

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：) 實習

## 全斷面隧道鑽掘機施工技術

服務機關： 台灣電力公司

出國人 職 稱： 十等地質監

姓 名： 黃偉光

出國地區： 日 本

出國日期： 89年11月27日~12月14日

報告日期： 90年2月8日

# 目 錄

	頁 次
第壹章 研習目的	1
第貳章 研習過程	3
第參章 研習內容	11
一、前言	11
二、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 機型種類簡介	11
三、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 主要設備介紹	14
四、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 工法與傳統鑽炸工法 (D&B) 之優缺點比較	21
五、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 之規劃評估與鑽挖預 測	23
六、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 工法遭遇特殊困難地 質處理方法	28
第肆章 結論與建議	34
一、結論	34
二、建議	36
第伍章 參考文獻	38

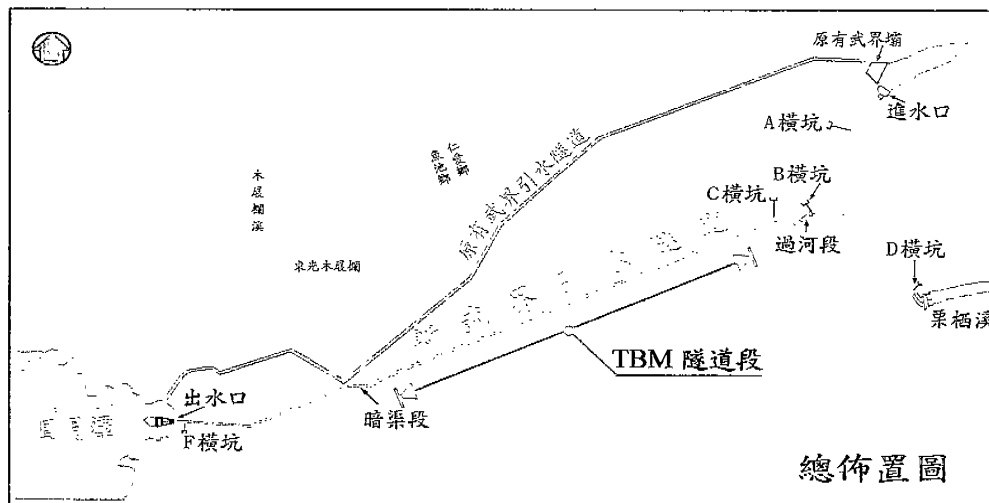
## 第壹章 研習目的

日月潭水庫為台灣電力公司日月潭水力發電系統之中樞，負責供應包括明湖、明潭等五座總裝置容量達 277 萬千瓦之抽蓄及傳統發電廠發電以及其周邊鄉鎮所需民生與灌溉之用水，是以，日月潭水庫之水源必須確保，否則，非但國內尖峰用電之供應受阻，附近居民之生活亦將遭受重大影響。日月潭為一離槽水庫，其水源主要仰賴現有武界隧道引取武界壩上游水量，由於現有武界隧道已使用 60 餘年，其襯砌混凝土已嚴重龜裂剝落，有崩坍之虞，為避免影響日月潭發電系統之正常運轉，本公司決定興建一條新武界引水隧道替代現有之老舊隧道，並將濁水溪上游支流栗栖溪之水源一併引入日月潭統合運用。

新武界引水計畫聯結現有武界壩、新建之栗栖壩及日月潭，隧道總長約 16.4 公里，引水路由四段隧道組成，彼此間以過河拱橋或暗渠相連，工程之佈置如圖一所示。本計畫於可行性研究階段時，當時負責調查與設計之中興顧問社建議所有隧道均採鑽炸法施工，至基本設計階段時，為考慮達到縮短工期、降低對施工地區環境造成之衝擊、減少對隧道勞工之需求量及提昇我國隧道施工水準之目的，自過河段至木屐欄暗渠段間約 7.7 公里長之大部份隧道改採全斷面隧道鑽掘機 (Tunnel Boring Machine, 簡稱 TBM) 工法施工 (長度約 6.3 公里)。

本計畫之 TBM 隧道段施工已於去 (89) 年 7 月中旬開始鑽挖，為因應爾後施工中可能遭遇之各項考驗，諸如：鑽掘至破碎帶及湧水帶等困難處理問題，所能採取之應變作為，期能使「新武界隧道及栗栖溪引水工程」之施工順利圓滿完成，擬前往他國取經 (因 TBM 工法施工於國內僅有二案例，一為北宜快速公路坪林隧道段採用密閉式 TBM 施工，二為本公司之士林發電工程頭水隧道採用開放式 TBM 施工)，觀摩其 TBM 施工經驗以為借鏡，又因日本之地質情況與台灣類似，均處地球板塊交接處且同為板塊運動頻繁之地區，TBM 施工中所面臨之地質問題應屬同一

性質，是以，決定赴日本研習「全斷面隧道鑽掘機施工技術」，並實際前往 TBM 施工現場觀摩、瞭解與實習，以期對新武界引水工程中採 TBM 施工部份所可能面臨之各項問題及處理措施，能有更深一層之認識與全盤性之了解，進而對其施工有所幫助。



圖一、新武界隧道及栗栖溪引水工程佈置圖

## 第貳章 研習過程

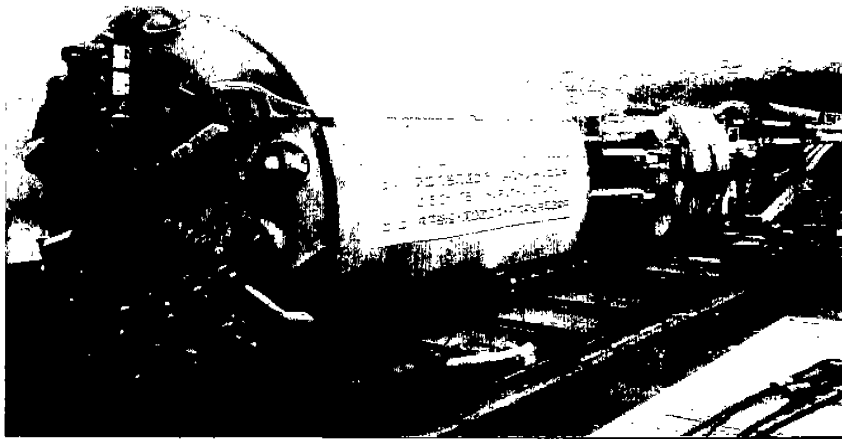
本次研習時間為 89 年 11 月 27 日至 12 月 14 日共計 18 天，赴日期間均由日本熊谷組株式會社代為安排行程，其中共參觀六個工地，茲將實際行程敘述如后：

(一)11 月 27 日至 12 月 1 日：

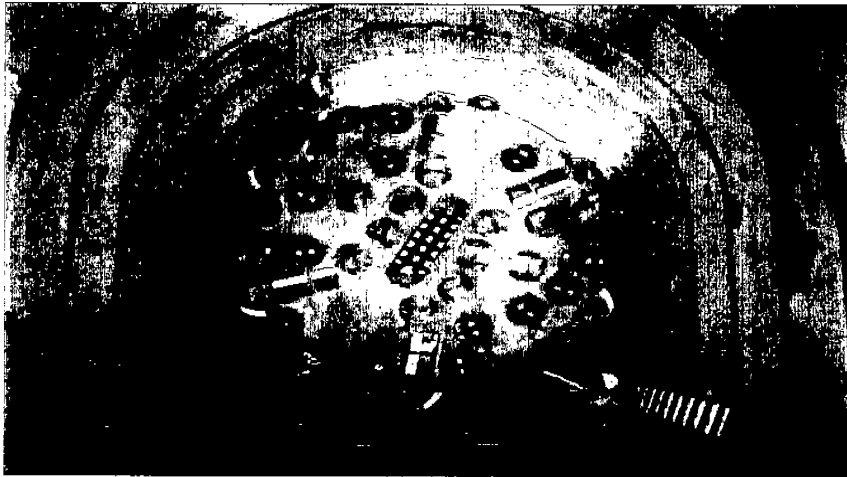
11 月 27 日早上從水里出發搭車前往桃園中正機場，到達機場後辦理相關出境手續，於午後 2 時 30 分搭乘中華航空公司 CI018 班機前往東京羽田機場，抵達機場時間約當地下午 6 時 30 分（日本時差較台灣快 1 小時），俟辦理入境手續後，會同日本熊谷組株式會社接機人員再轉往旅社投宿，已近當地晚上 8 時。

11 月 28 日從東京前往「第二東名高速道路Ⅸ松トンネル工事」工區研習（共四日），顧名思義，即為興建東京至名古屋第二條高速公路之Ⅸ松隧道工程，該工程分為上、下行線隧道，長度分別為 3,200 公尺及 3,262 公尺，兩線隧道工程雖由不同公司聯合承攬（上行線為佐藤工業、住友建設、株木建設公司，下行線為熊谷組、東急建設、大本組公司），惟工程均先以 TBM 工法（直徑 5 公尺）做為先進導坑開挖，貫通後再以 NATM 工法擴挖完成，而所採用之 TBM 同為開放式機型（Open Type），目前已完成上（東）行線隧道導坑開挖，現正進行下（西）行線導坑開挖，有關 TBM 機身組裝、TBM 駛進隧道及隧道洞外出渣情形如照片一、二、三所示。

12 月 2、3 日轉往「大久保古人見線トンネル工事」（為興建「Ⅸ名湖」對外聯絡道路工程）工區參觀，該工程由於地質不佳（為砂土層、卵礫石層及粘土層三種互層），開挖工法採用所謂「側壁導坑先進工法」，即「NATM 工法」（New Austrian Tunnel Method，新奧地利隧道工法，簡稱「新奧工法」）配合管幕工法分階開挖施工，隧道長度為 108 公尺，目前僅進行洞外第一組管幕工法鑽設工作，現場施工如照片四所示。



