

雪山隧道規劃設計與施工因應方案回顧

蔡茂生¹ 李友恆² 呂芳森³

¹ 國道新建工程局工務組 組長

² 國道新建工程局設計組 科長

³ 國道新建工程局設計組 副工程司

摘 要

雪山隧道為北宜高速公路之關鍵工程，穿越雪山山脈北支，隧道長達 12.9km，地表高約 850 m，最大覆土深度達 750m，沿線地質構造複雜，工程採用多項先進調查技術諸如遙感探測、航照判釋、水力破裂法應力測量等技術，規劃設計階段總計投入超過 1 億元的地質調查經費；主體設計包括主隧道、導坑、通風豎井、橫坑、洞口佈置、通風、照明、消防、逃生、通信、監控、維修、緊急供電系統等，各項設計與設施配置複雜且環環相扣；設計上並特別關注周遭茶樹生長以及水資源與環境的保護，締造出安全並兼顧生態永續發展之現代化隧道設計。工程自 80 年開工後施工過程中因地質惡劣、岩盤破碎並蘊含大量高壓地下水，工程進度嚴重遲滯，為提昇施工進度，經分別在 88 年間及 91 年初，採增加北洞口鑽炸法施工長度及利用 2 號豎井下主線增闢鑽炸法的工作面，終得以突破困境，完成此項世界矚目跨世紀的艱鉅工程，於 95 年 6 月 16 日通車，並為我國隧道工程史寫下光輝的一頁。本文將回顧過往，將雪山隧道之規劃設計及施工期間調整施工計畫階段調整作一簡單說明，提供隧道工程界參考及作為爾後推動類似工程建設之參考。

一、 前言

宜蘭地處台灣東北部，東邊面向太平洋，另三面為山地圍繞，由於此一相對封閉的地理空間，至 18 世紀明鄭時期才有大量漢人進入宜蘭開墾，也因此造就宜蘭獨具的交通歷史風貌，聯外交通建設亦成為各時期之施政重點，早在日治時期於公元 1916 年即完成宜蘭到台北的公路，即為現今北宜公路（台 9 線）的基礎，雖然早年於 1924 年即有台北宜蘭的鐵路完成，到 1980 年北迴鐵路的建設完成，仍使蘭陽地區對外交通極為不便。

為加速台灣東部的繁榮發展，縮短台北都會區和蘭陽平原兩地間的行車時間，最早自 71 年即由公路總局進行「南港頭城隧道公路可行性研究」，於 76 年由交通部運研所接續研究，到 77 年政府正式決定推動「國道南港宜蘭快速公路計畫」，並

於民國 78 年奉示提昇至高速公路標準，之後奉示將規劃路線由頭城延伸至蘇澳，計畫名稱隨後修改為「北宜高速公路計畫」。期間經路線評選、基本設計、細部設計等階段的縝密規劃設計，並導入價值工程評估及運用 PCM 以提昇營建管理績效。基本設計階段鑑於雪山隧道地質調查及營運維修需要，經顧問公司及專家一致建議設置導坑，並採用 TBM 開挖儘早施工，故於 79 年 12 月採基本設計成果辦理發包施工，由承包商配合施工需要辦理詳細設計，並依國際慣例提供地工設計摘要報告（GDSR）供施工廠商參考，於是 80 年 7 月以雪山隧道導坑工程開啓北宜高速公路建設的第一步。

為縮短台北和蘭陽平原間之距離，加速蘭陽地區發展，並帶動東部開發，而興建第一條橫貫東西部之北宜高速公路。其路線自台北市起，向東南方經石碇、坪林後，以長隧道貫穿雪山山脈，由頭城附近出口直抵蘭陽平原，全長約 31 公里，採雙向各二車道設計，全線共有五座隧道，隧道總長度達 20.1 公里，詳如圖 1。其中穿越中央山脈北支雪山山脈之隧道長 12.9 公里為最主要之關鍵工程，並首度引進全斷面隧道鑽掘機（TBM），為是台灣隧道工程史上之一大創舉。



圖 1 北宜高速公路路線圖

二、 規劃設計

(一) 辦理歷程

北宜高速公路南港頭城段自 71 年起年歷經不同單位主辦及國內、外顧問公司參與規劃設計，其間歷經可行性、路線研選、基本設計、細部設計等階段之規劃設計委辦情形，如表 1 所示，惟工程施工期間甚長，部分設計需配合時空變化與法規重新檢討修正。有關選線、路線規劃、整體工程佈置、功能設計及工方法研選等，均委聘國外有經驗的顧問公司、專家協助，以引進先進之技術，使配合工作之國內顧問公司人員得以順利技術轉移，提昇國內工程水準。其中主要參與計畫之顧問公司與工作要項如表 2 所示。

表 1 北宜高速公路各階段規劃設計一覽表

項次	階段	契約名稱	委託單位	時間	主辦單位
1	可行性研究	南港頭城隧道公路可行性研究	中華顧問工程司	71年12月	省公路局
2		南港頭城間隧道公路地質評估	中興工程顧問社	73年2月	省公路局
3		南港宜蘭隧道公路可行性研究	美國帝力凱撒顧問公司、中華顧問工程司、奧地利吉奧工程顧問公司	76年7月	交通部運輸研究所
4	路線評選	路線評選階段全線地質調查遙感探測與航照判釋工作	財團法人工業技術研究院	78年10月	南宜籌備處
5		路線評選階段「南港坪林段」「蘭陽平原段」地質調查	亞新工程顧問股份有限公司	78年10月	南宜籌備處
6		基本控制測量及一千分之一地形圖航測工作	中華民國航空測量及遙感探測學會	78年11月	南宜籌備處
7		南宜快速公路工程環境影響評估	中鼎工程股份有限公司	78年11月	南宜籌備處
8		路線評選階段坪林隧道地質調查服務工作	財團法人中興工程顧問社	78年12月	南宜籌備處
9		南港宜蘭快速公路工程路線評選工作	美商帝力凱撒國際顧問公司	78年12月	南宜籌備處
10	基本設計	基本設計服務契約	美國柏誠、瑞士電華、中興工程顧問社三家公司技術合作成立 AEC	79年6月	國工局
11		北宜高速公路(含蘇澳延伸段)運輸規劃分析	亞聯工程顧問股份有限公司	79年6月	國工局
12		國道北宜高速公路工程計畫基本設計補充測量工作	鉅工工程顧問股份有限公司	79年7月	國工局
13		基本設計階段南港坪林段地質調查服務工作	亞新工程顧問股份有限公司	79年8月	國工局
14		基本設計階段坪林頭城段地質調查服務工作	財團法人中興工程顧問社	79年8月	國工局
15	細部設計	國道北宜高速公路工程細部設計暨配合工作。	財團法人中興工程顧問社	81年2月	國工局
16		國道北宜高速公路交通控制系統工程細部設計	中華顧問工程司	82年10月	國工局

註 1：78年4月成立南港宜蘭快速公路工程籌備處（簡稱南宜籌備處），79年1月改制為國道新建工程局（簡稱國工局）。

註 2：國外顧問公司的英文全名如下：

- (1) 美國帝力凱撒：De Leuw Cather International Limited.
- (2) 奧地利吉奧：Geoconsult-Consulting Engineers.
- (3) 美國柏誠：Parsons Brinckerhoff International Inc.
- (4) 瑞士電華：Electrowatt Engineering Services Ltd.

