

高度破碎及湧水帶TBM施工技術之案例探討

鄭文隆 張文城

國道新建工程局

摘要

全斷面隧道鑽掘機 (TBM) 的使用為國內正在萌芽的施工技術, 並被首次應用在北宜高速公路的坪林隧道工程。因坪林隧道東端的地質構造甚為複雜且破碎, 因此以TBM施工的過程遭遇極大的困難, 尤其是在里程39k+079處遭遇極度堅硬而破碎的四稜石英砂岩層, 並伴隨壓力高達 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上的地下水, 以每秒約150公升的流量湧入隧道內, 造成TBM無法順利開挖並停機長達兩年。本文旨在詳細說明施工所遭遇之困難與處理所引用之技術與工法, 以為爾後使用TBM施工, 甚至規劃設計之參考。

關鍵字：迂迴隧道，繞行隧道，水平長距離鑽探。

THE CASE STUDY OF TBM CONSTRUCTION TECHNIQUES IN SEVERELY FRACTURED ZONE WITH HIGH GROUNDWATER INFLOW

CHENG, WEN-LON CHANG, WEN-CHERNG

National Expressway Engineering Bureau

ABSTRACT

The construction techniques of tunnel boring machine (TBM), which is firstly applied in the Pinglin tunnel of Taipei-Ilan expressway, is founded and been improving domestically. Many difficulties were encountered during the construction of TBM in Pinglin tunnel because of the complicated and fractured geological structure especially at station 39k + 079 of Pinglin pilot tunnel. Large groundwater inflow, i.e. approximately 150 l/s, with high water pressure over $20\text{ kg}/\text{cm}^2$ in highly hard and fractured Szeleng sandstone formation was encountered at station 39k+079 and approximately two years has been consumed to solve the geological difficulties since February 1996. This paper is to present and discuss the difficulties encountered and related construction techniques in the Pinglin tunnel in detail in order to upgrade the related techniques in the future.

KEY WORDS : by pass tunnel, detour tunnel, horizontal long distance drilling.

地工技術

一、工程概述

對於長隧道工程而言，基於工期考量，全斷面隧道鑽掘機（TBM）鑽掘的施工方式，已廣為工程界所接受及採用，不過根據過去的施工案例，TBM施工的效率受地質條件的影響甚大，雖然隨著科技的進步與經驗的累積，TBM已可被設計成符合各種不同的地質條件，不過每部TBM的設計通常只能在某種主要的地質條件下發揮其最大的施工效益，若是要設計一部TBM能同時應付各種不同的地質條件，尤其是從較差的高度破碎與湧水的岩盤到較好的均質且自立性良好的岩盤，則不符合經濟原則且其施工效益在不同的岩盤可能有極大的差異，甚至在某些地質條件下必須放棄以TBM施工的方式，而改用其他可行的替代方案。

北宜高速公路的坪林隧道長達12.9公里，東段靠近頭城端約三至四公里的部份地質情況頗為複雜（詳如圖一，里程36k+500~40k+000），不僅岩盤破碎，而且預期將遭遇高壓的地下湧水。由於當初國內並無TBM的施工經驗，因此規劃、設計階段即邀請國外的專家進行詳細的評估，因大部份專家認為TBM工法可適用於坪林隧道，故最後仍決定採用TBM施工，以期達到縮短工期的目的（張文城，民國85年）。不過為了提高TBM對於坪林隧道地質條件的適應能力，在預期將遭遇地質困難的路段，考量採用灌漿或以鑽炸法挖除等輔助工法，以利後續TBM之掘進，至於高壓地下湧水，則於每輪開挖前，於TBM內向前方鑽設前進探查孔（Probe Drilling），以瞭解開挖面前方的地質與含水情形，必要時並兼做排水孔之用。

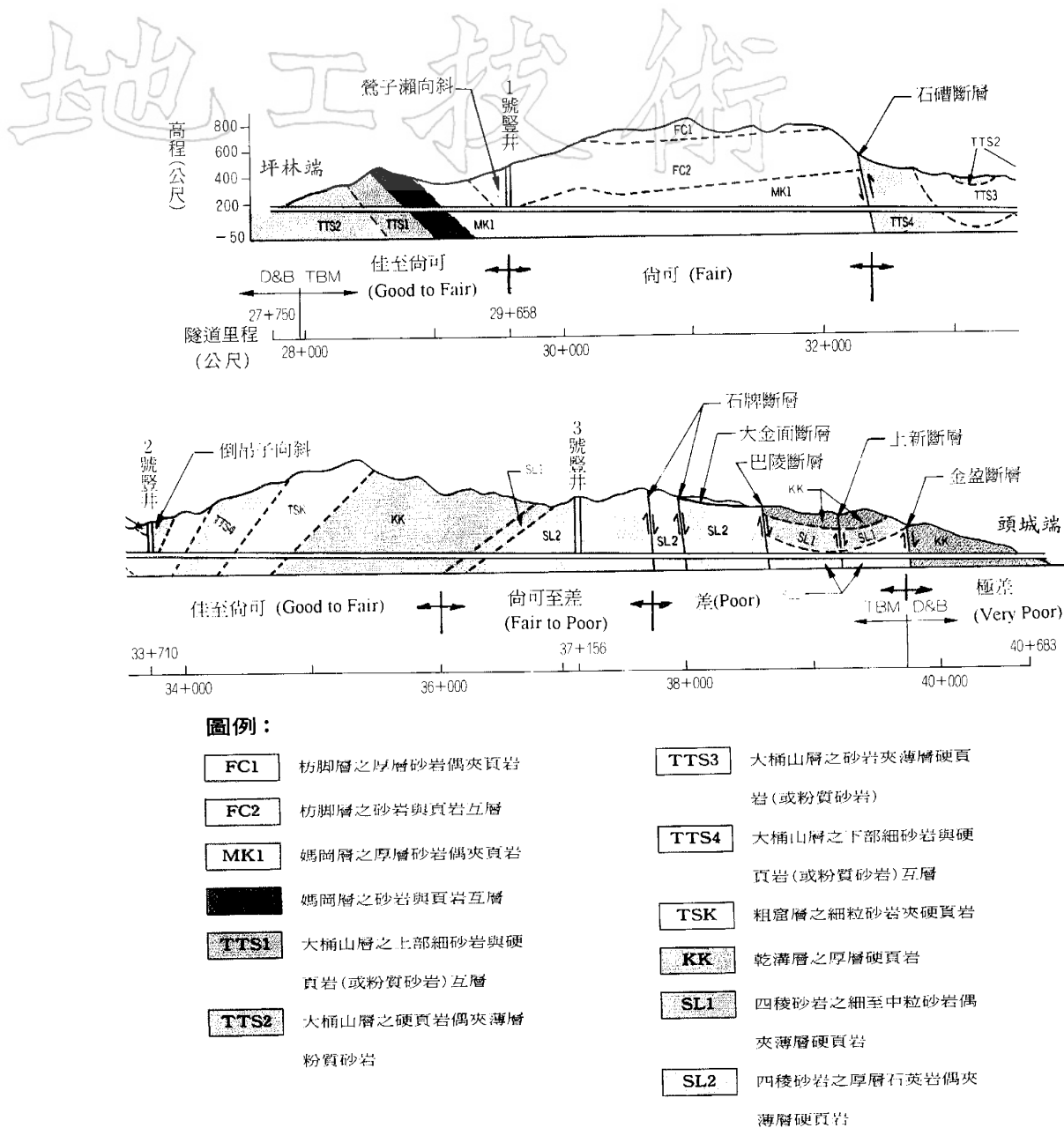
坪林隧道導坑工程自民國八十年七月開工後至八十一年七月止，利用TBM設計、製造期間，先以鑽炸法開挖522公尺。其後TBM運抵工地，於洞口經組裝測試後，於八十二年元月推進至鑽炸法的開挖面，開始TBM之開挖工作，迄八十七年二月止，共計以TBM開挖1080公尺。導坑TBM在開挖1,080公尺期間，總計有十次因開挖面前方崩坍，而導致TBM之削刀頭被卡住無法轉動，或因機頭有大量之地下水湧入（最高達180 l/s），致使TBM無法正常操作，而須由TBM後方開挖迂迴隧道（By Pass Tunnel）繞至機頭前方進行處理，以協助TBM恢復運轉。

在TBM歷次的受困中，第一至第八次的處理時間每次平均約為1至2個月，而第九及第十次則分別為10個月及24個月，總計十次受困的處理時間約達48個月。其中第十次受困（即里程39K+079）的時間長達2年，主要係因導坑於該處遭遇的高度剪裂破碎帶寬度超過10公尺，為歷次受困中最寬者，而湧水歷時長達2年以上，亦為歷次受困中最長者。本文以下將忠實記錄導坑TBM於里程39K+079停機2年的處理過程，以技術者及實際參與工程者的立場，表達對整個過程的看法與心得，並詳細說明導坑TBM於里程39K+079受困處遭遇之困難及引用之施工技術與工法，以為爾後應用TBM於類似地質時之參考。

二、地質調查

2.1 區域工程地質

坪林隧道規劃、設計階段，地質調查最主要成果之一為圖一所示之地質剖面



圖一 坪林隧道地質剖面圖

圖。由圖一及規劃設計階段的地質調查成果（國工局，民國80年），可獲得若干重要之工程地質訊息，包括主要岩性及其位態與分佈範圍、主要斷層、褶皺等地質構造及岩體的破碎程度等。由圖中顯示在里程約36k+500至40k+000之間預期將通

過依Deere之岩體分類（Deere, 1964），屬差（Poor）至極差（Very Poor）之高度破碎而堅硬之石英砂岩層，同時亦將通過剪裂帶（Shear Zone）寬度超過十公尺以上之五條主要斷層。至於是否仍有其他會造成施工困擾之較大規模的剪裂帶及