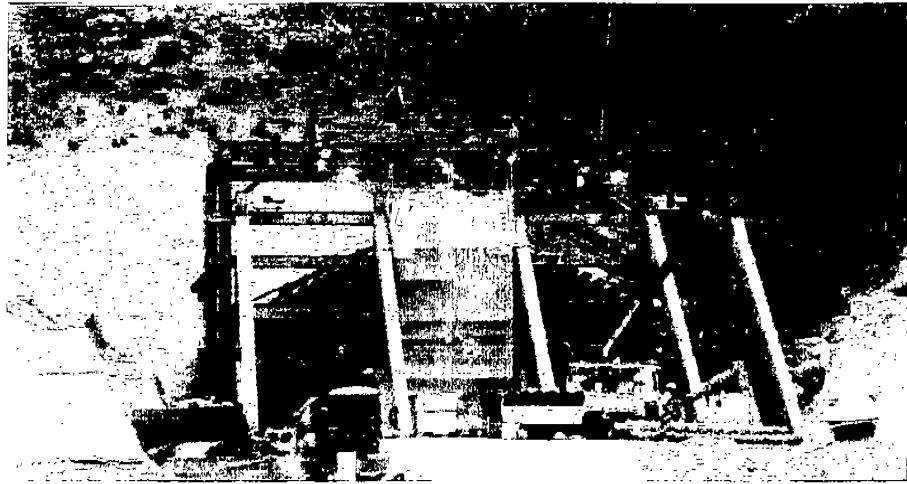
照片一、TBM 機身於 IX 松隧道外組裝情形



照片二、TBM 自行駛進 IX 松隧道情形



照片三、IX 松隧道（下行線）洞外出碴情形



照片四、大久保古人見線隧道施工情形

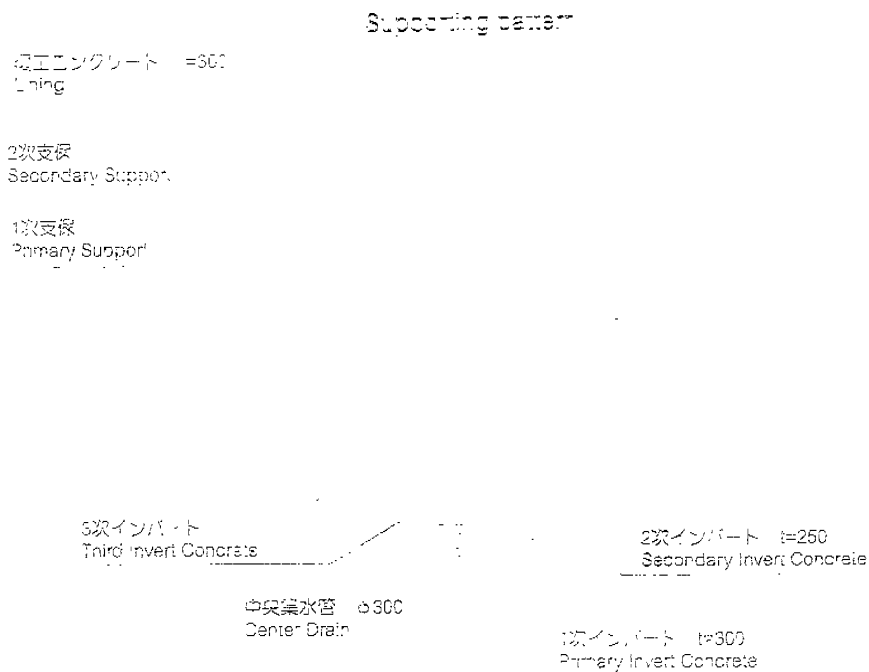
(二)12月4日至12月10日：

12月4日至6日則於「箕面有料道路山岳トンネル築造工事」(意即箕面收費公路之隧道工程)工區實習，此工程係配合大阪府名為「水と緑の健康都市計畫」(青山綠水健康之都)所興建，隧道並穿越「明治の森箕面國定公園」(箕面國家公園)底下，除有益於疏導現今往返箕面國家公園之擁塞交通外，並有利爾後東京至名古屋之第二條高速公路完工後所帶來之觀光發展，本工程隧道開挖為 NATM 工法，隧道長度約 2000 公尺，其現場施工如照片五所示。



照片五、箕面隧道噴凝土施作情形

12月7日至8日轉往「北陸新幹線飯山トンネル工事」富倉工區實習，顧名思義，此工程為興建北陸地區高速鐵路之飯山段隧道工程，該隧道工程全長為22,225公尺，隧道長度世界排名第三，該工程共分為六標，而本人所研習之富倉工區乃為其一，隧道長度約3,800公尺，開挖以NATM工法施作，惟富倉隧道為因應通過所謂「膨脹性岩盤」(係指泥岩與凝灰岩)，其保護工則採用非常特殊之二次支撐(Secondary Support)，設計上對二次保護工所允許之變形量分別為20cm、15cm(即襯砌前最大累計變形量可容許至35cm)，仰拱混凝土部份更為配合此保護工施作，共分為三次澆置，其施工示意圖如附圖二，現場仰拱混凝土澆置情形如照片六所示。



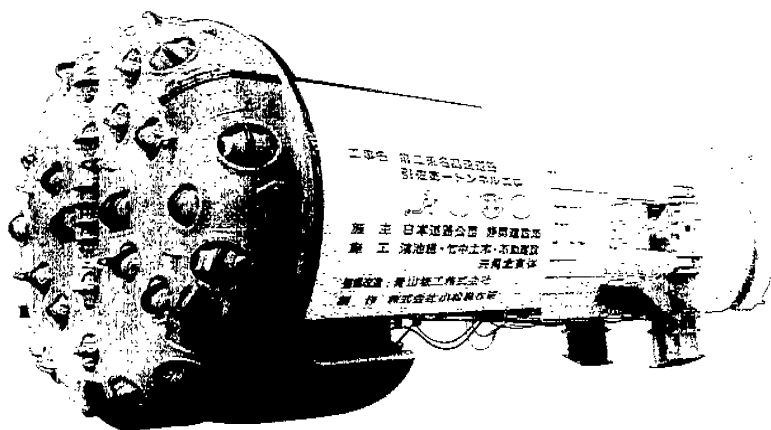
附圖二、富倉隧道支撐示意圖





照片六、富倉隧道仰拱混凝土澆置情形

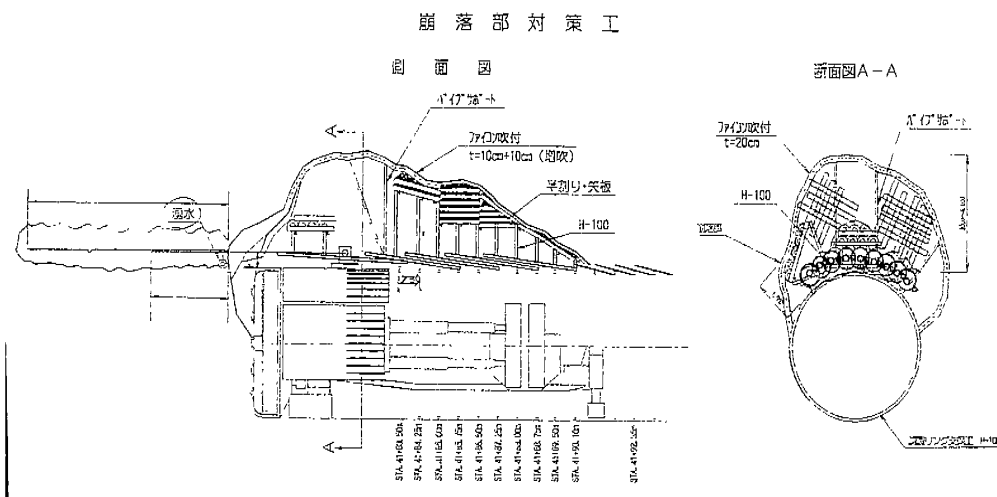
12月9、10日則在「第二東名高速道路引佐第一トンネル工事」工區研習，同前所言，亦為東京至名古屋之第二條高速公路工程之一，該工程分為上、下行線隧道，長度分別為1,440公尺及1,464公尺，兩者同以TBM工法（直徑5公尺）做為先進導坑開挖，貫通後再以NATM工法擴挖完成，所採用之TBM均為開放式機型（Open Type），如照片七、八所示。然於現場實習時發現，恰於TBM掘進時發生前方湧水，造成TBM機身上方崩塌意外，目前正在處理中，其所採取快速施工之因應對策值得本國爾後施工之參考，如附圖三所示。



照片七、引佐隧道TBM機頭模型照片



照片八、引佐隧道 TBM 後方支援系統照片



附圖三、引佐隧道 TBM 機身上方發生崩落之因應對策示意圖

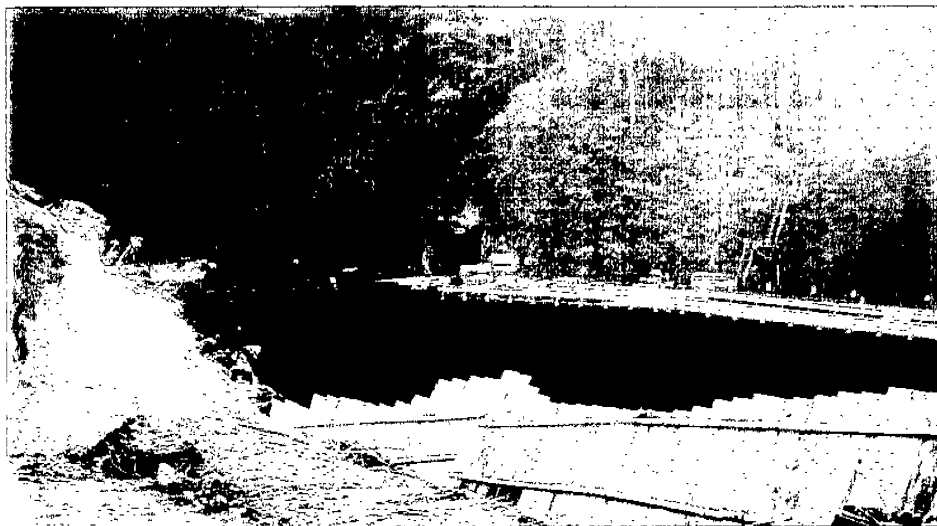
(三)12月11日至12月14日：

12月11、12日轉往「第二東名高速道路富士川トンネル西(その2)工事」工區研習，雖同前為東京至名古屋第二條高速公路工程之一，但此工程是所有計畫中困難度最高且工期最久(約十年，今年為第5年)，除隧道最長(上、下行線分別為4,520、4,434公尺)外，且因位於高山峻嶺中，隧道二端出口即須銜接約80公尺高之高架橋，同樣地，隧道均先以TBM工法做為先進導坑開挖，貫通後再以NATM工法擴挖完成，其施作流程示意圖如附圖四所示。又，為求慎重起見，於導坑施工前，特別再施作

一直徑為 3.5 公尺且平行主隧道之探查坑（亦採 TBM 工法），做為先進導坑之地質調查之用，如照片九，而所有之 TBM 均為密閉式機型（Close Type），目前已完成下行線隧道先進導坑開挖，除依規定下行線隧道正擴挖外，亦在進行上行線隧道先進導坑之鑽掘，TBM 切輪（Cutterhead）及現場鋼支保架設施工情形分別如照片十、十一所示。



附圖四、富士川隧道開挖流程示意圖



照片九、富士川隧道探查坑東側口遠眺照片



照片十、富士川隧道密閉式 TBM 切輪照片



照片十一、富士川隧道現場鋼支保架設施工照片

12 月 13 日則前往熊谷組株式會社拜會並誌謝安排所有行程，順便借閱有關 TBM 設計及施工方面之書籍，獲益匪淺。

12 月 14 日早上從下塌旅館出發乘坐捷運前往東京羽田機場，俟辦理相關出境手續後，搭乘中華航空公司 CI017 班機於下午 5 時 30 分返抵桃園中正機場，正式結束為期 18 天之出國研習行程。

