

# 北宜高速公路雪山隧道設計重點回顧

林振基

中興工程顧問公司 前北宜高監造經理

## 一、 摘要

雪山隧道全長 12.9 公里，屬雙孔雙車道斷面，為世界上現有最長之雙孔型公路隧道。本隧道初期規劃主要係針對路線評選、施工工法及施工規畫作深入的研究與探討。由於本隧道工程規模龐大複雜，通風系統型式又為世界上首創，因此後續設計是否能達到日後通車運作順暢的目標，面臨嚴峻的考驗與挑戰。

本文係針對本隧道各項設計重點加以說明，諸如路線評選、地質探勘、開挖工法選擇、平面及縱剖面、工程佈置、隧道斷面、通風系統等等。由於本設計完成至施工完工，長達十五年之久，施工中如有因應各種因素而調整設計部分，亦將一併加以說明。

## 二、 路線評選

北宜高速公路由南港至頭城，全長 31 公里，民國 71 年起即開始研選路廊，其後歷經各階段之研究評估，至 79 年路線才正式定案。由於坪林是路線中點而且是唯一的開闊地形，適合設置長隧道間交通安全需要之交流道，所以南港坪林間之路廊較為單純，各階段所研選的路線僅有一條，亦即目前之路線，係由北二高南港系統交流道經石碇至坪林。至於坪林至頭城段，則因蘭陽平原地形開闊而有各種不同的選線。

交通部公路總局於 73 年委託中興顧問公司辦理本公路初步地質調查，共完成 16 孔鑽探，總進尺 1,145 公尺，以及二條震測線共長 1,150 公尺，據以評估隧道公路之地質及初步工程佈置。當時該公路係按一般公路的標準規劃，並非快速道路或高速公路，所以中興公司研選的路廊以地質觀點考量，避開金盈斷層及上新斷層，選擇通過四稜砂岩破碎區較短之北側，以靠近頭城鎮作為雪山隧道東端出口，約距離目前的洞口 3 公里，旨在減少地質風險，並建議以傳統鑽炸法開挖。後來因本公路提昇為快速道路及高速公路標準規劃，認為此一路線不合乎設計條

件以及整體高速公路路網的規劃而未被採用。

交通部運輸研究所於 76 年間委託美國帝力凱撒顧問公司(De Lew Cather, USA)辦理可行性研究，係以一般快速道路的標準規劃，共研擬三條路線。其中路線“#1”係將台九號公路部分路段拓寬，再銜接多座長短不一之隧道群，出口偏南繞經礁溪山側溫泉觀光區至宜蘭與台九號公路銜接；路線“#2”及“#3”均佈設 12.9 公里之長隧道，其中路線“#2”出口在五峰旗瀑布附近，南行與台二線相接；路線“#3”出口位於頭城，與台九線相接。

交通部國道新建工程局成立後接辦北宜高速公路之規劃與興建，於 78 年間再委託帝力凱撒，根據地質探查資料及環評報告辦理路線評選工作，本階段已將本公路設計標準提昇為高速公路。經考量本公路為環島高速公路路網之一段，為便於銜接頭城蘇澳延伸段，以及交流道對頭城與礁溪地區的服務功能，而採用路線“#3”，惟為配合交流道佈置及避免出隧道即面對東陽旭昇強光的眩光影響，把雪山隧道東端出口略微修改南移，成為目前的雪山隧道路線，詳圖一及圖二。唯有此路線才有可能在頭城佈置佔地極廣的交流道、收費站、工務段、警察分隊、變電站等重要設施。

路線評選階段已有相當數量之地質探查資料，國外顧問亦親赴現場勘查沿線露頭及鑽孔岩心，大致瞭解雪山隧道東段約 3 公里通過破碎之乾溝層與四稜砂岩地層，斷層密集，地下水蘊藏豐沛。如純以隧道工程技術觀點，理應避開，但因地質弱帶範圍太大，並無法完全繞過。由目前已開挖明確之地質資料觀之，愈往北地質情況確實愈佳，當時路線如能北移，則地質風險應可大為降低及縮短工期。但北宜高速公路係以交通運輸功能為目的，路線之研選及工程佈置，自然以交通功能需求為第一考量。國外顧問以其專業經驗認為隧道通過此種惡劣地質區段，應可由有經驗的包商以工程技術克服，路線北移對高速公路整體工程佈置並不理想，反而需要拆遷更多的民房，招致不可抗力的社會問題，這是國內工程師最感棘手且難以克服的非技術性問題。

### 三、 地質探勘

雪山隧道施工不順，許多人質疑當初地質探勘不實。雪山隧道隧道長達 12.9 公里，最大覆蓋厚度 750 公尺，沿線被覆深，露頭不多，且距歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊衝擊區不遠，地質構造複雜。希望由地表有限的露頭與鑽孔或震測完全查明深層隧道沿線之地質細節，實有先天上的困難，現今科技尚無法達成，天下皆然。儘管如此，主辦單位仍然想盡辦法試圖查明沿線之主要地質構造、岩性、

地下水文及力學特性。規設階段自 72 年起就依據各階段所需精度，分期、分批進行地質調查，迄止 80 年共完成：

1. 隧道沿線區域之野外地質調查、遙感探測及航照判釋。
2. 地質鑽探共 59 孔，總長 4,887 公尺。其中有 3 孔係沿豎井位置鑽穿至隧道底部，並沿導坑東口鑽 1 孔 150 公尺之水平鑽孔。
3. 震測共 12 條，總長 26,450 公尺。
4. 地質構造之槽溝開挖 7 處，總體積 2,100 立方公尺。
5. 東洞口惡劣地質橫坑開挖長度 150 公尺。
6. 野外及室內相關之試驗。

