

北宜高速公路工程

雪山隧道特殊地質施工案例探討

交通部台灣區國道新建工程局第三區工程處

處長：張文城博士

中華民國九十三年九月

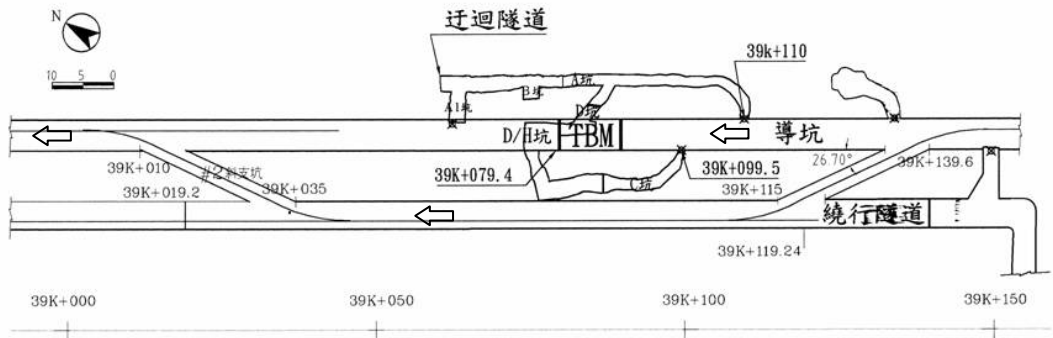
參、導坑 TBM 第十次受困處理案例

一、案由:

導坑 TBM 於里程 39K+079 處遭遇到第十次受困後，以鑽炸法施做長 223m，開挖面積約 20m²(4.5 x 4.5m)之繞行隧道，繞過 TBM 繼續向前開挖。鑽炸法施工過程中仍多次遭遇高壓湧水(約 18kg/cm²)，須耗時對地質弱帶及大湧水進行處理。

二、地質狀況:

位於上新斷層與巴陵斷層間，形成許多頗具規模的含泥層剪裂帶，節理發達密集，經常有三組或四組出現，節理張開常含剪裂泥。



圖二、迂迴隧道示意圖



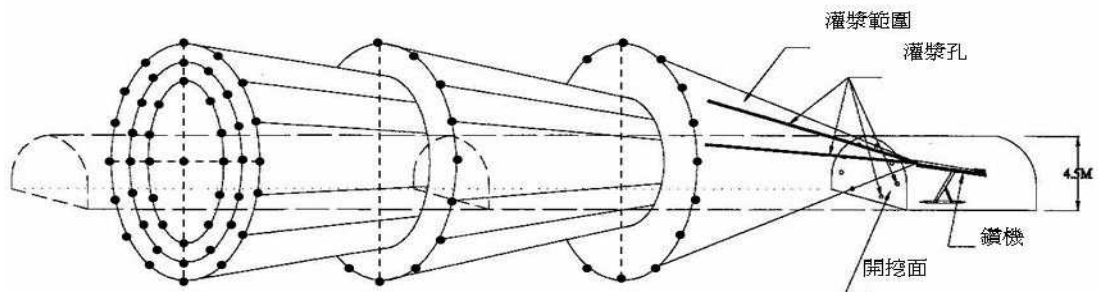
照片一、導坑里程 38K+935 湧水抽坍



照片二、導坑第十次受困 A 坑出水

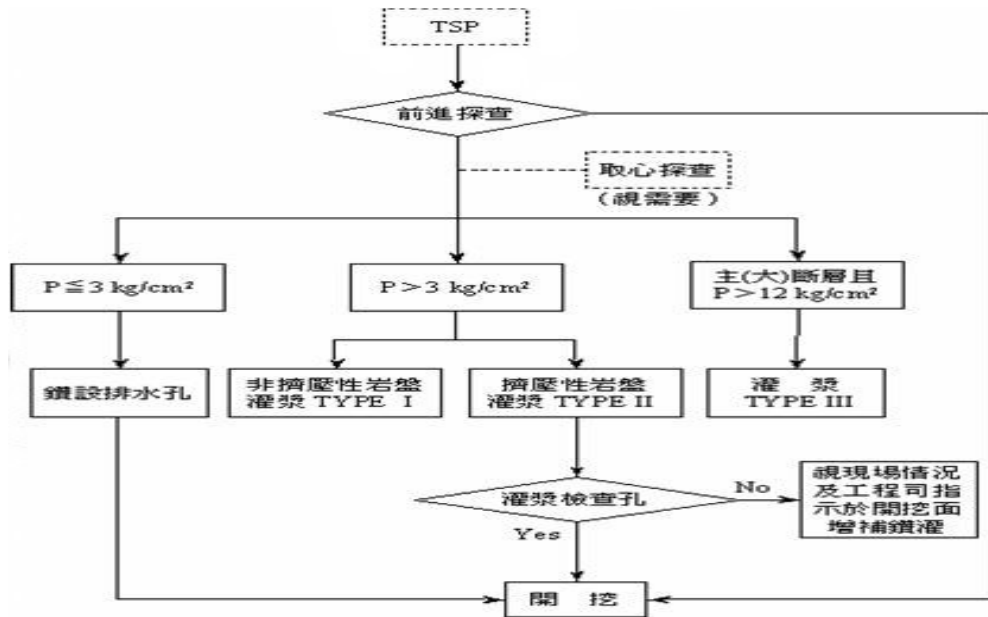
三、處理方案

1. 因地下水豐沛，採「遠排近灌」。
2. 灌漿前施鑽 3~6 孔 NX 排水孔，長度 35~40m。
3. 灌漿採三環配置的錐體灌漿，外環止水漿材；內環固結漿材，壓力不超過三倍地下水壓且不大於 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