## 第參章 研習內容

### 一、前言：

水力發電屬再生能源之一，為目前所謂乾淨無污染能源中發電效率最高，故向來於本公司具有舉足輕重之位，未來亦更如此，然水力發電基本原理係利用河流之位能差帶動水輪機發電，而能製造位能差之環境，均處深山峻嶺，因此，無不仰賴開挖隧道引水方可達成。早期隧道之開挖均採鑽炸工法施作，雖近二十年來在不斷求新求變下，有不錯之成就，然具有高效率及安全性之隧道機械施工法也在同一時期內有著令人矚目之進展，其中「全斷面隧道鑽掘機（TBM）施工法」之孕育而成，可稱得上是人類於二十世紀隧道開挖史上最偉大之發明。

新武界工程為國內第三個採用 TBM 施工之工程案例，前有北宜高速公路之坪林隧道工程採用密閉式 TBM 施工，因遭遇惡劣地質，致導坑及西行線主坑 TBM 機頭分別遭挾埋受困，工程進度嚴重耽誤；及士林水力發電工程頭水隧道採用開放式 TBM 施工，獲致還算不錯之成果，但卻因遭遇瓦斯而未竟全功。於此，實有必要對此具有縮短工期、降低環境衝擊、減少人力需求及提昇施工技術等多項優點之 TBM 開挖工法通盤了解，方能記取前車之鑑，避免重蹈覆轍。以下內容即針對作者現有資料加上赴日研習心得，將 TBM 之機型及設備、與傳統鑽炸工法（D&B）之優缺點比較、規劃評估與鑽挖預測、遭遇特殊困難地質相關處理方法等作一系列之敘述，並於說明中適時參入案例一同探討，希俾供同儕之參考。

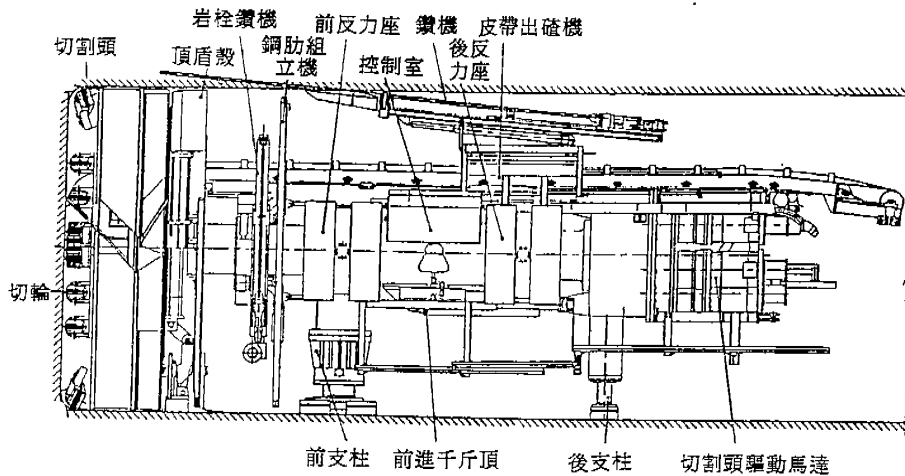
### 二、全斷面隧道鑽掘機（TBM）機型種類簡介：

TBM 可根據隧道之地質特徵而設計，因此，每部 TBM 之規格不盡相同，惟其切磨之原理則相同；所謂機型之不同，主要是基於隧道開挖後之岩盤自立時間及為保護主機與操作人員安全之考量所作之不同設計。大體上可依切削頭及盾殼之種類分為開放

型 (Open Type) 及密閉型 (Close Type) 兩種，茲略述如后：

(一)開放型 (Open Type)

開放型隧道鑽掘機用於地質條件較佳，預期無較軟弱地質（如：具有膨脹或擠壓特性）或無大量湧水隧道，為保護機具及人員之安全，僅於鑽掘機之頂拱設盾殼保護。盾殼分為局部片狀、網格狀及條指狀，後二者可利用其空隙施打岩釘，以穩定隧道岩壁，TBM 主機部份之典型構造如圖五所示，操作過程與時間循環如表一（以一衝程為 2 公尺作範例說明），此型鑽掘機經常採行岩釘及噴凝土作為支撐系統，符合 NATM 之支撐精神，支撐成本較低，如：新武界引水工程及士林水力發電工程等即採此類型。



圖五、開放型 TBM 主機構造示意圖

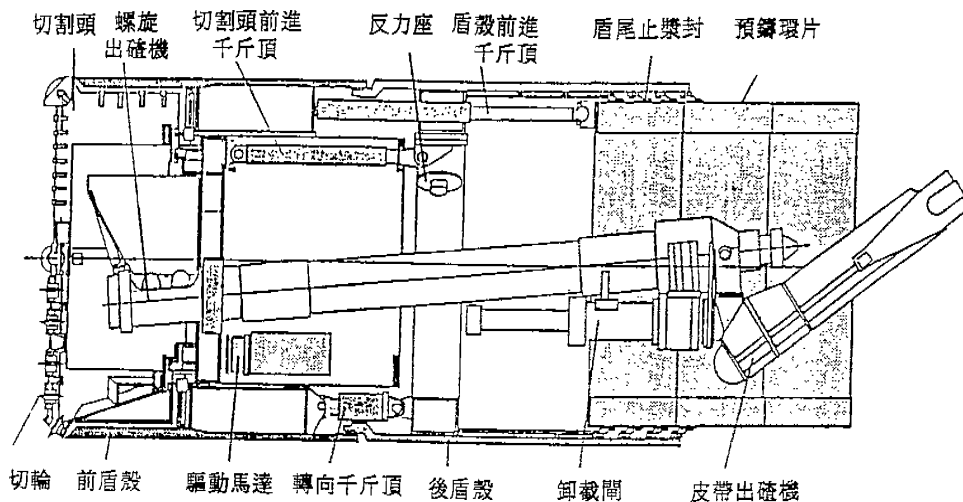
表一、開放型 TBM 操作過程與循環時間表

操作過程示意圖	步驟	操作過程	循環時間 / 2 公尺 (分鐘)
	1	反力座緊壓隧道側壁 千斤頂向前推出 切割頭旋轉開挖面切磨 施作隧道支撐工	50
	2	完成一次衝程，切割頭暫停旋轉放下後支柱。 收回反力座並向前移動至新衝程起點。	10
	3	反力座再緊壓隧道側壁 收回後支柱 重新啓動切割頭及千斤頂	5
	4	藉著機座調整上下位置及左右方向 調整結果使機身向相反方向轉向 可於切磨循環之前或中調整方向	視需要

## (二)密閉型 ( Close Type )

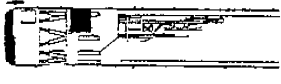


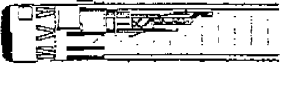


密閉型隧道鑽掘機用於地質變化較大，預期遭遇軟弱岩質（膨脹性或擠壓性）或大量湧水之隧道。此型鑽掘機全體以盾殼保護如同土層潛盾機，盾尾及各個關節均有止水設施，以防地下水湧入。盾殼又分為單節盾殼（Single Shield）、雙重盾殼（Double Shield or Telescopic Shield）、及縱走盾殼（Walking Blade - Gripper Shield）三種。

單節盾殼與主機連成一體，當鑽掘機前進時盾殼及支撐安裝設備亦隨同移動，故如安裝環片，主機需要停止前進。雙節盾殼鑽掘機為套筒式之兩節盾殼所組成，前節盾殼前進移動時，後節盾殼則保持靜止，以便安裝環片，俟環片裝妥後，後節盾殼再行跟進，其典型構造如附圖六所示，操作過程與時間循環如表二。縱走盾殼鑽掘機，其盾殼分割為平行隧道軸之片狀，各片可獨自往前推進。由於每片面積較小，推進較易。另因可調小各片之間隙以縮小盾殼外徑，可防止鑽掘機被軟弱地質挾埋。又，密閉型鑽掘機常以環片為支撐系統，以簡化作業，並防患地下水之湧入，惟環片之價格較高且搬運不便，如：北宜高速公路之坪林隧道工程即採此機型。



圖六、密閉放型 TBM 主機構造示意圖

表二、密閉型 TBM 操作過程與循環時間表

操作過程示意圖	步驟	操 作 過 程	循環時間/2 公尺 (分 鐘)
		一 般 岩 盤	
	1	後盾殼之反力座緊壓隧道側壁 千斤頂向前推出 切割頭旋轉向開挖面切磨	50
	2	完成一次衝程，切割頭暫停旋轉 前盾殼之反力座緊壓隧道側壁 收回後盾殼之反力座並向前移動至新衝程起點	10
	3	後盾殼之反力座再緊壓隧道側壁 重新啟動切割頭及千斤頂施作 隧道支撐工	5
	1	破碎岩盤或斷層 輔助千斤頂緊推隧道襯砌環片 千斤頂向後推出 切割頭旋轉向開挖面切磨	70
	2	完成一次衝程，切割頭暫停旋轉 收回千斤頂 組立隧道襯砌環片	50
	3	重新啟動切割頭及千斤頂	0

### 三、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 主要設備介紹：

TBM 設備一般分為：主機、支援系統、運輸設備 (含運輸車輛)、管線設備及隧道外工作場設備等五項，概述如下：

(一)主機：此設備可謂是 TBM 工法成功與否之最重要之關鍵部份，包括開挖機頭、前進動力設備、支撐材料之安裝設備、出渣輸送帶等四個主要結構。

1.開挖機頭：又稱為「切削頭」，由「切輪」(Cutterhead，有人稱之「切刀」)、「進渣口」(Muck Bucket)及「人孔」(Access Door)等三個部份所組成；切輪專責將前方岩盤磨碎，磨碎後之岩塊(此時稱為「渣料」)經由進渣口掉入機頭後方之進渣槽(Muck Chute)後，再藉由出渣輸送帶(Conveyor)運送至支援系統，

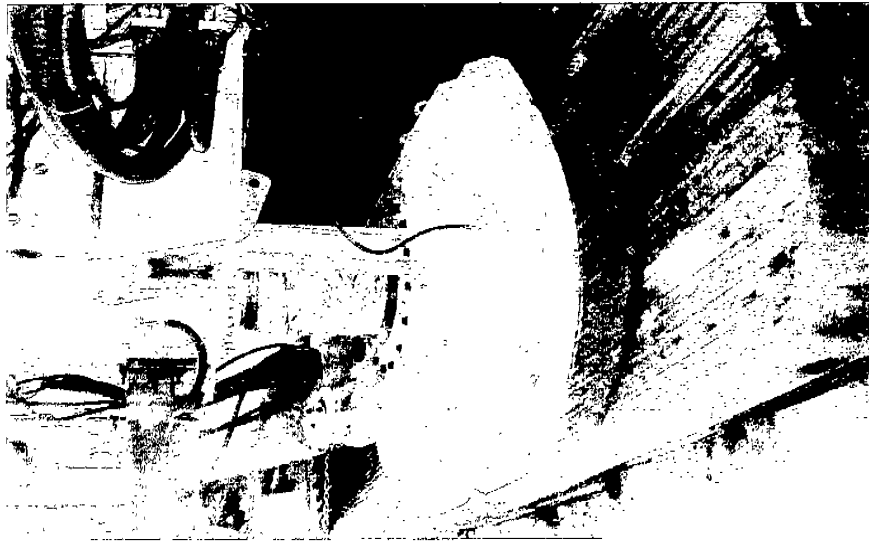


進而轉運至隧道外運走，而人孔之功用為方便工作人員進出機頭並置換已磨損之切輪，三者之中又以切輪最為重要，因切輪之大小尺寸、數量及磨損程度等均左右開挖速率之好壞，如照片十二所示。



