

坪林隧道困難地質處理施工案例探討

曾大仁

國道新建工程局第三區工程處 副處長

一、 前言

坪林隧道全長 12.9 公里，不僅是國道北宜高速公路上最長的隧道，更將成為亞洲地區最長的公路隧道。坪林隧道穿越雪山山脈，全線採用雙向雙孔分離車道設計，隧道整體由二條主線隧道及一條導坑組成，主線隧道直徑 11.8 公尺，導坑直徑 4.8 公尺，標準斷面如圖一所示，每條主線隧道設置單向二車道，合計共有四車道。

由於坪林隧道為穿越雪山山脈的長隧道，其上方最大岩覆厚度超過 700 公尺，在規劃設計之初即已瞭解，隧道沿線地質變化無法以地表地質調查，及有限的鑽孔資料完全掌握。因此於主線隧道施工前，先行開挖一條與主線隧道平行，惟直徑較小的導坑，探查隧道全線地質，且針對特殊惡劣地質區段，進行必要的地盤處理；同時可利用導坑排水以降低地下水壓，協助主線隧道順利開挖。坪林隧道完工後，導坑留作服務隧道，於緊急狀況時供救援車輛行駛，平時做為維修通路。由於坪林隧道西洞口及隧道西段約四分之三的長度，位於台北水源水質保護區內；因此在原定施工構想中，即計劃採用全斷面隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)由東向西開挖大部分的長度，同時將開挖所產生碴料，經隧道運至東洞口外的頭城交流道，供路工回填使用，以減少對環境的衝擊。導坑於民國八十年七月開工，主坑於民國八十二年七月開工，二者皆先以鑽炸法於隧道東段開挖約一公里長度，待 TBM 完成工地組裝，即以 TBM 由東向西開挖。

導坑在鑽炸法完成 600 餘公尺後，於民國八十一年十二月，開始使用 TBM。至民國八十五年二月為止，導坑以 TBM 完成約 1000 公尺的開挖，但先後十次受困，以致平均開挖速率低落，未能發揮高速開挖的優點。這十次受困中前四次發生在乾溝層，後六次發生在四稜砂岩地層。各次受困所遭遇的地質狀況不盡相同，包括有破碎岩盤、剪磨泥、斷層泥、斷層角礫、高壓地下水層等惡劣地質狀況。其中最後二次受困，均為遭遇突發高壓湧水及其隨伴而生的土石流所致，機頭脫困處理所耗時間越來越長。有鑑於機械開挖已無法符合計畫進度的需求，乃

於第十次受困後施做繞行隧道，繞過被夾埋的 TBM 機頭，改採鑽炸法的方式繼續向前開挖，以圖順利通過四稜砂岩中最惡劣的地質區段[1]。在這段鑽炸開挖施工過程中，經由直接檢視開挖面岩盤變化，充分的掌握多變的四稜砂岩地層，進而針對現地地質特性，發展出較為成熟的地盤改良的技術。導坑東口的開挖作業為目前坪林隧道工程施工的關鍵工程，且其所遭遇之地質風險最高，地盤改良作業也最困難，本文將就此經驗深入探討，以供工程界日後類似案例參考。

二、 坪林隧道沿線岩層地質概況

坪林隧道位於雪山山脈亞區之輕度變質沉積岩地層，地層受到板塊衝擊所產生的褶皺及斷層的影響，隧道沿線地質變化相當複雜。隧道穿越雪山山脈最大岩覆超過 700 公尺以上，隧道沿線地質剖面如圖二。地層的分佈以年代而言，由西口的第三紀中新世，向東口方向漸變為較古老的第三紀始新世，分別為枋腳層、媽岡層、大桶山層、乾溝層及四稜砂岩；各岩層具代表性的岩石性質及土工參數綜合如表一[2]。

表一、坪林隧道沿線地層表代性岩性及土工參數(資料來源：[2])

