及T B M仰拱滑床，並須檢核隧道淨空，雪山隧道主坑係採用斷面測量之方式進行隧道淨空檢核，確定淨空無誤後，即可進行T B M推進工作。T B M推進至仰拱滑床後，係利用位於尾盾底部之環片唧筒頂住仰拱環片前進（T B M滑床應於T B M推進前施作完成）。另未使T B M發進時，的到足夠之反作用力點，故需於開挖面先行施作一發進座，長度約 13 公尺，厚度約 40 公分，當T B M推進發進座時，可使撐座撐於發進座上，以提供T B M開挖時所需之反作用立及扭力，開挖完成一輪進後，須先完成環片反力支撐結構（其作用在協助環片組裝之定位及環片唧筒向前推進之反作用力），即組裝第一環全環片。環片則是利用火車運送之支援系統後，利用環片運送夾及環片組裝機進行組裝，最快可約在 17 分鐘內完成一環組裝。

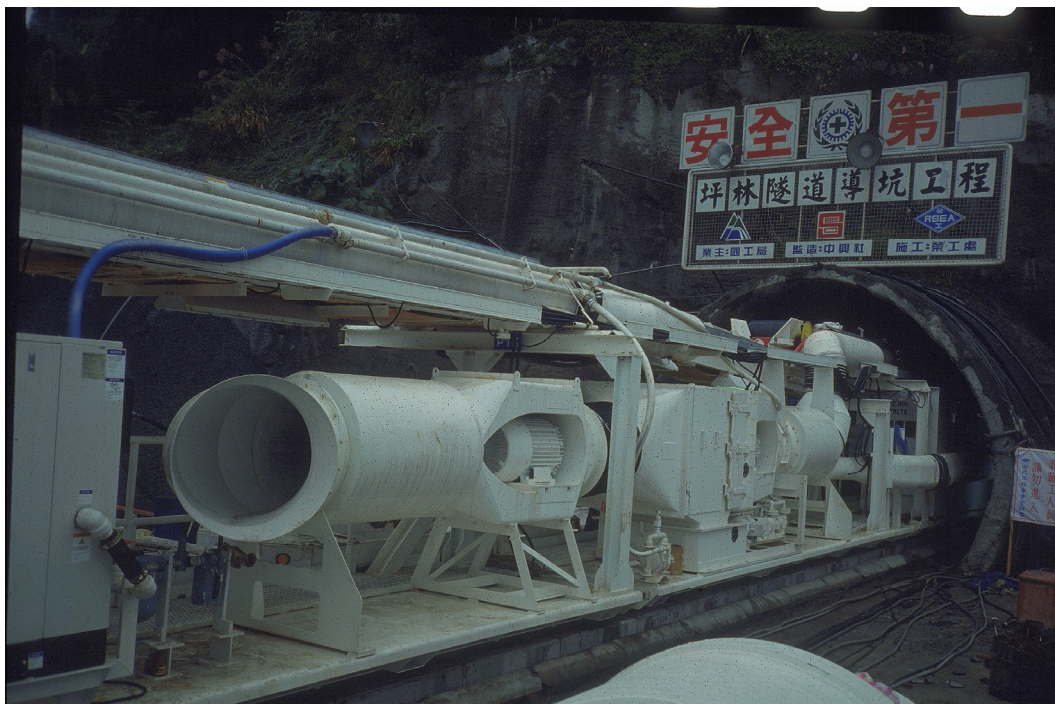


圖 5 導坑 T B M 進洞情形