照片十二、切輪照片

2. 前進動力設備：包含切輪之驅動設備 ( Main Drive Assembly )、反力座 ( Gripper )、推進設備 ( Propel Assembly )、輔助推進千斤頂 ( Thrust Cylinder ) 及支撐腳 ( Rear Support ) 等五項；切輪之驅動設備為供應切輪轉速之動力，其驅動方式又可分為油壓式及電動式兩種；反力座係為抵住側壁，並借以產生反作用力，使其轉為前進之動力，又可作為左右方向校正之用，如照片十三所示；推進設備即為將反力座產生之反作用力轉換為 TBM 前進動力，使得 TBM 整體前進；而輔助推進千斤頂，意謂當 TBM 位於較軟弱地質處，反力座所產生之反作用力不足以提供 TBM 前進，此時須借由輔助推進千斤頂抵住已安裝完成之混凝土鋪片 ( 襯砌環片或為仰拱混凝土鋪片，密閉式為 )，適時補充所需之反作用力，以免 TBM 動彈不得；至於位於後部之支撐腳功能為當 TBM 停止前進時 ( 切輪正在磨碎岩盤或 TBM 維修等 )，後部支撐腳係做為支撐 TBM 整體重力之用。



照片十三、反力座張開抵住側壁岩盤照片

3.支撐材料之安裝設備：為考慮隧道內施工人員及機具之安全，隧道保護工之施作乃為必要工作，因此，支撐工之安裝設備更不可或缺，惟配合支撐材料之選定，所搭配之設備會有所不同。以下係以保護工施作方式將所搭配之機具設備一併敘述：

(1)H 型環狀鋼支保：須依賴配置於開挖機頭後方的滑車與人力之配合，得將 H 型鋼支保迅速而準確的架設在隧道壁上，如照片十四所示，由於鋼支保裝設位於最前方且為環狀，故 TBM 每一衝程須為鋼支保間距（混凝土鋪片長度亦同）之整數倍（一般均採相同值或為 2 倍，如：一個衝程為 1.5 公尺，鋼支保架設間距（或混凝土鋪片長度）則為 1.5 公尺或 0.75 公尺。

(2)U 型槽鋼及鋼線網：須搭配於主樑上可縱向移動之滑車及鑽機，方能輕易地鑽設岩釘（Rock Bolt，或稱「岩栓」），而將 U 型槽鋼及鋼線網立即安裝在隧道頂拱，以達到立即支撐之目的。

(3)岩釘：利用架設於主樑上之「頂拱鑽機」（Roof Drill，一般分設於主機左右兩側），可於頂拱左右各約 60 度範圍內鑽設岩釘（一般鑽設 2~4 支），為配合 TBM 前進速率，若遭遇地質較軟弱地方，需增設岩釘較為安全，則不足數量則再於支援系統區域配合台車及使用輕便型鑽機補設岩釘。



照片十四、鋼支保架設施工照片

(4)噴凝土：其施噴之機具與一般鑽炸法隧道或露天邊坡使用時大致相同，比較不一樣係需銜接較長之管路，因所提供之料源均置於支援系統，並須依賴台車運至；就岩體力學觀點而言，隧道開挖完成後為提供岩石初期解壓時所需之支撐，噴凝土施作應採隨挖隨噴，因此，均在機頭後方施作，然因噴凝土具有污染性及反彈料，在施工之前，應將施噴範圍內附近之設備覆蓋（一般採用防水布），以免將機具污染而發生故障；又為減少骨材之反彈量且增加早期強度，目前日本均採用細骨材之混凝土砂漿加上化學纖維施作，操作起來亦相當輕便，如照片十五所示。

(5)前進地質探查孔：因鑽孔角度幾為水平，故又稱為「前進水平探查孔」，係利用「前進鑽機」(Probe Drill)於機頭後方（可依鑽孔位置而移動）往前進方向鑽孔，探查前方地質情況，據瞭解現今日本施工時為求鑽孔效率，一般不取心（因取心需耗時甚久，會影響 TBM 鑽挖時程），而由鑽機操作手依鑽進壓力及（地質）工程師依鑽孔洗出之碎岩塊、出水量來研判前方地質好壞，作為往後支撐保護工選定之參考，如此一來，不僅可做好地質調查又不影響 TBM 鑽進效率，值得本國學習；再者，前進鑽機又有施作先撐鋼棒之功用，可作為保護頂拱以免岩塊掉落，影

響工作人員安全，如照片十六所示。



照片十五、噴凝土施工照片



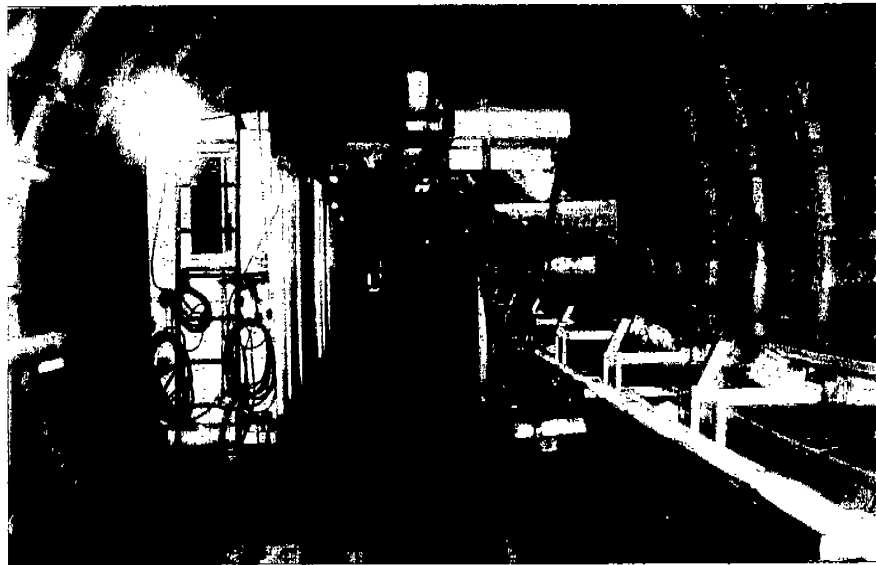
照片十六、前進鑽機施作先撐鋼棒之情形

(6)混凝土鋪片：可分為預鑄混凝土鋪片及場鑄混凝土鋪片，一般來說，前者品質容易控制且為佳，而後者則較為經濟；就開放式 TBM 而言，又可分為仰拱預鑄混凝土鋪片及場鑄環片兩次方式完成，因隧道開挖初期先施作仰拱預鑄混凝土鋪片，俟貫通後採兩端齊頭式澆置場鑄環片，其優點可縮短工期。

(二)支援系統：顧名思義，即為支援 TBM 主機之設備，大致上分為輔助機具設備、出渣與供料設備、通風設備等三種。

1.輔助機具設備：包括輸電系統、保養維修系統、變速箱、電路系統、液壓設備、施工人員用膳間、出渣操作系統、冷卻系統、空氣集塵器及照明系統等。

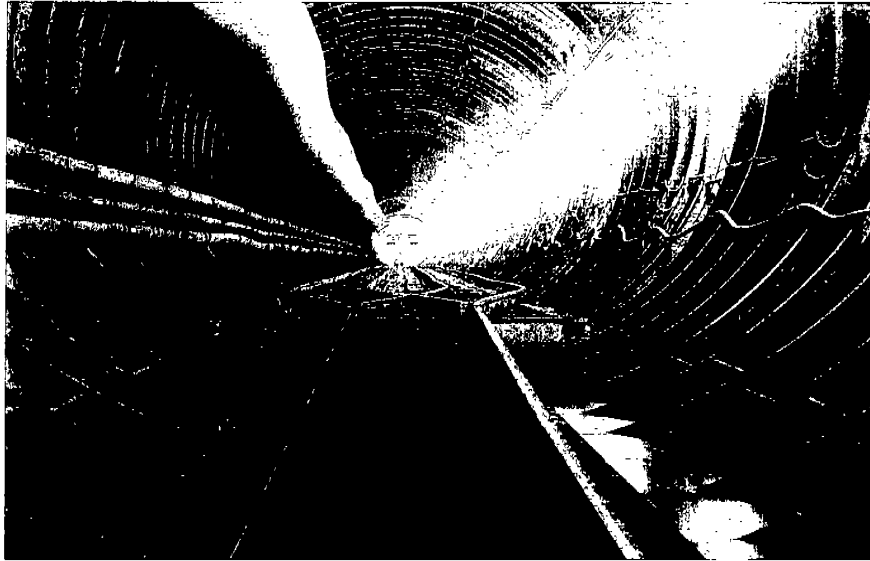
2.出渣與供料設備：一般指運渣台車、供料台車、機車頭等，若 TBM 尺寸（即隧道斷面）夠大時，有時直接架設出渣輸送帶至隧道外，如此一來，運渣台車可免，較符合經濟原則（又可節省人力，目前在日本很普遍），如照片十七所示。



照片十七、TBM 使用輸送帶直接出渣至隧道外照片

3.通風設備：包含通風管儲存區、油壓吊裝機、二次通風機等。

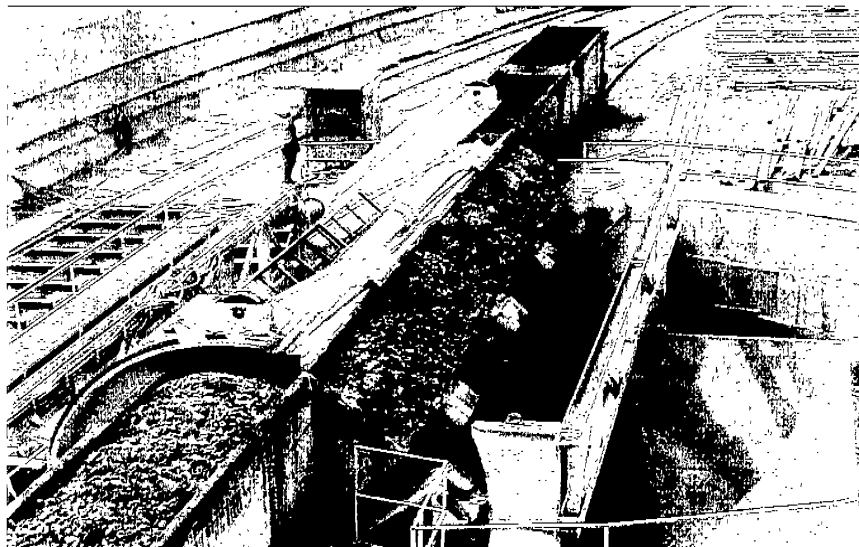
(三)運輸設備：包括 TBM 運輸軌道、柴油機車頭、旋轉式棄渣車（如前段所言，直接架設出渣輸送帶至隧道外時，此設備可免除）、混凝土鋪片車（若採場鑄混凝土時則無此設備）、支撐構件及鐵軌運輸平板車、人員專用廂車等，其中若 TBM 運輸軌道採用單軌時，為利各類型台車進出（尤其是運渣台車，因會影響鑽進速率），加州轉轍器（California Switch）台車系統及坡道台車就需增設，如照片十八所示。