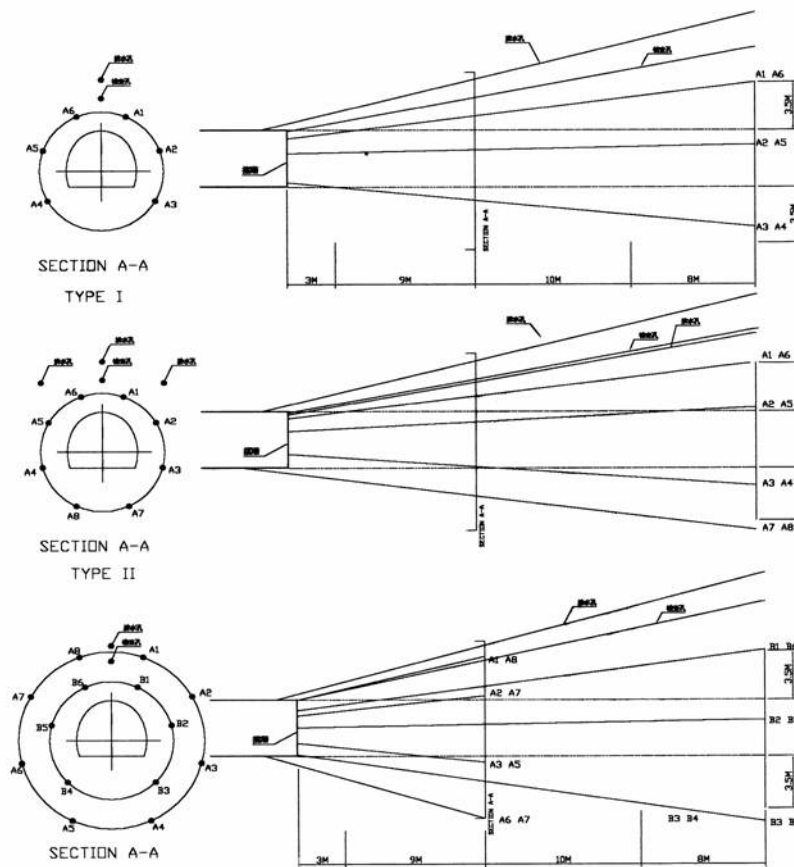


圖三、三環錐體灌漿示意圖

4. 處理方案判釋機制(圖四)



5. 灌漿斷面型式(圖五)



四、探討

1. 地層剪裂破碎，則地下水蘊藏豐沛，對隧道開挖極端不利。
2. 地質前進探查為必要的例行作業，並應有高效能的鑽灌設備。
3. 擬訂地質處理判釋機制，執行過程中視成效修正。
4. 固結止水灌漿與排水降壓可合併使用，以增加處理時效。
5. 本案 TBM 之脫困處理達 7.3 月，而繞行隧道 223m 之處理及開挖達 21 個月之久，相當耗時。

