

全斷面隧道鑽掘機(TBM) 於破碎與湧水帶施工之探討 (上)

作者/張文城

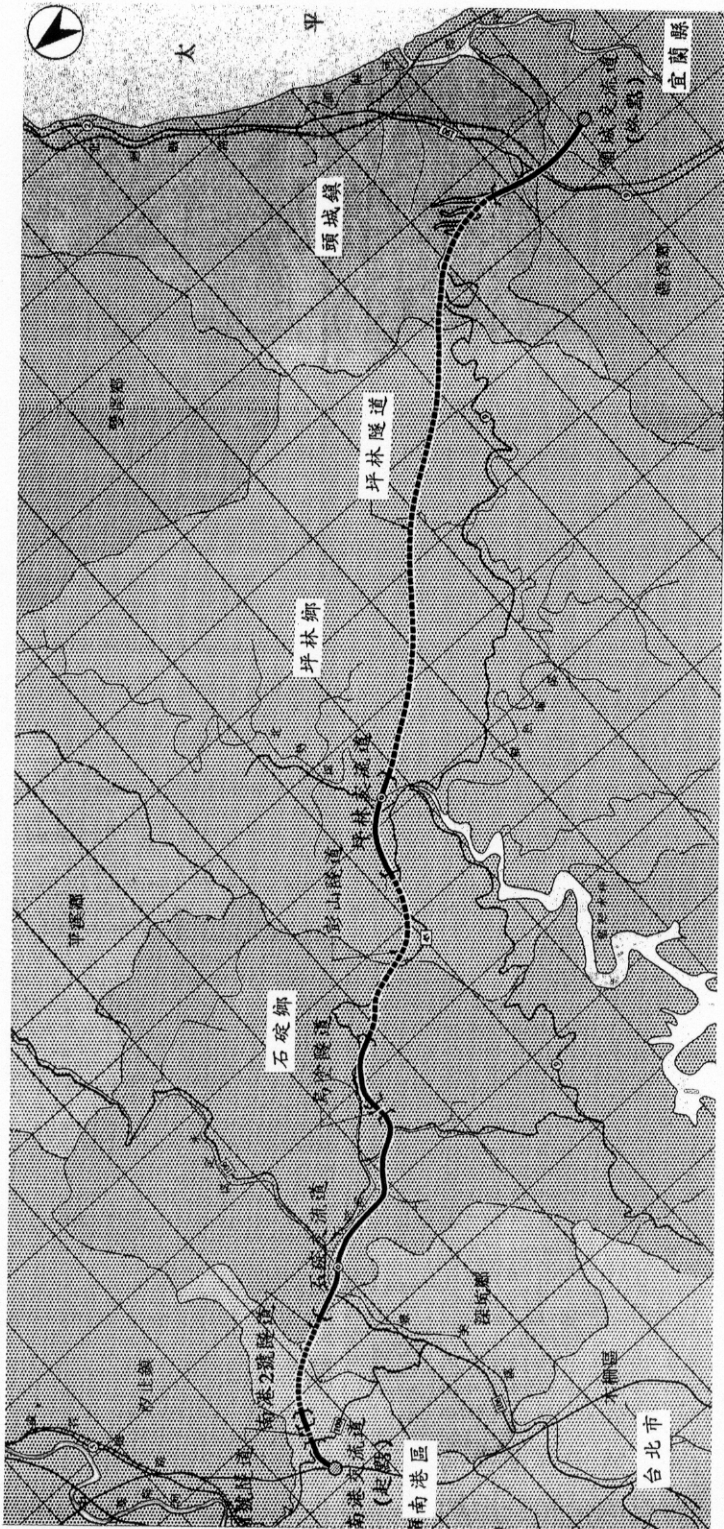
國道新建工程局 第三區工程處頭城工務所主任

一、前言

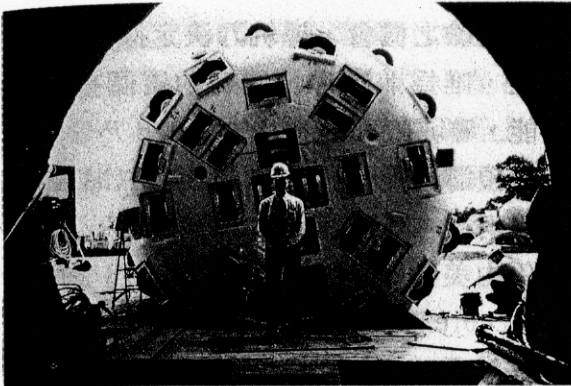
坪林隧道為北宜高速公路建設之要徑工程，並於國內首次引進全斷面隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM, 詳如照片一、二)，其中導坑工程並已於民國八十年七月正式開工。宜蘭地區由於山脈之阻隔，與台北都會區間僅能行經崎嶇山區之台九線及濱海之台二線連絡，因台二及台九線之行車時間皆須九十分鐘以上，故宜蘭地區之發展乃受到相當程度之限制。北宜高速公路即為促進宜蘭甚至東部地區產業之升級與區域之繁榮，並為環島高速公路網之先期工程。北宜高速公路由台北市之南港區經石碇鄉、坪林鄉至宜蘭縣之頭城鎮(如圖一)，全長約31公里，為雙向四車道之公路隧道。