照片十八、加州轉轍器台車系統照片

(四)管線設備：隧道內管線裝配系統包含通風管路、高壓電纜、給水管線及通信管線等。

(五)隧道外工作場設備：係指門型吊車、旋轉傾倒渣料設施（如照片十九，同前述，使用輸送帶直接將渣料運至隧道外，則此項設備亦可免）、噴凝土轉運站、台車修護廠、TBM 零件儲放倉庫、廢水處理槽及臨時置渣場（坑）等。



照片十九、旋轉傾倒渣料設施照片

四、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 工法與傳統鑽炸工法 (D&B) 之優缺點比較：

施工方法之選擇對隧道工程本身及環境之影響均極為廣大深遠，而唯有謹慎且詳盡之研究評估，工法之選擇方能臻於完善，是以，吾等更須對全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 工法與傳統鑽炸法 (D&B) 之優缺點有所了解，才能做出有利之判斷，方使工程事半功倍，綜言之，TBM 工法可歸納出以下四項優點：

(一)機械化施工，開挖速度較快；在適當之地質條件下，機械開挖之速度約傳統鑽炸法 2~4 倍。以英法海峽隧道法國端所使用之全斷面隧道鑽掘機 (T1~T5) 為例，詳如表三，其每週開挖速度最高可達 264 公尺，而每週平均開挖速度亦約在 69~100 公尺左右；若以本公司新武界工程為例，截至目前 (89 年 7 月至 12 月) 為止 TBM 隧道之進度，每週最高開挖速度為 175 公尺，而每週平均開挖速度亦約在 74 公尺左右，同樣地，於新武界工程效率最高之 D&B 隧道，其週最高開挖速度亦僅為 35 公尺，每週平均開挖速度約 25 公尺，由此，可看出二工法間效率上之優劣。

表三、英法海峽隧道法國端與新武界工程之 TBM 施工數據

工程名稱 項 目	英法海峽隧道工程法國端隧道					新武界計畫 TBM 隧道
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	
1.開始日期(年/月/日)	1988/2/28	1988/11/28	1989/3/27	1988/6/28	1989/1/15	2000/7/14
2.已開挖長度(m)	10,200	8,130	6,060	3,215	3,264	1,796.2
3.開挖直徑	5.77	8.78	8.78	5.61	8.64	6.20
4.平均週開挖速度(m)	85.0	100.6	94.7	72.0	69.0	73.5
5.最高日開挖速度(m)	46.9	51.2	49.6	40.6	49.6	40.3
6.最高週開挖速度(m)	237.0	264.0	238.6	210.2	230.6	175.1
7.TBM 長度(m)	11.0	13.75	13.75	10.6	12.6	26.84
8.支援系統長度(m)	270	215	215	200	200	195.16
9.TBM 重量(t)	415	1,200	1,200	320	660	380
10.TBM 動力(kw)	882	2,160	2,160	750	1,440	1,890

(二)不使用爆破方式，可減少超挖量；在採用鑽炸法時，如控制不良，隧道之平均超挖量曾有高達 25%之紀錄。依據新天輪水力發電工程頭水隧道之鑽炸法施工為例，平均超挖量約為 18%。又，在澳洲所進行之一項大型實驗顯示，在 TBM 在遭遇各種不同分類之岩體下，其超挖量之平均值僅約為鑽炸法之 26%，研究之成果並顯示 TBM 開挖在良好之岩體下施作，其超挖量更可大幅減少。

(三)TBM 開挖對開挖面周邊岩盤之擾動較少，可節省部份臨時支撐之費用，依據 I McFeat-Smith 針對一 20 公里長隧道之研究，採用 TBM 約可節省 30%之臨時支撐費用。

(四)TBM 開挖所使用之人力較為精簡，一般約僅為鑽炸法之 33~60%。舉例來說，鑽炸工法之開挖作業屬線性推進，工作人員互相配合，以目前最有效率之全能工作班要從事整個工作循環來說，包括鑽藥孔、裝炸藥、接導線、開炸、通風、局部修挖、支撐工組立、碴料清理及出碴等，至少約需 6~7 人並工作約 6~10 小時，然對 TBM 施工而言，每一循環之作業手工作可簡化為開挖機頭操作手、機工與電工、一般工人（鋪軌、支撐及例行維修）及台車操作手等，僅約需 4~5 人，工作時間亦縮短約 1~3 小時，兩者間之差距不言而喻。

(五)因無爆破，震動及噪音相對減少許多，對附近居民之建築物影響降到最低，可免除不必要之抗爭及費用。例如：馬鞍水力發電工程曾因橫坑洞口距離住宅區太過接近，百姓於夜間可感受到爆炸震動，而遭受彼等要求房屋受損賠償案件，業主為證實與工程無關，除付費邀請公正學術機構進行學術研究調查外，還須數次召開公聽會方能平息民怨。

唯 TBM 工法亦非隧道施工之萬靈丹，尤其於下列事項在工法選擇時，均須予以審慎評估，以免造成難以彌補之嚴重後果：

(一)設備性能一般係依據事先所推判之地質條件來設計，在遭遇異常情況時，可能發生掘進速度大減、設備不正常損耗，甚或有設備被淹沒之危險。傳統鑽炸工法對於地質情況之變化，則有較



佳之應變能力。

(二)設備交貨時間較長，因國內無法自產須從國外購製，一套全新之 TBM 機具最快約等待 1 年半以上始可抵達指定地點，據一項統計資料顯示，平均交貨期約需 9~18 個月。以新武界引水工程為例，88 年 1 月 8 日簽約，89 年 4 月 25 日 TBM 始全部運抵工地並組裝，共歷經近 16 個月，且該成品並非新品製造（曾於瑞士與香港進行過隧道開挖），係由香港維護並作局部修改後就運至台灣，時程上算是迅速。

(三)施工用電量甚鉅，以瑞士 Bozberg 隧道（為目前世界排名第三大口徑之 TBM，開挖直徑為 11.87 公尺）為例，其總動力高達 4,500Kw（與國內坪林隧道主坑所採用之 TBM 相當），有關於施工變電站之設置及其新增用電之申請均十分費時，其費用亦相當可觀。

(四)設備購置、搬運、組立及貫通後之解體費用龐大，其重覆使用性又較鑽炸法為低，對廠商財務負擔較重，因此，不適合隧道較短之工程。

(五)施工途中之鑽掘斷面幾乎無法變更，如設置避車道、轉彎車道等，開放型 TBM 或許還有約直徑之 10% 範圍內尺寸修改之可能，密閉型 TBM 則完全不考可能。

#### 五、全斷面隧道鑽掘機（TBM）之規劃評估與鑽挖預測：

因 TBM 設備成本高於其他工法，因此，其僅適用於長距離隧道工程，一般而言，長度須大於  $0.8D \times 1000$  公尺（D 為隧道直徑）較符合經濟原則。其次，地質條件會影響 TBM 的設計及控制開挖面變形的的方法，同時施工績效對隧道沿線地質狀況仍然十分敏感，尤其在遭遇未預期之地質狀況時，也有可能發生嚴重的進度遲滯情形，這也是採用 TBM 工法時之地質調查費用較高的緣故，茲將岩石隧道開挖時各項考慮因素彙整如表四所示。

當決定採用 TBM 工法時，就需針對已得知之地質條件設計 TBM 設備進而預測鑽掘進度與效率，除了 TBM 斷面尺寸須符合

所要求之開挖斷面外，諸如：切刀尺寸與數量、供應切刀之驅動設備、反力座之扭力、推進設備所提供之推力等等因素，均影響 TBM 掘進之效率，以下係利用二套經驗法則之 TBM 鑽挖能力預測模式，評估新武界引水工程 TBM 隧道之開挖效率並將分析成果與已完成之士林水力發電工程 TBM 隧道做比較。

表四、TBM 工法與 D&B 工法各項考慮因素之比較

考 慮 因 素	D&B 工法	TBM 工法
應用地質情況	任何地質	軟岩—硬岩
投資成本	低	高
施工進度及工期	慢	快
交貨時間	2~3 月	9~18 月
工地組合及試運轉	2 週	8~12 週
組合場地	無限制	較大場地
最小轉彎半徑	無限制	約 200~300 公尺
一般最大坡度	30 度	10~30 度
開挖斷面型狀	任意	圓型
開挖斷面尺寸	任意	1.8~12 公尺
隧道支撐費用	大	小
開挖面週邊擾動情形及超挖量	大	小
隧道內通風情形及費用	不良、高	良好、低
斷層處理及鑽孔費用	無限制	可能
適用隧道長度 (D：隧道直徑)	無限制	約 0.8D×1000 公尺
環境影響	大	小
使用人力數量	多	少
國內施工經驗	多	極少
施工用電量	小	大
地質風險造成機具損失	小	大
施工人員安全	低	高
機具重覆使用性	高	低
隧道內運渣系統要求及重要性	較小	高

(一)本經驗模式乃發表於挪威 Trondheim 大學之 Project Report 1-94 (Hard Rock Tunnel Boring)，係以挪威及其他國家之 TBM

隧道工程作為研究對象，廣泛蒐集並分析資料歸納獲致之經驗模式，於 1976 年首次發表，歷經 79、83 及 88 年版至目前之 94 年版，累計蒐集之資料增加甚多，故其雖為經驗公式，但準確性頗高，茲將分析之主要資料說明如下：