以上調查工作共花一億元，相關報告有 46 冊之多，是當時國內最具規模之地質調查工作。地質調查資料均經綜合判斷解釋，對沿線之地層分佈、斷層位置、位態、寬度及性質均以公認方法合理推估記述，分段描述破碎岩盤狀況及地下水分佈，列入雪山隧道導坑工程發包文件土工設計資料，供施工單位參考。全線岩體品質亦經推估預行評分及分類，畫成隧道沿線地質剖面圖(詳圖三)，作為設計支撐、襯砌以及編製工程預算之依據。當時曾推估施工期間全線地下水總滲水量將達每秒 3,000 公升，瞬間最大湧水量可能達到每秒 1,000 公升以上，據以設計導坑仰拱排水溝的容量。石英岩之單壓強度可能高達 3,000 公斤/立方公尺，石英含量平均約 82%，總硬度平均約 105，供 TBM 設計製造及施工之參考用。

由於從地表完成的地質調查資料畢竟有限，爲了彌補不足，乃設計開闢導坑工程，在主隧道開工前直接了當查明隧道路線實質地質縱剖面及力學行爲，同時規定導坑 TBM 必須有足夠能力之鑽孔設備，全程作先進地質探查及必要之灌漿。施工期間亦編列 85,000,000 元之補充地質調查經費，以資配合。此間共完成了以下補充地質調查及相關報告 79 冊：

1. 區域重點野外地質複查、遙感探測及航照判釋。
2. 水文調查及地下水文評估。
3. 地質鑽孔共 7 孔，總長 1,320 公尺，大部分爲深孔，主要在查明四稜砂岩層之界面、石叻斷層及移位後之一號豎井地質。
4. 震測 2 條，共長 2,000 公尺。
5. 地電阻探查 1,500 公尺。
6. 隧道內水平長鑽孔 6 孔，總長 1,560 公尺。

7. 隧道內震波探測 41 次。

8. 相關之試驗及計測。

如今雪山隧道全線地質已分別由兩條主隧道、導坑及 6 座豎井的開挖而瞭然。實際所顯示之地質狀況與規設階段調查所預測，無論斷層位置與規模、岩盤破碎情形，剪裂帶出現頻率及地下水情形均甚接近。惟區域斷層間分佈不規則且延展不長之高低角度剪裂帶，其位置、位態與寬度則因科技限制，為規設階段調查所未能從地面鑽探掌握者。地下水的確實分佈狀況與出水量亦然，施工期間隧道最大總滲水量並未超過每秒 1000 公升，比當初推估值為低，惟湧水區段則如原推估。記得 88 年奧地利知名地質專家 G. Riedmueller 教授於研讀已有相關地質資料，深入隧道瞭解實際地質情況，並赴野外勘查露頭後，持悲觀的態度認為惡劣之四稜砂岩層比預估長 1,000 公尺，石礮斷層帶可能寬達 100 至 200 公尺，並且有大量高壓地下湧水。事實上四稜砂岩層僅比原推估的 3.5 公里長 255 公尺，石礮斷層亦僅比預估的 35 公尺寬 20 公尺，也無大量高壓地下湧水，可見地質推估之困難性。茲將推估之區域斷層與實際比照如表一。

#### 四、 隧道開挖工法之選擇

雪山隧道長達 12.9 公里，其完工時程為北宜高速公路通車之要徑。規劃之初，在 78 年間即由業主、顧問公司及後來之承包商高級主管偕同前往美國芝加哥參觀地下蓄洪水道工程直徑 9.1 至 10.8 公尺之 TBM 施工實況，當時每月開挖進度平均可達 335 公尺，參訪者印象非常深刻，回國後承商亦表示有信心而評估雪山隧道以 TBM 開挖之進度於正常地質段可達 350~400 公尺/月，斷層或困難地質段 250~300 公尺/月，於是 TBM 工法成為以後各階段研究之重要課題。

路線評選階段曾研究導坑與主隧道採用鑽炸法抑或 TBM 施工，結論是當時之地質資料尚不充足，難以評估主隧道採用 TBM 施工之可行性，應俟進一步地質調查後再評估。至於導坑工程則肯定建議採用 TBM 施工，因以當時之施工技術及水文地質條件，直徑 4 公尺左右之 TBM 施工，在世界上已有許多成功之業績及克服惡劣地質的經驗。

路線評選階段之諮詢顧問團經勘查現場及檢視地調資料，於分析工程進度、費用及技術性後，評估認為雪山隧道採用 TBM 施工技術上可行，惟強調施工經驗及工程管理相當重要，強烈建議應由國外有經驗的專業包商主導施工。

基本設計階段，Asian Expressway Consultants (AEC)曾針對雪山隧道採用傳

統鑽炸法及 TBM 工法作詳細之比較，完成專題報告。結論是以 TBM 工法施工比鑽炸法優越，故建議採用 TBM 工法施工。唯設計時開挖工法仍保留彈性，原則上地質不良區段採用鑽炸法，地質較佳段採用 TBM 工法，二者可視地質情況及施工技術調整，實際施工時確實作了很大的工法調整。

當時雪山隧道採用 TBM 施工尚有以下理由：

1. 雪山隧道有 10 公里位於台北水源特定區內，各主管單位均強烈表示儘可能減少在水源區內設施工面。
2. 雪山隧道如採用傳統鑽炸法施工，必須選擇於隧道中點另開一條施工橫坑長達 2.0 公里，縱坡 8%。無論出碴、排水、通風均有甚大之問題，並且有 6 個開挖工作面在水源區內進行，將嚴重影響台九線交通與環境。
3. 雪山隧道長達 12.9 公里，如採用傳統鑽炸法開挖，以台灣當時施工實績每個月約 50 公尺核計，則單向施工需要 20 年以上才能貫通，無法配合通車時程，並不符經濟效益。
4. 雪山隧道將近有 10 公里之長度地質情況良好，適合採用 TBM 施工，其施工進度可超過傳統鑽炸法之數倍以上，人力需求亦相對減少。其餘約 3 公里中之不良地質帶，先經地質處理後仍可以 TBM 施工。
5. TBM 由南口開挖，對出碴及排水相當有利，對環境影響最少，大部份碴料可直接利用作為頭城交流道之大量填方。
6. 長隧道採用機械化施工以縮短工期，是目前世界上隧道工程之趨勢，尤其 TBM 之性能在近年來已有甚大之提昇，廣被採用，亦可作為今後國內長隧道施工技術與經驗之培訓及借鏡。
7. 雪山隧道採用 TBM 施工，係經國外有實際經驗之專家就經濟性、時間性、安全性、人力需求及施工可行性詳細評估後決定。