其位置則不得而知，而必須於施工中再做輔助調查，以進一步瞭解地質情況。

此外由於地下水的流動與雨量、地形、岩性、地質構造、岩體的破碎程度等皆有密切的關連，故地下水之水源、水量與水壓的評估為隧道地質調查中最困難的項目，規劃設計階段僅能粗略評估隧道沿線之地下水水位，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，並概略說明斷層帶、破碎帶及向斜軸的軸部為較具湧水或滲水潛能的地段，至於可能湧水或滲水而造成施工困擾的確實位置則無法得知。根據基本設計階段的調查，評估施工期間導坑由東洞口至里程39k+079處累積之地下水水量約為150~200 l/s，不過實際上施工階段隧道沿線累積之地下水水量，除與雨量、地形及地質等因素有關外，亦與施工期間之施工方式及地盤處理（如灌漿）的範圍有極大的關聯，故規劃、設計階段推估的累積水量與實際施工階段之累積水量間，比較結果所代表的意義，宜有審慎嚴謹的評估。

2.2 施工中之輔助調查

由於坪林隧道覆蓋深度300公尺以上的路段超過10公里，最深的覆蓋深度約為700公尺，因此規劃、設計階段依據淺層或某些定點的調查成果，所推估的隧道沿線之地質情況自然有其不確定性存在，故施工中仍須做進一步之調查，以進一步瞭解可能影響施工之地質因素之位置。

2.2.1 震測

傳統以TBM施工所採用的前進探查孔，以瞭解開挖面前方的地質情況，常甚為費時。以坪林隧道導坑為例，在歷次TBM受困前所施作的前進探查，完成30m鑽孔工作平均耗費10小時以上，最長者甚

至達48小時（張文城，民國83年），而在地質不佳的地段停機過久，極可能造成開挖面前方岩盤鬆弛，而增加TBM施工受困的風險，故在隧道內應用震測法，以迅速、廣泛而初略的瞭解前方地質的調查方式乃應運而生。

坪林隧道導坑在第四次受困後，於里程40k+038~39k+217間先後施作五次HSP(Horizontal Seismic Profile)反射法震測，每次可探測受波器前方約200公尺範圍內的地質情況。根據其中在里程39k+217附近所做的HSP震測之P波及S波探測的成果判釋（榮工處，民國84年），顯示在里程39k+169及39k+079兩地段的地質，並無明顯特殊的異常情況，但TBM先後在此兩處卻遭遇了高壓湧水並伴隨嚴重的崩坍而導致TBM受困。由導坑開挖後實際之地質與震測所預測者比對之結果顯示（中興顧問公司，民國84年），利用震測以預測前方之地質，仍有待震測軟硬體設備與施測方式的改進及判釋經驗之累積，以提高其準確性。

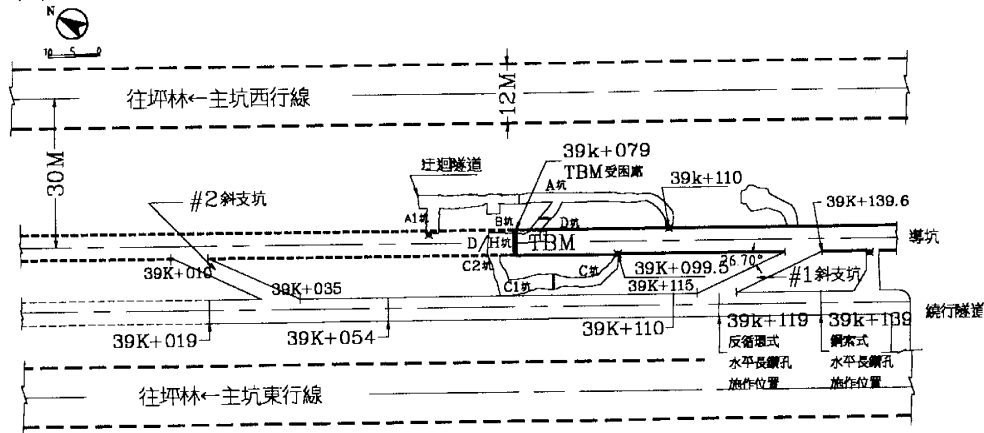
2.2.2 水平長距離鑽探

雖然以TBM本身配備的鑽機進行前進探查作業，常耗費相當長的時間，但畢竟鑽探仍是以瞭解開挖面前方地質最直接有效之調查方式，故導坑工程在里程39k+079受困後，即嘗試另闢工作坑以較大鑽進能力，並可鑽較長深度之大型鑽機，施作長距離鑽探來取得進一步的地質資料，以做為後續施工作業的參考，必要時並可兼做排水孔，以減小開挖時湧水之水量與水壓，降低施工風險。

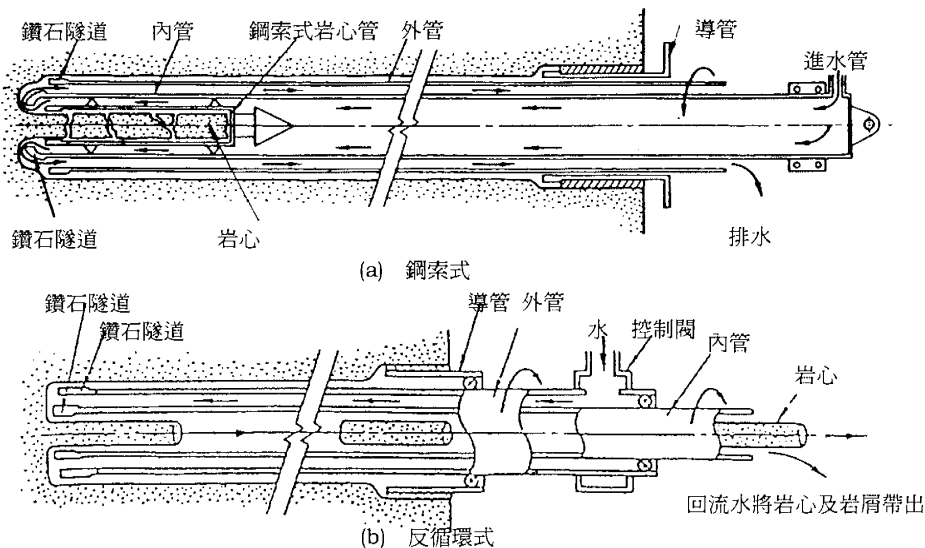
坪林隧道導坑工程配合39k+079處受困後的脫困作業，於繞行隧道內（詳如圖二）共施作了兩次水平長距離的鑽孔作業。第一次於相對導坑里程39k+139處採

用鋼索式(Wire Line)取岩心的作業方式施鑽（詳如圖三(a)），原預定鑽進300m，但於耗費56日完成107m之鑽孔後，因遭遇嚴重之坍塌，且鑽孔孔徑已由最初之HQ（約為9.6cm）縮小至BQ（約為6cm），鑽桿經常斷裂無法再鑽進而停止作業，本次鑽探遭遇之最大湧水量為20 l/s，最大地下水壓力約為3kg/cm²（榮工處，民國86年a）。第二次則於相對導坑里程39k+119處，採用反循環式(Reverse Circulation)取岩心的作業方式施鑽（詳如圖三(b)），原亦預定鑽進300m，但於

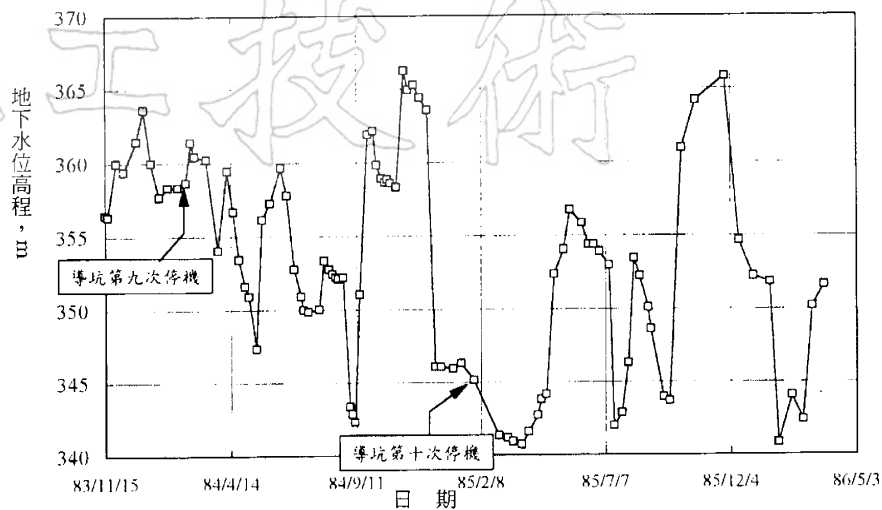
耗費30日完成103m之鑽孔後（初始之鑽孔直徑為21.6cm，103m處之鑽孔直徑為10.5cm），因鑽桿（含鑽頭）斷於孔內無法取出，且湧水量及孔口水壓力分別高達117 l/s及18kg/cm²，故停止作業並將該孔留做排水孔，以降低開挖面前方的水壓（榮工處，民國86年b）。由鑽探成果顯示在鑽孔深度約70m的位置（即相對導坑里程約39k+050處），水壓力急劇上升至18kg/cm²，而在深度95m處，水量則急升至100 l/s以上（詳如照片一），可見在里程39k+079前方，確有一明顯高壓含水帶存在。



