

初步回顧雪山隧道規劃設計與施工

國道新建工程局副總工程司 曾大仁
中興工程顧問公司北宜工程處處長 林振基

一、前言

北宜高速公路之雪山隧道(原稱坪林隧道)全長 12.9 公里,以西北 - 東南方向貫穿台灣雪山山脈北端之東段惡劣地質區。由於施工期間遭遇斷層群之剪裂破碎地層及大量高壓湧水,自 80 年 7 月開工以來,施工進度嚴重受阻,通車日期一再延後,社會各界對本公路之通車充滿疑慮。今年 5 月 31 日導坑工程西段貫通,游院長親臨主持視訊貫通典禮並慰勉施工團隊的辛勞,可謂意義重大。目前已大部分通過惡劣地質區,導坑全線僅餘數百公尺尚未貫通,預期今年 9 月即可全線貫通,94 年底主隧道全線完工通車之目標應是指日可待,惟後續主隧道開挖及各項繁重之土木結構與機電交控工程,仍然非常艱鉅,有賴施工團隊的繼續努力與社會各界之支持、鼓勵。值此導坑即將全線貫通,地質已全線瞭然之前夕,本文回顧往日,展望未來,旨在回憶當初路線評選、地質調查、工法選用之過程及實際施工所遭遇之困難,希望將十二年來的寶貴經驗,提供工程界參考。

二、路線評選

北宜公路由南港至頭城,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,由北二高南港系統交流道經石碇至坪林。而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(當時為台灣省公路局)於 73 年委託中興顧問公司(當時為中興工程顧問社)辦理本公路初步地質調查,共辦理 16 孔鑽探,總進尺達 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工程佈置。當時該公路係按一般公路的標準規劃,並非高速公路,所以中興公司研選的路廊避開金盈斷層、上新斷層而通過四稜砂岩破碎區較短之北側,以靠近頭城鎮之處作為雪山隧道東端出口,約距離目前的洞口 3 公里,儘可能減少地質風險區,並建議以傳統鑽炸法開挖。後來因公路升格為高速公路,此一路線不合高速公路的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考量洞口眩光的交通安全因素，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、1 及圖、2。

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，但因範圍太大並無法完全繞過。由目前已挖出之地質資料觀之，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。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，應可以工程技術克服，路線北移反可能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，全世界皆然。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，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地工設計資料，供施工單位參考。全線岩體品質亦經推估預行評分及分類，作成隧道沿線地質剖面圖(詳圖、3)，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。

由於從地表完成的地質調查資料畢竟有限，為了彌補，乃設計開闢導坑工程，在主隧道開工前直接了當查明隧道實質路線地質縱剖面及力學行為，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：

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，大部分為深孔，主要在查明四稜砂岩層之界面、石 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及導坑的開挖而瞭然。實際所顯示之地質狀況與規設階段調查所預測者，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，目前隧道總滲水量為每秒 450 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 斷層帶可能寬達 100 至 200 公尺。事實上四稜砂岩層僅比原推估長 255 公尺，石 斷層亦僅比預估者寬 20 公尺，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 1。

表 1、 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 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

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, 尚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。

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。

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。
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 由東口開挖, 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, 已廣被採用, 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、施工經過

雪山隧道施工迄今, 可概分三個時期。第一期為由 80 年 7 月至 87 年 12 月, 係按照原合約的施工計畫執行, 設定 88 年底為通車目標。第二期為 88 年元月至 90 年 11 月, 因施工進度嚴重落後而提出施工改善因應方案增闢工作面贖趕, 修訂 92 年 6 月為通車目標。第三期為 90 年 12 月以後, 因東段仍在惡劣地質區段, 施工成效不佳, 再修正施工改善因應方案, 將鑽炸法工作面延長, 並由二號豎井增闢導坑工作面, 再次修訂通車目標為 94 年 12 月, 茲將各期之施工經過分述如以下各節。

1.工程概要:

(1)導坑工程: 第五標

全長 12.9 公里, 直徑 4.8 公尺, 主要目的為探查地質及輔助主隧道施工, 完工後作為維修及救難之通路, 係以議價方式由榮工公司承包, 於 80 年 7 月開工, 原定 84 年 3 月完工。

(2)主隧道工程: 第四標

主隧道為兩車道的隧道, 分為東、西行兩條, 兩者相距 42 至 60 公尺, 與導坑同長均為 12.9 公里, 開挖直徑約 12 公尺。此外, 兩主隧道間尚有 28 條橫向人行聯絡隧道、8 條車行聯絡隧道、三組分離式之通風豎井、機房、中繼站。仍以議價方式由榮工公司承包, 惟與導坑工程分屬不同合約。本標工程於 82 年 7 月開工, 原定於 88 年 9 月完工。

2.原合約施工計畫:

導坑及主隧道工程主要係以 TBM 由東往西開挖, 為了提高 TBM 開挖進度, 規定 TBM 掘進時亦能同時組裝環片, 因而採用伸縮盾身機型。茲分述如下:

(1)導坑工程:

東洞口約 700 公尺為岩體評分「甚差」之乾溝層硬頁岩不良地質帶, 計畫利用 TBM 製造約需一年半的時間, 以鑽炸法開挖 1 公里, 將該段不良地質挖除, 並通過金盈斷層, 以避免 TBM 受困; 為了讓 TBM 到達西口時拆解之需, 西口僅規劃以鑽炸法開挖 150 公尺, 其餘之區段則均以雙盾身 TBM 由東往西開挖。TBM 直徑 4.8 公尺, 係由美國 ROBBINS 廠製造, 詳圖、4。當時承商所提之開挖工率為 D&B 90 公尺/月, TBM 則由 220 公尺/月至 670 公尺/月,

視地質好壞而定。本工程全由榮工公司自辦, 惟合約規定初期之 3 公里, TBM 必須由國外有 TBM 施工經驗之人員操作, 但指揮權仍屬榮工公司。

(2) 主隧道工程

主隧道工程的施工理念與導坑工程相似, 惟因導坑已比主隧道 TBM 早三年半施工, 按原定時程導坑已挖通, 主隧道的地質弱帶均可由導坑先行處理, 讓後續的主隧道 TBM 得以安全通過。

主隧道東口約 800 公尺及西口 150 公尺, 計劃以鑽炸法施工, 其餘長度均以雙盾身 TBM 由東往西開挖。TBM 直徑 11.75 公尺, 係由西德 WIRTH 廠製造。當時承商所提的開挖工率 D&B 為 60 公尺/月, TBM 為 67 公尺/月至 650 公尺/月, 視地質好壞而定。

由於榮工公司並無 TBM 的施工經驗, 所以合約規定需與國外有經驗之承商合作, 於是榮工公司與法國 Spie Batignolles (簡稱 S.B.) 簽約承建東行線, 並負責指導榮工公司西行線 TBM 的施工, 以達技術轉移。

3. 初期施工概況:

(1) 導坑工程

導坑東口工作面自 80 年 7 月以鑽炸法開挖進洞, 迄止 81 年 9 月, 共開挖 522.1 公尺, 單月最佳進度 73 公尺, 平均每月進度約 40 公尺/月。係由榮工公司隊員自辦, 採用手提式鑽機, 全斷面一次開炸, NATM 支撐工, 鐵牛車出渣, 每天工作兩輪, 每輪 10 小時。

此段均在乾溝層硬頁岩內, 岩體評分屬「甚差(very poor)」, 分佈不規則之高低角度剪裂破碎帶出現頻繁, 曾經造成 13 次之岩盤抽坍, 平均約 40 至 50 公尺即有一道 1 至 3 公尺寬之剪裂破碎帶或節理發達之地質弱帶。一般抽坍的量不大, 均在 30 立方公尺以下, 只有第 13 次約有 100 立方公尺。實際岩體評分與規設階段原評相當, 惟地下湧水不大, 最大瞬間湧水量約每秒 100 公升, 湧水一段時間以後即消失, 顯然係棲留性的隙中水所致。每次抽坍的處理時間約 3 天, 隨即施工仰拱混凝土滑床, 供 TBM 推進到工作面之用。