表 2 北宜高速公路計畫主要參與之顧問單位

工作要項	委 託 顧 問
南港頭城隧道公路 可行性研究	美國帝力凱撒顧問公司、中華顧問工程司、奧地利吉奧工程顧問公司
南宜快速公路工程 環境影響評估	中鼎工程股份有限公司
南港宜蘭快速公路工程 路線評選工作	美商帝力凱撒國際顧問公司
地質調查服務工作	中興工程顧問公司、亞新工程顧問股份有限公司
基本設計	由美國 Parsons Brincherhoff International, Inc.(以下簡稱 PBI)、瑞士 Electrowatt Engineering Services Ltd.(以下簡稱 EWI)及中興工程顧問社三家公司技術合作成立 AEC 組成之團隊聯合承辦
細部設計	中興工程顧問公司

本公路最早之規劃要追溯至民國 71 年公路總局辦理之「南港頭城隧道公路可行性」研究，於 76 年間由交通部運研所接續辦理「南港宜蘭公路可行性研究」，研究成果經報請行政院核定，奉示辦理進一步之地質評估及環境影響，自路線”2”及”3”中評選出最佳路線，國工局（當時之南宜籌備處）即在 78 年間奉准成立並接續辦理本公路之先期規劃作業，辦理評選結果建議採用路線”3”，惟為利後續路線銜接，將隧道東口向南偏移，是為“3A”線，如圖 2 所示。繼路線評選之後由 AEC 組成之團隊聯合承辦基本設計，包括隧道、通風豎井、橫坑、洞口佈置、通風、照明、消防、逃生、通信、監控、維修、緊急供電系統及其他必要之功能研究與設計。於 80 年本計畫經國工局委託中興工程顧問公司辦理細部設計，根據基本設計構架完成各標發包文件，期間亦聘請多位國外專家指導，故本路包括雪山隧道經過上述階段之嚴謹作業程序，由歐美具經驗之顧問公司及專家參與規劃，可謂彙集國內外工程界之專業技術。

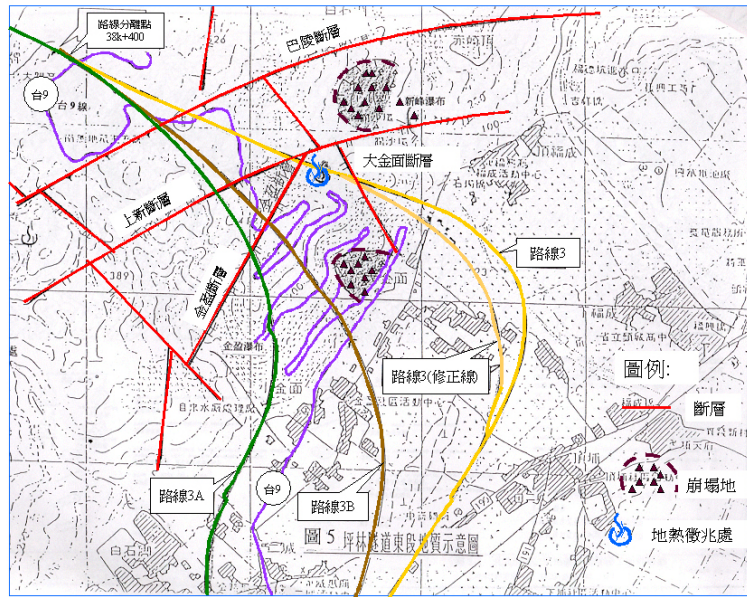


圖 2 雪山隧道東口路線與主要地質影響示意圖

(二) 路線規劃與標準

北宜高速公路路線自台北市起，向東南方經石碇、坪林後，以長隧道貫穿雪山山脈，由頭城附近出口直抵蘭陽平原，全長約 31 公里，採雙向各二車道設計，全線在山區蜿蜒通過，路線沿山區及溪谷行走，為維持天然景觀，故大部分均採隧道或高架橋梁工程克服，隧道特多且長，全段共有隧道五座，總長度達 20.1 公里，佔北宜高全長 65%，其中之雪山隧道長 12.9 公里更列為全球第五長之公路隧道，橋梁工程長 6.2 公里，佔 20%，道路工程長 4.7 公里，佔 15%。全線計設置南港系統交流道、石碇交流道及頭城交流道共 3 處及坪林行控中心專用道 1 處。如圖 3~圖 6 所示。



圖 3 南港系統交流道



圖 4 石碇交流道



圖 5 坪林行控中心與專用道



圖 6 頭城交流道

三、 雪山隧道

(一) 地質環境

台灣島因位處歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊衝撞處，地質構造錯綜複雜，且由於板塊互相擠壓作用，島內山巒疊起，約有四分之三的面積為山脈、丘陵等山區，如圖 7 所示，在島上擁有多樣且複雜的地形，遍佈著高密度的斷層與褶皺等地質構造；且由於台灣地區雨量豐沛，年降雨量遠比世界其他地區高，獨特之水文環境常造成地下水沿著上述地體構造之破碎帶蓄積，造成隧道施工中難以預期的湧水現象，而雪山隧道即於此惡烈環境下，穿越雪山山脈地質區的北支，地表最大高程約 850m，最大覆土深度約 750 m，其北洞口位於翡翠水庫上游之台北水源特定區，於坪林與北勢溪橋連接，隧道全長 12.9 km，南洞口以路堤填築段及頭城高架橋，往南接續頭城蘇澳段，全線衛星影像如圖 8 所示。

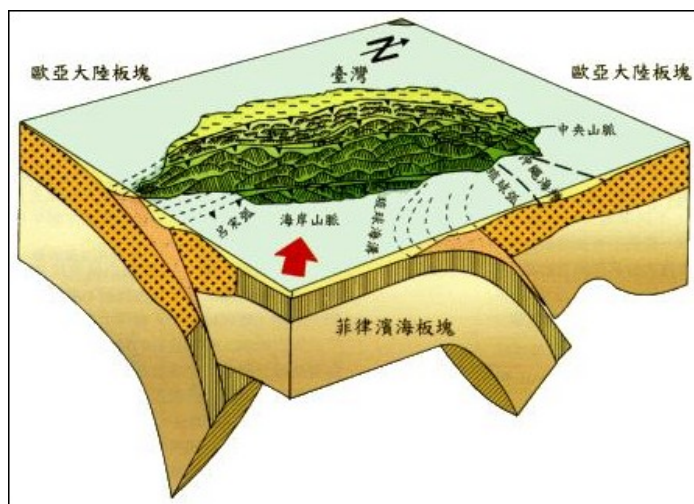


圖 7 台灣地體構造

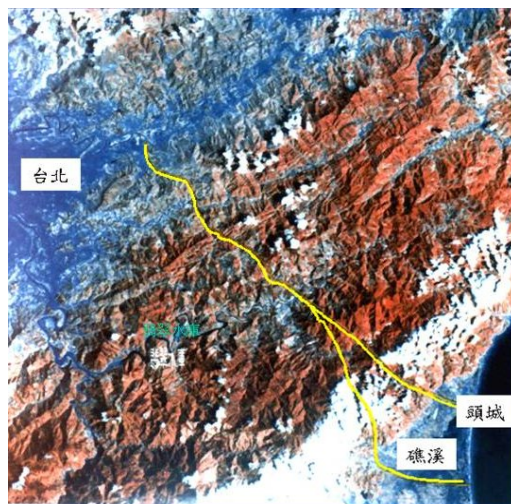


圖 8 北宜高衛星影像圖

雪山隧道全線均位於雪山山脈地質區，沿線地盤係由已褶皺之第三紀沉積岩地層構成，屬於造山帶中之褶皺衝斷帶。除區域性皺軸及衝斷層係主要構造單元外，造山運動產生橫切地層走向之橫移斷層及局部之正斷層，更添增地質構造的複雜程度。

(二) 主要地質調查工作與成果

雪山隧道長地質構造複雜，規劃設計至施工階段依精度需求循序辦理地質調查工作，期間主要之地質調查工作項目如表 3 所示，地質調查隧道工程執行方面，由於方法及技術限制，具有相當程度的不確定性，為進一步確實掌握開挖後實際之地質情況，於施工階段，雪山隧道亦擬定有若干調查工作，以期能降低施工地質風險。調查工作包括開挖面地質記錄、監測、現地應力試驗、室內試驗、前進探測孔，其中配合 T B M 施工時施作之前進探測孔，藉以事先了解 T B M 開挖面前方的地質情況，做為後續施工之依據。

表 3 雪山隧道規劃設計階段地質調查主要工作項目

主要工作項目	說明
1.遙感探測與航照判釋	了解大區域之工程地質，以為後續詳細調查計畫擬定之參考。
2.野外地質調查	詳細了解隧道沿線地表之工程地質。
3.折射法震測	了解隧道沿線地表下約 50 公尺範圍內地層及地質構造之震波波速。
4.鑽探	詳細了解豎井及隧道沿線主要地層及地質構造之相關地質與地工資料。
5.槽溝開挖	了解隧道沿線主要斷層之位置及相關地質與地工資料。
6.橫坑探查	了解隧道洞口段之實際地質及開挖後岩體顯現之行爲。
7.現地試驗	了解現場主要岩體及地質構造之力學行爲及當地應力，以為分析設計之依據。
8.室內試驗	了解岩石之力學參數以為分析設計之依據。