地層	岩性	單位重 (t/m ³)	含水量 (%)	比重	孔隙率	單壓強度 (kg/cm ²)	總硬度	石英含量 (%)
四稜砂岩	石英岩	2.62	0.3	2.64	0.01	1670	133	82
四稜砂岩	石英砂岩	2.67	0.5	2.68	0.02	1480	133	71
四稜砂岩	紋層狀砂岩	2.68	0.6	2.71	0.01	650	31	82
四稜砂岩	粉砂岩	2.69	1.6	2.73	0.04	340	--	42
四稜砂岩	碳質頁岩	2.38	4.0	2.52	0.10	120	--	--
乾溝層	粉砂岩	2.70	1.4	2.74	0.03	309	23	--
大桶山層	粉砂岩	2.68	1.2	2.72	0.03	210	19	28
媽岡層	紋層狀砂岩	2.68	1.3	2.70	0.03	750	--	40

隧道東段約有四分之一的長度屬四稜砂岩及乾溝層地層，主要為硬頁岩及輕度變質的石英砂岩所組成。由於此段硬頁岩及石英砂岩地層，斷層出現頻繁，岩盤高度破碎，岩體品質多為差至極差。隧道沿線其餘四分之三長度，岩性主為砂岩、頁岩及砂頁岩互層；除靠近石 斷層及褶皺軸部的少數區段外，岩體品質普遍較佳。前述各地層岩性及岩體品質，以由西向東的順序分別略述如後：

1. 大桶山層：大桶山層主要由暗灰色緻密硬頁岩和顏色相近的灰色細粒砂岩及泥質粉砂岩之互層所組成。岩盤大致良好，主要分佈於隧道西口及中段之一

處背斜構造區段。

2. 媽岡層：媽岡層主要由深灰色頁岩夾有灰色細粒砂岩的薄互層所組成。此地層出現於石 斷層以西，隧道之西半段，岩盤品質良好。
3. 枋腳層：枋腳層位於媽岡層之上，主為中至細粒之厚層砂岩，間夾深灰色頁岩。此地層出現於隧道之西半段，岩盤品質大致良好。
4. 粗窟砂岩：粗窟砂岩層主由灰色、細粒砂岩組成。位為大桶山層之下，整合覆蓋於乾溝層之上，出現於導坑設計里程 35k+100 至 35k+500 之間，岩盤品質尚可。
5. 乾溝層：乾溝層主由輕度變質的硬頁岩或深灰色粉砂岩組成。坪林隧道東段出現之乾溝層為金盈斷層及上新斷層所切割，岩層中遍佈剪裂帶，岩體極為破碎，品質極差。地下水通常受阻於剪裂帶，以孤立的水包型式出現。
6. 四稜砂岩：此地層由灰色至白色(偶夾深灰色)、細至中粒輕度變質之石英砂岩及硬頁岩組成(偶夾碳質頁岩)。石英砂岩以層狀出現，其中夾層(硬頁岩或碳質頁岩)厚度為數公分至數十公分不等，為較具塑性的岩石；石英砂岩主要為粗粒至細粒石英顆粒構成，含少量長石，膠結良好，岩質堅硬但質脆，由於部分砂岩石英含量超過 90%，對鑽孔用的鑽頭設備磨耗極大。四稜砂岩層主要分佈於坪林隧道之東半部，導坑里程 36k+400 以東，其中的石英砂岩，受造山運動之擠壓及斷層作用時，岩體易破碎，形成密集分佈的剪裂帶。根據最近施工階段的調查資料顯示[3]，四稜砂岩地層中岩盤節理發達，經常出現三組或四組，其間距平均在數公分至十數公分間，且裂隙張口(opening)目測可達一至數公釐；因此岩盤蓄水能力強，且極為透水，地下水蘊藏於斷層背面或層間含泥阻水夾層間，以高壓的狀態出現，對隧道施工開挖造成極大的困難。

坪林隧道穿過六條斷層，按由西向東的順序排列分別為：石 斷層、石牌斷層北支、石牌斷層南支、巴陵斷層、上新斷層及金盈斷層；其中石牌斷層北支及南支、巴陵斷層、上新斷層及金盈斷層等五條斷層集中在靠近隧道東洞口三公里範圍內，形成一組正斷層群，據規設階段及部份施工階段地質調查資料，各斷層狀況略述如後：