導坑 TBM 於 82 年 1 月正式掘進, 至 85 年 2 月之三年期間共挖掘 1,080 公尺。此間 TBM 共受困十次, 前七次位於延續鑽炸段相同的乾溝層之硬頁岩內, 主要原因為貫穿地層剪裂帶或斷層帶, 岩屑瞬間大量掉落致 TBM 機頭無法轉動。第六次及第七次為硬頁岩及四稜砂岩層之界面金盈斷層的破碎帶。七次受困之最大瞬間湧水量約每秒 40 公升。後三次之受困則位於四稜砂岩層內, 岩性與前者差異較大, 岩層剪裂破碎帶出現的間距較疏, 約為 100 至 200 公尺, 惟均伴隨大量的地下湧水達每秒 185 公升。以上受困均採用開挖迂迴坑的方式繞行到 TBM 機頭前方將岩屑清除或作地質固結灌漿處理。前八次處理的時間較短約一至三個月, 後兩次的處理時間則長達十個月以上, 詳表 2。

以上 TBM 受困, 均因未能按照原設計理念先行灌漿處理後再向前開挖所致。合約規定 TBM 必須有能力施鑽不取心及取心之前進鑽孔設備, 以供研判

地質狀況，決定前進或停機灌漿處理與否，所以 TBM 分別配備有 Boart HD 150L(裝在大樑上)不取心鑽機二部及可換裝之 Longyear LM-22 取心鑽機一部。撐腳盾周圍共佈置 16 孔 80mm 之導孔，偏角 6°呈幅射狀，可作為鑽探兼具灌漿之用。惟實際施鑽時由於岩盤堅硬破碎、鑽機偏角太小、安裝不穩、能量不足，致經常卡鑽。而衝擊式不取心鑽孔，只能經由鑽進速率、迴水顏色及碎屑材料加以研判，可謂非常困難。如要取心鑽孔，則 30 公尺之鑽孔經常要花費 24 小時以上，影響工進至鉅。後來雖加裝性能較佳之 2 台 Atlas Copco 1238 及 1 台 Diamec 262 鑽機，但改善仍然有限，期間再試著以 HSP 及 TSP 震測法協助研判前方地質，惟效果有限，所以 TBM 始終無法作有效的鑽孔與灌漿處理。

TBM 受困期間曾經邀請國外知名之 TBM 專家及廠商來台提供建議，如開發雙盾身 TBM 之義大利專家 Mr. Grandori 曾經提出改善 TBM 的若干建議，承商亦作部分的改善措施，如渣斗(Bucket)、輸送機、大樑、鑽孔設備、削刀頭面鉞、尾盾缺口等等。當時最佳開挖進度曾經達到 220 公尺/月，及一天鑽掘 7 環(8.4 公尺)的紀錄。

記得導坑 TBM 第三次受困時，曾邀請國外有 TBM 豐富施工經驗廠商義大利 SELI 公司來台諮詢，該公司派遣專家數名詳細評估當時的地質及 TBM 之狀況後，相當有信心要承包導坑 TBM 的後續開挖，並要求完工後 TBM 歸其所有，後來因為條件沒有談妥及考慮其他因素而作罷，實在可惜。規設階段國外顧問建議雪山隧道採用 TBM 開挖，同時強調宜由有經驗的包商承造，可見 TBM 的選用與承包商的施工經驗有很大的關係。

導坑西口工作面係由協力包商聖芳公司所承建，於 85 年 1 月施工洞口保護工，85 年 3 月進洞開挖，85 年 12 月完成開挖 262 公尺，主要施工機具包含：1.鑽堡、2.履帶式出渣機、3.軌式渣車、4.噴漿機、5.破碎機、6.運渣車。

(2)主隧道工程

主坑兩端採用鑽炸法的目的主要是利用 TBM 的製造期間，先開挖東口不良的地質帶及西口供 TBM 出洞拆解之空間，所以隧道斷面應比 TBM 大才能自由推進及拖出。鑽炸法隧道斷面為標準馬蹄型，外徑達 12.5 公尺，開挖面積約 130 平方公尺。各工作面之施工概況說明如下：

①西行線

- A.東口工作面：原定開挖鑽炸法 880 公尺、TBM 11,912 公尺。
 - a.施工包商：榮工公司、聖芳公司、利德營造及福清營造。
 - b.主要施工機具：輪式鑽堡、ROC-601 履帶式鑽機(氣動式)、輪式裝載機、履帶式挖溝機、鐵牛車出渣及運料。
 - c.施工作業時間：三班(全能班)24 小時制。

d. 施工方式: 鑽炸法分上半、洞台(一)、洞台(二)等三段長階開挖。

e. 施工經過:

自 82 年 8 月開挖, 至 84 年 4 月之 21 個月內共完成開挖 893 公尺, 平均月進度約 42 公尺, 惟最高上半斷面開挖曾達 85 公尺/月。開挖期間的地質狀況與問題均與導坑相似, 主要係乾溝層硬頁岩破碎性風化岩盤或剪裂帶所形成之頂拱岩楔及不穩定岩屑, 造成抽坍, 惟鮮有地下湧水出現, 可能係導坑已事先發揮排水的效果。由於裂隙性岩體的特質, 曾經造成洞台降挖時支撐工大量變形, 特別是鋼支保腿部接合處發生挫曲現象, 惟經施作仰拱加以閉合後, 變形量立即收斂, 可見此類岩盤不適合長階開挖及省略仰拱閉合作業。惟採用中(短)階開挖及仰拱閉合作業, 將增加施工開挖及作業程序的複雜性與技術性, 影響施工進度及估驗金額, 承商配合的意願不高, 於是等洞台全部降挖完成, 支撐工變形太大侵入開挖線, 必須再作補強及降挖作業, 反而費時又費工, 紛爭不斷。

TBM 於 85 年 1 月推進, 85 年 5 月開始全斷面開挖, 迄至 86 年 12 月 TBM 遭遇重大災變, 20 個月內共開挖 455.5 公尺, 平均每月進度僅 23 公尺, 惟曾經有單日開挖 14.7 公尺的優良紀錄。TBM 開挖進度緩慢的原因主要為破碎性堅硬的岩盤, TBM 削刀並非真正貫入造成剪力破壞之岩屑, 而大部分係削刀撞擊岩塊產生震動造成岩塊節理弱面破壞的重力剝落現象, 致超挖太大, 開挖碴料產能不穩定, 導致碴料輸送系統常因超載故障 削刀頭(Cutter head)阻力太大轉不動及環片背填作業困難等現象, 再加上 TBM 操作學習初期又從如此困難的地質開始, 難免問題重重, 且 TBM 施工經驗不足, 處理方式及時間難以掌控, 致進度緩慢。

西行線 TBM 於 86 年 9 月開挖至上新斷層前方, 因導坑及東行線已通過該斷層, 該斷層的地質情形已很清楚, 乃停機作地質探查與處理。處理措施係從 TBM 盾身上方開挖一小廊道至機頭前方施作 3 公尺高之扁型頂導坑支撐。由於鑽孔探查未能探得右上方之石英砂岩儲水層, TBM 啟動後擾動頂導坑基座, 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 TBM。TBM 經原廠專家檢視後評估修復費比新購高, 費時亦需 3 年, 承商遂建議將 TBM 解體拆除, 西行線全線改用鑽炸法施工。

B. 西口工作面: 原定以鑽炸法開挖 150 公尺

a. 施工包商: 協建廠商聖芳公司及世久營造。

b. 主要施工機具: 鑽堡、裝載機、運碴車、挖土機、破碎機、乾式噴漿機。

c. 施工作業時間: 全能班(24 小時制)。

d.施工方式: 分上半、洞口一、洞台二, 三段長階開挖。

e.施工經過:

本工作面先由聖芳公司自 85 年 7 月開挖進洞, 至 85 年 11 月共完成開挖 80 公尺, 再由世久營造於 86 年 1 月繼續開挖至 87 年 6 月完成 378 公尺, 總共開挖 458 公尺, 地質為巨積之硬頁岩, 相當良好。

②東行線

A.東口工作面: 預定開挖鑽炸法 720 公尺, TBM 12,047 公尺。

a.施工承包商: 協建廠商興志公司(D&B)、S.B.(TBM)、榮工公司(TBM)。

b.主要施工機具: 輪式鑽堡、履帶式鑽機(氣動式)、輪式裝載機、履帶式挖溝機、鐵牛車出渣及運料。

c.施工作業時間: 依專業分班。

d.施工方式: 分上半、洞口一、洞台二, 三段長階開挖。

e.施工經過:

本工作面於 82 年 8 月以鑽炸法開挖進洞, 至 84 年 4 月之 20 個月內共完成開挖 732 公尺, 平均每月開挖 36 公尺, 單日開挖最高進度為 3.5 公尺。施工中所遭遇的地質情況及問題與西行線相似。

法商 S.B.於 85 年 5 月進場施工 TBM 推進用之仰拱滑床, 於 85 年 9 月開始 TBM 全斷面開挖時, 因考慮主坑 TBM 可能超越導坑之 TBM, 必須承擔非合約條件之地質風險, 提出要求增加費用的異議, 否則拒絕施工。後來遭到榮工公司以違約行為驅離工地, 全部工程改由榮工公司自行施工。迄至 86 年 7 月之 10 個月內, 東行線 TBM 共開挖 653 公尺, 平均每月進度約 65 公尺, 單日最佳進度 17.8 公尺, 均比西行線佳, 遭遇的困難與西行線相似。

由於導坑 TBM 於通過上新斷層時曾經遭遇困難, 所以東行線 TBM 亦於抵達上新斷層即停機作相應之處理措施。處理方式係於 TBM 盾尾山側開挖 110 公尺長之迂迴隧道繞到機頭, 施作上半斷面頂導坑, 先將不良地質挖除並支撐保護, 讓 TBM 儘速挖掘下半斷面, 避免落盤, TBM 才得以安全通過。此種方式雖然費時、工程費高, 但安全保守, 一直是本工程特有的施工方式, 並持續使用。

B.西口工作面: 原定以鑽炸法開挖 150 公尺

a.施工承包商: 協建廠商聖芳公司及世久營造。

b.主要施工機具: 鑽堡、裝載機、運渣車、挖土機、破碎機、乾式噴漿機。

c.施工作業時間: 全能班(24 小時制)。

d.施工方式: 分上半、洞台一、洞台二, 三段長階開挖。

e.施工經過:

本工作面先由聖芳公司於 85 年 7 月開挖至 85 年 11 月完成 75 公尺, 再由世久營造於 86 年 2 月繼續開挖至 87 年 7 月完成 394 公尺, 本期總

共開挖 469 公尺，地質條件良好。

4. 施工改善因應方案：詳圖、5

雪山隧道東段因遭遇不良地質，不論採用鑽炸法或 TBM 工法開挖，施工均不順利，工程進度已嚴重落後，為了趕趕落後之進度及確認完工時間，於八十八年元月召開國外專家學者諮詢會議，依據該會議之結論與建議，承商提出「施工改善因應方案」，經行政院公共工程建設委員會成立專案小組審理，以合約變更方式增加工程費，並將完工時程設定於 92 年 6 月為通車目標，案經行政院核定。因應方案如下：

- (1) 主隧道東口工作面之東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 TBM 全斷面開挖。
- (2) 主隧道東口工作面西行線之 TBM 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) 導坑東口工作面 TBM 第 10 次受困，以開闢繞行隧道方式至機頭前方處理 TBM 受困，並以鑽炸法往前開挖，TBM 修復後，再繼續開挖。
- (4) 西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) 由二號豎井增闢西行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。

5. 改善因應方案執行之施工概況：

(1) 導坑工程

導坑 TBM 於 85 年 2 月第 10 次受困，計花費 7.5 月的時間才於 85 年 9 月處理完成，並繼續以鑽炸法往前開挖，同時將 TBM 推進到挖完之通風中繼站機房作全面性修復與改裝，增設 HD-90 高效能鑽機，迄 89 年 9 月止鑽炸法開挖 1,242 公尺，單月開挖最高達 96.5 公尺。此間亦曾於 87 年 3 月及 10 月發生二次抽坍，每次抽坍岩屑各約 60 立方公尺，湧水量每秒 70~120 公升，水壓約 12 公斤/平方公分，均以固結灌漿及施鑽排水孔克服，處理時間約 1 個月。

以鑽炸法開挖的同時，TBM 也隨後推進，於 89 年 12 月 TBM 正式恢復全斷面開挖。迄 90 年 11 月止共開挖 542 公尺，單月最佳開挖 168 公尺，平均月進度約 109 公尺(不含停機處理)，期間亦曾經於 90 年 4 月及 90 年 8 月兩次受困，受困處理時間各為 128 天及 76 天。

導坑西口工作面改由協建廠商世久營造負責延長段之開挖，於 85 年 12 月迄 90 年 11 月止計開挖 3,168 公尺，單月最佳進度 120 公尺，月平均進度 53 公尺。此間曾因招商作業及當地居民抗爭，各停工 3 個月。

導坑西口工作面之地質情況良好，一般施工尚稱順利，只有於鶯子瀨向斜軸部附近如預測遭逢大量湧水，致開挖面頂拱發生抽坍現象，並於里程 29K+503.3~29K+509.3 區段發生鋼肋擠壓變形、噴凝土剝裂及里程 29K+409.3~29K+503.3 區段部分噴凝土面龜裂等現象。經進行兩階段之錐體鑽灌地質改

良處理作業，配合機械開挖、組立補強鋼筋及鑽設深約 20 公尺之排水孔以導排固結處理範圍外之地下水，於 88 年 11 月 15 日全部處理完成。

此一方案，導坑迄 90 年 11 月為止，西口工作面鑽炸段開挖 3,430 公尺、東口工作面鑽炸段開挖 1,764 公尺；TBM 開挖 1,622 公尺，總計 6,816 公尺，佔總長度的 53%。

(2) 主隧道工程

① 西行線

A. 東口工作面:

本工作面由協建廠商福清營造負責施工，於 87 年 5 月 TBM 災變處理完成後以鑽炸法施工。迄 90 年 11 月止共開挖 1,804 公尺，單月最佳進度 100 公尺，月平均進度約 42 公尺。期間曾發生三次大小規模不等之抽坍事故。特別是於 90 年 4 月 20 日開挖至里程 37K+099 處時，因遭遇湧水抽坍，施工受阻，至 90 年 5 月 11 日於清理抽坍渣堆及預備灌漿處理施作擋牆時，開挖面又再度發生湧水抽坍，並造成榮工公司協建廠商工地主任慘遭活埋。該工作面進行地質處理支撐補強後修挖，共耗費七個月的時間，才恢復開挖。

B. 西口工作面:

本工作面改由協建廠商介興營造負責施工，於 87 年 8 月以鑽炸法延續施工，迄 90 年 11 月止共開挖 2,394 公尺，單月最佳進度 90 公尺，月平均進度約 61 公尺。期間曾經因當地居民抗爭而停工 3 個月，因承商招商作業延誤 10 個月。89 年 4 月 11 日開挖至里程 29K+046.5 鶯子瀨向斜軸部附近因地質破碎且微滲水，致開挖面頂拱破碎岩盤不斷掉落，承商雖立即進行噴凝土封面作業，惟仍造成抽坍現象。經採兩階段錐體灌漿地質改良處理作業，並鑽設長度約 33 公尺之排水孔洩降水壓。本案於 89 年 5 月 22 日施作完成，隨即恢復正常開挖作業。