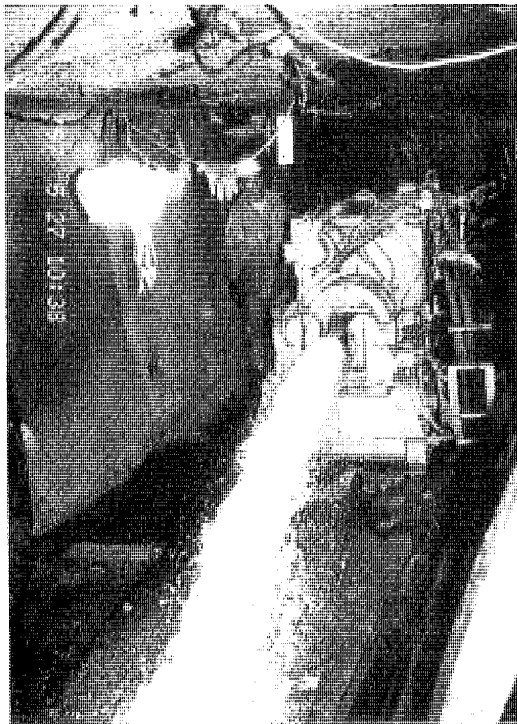
圖二 導坑里程39K+079處受困區域相關迂迴隧道及繞行隧道位置示意圖



圖三 水平長距離鑽探取心示意圖



圖四 導坑里程39K+079附近地表鑽孔(PH-25)地下水水位之歷時曲線



照片一 坪林隧道導坑里程39K+079反循環式水平長距離鑽孔湧水情形

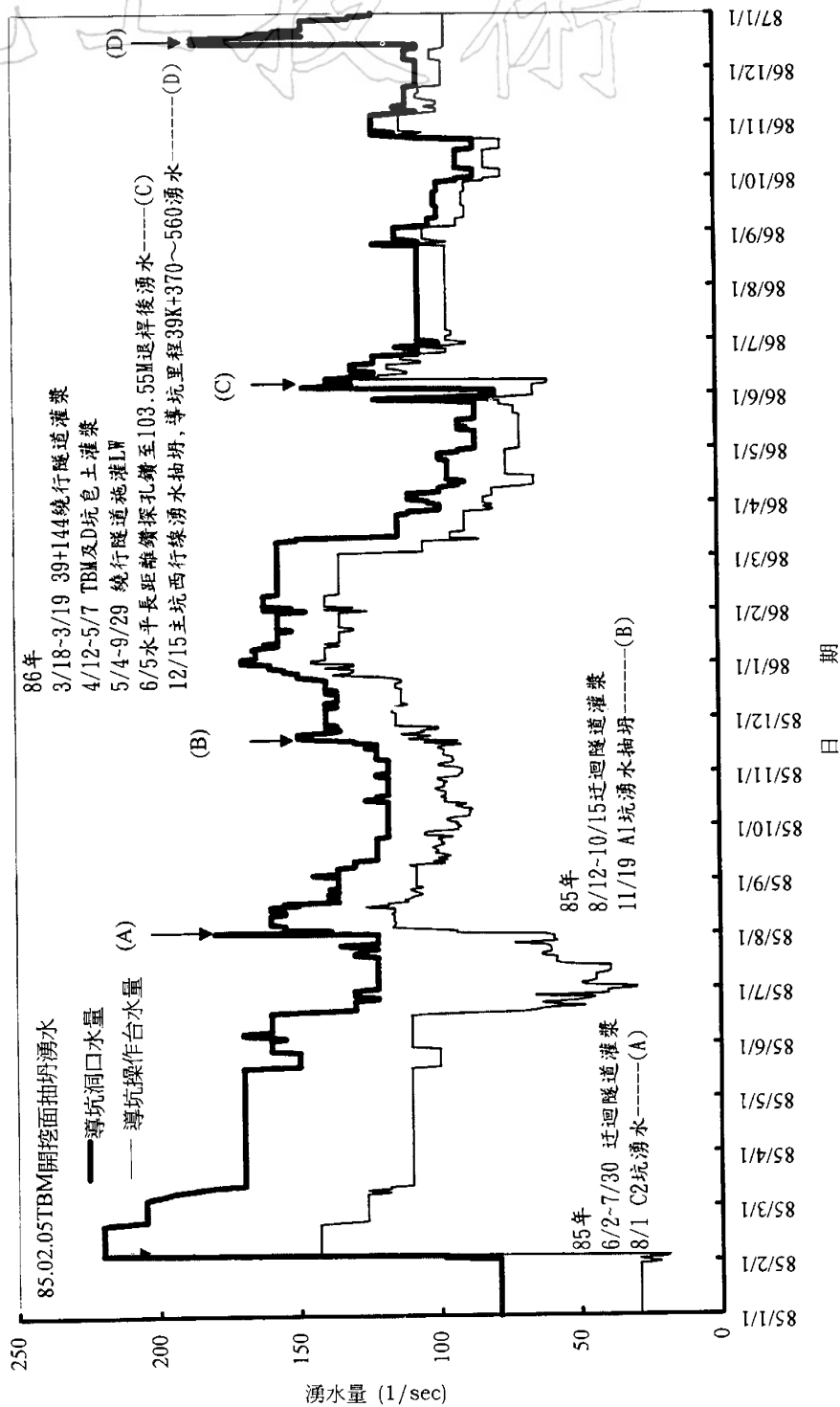
2.2.3 水文調查

水文的補充調查主要分為三個部份，包括地下水水位監測，隧道內湧出地下水之同位素定年分析及溪流流量監測

(國道新建工程局，民國87年)。圖四為坪林隧道導坑里程39k+079附近地表鑽孔中地下水水位之歷時曲線，該地表鑽孔口的高程約為380m，而導坑於該處之高程約為50m。圖五為導坑TBM第十次受困後導坑洞口及TBM開挖面的水量歷時曲線。由圖四、五顯示導坑從第十次受困停機後(85年2月5日)迄86年5月止(因坍孔而無法繼續量測)，機頭附近的地下水雖以超過40 l/s(最高約150 l/s)的流量日以繼夜的流出，但位於該處附近地下水水位的變化主要仍受季節性雨量的影響(由圖四顯示最高及最低水位，約分別發生在每年12月及2月的時候)，與導坑內地下水的流失並無明顯的關聯，也就是地下水與地表水間流動的關係並不明顯，此外由圖五亦可看出當隧道內進行灌漿作業時，水量即明顯降低，但若有抽坍發生時(圖五中標示A~D處)，洞口的累積地下水量即上升至150 l/s以上，足見隧道內累積地下水水量深受施工方式的影響。

此外導坑內亦辦理了地下水碳14及氫(H³)的同位素定年分析，藉由地下水的

土工技術



圖五 導坑洞口及TBM開挖面水量歷時曲線

年代以了解湧水的來源，並推測湧水來源是否隨湧水之持續而發生變化。根據同位素定年分析的結果，導坑內於里程39k+079湧出的地下水混合了年齡較老及年齡較輕的淺層地下水，至於湧水的確實來源及是否隨湧水之持續而發生變化，則仍有待後續進一步資料累積的判釋。

另外為進一步瞭解導坑地下水的流失與地表水的關係，導坑在里程39k+079受困後，開始辦理溪流流量的監測與分析，由於本項工作須做長期性的觀測，且必須綜合地形、地質、雨量、流量等多項資料後，才能建立區域水文地質架構與地下水流模式，故目前尚無具體成果。

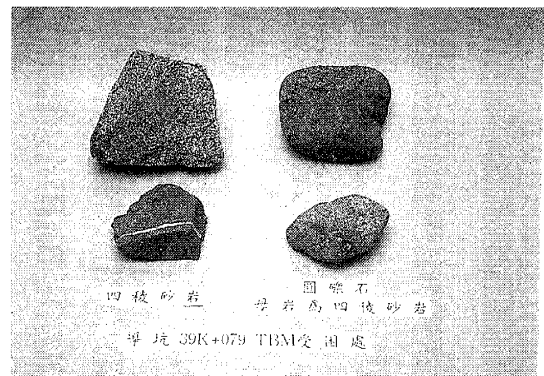
綜合前述水文調查的成果可知，水文地質的調查與判釋是相當複雜與困難的，尤其是欲藉由水文地質模式的建立，以預測開挖面前方地下湧水的水源、水量與水壓，則不但在規劃、設計階段即須建立充份而有系統的背景資料，施工期間更須有長期的調查與監測，而縱使如此，地質的不確定性也仍然存在，畢竟除非完全挖開，否則地下工程永遠必須面對地質的風險。

2.3 實際地質

根據圖二協助TBM脫困所施作之迂迴隧道開挖後之地質資料，並參考水平長距離鑽孔之資料，繞行隧道開挖前推估導坑在里程39k+079前方之地質平面及縱剖面圖如圖六所示，即推估在里程39k+079前方有兩組寬度約10~15公尺的剪裂帶，而高壓含水層則為此等剪裂帶所阻隔。繞行隧道開挖通過TBM停機的位置後，里程39k+079前方實際的地質情況則如圖七所示，由圖七顯示岩盤主要為

堅硬而破碎的石英砂岩，並夾有厚度十數公分至數十公分之薄層硬頁岩及碳質頁岩，而層面的走向則大致與隧道縱軸的方向一致，此外在里程39k+085至39k+065之間有二組剪裂帶通過導坑的航道，剪裂破碎含泥帶的寬度約達十公尺，此與導坑已開挖通過的金盈斷層及上新斷層的寬度相當。