1. 石 斷層：石 斷層為逆衝斷層，南側為上衝塊(斷層上盤)，主要由大桶山層的岩層組成；北側為下盤，為枋腳層的岩層組成。估計其斷層帶約 15 公尺寬，斷層泥厚度約 4 公尺，其餘寬度為斷層角礫。

2. 石牌斷層：石牌斷層為位於四稜砂岩地層中的正斷層，其在路線以東約五百公尺處之地面表徵是一明顯之長山溝，在隧道路線附近分岔而形成北、南二分支，稱為石牌斷層北支及石斷斷層南支。推估其斷層帶剪裂狀態強烈，南支斷層帶寬約 50 公尺，北支斷層帶寬約 30 公尺。斷層帶材料以石英岩碎屑及白色斷層泥為主。
3. 巴陵斷層：巴陵斷層為四稜砂岩地層中之正斷層，估計在導坑里程約 38k+500 至 38k+650 附近與路線相交，斷層面向東傾斜。地表岩層出露顯示，其東南側為上盤，由乾溝層硬岩組成；西北側為下盤，以四稜砂岩之石英岩為主。在斷層與隧道預估交會處，地表地形為一下凹地，顯示其下岩盤破碎且風化，估計寬可達 50 公尺。
4. 上新斷層：上新斷層亦為四稜砂岩地層中的正斷層，走向為東北，以高角度向東傾斜。導坑與主坑已於里程 39k+308 至 39k+320 間開挖通過斷層帶，其中出露材料主要為斷層角礫偶夾斷層泥組成，多呈磨碎狀，膠結極差，岩屑易剝落。
5. 金盈斷層：金盈斷層為正斷層，以高角度向東南傾斜，。導坑已於里程 39k+816 至 39k+842 間開挖通過斷層，由開挖出露材料顯示上盤為乾溝層，下盤為四稜砂岩層，斷層位態約為 $N10^{\circ}E/45-70^{\circ}E$ 。斷層東側有深灰至黑色之斷層泥及斷層角礫出露，推估為原乾溝層硬頁岩剪磨產物；斷層西側為灰色至灰白色之角礫，局部含斷層泥，岩體呈壓碎碾磨粉狀，膠結甚差，應為四稜砂岩剪磨產物；另外在斷層面兩側破碎帶已高度擾動。

除前述主要斷層構造外，於導坑里程 29k+500 及 33k+700 附近尚有鶯子瀨向斜軸及倒吊子向斜軸二處構造，對地層影響程度較斷層為小，但亦造成岩層局部破碎或地下水包等施工障礙。

三、 四稜砂岩地層地下水文模型概述

在坪林隧道施工過程中，所遭遇最嚴重的災變都發生在四稜砂岩地層，分別為導坑 TBM 第九次受困(導坑里程 39k+168)、導坑 TBM 第十次受困(導坑里程 39Kk+079)及主坑西行線 TBM 被掩埋事件(里程 38k+902)[4]；其中導坑 TBM 受困導致工期延滯，主坑西行線 TBM 被掩埋事件導致機具嚴重受損，影響施工進行。分析歷次災變過程，原因多是突發大量高壓湧水；為瞭解四稜砂岩地層中地下湧水模式，並探討處理岩層中高壓地下水的可行方法，必須先對四稜砂岩地層的水文模型加以介紹[5]。

目前鑽孔資料及導坑開挖所見顯示，在金盈斷層以西之四稜砂岩地層，以石英砂岩為主，間雜少量硬頁岩及碳質頁岩，層面呈次水平(小傾角)位態。岩層中節理高度發達且多呈張開狀態，為高度透水且蓄水性強的連續水體。然在此地層中多含泥之斷層或剪裂帶，常以近垂直的位態出現，為良好的阻水層；再者，石英砂岩層間所夾的硬頁岩或碳質頁岩(次水平位態)，透水性較差，可視為半阻水層(可阻水但仍有局部上下連通)。因此，在已知的四稜砂岩岩層中，地下水為三度空間格子狀分佈，如圖三所示意。從已知的現象中，四稜砂岩地層地質水文之特性，可歸納如以下數點：