TBM 受困後國外專家來現場勘查仍持肯定之看法，惟指出 TBM 施工適應之地質條件不如鑽炸法之廣泛，施工機動性亦較差，尤其 TBM 機具構造非常複雜，必須要有豐富之施工經驗、熟練之技術、良好之維護及嚴密之管理制度，於遭遇複雜之地質狀況時作出正確而迅速之處理，以四兩撥千斤之勢快速通過，否則任一環節發生差錯均將造成嚴重之後果。

## 五、 路線平面及縱剖面

### (一) 平面線形

駕駛者長時在單調的長隧道內行駛，會有輕微的睡意現象，隧道線形設計必須注意避免此現象發生，所以隧道線形以克羅梭曲線設計，最小變化曲率半徑為 1000 公尺，也就是駕駛者在隧道內必須隨時微調方向盤，保持清醒才能在車道上行駛，並避免急轉彎，以維行車安全。隧道通車以來，各界反映行駛雪山隧道平順舒適，隧道線形設計可謂理想。

## (二) 縱向坡度

坪林的標高約 200 公尺，而蘭陽平原的標高均在 40 公尺以下，亦即兩端的高低差在 160 公尺以上，雪山隧道兩端高程先天上已受此地理上的限制。如以施工性考量，由隧道兩端對向開挖以縮短工期，則隧道縱坡自以兩段上下坡設計最為理想，可達到自然重力排水及順坡出碴的經濟效益，惟因原有的 160 公尺高差，再加上提高山形高差，則使另一段的縱坡增加，不利通風。如以長隧道通風考量，隧道縱坡越小，則汽車廢氣排放量越少，可降低通風設施費及動力費。

雪山隧道全長有 9.6 公里長度係位於台北水源特定區內，規劃設計考量保護台北水源區的原則，施工中及營運後的隧道內廢污水不得排入北勢溪水源區，所以雪山隧道縱坡採單一坡度 1.25% 設計，兩端洞口高程相差 161 公尺，有利由南口施工之排水及出碴，並可減少北上線爬坡車輛的廢氣排放量、車輛輪胎磨損、燃料耗損，以及陡坡的交通肇事率。因為採取緩坡設計，可降低開挖出碴系統的剎車故障率及提高用路人的行車舒適性。

## 六、 工程佈置

### (一) 主隧道間距

歐洲之長隧道大部分都是單孔雙向車道隧道，很容易造成車輛對撞交通事故以及救難困難。雪山隧道是南下北上兩座隧道分離，各為單向雙車道，所以不會有上述之車輛對撞情形。雪山隧道於兩座主隧道之間尚有一座平行的導坑工程，事實上雪山隧道是由三座平行的隧道群所組成，因此隧道間距必須整體考量，基於隧道安全及地下通風機房設備空間之需要，設定主隧道平行間距為 60 公尺，於兩端洞口因銜接路工、橋梁工程以及交流道的佈置才縮減為 42 公尺。設計期間曾經辦理價值工程(VE)，建議將間距縮減為 40 公尺，以縮短各橫向坑道長度節省工程費，因基於上述理由並未接受建議。施工時南口段地質弱帶因隧道間距較小，曾發生岩柱應力集中，施工相互干擾，造成支撐工變形龜裂情形，所以主

隧道之間距 60 公尺是必要的。

## (二) 導坑工程

雪山隧道預期將遭遇東段惡劣地質區，同時爲了縮短工期及避免污染水源區，而決定採用 TBM 由南口向北口開挖，由於主隧道 TBM 直徑達 11.75 公尺，爲了降低大 TBM 的施工風險，所以在主隧道之外佈置一座平行之導坑工程，爲了雙軌運渣，直徑定爲 4.8 公尺，導坑比主隧道提早兩年施工，爲的是先行瞭解前方之地質情況、力學行爲及 TBM 技術培訓，必要時對主隧道先作地質處理，讓主隧道大 TBM 得以安然開挖通過。導坑的佈置經比較評估後認爲設於兩座主隧道中央之稍下方(路面相差 5 公尺)最爲理想，具有以下之優點：

1. 可先行有效排除主隧道地下水，降低主隧道施工湧水風險。
2. 方便處理兩側主隧道之地質弱帶。
3. 作爲增加主隧道工作面及材料運輸之通道。
4. 導坑先行挖通，有利施工排水及通風改善。
5. 導坑完工後作爲維修工作及緊急救難之通路。

導坑工程擔任先頭部隊，首當其衝，遭遇地質災變最多，但也提供了主坑增闢工作面及地質處理的要徑，居功厥偉。

## (三) 人行聯絡隧道

隧道內發生重大交通事故造成火災時，濃煙會飄浮在隧道頂拱吹向車行下游，約 400 公尺煙流會逐漸下降，危及人員安全，所以雪山隧道設計每 350 公尺有一座橫向之人行聯絡隧道，共有 28 座，緊急情況時旅客可棄車逃離座車，進入人行聯絡隧道避難，人行聯絡隧道內設有獨立的通風系統供氣並維持正壓，車道內之濃煙不會進入，避難人員可與行控中心聯絡及聽從指揮，經樓梯自導坑逃離事故現場。人行聯絡隧道於施工期間，提供主坑增闢各項工作之重要路徑，對縮短工期幫助很大。

## (四) 車行聯絡隧道

雪山隧道長達 12.9 公里，當隧道內發生交通事故，爲了利用南下、北上兩座隧道之優勢進行車輛疏散、調撥或救難通行，需要有車行聯絡隧道，本隧道每

1.4 公里設置一座，共有 8 座，其功能與人行聯絡隧道相同，人員亦可避難。

## (五) 緊急停車彎

當一般車輛緊急事故或工務車輛有需要在隧道內暫停，而不影響正常車輛之通行，有設置緊急停車彎的必要，所以於車行聯絡隧道兩端之對向車道各設 44.5 公尺長之緊急停車彎，並方便緊急情況時大型車輛順利轉向進入車行聯絡隧道，每座主隧道各有 8 座緊急停車彎。