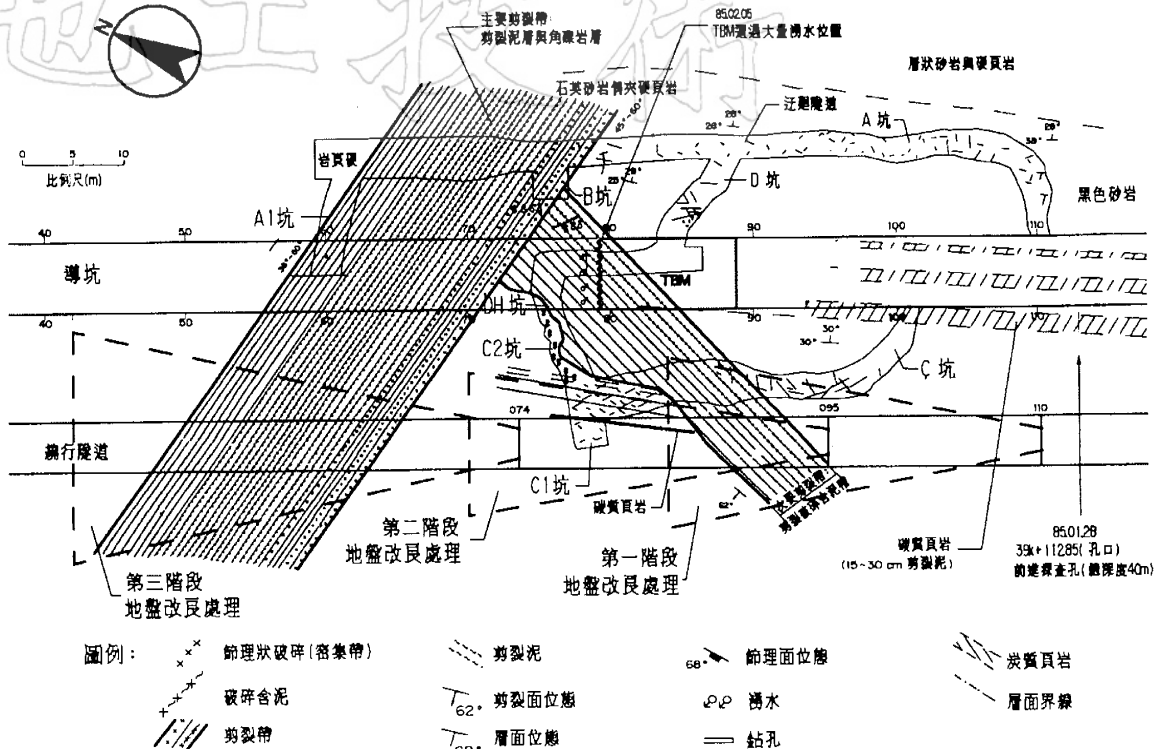
關於地下水的部份，則如圖七(b)所示，主要有兩個含水層，而為前述之兩組不透水的剪裂帶所分隔，當TBM開挖至里程39k+079時，巨大的水壓將剪裂帶沖破，大量的地下水湧入TBM內，並造成TBM機頭前方嚴重的崩坍，而使TBM無法正常開挖。另外由圖五顯示最大之湧水量發生在TBM受困的時候(約為150 l/s)，而TBM自第十次受困後，導坑洞口的湧水量大致皆維持在100 l/s以上，足見前述之含水層具有相當可觀之儲水量。



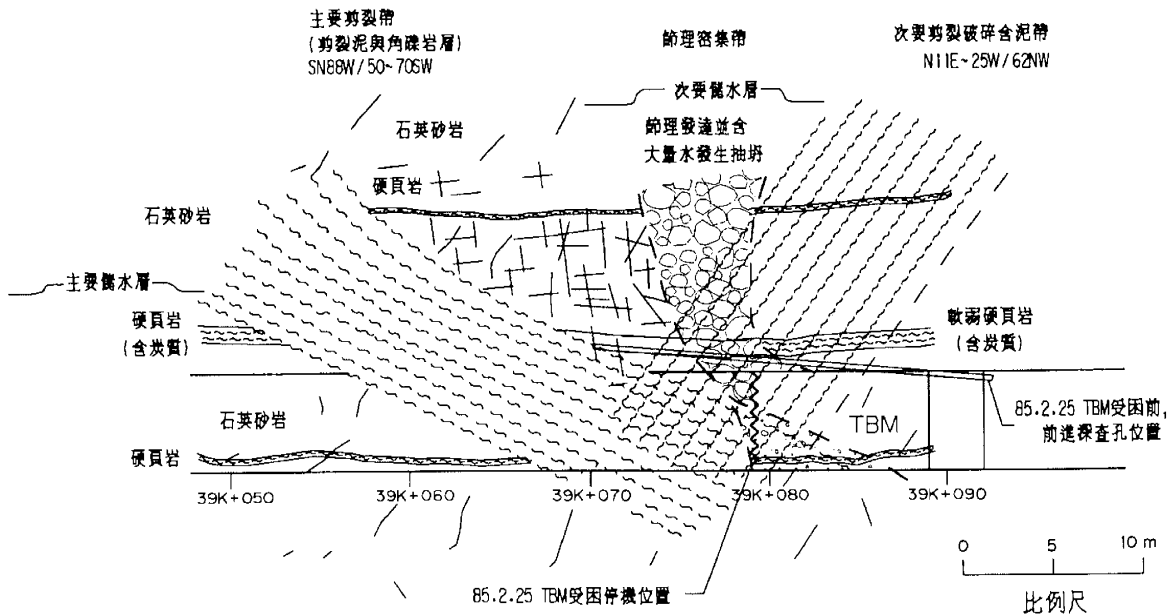
照片二 坪林隧道導坑里程39K+079迂迴隧道A坑崩坍後，大量近於圓角之石英砂岩石塊被湧水沖出

此外當迂迴隧道之B坑開挖至TBM機頭附近(見圖二)，因水壓過大而導致B坑開挖面崩坍，並有大量近於河川卵礫石之圓角石塊(如照片二)被沖出。由於該處之覆蓋厚度約有三百五十公尺，而經

土工技術

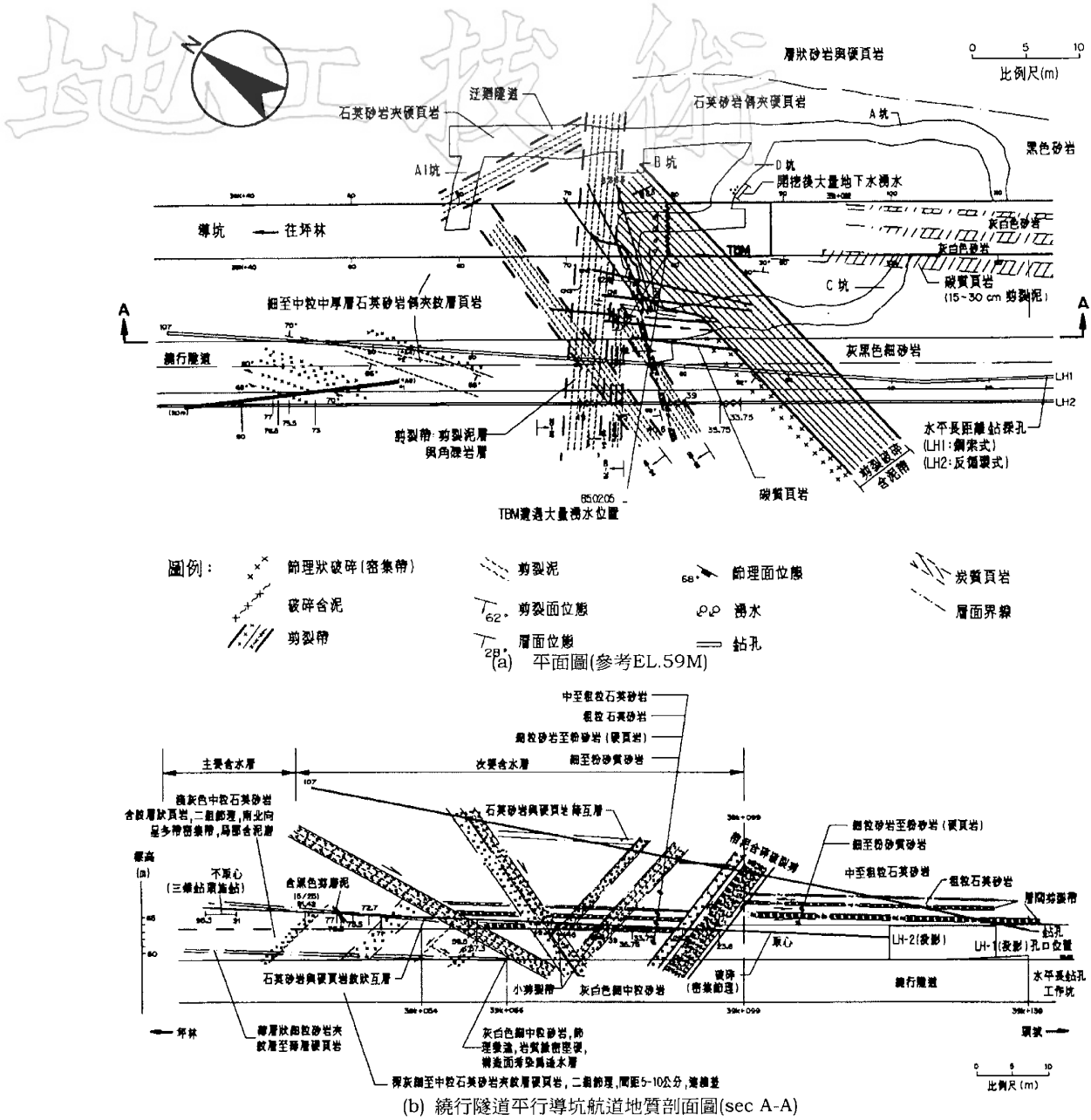


(a) 推估平面地質圖及灌漿平面配置



(b) 推估縱剖面圖

圖六 導坑里程39K+079推估地質圖及繞行隧道灌漿平面配置及縱剖面圖



圖七 導坑里程39K+079實際開挖地質圖

檢視沖出石塊之成份，係來自四稜石英砂岩層之岩塊，且該圓角礫石依外觀視之，其三個軸向之比例並不規則，與一般經流水搬運之卵礫石常見之形狀不同，故初步判斷該等圓角石塊應非源自地表之河川礫石，而係地下水活動所造成（中興工程