C. 二號豎井增闢主坑西行線工作面:

二號豎井之進氣井深度 240 公尺，排氣井深度 252 公尺，進排氣井相距 50 公尺，內徑均為 6.5 公尺，分別於 88 年 11 月及 89 年 1 月開挖達底，隨即開挖二號豎井通風機房，89 年 8 月完成上半部開挖後，榮工公司即交由協辦廠商日商熊谷組繼續施作，由於工作面深入地底 250 公尺，為維持施工安全並確保符合經濟效益之開挖進度，故增設提吊、渣料轉運、施工通風、施工排水、污水與湧水處理、災害預防及逃生系統等設備，並於 90 年 3 月組裝完成。

從二號豎井增闢主隧道西行線工作面，自 90 年 3 月 26 日起即以雙槍鑽堡開挖，並配合已組裝完成之提吊及渣料轉運設施，截至 90 年 11 月止，往頭城向開挖 396 公尺，往坪林向開挖 397 公尺，合計 793 公尺。本階段兩工作面之平均工率約為 85 公尺/月，最佳月開挖進度為 110 公尺（90

年 10 月), 期間頭城向曾經於倒吊子向斜摺鄒部發生抽坍 100 立方公尺及湧水量達每秒 80 公升的事故, 坪林向亦發生大量變形之狀況, 惟整體上以坪林向的地質條件較佳。

D. 本階段西行線總進度:

主隧道西行線迄 90 年 11 月止共開挖西口鑽炸段 2,852 公尺, 東口鑽炸段 2,697 公尺、TBM 段 456 公尺、及二號豎井增闢工作面 793 公尺, 總計開挖 6,798 公尺, 佔總長度約 53%。

②東行線

A. 東口工作面

主隧道東口東行線隧道為預先處理不良地質, 以利 TBM 順利施工, 由里程 38K+858 改採頂導坑工法施工。因地質情況仍不穩定, 頂導坑持續施作, 至 90 年 11 月 21 日頂導坑開挖至里程 37K+001 時, 又再遭遇突發湧水抽坍, 施工受阻, TBM 下半斷面推進至里程 37K+466.7。

本階段頂導坑共施作 1,866 公尺, 單月最佳進度 68 公尺, 平均月進度 38 公尺; TBM 共推進 1,392 公尺, 單月最佳推進 174 公尺。

B. 西口工作面

本工作面改由協建廠商介興營造負責施工, 於 87 年 9 月以鑽炸法延續施工, 迄 90 年 11 月止共開挖 2,466 公尺, 單月最佳進度 86.5 公尺, 月平均進度約 65 公尺。期間曾經因當地居民抗爭而停工 3 個月, 因承商招商作業延誤 10 個月, 並於鶯子瀨向斜軸部暫停, 施作地質處理。

C. 本階段東行線總進度

主隧道東行線迄 90 年 11 月止共開挖西口鑽炸段 2,935 公尺, 東口鑽炸段 732 公尺及 TBM 段 2,509 公尺, 總計開挖 6,176 公尺, 佔總長度的 48%。

6. 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) TBM 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, 如東口 TBM 施工不順, 再增闢頭城向工作面。
- (3) 導坑西口工作面鑽炸法由 3.8 公里再延長 0.8 公里。
- (4) 主隧道西口工作面東、西行線鑽炸法由 3.8 公里再分別延長 0.92 公里及 0.5 公里。

- (5)由西行線經人行聯絡隧道協助東行線以鑽炸工法開挖 1.1 公里, 並挖除 TBM 將開挖之地質弱帶頂導坑 150 公尺。
- (6)東口工作面東行線繼續施作頂導坑, 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西行線工作面, 協助西行線開挖 528 公尺。

7.修正施工改善因應方案執行之施工概況

(1)導坑工程

東口導坑 TBM 工作面於 90 年 11 月 17 日第十二次受困處理後再度開挖, 迄 92 年 6 月 8 日停機之 18.7 個月間共開挖 3,376 公尺, 惟期間因機具故障及檢修共停機 5.5 個月, 平均之開挖進度 256 公尺/月。其中 1,221 公尺段尚在四稜砂岩地層, 惟地質已轉佳, 除初期偶有剪裂帶, 經以 TBM 之鑽機設備作三次小規模之水泥混合水玻璃灌漿, 吃漿量 16 23 立方公尺, TBM 均安然通過。惟 TBM 因長期在堅硬的四稜砂岩挖掘, 機頭面鈹及頸部鋼鈹已部分磨穿, 不得不於 91 年 6 月停機檢修, 花費 47 天。該處為粗粒巨積石英砂岩, 地質相當良好, 一個半月時間未作任何支撐亦安然無恙。削刀之磨耗則相當嚴重, 在 8 個月的時間內共更換 323 只削刀, 單月最多換了 109 只, 曾經有一天換了 13 只。儘管在如此堅硬的四稜砂岩層(單壓強度達 $3,200\text{kg/cm}^2$), TBM 之平均開挖進度仍可達 191 公尺/月, 單日最大進度達 17.1 公尺/日, 誠屬不易。

TBM 進入乾溝層硬頁岩及大桶山層後, 已開挖 2,155 公尺之岩盤可謂相當良好, 並未作任何灌漿處理, 一路順暢。由於 TBM 在四稜砂岩層中的努力挖掘, 其環狀齒輪及小齒輪已發生磨損並發現裂痕, 如不及時更換, 可能導致主承軸無法運作。茲事體大, 乃於 91 年 11 月 8 日停機擴挖大型洞穴, 將 TBM 削刀頭拆離, 錨錠在岩壁上, 以安裝在頂拱的臨時軌式吊車, 將新的環狀齒輪及小齒輪精準的裝上, 削刀頭復位組合。此項工作非常複雜、艱鉅、精度與技術性高, 共耗費了八十三天的時間, 是難得的經驗。

導坑 TBM 在非四稜砂岩段的平均開挖進度為 378 公尺/月, 最佳進度為 400.8 公尺/月, 單日最佳進度為 24.7 公尺/日, 已發揮了 TBM 應有的工率。惟當時六支主推進唧筒有二支故障, 未能全力鑽掘, 如機具故障率能減少並再加強施工管理, 則開挖進度還可提昇。可惜導坑 TBM 因後期施工太順利失去戒心, 未能在西行線已開挖發生變形之地質弱帶相對位置先行灌漿處理, 致 TBM 於 92 年 6 月 8 日因抽坍而第 13 次停機, 目前正處理中, 預定七月底完成。

導坑西口工作面本期(90 年 12 月 92 年 5 月)共開挖 904 公尺, 並安然通過石 斷層, 只有採用加重型支撐工, 未施作地質灌漿, 亦無高壓地下湧水。本期開挖平均進度 66 公尺/月, 最佳單月進度 93 公尺/月, 均比預期為佳, 於 5 月 31 日與二號豎井坪林向開挖面貫通。

二號豎井增闢導坑坪林向工作面由興志營造公司承造, 於 91 年 5 月 28

日才完成斜支坑而正式以全斷面鑽炸法開挖,於 92 年 5 月 5 日完成合約里程,共長 904 公尺。開挖平均進度達 82 公尺/月,單月最佳進度達 121 公尺/月。此段除偶有滲水及局部小剪裂帶之外,地質均相當良好,雖然如此,可是在施工環境相當差的情況下,有此優越的成績,相當難能可貴。

導坑迄止 92 年 6 月底已開挖長度 12,283 公尺,佔總長之 95%,尚餘 659 公尺,可望於 9 月底全線貫通。

(2)主隧道工程

①東口東行線 TBM 工作面

TBM 持續以頂導坑推進到 36K+923,確認前方地質轉佳,於 91 年 4 月 2 日開始全斷面開挖,惟開挖 482 公尺至導坑曾經灌漿處理才通過的剪裂帶地段。由於未預先施作地質固結灌漿處理,致開挖面抽坍盾身受夾,經開挖迂迴坑作灌漿處理及 TBM 脫困作業,共花費 5 個月時間才完成,於 92 年 5 月恢復全斷面開挖。迄 92 年 6 月 30 日計完成 325 公尺,平均開挖進度為 180 公尺/月,最佳開挖進度為 217 公尺/月。TBM 即將進入粗粒石英砂岩之良好地質,削刀將面臨嚴重損耗。