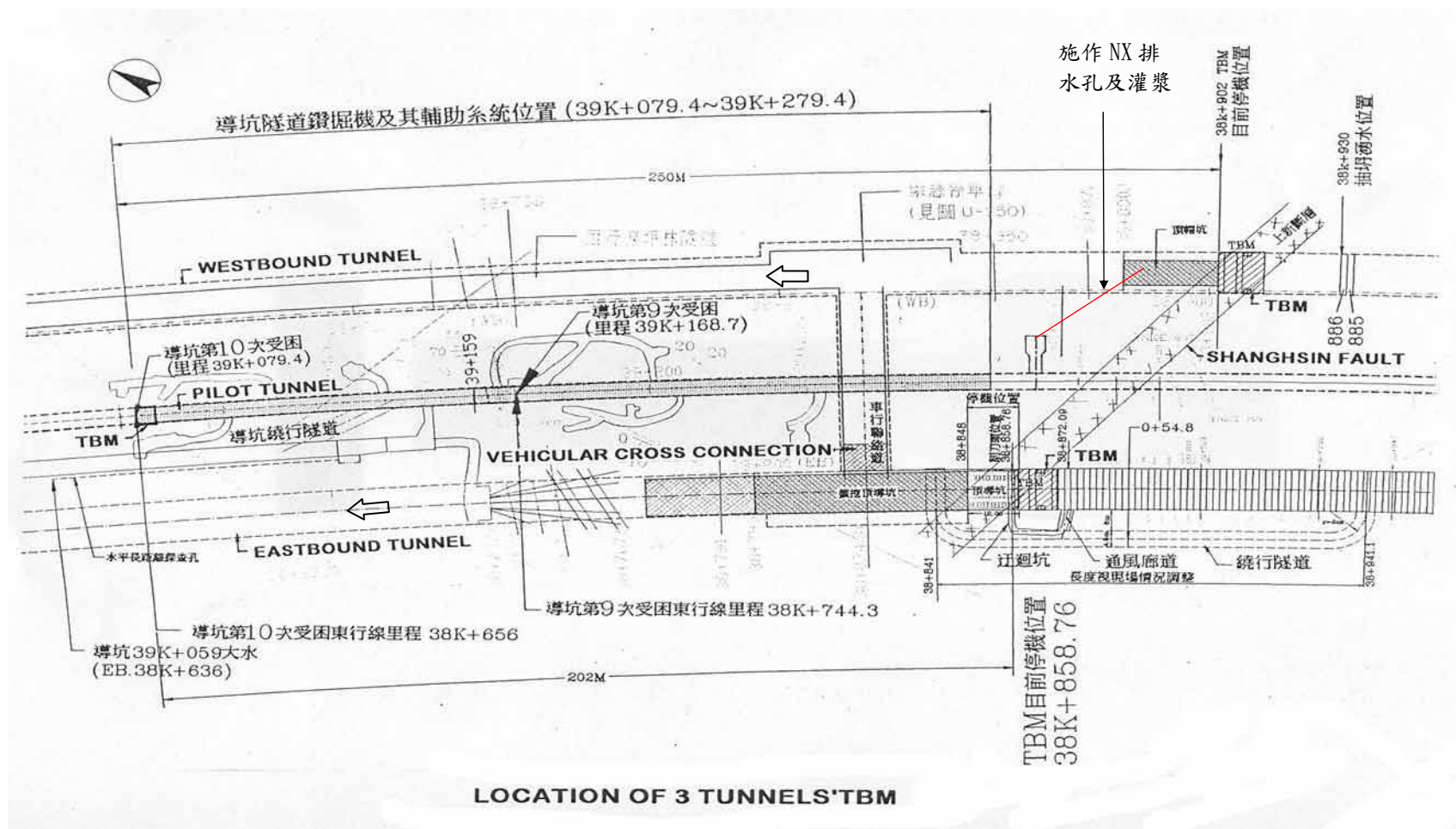
肆、主坑西行線 TBM 災變處理

一、案由

1. 西行線 TBM 鑽掘至上新斷層前，因地質弱帶及湧水停機處理。
2. 地質灌漿處理及頂導坑保護後，再恢復 TBM 鑽掘 24m，於 86.12.15 因頂拱大量高壓地下湧水而抽坍，將 TBM 及支援系統掩埋。



照片三、大量抽坍矧料湧入 TBM



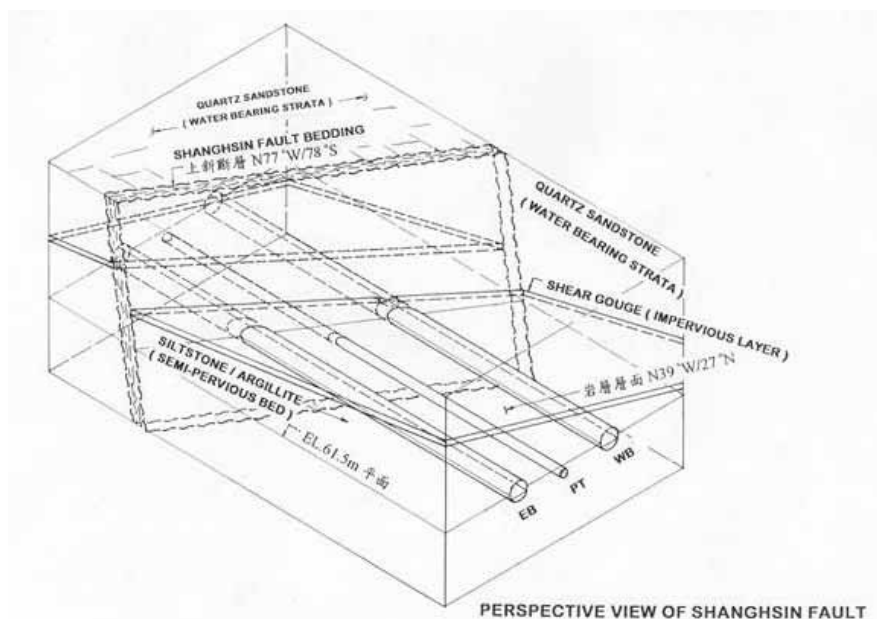
圖六、西行線災變前主、導坑施工關係圖

二、災變前之地質探查及處理

1. 由導坑之工作坑向西行線施作約 35m 取心探查及灌漿處理。
2. 由導坑向西行線施作約 40m 之 NX 排水孔。
3. 由西行線 TBM 後方頂拱往前開挖工作坑至機頭前方施作頂帽坑，將地質弱帶挖除(約 6m)，並作 20m 取心探查確認後再恢復 TBM 開挖。