1. 石英砂岩岩層透水係數(hydraulic conductivity)估計約為 10^{-4} 至 5×10^{-4} m/sec 間，為極透水岩盤，這與早期同一地層中，深孔鑽探完全無迴水的現象相吻合。
2. 四稜砂岩地層整體連通良好，導坑可以維持穩定出水量(約 150 公升/秒)，達三年以上。
3. 高角度含泥斷層或剪裂帶背面，常蓄積極大量的地下水。當隧道通過此類構造時，具高壓的地下水突然湧出，劇烈地沖蝕泥層及斷層角礫，變成土石流而瞬間產生大型崩坍。
4. 由於地下水呈格子狀分佈，隧道開挖面出水量減小或壓力降低，並不表示其附近絕對沒有其他高壓水層存在。

原規設階段所作之地質調查顯示，在坪林隧道東洞口三公里範圍內，主要的地質構造為正斷層群，如金盈斷層、上新斷層等。然近數年來，部份學者對台灣附近板塊衝撞的研究顯示[6, 7]，菲律賓海板塊以斜向撞擊大陸板塊，且在琉球島弧附近向下隱沒，雪山山脈東北段的地質構造，主要應為平移斷層(strike-slip fault)，正斷層及逆衝斷層較少，構造型式遠較正斷層群的模式為複雜。在導坑實際開挖過程中發現，除前述的正斷層群外，尚有為數甚多，頗具規模的含泥層剪裂帶出現；如出現在里程 39k+079、38k+998、38k+934 等位置的剪裂帶，皆具有阻水性，以致實際地質惡劣及變異程度較預期為大，施工控制亦較困難。

四、地質處理的策略擬定

山岳隧道開挖施工在通過斷層帶或剪裂破碎岩盤時，如遇高壓地下水引發土石流或泥流(mud flow)崩坍，除隧道改道外，多採排水降壓處理方式，如 1987 年日本安房隧道施工，開挖進入第四紀火山噴出屑堆積層，遇大湧水抽坍的處理方式[8, 9]；惟此方式在地下水補注良好時，需時甚長方可見效。另在排水孔出水

量低、降壓效果不良或地下水補注範圍太大時，亦可採強制灌漿固結止水的方式處理；如 1974 年日本青函隧道導坑在斷層帶遇湧水崩坍，即採用三次錐體擠壓灌漿，改良地盤後再順利開挖通過[10]。

84 年 2 月及 85 年 2 月，在坪林隧道導坑 TBM 開挖中，分別遭第九次及第十次抽坍夾埋，起因皆為高壓湧水所引發[1]。其中第十次受困，經過一年後，湧水量仍維持在 100 至 150 公升/秒間，且在長鑽孔中量得 $18\text{kg}/\text{cm}^2$ 實際水壓，可見湧水區段地下水補注能力極強，恐非僅靠排水降壓，即可在短期內安全地恢復開挖。由於四稜砂岩地層水文性質特殊：涵水能力強、透水性高、斷層及剪裂帶密佈、高壓水層呈格狀分佈等，加上施工的時效性考量，於是在 86 年 3 月確定了「遠排近灌」的地質處理策略；其概念如圖四所示。

五、 灌漿及排水孔施工過程及探討

於 86 年 5 月至 88 年 1 月間，坪林隧道導坑繞行隧道及主航道開挖過程中，因遭遇惡劣地質及湧水地盤，共作了 11 次地盤改良灌漿及排水孔鑽設，其位置及灌漿數量如圖五所示。在繞行隧道施工前期，灌漿孔採較為保守的二至三環配置[1]，漿材為 L.W.(水泥及水玻璃混合漿)、B.C.(皂土及水泥混合漿)或純水泥漿；視灌漿的位置及地下水湧水狀況而調整。以下是根據經驗所定灌漿佈孔及操作的原則：