②東口西行線鑽炸法工作面

本工作面仍在四稜砂岩地層,地質情況雖已逐漸轉好,但仍偶有剪裂帶及地下滲水出現,所以開挖進度一直無法大幅提昇。本期共開挖 1,034 公尺,平均進度 54 公尺/月,惟單月最佳進度曾達 126 公尺/月,創下各工作面鑽炸法最高紀錄。

③其他工作面鑽炸法

西口東、西行線、二號豎井增關西行線坪林端及頭城端等四個工作面,因地質情況均相當良好,所以開挖進度正常且比預期為佳。由導坑經三號中繼站增關西行線之工作面,因施工空間、動線及機具受限,已經開挖 3 個月,僅完成 59 公尺。本期一年半各工作面之開挖實績為過去十年半所開挖總長的 54%,成效優越,茲列如表 3:

表 3、 雪山隧道修正改善施工因應方案開挖實績(90.12 92.06)

工作面及開挖方法	開挖長度(公尺)	平均進度(公尺/月)	最佳進度(公尺/月)
1.導坑工程			
(1)東口(TBM)	3,308	256	400.8
(2)西口(D&B)	1,255	66	93
(3)二號豎井(D&B)	94	82	121
2.主隧道			
(1)東口			
a.東行線(TBM)	807	180	217
b.西行線(D&B)	1,034	54	126
c.增關西行線(D&B)	59	20	26
(2)西口(D&B)			
a.東行線	1,415	75	107
b.西行線	1,368	72	100
(3)二號豎井(D&B)			

a.西行線坪林端	1,093	58	98
b.西行線頭城端	711	47	87
合計	11,144		

雪山隧道主隧道及導坑工程自 80 年 7 月迄 92 年 6 月，共完成開挖 31,817 公尺，約佔總長度的 82%，尚餘 6,984 公尺未開挖，預定導坑可於 92 年 9 月；西行線於 93 年 5 月；東行線於 93 年 9 月分別貫通，工地正全力趕工中，各工作面的進度見表 4 及圖、7。

表 4、 雪山隧道各工作面已開挖之長度統計表(92.06.30)

單位: 公尺

隧道名稱	總長度	西口	二號豎井		二號中繼站	東口	合計 (已開挖)	完成百分比	剩餘 (未開挖)
			坪林向	頭城向					
導坑	12,942	4,685	802	102	-	6,694	12,283	(95%)	659
東行線	12,917	4,350	-	-	-	4,121	8,471	(66%)	4,464
西行線	12,942	4,220	1,489	1,107	59	4,187	11,063	(85%)	1,879
合計	38,801	13,255	2,291	1,209	59	15,002	31,817	(82%)	6,984

經統計主隧道在四稜砂岩與導坑 TBM 在四稜砂岩及非四稜砂岩開挖每公尺的作業循環時間分別為 232 分鐘、128 分鐘及 179 分鐘，惟 TBM 的利用率 (utilization) 則只有 20%、16% 及 28%，比歐美的 30% 至 50% 仍有相當的差距，而故障率則達 17%、19% 及 14%，顯示 TBM 維修保養及工程管理有待加強，見表 5。

表 5、 雪山隧道主隧道 TBM 及導坑 TBM 作業循環時間統計表

作業項目	主隧道 TBM (每公尺)		導坑 TBM(每公尺)			
			四稜砂岩段 (91.03.01 91.08.24)		非四稜砂岩段 (91.08.25 92.06.08)	
	時間 (分)	百分比 (%)	時間 (分)	百分比 (%)	時間 (分)	百分比 (%)
1.開挖	46	20	28	16	36	28
2.清碴	-	-	14	8	7	5
3.組裝環片	16	7	27	15	20	15
4.背填礫料	35	15	16	9	15	12
5.保養維修	63	27	25	14	11	9
6.鑽探	6	3	23	13	8	6
7.故障	41	17	33	19	18	14
8.管線延長	2	1	6	3	6	5
9.測量及其他	23	10	7	3	7	6

合計	232	100	179	100	128	100
----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

註: 1.統計時間不包含受困停機、地質灌漿及大規模檢修。

2.非四稜砂岩段的開挖時間比四稜砂岩段長，係因當時六支主推進唧筒中有二支故障，無法全出力。

六、綜合檢討

- 1.北宜高速公路之路線係基於公路功能、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，地質情況愈佳，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，因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，祇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採用的趨勢。後來年明知導坑 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完全沒有弱帶的，問題是地質弱帶的事故預防與處理，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沒有經驗，又從東口惡劣的地質開始開挖，特別是 TBM 的鑽機以及整體設計無法適應東段既堅硬又易脆的破碎四稜石英砂岩，初期均無法按照先探明地質狀況，必要時採取灌漿固結因應，讓 TBM 安全通過的施工理念進行。從導坑 TBM 曾經於事前灌漿三次均安然通過的經驗，証實灌漿只要略微改善破碎帶的自立性，讓抽坍量不大於 TBM 出渣能力而將削刀頭面鉞堵死，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。此案寶貴經驗希望能在國內傳承與生根。
- 6.榮工公司畢竟還是公家單位，一切作業必須遵照政府的採購法，所以機具、材料採購以及招商作業都不如民間包商靈活。後續工作面甚多，並且分別由不同的協建廠商施工，須有妥善的工作安排及良好的施工管理，否則將造成施工界面的混亂而影響工程進度及通車日期。
- 7.雪山隧道許多榮工公司的協建廠商表現不俗，在如此惡劣的施工環境之下，每個月的開挖進度能有 100 公尺以上的紀錄，確實不易，已不輸給國外的標準。國內

民間包商在鑽炸法的隧道施工已累積了豐富的經驗，施工技術已漸趨成熟，只要有合理的利潤與商機，工作態度仍然相當積極而有效率，值得鼓勵與培育，以提昇國內的隧道施工技術。

