

## 雪山隧道豎井工程地質弱帶處理施工案例

張文城 曹嘉永 \*

### 摘要

雪山隧道長度約12.9公里，為北宜高速公路隧道群中最長的隧道，而覆蓋層又最深達約750公尺，且長隧道的通風系統對交通安全非常重要，故經研究各種通風系統方式後採加強縱流式通風系統，全線交錯設置三組通風豎井機房及中繼站，形成8個獨立之通風迴路。

雪山隧道因位於雪山山脈，穿過經輕度變質之沉積岩層，並由於受板塊衝擊影響，致地質變化相當劇烈及複雜；當豎井遭不良地質時，無論採用沉挖工法或昇井工法均須事先處理，才能順利、迅速及安全通過，本文簡介雪山豎井工程地質弱帶處理案例，俾提供爾後類似案例參考。

### 一、前言

雪山隧道長度約12.9公里，為北宜高速公路隧道群中最長的隧道，亦為目前全世界第五長的公路隧道，主要包含雙孔雙向兩車道之主隧道及一條位於兩主隧道間下方直徑約4.8公尺的導坑，與作為通風系統用的三組通風豎井，每組豎井之進氣井及排氣井分離相距50公尺。



圖一 雪山隧道透視圖

雪山隧道三組通風豎井約等距座落於雪山隧道導坑上方（詳圖一），豎井之內徑除二號豎井為6.5公尺外，其餘均為6.0公尺；深度250公尺至500公尺。三組通風豎井因井底導坑進度之影響，致施工條件不同，除二號豎井因岩盤較緻密透水性低，採傳統沉挖工法開挖，且因地質情況尚佳，故施工期間並未施作地質弱帶處理作業外，一號豎井因導坑西口開挖已通過豎井底，採昇井沉挖混合工法施工，且因地質情況不良，採深孔皂土水泥灌漿處理後，順利完成施工作業。三號豎井之井體位址岩盤為四稜砂岩層，岩體破碎，地下水豐沛，故排氣井採短階L.W.灌漿預灌，再以沉挖工法開挖，進氣井則採全程皂土水泥灌漿預灌，再以沉挖工法開挖。各豎井基本資料如表一。

### 二、地質概述

雪山隧道的三組豎井地質情況如下：

1. 一號豎井位於鶯仔瀨向斜東南翼，一個單斜構造(monocline)上，此單斜構造近地表處因解壓及風化作用，岩體較為破碎，層面並夾有泥縫，地層岩性為中新世枋腳下部之砂頁岩層及媽岡層之厚層砂岩偶夾頁岩。

\* 臺灣區國道新建工程局第三區工程處

表一 雪山隧道通風豎井資料

豎井名稱	一號通風豎井		二號通風豎井		三號通風豎井	
	進氣井	排氣井	進氣井	排氣井	進氣井	排氣井
位置 (里程)	坪林大湖尾 (30K+013)	坪林大湖尾 (30K+063)	坪林尖山瑚 (30K+656)	坪林尖山瑚 (30K+706)	坪林石牌 (37K+104)	坪林石牌 (37K+154)
井深	482.2M	500.9M	237.9M	248.7M	438.2M	458.9M
內徑	6M	6M	6.5M	6.5M	6M	6M
工法	昇井工法	昇井工法	沉挖工法	沉挖工法	沉挖工法	沉挖工法
地質	上:枋腳層(砂頁岩) 下:媽岡層(砂頁岩)	上:枋腳層(砂頁岩) 下:媽岡層(砂頁岩)	大桶山層 (粉砂岩)	大桶山層 (粉砂岩)	四稜砂岩層 (石英砂岩)	四稜砂岩層 (石英砂岩)

2. 二號豎井位於倒吊子向斜北翼，地層岩性為漸新世大桶山層硬頁岩偶夾薄層粉砂岩。

3. 三號豎井位於一座獨立山頭之坡腰，地層岩性為漸新世四稜砂岩層，係由石英砂岩間夾粉質細砂岩、泥岩及炭質岩等構成。其中偶夾局部淺層火成岩之細岩脈及凝灰岩。岩層層理平緩，位態相當均緻，節理不連續面甚為顯著與發達，地下水位約在地面下55公尺，預估施工時之滲水量大。