雪山隧道除了上述一般傳統之野外地質調查、震測、鑽探等調查方法外，曾首次有系統的應用遙感探測與航照判釋之技術，以期充份了解大區域工程地質，此外亦首次引進水力破裂法當地應力測量技術，了解隧道沿線當地應力大小，做為隧道支撐分析設計之依據。以經費而言，雪山隧道於規劃設計階段之地質調查工作，總計約花費一億元，而施工階段亦編列有約八仟伍佰萬元之經費，合計約佔總工程費之 1%，各階段地質探查數量如表 4 所示。

表 4 北宜高速公路雪山隧道各階段地質探查一覽表

項目	單位	地質評估 (73 年)	路線評選 (78~79 年)	基本設計 (79~80 年)	細部設計 (81~82 年)	施工 (80~92 年)	合計
野外地質調查	-	V	V	V	V	V	V
遙感探測與航照判釋	-	-	V	V	-	-	V
鑽探	孔	16	15	30	15	10	86
	m	1144.5	1036.6	2246.0	834.0	2271.2	7532.3
震測	條	4	9	1	-	2	16
	m	1150.0	12190.0	13110.0	-	2000.0	28450.0
槽溝開挖	處	-	-	7	-	-	7
	m ³	-	-	2099.3	-	-	2099.3
煤坑調查	-	-	-	-	-	-	-
橫坑開挖	m	-	-	150	-	-	150
地電阻探測	m	-	-	-	3 點	6770.0	6770.0
導坑 TBM 前進探查	次	-	-	-	-	154	154
	m	-	-	-	-	5661.6	5661.6
水平長鑽孔	孔	-	-	-	-	6	6
	m	-	-	-	-	1560.4	1560.4
震波探測	主坑 TSP	次	-	-	-	9	9
	導坑 TSP	次	-	-	-	27	27
	導坑 HSP	次	-	-	-	5	5
地下水同位素定年	主坑	次	-	-	-	3	3
	導坑	次	-	-	-	17	17

* 本表未包括岩力室內及現地試驗

雪山隧道沿線地質係由已褶皺之始新世、漸新世及少部份中新世沉積岩地層構成，地層之出露順序，隧道沿線地層的分佈以年代而言，由北口的第三紀中新世，向南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，沿線遭遇之區域性主要褶皺構造為鶯仔瀨向斜及倒吊仔向斜。主要斷層有六條，即石碇斷層、石牌斷層、大金面斷層、巴陵斷層、上新斷層及金盈斷層。除石碇斷層外，主要斷層多發育於隧道線之南半部。另經辨別之主要及次要褶皺構造共 11 條，除鶯仔瀨向斜及倒吊子向斜兩主要褶皺外，其餘 9 條次要褶皺均延伸較短。雪山隧道地質構造單元與區域地質圖如圖 9 及圖 10 所示。

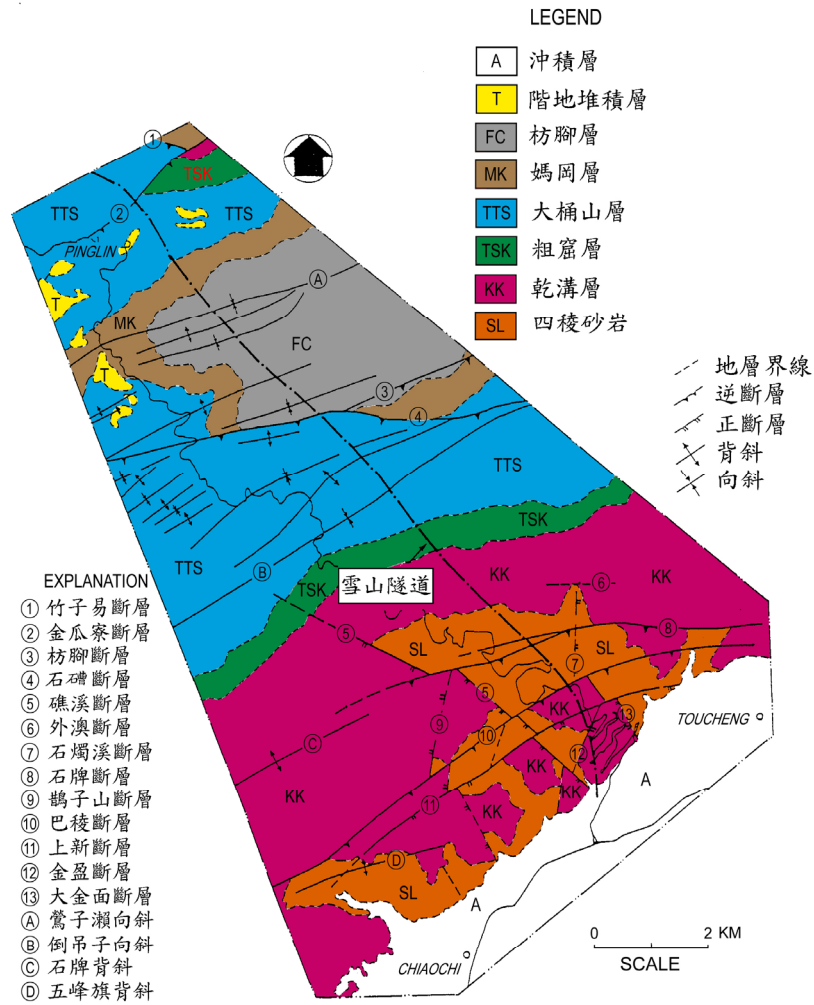


圖 9 雪山隧道平面地質圖

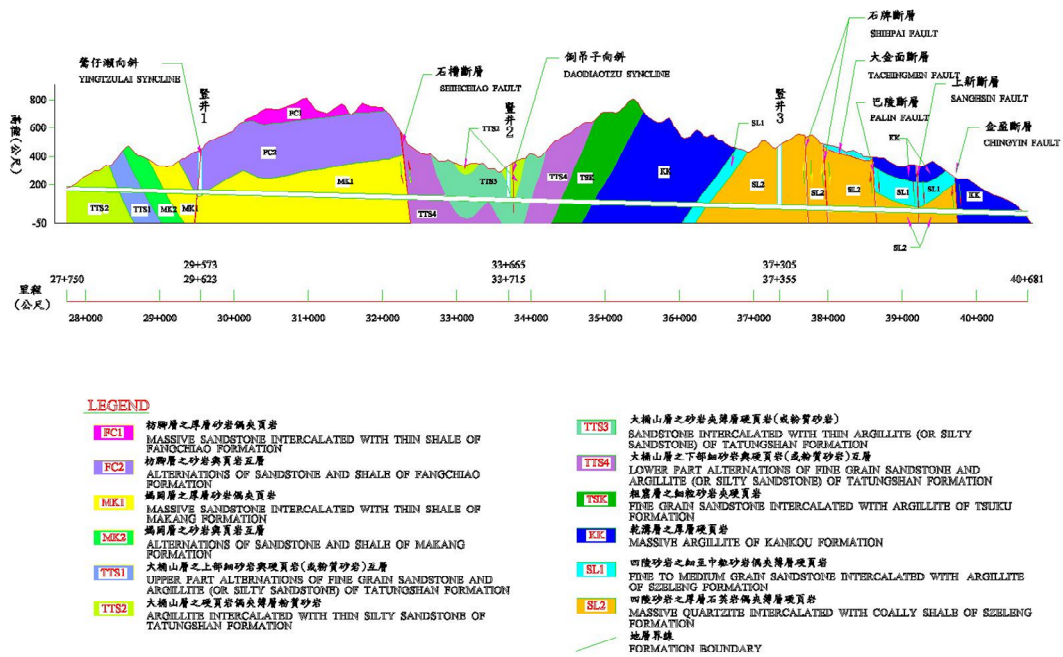


圖 10 雪山隧道地質剖面圖

雪山隧道南端約三分之一長度屬乾溝層及四稜砂岩地層，主要由硬頁岩及變質的石英砂岩所組成，剪裂帶及斷層帶出現頻繁，岩盤高度破碎，岩體品質多為差至極差。隧道其餘約三分之二長度，主要為砂岩、頁岩及砂頁岩互層所組成，除石礮斷層及鶯仔瀨向斜等區段外，岩體品質多為尚可至佳。而區域斷層間分佈有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，為規設階段調查無法能由地面鑽探掌握。隧道南段有超過 3.6 公里佔隧道總長 1/4 長屬四稜砂岩區段，其中粗粒石英岩單壓強度高達 $2,500\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上，因為受大地應力擠壓及拉張，致斷層剪裂帶交錯密佈、節理發達，不僅地質複雜變化快速且岩體極為破碎，且因地下水之滲入而形成含水層，此含水層又因斷層泥阻隔，造成複雜不連續水體，讓初期於南段隧道之施工與 T B M 吃盡苦頭。