圖 6 主坑 T B M 利用仰拱滑床進洞情形

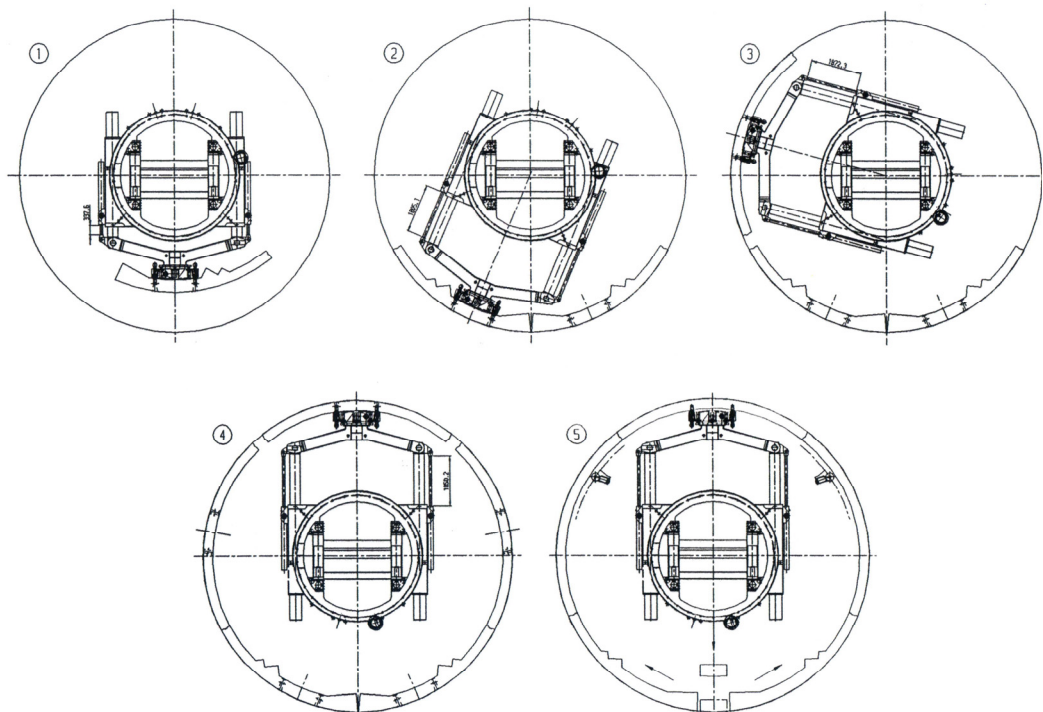


圖 7 主坑 T B M 全環片組裝順序



圖 8 主坑 T B M施工完成之情形

(二) T B M施工人力配置

依據榮工公司所提供之資料，主坑南下線每班人力（8 小時）約需:55 人（含國人及外勞），並區分為：

1. 機修站：負責削刀之檢查及更換，T B M油壓系統、潤滑系統、冷卻系統、輸送帶及機具設備之保養，隧道沿線及動口之鐵軌、轉轍器之保養修理等。
2. 土木站：負責環片組裝、背填粒料、背填灌漿、支援系統作業區之環片吊裝作業、車道板組裝、鐵軌組裝、碴車及環片運輸車之調度等。
3. 電修站：負責 PLC 與電子系統、電機系統保養及修理、#4 及#5 輸送帶之操作、動力及照明系統電纜之延伸及保養。
4. T B M操作手：負責T B M之操作。