三、地質狀況

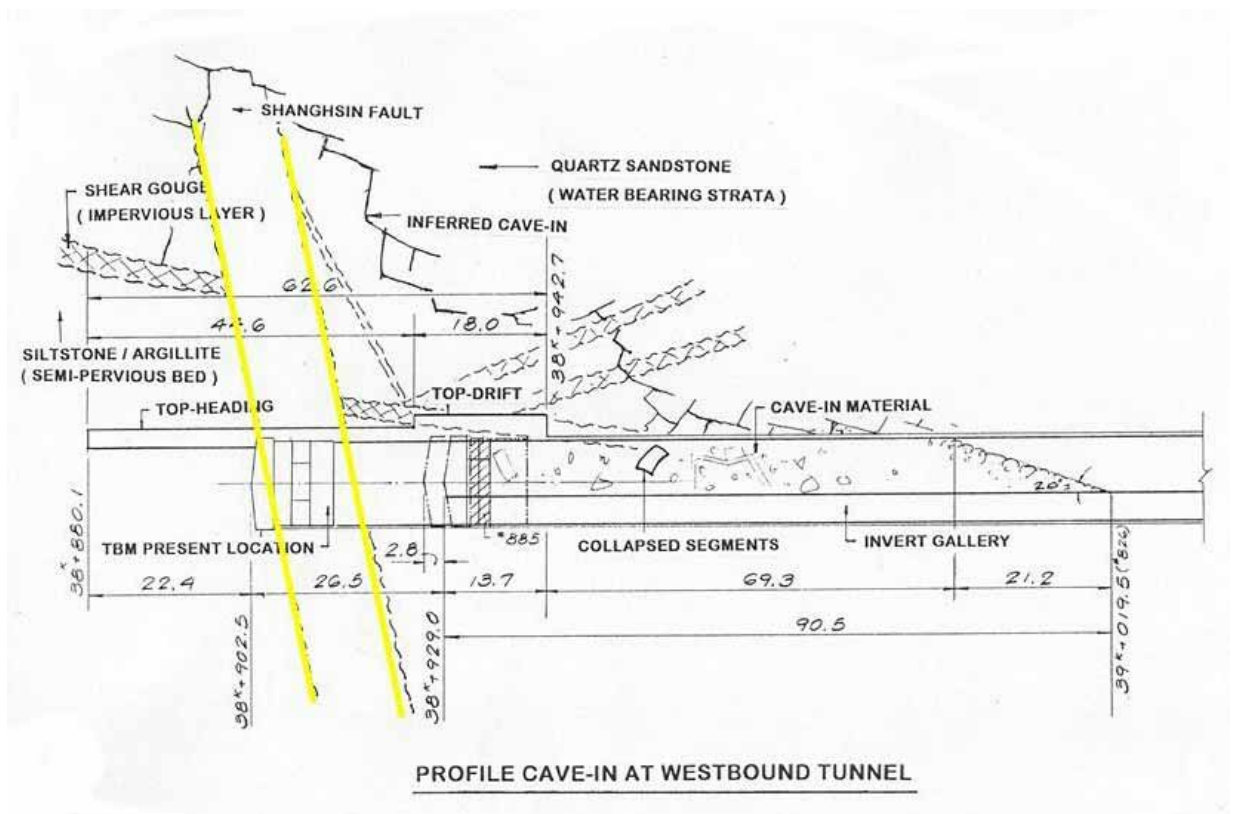
1. 地層：四稜砂岩層，層理位態平緩與隧道航道呈小角度相交。
2. 岩性：粗粒石英砂岩為主，間夾細砂岩、粉砂岩/硬頁岩等薄岩層，受上新斷層剪動錯移，岩盤破碎。
3. 地質構造：
 - 上新斷層為正斷層，其破碎帶寬約 15m，節理有 3 組。
 - 岩層產生平行褶皺之剪裂泥層，為一不透水層。
 - 頭城端之上盤向下滑移，坪林端之下盤相對衝上，落差位移約 8m。
4. 地下水：豐沛之地下水蘊藏於下盤上方之粗粒石英砂岩層及裂隙。



圖七、上新斷層地質模型

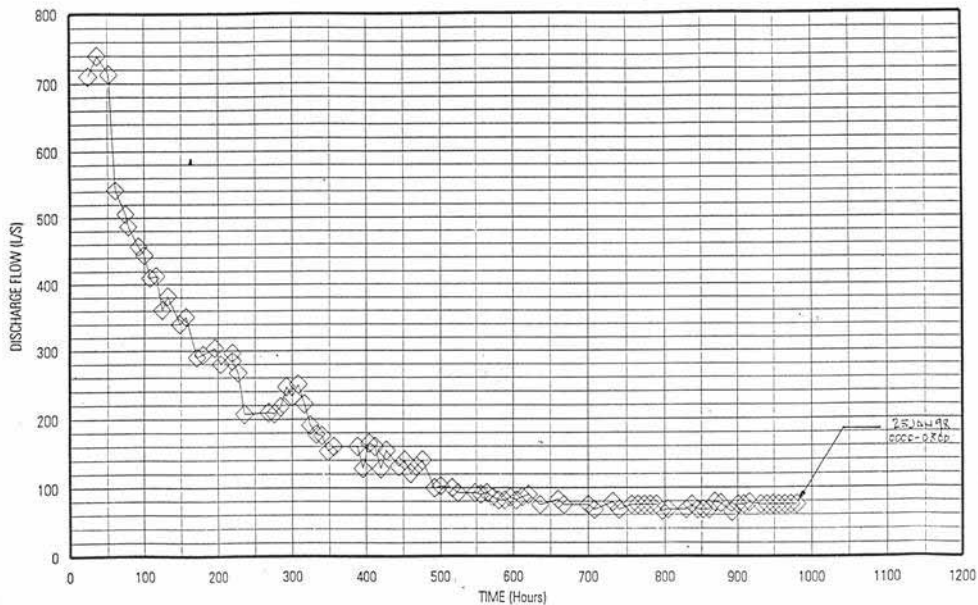
四、災變經過

1. 86.12.14 TBM 恢復掘進僅 23.7m，撐座盾及後方湧水 68 l/s，環片出現裂紋，TBM 停止鑽掘，準備組立鋼支保保護環片。
2. 86.12.15 凌晨位於工作坑下方之環片裂紋加大，向山側擠壓。8:00 AM 湧水量增大約 185 l/s，鋼支保來不及安裝，環片已大量變形。
3. 86.12.15，2:45 PM 龜裂之環片先掉落，水量增加約 300 l/s，並夾帶剪磨泥、岩塊湧入隧道，環片連鎖掉落。
4. 86.12.15，10:00 PM 水量增加約 500 l/s，土石碴料沖入約 80m 長，TBM 及支援系統被淹沒，抽坍量約 7,000m³。
5. 86.12.16，10:00AM 湧水量約 750 l/s，土石抽坍已漸趨穩定。