七、結語

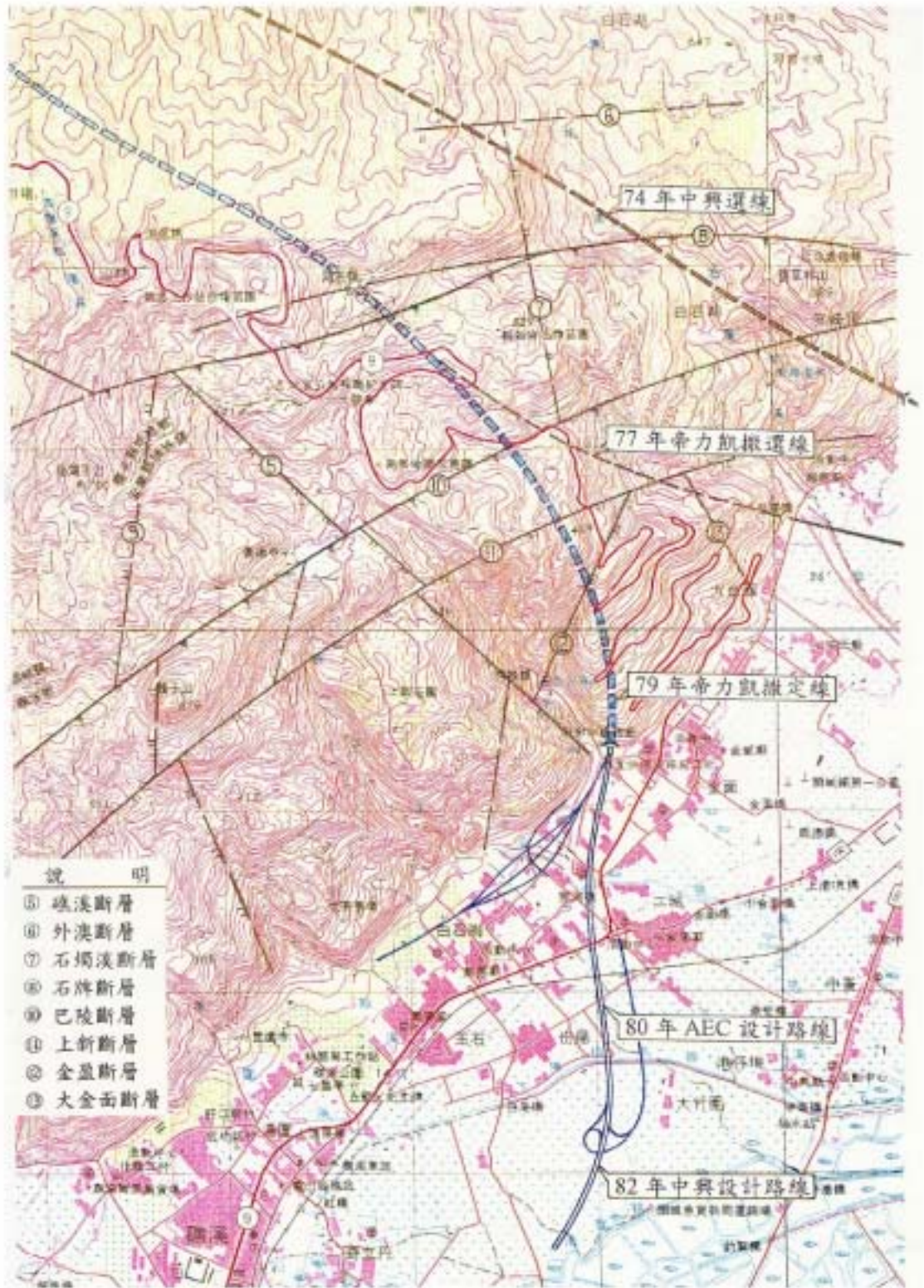
雪山隧道東段遭遇了世界上罕見既堅硬又破碎的四稜石英砂岩地層及大量高壓地下湧水，致施工災害與事故頻傳，完工通車日期一再延後。歷經十二年的堅苦奮鬥，惡劣的地質問題總算一一克服，此間工程師所承受的辛酸與壓力，不言可諭。在遭受無情的打擊與教訓中也學習到了許多無法用金錢買得到的寶貴經驗。值此導坑即將全線貫通的前夕，一切都已在掌握中，通車日期已經露出了曙光，讓我們迎接那盼望已久的美好一天。

參考文獻

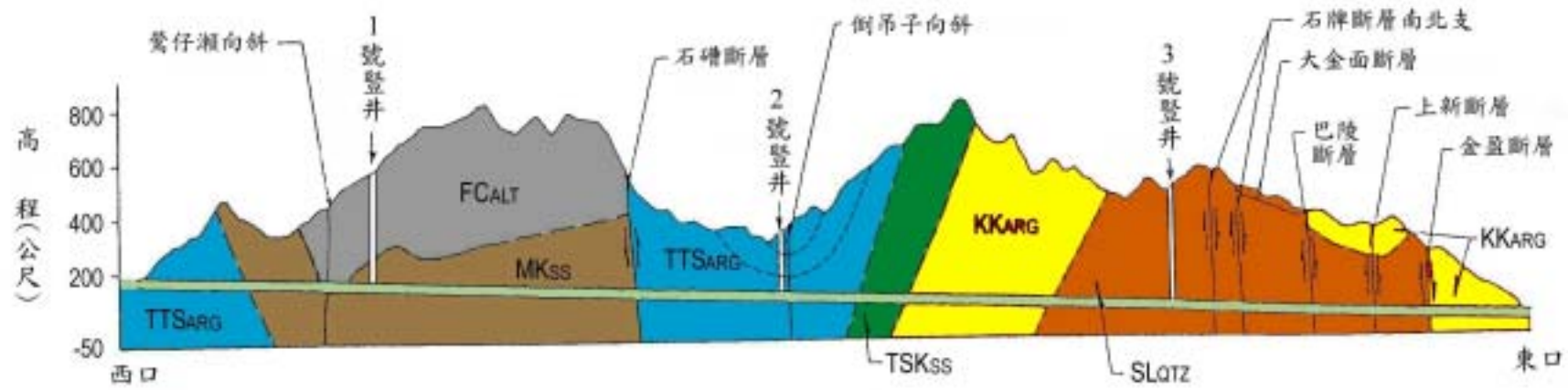
- 1.中興工程顧問社(1984)，南港頭城隧道公路地質評估。
- 2.美國帝力凱撒顧問公司(1988)，南港 - 宜蘭隧道公路計畫可行性研究。
- 3.美國帝力凱撒顧問公司(1990)，南宜高速公路路線評選。
- 4.Asian Expressway Consultants (1990), Special Report of Pinglin Main Tunnel Construction Methodology.
- 5.Asian Expressway Consultants (1991), Geotechnical Information for Construction of the Pinglin Pilot Tunnel.
- 6.NIE Advisory Board (1990), Nankang-Ilan Expressway Project, Record of Advisory Board Meeting No. 1.
- 7.NIE Advisory Board (1990), Nankang-Ilan Expressway Project, Record of Advisory Board Meeting No. 2.
- 8.NIE Advisory Board (1991), Nankang-Ilan Expressway Project, Record of Advisory Board Meeting No. 3.
- 9.林振基(1994)，日本讚岐隧道 TBM 通過斷層破碎帶的處理方法，中興工程第四十二期。
- 10.林振基、李宏徹(1994)，坪林隧道導坑工程及 TBM，中興工程第四十四期。
- 11.NIE Advisory Board (2000), Taipei-Ilan Expressway-Pinglin Tunnel Project, Record of Consulting Board Meeting.
- 12.國工局專家諮詢顧問團(2001)，北宜高速公路雪山隧道工程專家諮詢顧問會議總結報告。