(三) 碴車及環片運輸車之編組：

T B M開挖一輪進 1.5 公尺約需 3 列火車，每列火車均包含碴車 6 部，環片運輸車、背填粒料車等，詳細編組詳如圖 9

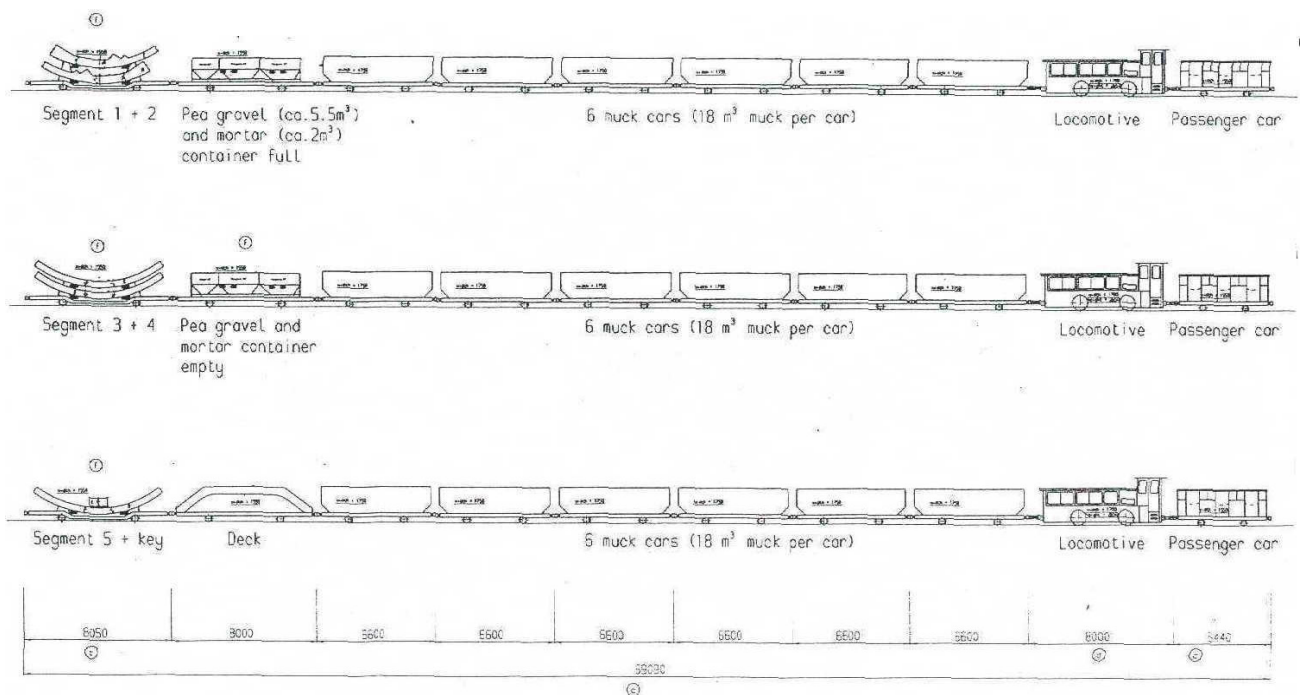


圖 9. T B M開挖一環 1.5M 需求之列車系統

(四) 環片生產製造

主坑 T B M 段採用內徑 10.8 公尺，外徑 11.5 公尺之預鑄混凝土環片，每環環片長度為 1.5 公尺，厚度為 35 公分，共分為 A、B、C、D、E、K 六片啣 RS 拱型蓋板一片，環片間採公母榫方式銜接，全環約需 25.6 立方公尺之混凝土，重量約 61.49 公噸。另消防栓及緊急電話部分，則使用鋼環片約需 1625 片（此一部分由承商另行擇地生產）。為應付龐大之環片生產數量（約估 T B M 施工最高峰期月使量為 872 環），故承商於頭城交流道用地範圍，設置環片廠，其佔地約 7 萬平方公尺，預計生產 11 萬 5 千片左右。



圖 10 主坑環片廠

環片預鑄廠之生產線配置：

1. 混凝土拌合廠：設置 2 套拌合設備，產能分別為 $60 \text{ M}^3/\text{HR}$ 及 $120\text{M}^3/\text{HR}$ ，以應付龐大之混凝土需求量。並配合設置試驗室及相關試驗儀器。
2. 鋼筋（線網）加工廠：設置 4 組拱型蓋板鋼筋籠生產組立架、環片鋼線籠生產組立架 10 組。
3. 環片生產線 3 條：其中二條生產環片，配有 35 套鋼模，預計每 20 分鐘生產一片；另一生產線為生產拱型蓋板及 K 片，預計每 36 分鐘生產拱型蓋板 1 片或 K 片 3 片。均採用自動輸送設備，並配合各式大、小型天車作業。
4. 蒸氣養生：為使環片在一個生產循環 9 小時內，達到脫膜起吊強度（ $175\text{KG}/\text{CM}^2$ ），故採用蒸氣養生方式提高其初期強度，故設置鍋爐室一間，提供蒸汽至蒸氣室，蒸氣室則區分為三個區間，分別為生、降溫區 45 度，恆溫區 65 度，並由電腦溫度控制系統維持其溫度。
5. 環片堆置區：至少約需維持 50 日生產量儲存廠，最大考慮 3 個月生產儲存量。