圖八、西行線抽坍災變剖面示意圖

圖一：流量歷時線圖



圖九、西行線災變湧水歷時曲線圖

五、緊急應變處理

1. 西行線

- 災區後方之環片以鋼支保、岩栓及噴凝土補強保護。
- 車道版以型鋼加撐，灌漿固結環片周圍岩盤。
- 檢視環片變形及量測湧水量之變化。

2. 東行線

- 災區相應區段滲水加大，頂拱環片有下陷現象；以鋼支保補強保護，並鑽排水孔。
- 檢視環片變形及湧水變化。

3. 導坑

- 災區相應區段滲水加大，環片銜接處出現裂縫，以鋼支保及噴凝土補強，施鑽排水孔解壓。
- 檢視環片變形及湧水變化。

六、後續處理措施

TBM 製造商西德 WIRTH 公司派員實地評估後，提出修復費用 14.2 億元，需時 38 月，經諮詢顧問團建議後續工程改採鑽炸法施工，據此研擬後續處理方案：

1. 繞行隧道開挖，L=79m。

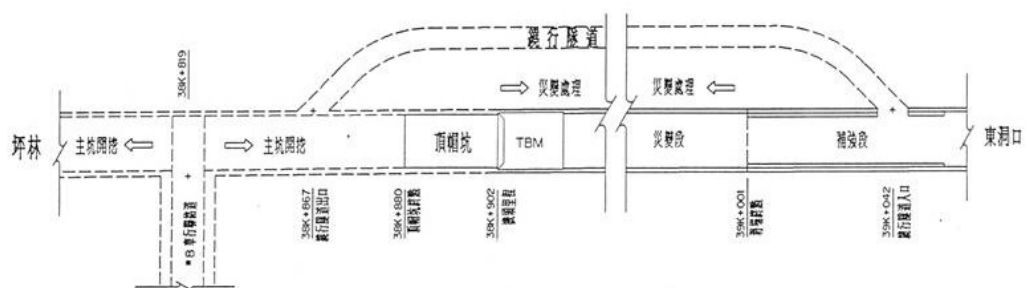
- (1) 便於對抽坍區之回填灌漿作業。
- (2) 繞過災區作為後續鑽炸法開挖之運輸通道。

2. 災變段復舊處理

- (1) 掉落之 A 型環片打除清理，降挖上半頂坑，B、C 型環片視情況作假支撐，頂坑完成 4.5~6.0m 再挖下半斷面。
- (2) 下半斷面分側開挖，將 B 或 C 型環片清除，再擴挖至設計線，接續支撐工(t=35cm)。
- (3) 清理管線廊道之崩坍料，吊裝車道蓋版環片。
- (4) TBM 拆解，可用機件回收利用。

3. 8 號車行聯絡道作為施工通道

- (1) 由東行線經 8 號車行聯絡道開挖至西行線。
- (2) 便於協助 TBM 機頭前方抽坍區之處理。
- (3) 以續西行線鑽炸法往坪林方向開挖。



A. 災變段後方環片補強:

- A.1 環片 ABC 塊補強
- A.2 拱型蓋板支撐
- A.3 固結灌漿

B. 繞行隧道開挖:

- B.1 繞行隧道開挖
- B.2 災變段回填灌漿

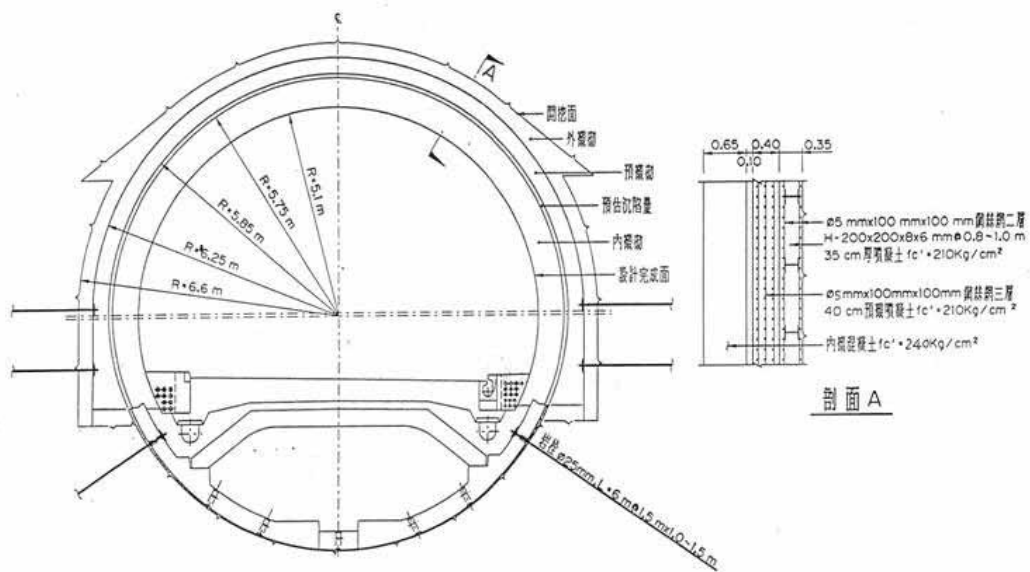
C. 主坑鑽炸開挖:

- C.1 聯絡道上半開挖
- C.2 主坑開挖-坪林方向
- C.3 主坑開挖-東口方向

D. 災變段處理:

- D.1 由 BU 向機頭正面處理
- D.2 由頂帽坑向東口處理

圖十、西行線災變處理大要圖



圖十一、西行線災變段復舊之最終支撐圖



照片四、繞行隧道施工



照片五、自機頭前方進行 TBM 清理作業



照片六、西行線 TBM 拆除作業

七、探討

1. 大型 TBM 於地質破碎地下水豐沛之地層施工，風險大。
2. 對四稜砂岩地層雖有高能力的鑽灌設備，仍不能發揮效果。
3. 工程師對於地質及地下水的研判，關係到後續的處理方案。
4. 保護措施宜採取較為保守的方式，以增加安全性。
5. 本案處理 7 個月後，即改採鑽炸法往坪林方向開挖，比當年國外廠商提出之處理方案省時及經濟。

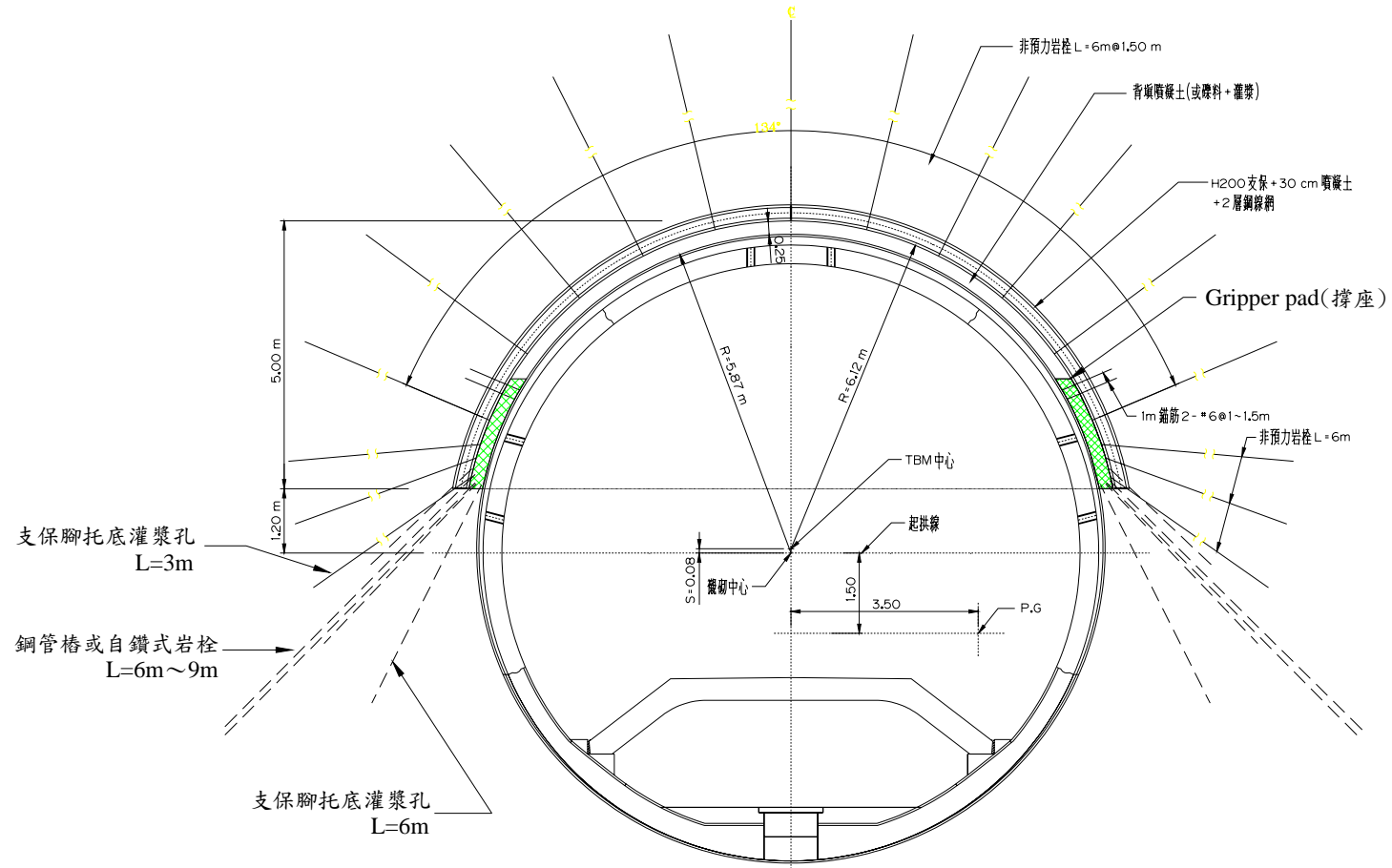
伍、主坑東行線 TBM 段混合工法

一、案由：

1. 依據原設計理念，主要地質弱帶區段必需先進行處理，TBM 才能安全順利通過。
2. 主隧道 TBM 段地盤處理方法包含灌漿處理、鑽設排水孔、斷層泥挖掘及改採鑽炸法施工等。
3. 因導坑施工進度嚴重落後，改由導坑進行主坑地質弱帶之處理，原意窒礙難行，再加上導坑 TBM 多次受困、大 TBM 大量超挖、西行線大 TBM 災變被埋及四稜砂岩久鑽不進、灌漿困難等因素，致 TBM 施工問題重重。

二、施工程序

1. 鑽炸法開挖上半斷面及施作支撐工。
2. 依實際滲水情況，視需要施作排水孔及灌漿。
3. 必要時施作支保腳托底灌漿、鋼管樁灌漿或仰拱閉合。
4. 施作 TBM 混凝土撐座。
5. TBM 開挖下半斷面及組裝預鑄環片。