顧問社，民國85年）。目前推斷可能有以下兩種解釋可供參考。

1. 本區地下水豐沛，流經斷層帶之地下水沖走斷層泥形成洞穴，而後斷層泥中之夾石掉落入洞穴內，地下水流經洞穴翻動穴中石塊，年代久遠後令其成渾圓狀。

2.本區因節理甚為發達，地下水沿著節理流動，經長期風化與變造的作用，使斷層帶附近節理狀的岩塊逐漸轉變成近於圓角狀之礫石，而非經流水之翻動淘選。

綜合前述繞行隧道及迂迴隧道實際開挖後的地質、水文現象及於地表下三百多公尺的斷層帶內有近於圓角的石塊被沖出，顯示本區段的地質確實相當的複雜。

三、施工流程

坪林隧道導坑從85年2月2日於里程39k+082處施作前進探查後以TBM進行開挖，隨後85年2月5日因大量湧水造成TBM機頭無法轉動開始進行脫困處理，迄87年2月底繞行隧道開挖通過TBM機頭，並繞回導坑的航道為止，共耗費約二年的時間，期間施工的流程大致可分為三個階段。

第一階段為按原TBM之施工理念施作前進探查，並進行TBM的開挖。

第二階段為TBM於里程39k+079受困後，採用如同第一至第九次受困的處理理念，以迂迴隧道的方式施工，期能儘速將遭掩埋的TBM機頭清出，以恢復TBM的施工。

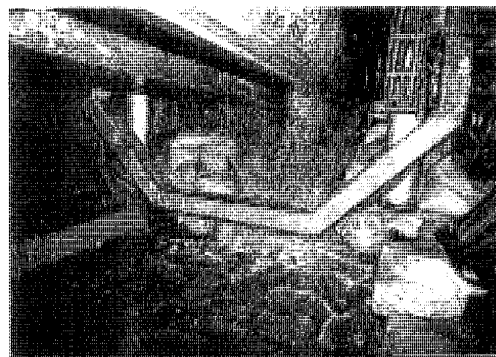
第三階段為迂迴隧道因遭遇極惡劣的地質而導致施工受阻，故改為採用斷面較大的繞行隧道施工，並暫時停止TBM的施工方式，而準備以鑽炸法進行後續約1.5公里惡劣地質路段的開挖。

3.1 原TBM施工理念

由於規劃設計階段研判，隧道通過沿線之地質情況仍有不確定性存在，故開挖前由TBM內部向開挖面前方所做的前進探查孔，就成為判斷開挖面前方地質情況的主要依據。導坑此次在里程39k+079受困

前，亦按原設計理念進行前進探查的作業，首先在探查孔口里程39k+092處(TBM機頭里程為39k+082)，TBM內頂拱11點鐘的位置，向前方施作第一次不取心的前進探查孔，經6小時後完成33米長度之鑽孔(孔底里程為39k+059)，由於在深度11至31公尺間鑽進速度甚快，推測該段可能為軟弱之剪裂帶，故再於二點鐘的位置進行取心探查作業，以進一步確認地質情況，惟該取心探查經二十餘小時之鑽孔僅能鑽入約14m，最後因坍孔嚴重無法再鑽進，故改在1點鐘位置另施作第二次不取心探查。第二次不取心探查孔耗時七小時完成30m，鑽探過程雖局部仍有較破碎軟弱之現象，但並未發生坍孔，且不若第一次不取心探查有明顯軟弱之差別，此外最重要者前述三次鑽孔皆未出現地下湧水的現象，故經綜合研判後，決定繼續以TBM向前開挖。

當TBM再度運轉進行開挖後，前兩環（一環為1.2m）之開挖尚屬正常，但開挖第三環時（機頭里程約39k+079），TBM機頭上方開始發生崩坍並有地下水湧入，而後在數小時之內湧水量由每秒十幾公升驟升至每秒約一百五十公升（詳如照片三），機頭上方崩坍規模不斷擴大，最後終導致TBM無法運轉而受困(國工局，民國85年)。



照片三 坪林隧道導坑里程39K+079因大量地下水湧入而停機（照片中之砂包乃用以阻擋因機頭前方抽坍而沖出之礫料）

此次開挖受困的主要原因，乃因開挖前根據規劃設計階段的地質調查成果，及施工中輔助震測作業，並未能發現開挖面前方有一寬十幾公尺之高度破碎剪裂帶，此外前述之前進探查，其鑽孔又剛好落在走向大致與隧道軸向一致之薄層硬頁岩內（詳如圖六(b)），該硬頁岩為一良好的阻水層，因此也未能發現開挖面前方有一水量豐沛的高壓儲水層，故開挖三公尺後，即遭遇高壓的地下湧水及高度剪裂破碎帶而受困。

3.2 迂迴隧道開挖

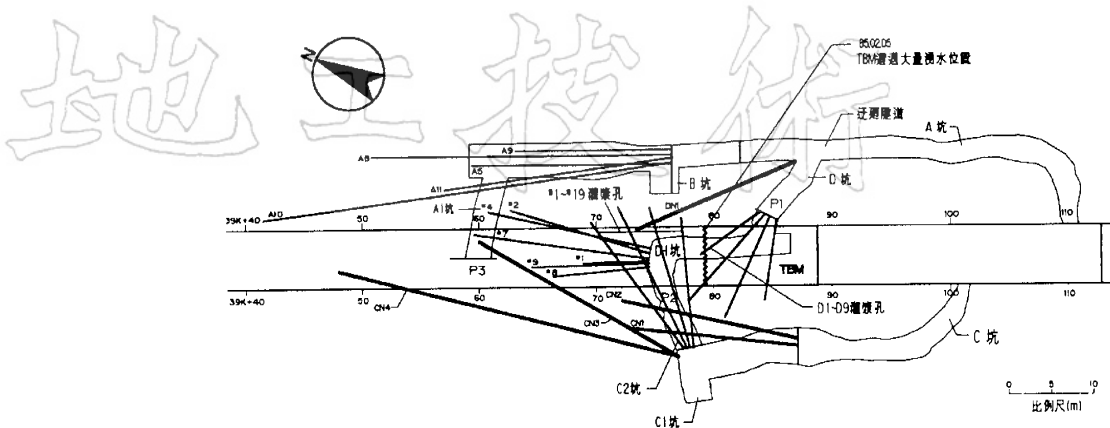
當TBM於里程39k+079受困後，基於過去幾次受困的施工經驗及工進的考量，從85年2月至12月止約10個月的時間，大致上係嚐試由導坑旁邊以開挖迂迴隧道的方式，繞到TBM機頭前方將TBM機頭清出，以恢復TBM的開挖。在這十個月的期間，由於施工上遭遇比以往歷次受困

更大的困難，故施工的理念又可分為以下幾個階段（如表一並參考圖八）：

1. 首先基於過去幾次受困的施工經驗，在考量TBM內部作業空間限制的條件下，由TBM機頭後方距機頭約30m的位置（圖八中之里程39k+110），破除環片開挖迂迴隧道A坑，A坑約與導坑平行並與導坑側壁保留約5m的淨間距，斷面尺寸僅約為2m×2m，以提供人員及簡易的鑽灌設備通過。當施工人員以約一個半月的時間完成約36m的開挖（即超過TBM機頭約6m）後，由於地質情況轉趨惡劣，故決定往導坑的方向擴挖B坑，以便進行後續開挖範圍內的灌漿工作，惟B坑開挖約2m後，開挖面突然出現每秒約100公升的湧水，導致開挖面坍塌而將B坑及A坑淹埋，坍塌的渣料一直冲到A坑與導坑連接的坑口位置，而已完成的A坑約有一半的長度整個斷面被坍塌的渣料掩埋，預估抽

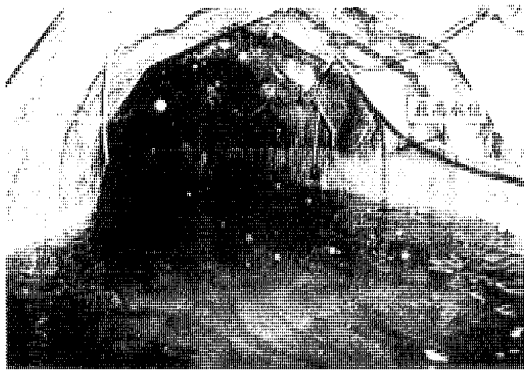
表一 坪林隧道導坑里程39K+079迂迴隧道開挖流程摘要表(參考圖八)

施工順序	工 作 摘 要
1.	85年2月5日TBM於里程39k+079處因高度破碎岩盤及高壓湧水而受困，最大湧水量約150 l/s，受困後即進行迂迴隧道開挖之準備工作。
2.	85年2月8日開始開挖迂迴隧道A坑，85年3月26日A坑開挖面超過TBM機頭約6m轉向開挖B坑(約完成2m準備進行灌漿工作時，B坑開挖面突遭大量湧水而崩落將B坑及A坑淹埋，B坑開挖面湧水量約100 l/s，並發現大量圓角之石英砂岩石塊。
3.	85年4月1日開始開挖C坑至5月31日完成C 1坑後暫停開挖，並由C 1坑開始進行TBM機頭前方之灌漿工作，灌漿工作告一段落後，7月16日由C 1坑再朝TBM機頭方向開挖C 2坑，開挖期間仰拱及側壁持續出現湧水（最大湧水量約100 l/s），8月19日C 2坑開挖到達導坑航道後（圖八中之P 2點），因湧水及地質轉趨惡劣而暫停。
4.	在開挖C坑之同時85年4月7日開始開挖D坑，完成約6m到達TBM的中折盾位置後（圖八中之P 1點），因地質轉趨惡劣而於85年5月1日暫停D坑之開挖。另外在C坑開挖期間，亦配合進行鋼索式（Wireline）水平長距離取心探查作業，由7月24日至9月17日止計鑽進107m。
5.	C 2坑暫停開挖後85年8月25日恢復D坑之開挖，9月13日經由D坑到達TBM機頭前方並與C 2坑連通準備進行導坑航道內的開挖工作，10月16日C 2坑開挖面噴凝土出現裂痕並伴隨大量地下水由仰拱及頂拱湧入，故暫停TBM機頭前方導坑航道內之開挖工作。
6.	85年10月19日再恢復A坑之開挖，往坪林方向開挖超越TBM機頭約20m後轉向開挖A 1坑，85年11月19日A 1坑開挖完成約7m（圖八中之P 3點）後，開挖面出現湧水（最大湧水量約100 l/s）而坍塌，A 1坑及A坑再度遭淹埋。
7.	85年11月19日A坑二度遭淹埋後，即持續進行A、C、D及DH坑的清理與補強工作，85年12月24日DH坑發生坍塌，迂迴隧道的工作至此全部暫停。