環片生產流程：

1. 鋼模清理、塗脫模劑、組模
2. 鋼筋籠、預埋件擺設

- 3 組邊模、蓋頂模、檢查
4. 混凝土澆置
5. 拆蓋頂模、一二階段表面抹平、混凝土初凝
6. 蒸氣養生
7. 靜置冷卻
8. 鬆模、拆模
9. 送儲存場、成品修補、編號。

(五) 削刀之更換

按 T B M 最重要之部位莫過於削刀頭，而削刀頭之保護工具之一即為削刀。因此削刀之每日維護、檢查、更換等工作是 T B M 工法重要之一環。主坑 T B M 共計有面削刀 71 個、徑規削刀 3 個、中心削刀 6 個、擴挖削刀 3 個，共 83 個。每個削刀直徑約為 432 mm(17 吋)，重量 186(181)kg。T B M 削刀之損壞磨耗有多種原因，如岩盤穩定，自持性佳，切削刀能均勻地擠壓輾轉切削自持岩盤面，不會造成異常之切削刀軋崩裂損壞，而屬於正常刀軋磨損。然而，本工程常因遭遇剪裂破碎之開挖面而發生抽坍，大塊岩石在削刀頭前推擠，刀軋無法發揮其正常之切割功能，而係遭鬆散推擠之硬岩塊隨著削刀頭轉動而扭擠撞裂，並進一步造成連鎖性同圓周附近之其他削刀因負荷增加而迅速損壞，甚至損傷及相關位置之刮板及刮板座本體，故削刀常因異常損壞而需更換。以南下線 T B M 共計開挖 7316.553 公尺（包括 T B M 全斷面開挖長度 3863.143 公尺及 T B M+D & B(頂導坑)混合工法開挖長度 3453.390 公尺），累計拆換 1636 顆削刀，平均削刀壽命為 4.472M/ Cutter。



圖 11 削刀磨損情形

削刀材質之選擇係考量隧道沿線地質性質與供應製造商研商選定，一般均採高硬度之合金剛製成，其成分包括鎢、鉬及鉻等金屬元素所製成。當削刀磨損嚴重需更換時，可由切削頭後方（及 T B M機身內）更換。

(六) 使用 ZED-260 隧道導向系統為 T B M定位系統

ZED-260 之隧道導向系統係由目標單元、控制單元及輸出入單元所組成，主要係用於隧道鑽掘時，可正確的監測隧道鑽掘機 T B M之正確位置。此套系統可連續準確地監測 T B M機頭之位置、位態及方向，並將 T B M偏移隧道中心線之數值提供 T B M操作手，迅速了解 T B M偏離設計路線之差異值，調整上、下、左、右之方向，迅速修正 T B M之掘進方向。當開挖 150~200 公尺後因訊號趨弱及電線長度之限制需前移一次 ZED 之附屬設備（經緯儀、雷射、測距儀、介面卡系統等），每經移動一次，則必須重新測量、將 T B M前方尚未開挖之隧道中心線位置之座標數入系統中，提供 T B M操作手後續開挖之用。

(七) 前進探查

傳統鑽炸法隧道開挖，每當一輪進開炸完後即很清楚的藉由開挖面了解地質情況，進而採取適當且有效之支撐方式加以支撐。TBM工法則不然，對於開挖面前方之地質，除前進探查為較直接之方式外，僅可間接藉由開挖出之碴料，機身預留之地質觀察開孔，觀察出露之岩盤，故前進探查對TBM施工係相當重要的。TBM操作手則是藉由前進探查所獲悉TBM前方之地質資料，且於開挖進行中依實際目視輸送帶上之出碴情形（如：出碴量、碴料之形態、大小、顏色、含水與否...等等）以及開挖之扭矩、轉速、掘進率、耗電量（安培數）、震動、聲音等等，了解TBM所遭遇之岩盤。