1. 灌漿處理涵蓋開挖斷面向外一個隧道直徑的範圍。
2. 灌漿孔間距原則上不超過 2 公尺。
3. 外環目標為止水，採用 L.W.及 B.C.漿材；內環以固結為主要目標，採用純水泥漿為漿材。
4. 採順級式鑽灌，每階灌漿孔最長不超過 15 公尺，惟在鑽孔湧水大於 2 公升/秒或有相當水壓力時，應立即停止鑽進，開始灌漿。
5. L.W.凝結時間設定為 2 分鐘，但須配合出水狀況做必要的縮短。B.C.漿及水泥漿施灌時，漿液調配由稀逐漸濃稠，視現場吃漿情形調整。
6. 灌漿壓力應控制不超過三倍地下水壓力且不大於 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

灌漿作業中所遭遇的問題主要是鑽孔困難；作業初期採用旋轉式鑽機，經常發生卡鑽斷桿的情形，平均約二天才可完成一孔鑽灌作業，工進十分緩慢，其中最長的一次灌漿費時 69 天。在改善鑽機及鑽串配置方式後(採用衝擊式鑽機及高強度鑽桿)，已大幅提高鑽孔的工作效率，可以在一天之內完成二孔的鑽灌作業，

其中第七次灌漿共有 10 孔，僅費時 6 天即完成全部作業；顯見作業效率與施工經驗及機具配置有密切關係。以下為第一次至第七次鑽灌作業情形，彙整統計工作數量及作業時間如表一。

表二、導坑及繞行隧道灌漿數量及工期統計

里程位置	39k+110 (D.T.)	39k+095 (D.T.)	39k+074 (D.T.)	39k+019 (D.T.)	39k+005 (D.T.)	38k+998 (P.T.)	38k+980 (P.T.)
鑽孔總數	9	10	27	26	24	22	10
鑽孔 總長度(m)	234	310	1026	460	472	442	170
錐體 處理長度 (m)	26	31	24/30	15/20	15/23	15/23	15/20
L.W.體積 (m ³)	42.6	309.1	317.9	231.0	322.6* ²	279.2	99.3
水泥/BC 漿體積 (m ³)	9.9	18.1	109.2	16.1	81.2* ²	14.8	3.7
漿體總體積 (m ³)	52.5	327.2	427.1	247.1	403.8* ² (283)	294.0	103.0
單位孔長吃漿量 (m ³ /m)	0.22	1.05	0.42	0.54	0.60	0.67	0.61
單位長度錐體吃 漿量(m ³ /m)	2.0* ¹	10.6	14.2	12.4	12.3	12.8	5.2* ³
工期(天)	12	20	69	15	21	22	6
鑽機型號	KH120	KH120	KH120	A. Copco 1238	A. Copco 1238	A. Copco 1238	A. Copco 1238
最大灌漿壓力 (kg/cm ²)	40	40	50	50	50	50	50
與前次錐體重疊 長度(m)	0	10	10	0	6	0	5

附註：

1. 本次灌漿係為補充灌漿，故吃漿量明顯較低。
2. 灌漿時導坑主航道湧水大減，估計約有 120m³ 漿體流入抽坍所形成的空洞。
3. 受硬頁岩層阻隔，推估灌漿改良區域僅及正常錐體之 30% 至 50%。
4. P.T.表示導坑主航道，D.T.表示繞行隧道。

從表二的統計可見，在一般情形下，不論孔數的變化，每單位長度錐體吃漿量約在 10.6 至 14.2m³/m 之間，平均約為 12.5m³/m；而每單位孔長吃漿量則變化較大，在 0.42 至 1.05m³/m 之間。由此可見在四稜砂岩中，若減少灌漿孔數，但增加每一孔的吃漿量，可維持相仿的地盤改良的效果。

假設灌漿改良地盤為均質節理發達岩盤，則吃漿半徑(R)、單位長度錐體吃

漿量(V)、節理組數(n)、節理平均間距(s)、及節理平均開口寬度(e)之間的關係可以表示如式 1：

$$V = \pi R^2 \frac{n}{s} e \quad (\text{式 1})$$

假設 $V=12.5\text{m}^3/\text{m}$ ， $n=4$ ，則灌漿錐體吃漿半徑、節理間距與節理開口寬度三者之關係可表示如表三；另根據理論推導，節理岩盤中透水係數 k (hydraulic conductivity) 可以表示如式 2[11]：

$$k = \frac{\gamma_w}{6\mu} \left(\frac{e^3}{s} \right) \quad (\text{式 2})$$

其中 $\gamma_w=9.8\text{KN}/\text{m}^3$ ， $\mu=1.005\times 10^{-6}\text{KN}/\text{m}^2$ 。表三中括號內所示之數字，即為節理岩盤在灌漿處理前所相對應之理論 k 值：