## 七、 隧道斷面設計(圖四、圖五)

### (一) 隧道行車淨空

雪山隧道為山嶺區高速公路隧道，設計行車速率為每小時 80 公里，比 1 號及 3 號高速公路每小時 100 公里低，所以隧道斷面淨空亦略小，車道淨寬為 3.5 公尺，淨高為 4.6 公尺，也因此節省了巨額的工程費，隧道設兩車道寬 7.0 公尺，兩側各預留 30 公分路肩，所以路面總寬度 7.6 公尺，路面兩側各有 1.0 公尺寬之人行步道，緣石高 15 公分，淨高 2.0 公尺，此項低式人行步道，係考量緊急情況時方便老弱婦孺的迅速逃離。

隧道行車淨空與頂拱之上弦形空間，正好利用佈置照明燈具、噴流式風機及其他機電交控設施，以充分利用可貴的有限空間。

隧道路面採用 AC 路面，總厚度 56 公分，路面橫向超高最少 2%。

### (二) 隧道開挖支撐工

雪山隧道約有 10 公里地質良好，適合 TBM 開挖，所以原則上雪山隧道係規劃以 TBM 開挖，南口段約 1 公里之不良地質，則利用 TBM 製造期間，先行以傳統鑽炸法開挖，如地質仍然不佳，則鑽炸法可以繼續延長，以降低 TBM 的施工風險。

#### 1. 傳統鑽炸法支撐工

採用由鋼肋、岩栓、鋼線網及噴凝土所組成的半剛性支撐工，促使隧道周圍岩盤形成拱效應，以抵抗外圍之岩壓，並配合計測變形量之變化，採用必要之支撐工調整、補強、仰拱閉合或開挖面封面措施，以達安全。如遭遇不良地質，則儘可能預先作地質處理、止水或排水措施，然後才開挖。南口

地質條件較差，曾發生支撐工嚴重變形，經儘速仰拱閉合及補強後才穩定，惟一般承包商並不喜愛仰拱閉合工作，因其費時費工且影響開挖工作進度。

## 2. TBM 開挖支撐工

TBM 開挖的速度甚快，唯有快速安裝預鑄混凝土環片才能及時保護開挖面的安全。環片安裝時其與開挖周圍的孔隙，必須儘速回填細礫料及水泥漿，使其與岩盤緊密接成一體，才能有效的發揮環片的支撐功能。導坑係以基本設計成果發包，僅規定環片之厚度為 18 公分，承包商應根據其設計之 TBM 組裝方式，自行細部設計環片型式與結構，環片長度 1.2 公尺由 4 片組成，採頂拱楔型塊由前往後水平承插，環片間採用碗狀及凹凸公母榫連接，並未採用任何螺旋連接，以提高環片組裝速度，惟因環片承插型而有甚多菱角，當環片受力太大時，容易造成應力集中破損。主隧道之環片厚度為 35 公分，長度 1.4 公尺，由 6 片組成，K 塊置放於迎拱，其型式及安裝方式與瑞士兩座大型 TBM 開挖隧道相同，以上環片之混凝土強度均為 350kg/cm<sup>2</sup>。導坑南口因不良地質致環片有擠壓變形之損壞情形，主隧道之環片則少有損壞情形。

施工期間由於東段遭遇惡劣地質，施工進度嚴重落後，整體施工計畫必須調整，如導坑增加延長北口之鑽炸段，南口亦有區段變更為鑽炸工法。主坑北上線則於 TBM 災變埋沒之後，全線改為鑽炸法；主坑南下線亦於北口延長鑽炸段，並由 2 號豎井增闢工作面改用鑽炸法趕工。隧道斷面為了配合各種施工機具的施工與運輸動線，作了非常多的變更設計。

### (三) 隧道內層襯砌

雪山隧道全部設置 30 公分厚之內襯砌混凝土，內層襯砌與外層襯砌之間鋪設防水層，其目的是為提高行車安全、增加照明效果與通風效率、便於安裝交通安全設施及防止漏水。內層襯砌係於隧道變形穩定之後才澆置施工，基本上不承受岩壓，所以不鋪設鋼筋補強，只有於交叉段、風機吊掛處及地質弱帶或抽坍段，才鋪設鋼筋補強。

導坑工程因非公共行車之用，且為排除地下水以確保主隧道安全及節省工程費，所以不設內層襯砌。

### (四) 其他設施

#### 1. 管線廊道

雪山隧道以 TBM 開挖，形成圓型斷面，預鑄拱型蓋版隨 TBM 前進而安裝後，供運輸路面。於路面下方之空間自然形成作為管線廊道，供安裝消防

水管、給水管、電力電信電纜線及各橫向坑道之新鮮空氣送風管道

## 2. 電力管群

分別於人行步道下方佈設電力、電信及交控管群，強電及弱電則分邊佈設，以防干擾。

## 3. 排水系統

排水系統分為路面污水排水系統及隧道壁岩盤滲水排水系統。前者分設於路面兩側下方之暗溝，每隔 50 公尺設集水井乙處，防止路面漏油時，得以收集，以免火災時漫延全線擴大危險，污水排水系統於出口設油水分離池處理後才排放。後者之清水排水系統，係於隧道壁防水層之下方底部鋪設 15 公分直徑之水管，相距 25 公尺再排入中央盲溝幹管，管線廊道內亦設有排水溝以收集環片縫隙之地下水，導坑仰拱亦設排水溝排除地下滲水，以上地下滲水於南洞口收集後將供作頭城地區之自來水水源。