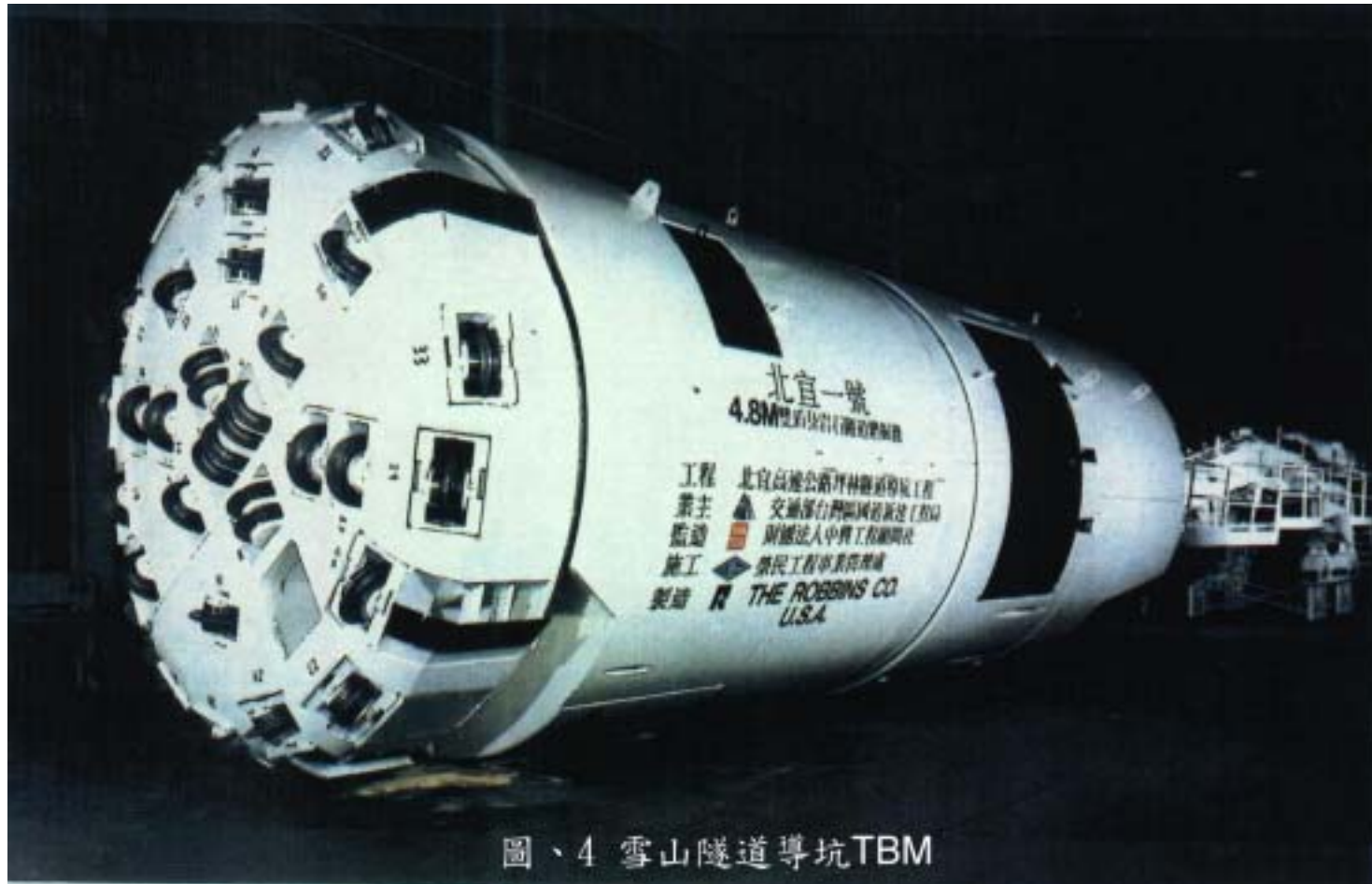
圖、1 雪山隧道評選路線



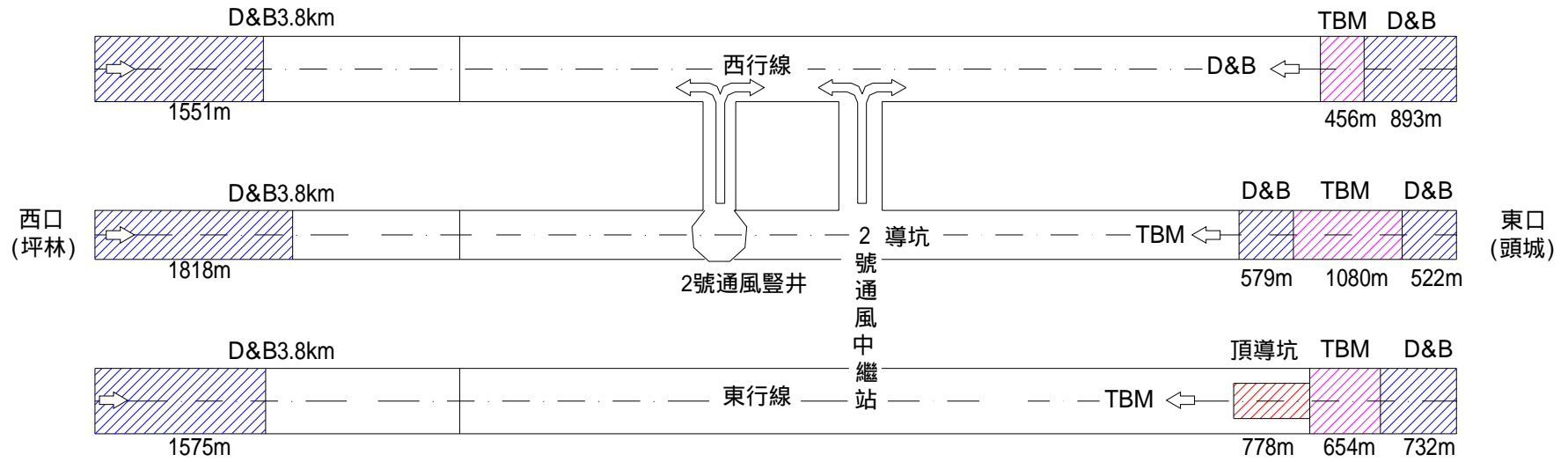
圖、2 雪山隧道定線東段地質狀況圖



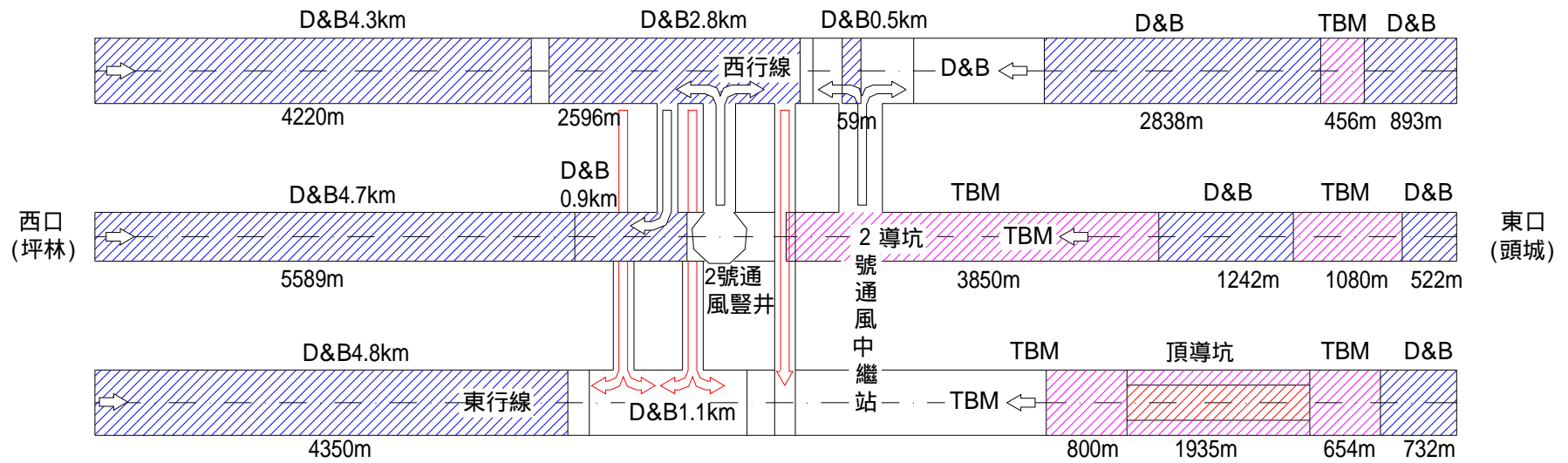
圖、3 雪山隧道地質剖面圖



圖、4 雪山隧道導坑TBM



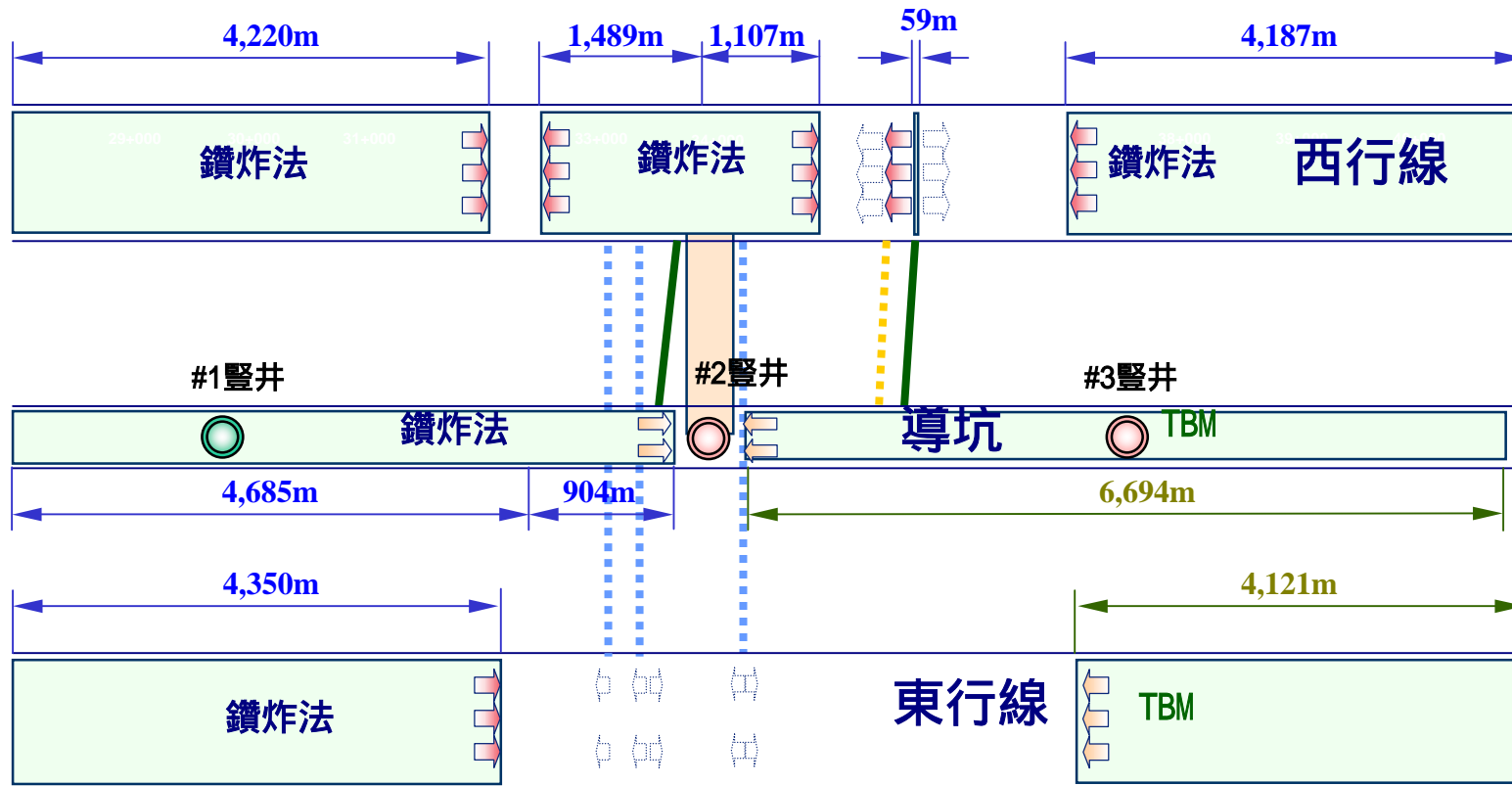
圖、5 雪山隧道施工改善因應方案平面圖 (88.01.01)



圖、6 雪山隧道修正施工改善因應方案平面圖 (92.06.30)

西口(坪林)

東口(頭城)



圖例： 已完成區段

圖、7 雪山隧道施工進度示意圖(92.06.30)

表 2、雪山隧道導坑歷次受困概況一覽表

次序	發生樁號 發生日期	事 故 現 象	停 機 時 間	脫 困 方 法
1	40K+138.5 82.01.22	破碎硬頁岩，湧水量約 11-32 l/s。 機頭上方及前方抽坍，伸縮盾湧入渣料，機件遭掩埋，致 TBM 全面停機。	82.01.22 82.04.24	1. 開挖迂迴隧道 3 道(計 63.5m)至機頭擴挖清理前方及機身落渣約 120 m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 23 m ³ 。 3. L.W、B.C 固結灌漿約 170 m ³ 及 PUIF 化學灌漿計約 738kg。
2	40K+083.0 82.05.25	破碎硬頁岩，湧水量約 20-40 l/s。 機頭上方及前方抽坍，伸縮盾湧入渣料，機件遭掩埋，致 TBM 全面停機。	82.05.2 82.07.15	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 22.3m)至機頭擴挖清理前方及機身落渣約 100m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 32 m ³ 。 3. L.W 化學及水泥固結灌漿約 105m ³ 。
3	40K+075.0 82.08.29	破碎硬頁岩，少量湧水。 機頭上方及前方抽坍，岩塊卡住進渣斗及削刀座凹槽，致切削頭無法運轉。	82.08.29 82.10.04	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 21.4m)及頂導坑清理前方落渣約 25m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 6m ³ 。 3. L.W 化學灌漿、水泥固結灌漿及 B.C 固結灌漿約 123m ³ 。
4	40K+040.7 82.10.22	破碎硬頁岩，無湧水。 機頭上方及前方抽坍，岩塊及細料擠滿切削頭之前面及四周，切削頭受擠壓而無法運轉。	82.10.22 82.12.20	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 20m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 50m ³ 。 2. ARON SR-US+水玻璃機身保護灌漿約 4m ³ 。
5	39k+972.4 83.02.22	全上。	83.02.22 83.04.07	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 17.4m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 30 m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 97m ³ 。 3. 水泥固結灌漿約 18m ³ 。