表三、吃漿半徑與岩盤節理開口寬度及理論透水係數之關係

吃漿半徑 $R(\text{m})$	$s=10\text{cm}$	$s=5\text{cm}$	$s=2\text{cm}$
	節理開口寬度 $e(\text{mm})$ [理論透水係數 $k (\text{m}/\text{sec})$]		
8.0	1.55 [6.0×10^{-2}]	0.78 [1.5×10^{-2}]	0.31 [2.4×10^{-3}]
10.0	0.99 [1.6×10^{-2}]	0.50 [4.1×10^{-3}]	0.20 [6.5×10^{-4}]
12.0	0.69 [5.3×10^{-3}]	0.34 [1.3×10^{-3}]	0.14 [2.2×10^{-4}]
14.0	0.51 [2.2×10^{-3}]	0.25 [5.1×10^{-4}]	0.10 [8.1×10^{-5}]
16.0	0.39 [9.6×10^{-4}]	0.19 [2.2×10^{-4}]	0.078 [3.8×10^{-5}]

由過去的經驗，以排水孔出水量及水壓力的關係推算，四稜砂岩地層中結理發達之石英砂岩層，其透水係數約為在 10^{-4} 至 $5\times 10^{-4}\text{m}/\text{sec}$ 間。由表三數字可見，節理開口寬度為 0.2mm ，為合理的估算，因此前述灌漿錐體有效吃漿半徑合理推估值為 12 至 14 公尺間。

在導坑繞行隧道 38k+075 至 39k+010 間，為協助降低主坑東行線開挖面前方的地下水壓，曾於錐體灌漿完成後，施作完成一系列排水孔，其出水點(位置如圖六所示)可代表灌漿錐體有效止水範圍的邊緣。由此研判，在節理發達的四稜砂岩

地層中，前述灌漿方式可達成的有效吃漿範圍，約為距離灌漿孔 4 至 6 公尺間；此一觀察與前述推估亦無矛盾。因此在第七次灌漿地盤改良後，檢討調整佈孔的方式，以減少鑽孔數。鑽孔數的配置與有效吃漿半徑相關，如每孔有效吃漿半徑可維持 4 至 5 公尺，則鑽數可減至 6 孔一環；但應在整環完成後，於環內施鑽檢查孔(check hole)，以確認灌漿效果。但是在地下水層壓力太大，且破碎帶寬廣時，基於安全考量，仍有必要採雙環佈孔。

鑽灌及排水孔施工的順序原則上從施作擋牆開始、再來是安裝孔口套管、鑽設灌漿孔、外環灌漿、內環灌漿(如採二環佈孔)、檢查孔，最後施鑽排水孔。排水孔的孔數及孔位甚難根據理論事先計算確定，應於現場逐步調整決定；調整原則如後述。鑽排水孔時，每加一孔，即應量測排水孔總出水量；若其總出水量不再隨排水孔的增加而顯著增加，表示再加排水孔效果有限，即可停止鑽設更多的排水孔。

經過檢討調整，於 87 年 11 月至 88 年 1 月間，又於繞行隧道及導坑主航道進行了四次地質處理，處理的規模及範圍，參見圖五；由於處理成果皆在合理控制範圍內，可驗證前述的推論，即在四稜砂岩地層中確實可以較少的孔數，配合較高的灌漿壓力，有效地完成地盤改良，並安全地完成開挖。坪林隧道導坑配合鑽炸開挖，現行施工中的地質探查及地質改良作業的執行流程如圖七所示；灌漿孔及排水孔配置如圖八所示。

六、 結論與結語

坪林隧道施工過程遭遇多次崩坍、湧水、機具夾埋等災變，對工程人員而言是極嚴峻的考驗與挑戰。探討災變成因，多是由於現今的科技能力，尚無法在施工前充份掌握多變的地質，並適時有效地處理地盤，以確保開挖的安全。經過長期的檢討及實質經驗的累積，我們對四稜砂岩地層的地質特性，已有所掌握，相信對順利完工必有關鍵的助益。以下再簡要整理坪林隧道地質處理的經驗，供工程界參考：