圖 11 導坑東段 36k+204 處 T B M 切削岩面軌跡

四、 雪山隧道設計

(一) 線形規劃設計

雪山隧道路線規劃經可行性研究、路線評選及基本設計等階段審慎評估後加以確定，北端起自坪林北勢溪右岸，南端則自頭城進入蘭陽平原。以下分別就平面線形與縱向坡度加以說明

1. 平面線型：雪山隧道北口連接坪林行控中心專用道，該處是坪林唯一設置交流道的開闊地形，別無選擇，亦即雪山隧道北口位置沒有其他較佳選案，而南口因面對蘭陽平原的廣大腹地，則有較多的選案，包括頭城、礁溪及宜蘭等三處出口，經詳細評估考量高速公路服務旅客功能性、頭城交流道區位及頭城蘇澳段延伸線的銜接性，而選擇於頭城為出口，同時為了行車交通安全，避免出隧道即面對東方太陽旭昇強光的眩光現象影響，及考量安全視距，調整出洞口之線型，配置平曲線最小轉彎半徑 600 公尺，而將南口線型轉向南側，以策安全。為避免行車駕駛疲勞及視覺焦點遲滯，駕駛者在單調的長隧道密閉空間內行駛會有催眠作用，所以隧道線型以克羅梭曲線設計，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，保持清醒才能上車道行駛，並避免急轉彎，以維行車安全。
2. 縱向坡度：北洞口坪林端的標高約 208 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，則隧道縱坡以兩段上下坡設計最為理想，可以達到自然重力排水及順坡出碴的經濟效益，但因原有的 160 公尺高差，再加上提高山形高差，則將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小，可降低通風設施費及動力費。另雪山隧道全長有 9.6 公里長度係位於台北水源特定區內，原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，並可減少北上線爬坡車輛的廢氣排放量，以及陡坡的交通肇事率。由坪林端以 1.25% 坡度往頭城端下降至標高 44 公尺，隧道內路面正常路拱為 2%，最大超高為 3.4%。

(二) 隧道工程布置

隧道配置主要包括兩座主坑、一座導坑。另為通風需要，採用加強縱流式通風系統，沿線設置三組豎井，每組包括進氣井與出氣井各一，每組豎井底部均設置一座地下通風機房，隧道內三組通風機房之間加設通風中繼站，以調和空氣品質，共有三組通風中繼站，每組之新鮮空氣及廢氣中繼站分開相距 50m，豎井尺寸概要，如表 5 所示。東西行兩隧道間每隔 350m 設人行聯絡隧道乙座，計 28 座；

每隔 1.4km 設車行聯絡隧道乙座，計 8 座供作車輛疏導之用，另於隧道各車行聯絡隧道處，均設緊急停車彎乙處；聯絡隧道位置於主坑施工時，得視地質狀況適度調整；兩隧道主坑間之距離(中心至中心)主要依據隧道直徑(約 12m)及力學分析結果定為 60m，期使應力於開挖後周圍地盤將因解壓而造成應力重新分佈，收斂至隧道開挖前之初始應力(Initial Stress)狀態，同時為減少隧道洞口之用地，於洞口處隧道間距縮減為 42m。圖 12 所示為雪山隧道及通風豎井透視圖。



圖 12 雪山隧道群工程布置透視圖

表 5- 雪山隧道通風豎井內徑與深度一覽表。

通風豎井	1 號通風豎井		2 號通風豎井		3 號通風豎井	
	進氣井	排氣井	進氣井	排氣井	進氣井	排氣井
內徑(m)	6.00	6.00	6.50	6.50	6.00	6.00
深度(m)	492.7	512.3	250.4	260.1	450.7	470.3

(三) 隧道斷面設計與配置

隧道南北向線均為單向雙線車道，由於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，行車淨高為 4.6 公尺，路面全寬為 7.6 公尺，包含二車道，每線車道寬 3.5 公尺及兩側各 0.3 公尺之路肩，兩側步道各寬 1.0 公尺，淨高為 2 公尺，可供避難及維修人員步行之用，緣石高 15 公分，以利故障車輛緊急開門逃生，雪山隧道斷面佈置，如圖 13 所示。

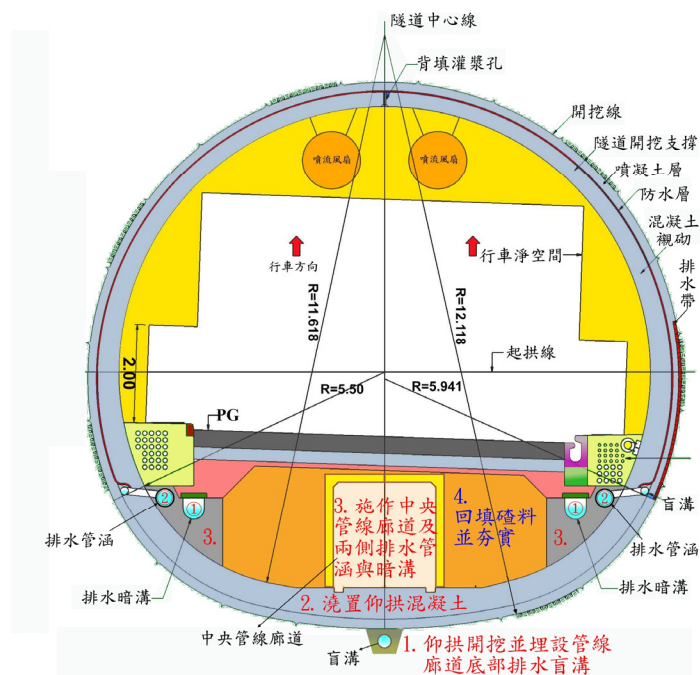


圖 13 雪山隧道斷面佈置示意圖

隧道開挖斷面依施工方法不同而異，以 TBM 開挖時採用外徑約 11.8 公尺之圓形斷面，初期襯砌以使用預鑄環片為主；以鑽炸法施工時則開挖斷面為馬蹄形。隧道路面下置拱形預鑄混凝土蓋版，蓋版以下，仰拱環片以上之空間為仰拱廊道，電力、電訊及消防用之管線系統則安裝於廊道內，此外仰拱廊道並作為輸送新鮮空氣至聯絡隧道及地下機房的通道。隧道通風用之噴流風扇設於行車淨空之上方，同時隧道兩側於行車淨空之外，設置標誌、號誌及監測設施於隧道側牆上；隧道內之排水系統分別為路面污水系統及地下水排水系統。圖 14 及圖 15 分別為雪山隧道典型 TBM 開挖段及鑽炸法開挖段斷面示意圖。

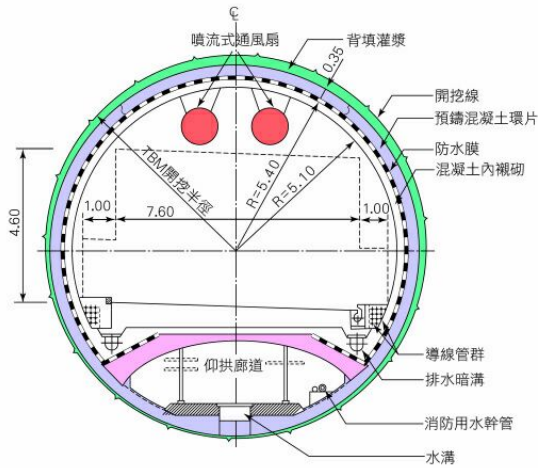


圖 14 TBM 開挖段斷面示意圖

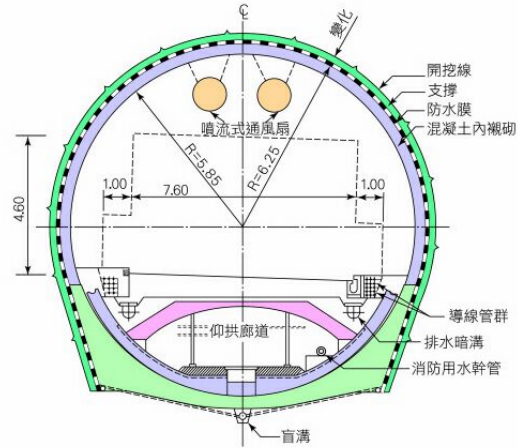


圖 15 鑽炸法開挖段斷面示意圖

(四) 探查導坑

雪山隧道全段設置一全長 12.9 公里之導坑，位於兩座主隧道中間偏下位置，直徑 4.8 公尺，施工階段較主隧道先行開挖，作為地質探查、預先排水、處理主隧道地層降低後續主坑施工風險，並可供作輔助通道之用。完工後之路面寬 3.0 公尺，淨高 2.9 公尺，每 350 公尺設避車彎，且均設樓梯與主隧道之人行橫坑及車行橫坑相連接，主要提供營運階段主隧道發生緊急事故時之人員避難、救援車輛行駛路徑及維護、運轉、通達機房等獨立性通路，主隧道與導坑之關係位置，如圖 16 所示。