圖八 導坑里程39K+079迂迴隧道灌漿平面配置圖

坍的體積超過 100m^3 ，崩坍後伴隨的湧水最高會將A坑淹沒約1m以上（詳照片四），此外隨著B坑的崩坍，大量圓角的石英砂岩石塊被沖出（詳照片二），使得開挖面前方地質的研判更加困難。



照片四 坪林隧道導坑里程39K+079迂迴隧道A坑崩坍後湧水情形（隧道斷面約為 $2\text{M} \times 2\text{M}$ ）

2.當B坑坍落後決定由導坑的另一側開挖C坑，以進行後續的脫困作業。C坑作業的初期，其施工理念與方式大致與前一階段之A坑相同，並配合適當的前進探查孔（最長約二十幾公尺，圖八之CN1~CN4及DN1），以瞭解前方的地質，做為後續施工的依據。此外為加速脫困作業，當A坑清理告一段落後，於A坑靠近TBM尾盾的附近另外再開挖D坑，惟D坑開挖

約6m到達TBM盾殼（中折盾）的位置後（圖八中之P1點），因地質轉趨惡劣，且開始有大量地下水湧入而暫停。當施工人員以2個月的時間完成C及C1坑的開挖後，由於C1及D坑開挖面岩盤非常的破碎，湧水量不斷的增加，且考慮先前B坑崩坍後，TBM機頭前方的岩盤可能都已嚴重鬆動，故為考慮施工的安全，而於C1及D坑的位置往TBM機頭前方約5~10m的範圍內（即圖八C1坑之#1~#19與D坑之DN1孔）實施全面性的灌漿。灌漿工作持續約一個半月後，由C1坑再度朝TBM機頭方向開挖C2坑，由於已進入儲水帶及B坑崩坍的影響範圍，故地下湧水量不斷增加，期間仰拱曾出現 100 l/s 之湧水，將支保腳底部的岩盤淘空，對於隧道的穩定性極為不利，也因此C2坑開挖約6m到達導坑航道的位置後（圖八中之P2點），即暫時停止開挖。C2坑開挖期間，另外亦由D坑配合往TBM機身周圍進行灌漿作業（圖八，D坑之D1~D9孔），除提高C2坑開挖的穩定性外，亦為後續D坑往前開挖預作準備。

對於使用TBM之施工方式而言，灌漿是一件極為困難的作業（張文城，民國83年），蓋若由TBM內部向TBM的前方進行

灌漿，則由於受到TBM內作業空間及設備的限制，灌漿的成效極為有限。若由TBM外面往TBM附近進行灌漿，則亦須避免漿液流至TBM盾殼甚至內部，而將TBM灌成RC結構，這也是作業最困難的部份。由C1及D坑往TBM機頭前方進行的灌漿作業，除了有前述灌漿之困難外，由於先前B坑的崩坍，再加上原先TBM受困時機頭位置的抽坍，使機頭附近水路幾乎皆已連通，灌漿時為控制灌漿壓力極為重要的「隔幕層」已無法形成，故更增加灌漿工作的困難度，也因此C1及D坑灌漿孔的配置就必須有特別的考量。大致上灌漿前規劃在TBM機頭前方約5~6m的位置佈設四排灌漿孔（詳如圖八，C1坑之#1~#19），第一排（計4孔）灌漿孔距離TBM機頭前方約1.5m及航道外圍1.5m處，施灌幾乎沒有固結強度之ARON SR-US與水玻璃混合的化學漿液，以保護TBM機頭，避免被後續有固結強度的漿液灌死。第二排（計3孔）灌漿孔距離TBM機頭前方約3m及航道外圍2.5m處，施灌低固結強度之水泥與水玻璃混合的L.W.漿液。第三及第四排（合計6孔）灌漿孔距離TBM機頭前方約4.5~6m及航道外圍2.5m處，施灌高強度之水泥或水泥砂漿。由於實際施灌後，前述之困難陸續發生，故隔幕層無法形成漿液到處流竄，灌漿壓力無法有效控制。前述灌漿作業實際的灌漿數量，若折合灌入之體積約有150m³，但其成效應不如預期中理想。

由於C1及D坑開挖所遭遇的岩盤極為破碎，地下湧水水量及水壓極大，為充份掌握TBM前方幾百公尺內的地質情況，以為長期施工計畫之依據，前述C2坑開挖期間另一件重要的配合工作，為於TBM後方距機頭約40m處另闢一作業

坑，以施作鋼索式水平長距離取心鑽孔（如圖二）。該鑽孔之鑽機為TONE TEL 7型，最大扭力1,200 N-m，其操作的原理為利用內管鑽進的同時，將岩心送入岩心管內，每鑽進1~2m後，內管不必退出，而以鋼索直接將岩心管取出。該鑽孔原預定以30天的時間完成300m的鑽孔作業，惟實際施作後，2個月的時間僅完成約107m之鑽孔後（磨損鑽頭約20個），即因岩盤極度破碎，鑽桿經常斷裂而停止鑽進。該鑽孔係以HQ完成0~89m之鑽孔，NQ完成89~105m之鑽孔，而最後以BQ（鑽孔直徑約6cm）完成2m後即無法鑽進。由於鑽孔過程中經常有坍孔之情形發生，施工人員通常於坍孔後，即退出內桿進行孔底的灌漿作業，以期穩定孔底岩盤後再重新施鑽，由於鑽孔接近於水平，故灌漿穩定岩盤的同時，也會將留於孔內直徑較大的外套管灌死，因此當最後BQ因管徑太小經常斷裂而無法鑽進時，管徑較大的外套管（即HQ與NQ）已無法再重新鑽孔套進，此亦是最後導致鑽孔作業無法繼續進行的原因之一。按該組設備及人員曾於國內之鯉魚潭引水計畫，以約42天的時間完成700m的鑽孔，兩相比較足見坪林隧道的地質確實非常的困難。

3.C2坑因地質惡劣而暫停開挖後，因C2坑施工期間，D坑前方的岩盤已做了部份的地質改良，故決定由D坑恢復開挖。首先由D坑於接近TBM中折盾的位置沿機身右側向前開挖，待到達機頭的位置後，即於機頭前方導坑的航道內開挖DH坑，並與原開挖之C2坑連通。由於評估先前於C1及D坑所做之灌漿效果可能不理想，故決定於DH坑再往導坑航道前方進行進一步之L.W.及水泥固結灌漿（如圖八DH坑之#1~#9孔）。此外在DH灌漿的同時，亦於

A坑向前方進行灌漿作業（圖八A坑之A1~A11孔），為A坑恢復開挖預做準備。本次於DH及A坑的灌漿作業所遭遇的困難和施灌成效，大致上和前一階段在C1及D坑的灌漿作業一樣，而根據記錄所灌入漿液的體積約達250m³。由於作業期間地下水仍不斷湧入，已開挖完成的C、C1及C2坑的噴凝土面出現裂縫，再加上評估後對於DH坑的灌漿成效並無把握，故決定暫停灌漿及預定由DH坑進行的頂導坑開挖作業。

4.當原先預定由DH坑沿導坑航道往前開挖頂導坑的計畫暫停後，決定再由A坑恢復開挖工作。當A坑開挖超過TBM機頭約20m的長度後，因預估A坑已穿過原先推估的剪裂帶，故轉向開挖A1坑，不過當A1坑開挖約7m並進入導坑之航道後（圖八中之P3點），地質情況急遽惡化，地下湧水持續增加，最後在巨大的水壓與水量下，終導致A1坑的坍塌，最大湧水量達100 l/s，坍塌的渣料預估有100m³以上，再度將A坑掩沒，並沖到A坑的坑口。當A1坑坍塌後，原先已開挖坑道的穩定性皆受到影響，85年12月24日DH坑道再度發生嚴重的崩塌，鋼支保扭曲變形，迂迴隧道的施工作業至此全面暫停。

總計迂迴隧道從A坑開始開挖後施工期間約十個月，開挖總長度約100m，灌漿的體積約在400 m³以上。

3.3 繞行隧道

由於導坑於里程39k+079附近兩側開挖的迂迴隧道，總長度已超過100m以上，且先後歷經了B坑、A1坑及DH坑之崩塌，坍塌渣料的體積推估超過200m³以上，導坑及迂迴隧道的穩定性已受到嚴重的影響。因此為考慮爾後施工的安全性，除持續進行各坑道的補強工作外，亦必須