## 八、通風系統(圖六)

雪山隧道兩端洞口之高程相差 161 公尺，南下線下坡，車輛廢氣排放量較少；北上線上坡，車輛廢氣排放量較多。南下線如為交通尖峰時段，則同一時間北上線為離峰時段，反之亦然，這是雪山隧道的交通特性。兩座隧道之通風系統如分開獨立設計，則南下線僅需二座通風豎井，北上線則需要五座通風豎井，工程費浩大，而且並非全載運轉，造成投資浪費，於是研究如何將南下、北上線之不同通風情況加以混合利用，以達空氣品質要求。經詳細研究，雪山隧道共設置三組通風豎井及通風機房，以引進外面之新鮮空氣，同時將隧道內之廢氣排出，並於兩組通風豎井之間加入一組通風中繼站，將一線之空氣抽到另一線加以調和，共有三組中繼站，使 12.9 公里之長隧道形成 8 個獨立之通風迴路，當交通離峰時段則關閉中繼站之運轉，以節省能源，此項利用通風中繼站的理念，在世界上為首創。

每組通風豎井之進氣與排氣分開設立，相距 50 公尺，目的是避免污染空氣迴流進入隧道並減少豎井之直徑。經風洞試驗及電腦數值模擬分析，除了進、排氣井相距 50 公尺之外，兩井進出口高程相差 20 公尺，以避免廢氣迴流。一號豎井原設計位於大湖尾茶園區，豎井深度僅 345 公尺，由於當地居民疑慮排氣將影響茶葉及民生生活品質，長期激烈抗爭達七年之久，期間曾研究 35 個替代方案，經一再協調雙方同意井位往後山側移 400 公尺，並在排氣井井口以一座 340 公尺長之水平排氣隧道將廢氣排到山脊的背後，以消除民慮。經此調整後豎井共增加 312 公尺，工程費亦增加 2.6 億元。三組通風豎井之高度分別為一號 501 公尺、

二號 245 公尺及三號 450 公尺，內徑除二號豎井為 6.5 公尺之外，其餘均為 6.0 公尺。

通風豎井下方，於隧道高程設通風機房，進排氣機房相距 50 公尺，以避免大型地下洞穴開挖之岩體應力干擾。每組通風中繼站，分為 A、B 兩座機房雙向抽風，同樣相距 50 公尺。通風機房方圓 60 公尺內共有橫豎 7 條洞穴交會，並且各種斷面變化繁多，形成複雜的岩柱效應及岩體應力集中，設計時曾以 FLAG 程式作 3D 數值分析，施工期間除了局部變形較大之外，並未發生崩坍情形。

通車迄今，經過常態性的假日嚴重堵車，隧道內之空氣品質仍相當良好，證明本通風系統是良好的首創設計。

## 九、 結語

1. 北宜高速公路之路線係基於交通功能、設計標準、環島路網、交流道區位、環境影響、地質及工程佈置等複雜因素所評定。地質因素雖然可以工程技術克服，但與承包商的能力有關，甚難評估其風險，惟可確定的是路線如能北移，地質情況較佳，似可減少部分困難地質，縮短工期。
2. 雪山隧道長達 12.9 公里，最大覆蓋厚度達 750 公尺，雖然用了鉅額之地質調查費用，惟現今科技上的限制仍無法查明隧道沿線的地質細節，所以本工程乃於施工階段繼續補充地質調查。經比對實際地質狀況，主要地質構造、岩性及地下湧水均與原調查結果差異不大。斷層間分佈不規則之高低角度剪裂帶以及地下水確實位置與水量，事先均無法查明，只有在施工中經由前進探查確認一途。
3. TBM 開挖確實有其優越性，也是世界上長隧道開挖的趨勢。各界明知導坑 TBM 開挖不順，但國內其他計畫仍相繼採用，且有不錯的表現。世界上沒有任何一座長隧道之地質是全無地質弱帶，問題是地質弱帶的事前預防與處理，在費用及工期上與其他工法比較是否合理。畢竟 TBM 一旦發生事故，在處理上要比鑽炸法困難許多。所以選用 TBM 工法必須針對不可避免的地質風險、包商施工能力及工程管理等詳加評估。
4. 雪山隧道 TBM 之施工不順，主要原因係台灣第一次採用新工法，又從東口惡劣的地質開始開挖，無論是 TBM 的鑽機或整體設計均難以適應東段既堅硬又

易碎的四稜石英砂岩及高壓地下水。施工初期無法按照先探明地質狀況，必要時灌漿固結，使 TBM 得以安全通過的施工理念。從導坑 TBM 曾經於事前灌漿三次均安然通過的經驗，証實只要灌漿略微改善破碎帶的自立性，讓抽坍量不大於 TBM 出碴能力而將削刀頭面鈹堵死，則 TBM 就能快速的通過。所以施工中不能存冒險的心理或因工期的壓力而忽略灌漿工作，否則得不償失。

5. 雪山隧道 TBM 施工得到了許多寶貴的經驗，如適應石英砂岩的鑽機改善、削刀頭的耐磨處理、磨耗性之削刀選擇、重要機件之替換與安裝、四稜砂岩層破碎帶及高壓湧水的標準灌漿模式、TBM 受困的處理模式以及 TBM 的操作等。此案之寶貴經驗希望能在國內傳承與生根。
6. 雪山隧道的設計是結合了歐美及國內著名顧問公司的設計經驗與技術，在充分考量環境保護、工程安全及交通安全的原則下，長短、橫豎、大小不一的坑道共有 58 座之多，並有配備齊全之機、電及交控安全設施，是目前世界上高速公路長隧道工程規模最大、設備最完整與最現代化的長隧道。
7. 雪山隧道縱有完善的交通安全設施，但長隧道交通安全仍有賴於用路人共同維持，用路人應充分瞭解長隧道發生車禍可能造成的嚴重後果，將國內駕駛者之不良惡習徹底摒除，確實遵守交通規則，才能確保長隧道之行車安全。
8. 雪山隧道的通風系統模式是世界上首創，設計時深怕無法達到預期的通風效果，但是經過幾個月通車及假日嚴重塞車，隧道內空氣品質仍然相當良好，用路人亦反應行車感覺舒適，雪山隧道的整體設計可謂已達到了預期的目標。