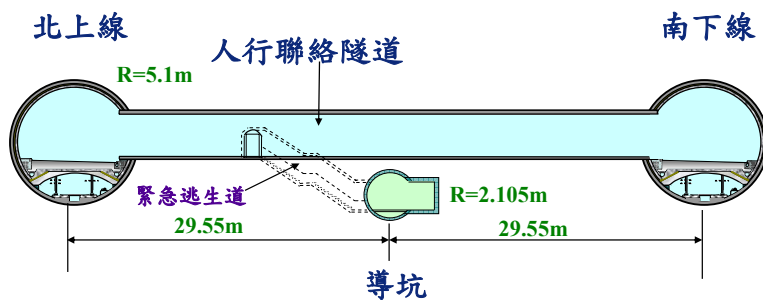


圖 16 雪山隧道主坑及導坑關係位置圖

(五) 機電交控設施配置

1. 通風系統

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。規設經評估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。經詳細研究評估後，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，將隧道內之廢氣排除，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，如圖 17 所示，當交通離峰時段則關閉中繼站之運轉，以節省能源。

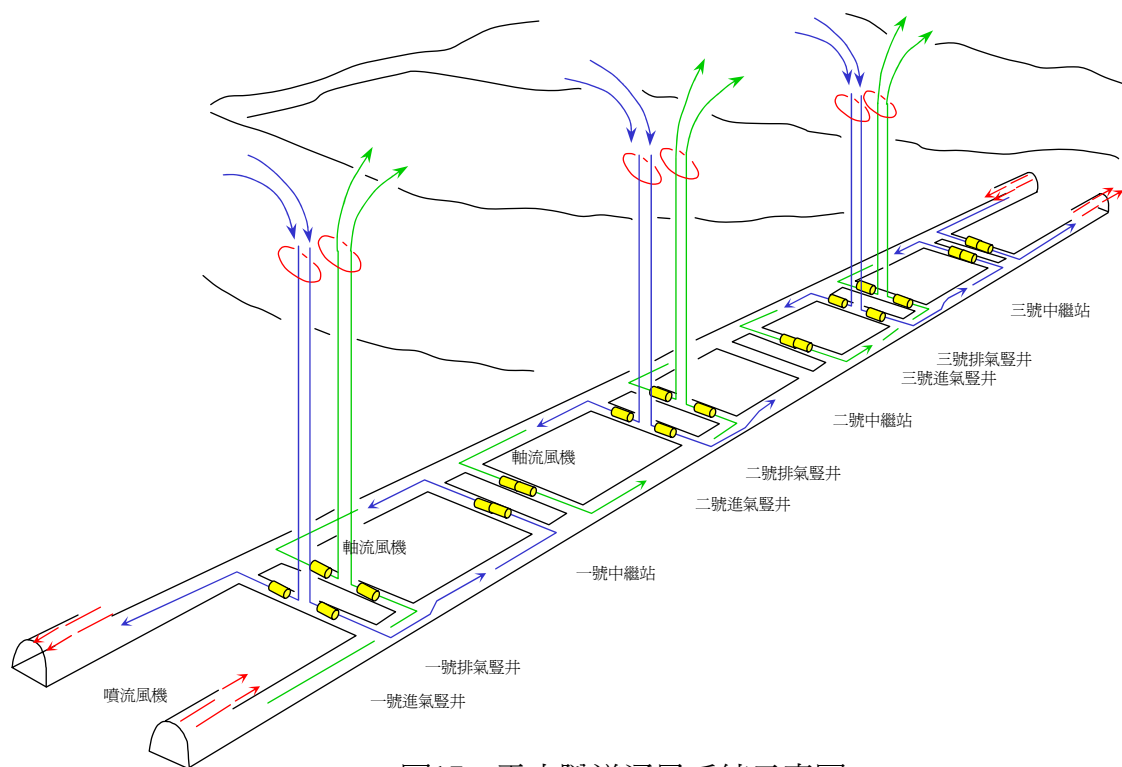


圖17 雪山隧道通風系統示意圖

通風換氣站之功能為將新鮮空氣由進氣豎井引入隧道，將隧道內污濁空氣或發生火災之煙霧經由排氣豎井排出。而通風中繼站之功能為將交通流量較低之該孔隧道內較乾淨之空氣，引入另一孔隧道內稀釋其較污濁空氣，以節省能源提高整體通風系統運轉效益。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，同時避免大型地

下洞穴開挖之岩體應力干擾。每組通風中繼站，分爲 A、B 兩座機房雙向抽風，同樣相距 50 公尺，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，以儘可能避免廢氣迴流。如圖 18 所示。

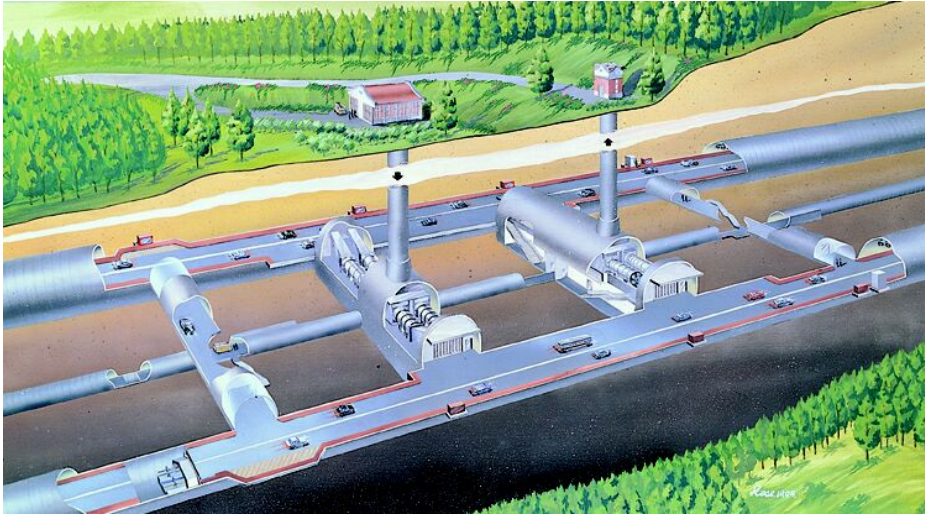


圖 18 雪山隧道及通風豎井透視圖

雪山隧道一號豎井原設計位於坪林鄉大湖尾村之茶園區，由於當地居民長期強烈抗爭擔心污染茶園，因而將豎井沿導坑線上往東南位移約 400 m，再設長約 320 m 之水平排氣隧道連接排氣豎井，將廢氣排到山脊的背後，以消除民慮，另為減輕施工對當地環境之衝擊，除利用既有產業道路外，另闢 800 m 之通達道路到達移位後之豎井位置。

2. 機電交控設施

雪山隧道設置車行聯絡橫坑，緊急時車輛可經此橫坑駛向另一孔隧道疏散，而遇緊急救援時，救援人員亦可經由導坑至車行橫坑，緊急停車彎提供車輛故障或緊急停車或避車之用；設置之人行聯絡橫坑，可提供緊急時車內人員藉此橫坑逃離現場或逃至導坑疏散，如圖 18 所示。另每隔 50 公尺設消防栓一處；每隔 175 公尺設緊急聯絡電話一處；隧道內尚有交通安全管制設施、照明設施、通風設施、路況監測設施及火警消防系統設施與疏散指引設施等。交通控制系統係運用資料蒐集子系統之各項蒐集方式與設備，將交通資訊經由通訊傳輸子系統傳至坪林交控中心，經電腦處理研析交通策略及反應計畫後，再經由傳輸子系統及資訊顯示子系統，將路況及各種管制訊息傳達給用路人，以達到通報、預警、指引、事故處理、急難救助等功能，如圖 19 所示。