1. 已知資料

a. 隧道長度：6143.88m (扣除 300m 啟動段及上游側 800m 之鑽炸法段，其中，砂岩段 453m、板岩段 5,691m)

b. 隧道方向：N67°E

c. 層面 (砂岩) 及劈理面 (板岩) 位態：N24°E/64°S 及 N38°E/58°S

d. 不連續面間距(cm)/破碎等級：10/III (砂岩)，20/II (板岩)

e. 岩盤石英含量(%)：75/砂岩，37/板岩

f. TBM 直徑/衝程：6.2m/1.5m (雖可達 1.83m，承商擬採 1.5m)

g. TBM 切輪直徑/數量：17"/44

h. 推力/切輪：267KN

i. 切削頭轉速：8.4rpm

j. 切輪間距/切削頭形狀：70mm/半圓形

2. 分析結果

a. 基本貫入率(mm/rev)：6.2 (砂岩)，7.05 (板岩)

b. 淨貫入率(m/hr)：3.12 (砂岩)，3.55 (板岩)

c. 推估需求扭力/實際裝設扭力 (KN-m)：1,660/2,150

d. 推估需求馬力/實際裝設馬力 (KW)：1,460/1,890

e. 平均切輪壽命(hr/c)：1.94 (砂岩)，4.38 (板岩)

f. 機械開挖總需時 (hr/km，包括鑽掘、定位、更換切輪、維修及雜項)：723.4 (砂岩)，586.9 (板岩)

g. 機械利用率(%)：44.31 (砂岩)，48 (板岩)

h. 預測每週/月之前進速率(m，以 101hr/週、4 週/月計)：

140/560 (砂岩)，172/688 (板岩)

i. 預測 TBM 隧道完成所需工期：36.3 週

以上分析結果乃假設承商隧道施工之工程管理良好，未考慮承商施工初期所需之適應期，且開挖過程中未遭遇破碎帶或斷層等地質弱帶而得。又，中興工程顧問公司於分析 TBM 工法之利弊時，曾保守地假設 TBM 隧道全線將遭遇 8 處地質弱帶，各寬約 30m，每處特殊處理之時間約為 1 個月（以 4 週計）；另，依承商（日本熊谷組）之地質專家於參考業主（台灣電力公司）提供之相關調查成果後，推估 TBM 隧道施工中可能遭遇 5 處地下湧水較大或地質弱帶，其寬度比中興假設者少（約 10~20m），若亦保守地假設其平均特殊處理時間為 1 個月（以 4 週計），將其攤入隧道施工所需工期後，所得結果如下所示：

(1)依中興顧問公司假設（8 處地質弱帶，假設砂岩段 1 處、板岩段 7 處）所得進度為：砂岩 63m/週（252m/月），板岩 93m/週（372m/月），總平均進度為 90m/週（360m/月）。

(2)依承商（熊谷組）假設（5 處湧水或地質弱帶，皆位處板岩段）所得進度為：砂岩 140m/週（560m/月），板岩 107m/週（428m/月），總平均進度為 109m/週（436m/月）。

綜上分析，彙整如表五所示。

(二)日本曾以 18 個國內外施工實績做線性迴歸統計，可將最大月進度與平均月進度推導以下公式，並以士林水力發電工程與新武界引水工程做比較，如表六所示。

$$Y = 1.316X + 150.25 \text{ ----- 公式(一)}$$

Y：最大月進度（單位：m/月）

X：平均月進度（單位：m/月）

由以上二經驗法則發現一共通點，事前評估之鑽進效率均優於實際成果，可知，台灣之施工現場仍存在一些無法控制因素，導致兩者實績均較預測為低，此等問題有待現場工程師去發覺及修正，或許與施工經驗有關也說不一定，雖是如此，所得之預測數據與實際相差不大，亦是具有參考價值。

表五、TBM 隧道開挖前進效率預測對照表(一)

新武界引水工程 (一)						
岩層	長度	理論進度	中興公司推測 特殊處理時間	推測 各岩層進度	推測 總平均進度	備 註
達見層 (砂岩)	453 m	140 (m/週)	4 週	63 (m/週)	90 (m/週)	1. 遭遇地質弱帶每次處理時間以 1 個月 (4 週) 計算。 2. ( 89.7.14 ~ 12.31 止 ): 74 (m/週), <b>327</b> (m/月)
		560 (m/月)	( 1 次)	252 (m/月)		
佳陽層 (板岩)	5691 m	172 (m/週)	28 週	93 (m/週)	<b>360</b> (m/月)	
		688 (m/月)	( 7 次)	372 (m/月)		
新武界引水工程 (二)						
岩層	長度	理論進度	承商推測 特殊處理時間	推測 各岩層進度	推測 總平均進度	備 註
達見層 (砂岩)	453 m	140 (m/週)	0 週	140 (m/週)	109 (m/週)	1. 遭遇地質弱帶每次處理時間以 1 個月 (4 週) 計算 2. ( 89.7.14 ~ 12.31 止 ): 74 (m/週), <b>327</b> (m/月)
		560 (m/月)	( 0 次)	560 (m/月)		
佳陽層 (板岩)	5691 m	172 (m/週)	20 週	107 (m/週)	<b>436</b> (m/月)	
		688 (m/月)	( 5 次)	428 (m/月)		
士林水力發電工程						
岩層	長度	理論進度	實際 特殊處理時間	推測 各岩層進度	推測 總平均進度	實際 總平均進度
南港層 (砂岩)	622.4 m	139 (m/週)	0	139 (m/週)	62.2 (m/週)	<b>218</b> (m/月)
		556 (m/月)	0	556 (m/月)		
南莊層 (砂岩)	2873 m	130 (m/週)	29.6 週	55.6 (m/週)	<b>249</b> (m/月)	
		520 (m/月)	207 天 ( 5 次)	222 (m/月)		

表六、TBM 隧道開挖前進效率預測對照表(二)

工 程 名 稱	最大月進度(Y) (m/月)	推測平均月進度(X) (m/月)	實際月進度 (m/月)
士林水力發電工程	560.3	311.6	218
新武界引水工程	659.3	386.8	327

註：新武界引水工程尚未完工，暫以 89.7.14.~12.31.為計算標準。

六、全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 工法遭遇特殊困難地質處理方法：

台灣全島除少量火成岩及較多量的變質岩外，大多屬較為年輕之沉積岩，一般而言，強度較低，加上菲律賓海盆板塊與歐亞大陸板塊衝擊交接地帶，長期受造山運動之影響，山脈劇烈起伏，地層岩盤性質變化大，經常破碎且蘊涵豐富之地下水，在如此惡劣的自然條件下，台灣地區隧道施工無法避免遭遇各種困難與挑戰，也使隧道工程師較其他土木工程師面臨更多的挑戰。

是以，在瞭解特殊困難地質源由之後，處理方法就必須先從所謂標準支撐保護工談起，國內僅有之三個 TBM 施工案例恰均由中興工程顧問公司設計，茲將斷面尺寸較為接近之士林水力發電工程及新武界引水工程之岩體分類與保護工型式彙整如表七所示。

表七、士林、新武界工程之岩體分類與支撐工對照表

計畫別/開挖內徑	支 撐 種 類					
新武界/6.2m	Type I	Type II	Type III-A	Type III-B	Type IV	Type V
NGI 岩質指數 (Q 值)	≥10	4~10	1~4		0.1~1	≤0.1
岩體等級	佳至甚佳	尚可	差		甚 差	極 差
TBM 工法 支撐內容 (標準斷面)	(1)岩釘 (局部) (2)4cm 鋼纖維 噴凝土(局部)	(1)岩釘 5 支 (局部) (2)4cm 鋼纖維 噴凝土(頂+ 側) (3)鋼線網 (頂) (4)C100 槽型鋼 (頂)	(1)岩釘 7 支 (局部) (2)8cm 鋼纖維 噴凝土(頂+ 側) (3)鋼線網 (頂) (4)槽型鋼 (頂)	(1)H100 鋼支 保(1.5m) (2)8cm 鋼纖維 噴凝土(頂+ 側) (3)鋼線網 (頂)	(1)H100 鋼支 保(0.75~1.5 m) (2)12cm 鋼纖 維噴凝土(頂+ 側) (3)鋼線網 (頂) (4)先撐鋼棒 (照指示)	(1)H125 鋼支 保(0.75m) (2)16cm 鋼纖 維噴凝土(頂 +側) (3)鋼線網 (頂) (4)先撐鋼材 (照指示)
士林/4.5m	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type IV-A	Type V
NGI 岩質指數 (Q 值)	>40	10~40	4~10	1~4		<1
岩體等級	非常好	良好	普通	壞		甚壞至極壞
TBM 隧道 支撐內容 (標準斷面)	(1)岩釘 (局部)	(1)岩釘 5 支	(1)岩釘 7 支 (2)5cm 噴凝土 (頂)	(1)岩釘 9 支 (2) 8cm 噴凝土	(1)10cm 噴凝 土 (2)鋼矢板 (3)H100 鋼支 保(1.5m) (4)環撐及繫桿	(1)10cm 噴凝 土 (2)鋼矢板 (3)H100 鋼支 保(0.75-1.25 m) (4)環撐及繫桿 (5)岩釘 (照指示)

又，國內之岩體分類與日本最普遍之隧道工程分類不太一樣，如表八所示，而所牽涉之設計自然就不同，列舉幾項工程案例如表九所示，提供參考，若將表七與表九仔細比較，似乎可看出國內之設計遠比日本保守些。

因此，若（預測）使用上述標準支撐保護工施作後仍無法防止隧道擠壓變形（一般所指為遭遇斷層、破碎帶等惡劣地質），就必須採用所謂特殊困難處理方法以求解決，其方法不外以下幾種：

（一）打設先撐鋼材保護頂拱：

前方地質若僅止破碎岩塊或節理（或劈理）發達時，此時可利用前進鑽機鑽設先撐鋼棒（管）保護頂拱，阻止上方崩落，必要時亦可採用鋼管內灌注漿液施作，亦可兼做上部地質改良之用。

（二）排水：

若岩盤為破碎石英砂岩、而碎裂間隙含有豐富地下水，或遭遇水量充沛之含水層，則宜先以排水方法排除地下水，可使用前進鑽機鑽設排水孔為之，孔向、孔數及孔深可視出水量大小而增減。

表八、日本選用之岩體分類對照表

日本道路公團	RSR	RMR	Q 值
A	100~75	非常良好 100~81	普通 10 以上
B	74~59	良好 80~61	惡劣 2.0~10
C I	58~44	普通 60~41	相當惡劣 0.1~2.0
C II	43~29	惡劣 40~21	
D I	28 以下	非常惡劣 20 以下	非常惡劣 0.04~0.1
D II			極端惡劣 0.04 以下
E			