尋求其他可行的施工方法，以突破困境。

85年11月19日迂迴隧道於A1坑產生嚴重坍塌後，即陸續有國內、外多家專業顧問及施工廠商，分別提出特殊的材料或工法，以克服前述的施工困境。顧問公司方面主要皆建議對於地質應有進一步更確實之調查後，才能提出詳細的施工細節。施工廠商方面則主要為以特殊的灌漿材料並配合其專業的施工方法，先形成帷幕層以有效控制灌漿壓力，達到地盤改良的成果後，才能進行後續的開挖作業，另外亦有施工廠商提出以管幕工法或水泥高壓噴射樁的工法，直接進行開挖。由於前述顧問公司或施工廠商提出的建議案，不是需要花長時間進行先期的調查及研究，就是要以昂貴的特殊材料進行施工，此外基於商業機密(Know How)，各專業廠商對於其工法或材料又多不願詳加說明，使得決策人員無法獲得充份的決策資訊，而不敢冒然採用。雖然後續施工方案的決定有前述的困難，不過有幾個觀點經各方充份討論後則可達成共識，包括：(1).前方的地質高度的破碎，地下水量及水壓皆甚高，而且未來1.5公里在四稜石英砂岩層內的路段，也極可能會遭遇類似的地質情況。(2).迂迴隧道已柔腸寸斷，穩定性極差，除非地質經過相當的改良並降低地下水壓，否則不宜再進行迂迴隧道的開挖。基於此種共識，經各方再對地質、施工方法及現況充份評估後，決定未來1.5km不良地質路段，由TBM改為鑽炸法施工，也因此暫時停止迂迴隧道內的各項施工作業，而針對突破施工困境的施工理念，則改為採用斷面較大的繞行隧道，並配合皂土、水泥及水玻璃材料的灌漿，進行開挖作業，以期先行繞過目前TBM及迂迴隧道的位置後，再轉回導坑的

航道（詳如圖二），最後再分頭一方面往坪林方向繼續以鑽炸法開挖未來的1.5km不良地質路段，同時回頭處理里程39k+079附近的不良地質路段，並將TBM挖出恢復TBM的功能，俟鑽炸法完成前述1.5km的開挖後，再恢復以TBM開挖的方式，貫通坪林導坑。

繞行隧道自86年3月9日利用原有的鋼索式水平長距離鑽探工作坑，由相對導坑里程39k+139處開始開挖，至87年2月底止繞過TBM回到導坑航道（里程為39k+010），總計一年的時間開挖長度約150m，其施工流程與理念，大致上可分為以下幾個階段（如表二並參考圖二）：

1. 根據迂迴隧道及鋼索式水平長鑽孔之調查資料，所推估的地質情況如圖六所示，也就是在里程39k+079前方有一寬約10~15m之主要剪裂帶及寬約5~10m之次要剪裂帶，地下含水層則為該兩剪裂帶及不透水的硬頁岩層面所分隔。因此經綜合評估後，決定以繞行隧道開挖並先以

上半斷面開挖的方式通過前述之主要及次要剪裂帶後再開挖下半斷面，不過為確保施工之安全性，採用「近灌遠排」的施工理念，即先以灌漿的方式改良該兩剪裂帶，並配合水平長鑽孔降低灌漿範圍外之地下水壓後再進行開挖，因此第一階段的開挖自86年3月9日由對應導坑里程39k+139開始，至4月23日止挖至里程39k+110後，即暫停開挖而準備進行前述兩剪裂帶所通過區段之灌漿作業。此外由於前一階段施作之鋼索式水平長距離鑽孔，並沒有達到預定的調查深度，因此決定配合繞行隧道的開挖，再施作反循環式水平長距離鑽孔，長度仍預定為300m，以探知前方的地質情況，做為後續繞行隧道開挖時研判之參考，並兼做排水孔，以降低開挖面前方灌漿範圍外的地下水壓，提高施工之安全性。

反循環式水平鑽孔所使用鑽機之機型為TONE Top-LS，最大扭力為14,000 N-m，其操作與前述鋼索式鑽孔最大之

表二 坪林隧道導坑里程39K+079繞行隧道開挖流程摘要表(參考圖二)

施工順序	工 作 摘 要
1.	86年3月9日利用原鋼索式水平長距離探查工作坑由相對導坑里程39k+139處，平行導坑往坪林方向開始開挖繞行隧道，至4月23日止完成29m到達里程39k+110。前述開挖期間同時由繞行隧道的側壁擴挖一16m(長)×2m(寬)×2.3m(高)之工作坑，以便做為後續反循環式水平長距離探查孔之作業空間。
2.	86年5月5日開始進行繞行隧道第一階段(里程39k+110~39k+085)的灌漿作業，至5月14日完成。5月16日繞行隧道恢復開挖，至5月29日止開挖至里程39k+095。另於本階段灌漿與開挖期間，同時施作反循環式水平長距離探查作業，自5月5日起至6月4日止計完成103.5m。
3.	86年6月11日開始進行繞行隧道第二階段(里程39k+095~39k+070)的灌漿作業，至6月29日完成。6月30日繞行隧道恢復開挖，至7月20日止開挖至里程39k+074。
4.	86年7月21日開始進行繞行隧道第三階段(里程39k+074~39k+042)的灌漿作業，至9月27日完成。9月29日繞行隧道恢復開挖，至10月18日止開挖至里程39k+054。另為利於往後施工動線之順暢，自8月8日至9月14日開挖完成#1之斜支坑。
5.	86年10月20日於里程39k+066及39k+054兩處，往繞行隧道前方鑽設30m長之排水孔降低水壓以利後續開挖，至10月31日計完成18孔。11月1日至11月27日開挖繞行隧道里程39k+139~39k+054的下半斷面(前述施工順序1~4繞行隧道只開挖上半斷面)，並完成仰拱閉合工作。
6.	86年11月28日起至87年2月底，由里程39k+054開挖至里程39k+019準備再進行水平長距離的鑽探作業，另由里程39k+035開挖#2斜支坑將繞行隧道彎回導坑的航道上，至此繞行隧道的開挖工作暫告一段落，準備以鑽炸法進行導坑後續1.5km的開挖工作。

差、別為使用雙套管同時鑽進，循環水由內外套管間之空隙流入，再由內管之管內流出，循環水流出之同時，將已鑽好之岩心一起帶出，而不使用岩心管（詳如圖三）。施鑽前先由繞行隧道之側壁開挖一工作坑，施鑽位置與先前之鋼索式之鑽孔僅相距20m（如圖二），開鑽後30天約鑽進103m（磨損之鑽頭超過15個），雖然本次鑽探記取了前次鋼索式鑽探，因套管管徑太小而經常扭斷的教訓，改採較大管徑的套管（0~15m管徑21.6cm，15~75m管徑16.5cm，75~100m管徑13.0cm，100~103m管徑10.5cm），但最後仍因鑽頭及鑽桿斷於孔內無法取出，且量測地下水壓高達 18 kg/cm^2 ，水量亦達 117 l/s ，故決定不再鑽進而留作排水降低水壓之用。此外為量測地下水的水壓力，必須將鑽孔的孔口封堵，惟封堵後卻發生地下水改由繞行隧道的開挖面大量湧出的現象，於瞬間即造成開挖面局部小規模的崩坍，足見前述「近灌遠排」的施工理念，對於繞行隧道開挖面的穩定性，確實有相當的助益，也因此量測地下水壓力時，為避免繞行隧道的崩坍，僅能瞬間將鑽孔封堵，而無法長期封堵孔口，待水壓力面穩定後，再量測穩定的水壓力（評估該水壓力應較 18 kg/cm^2 為高）。大致而言反循環式鑽探除其進度（約 3m/天 ）略較前述鋼索式鑽探（約 2m/天 ）為佳外，其餘遭遇之地質情況及施工困難則兩者大致相同。

2.當繞行隧道開挖至距圖六(a)所示之次要剪裂帶前緣約15m的位置後(即里程 $39\text{k}+110$)，即準備進行後續的灌漿作業。由於推估繞行隧道從進入次要剪裂帶到穿越主要剪裂帶，約需開挖50m，且由

反循環式水平鑽探得知前方含水層之水壓力達 18 kg/cm^2 ，故決定將灌漿的里程分成三個階段（佈置圖詳如圖六(a)）。第一階段預定施鑽25m後開挖15m，以保留10m的安全間距，第二階段施灌25m後開挖20m，保留5m的安全間距；最後一階段則施灌32m開挖20m，以保留12m的安全間距。至於灌漿的範圍，則鑑於先前於迂迴隧道內之灌漿成效不彰，且開挖後仍導致崩坍的經驗，故決定除繞行隧道開挖的範圍內進行灌漿外，仍向外施灌至 $2.5D\sim 3.5D$ 的範圍（ D 為繞行隧道的直徑），以確保開挖後，周圍留有足夠厚度之改良岩盤，以抵抗巨大的之岩壓及水壓。圖九為第三階段的灌漿孔位佈置圖，灌漿孔共分成A、B、D三圈，灌漿完成後則於圓心施鑽C 1孔，以檢核灌漿之效果。此外，灌漿時所用的材料，原則上內圈的部份使用水泥加皂土的混合材料，以固結岩盤，而最外圈則使用水泥加水玻璃的材料，以便發揮較佳之止水效果。實際施工時係先灌外圈，再施灌內圈。

本區段三階段的灌漿作業再加上約55m繞行隧道的開挖，共耗費了約五個半月的時間。總計三階段灌入漿液之體積約達 900 m^3 ，由於施灌過程中可有效形成帷幕層，故灌漿壓力可提升至 50 kg/cm^2 ，也因此灌漿成效較迂迴隧道內改善許多，不再有嚴重漏漿的現象，灌漿後開挖面的地下水已受到良好的控制，不再有大量入滲的現象。