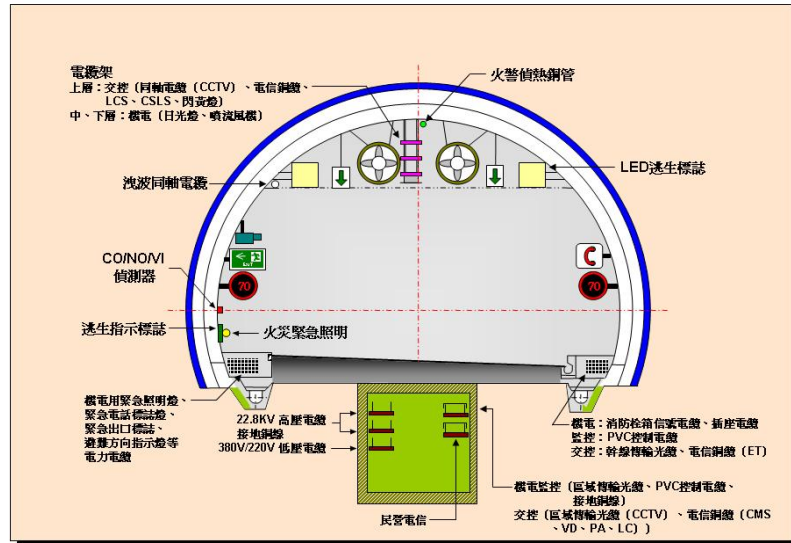


圖 19 隧道機電設備配置概要

(六) 里程辨識系統圖案

北雪山隧道長達 12.9 km，考量長時間行駛於長隧道封閉空間內難免令人產生焦慮及壓迫感，為破除用路人對隧道的呆板陰暗印象，舒緩用路人長時間行駛於封閉空間內單調枯燥的情緒，規設階段以動畫模擬數，原經選定主要圖案置於發包圖以作隧道側壁塗漆之依據，惟隨著北二高隧道之開通營運，經檢討維修、成本等因素後，僅保留近洞口 500 m 段設有側壁塗漆。至施工後期經檢討為提高用路人行駛於隧道中對時空之辨識感，因此計劃隧道每隔 1 km 處設置有簡單之里程辨識系統圖案，以利用路人辨識行車位置。

里程辨識系統圖案設計理念為「穿越一條美麗的文化時空隧道」，以柔性之藝術圖案構築成「時光拼織 12.9」之設計主題，整體設計構想起始於隧道開鑿的一土一石工程如同織布的一針一線般緊密又謹慎，期以傳統民族服飾圖案象徵不同文化的內涵與融合，並將美術館之概念植入於隧道空間內，煦麗的圖案色彩如同迎賓的壁毯，除注入新鮮活力圖案與文化氣息，並可增加用路人對長隧道行駛時空之辨識，舒緩用路人單調枯燥的心情。

雪山隧道內每隔 1 km 處，於隧道兩側壁面設置 1 組圖案，每孔隧道各設置 12 組，每組圖案包含左牆面（車行方向）之傳統壁飾圖案及右牆面之里程數字辨識系統，使用路人同時沈浸於傳統文化及科技交融的饗宴中，如圖 20a、20b 所示。



圖 20a 雪山隧道原住民服飾圖(南下線)

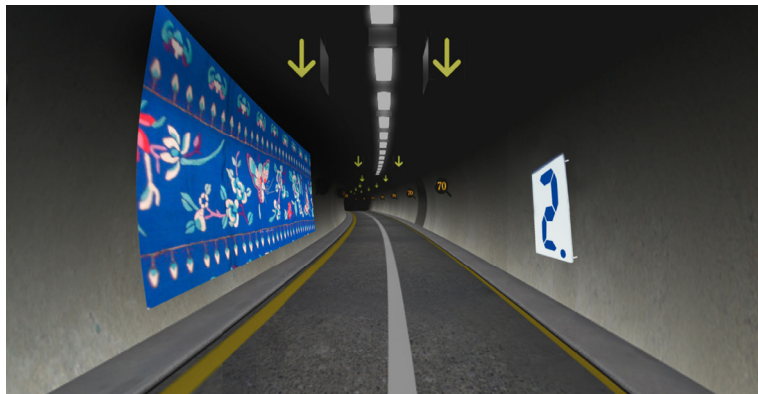


圖 20b 雪山隧道漢族服飾圖(北上線)

五、 雪山隧道開挖工法

(一) 開挖工法選擇

雪山隧道長達 12.9 公里，為北宜高速公路通車之要徑，綜合各階段隧道施工方法之評估主要考量因素包括地質構造、隧道規模（長度及斷面尺寸）、施工進度、施工費用、安全性、勞力需求、環境維護及技術提昇等，先就各項因素檢討評估可能施工方法之優劣，再予綜合評估出相對較優之工法。

由於隧道穿越雪山山脈，覆蓋層甚厚且經過大台北水源、水質保護區；除兩端洞口外沿線並無適當位置打設橫坑增闢施工面，如選擇隧道中央另開一條施工橫坑，亦長遠 2.0 公里，縱坡 8%，出碴、排水、通風均有問題；施工期間同時有北部第二高速公路、大台北地區捷運系統、越域引水計畫等多項隧道工程進行中，隧道作業勞工之來源極端缺乏；如採鑽炸法施工以當時國內實績核計，單向施工需要 20 年以上才能貫通；經各種因素綜合比較後，以 TBM 工法較傳統之鑽炸工法來得有利，如表 6 所示，最後建議採用 TBM 工法，另為因應本工程可能經過數段斷層構造及部分地質弱帶，避免落盤及泥濘傷及人員及機具，經評估採用與英法海峽隧道

相同之雙盾式 (double shield) T B M 施工。施工期間亦先後多次邀請國際專業廠商及專家來台勘研評估，對本工程選用 T B M 工法仍均表肯定。

表 6- 隧道開挖工法比較表

項目	環境衝擊影響	施工道路	技術提昇	安全性	勞力需求
T B M 工法	○	○	○	○	○
鑽炸工法 D&B	×	×	△	×	×

○：佳 △：普通 ×：差

由於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，而台灣大部份為山區，當時考量後續之高速公路計畫及其他水力工程，均有長大型隧道即將興建，故特別於雪山隧道工程契約中規定有技術合作協議書要點，希冀借由國內承商與 T B M 專業廠商之技術轉移，達成提昇國內隧道施工技術，並作為後續長隧道施工技術與經驗之培訓及借鏡。規設期間曾就隧道開挖進行施工規劃，於施工階段因遭遇不良地質與工程進度落後，必須趕趕進度曾經兩度調整施工計劃以為因應，概述如下：

1. 初期施工規劃

經規劃階段綜合評估後，施工規劃決定主坑以兩部直徑 11.7m，導坑乙部直徑 4.8m T B M 施工，並利用 T B M 製造期間，約需 1 至 2 年，先行以鑽炸法自頭城端往坪林方向施工，通過東端地質較差路段，以降低施工風險。雪山隧道導坑工程，原設計預定南口段首一公里及北口 150 m 採鑽炸法開挖，其餘部份則採用 T B M 施工。主坑分南下線、北上線兩條隧道與導坑隧道相仿，原預定南口首約 800 m 及北口 150 m 採鑽炸法開挖，其餘部份則採 T B M 開挖施工。圖 21 所示為雪山隧道主坑 T B M 於已完工之鑽炸段內推進實景。

隧道南段開挖約有 3671m 長的四稜砂岩區段，其中的單壓強度在 1200~3,000 kg/cm²，硬度 MI6~7 間，石英岩含量高達 82%，岩質堅硬且破碎，迫使 T B M 不時停機更換環齒輪、小齒輪等零件，並曾經有一天內更換 13 只削刀的記錄，讓 T B M 吃盡苦頭。

由於隧道南段因地質不佳，開工以來無論是鑽炸法或 T B M 法，開挖均不順利，致進度嚴重落後，其間北上線 T B M 自 85 年 07 月 21 日開始開挖，鑽掘不到 500 公尺於 86 年 12 月遭遇本工程規模最巨大的一次湧水抽坍事故，造成頂拱大量地下湧水挾帶岩屑崩坍沖入隧道內，埋沒 90 公尺既成隧道，岩屑礫料約 7,000