圖 13 導坑施作前進探查



圖 14 主坑 T B M 鑽機施作情形

故雪山隧道導坑 T B M 施工時，即規定 T B M 開挖時，需於 T B M 前方進行不取心之前進探查工作，每次探查孔深至少須達 30 公尺，且需經常維持在開挖面前方 10 公尺以上。主坑部分，由於導坑開挖在前，以提供相當之地質資料，故僅規定視需要施做，故導坑 T B M 於尾盾後方配置 2 部鑽機，主坑 T B M 則設置一部鑽機，利用盾身預留之鑽探導孔，施做前進探查。然導坑施做不取心前進探查，除一般施做鑽探常發生包括塌孔、鑽頭偏移、回水過低或無迴水等困難外，尚遭遇下列因素造成困難，導致施做 30 公尺長之前進探查，常需耗費極長之時間，地質越差耗費時間越長，有時需花費一日以上之時間，造成 T B M 停機過久，需承擔之風險越高。

1. 鑽機及鑽桿固定不易：導坑 T B M 鑽機係固定於於尾盾後方之迴轉架上，鑽機又有相當之重量，施鑽過程中固定不易，鑽桿不易直線前進，主坑 T B M 係固定於尾盾後方之平台上較無上述問題；另鑽機與尾盾上之導孔有一段距離鑽桿呈現懸空狀況，鑽探時穩定度差，影響施鑽效率。
2. 鑽桿對孔不易：由於鑽桿需經過尾盾後方預留之導孔，以導坑 T B M 為例，導孔與 T B M 水平軸之夾角甚小(約僅 6° ，主坑約為 $7.5^{\circ}\sim 14^{\circ}$)，孔徑為 80mm，且穿過尾盾頓盾身之長度達 2.1 公尺，故施鑽時鑽機需緊貼於盾殼上，且對孔不易，施鑽時鑽桿易緊貼於導孔，造成施鑽時之困難。

T B M施做前進探查時，由於前述之因素造成施做時常需花費極長之時間，對於T B M施工效率產生極大之影響，亦將造成T B M停機過久，使T B M受夾之施工風險大增，為改善施鑽過程中所遭遇之困難，除改善鑽機之性能及穩定度外，導孔之孔徑以加以擴大，施鑽之效率略有改善。此外亦引進包括水平長距離探查、震測等方式，協助了解T B M前方地質。

(八) 地質改良

若經由前進探查發現T B M前方有不良地質時，即需進行地質灌漿處理，在正常情況下，僅能由T B M內進行灌漿作業，藉由尾盾後方之鑽探導孔進行灌漿作業。其打設灌漿孔方式與施鑽前進探查相同，即作地質灌漿鑽孔處理時，鑽設灌漿孔之困難度與施做前進探查相同，另外尚有下列事項須特別考量：

1. 灌漿前必須先以低強度之灌漿材料將T B M機身四周予以保護，以避免後續之灌漿，將盾身內T B M之驅動馬達等設備遭漿液灌死，使T B M恢復開挖時無法正常運作。
2. T B M開挖後盾殼與岩盤間留有空隙，鑽孔後該部份無法於灌漿孔進行封堵工作，漿液極易由該部分孔口流出。故如何在灌漿時有效封堵漿液，成為灌漿成功與否之重要因素。
3. 由於尾盾導孔之孔口至T B M機頭之距離約 10 公尺，加上導孔與之水平軸夾角，以打設 30 公尺之灌漿孔，僅達T B M機頭前方約 20 公尺，崇直距離約以達 10 公尺左右，此一部份應於佈設灌漿孔時應特別考量之因素。
4. 因受T B M本身預留之固定導孔位置，僅能利用導孔進行鑽孔作業，且其方向亦受到限制，故灌漿佈孔工作受到相當之限制。