由於北宜高速公路主要係穿越台灣北部崎嶇之山區，故工程主要為隧道之施工，隧道計有五處，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。

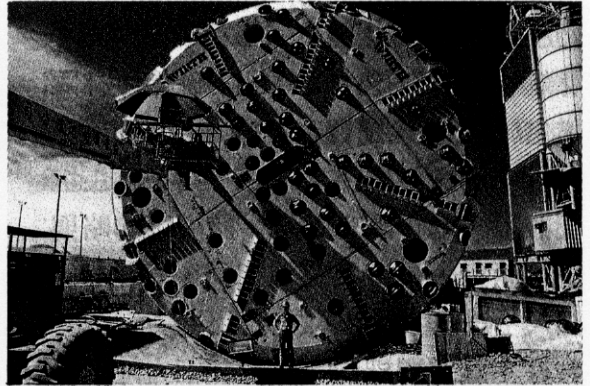
根據本計畫於規劃設計階段地質調查之成果得知，本隧道之最大覆土深度約七百公尺，坪林隧道西半部(坪林端)主要之岩性為砂岩及硬頁岩，而東半部(頭城端)主要則為硬頁岩及四稜砂岩(詳如圖二)，其中四稜石英砂岩之單壓強度最高達 3000 kg/cm^2 以上。地質構造上，穿越坪林隧道之斷層主要則分布在頭城端約3公里的範圍內，其斷層厚度可能超過50公尺以上，另根據地質調查之成果推估，該頭城端3公里之岩盤相當破碎且含豐富之地下水，其餘路段岩體品質則尚佳。堅硬而破碎之岩盤，伴隨豐富之地下水與斷層群，對於隧道施工而言，相對的增加了許多的困難與風險。