立方公尺，瞬間地下湧水量達每秒 750 公升，環片支撐掉落壓毀 T B M，致該工作面完全停頓，如圖 22 所示。經檢討後提出工程後續因應計畫，除以繞行隧道處理 T B M 脫困作業外，並增闢工作面趕工。



圖 21 雪山隧道主坑 T B M 於鑽炸段內推進實景



圖 22 北上線里程 38K+902.5 TBM 抽坍情況

2. 施工改善因應方案

雪山隧道南段因遭遇不良地質，不論採用鑽炸法或 T B M 工法開挖，施工均不順利，工程進度已嚴重落後，爲了趕趕落後之進度及確認完工時間，於 88 年元月召開國外專家學者諮詢會議，由承商提出「施工改善因應方案」如圖 23 所示，並將完工時程設定於 92 年 6 月爲通車目標，報經行政院核定。因應方案如下：

- (1) 主隧道南口工作面之南下行線繼續以頂導坑將不良地質挖除，長度約 628 公尺，再視地質情況恢復 T B M 全斷面開挖。
- (2) 主隧道南口工作面北上線之 T B M 拆解，全線改用鑽炸法施工，並適時由東

行線打通聯絡隧道，以增闢西行線之工作面。

- (3) 導坑南口工作面 T B M 第 10 次受困，以開闢繞行隧道方式至機頭前方處理 T B M 受困，並以鑽炸法往前開挖，T B M 修復後，再繼續開挖。
- (4) 北口之主隧道及導坑工作面，將已開挖之 150 公尺繼續以鑽炸法延長至 3,800 公尺。
- (5) 由二號豎井增闢北上線往坪林向工作面開挖 1,410 公尺，往頭城向工作面開挖 1,100 公尺。

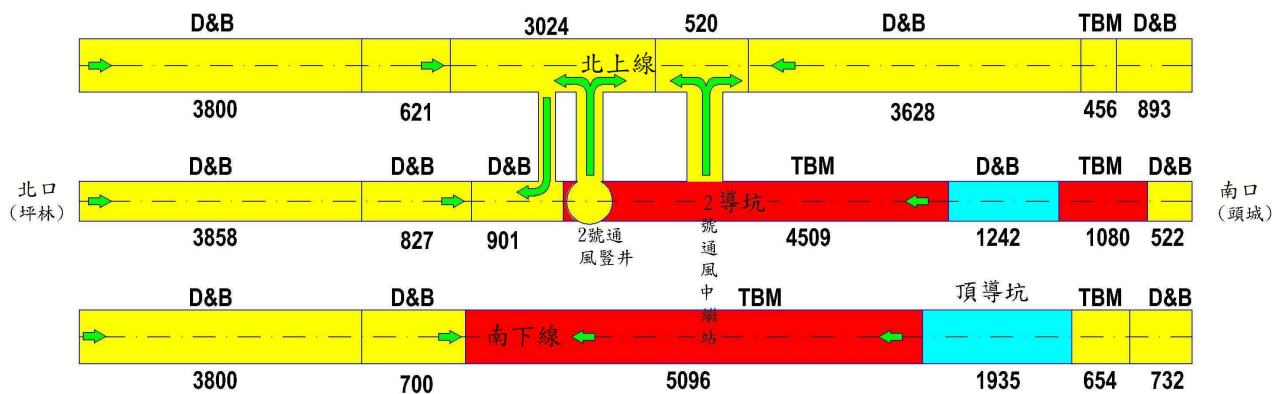


圖 23 整體改善方案施工平面配置圖

3. 修正施工改善因應方案

前述施工改善因應方案原設定以 92 年 6 月為通車目標，惟迄止 90 年 12 月各工作面開挖進度為導坑 53%、東行線 48%及西行線 53%，確定已無法如期於 92 年 6 月完工通車，於是於 90 年 12 月再度召開國內專家諮詢顧問會議。根據該會議之建議，承商提出修正施工改善因應方案，如圖 24 所示，循序陳報，並重新設定 94 年底為通車目標，業經行政院正式核定。其內容下：

- (1) T B M 開挖工率修正為：導坑 300~450 公尺/月；主隧道 150~200 公尺/月。
- (2) 由二號豎井增闢導坑坪林向工作面，如南口 T B M 施工不順，再增闢頭城向工作面。
- (3) 導坑北口工作面鑽炸法由 3.8 公里再延長 0.8 公里。
- (4) 主隧道北口工作面南下、北上線鑽炸法由 3.8 公里再分別延長 0.92 公里及 0.5 公里。
- (5) 由北上線經人行聯絡隧道協助南下線以鑽炸工法開挖 1.1 公里，並挖除 TBM 將開挖之地質弱帶頂導坑 150 公尺。
- (6) 南口工作面南下線繼續施作頂導坑，俟良好地質再以全斷面開挖。

(7) 由導坑經二號通風中繼站以鑽炸法增闢北上線工作面，協助西行線開挖 528 公尺。

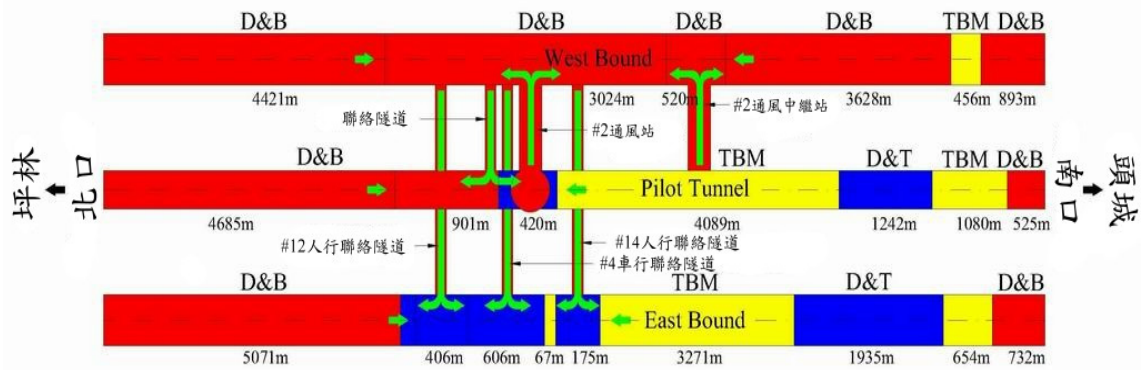


圖 24 整體改善方案修正計畫施工平面配置圖

4. 檢討

回顧雪山隧道的開挖，由於地質困難度遠大於預期，為加速趕進度，亟力以鑽炸法增闢工作面，並於 T B M 前方儘量施作頂帽坑以降低被夾埋之風險，整體來看實際開挖方式因應各階段之施工需要採鑽炸法、TBM 法及鑽炸法&TBM 法混合施工等 3 種施工法施工，各種施工法之施工位置及長度詳圖 25，期間使用 T B M 開挖之長度與功率實績如表 7 所示。

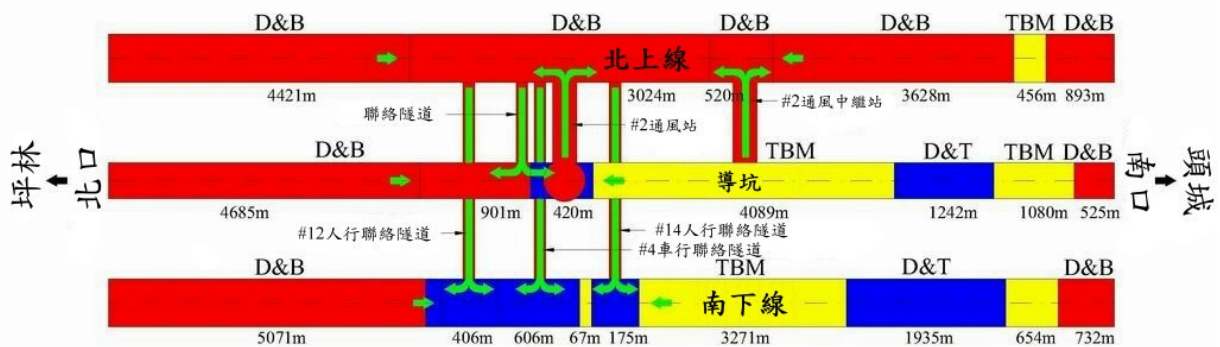


圖 25 雪山隧道各工作面施工示意圖

表 7 雪山隧道 T B M 開挖實績

項目	導坑	南下線	北上線
使用 T B M 長度 (M)	5169	3925	456
單日最佳進度 (m/day)	24.73	17.9	14.69
單月最佳進度 (m/mon)	123	106.5	126.4
貫通日期	92.10.20	92.09.16	93.03.14