1. 應視地質探查為施工過程的例行作業，無論任何原因，皆不可省略。惟探查的方法，可配合的地盤特性及工程時效性，適當選用。
2. 高透水性地盤，加上豐沛地下水補注時，要特別防範阻水層後的高壓湧水；此等地盤如未事先處理，將註定遭遇開挖面崩潰的災害。
3. 固結止水灌漿與排水降壓，屬相反的兩種地下湧水處理觀念，但是可合併使用，增加處理時效；惟施工的順序須妥為計劃，以免事倍功半。

4. 在隧道施工過程中，如遇特殊地質狀況，應針對岩盤特性、水文地質、施工機具、工程需求等條件，個別釐訂地盤改良計畫。初始宜偏保守作業，再視處理效果，逐步合理修正調整，以兼顧安全及效率。
5. 鑽灌作業為隧道及地下廠房工程施工極專業的工作，目前國內甚缺優秀的鑽灌工班，隧道專業廠商應注意此類工班的培訓。
6. 鑽機及鑽串是鑽灌作業成敗的關鍵，而需要做地質處理的岩盤大多性質甚劣，因此必須採最佳的機具組合，以利處理成效。

七、 參考文獻

1. 鄭文隆、張文城，“高度破碎及湧水帶 TBM 施工之案例探討”，地工技術，第 66 期，page 5-24，April 1998。
2. 國道新建工程局，“國道北宜高速公路工基本設計階段坪林－頭城段地質調查工作期末報告，March 1991。
3. 國道新建工程局，“國道北宜高速公路計畫坪林隧道導坑工程地質調查工作 86 年度簡要報告”，1998。
4. 中興工程顧問股份有限公司，“北宜高速公路計畫坪林隧道地質摘要報告(坪林隧道第五次諮詢顧問會議書面資料)”，March 1998。
5. 國道新建工程局，“國道北宜高速公路計畫坪林隧道湧水問題評估調查服務工作第二年度工作成果報告”，February 1999。
6. Lu, C-Y and Malavieille, J., “Oblique Convergence, Indentation and Rotation Tectonics in the Taiwan Mountain Belt: Insights from Experimental Modelling”, *Earth and Planetary Science Letters* 121, page 477 – 494, 1994.
7. Lu, C-Y, Chu, H-T and Lee, L-C, “Structural Evolution in the Hsuhshan Range, Taiwan”, *Journal of the Geological Society of China*, vol.40, No.1, page 261 – 279, January 1997.
8. 三谷 哲(日本熊谷組工程公司主任研究員)與作者個人之技術討論，August 1998。
9. 武藤 章，鈴木 和夫，“國道 158 號安房隧道調查坑經低速帶大湧水處理案例(日文)”，地下隧道期刊(日文)，第 20 卷 6 號，June 1989。
10. Greenwood, D.A. and Hutchinson, M.T., “Squeeze Grouting Unstable Ground in

Deep Tunnels ” , *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, Geotechnical Engineering Division ASCE, New Orleans, USA, Feb. 1982.

11. Goodman, R.E., “ Introduction to Rock Mechanics ” , 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1989.

圖一、坪林隧道主坑及導坑標準斷面概要圖

圖三、坪林隧道東段地層水文地質模型示意圖

圖四、「遠排近灌」處理高壓地下水層及破碎岩盤概念示意圖

圖六、導坑繞行隧道排水孔出水點與灌漿錐相關位置圖

(相對導坑里程 38k+980 至 39k+010)

圖八、導坑灌漿及排水孔佈置示意圖

圖三、坪林隧道東段地層水文地質模型示意圖

圖四、「遠排近灌」處理高壓地下水層及破碎岩盤概念示意圖

圖二、坪林隧道沿線地質剖面概要圖

圖五、導坑及繞行隧道地質處理平面位置及數量統計

圖七、導坑配合鑽炸施工之地質調查及處理流程圖