圖十二、主坑東行線 TBM 段混合工法施工斷面圖



照片七、東行線 TBM 混凝土撐座



照片八、自 14 號人行聯絡道增闢東行線頂導坑開挖作業

三、探討

1. 施作頂導坑區段，TBM 均能安全、迅速、順利通過，本工法適合大 TBM 於破碎岩盤施工。
2. 初期因預留較大變形量，以便 TBM 能順利通過，但為使 TBM 通過後之大量背填作業耗時甚多，影響工進至鉅，後來減少預留變形量，則情況改善很多。
3. 為了縮短工期，初期之頂導坑斷面較矮小，但須施打支保腳托底鋼管樁及灌漿。後經檢討安全性，而將上半斷面加高下降，惟鋼管樁取消，均安然通過。
4. 就經濟性而言，本工法 TBM 並未發揮百分百的效能，時間上重疊浪費。但就安全性觀點，本工法是在破碎性的岩盤適合大 TBM 開挖的保險工法，也是台灣首創的工法。



照片九、TBM 背填噴凝土作業

陸、一號豎井昇井工法及地質弱帶灌漿處理

一、案由

1. 進氣井深度 480m，排氣井深度 500m，內徑 6m，開挖直徑 7.2m，兩井相距 50m。
2. 本豎井如採用傳統鑽炸沉挖法(Sinking Method)開挖，則 22,000m³之碴料需經由大湖尾村私設之 3.5km 山區產業道路運出，當地居民反對。
3. 導坑已通過井底位置，井底機房上半斷面也已開挖完成，符合昇井工法(Raise Boring Method)的施工條件，於是決定採用昇井工法施工。

二、將面臨的問題

1. 豎井位於鶯仔瀨向斜軸部的南翼褶綳的地層，岩盤為砂頁岩互層及厚層砂岩偶夾薄頁岩，有一道 100m 之剪裂帶通過兩豎井，如何克服此地層弱帶。
2. 400m 外之舊址鑽孔時，高壓地下水曾噴出地面 10m，本豎井如同樣有高壓地下水層存在，施工如何克服。
3. 井深達 500m，如何控制導孔(Pilot Hole)的精準度不超出開挖範圍外，一般精度為 1%，亦即有 5m 的偏差。
4. 擴孔 2.4m 直徑之岩壁完全無支撐保護，而須自立一年以上並承受降挖時的碴料撞擊，究竟會崩坍成怎樣的情況。
5. 台灣沒有如此大口徑及深度的施工經驗，如何擁有完善的鑽孔、灌漿及提吊設備，是一大考驗。
6. 豎井開挖是超高空作業，如何增進作業人員的安全感並使開挖工作維持一定的速度，順利完成此一高技術性的工作，是國內工程師的一大挑戰。

三、地質弱帶灌漿處理

1. 表層 20m(覆蓋層)採一般水泥砂漿固結灌漿處理，以保護管環及承載提吊設備。

2. 地表 20m 以下之深層灌漿旨在止水兼具強化地質弱帶，以維開挖自立性，所以引進烏克蘭 S.T.G.公司之深孔皂土水泥灌漿法。
3. 由地面分階佈設三孔，位置視前一灌漿孔的偏位及吃漿情形調整。施鑽灌漿孔因偏位太大，曾經由大陸引進陀螺儀校正。排氣井三灌漿孔的深度均約為 390m，吃漿量分別為 3,835m³、2,823m³、3,775m³。第 4 孔係利用昇井工法之導孔施灌，深度 475m，吃漿量 1,738m³。另進氣井三個灌漿孔的深度均約為 460m，吃漿量分別為 4,786m³、3,379m³、2,535m³，第 4 孔原擬用昇井工法之導孔施灌，惟當施作導孔時，發現灌漿效果已達要求，故未再施灌。
4. 擴孔完成後於孔底驗證止水灌漿效果，結果測量之滲水量僅 0.81 l/s (進氣井)及 0.27 l/s (排氣井)，效果相當良好。

四、昇井工法(Raise Boring Method)施工

1. 施鑽直徑 31cm 之導孔(Pilot Hole)，由奧地利舊鑽機及技師操作，進、排氣井分別耗時 22 天及 56 天，配合精密之導航儀器，偏差量僅 0.72m(0.14%)及 0.14m(0.03%)，作業相當有效率而快速，精度非常高。
2. 隨後運入擴孔 2.44m 直徑之鑽頭(Reaming head)，裝上鑽孔之鑽串，由下往上旋轉鑽掘，碴料落入井底由隧道運出，過程非常順利，沒有發生夾鑽或大崩孔的情形，而且施工非常快速，進、排氣井分別僅耗時 13 天及 17 天。