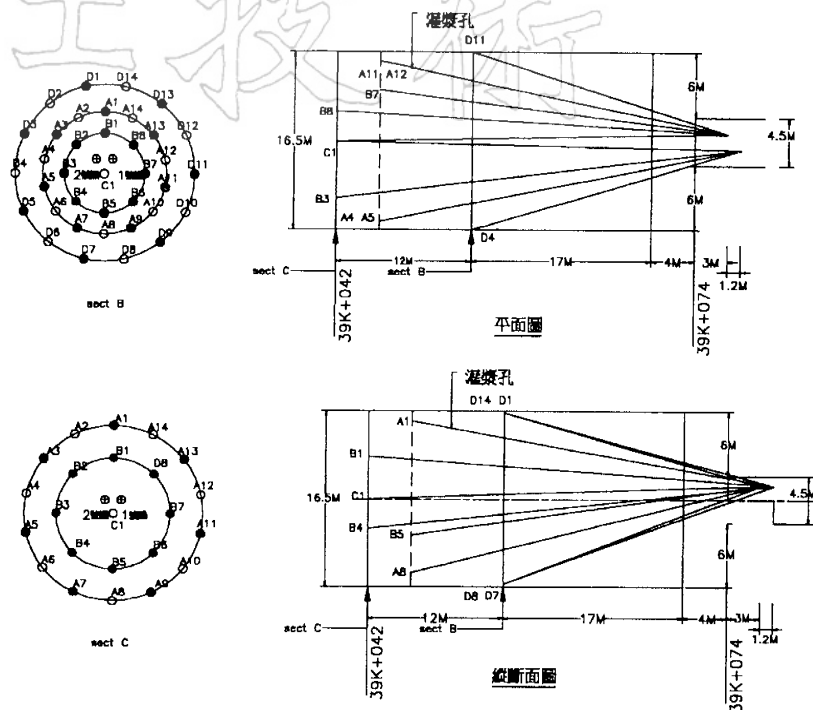
3.當繞行隧道以灌漿之輔助工法，開挖通過圖六所推估之主要剪裂帶後，預估前方的地質情況將逐漸轉好，不過因仍預期前方地盤內仍有高壓力之地下水存在，故先於開挖面以一般鑽機往前鑽設18

地

工

技

術



圖九 導坑里程39K+079繞行隧道第三階段灌漿佈置圖

孔長約30m之排水孔，以降低開挖面前方之地下水壓，最後繞行隧道再往前開挖至里程39k+019後暫停開挖前進，準備於該處進行另外一次的水平長距離鑽探，而於此同時另由里程39k+035處開挖#2斜支坑，將繞行隧道彎回導坑的航道，至此繞行隧道的施工告一段落。

4. 繞行隧道回到導坑航道後，將由導坑航道以鑽炸法方式往前（往坪林方向）開挖1.5km，同時亦將回頭將TBM機頭清出恢復TBM之功能，待前方1.5km的路段以鑽炸法開挖完成後，再恢復使用TBM的施工方式以貫通坪林導坑。

四、結論與建議

北宜高速公路坪林隧道導坑，自民國85年2月5日於里程39k+079受困後開始

進行脫困作業，至87年2月底以繞行隧道繞過TBM並彎回到導坑航道止，總計開挖了約100m長的迂迴隧道，150m長的繞行隧道，地盤改良所灌入的漿液體積約達1,300m³，期間遭遇最大的湧水量約150 l/s，最大水壓力約20kg/cm²。施工作業初期，由於對於前方的地質及水文情況尚未充分掌握，故灌漿成效不盡理想，並且先後因水壓力過大而導致三次大規模的崩坍。其後由於地質及水文情況逐漸掌握，採用「近灌遠排」的施工理念，灌漿效果漸能發揮，且輔以長距離的鑽孔及排水作業有效的降低水壓，故終能克服此一地質困境。由本次的施工經驗亦可瞭解，地質情況的不確定性是隧道施工的最大風險所在，尤其是地下水文縱使在施工階段辦理更進一步的調查，亦未必能充份的掌握，這也是當初坪林隧道工程決定在大

斷面的主坑開挖之前, 以小斷面的導坑先行開挖, 以充分掌握沿線的地質及水文情況, 作為後續主坑開挖之參考的主要原因。

本次導坑於里程39k+079處原規劃以直徑約4.8m的TBM開挖通過, 惟TBM受困停機後, 後續的迂迴隧道及繞行隧道皆以鑽炸法施工, 但仍遭遇極大的困難, 其中迂迴隧道及繞行隧道的開挖斷面分別約為2m×2m, 及5m×5m, 由此可知本次施工所遭遇的困難, 無論採用TBM或鑽炸法的施工方式都會發生, 也就是當初導坑若係規劃以鑽炸法的方式開挖, 則通過里程39k+079仍會遭遇到相同的地質及水文情況, 也可能需要耗費相當的工期及費用, 才能克服此一地質困境。不過採用TBM的施工方式, 與直接採用鑽炸法開挖, 基本上仍有若干主要的差異, 包含(1). 採用TBM的施工方式, 若需要以灌漿進行地盤改良時, 則為保護TBM避免於灌漿過程被流入的漿液卡死, TBM機身周圍必須先形成適當的保護層, 以本工程為例係施灌幾乎無固結強度的ARON SR-US化學漿液, 由於有此顧忌, 故灌漿的效率及效果常會受到相當程度的影響。(2). 由於TBM含支援設備通常都會有兩百公尺以上的長度, 故TBM受困停機而採用迂迴隧道繞過TBM往前做長距離的開挖時, TBM本身常會成為施工動線的障礙, 因此施工的效率自然也會受到若干程度的影響。(3) 若欲以其他輔助作業進行地質調查工作 (如地球物理、水平長鑽孔), 則由於TBM作業空間及設備的限制, 採用TBM工法自然也比鑽炸法困難。雖然有前述的困難, 會影響到TBM配合迂迴隧道 (或繞行隧道) 的施工效率, 不過若TBM可正常運轉時, 其開挖效率卻遠高於鑽炸法, 故對於

困難地質路段, 其工法的選擇仍必須以個案的方式詳加評估。

坪林隧道導坑採用TBM施工5年以來, 雖然TBM對施工進度一直未如預期理想, 且配合的鑽探、灌漿及地質調查等工作, 也仍需藉由實際施工時遭遇之困難, 來不斷的加以改善, 不過由此次導坑於39k+079所獲得的施工經驗, 有以下幾點主要的建議, 以供後續遭遇類似地質情況時做為參考:

1. 高度破碎且伴隨大量及高壓地下水的岩盤, 無論採用TBM或鑽炸法的施工方式, 都會面臨相同的地質困難, 也必須有相對的工期與費用的考量, 不過由於TBM通常給人的印象是可「快速開挖」的設備, 故一旦TBM因地質因素而需停機處理時, 常會有選用TBM決策錯誤的評論, 故若決定採用TBM施工時, 對於預期的特殊地質狀況, 於合約內對於衍生的工期與費用必須有明確而周延的考量, 以避免非技術性的因素影響工程的正常推展。

2. 地質因素為隧道施工最大的風險, 故施工中持續的地質調查有其正面的價值與必要性。從隧道內採用水平長距離鑽孔, 以瞭解前方的地質情況為最直接有效的方法, 不過通常地質惡劣時, 欲單獨以鑽孔的方法完成詳細的地質探查, 則時效上可能大有問題, 因此其他有系統而迅速的輔助調查方法 (如地球物理) 及延續規劃、設計階段的長期調查 (如水文), 或可加以考量, 並明訂於施工合約中, 以儘量充份掌握開挖面前方的地質及水文情況。

3. 對於含高壓地下水的岩盤, 欲以灌漿的方式進行地盤改良時, 「近灌遠排」的施工方式, 應可有效固結開挖面前方的岩盤, 並降低固結岩盤範圍外的水壓力,

以提高施工的安全性。而對於灌漿材料的選擇，除一般的水泥、皂土及水玻璃外，其他特殊材料及工法雖然價格較為昂貴，不過因往往可以大幅縮短施工時程，所以基於工期的要求，或許可針對工程的需要，於合約中做適當的考量。

4. 本工程共施作了鋼索式及反循環式二次水平長距離的探查，技術上兩種方式都遭遇了同樣的困難，主要為經常的斷桿及鑽頭損耗太大，不過技術均屬可行，但施作時對於管徑及鑽頭的型式必須先充份評估地質情況而作適當的因應。從可獲得之地質資料而言，鋼索式係以岩心筒取出完整的岩心，岩盤破碎時提取率可能較差，但反循環式則因係利用循環水將岩心沖出，故岩盤破碎時，僅能在孔口撈取部份已被沖散的岩屑，比較之下鋼索式可利用較完整的岩心做地質研判應該比較有利。至於施工的進度由於鋼索式遭遇破碎岩盤遇有坍孔現象時，通常必須先以灌漿方式改良孔底的岩盤後才能再鑽進，且每鑽進一定距離後（通常為1~2m），必須將岩心筒取出，而反循環式則無前述灌漿及取岩心筒的問題，故大致上反循環式的進度會比鋼索式快，以本工程而言，反循環式的進尺率約3m/天，而鋼索式為2m/天。綜合前述，鋼索式及反循環式長距離鑽孔施作時各有其優劣點，因此必須根據工程的地質特性、工期及費用選擇適當施作的方式。

參考文獻

- 中興工程顧問社（民國84年），“坪林隧道導坑工程震測法探測地質成果與實際開挖面地質之比對”。
- 中興工程顧問社（民國85年），“坪林隧道導坑TBM第

十次受困（里程39k+079）及迂迴坑坍塌地質勘察與評估”報告。

國道新建工程局（民國80年），“國道北宜高速公路工程基本設計階段坪林—頭城段地質調查工作期末報告”，第十一章。

國道新建工程局（民國85年），“國道北宜高速公路計畫坪林隧道導坑工程地質調查工作85年度簡要報告”，第四章。

國道新建工程局（民國87年），“國道北宜高速公路施工階段坪林隧道湧水問題評估調查服務工作第一年度工作成果報告”。

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85年），“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。

榮工處北宜施工處（民國84年），“震測法探測隧道開挖面前方地層構造研究報告”。

榮工處北宜施工處（民國86年a），“北宜高速公路坪林隧道導坑工程水平長距離探查工作”報告。

榮工處北宜施工處（民國86年b），“北宜高速公路坪林隧道導坑工程水平長距離反循環套管鑽探工作完工報告書”。

DEERE, D. U. (1964), “Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose” *Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol.1, No.1.*

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。

86年 12月 20日 收稿
87年 3月 9日 修改
87年 3月 14日 接受