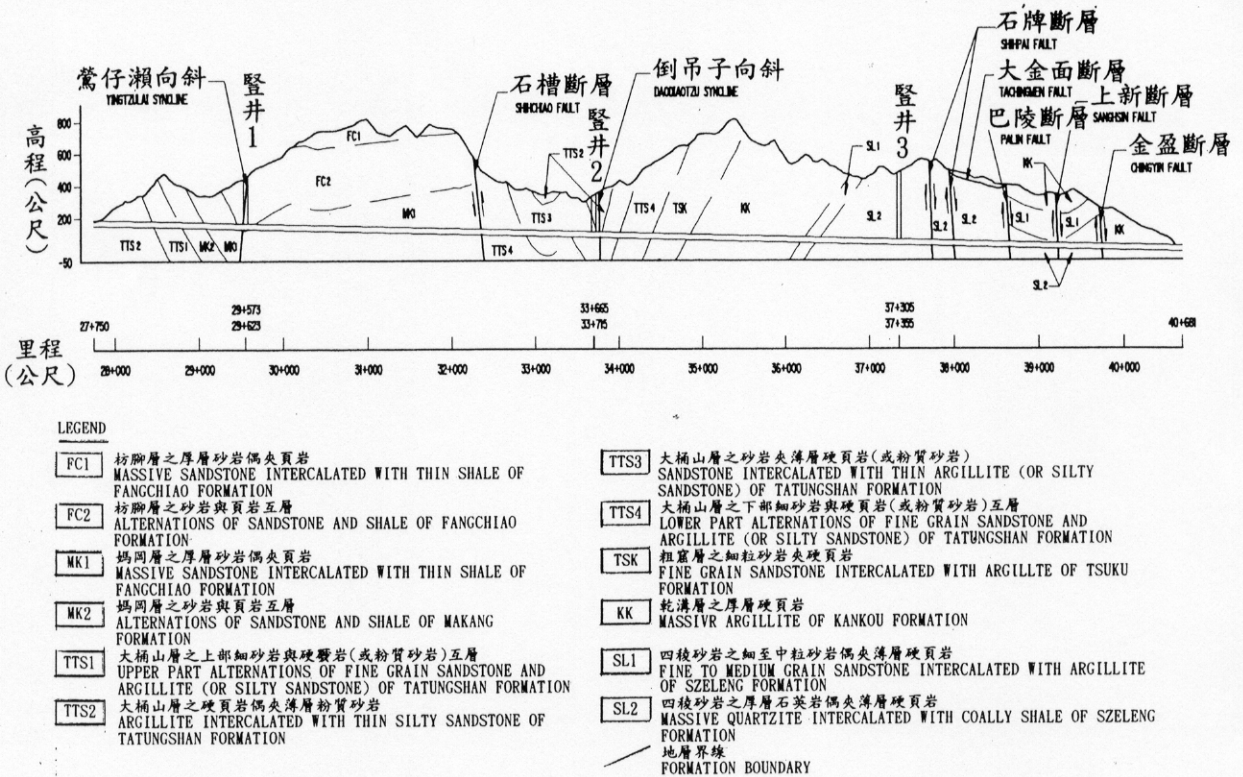
圖一 台北宜蘭高速公路線佈置圖



照片一 坪林隧道導坑 TBM(直徑4.82m)



照片二 坪林隧道島主坑 TBM(直徑11.74m)



圖二 坪林隧道沿線地質剖面圖

二、TBM簡介

坪林隧道於規畫設計階段，曾針對採用傳統之鑽炸法(Drilling and

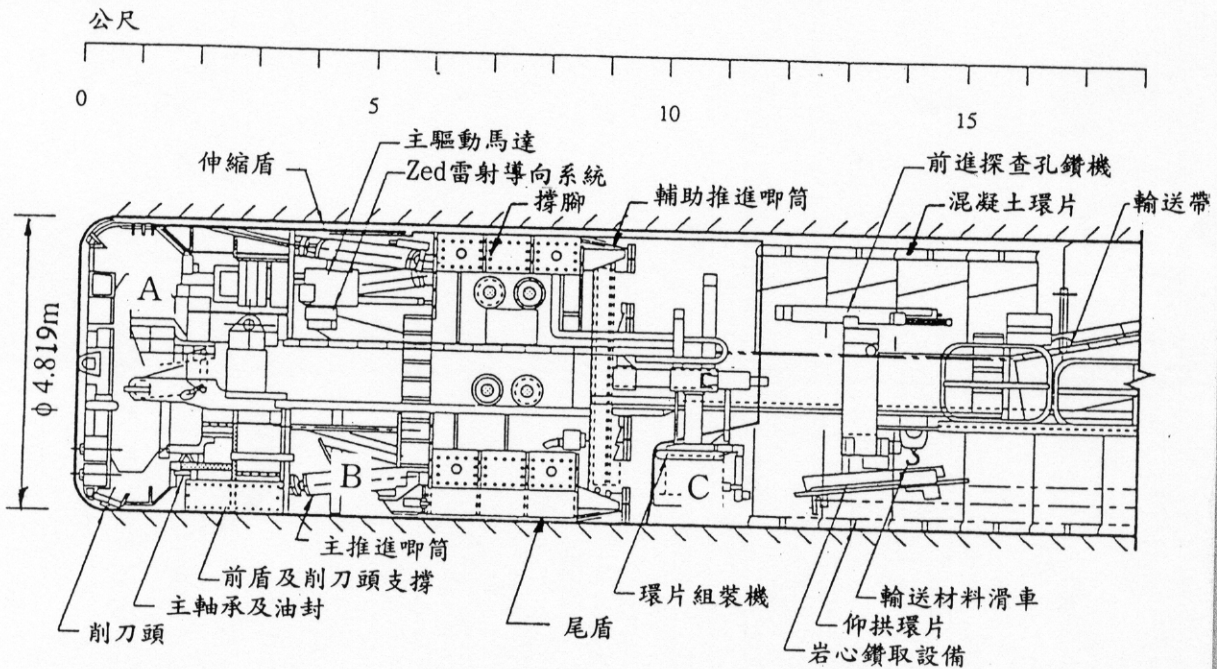
Blasting)或全斷面隧道鑽掘機法加以評估比較，最後基於縮短工期、減少環境污染及提昇國內隧道施工技術等因素，