### 三、地質弱帶處理工法

雪山隧道豎井工程遭遇地質弱帶，係採用地盤改良灌漿工法處理。所謂地盤改良灌漿工法係指利用液壓、氣壓或重力等原理，通過灌漿管把能在預定時間固化的指定材料的漿液注入土體或岩體中，漿液藉填充、滲透或擠密等方式，將土壤顆粒間或岩體裂隙中的水分和空氣或剪磨泥等，趕走或擠密後替代其位置，並因漿液將原鬆散的土壤顆粒或岩體裂隙，膠結成一體，以達到減少沉陷量或變形、增加支承力、減少透水性等效果。

地盤改良灌漿依功能性可分為回填灌漿、固結灌漿及止水灌漿等；依灌漿材料又可分為水泥系灌漿、化學系灌漿及皂土水泥系灌漿等。故在灌漿作業施工前必須針對該欲處理區域之地質充分瞭解及掌控，方可選用最適合之材料、方式達到最佳灌漿效果。以一號豎井及三號豎井採用之地質弱帶處理為例說明地質特性及處理原則。

#### 3.1 豎井地質弱帶處理方式

##### 3.1.1 深孔皂土水泥灌漿

雪山隧道一號豎井深度約500公尺，因位於豎井下方之導坑已開挖通過，致一號豎井可採昇

井沉挖混合工法施工，但依現場鑽孔資料顯示，自地表下78m岩層破碎且地下水豐沛，又有一傾角約65°、寬約45m之破碎剪裂帶須事先加以處理。此外三號豎井進氣井深度約438m，地層屬始新世之四稜砂岩，因臨近東洞口段斷層群，雖岩體品質尚可，但透水性較高，致開挖期間地下滲水量甚大，若未事先加以處理，恐無法如期如質施工。

經參考烏克蘭STG公司與中國大陸有關豎井開挖採用黏土(或皂土)水泥灌漿工法之成果報告文獻，其滲水量阻絕率達90%以上，並多次就灌漿方案(如灌漿材料、灌漿方式及灌漿時程等)檢討評估後，雪山隧道一號豎井進、排氣井及三號豎井進氣井引進深孔皂土水泥灌漿工法，以提高開挖工率，縮短工期；惟因環保意識高漲且用地取得困難，無法採擷適量之黏土材料，而以皂土替代黏土施作。

##### 3.1.1.1 皂土水泥灌漿工法之特性

本工程採用之皂土水泥灌漿，係以STG公司之泥基灌漿工法之經驗再配合實際地質情況加以調整，其主要特性為：

1. 灌漿依據STG之「流體動力學」、「地下水文學」等理論經驗公式，並針對灌漿地層的地下水文進行詳細調查，再按調查結果推算各項灌漿參數。

2. 漿材係採用皂土、水泥及少量添加劑，具較長凝結時間，可滲入0.1~0.15mm裂隙，不易受地下水稀釋，塑性強度高，凝固後仍具彈性，抗腐蝕性，處理後岩盤滲透係數約可降低至 $10^{-6}$ cm/sec。

3. 灌漿過程中對灌漿壓力、灌漿流量和灌漿漿液比重進行連續監控。

4. 主要灌漿孔灌漿完成後，再鑽檢查孔，以

檢驗灌漿成果，並視實際需要針對部分區段，由檢查孔再施作灌漿處理。

### 3.1.1.2 皂土水泥漿配比及施工程序

配比：本工程採用之皂土水泥灌漿，係以比重控制其品質，以黏滯度維持其工作性，經STG公司試驗後，採皂土漿比重 $1.03\sim 1.04\text{g/cm}^3$ ，黏滯度(flow cone) $40\sim 50\text{sec}$ ，皂土水泥漿之比重 $1.3\sim 1.4\text{g/cm}^3$ ，配比如表二所示。若岩層裂縫甚小時，可考慮降低水泥含量，並依動態水文調查結果及實際灌漿情況決定添加木屑之時機及數量。

2.灌漿程序：本工程採用由上而下逐階施灌之方式(Stage-Down Method)灌漿，其灌漿程序流程，如圖二所示。一號豎井皂土水泥灌漿佈孔及帷幕剖面如圖三、四所示。