表九、日本隧道工程之岩體分類與支撐工對照表

工程名稱 / 開挖內徑	支 撐 種 類				
新湯山發電工程 / 3.8m	Type B	Type CI	Type CII	Type D1	Type DII
Close Type TBM 支撐內容 (標準斷面)	無支保	(1)2cm 之纖維+水泥砂漿 (fiber mortar (照指示))	(1)3cm 之纖維+水泥砂漿 (fiber mortar (照指示))	(1) H100 鋼支保 (@1.0m) (2)10cm 噴凝土 (照指示)	(1)襯砌環片 (@1.0m)
富士川隧道東行線工程 / 5.0m	Type B	Type CI	Type CII	Type D1	Type DII
Close Type TBM 支撐內容 (標準斷面)	無支保	(1)2cm 之化學物質+水泥砂漿 (180度)	(1)2cm 之化學物質+水泥砂漿 (180度) (2) H100 鋼支保 (@1.5m)	(1)3cm 之化學物質+水泥砂漿 (180度) (2) H100 鋼支保 (@1.0m)	---
津久井引水工程 / 5.4m	Type B	Type CI	Type CII	Type D1	Type DII
Open Type TBM 支撐內容 (標準斷面)	無支保	無支保	(1)5cm 之噴凝土 (照指示) (2) H100 鋼支保 (@1.5m)	(1)10cm 之噴凝土 (照指示) (2) H100 鋼支保 (@1.2m)	---
新愛本水力發電工程 / 6.1m	Type B	Type CI	Type CII	Type D1	Type DII
Open Type TBM 支撐內容 (標準斷面)	無支保	(1)2cm 之噴凝土 (180度)	(1)2~4cm 之噴凝土 (180度) (2) 岩釘 7 支 (L=2m) + 鋼線網	(1)2~4cm 之噴凝土 (180度) (2) 岩釘 11 支 (L=3m) + 鋼線網	(1) H150 鋼支保 (@1.0m) (2)4cm 之噴凝土 (240度) (3) 岩釘 11 支 (L=3m) + 鋼線網
秋葉第3發電工程 / 7.1m	Type B	Type CI	Type CII	Type D1	Type DII
Open Type TBM 支撐內容 (標準斷面)	無支保	(1)6cm 之噴凝土 (120~200度) (2) H125 鋼支保 (@1.0m) (3) 岩釘 13 支 (L=3m)	(1)6cm 之噴凝土 (200度) (2) H125 鋼支保 (@1.0m) (3) 岩釘 13 支 (L=3m)	(1)10cm 之噴凝土 (照指示) (2) H125 鋼支保 (@1.0m) (3) 岩釘 13 支 (L=3m)	---

(三)灌漿：

當排水方法仍無法減少水量時，則應配以灌漿阻水法，從主機內向外鑽設扇形灌漿孔，形成阻水幕，施灌材料需視實際地質情況而定，可用純水泥漿或化學漿液，亦可兩者配合使用，隧道外圍經予固化為岩拱後，再以 TBM 開挖，惟仍須利用一般支撐設施立即完成支撐工作。有時，為改良前方地質亦施作藥液灌漿，適時提供 TBM 反力座所需之反作用力。因此，亦有人將灌漿之



方法分類稱之，如：管幕灌漿、止水灌漿、固結灌漿、噴射灌漿等等，其結果均殊途同歸。

#### (四)環片支撐工法：

位於較軟弱之砂岩、頁岩或砂頁岩互層中之斷層，斷裂面上常因錯動而挾有斷層泥，其厚度由幾公分至幾公尺不等，或分為數條密集排列，此時為使 TBM 安全通過不致有意外發生，於 TBM 開挖機頭後方裝設環片，讓 TBM 具有類似密閉式盾殼之功能，隨著 TBM 之前進拖曳環片，並留置於斷層或破碎帶，使後方之支援系統亦安全且快速地通過該地質弱帶，一般適用於開放型。

藉於前述理念，新武界引水工程之承商（熊谷組）研發一種名為「鋼環片支撐工法」，並成功使用於香港 Tai Po-Butterfly Valley 引水隧道，其施作步驟概述如下：

- 1.當鑽遇極軟弱地質且研判 TBM 有遭挾埋之可能時，隨即組裝 4 節鋼環片形成 TBM 之第二護盾，鋼環片之間以螺栓接合並與 TBM 連結在一起。

- 2.當 TBM 前進 0.5 公尺時，另一鋼環片跟著以螺栓續接先前之最後一節鋼環片，重覆此步驟。亦即額外環片（5~13 環）皆在良好岩盤中組裝後拖拉，直至 TBM 機頭端通過軟弱地質帶進入較好岩盤為止。

- 3.以濃稠之水泥漿經由 2 英吋之灌漿管灌入鋼環片後方之空隙。

- 4.切除 TBM 盾殼與第一節鋼環片間之鋼鍊，留下筒狀鋼環片，TBM 繼續前進鑽掘作業。

本工法之最大優點在於其可快速施工、節省工期，依熊谷組之估計，就 10 公尺寬之斷層帶而言，若採傳統方式處理，恐需耗時 10~12 週；但若採鋼環片支撐工法施作，僅需 20 天即可順利通過斷層帶，其中鋼環片組立及拖行每天可完成 1 公尺，灌漿工作亦以 1 公尺/日計算，亦即每公尺斷層將僅使用 2 天即可通過，兩者所需處理時間之差異甚大。此外，本工法連接 TBM 增設護盾，工作人員不致暴露在危險之地質弱帶之下，對員工之工作安

全較有保障。

(五)迂迴導坑 (By-pass Tunnel) 工法：

顧名思義，即 TBM 到達地質弱帶前即暫停開挖，另闢一條迂迴導坑，施工方法採鑽炸工法開挖，當導坑開挖至隧道前方時，再回頭開挖斷層帶，俟所有支撐工完成後，TBM 方繼續鑽挖。

(六)擴挖鑽掘工法：

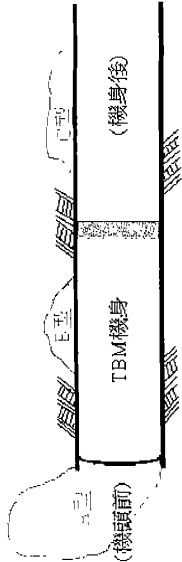
此施工方法比迂迴導坑工法更為費時，同樣地，於 TBM 到達地質弱帶前即暫停開挖，經由開挖機頭上之窗口向開挖面進行開挖，其施工方法與鑽炸工法類似，俟斷層或破碎帶開挖完成後，TBM 再繼續前進。

另外，若在無預知情況下產生崩坍災變時，TBM 本身亦須發掘問題所在與發生之位置，進而採取必要之應變措施，此應變方法與前文所述略有不同，茲將針對 TBM 之機型與問題之關鍵及所應採其因應對策整理如表十所示，供大家酌參。

Hoek&Brown 亦曾指出，隧道施工過程中發生開挖面不穩定甚至全面性災變之可能原因，包括以下幾項：

1. 在硬質岩盤中遭遇極端不利之不連續面（如：層面、節理及剪裂帶等）組合。
2. 覆蓋深度大，開挖斷面遭受巨大之岩壓（大地應力）。
3. 隧道在陡坡山區施工，遭遇異常應力組合，如：靠近邊坡的偏壓。
4. 遭遇極易風化、破碎、擠壓性或膨脹性岩盤。
5. 遭遇岩層中異常之高壓水層。

根據過去的案例顯示，除了上列的原因外，在突遇天然或人為的既有坑道、地下高壓瓦斯氣體、地熱或高溫地下水等特殊狀況時，亦可能為隧道施工災變的原因。面對於這些情形，設計工程人員甚難以既有理論事先預測岩盤之行為，有時必須依賴工程師現場機智反應與經驗判斷，俾能及時解決問題。



TBM 示意圖

表十、TBM基本型式類別與施工災變對應比較表

型式\項目	A 型崩坍之因應	B 型崩坍之因應	C 型崩坍之因應	突發湧水之因應	堅硬岩盤之因應	
問題之關鍵	TBM 開挖面附近發生崩坍： • 高壓湧水噴出。 • 滲砂現象。 • 砂土崩坍。 • 切削頭或機身主要部份被埋沒。	TBM 開挖面後方（機身範圍內）附近發生崩坍或落石： • 由於地層崩落或應力釋放而形成鬆弛地。 • 由於湧水以致岩盤鬆弛力降低。 • 反力座（Gripper）底部或側壁之岩盤崩坍。 • 機身主要部份被埋沒或受損。 • 頂部裝置崩坍保護。 • 施打岩釘。 • 施打噴漿土、鋼索噴漿土、鋼索保、施打鋼索板等。 • 降低反力座壓力。	TBM 機身後方（機身範圍外）附近發生崩坍或落石： • 由於地層崩落或應力釋放而形成鬆弛地。 • 由於湧水以致岩盤鬆弛力降低。 • 反力座（Gripper）底部或側壁之岩盤崩坍。 • 機身後方主要部份被埋沒或受損。 • 施打岩釘、噴漿土、鋼索保或鋼索板等。 • 觀察地盤變化狀況及計劃。	TBM 前方突發發生湧水（33L/iter/sec）： • 沿澤地區或斷層帶之突發湧水。 • 由於砂土之滑動而無法清除。 • 頻頻發生湧水或機具遭水淹沒。	異圍壓縮強度（ $q_u$ ）大於 2000kgf/cm <sup>2</sup> ，鑽進速度降低； • 切削頭耗損嚴重或破損。 • 換裝作業頻率太多。	
	因應對策	• 無法緊靠面板予以保護。 • 採用密閉型 TBM。 • 採用拋棄前方排水孔排水。 • 地盤改良。	• 無法緊靠面板予以保護。 • 沒有密閉型 TBM 之缺點，有止壓、水壓、後方盾殼及襯砌向水性等問題。 • 崩坍規模小時則以前方排水孔因應，而規模大時則難以因應，即使採用地盤改良亦同。 • 由於前面出入較容易，故崩坍後之復舊較容易。 • 大規模崩坍場合，TBM 難以適用。	• 施噴非水孔。 • 輸送皮帶厚度要平緩。 • 砂土和水須加以分離。 • 切削頭需排水。 • 裝置噴漿式輸送帶。 • 裝置防水插座。 • 用變壓電氣系統。 • 易從機身內貫流湧水因應對策。 • 設備全長會加長。 • 被水淹沒後之復舊工作，至少需要一個月。 • 由於湧水而誘發上部之崩坍，容易造成機身主要部份受損。	• 增加切削頭荷重。 • 提高推力。 • 提高切削頭扭力。 • 提升旋轉數。 • 採用大口徑切削頭。	• 可從機頭外部換裝大口徑切削頭，因而切削荷重及扭力亦能提高。 • 由於外部能換裝，機身前部之開口率亦增大，砂土之取出則增多。 • 部份崩坍之大岩塊可能會堵塞或殘渣。
綜合評價	△	○	○	○	◎	
	因應對策	• 無法緊靠面板予以保護。 • 採用前方排水孔排水。 • 地盤改良。	• 盾殼（Shield）自然形成保護。 • 緊接於盾殼之後，可施作輔助工法，如打噴漿土等。 • 覆片組立簡易。	• 與開成型 TBM 相同。	• 與開成型 TBM 相同。	• 與開成型 TBM 相同。
審閱型（Shield Type）	• 由於機頭面開口率稍小，小規模之塌方可以形成防護，大規模則不可能形成保護。 • 排水孔及地盤改良作業與機身形狀無關。 • 崩坍後之復舊對策，從 TBM 後方施作稍為困難。 • 大規模崩坍場合，TBM 難以適用。	• 以盾殼（Shield）防護屬於可行。 • 亦可防止側壁、底部之崩坍。崩坍程度較低。 • 崩坍發生後，機身主要部份受損程度較輕。 • 從機身後方施作復舊對策，尚有一點時間。 • 普通作業員亦可從容因應。	• 隧道內空間狹窄，輔助工法施工不易。 • 發生崩坍後，後方設備必須維護。 • 容易觀察地盤變化狀況及計劃。	• 較不易從機身內貫流湧水因應對策。 • 設備全長會加長。 • 被水淹沒後之復舊工作，至少需要一個月。 • 由於湧水而誘發上部之崩坍，較不易造成機身主要部份受損。	• 事故機身內部狹窄，難以配置大口徑切削頭。（現已改良為可裝設 17"，即 432mm 之機內更換型） • 由於機頭面之開口率要小，砂土之取出量受到限制。 • 部份崩坍之大岩塊堵塞或殘渣斗可能性則較少。	△ 視情況而適合