乃決定採用TBM，並由頭城端(低處)向坪林端(高處)開挖。此外，為確保坪林隧道主坑(即車輛通行之坑道)採用TBM施工時之安全，最重要之工作，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4.82公尺。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。
3. 完工後可做為主坑之維修及緊急逃生用之坑道。

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

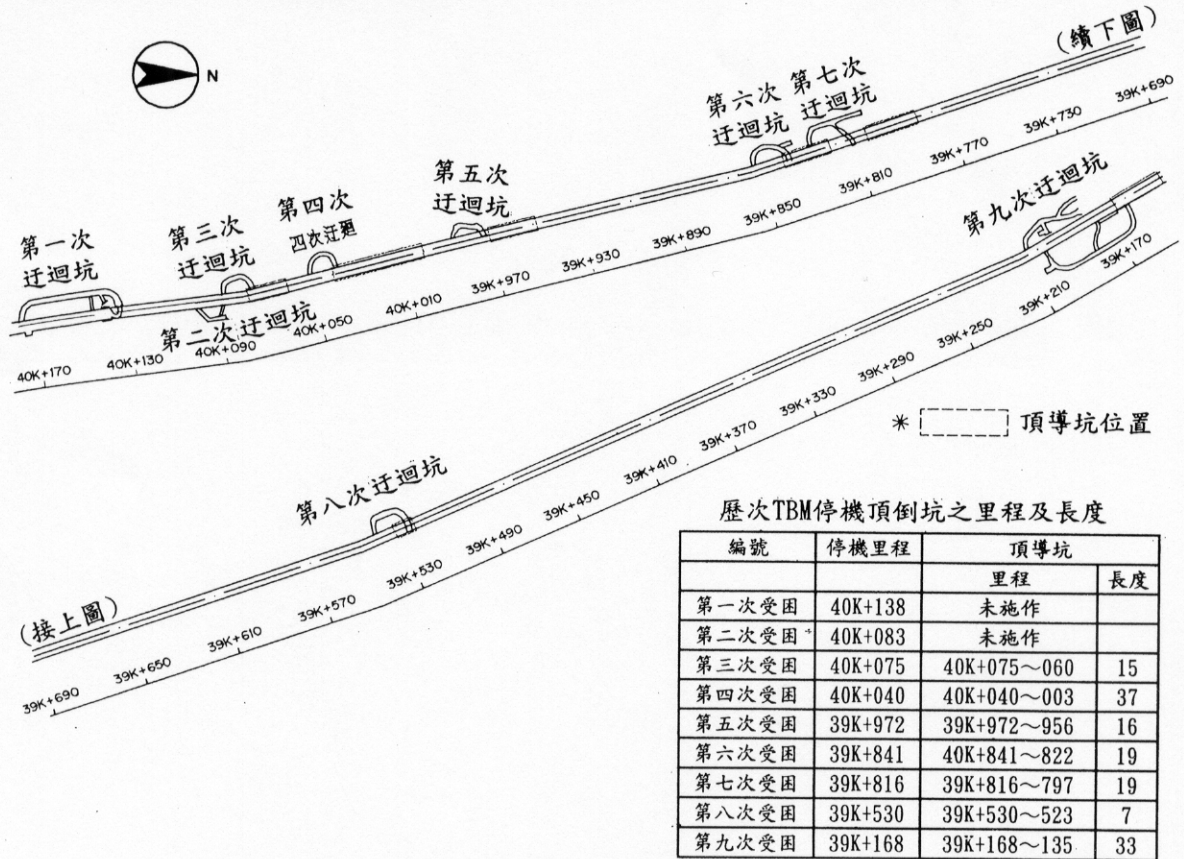
工經驗之機會，導坑乃決定採用TBM施工，唯為兼顧導坑原有地質調查之功能，導坑TBM開挖後之支撐工，乃分別採用預鑄混凝土環片及新奧工法(NATM)支撐兩種。圖三為導坑TBM剖面圖，該TBM係由美國Robbins公司製造，為雙盾身(Double Shield)之型式，直徑4.82m，主機長10.8m，若含支援系統全長達188m，削刀頭轉動採用電動式馬達，總重量(含機身及支援系統)約720T。此外為配合TBM開挖時能事先進行機頭前方之鑽孔探查(Probe Drilling)，於TBM尾盾附近之環座上裝設有兩部鑽機(該鑽機可於環座上移動)，以進行相關之取心及不取心鑽探，並可做為採用NATM之支撐型式時鑽設岩栓之用。