## 參考文獻

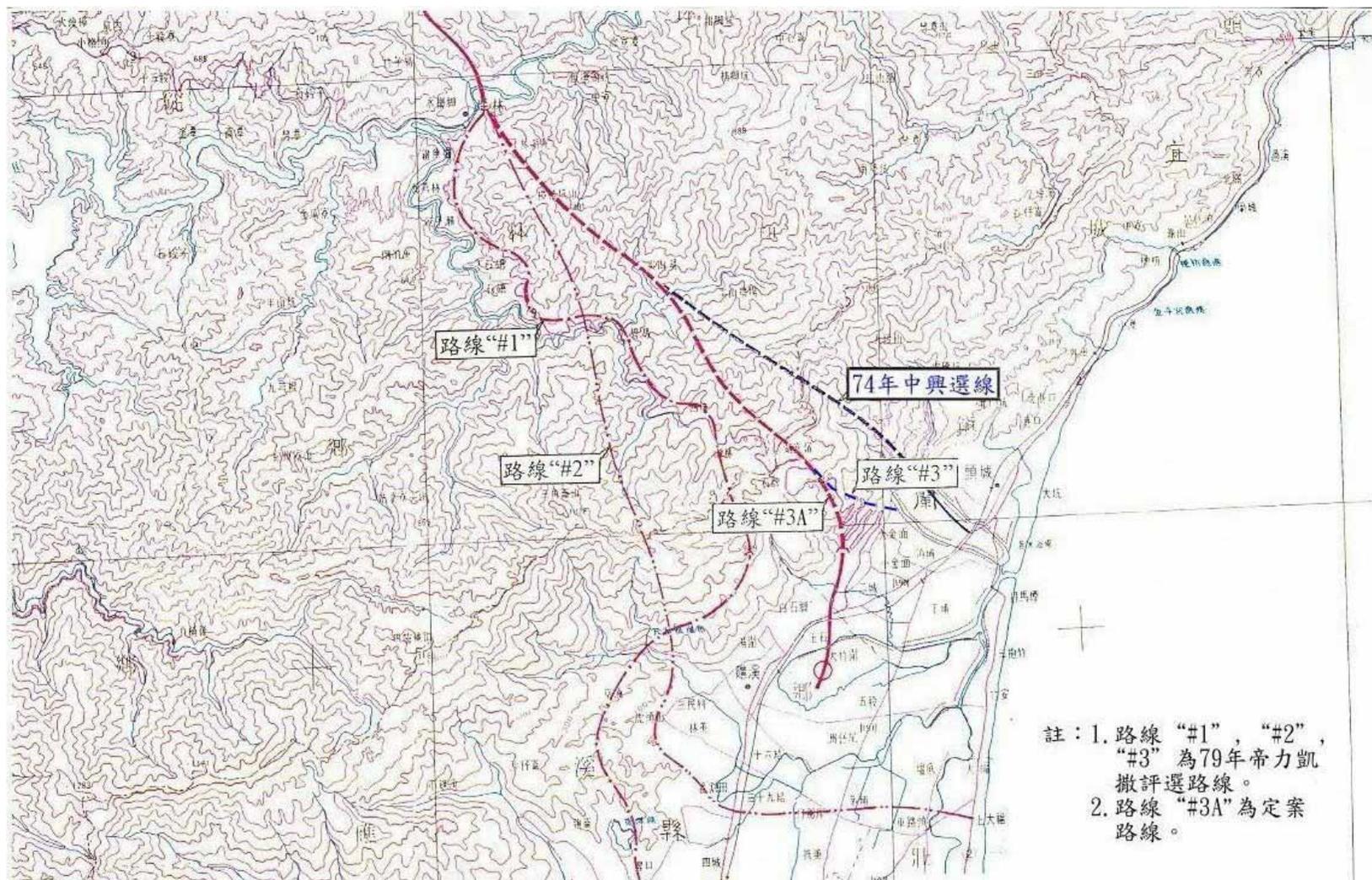
1. 中華顧問工程司，南港頭城隧道公路可行性研究報告，1982 年，公路總局。
2. 中興工程顧問社，南港頭城間隧道公路地質評估報告，1984 年，公路總局。
3. 美國帝力凱撒工程顧問公司，南港宜蘭快速道路可行性研究報告，1987 年，交通部運輸研究所。
4. 美國帝力凱撒工程顧問公司，南港宜蘭快速公路工程路線評選報告，1989 年，國道新建工程局。

5. 美國柏誠(PBI)、中興工程顧問社(SEC)及瑞士電華顧問公司(EWI)，北宜高速公路基本設計報告，1990年，國道新建工程局。
6. 林振基、陳嘉萍，長隧道之照明與眩光，土木水利，1992年2月。
7. 林振基、曾大仁，初步回顧雪山隧道規劃設計與施工，土木水利 2003年8月。