(九) T B M受困原因及處理方式

依導坑T B M受困情況大致可以分為三大類，第 I 類為T B M機頭受夾。第 II 類為渣料湧入T B M機身內。第 III 類為盾身受夾。

1. T B M機頭受夾

T B M於開挖通過時T B M機頭前方及削刀頭上方岩盤局部或全面性抽坍，大量岩塊及細料擠滿削刀頭之前面及四周，抽坍渣料將機頭埋沒，使削刀頭受擠壓無法運轉，或因岩塊卡住削刀頭頸部、進渣口及削刀座，造成T B M機頭無法運轉。

2. 渣料湧入T B M機身

T B M機頭突然出現大量湧水，造成T B M機頭前方或上方發生抽坍，抽坍渣料除將機頭埋沒外，大量渣料亦隨地下水湧入T B M料艙，致T B M輸送帶超過負荷，或因大量湧水夾帶泥渣淹沒主驅動馬達，造成T B M全面性停機而無法運轉。

3. T B M機身受夾

於T B M開挖通過後，因某些因素停留過久，盾殼四周岩盤解壓鬆弛或上方岩楔破壞，造成T B M前盾或尾盾受夾，致T B M無法繼續開挖。

T B M受困之處理方式，不外乎開挖迂迴隧道、排水廊道、頂導坑，並配合灌漿作業處理。然T B M一旦受困，開挖迂迴隧道處理為最直接而簡單之處理方式。迂迴隧道入口以儘量接近機頭為原則，因此迂迴隧道入口常在尾盾後方及T B M B/U 區，依據雪山隧道T B M脫困之迂迴隧道入口位置可分為下列幾種：

- (1).迂迴隧道入口位於尾盾側壁方案，如圖 15 所示。
- (2).迂迴隧道入口位於尾盾後方之側壁，如圖 16 所示。
- (3).迂迴隧道入口位於尾盾後方之頂拱，如圖 17 所示。