表二 皂土水泥灌漿配比

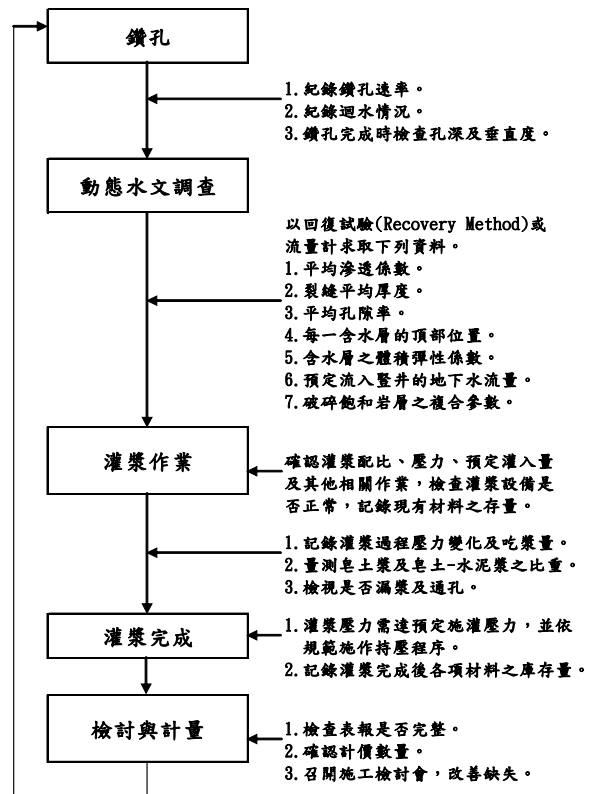
每 $\text{m}^3$ 漿液之配比(kg)				
皂土	水泥	水玻璃	水	備註
美國:45±	450±	12±	829±	美國皂土比重 $2.3\text{g/cm}^3$
烏克蘭:45±	450±	12±	832±	烏克蘭皂土比重 $2.7\text{g/cm}^3$

### 3.1.2 L.W.灌漿工法

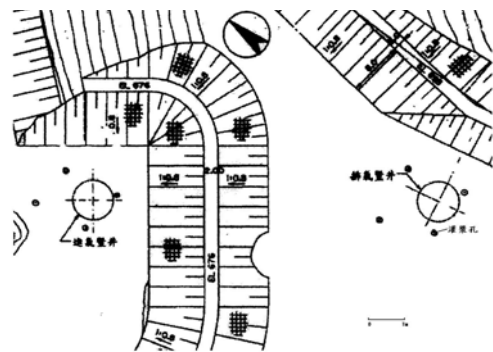
雪山隧道三號豎井排氣井深度約459m，因位於豎井下方之導坑尚未開挖通過，致無法採昇井工法施工，須採傳統沉挖工法開挖；並因井體位址之岩盤為四稜砂岩層，岩體破碎、地下水豐沛，且地層之軸向多為高角度傾斜或垂直，致地下水多流至開挖面，造成施工非常艱困且施工品質較難完全掌控，故檢討評估後，採止水灌漿工法，減少井內滲水，並輔以強制抽排水系統，以確保豎井之施工進度及品質。

三號豎井排氣井灌漿之主要目的係降低開挖面側壁之滲水量及增加其穩定性，使開挖作業順利進行，並經多種方法、多次施灌及比較評估結果，L.W.灌漿工法效果較佳，於是採L.W.灌漿工法以短階先灌後挖方式施工，並順利開挖至井底。

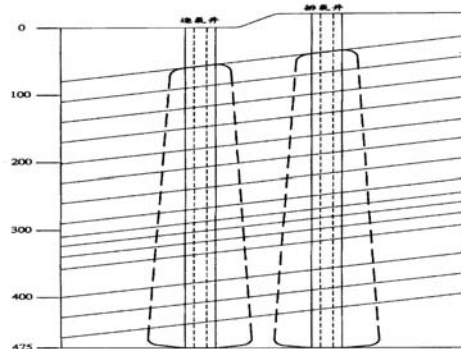
L.W.漿液膠凝時間及配比，如表三所示，並得依現場施灌情況調整。



圖二 豎井工程灌漿程序流程圖



圖三 一號豎井皂土水泥灌漿佈孔圖



圖四 一號豎井皂土水泥灌漿帷幕剖面示意圖

表三 三號豎井 L.W.灌漿配比表

A劑			B劑			合計 (公升)	膠凝時間 (秒)	A劑濃度 (%)	B劑濃度 (%)
水泥(公斤)	水(公升)	合計(公升)	水玻璃(公升)	水(公升)	合計(公升)				
50	176	192	96	96	192	384	113	8.30	50
50	151	167	84	83	167	334	91	9.50	50
50	109	125	63	62	125	250	64	12.70	50
100	168	200	100	100	200	400	51	15.90	50
100	135	167	84	83	167	334	45	19.10	50
100	93	125	63	62	125	250	31	25.40	50
200	136	200	100	100	200	400	26	31.80	50