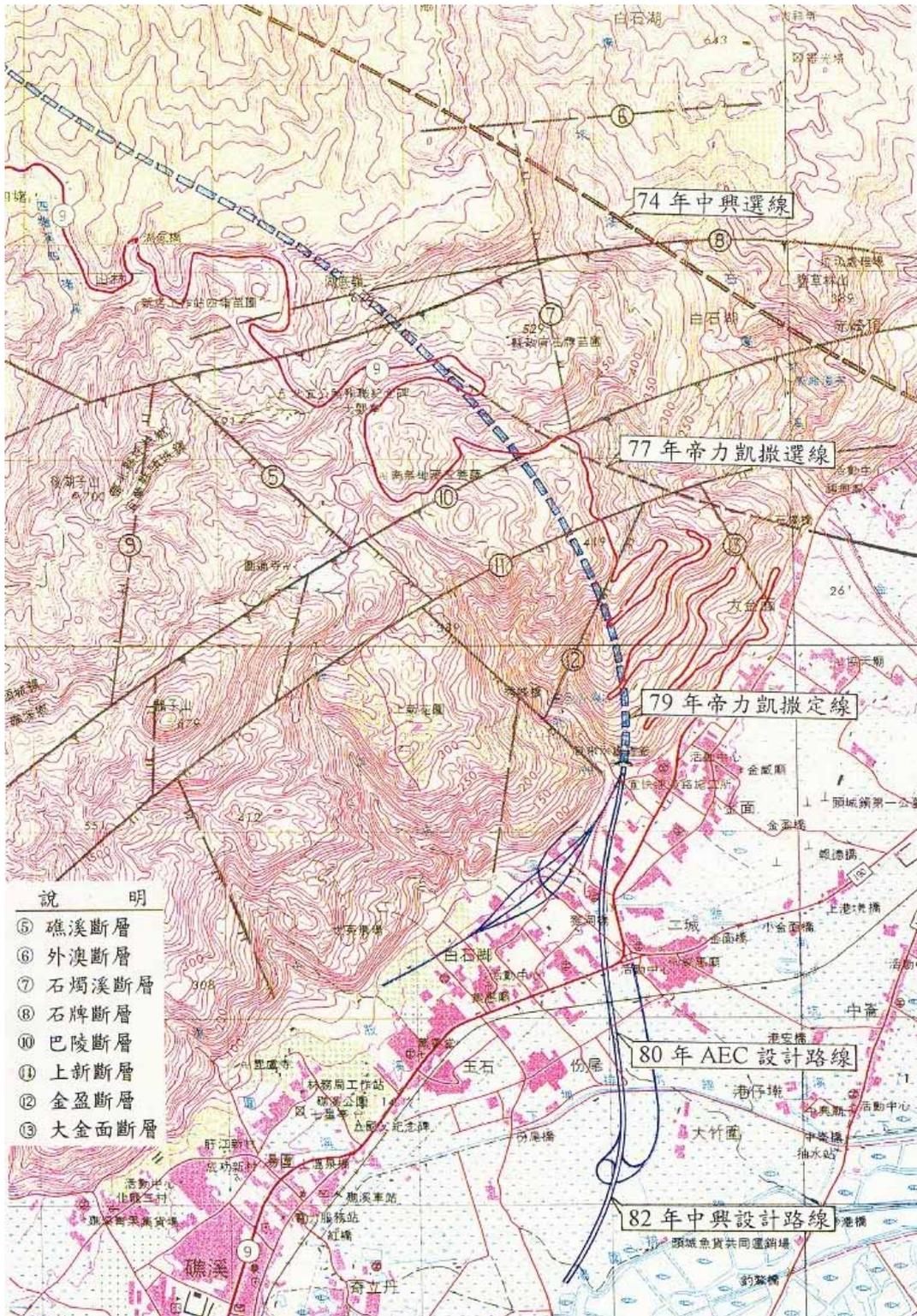
表一 雪山隧道區域斷層推估與實際比照表

地質構造		位置 (樁號*)	斷層帶 寬度 (m)	擾動帶 寬度 (m)	位態
1.石碇斷層	推估	33+250	10		N90E/80S
	實際	33+260	20	40	N74E/80S
2.石牌斷層北支	推估	37+750	20~30		N75E/80S
	實際	37+756	16	28	N80W/80S
3.石牌斷層南支	推估	37+900	10~20		N47E/80S
	實際	38+150	8	14	N25E/77S
4.巴陵斷層	推估	38+650	30		N40~70E/80S
	實際	38+680	6	20	N85E/78S
5.上新斷層	推估	39+250	10		N60E/80S
	實際	39+316	6	5	N50E/50S
6.金盈斷層	推估	39+700	20		N30E/70S
	實際	39+816	7	11	N20E/70S
7.四稜砂岩分界	推估	36+400~39+650, L=3,250m			
	實際	36+145~39+816, L=3,671m			