(二) 豎井開挖工法

為通風需要，長度超過 5KM 之鐵公路交通隧道需設置豎井或橫坑。豎井，為自地表連通至隧道的垂直結構物，所採用的施工方法有自地面逐階往下開挖之「降挖工法」(Sinking Method)，如圖 26 及圖 27 所示；或先自地面以鑽機鑽設導孔(pilot hole)貫穿隧道後，再自隧道內換裝擴挖頭(reamer)自隧道向地面擴挖，最後再以鑽炸法自地面向下開挖完成，稱為之「昇井工法」(Raise Boring Method)，如圖 28 所示；另外尚有以特殊爬升工作架自隧道向地面進行鑽炸施工之「爬昇機工法」；或以類似 TBM 之「豎井鑽掘機 (shaft boring machine)」進行開挖者。



圖 26 降挖工法示意圖



圖 27 降挖工法開挖

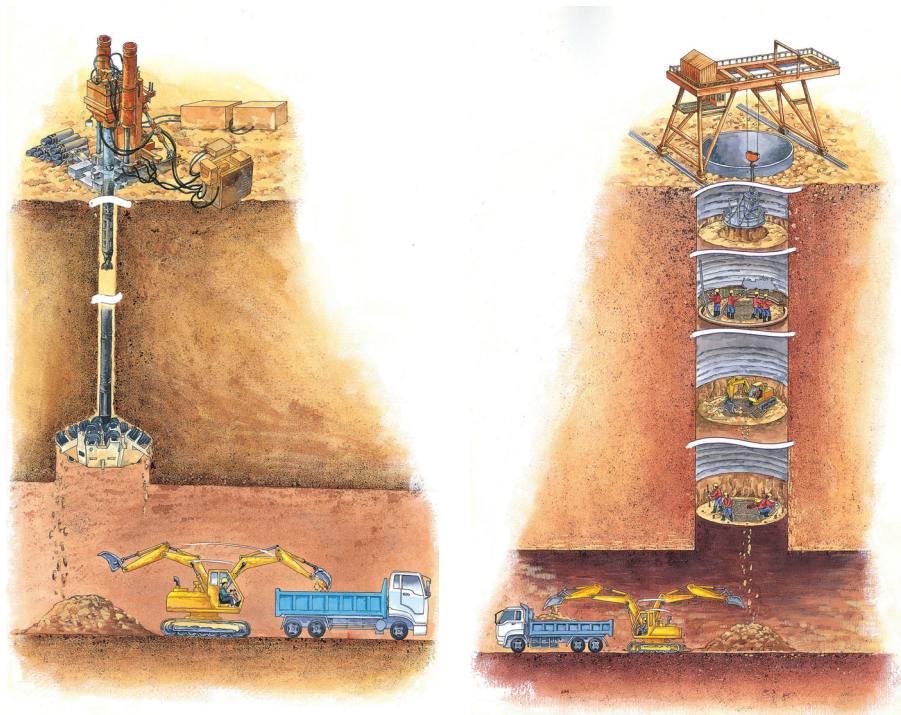


圖 28 昇井工法示意圖

為應通風需要雪山隧道沿線供設置三處豎井，每處豎井由兩口直徑 6M，相距 50M 之進氣井及排氣井構成，深度 250~512M，如表 5 所示。由於豎井需自地面開挖貫穿隧道，開挖之土碴及排水處理均甚困難，尤其遭遇斷層、剪裂帶等破碎地層崩坍、湧水之處理較諸隧道施工更為困難。須自地面先進行灌漿等止水、加固措施後再行開挖。2 號、3 號兩處豎井均採沉箱工法自地面向下開挖；1 號豎井因深度較深，深度達五百多公尺，且通行道路狹窄，車輛通行困難，且因施工時間較晚，導坑已開挖通過其下方，為降低施工障礙，加速工進，採用豎井鑽掘機（Raise Borer）自地面向隧道鑽穿一直徑 31cm 之導孔，再更換直徑 244 cm 之擴孔鑽頭（Reamer），由下往上鑽掘擴孔。最後再以鑽炸法自地面向下擴挖為設計直徑，開炸之碴料直接掉落至隧道底部，再自隧道內運出，如圖 29 所示。

豎井昇井工法示意圖

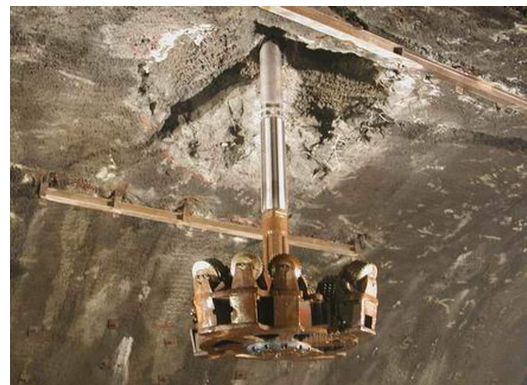
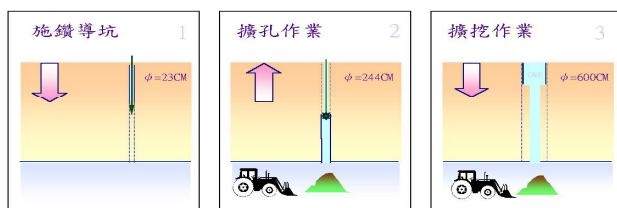


圖 29 雪山隧道 1 號豎井採昇井工法示意及擴挖頭安裝

六、 結語

1. 雪山隧道除兩座南北向的主隧道及 1 座導坑，沿線還有 28 個人行聯絡道、8 個車行聯絡道、3 處通風站（每處各有 2 座橫向通風隧道）及 3 處通風中繼站（每處各有 2 座橫向通風隧道）連通兩個主隧道，另外還有 6 座豎井，加上 1 號豎井頂部之橫向排氣隧道，總計 58 座長短、橫豎、大小不一的隧道，總長達 43,784 公尺，在充分考量環境保護、工程安全及交通安全的原則下，並有配備齊全之機、電及交控安全設施。
2. 雪山隧道相對於北宜高整體計畫，從可行性研究、規劃、設計到施工階段，均是關鍵所在，尤其是規劃設計階段之調查與地質情況的掌握，更是工程是否能有效控制成本及掌握工期之先決條件，因技術與地形上的限制，可能無法完全掌握實際地質情況，尤其是影響施工至鉅之斷層地質弱帶、高壓湧水與四稜砂岩區段。
3. 長隧道工程除了地質是項影響因素外，對於工程設計（如豎井位址）、工法之選定與施工階段適時之調整因應，無疑是對工程執行者智慧與技術的最大考驗。工程師如何秉持其專業、經驗，且需衡酌民情與社會各方的期待等非技術性因素作適時的回應與調整工程腳步，已是現今工程人員必須面對的課題與挑戰。
4. 雪山隧道工程艱鉅且複雜，包含各項專業工程，且計畫從規劃設計開始即採用專業營建管理制度，以增進各項功能之運作、控制進度、節省人力並提高工程品質。施工前的規劃設計所採用的技術與方法均達世界水準，其間在政府、國內顧問公司所累積之地質調查、規劃設計等豐碩的經驗與技術，並無法由本文全部道盡，在面對未來更形艱鉅之深岩覆長大隧道工程，台灣隧道工程界仍有相當幅度的提昇空間。
5. 面對國人環保意識日益高彰的工程環境，雖然工程經過長期的規劃設計以為因應，仍然有很大的改善與進步空間，但對於不同專業領域間互動與互信則是必須大家共同努力的方向，從長遠的角度來看，北宜計畫乃至雪山隧道的完成，它的得與失應不是單一技術層面或單一工程背景可以論述完整的，尤其面對未來環島路網之東部公路、南橫公路及中橫快速公路之興闢更是一重大指標，因此在本計畫過去所應用之執行方式，對後者均具有重要參考價價值與指標意義。