圖三 坪林隧道導坑TBM剖面圖

另主坑之TBM則係由德國Wirth公司製造，亦為雙盾身之型式，直徑11.74m，主機長11m，若含支援系統全長為248m，削刀頭轉動採用油壓式馬達，總重量(含機身及支援系統)約2500t。此

外於尾盾附近之固定座上裝設有鑽機乙部，可進行相關之取心或不取心之鑽探工作，該鑽機亦可裝設於可旋轉之環片組裝機上，以使鑽探工作更具有彈性。



圖四 坪林隧道導坑TBM歷次受困及停機處理位置示意圖

三、TBM施破碎與湧水帶之施工

一般雙盾身TBM之開挖方式有兩種(參考圖三)，當岩盤之強度足以使TBM尾盾之撐腳推出頂住岩盤，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，此時尾盾於開挖時，並未隨前盾向前移動，故於開挖之同

時，可於尾盾內進行環片組裝之工作(主坑尾盾盾殼內徑為11.56m，環片外徑為11.50m，導坑尾盾盾殼內徑為4.67m，環片外徑為4.62m)。當岩盤之強度較差，使撐腳頂住岩盤，不足以提供足夠之摩擦力使前盾推進時，此時必須藉由尾盾之輔助推進唧筒向後推頂已組立之

環片，以提供開挖前進所需之推力，因此時尾盾係隨前盾開挖前進，故開挖時並不能同時進行環片之組裝工作。

坪林隧道導坑自民國八十年七月開工後，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522m。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，開始TBM之開挖工作。迄八十五年四月止，共計以TBM開挖1080m。主坑方面，於八十二年七月開始進行鑽炸法開挖，利用TBM設計、製造、運輸、組裝期間，至八十五年四月止，以鑽炸法開挖約850m，隨後將進行TBM之推進與開挖工作。

導坑TBM迄今，遭遇相當多之困難，致施工進度一直不甚理想，至八十四年年底止，前後有九次因削刀頭前方之岩盤坍方，致削刀頭無法轉動而受困或因地下水水量過大而需停機處理。圖四為導坑自里程40k+158m開始以TBM開挖後，至39k+168m共計990m之開挖中，歷次受困停機之位置。在歷次受困中，皆以開挖迂迴坑(Bypass Adit)之方式由尾盾附近經導坑旁邊繞過TBM主機，而至TBM機頭前方處理坍落之岩盤，使TBM能恢復開挖。由於TBM受困時，機頭位置之地質情況皆甚為破碎，故TBM恢復運轉後，通常再以頂導坑開挖之方式，於TBM機頭前方以鑽炸法將地質情況較差之岩盤直接挖除，以利後續TBM之施工。圖四亦標示前述頂導坑開挖之位置及長