三號豎井L.W.灌漿範圍及配孔方式：灌漿工法每次施灌19m、開挖15m，範圍約為井壁外8m，採三環佈置，A、B環每環8孔，交錯排列，C環4孔兼做檢查孔，L.W.灌漿孔配置圖及剖面圖詳圖五、六，其各階深度及灌漿壓力詳表四。

## 四、地質弱帶處理成效

### 4.1 皂土水泥預灌作業之成效

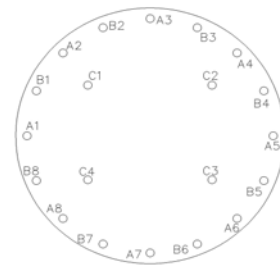
雪山隧道一號豎井係與三號豎井進氣井均參考烏克蘭STG公司之深孔皂土水泥灌漿工法，進行止水及改良地質作業。並於皂土水泥灌漿作業完成後，採昇井沉挖混合法進行開挖作業。

昇井工法(Raise Boring Method，簡稱R.B.M.)，於1949年，首次運用於德國鑽鑿礦坑間之聯絡坑道為主，至1960年代，鑽鑿機具發展已日趨成熟，才有較廣泛的運用於工程界。國內於1990年，南迴鐵路中央隧道西豎井工程中，首次採用昇井鑽鑿工法施作，後於花蓮和平之水泥礦場使用達到高峰。本豎井係由榮民工程股份有限公司協建廠商興志公司與奧地利U-BAU公司承攬負責昇井鑽鑿作業，所用之昇井鑽鑿機具(型號：INDAU Raiser 250-H)，大致可分為以下四大部分：

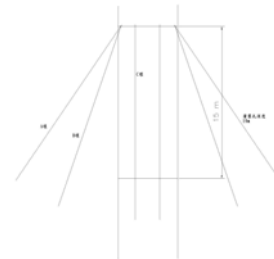
(一)主體架構：(1)動力系統(2)傳動系統(3)旋轉及鑽進系統(4)升降系統(5)底座及支撐架(6)操作控制台(7)鑽桿供應架。(二)鑽孔鑽鑿之鑽串：(1)鑽頭(2)導向裝置(Directional Drilling System D.D.S.)包含導向組件及鼓動器組件(3)穩定桿(4)鑽桿。(三)擴孔鑽鑿之鑽串：(1)擴孔鑽頭(2)鑽鉸(3)鑽桿。(四)其他周邊附屬設備。

表四 三號豎井 L.W 灌漿各階段深度及灌漿壓力表

階段數	A	B	C	深度 (m)	PVC管 埋設深度(m)	灌漿壓力 (kg/cm <sup>2</sup> )
一	8孔	8孔		5m	4	15
二	8孔	8孔		12m	11	25
三	8孔	8孔		19m	18	40
檢查孔			4孔	19m	18	40

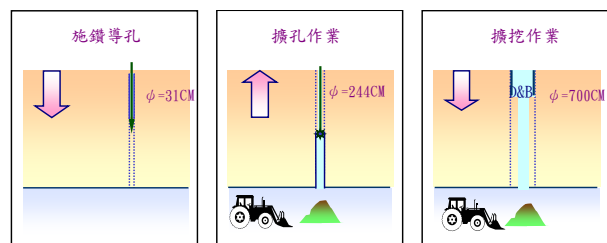


圖五 三號豎井 L.W 灌漿孔配置圖



圖六 三號豎井 L.W 灌漿孔剖面示意圖

本豎井昇井工法施工步驟如圖七：



圖七 昇井工法施工步驟圖

一般昇井工法鑽設導孔之偏差率約為1%至2%，換算於此一深度500m之豎井相當於約5至10m偏差，而經本深孔皂土水泥灌漿作業及引進

精密的導航儀器，一號豎井排氣井昇井工法偏差率僅約72cm，且進氣井昇井工法偏差率更僅約14cm。為世界上罕有之精度，且導孔鑽設每日最高工率達44.5m，擴孔每日最高工率達54m，均為國內最佳紀錄。一號豎井導孔擴孔完成後，於豎井底部量測其豎井總合之滲水量僅約0.27 l/s，灌漿效果非常顯著。

位於雪山隧道四稜砂岩區之三號豎井進氣井，GL-157~357區段，係採深孔皂土水泥灌漿工法，經現場回復試驗結果，可推估現地岩盤滲透係數，如表五、六所示，在進行地盤改良灌漿前在覆蓋深度200~300m間約為 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，灌漿後約為 $2 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ，灌漿效果可降低滲透係數約100倍。