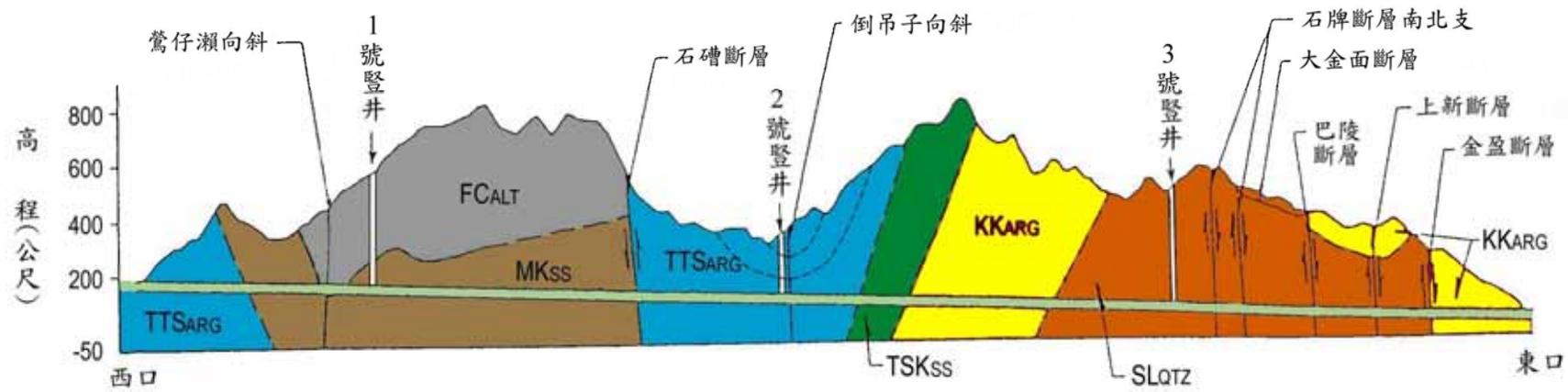
\* 導坑樁號



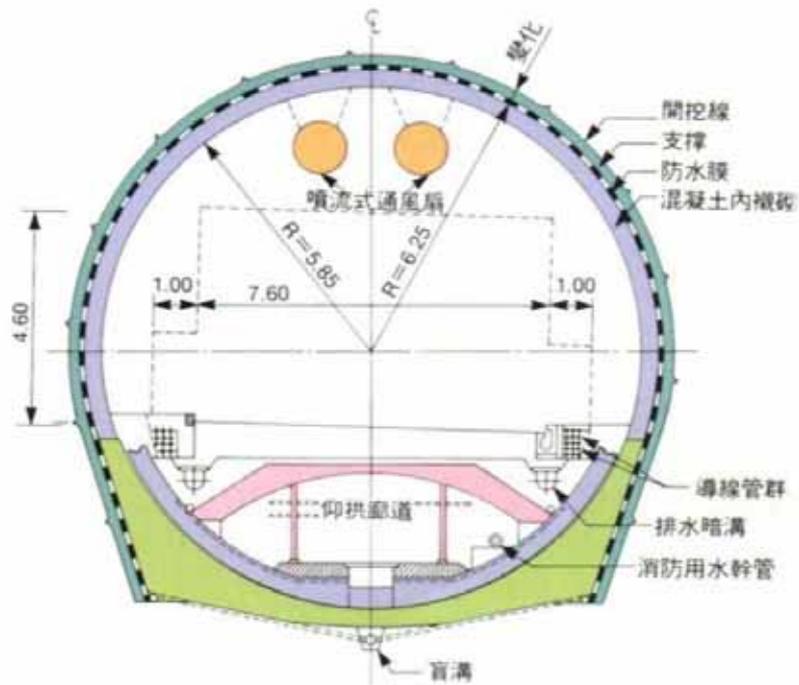
圖一 雪山隧道路線評選平面圖



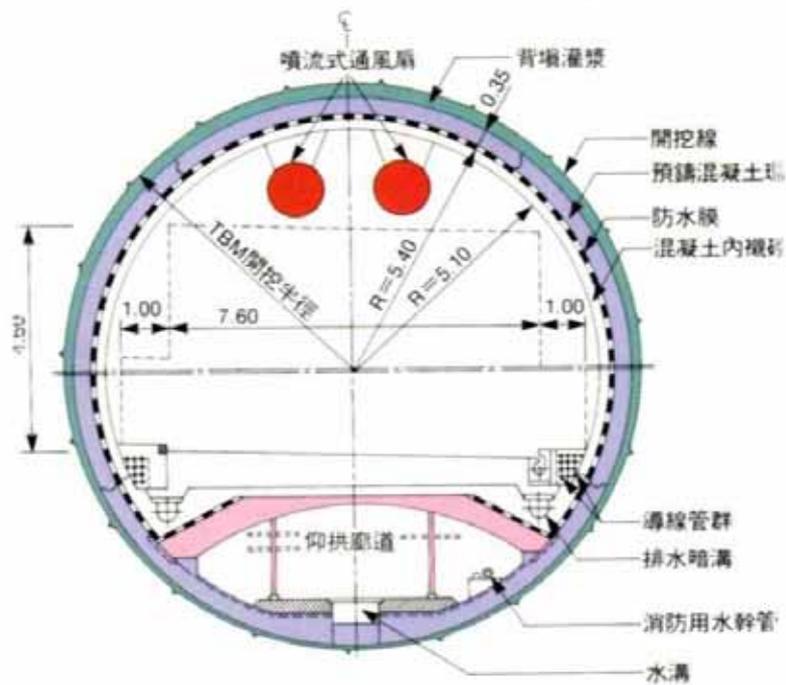
圖二 雪山隧道定線東段地質狀況圖



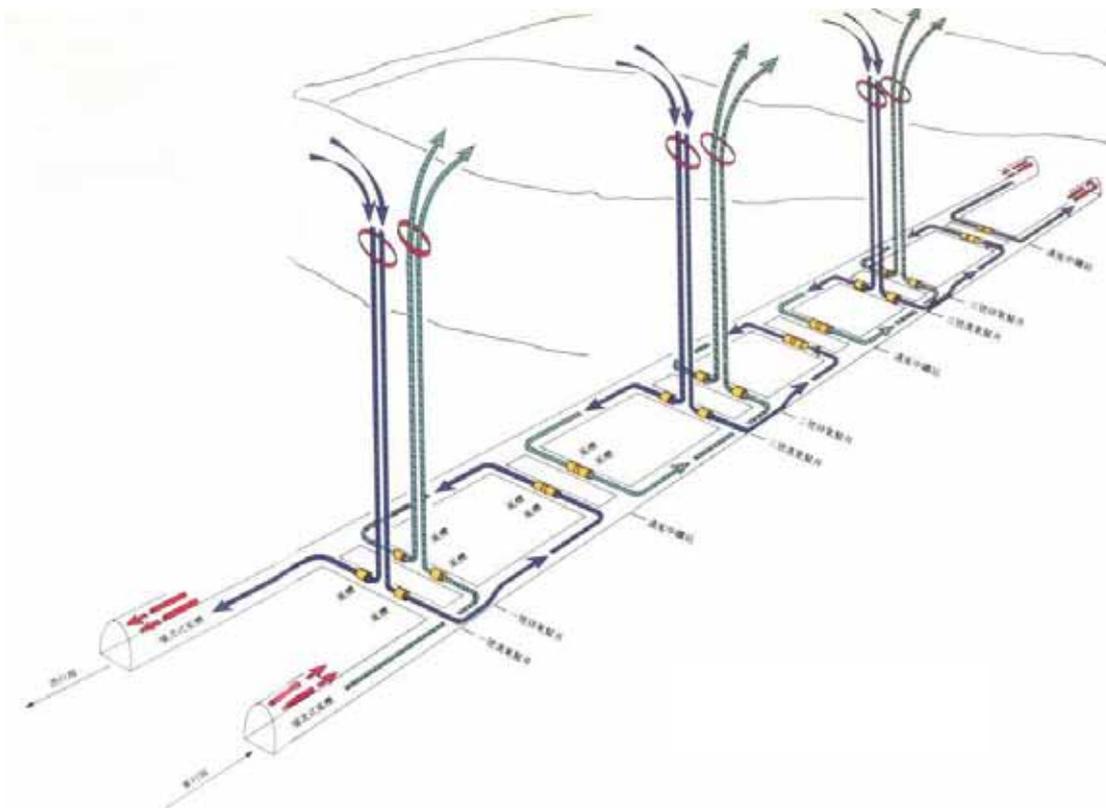
圖三 雪山隧道地質剖面圖



圖四 鑽炸法開挖標準斷面圖



圖五 TBM 開挖標準斷面圖



圖六 雪山隧道通風系統示意圖