度。

在導坑TBM歷次受困中，其地質情況大致可分為兩類，一為破碎岩盤，一為湧水帶，以下針對坪林隧道導坑TBM於此兩類地盤之施工及受困後之處理做一說明：

1. TBM受困原因及因應對策之探討

TBM開挖之原理係利用削刀頭之轉動而藉由削刀頭上之削刀將岩盤破碎後，向前推進，因此理論上若削刀頭維持可轉動之狀態，則TBM應可持續向前開挖。實際上，TBM在削刀頭正在轉動而進行開挖之過程中，並未直接發生過削刀頭因坍落岩盤之掩埋而無法轉動之情形。在歷次的受困案例中，TBM皆是因某些『障礙』而必須暫時停止開挖動作，以便排除此等障礙，此時機頭前方之地質情況通常皆極為惡劣，故於此等停機排除障礙之期間內(可能是數拾分鐘或數小時)，削刀頭周圍之岩盤持續大量坍落而掩埋削刀頭，故待障礙排除後已無力重新啓動削刀頭。前述之障礙大致可分為以下幾類：

- (1) 當TBM機頭前方岩盤較為破碎時，開挖後之碴料常大量突然湧入削刀頭內及碴料輸送帶上，甚至掩埋最前端之輸送帶(即位於削刀頭內之區段，如圖三A之位置)，使輸送帶超過負荷而無法運轉。根據TBM開挖時控制程式之設定，當輸送帶停止運轉時，削刀頭亦必須停止轉動，否

則在輸送帶無法出碴而削刀頭繼續開挖的情形下，將使碴料掩埋整個TBM的內部。此時便需以人工方式進入前盾，甚至削刀頭內清除輸送帶上過積之碴料，以恢復輸送帶之運轉，進而恢復機頭之轉動。由於空間之限制，前盾及削刀頭內之清碴工作非常的困難及耗時，無形中提高了機頭於此等停機處理時間內遭掩埋的風險。

- (2) 伸縮盾因碴料堆積過多(如圖三B之位置)，使尾盾無法順利回收，同時若湧入之地下水量過大量時，因碴料之阻礙，使地下水來不及渲洩，而淹沒位於伸縮盾之削刀頭驅動馬達，而導致無法進行開挖工作，此時亦必須以人工方式進入伸縮盾清除堆積之碴料，方可進行後續之工作。
- (3) 為利於環片之組裝，TBM尾盾盾殼於仰拱及側壁之位置有局部之開口，若岩盤較為破碎，則當尾盾回收時，側壁之岩盤出露後便極易崩落於仰拱處(如圖三C之位置)而無法進行環片之組裝工作。故此時亦必須先將該處之碴料先予清除後，方可進行後續之工作。
- (4) 當岩盤較為破碎時，開挖後之出碴量常會超過設計理論之出碴量，有時甚至會超過一倍以上，此時備用碴車事先的調度便非常重要。不過若因地質狀況無法正確掌握，致使

開挖過程中，因出碴量遠超過預期者而又無備用碴車時，便必須暫停開挖而等待空碴車的到達。

- (5) 在較差的地質情況下施工，機具、設備故障的機率無形中也相對提高，而某些故障(如碴料輸送帶，開挖控制程式，推進唧筒的油壓系統等)是與開挖動作相關聯的，因此也必須等此等故障排除後，方可進行後續之工作。

根據導坑TBM的施工經驗，前述導致TBM受困的因素可能會同時發生，尤其是(1)、(2)、(3)發生的機率最高。

針對前述導坑TBM施工受困之因應對策，主要可分為幾個方面著手：

- (1) 減少TBM削刀頭轉動時之阻力，如減小削刀頭於前盾盾殼內突出之尺寸，減小削刀頭周緣進碴口突出之尺寸等。
- (2) 控制進碴數量，如進碴口裝設可關閉之自動柵門，控制碴料進入輸送帶之速率等。
- (3) 增加削刀頭轉動之扭力及輸送帶之馬力。
- (4) 於前盾及伸縮盾裝設抽水馬達，以及時抽除湧入之地下水。

目前主坑及導坑之TBM已根據前述之因應對策做了必要的修改與調整，以使爾後TBM之施工，更能適應目前實際之地質情況。

…未完待續…