三號豎井進氣井採深孔皂土水泥灌漿後之後續開挖作業，由於滲水量已大幅降低，GL-157~357區段開挖過程中，除於GL-243.1處因地質惡劣且側壁滲水量變大，須採補灌措施外，其餘區段滲水量大致維持於6~7 l/s，致開挖工作順利進行，最高月進度達39m，顯見深孔皂土水泥灌漿作業對提升豎井之開挖工進有顯著成效。

表五 三號豎井進氣井灌漿前動態水文調查資料表

深度 GL-(m)	滲透係數 k(m/s)	孔隙率 (%)	裂隙寬度 e(cm)	備註
-215	$2.33 \times 10^{-5}$	4.99	1.4	GL-199~-215m
-238	$2.24 \times 10^{-5}$	4.51	1.9	GL-215~-238m
-271	$8.52 \times 10^{-5}$	4.26	0.6	GL-254~-271m
-270	$3.23 \times 10^{-5}$	4.02	3.5	GL-268.2~-270m
-285	$7.00 \times 10^{-5}$	4.02	4.6	GL-283.8~-285m
-308.5	$2.30 \times 10^{-6}$	7.1	3.7	GL-300~-308.5m
-317.5	$4.30 \times 10^{-6}$	5.43	8	GL-308.5~-317.5m
-334	$9.20 \times 10^{-6}$	3.6	3.7	GL-317~-334m

表六 三號豎井進氣井灌漿後動態水文調查資料表

深度 GL-(m)	滲透係數 k(m/s)	孔隙率 (%)	裂隙寬度 e(cm)	備註
-200	$7.57 \times 10^{-8}$	0.00036	0.1	GL-172~-200m
-216.5	$7.22 \times 10^{-8}$	0.24	0.2	GL-200~-216.5m
-238	$2.52 \times 10^{-7}$	0.35	1.51	GL-216.5~-238m
-300	$9.70 \times 10^{-7}$	1.66	1.4	GL-238~-300m
-342	$9.57 \times 10^{-7}$	0.73	0.3	GL-300~-342m

## 4.2 三號豎井L.W.灌漿處理成效

三號豎井進氣井GL-59.7~168.6及排氣井GL-51.5~井底，係採L.W.灌漿工法，以短階方式先灌後挖施工，L.W.灌漿前後井體滲水量的變化如圖八、九所示，灌漿後之滲水量有明顯減少之現象。惟因係採短階，致滲水將隨開挖深度之增大而由較大連續性較長之岩盤裂隙滲出，故必須隨時將其滲水量控制於強制抽排水之能量內，俾利開挖工作能順利進行，所以必須重覆短階先灌後挖之模式接續進行。每月之工進約只能完成一階灌漿19m，開挖15m之工率，且L.W.灌漿材料有隨時間增長而出現水解之跡象，致原已阻絕於豎井開挖側壁外之地下水再度滲入井體，造成日後襯砌作業之困擾。

## 五、檢討與建議

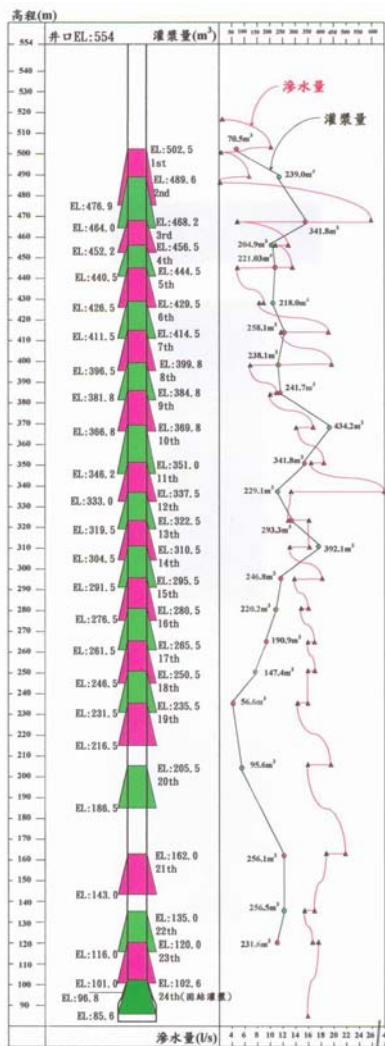
### 5.1 檢討

本案例探討係以雪山隧道三號豎井及一號豎井之地質弱帶處理為例，由三號豎井L.W.灌漿前後井體滲水量的變化、三號豎井進氣井深孔皂土水泥灌漿前後，進行回復試驗之現地滲透係數推估及一號豎井昇井工法施工前進行深孔皂土水泥灌漿作業後，排氣井昇井工法導孔鑽設及擴孔成果，歸納得以下結論：