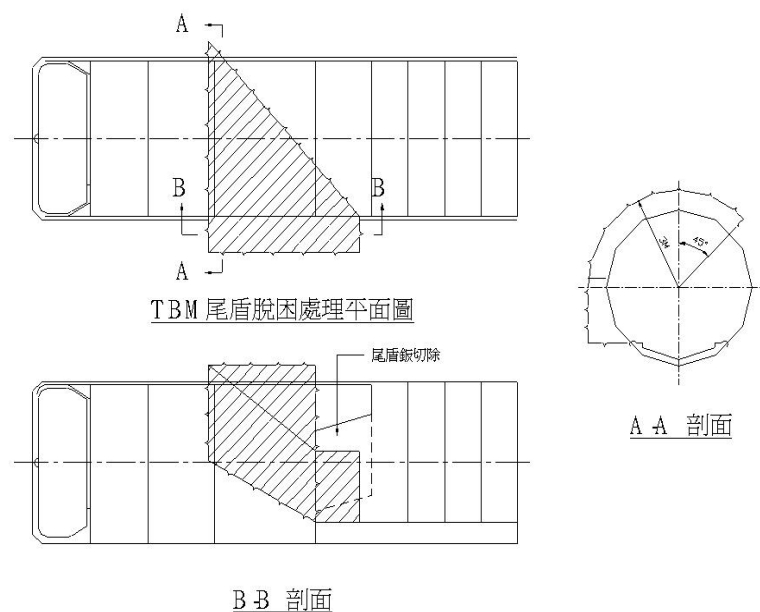


圖 15 迂迴隧道入口位於尾盾側壁

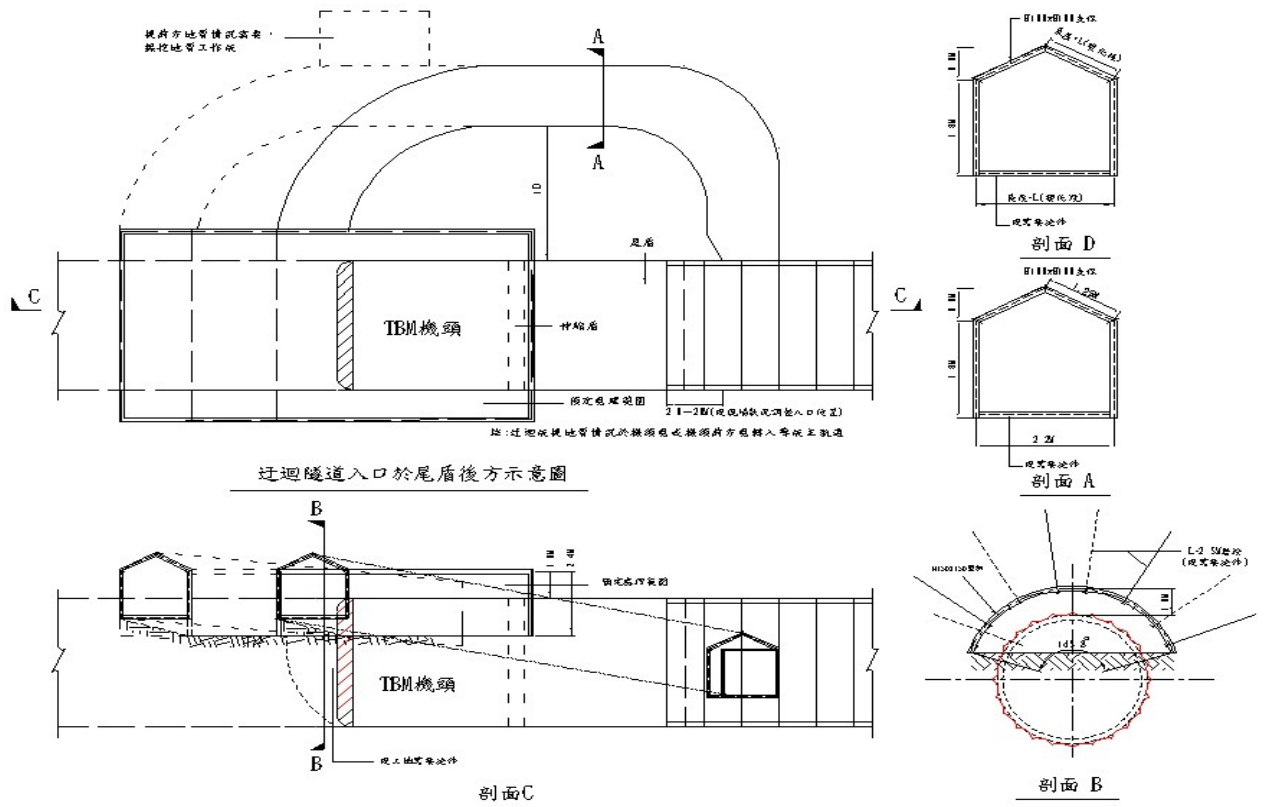
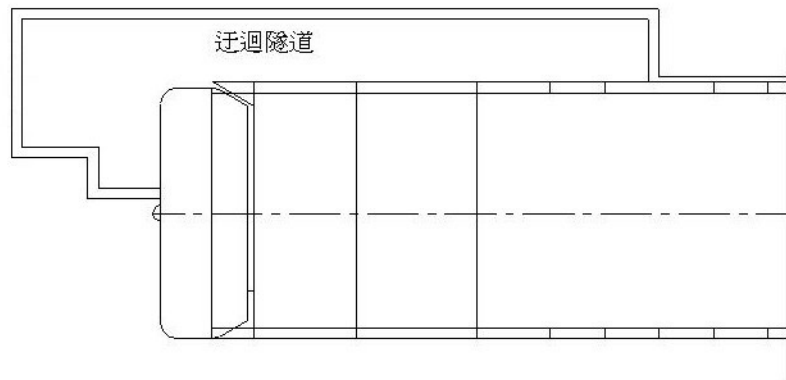