## 第肆章 結論與建議

### 一、結論：

1. 台灣平原之交通開發已臻完備，未來台灣為縮短城鄉距離，穿越之高山隧道工程是無法避免，尤其目前北宜快速公路之構築最為明顯（水力發電工程更是如此），隨之而來以 TBM 工法的興建案例亦將日益增多，此趨勢不容忽視，就以日本為例，自從 1986 年以來，TBM 隧道工程急速增加，據統計至 1999 年為止之 14 年間，共約 90 件，平均每年有 6~7 件，此數據顯示吾等應對 TBM 工法須有更深一層之認知，方能跟上世界潮流。

2. 隧道施工法之選擇須視工程規模、地質條件、施工環境、工程期限及費用等因素之影響而異。TBM 工法近年來隨著科技之日新月異，其設備性能及可靠性方面之研究均有長足之進展，故一般較長之岩石隧道在配合適當之地質條件下，TBM 工法較 D&B 工法更具有其競爭力。唯工法之選擇關係整體工程之成敗，尤其各種類型之施工設備均分別有其特性與適用性，業主與承包商在計畫評估過程中均應謹慎其事。

3. 充分之地質調查工作係隧道工程成功之先決條件，國外先進國家對於隧道施工前之地質資料蒐集、探查試驗及研究等工作均十分重視，反觀國內隧道之施工，常因落盤、湧水、斷層泥等災變而展延工期與追加預算，而其發生之原因追根究底即在施工前地質調查之不足（事前地質調查費用約占總工程費用之 5% 較為合理），故規劃設計階段宜有周詳之地質調查計畫，必要時須先鑽掘導坑深入瞭解地質狀況，以作為工法選擇、工程進度及預算編擬之依據。

4. 隧道工程係於變化多端之地層中進行，對未開挖前地質狀況之掌握，事先縱有周詳之地調計畫，唯欲求鉅細靡遺，殆不可能。採用 TBM 施工時，萬不可自恃於優越之機械性能，而疏忽可能之地質變化，開挖時應隨時觀察實際情況，以作為必要之因應準備，必要時須施鑽水平探查孔，據以掌握開挖面前方之真正地質

情況，俾使災害之可能性降至最低。

5.在國內環保意識日漸高漲，勞力日益缺乏之大環境下，現代化之 TBM 工法預期將成為日後長隧道施工之驅勢，惟目前國內相關施工經驗不多（僅有三個案例），初期仍須借重國外專家顧問或廠商之經驗。此外，先進國家之業主與承商間互相信任合作，以迅速反應現地施工條件及處理應變之精神與習慣，應在我國現有制度與觀念下求得突破，如此 TBM 快速施工之特點方能充分發揮。

6.採用 TBM 開挖隧道之目的不外乎求其安全、快速與經濟之優點，但若只是將 TBM 代替傳統開挖設備而無其他相關配合措施，則 TBM 仍無法發揮其功能。因此，有關工法的認知、設計理念之配合、合約與規範得制訂、TBM 機型的選定、現場岩體的研判、支撐材料之選用及現場施工管理等，不宜完全沿襲舊制（NATM）而需加以調整，才能發揮事半功倍之效果。

7.TBM 之型式大致上可分為開放型及密閉型兩種，各型均有其優缺點，若預估全線地質無特殊弱帶或大部份地質尚稱均質時，則採用前者較為有利，尤其該機型可在開挖機頭後方岩盤初露時及鑽挖進行中，判定岩體種類進而安裝隧道所需之支撐材料。

8.即如前述，TBM 開挖工法有縮短工期、降低環境衝擊、減少人力需求及提昇施工技術等優點，然而，TBM 畢竟只是一台供人操作使用之機器，或可稱為供人駕馭之馬匹，此馬是否可成為日行千里之千里馬或竟沉淪為倔強、笨拙之禿驢，端視施工前之調查、規劃是否完備得宜，及施工中之工程管理與應變計畫是否妥善擬定並有效執行而決定。畢竟，千里馬也需遇到伯樂方能充分展現其才華，吾等工程師輩是否均能扮妥伯樂之角色，值得大家努力。

9.新武界引水工程乃台灣隧道工程界第三個採用 TBM 施工的案例，現正如火如荼地展開中，若本案能順利完成，將成為台灣 TBM 隧道首次貫通之案例，對本公司正規劃中之 TBM 隧道（和平碧海水力發電計畫頭水隧道及龍門計畫循環冷卻水出水隧道）

將可注入強心劑，同時對台灣隧道工程界亦深具鼓舞作用。

## 二、建議：

1.此次在機場於中華航空公司櫃台辦理機票確認 (Check in) 時始明白，於洽請旅行社委購機票時，若能附上因公出國證明文件 (證明為公務員) 及與國外公司書信往返文件，可以經濟艙之票價乘坐商務艙 (僅中華航空公司有此優待)，即達到低價位、高品質之服務與享受，希書此告知爾後同仁可參考辦理。

2.此行見識到日本整齊乾淨之市容、遵守交通秩序及親切和諧之市民，實在讓吾輩汗顏，更值得稱讚及學習。尤其是日本人之敬業精神，不論是那一個工區均是相同，每每參觀並討論時間超過白天中午 12 時或夜間 7 時，甚或更晚，均毫無怨言且耐心解說，直到滿意為止。

3.工程承攬招標方面，目前日本營建系統承攬方式大都採用統包式 (Turn Key) 招標，而且是高於底價之最低標為得標價 (類似所謂「合理標」)，如此不會產生惡性競標，與台灣之最低價競標不同，因此，工程品質不會因價格過低而有所折扣，而且均是聯合承攬 (Joint Venture)，亦不會形成壟斷市場局面，非常值得我國學習與借鏡。

4.人事制度與組織方面，由於工程如前述採統包式招標，業主僅定期 (每月) 派員赴工地查核檢驗，人力節省許多，就承商工務所而言，人力亦非常有限 (為減少人力浪費)，平均僅 15 人左右，由上至下包括：所長、副所長、課長、股長 (僅設於機電課，因 TBM 維修之故)、現場主辦、辦事員等，課長還須與現場主辦輪班，此組織有點類似本公司最近要推行之組織扁平化制度，不過話雖如此，因人力縮編，工作量卻因而增多，故其鼓勵加班並給予適當之加班費，以符合人性化管理 (與本公司為配合民營化政策，人力不補充，工作量增加，又礙於經濟部規定，嚴控加班費有所不同)，亦值得三思。

5. 工程管理及工作安全方面，不論隧道或露天結構物，現場均非常整潔，各項工具及器材，堆置亦井然有序，工安標語與標誌更是清楚，與日本人討論後發現，除每週不定期召開會議討論工進外，每月定期舉行工安會議研商工作安全是否有遺漏之處，而且利用每日上午八時集合眾人做晨操，除可健身外，並利用早操後時間，由現場人員針對昨日施工情況作簡短扼要之報告給在場每一位同仁知情，如此每一個人均對工地情況均很明瞭，必要時，主事者再做工作指導及政策性宣示，這與現今潮流之走動式管理有異曲同工之妙。

6. 隧道支撐設計方面，如前文所述，TBM 隧道內支撐保護工是否採用 NATM 設計理念而造成過度設計 (Overdesign) 而不符合經濟原則，恐需請大處 (營建處) 洽設計顧問公司針對此加以分析研判，以免因此而折損 TBM 之功能 (減少支撐費用)。

7. 土木施工方面：就目前新武界引水工程之承商不太願意施作噴凝土案，誠如前文所言，以岩體力學觀點來看，隧道開挖完成後，為提供岩石初期解壓時所需之支撐，噴凝土應採隨挖隨噴方式施作，故為求隧道安全及時效，均應在機頭後方施作，本人赴日研習所見亦是如此，雖然噴凝土具有反彈料，惟在施工之前，將施噴範圍內附近之設備覆蓋 (一般採用防水布)，即可免除因污染而發生機具故障，據瞭解士林水力發電工程噴凝土亦於機身後方 (支援系統前半部) 隨即施作，所以，現場工程師應確實要求承商依此理念 (隨挖隨噴) 執行，方為上策。

8. 有關前進地質探查孔之取心與否問題，亦需吾等深思，因就本公司士林水力發電工程及新武界引水工程承攬契約內均明白指出，須取心方可計價，不取心因無法明顯判定前方地質而不予計價，此法恐值得商榷，設計理念採用取心之美意或許很好 (可較明顯判定前方地質)，然卻因取心而影響 TBM 效率亦非吾等願見到，況且國外 (尤其是日本) 不取心來研判前方地質已行之有年，表示此法可行，因此，建議一折衷方式，可將取心與不取心分開計價，應較為公允。

## 第五章 參考文獻

1. 李明雄等 (1998), 「新武界引水隧道 TBM 段深孔地質鑽探工作概述」, 1998 岩盤工程研討會論文集, 第 539~548 頁。
2. 曾大仁 (1998), 「隧道施工技術」, 隧道工程災變處理實務, 第 147~170 頁。
3. 黃治 (1998), 「隧道施工技術」, 隧道工程實務, 第 111~123 頁。
4. 傅子仁 (1997), 「山岳隧道施工方法之探討」, 土工技術雜誌, 第 59 期, 第 5~16 頁。
5. 陳嘉男等 (1997), 「鯉魚潭水庫士林水力發電工程頭水隧道 TBM 簡介與施工概況」, 土工技術雜誌, 第 59 期, 第 51~60 頁。
6. 張文城 (1996), 「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 145~155 頁。
7. 魏建生 (1996), 「全斷面隧道鑽掘機之製造、運輸、組裝及發進」, 1996 岩盤工程研討會論文集, 第 201~220 頁。
8. 曾大仁譯 (1991), 「從地質觀點看隧道工法選擇」, 土工技術雜誌, 第 33 期, 第 6~15 頁。
9. 廖同柏等 (1991), 「岩石隧道開挖機械介紹」, 土工技術雜誌, 第 33 期, 第 24~40 頁。
10. 劉弘祥 (1990), 「鑽隧機及其施工方法簡介」, 土工技術雜誌, 第 32 期, 第 67~77 頁。
11. University of Trondheim, Norway (1994), 「Hard Rock Tunnel Boring」, Project Report 1-94.。
12. 日本トンネル技術協會 (2000), 「TBM ハンドブック」。
13. ジェオフロンテ研究會 (1999), 「TBM 急速施工檢討報告書」。