1. 雪山隧道一號豎井工程之深孔皂土水泥預灌作業，因深孔方向控制較不易，灌漿範圍及效果較難掌控，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。此外以昇井工法之導孔配合作為預灌作業之第四孔及檢查孔，而獲得更佳的昇井工法之導孔與擴孔之工率，應為一適當之抉擇。

2. 雪山隧道三號豎井工程，以沉挖工法開挖，且由岩層裂隙滲出之水皆必須以抽水機強制抽水之方式抽出井外，才能確保開挖面能順利開挖。豎井的滲水，雖可以強制抽排水方式抽出井外，但側壁滲水除影響施工進度外亦將影響支撐工噴凝土之品質，致須採預先灌漿方式減少滲水量，降低抽水機之負擔，並使開挖及支撐工等工作得以順利進行。

雪山隧道三號通風豎井採用短階L.W.灌漿工法，因其灌材具水解特性形成日後滲水量再增加而造成襯砌作業困難，且施灌作業中滲漏漿材



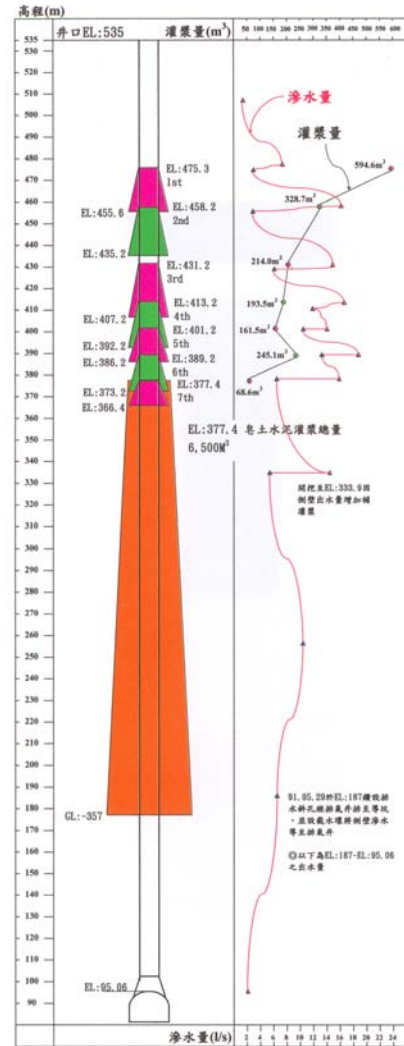
圖八 三號豎井排氣井 L.W.灌漿量與滲水量關係圖

造成現有污水處理設施無法有效處理，有不符環保要求之虞，似不適宜深豎井工程。深孔皂土水泥灌漿於井壁滲水阻絕達到預期效果且於後續開挖施工過程，井內滲水量有持續減少的趨勢，充份彰顯其灌材具彈塑性，且由一號通風豎井昇井上擴工法、擴挖作業及後續襯砌作業進度皆能達到要求，顯見昇井工法施工前之全程深孔皂土水泥預灌作業模式之成效。

## 5.2 建議

雪山隧道一號豎井昇井工法施工前之全程深孔皂土水泥預灌作業模式，及以昇井工法之導孔配合預灌作業進行，均得到相當顯著之成效，似值得爾後類似豎井工程之參考。

建議爾後之豎井工程應借重日益精進之地



圖九 三號豎井進氣井 L.W.灌漿量與滲水量關係圖

質鑽探技術，於規設階段即針對豎井位址做較詳盡之地質及水文調查，並於工程合約中預留彈性，使承商於施工中遭遇特殊地質狀況時，可依據岩體的特性、水文資料、工程需求、環保要求、施工機具設備、施工材料及工程經費等因素，慎選適當的地質弱帶之處理模式，據以執行後，再依實際情況調整，俾有效掌控施工進度及工程品質。

## 參考文獻

- 交通部國道新建工程局，「三號通風豎井EL.401.2隔幕灌漿施工計畫」，(1999)。
- 交通部國道新建工程局，「三號通風豎井進氣井EL.377.4以下全程止水隔幕預灌處理施工計畫」，(2000)。
- 交通部國道新建工程局，「一號通風豎井全程止水隔幕預灌處理施工計畫」，(2001)。