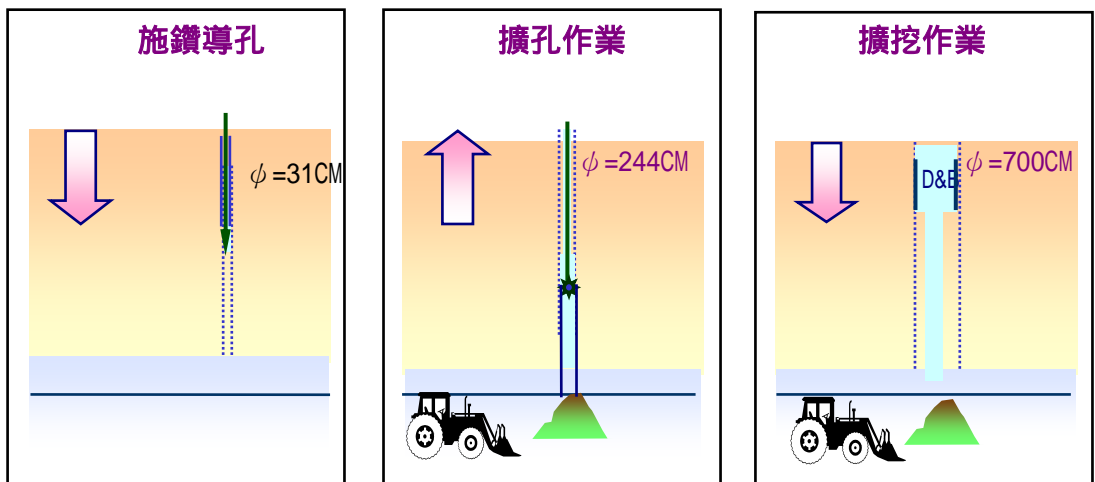
五、鑽炸沉挖工法

1. 鑽孔裝藥開炸後，將碴料堆進擴孔落入井底，再由隧道運出。
2. 逐輪施作噴凝土、掛網、安裝鋼支保及施打岩栓等支撐工，循序重複作業。
3. 由於組裝豎井提吊設備及工安事件，擴孔完成約 9 個月之後才開始降挖作業，於剪裂破碎帶之擴孔段，開挖壁面因長久無支撐狀態之自然風化與解壓，及頂部落碴撞擊的影響，呈不規則崩塌，超出開挖線達 3m 之鉅，施工支撐非常困難而危險，工作人員冒著生命的危險，快速應變支撐，安然通過。

4. 降挖工作熟練以後，最佳進度曾達每月 93m 之罕見紀錄。

六、探討

1. 此工法在本工地應用可謂非常成功，可作為台灣此後豎井施工的經驗傳承。
2. 皂土水泥灌漿因深孔方向控制不易，灌漿範圍及效果較難掌控，所以剪裂破碎段的固結強化效果有限，擴孔後有塌孔的情形，惟止水效果甚為良好。
3. 昇井工法由國外廠商施工，其設備相當老舊，但操作手有經驗而動作熟練，所以施工順利而快速，國內包商有必要引進生根。
4. 擴孔完成後應儘快進行降挖作業，以免開挖壁面暴露時間太長，造成嚴重的崩塌。如能研發遙控噴凝土設備，將開挖壁面封面，則對安全有很大的保障。
5. 複雜的豎井提吊及鑽挖設備概由國內廠家自行組裝，所以故障率較高，作業效率亦較差。如能有完善新穎的機具設備，並加強維修，則降挖的效果會更佳。



圖十三、 昇井工法施工程序示意圖



照片十、昇井工法鑽機導孔導向鑽孔系統



照片十一、昇井工法鑽機自動接管裝置



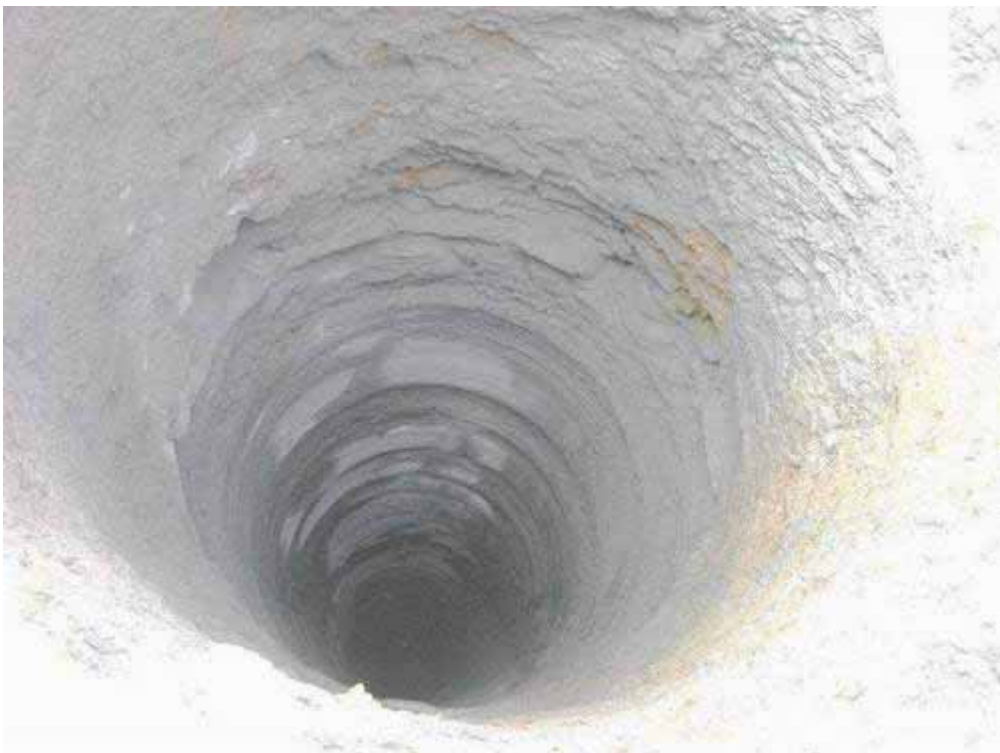
照片十二、昇井工法導孔貫通



照片十三、昇井工法擴孔鑽頭



照片十四、昇井工法向上擴孔達頂



照片十五、昇井工法向上擴孔完成