圖 16 迂迴隧道入口位於尾盾後方之側壁



迂迴隧道入口位於尾盾後方3m 之頂拱方案示意圖

圖 17 迂迴隧道入口位於尾盾後方之頂拱



圖 18 迂迴隧道抽坍情形

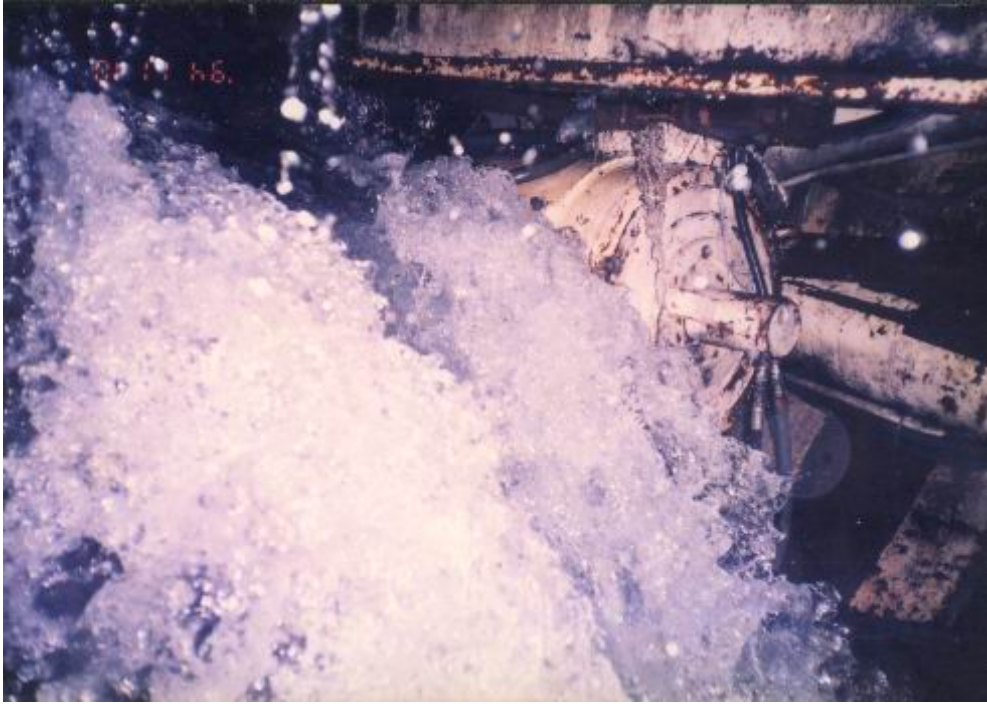


圖 19 TBM施工遭遇大湧水



圖 20 抽坍碴料隨地下水湧入TBM料倉

四、 結語

雪山隧道已經完工通車，回想 T B M 剛引進雪山隧道時，由於係國內第一次使用 T B M 施工，欠缺有經驗之施工團隊，雖有外籍技術顧問之指導，然由於雪山隧道東口段堅硬又破碎之四稜砂岩層，一度使 T B M 之施工效率不如預期中之理想，每遭遇一次困難，施工團隊往往想盡各種方式一試再試，從中獲取相當之經驗，採取之措施包括：T B M 機具之局部修改，鑽灌機具之改善，引進震測法、水平長距離探測協助了解 T B M 前方之地質，T B M 機具之加強維修保養等，使 T B M 施工後期，達到規劃時預期之進度。如今 T B M 已功成身退，施工團隊也已完成了一個世界級之工程，相信「T B M 或雪山隧道」這個名詞，將在每一個曾經參與過的工作伙伴心目中留下一個充滿喜怒哀樂很難忘懷的回憶。

五、 參考文獻

1. 張文城，”北宜高速公路坪林隧道導坑工程 T B M 施工灌漿及地質調查工作概述”，94 岩盤工程研討會，P59~67
2. 魏建生，”全斷面隧道鑽掘機之製造、運輸、組裝及發進”，94 岩盤工程研討會，P201~208
2. 張文城，”全斷面隧道鑽掘機(T B M)之規劃、設計與施工”，岩石隧道工程研討會，P145~P155
3. 國道新建工程局，”隧道工程施工技術解說圖冊”
4. 榮民工程股份有限公司北宜施工處，”85~94 年度 T B M 及其支援系統之操作細節評估報告”及雪山主隧道隧道鑽掘機(T B M)全程施工重要事項記錄及檢討報告