6	39k+841.9 83.05.25	金盈斷層(軟弱破碎硬頁岩，無湧水) 機頭上方及前方抽坍，岩塊及細料擠滿切削頭之前面及四周，切削頭受擠壓而無法運轉。	83.05.25 83.06.30	1.開挖迂迴隧道 2 道(計 30m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 2 m ³ 。
7	39K+816.0 83.07.10	金盈斷層(破碎細砂岩，湧水量最大約 25-30 l/s)。 機頭上方及前方抽坍，伸縮盾湧入渣料，機件遭掩埋，致 TBM 全面停機。	83.07.10 83.9.20	1. 開挖迂迴隧道 2 道(計 37.3m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 300 m ³ 。 2. ARON SR-US+水玻璃機身保護灌漿約 48 m ³ 。
8	39K+530.4 83.11.07	破碎四稜砂岩，湧水量最大約 185 l/s。 高壓地下水大量湧入，淹沒驅動馬達，致渣料無法清理及輸送而告停機受困。	83.11.07 83.12.23	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 20.4m)及頂導坑清理前方落渣約 10m ³ 。 2. 排水廊道開挖。
9	39K+168.7 84.02.18	破碎石英砂岩，湧水量最大約 150 l/s。 機頭至盾尾抽坍，高壓地下水大量湧入，盾尾頂拱環片墜落，TBM 機身全遭掩埋，湧水量持續八個月仍在 45 l/s 以上。	84.02.18 84.12.05	1. 開挖迂迴隧道 6 道(計 137m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 250 m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 83 m ³ 。 3. 排水廊道開挖。 4. 受損環片拆除復舊。 5. L.W、水泥固結灌漿約 120 m ³ 及 PUIF 化學灌漿計約 6,800kg。
10	39K+079.4 85.02.05	破碎石英砂岩，湧水量最大約 150 l/s。 機頭上方及前方抽坍，高壓地下水伴隨渣料湧入伸縮盾及尾盾區，淹沒 TBM 主驅動馬達，致 TBM 受困無法前進。	85.02.05 85.09.13	1. 開挖迂迴隧道 6 道(計 81.7m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 200 m ³ 。 2. ARON SR-US 機身保護灌漿約 68 m ³ 。 3. 鑽設排水孔。 4. L.W、水泥固結灌漿約 200 m ³ 及 PUIF 化學灌漿約 16,300kg。
11	37K+431.0 90.04.10	破碎四稜砂岩局部夾硬頁岩及粉砂岩，湧水量約 20 l/s。 機頭上方抽坍，渣料擠滿切削頭前方及湧入伸縮盾，致 TBM 切削頭無法運轉。	90.04.10 90.08.16	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 14.53m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 30 m ³ 。 2. 鑽設排水孔。 3. L.W、水泥固結灌漿約 493 m ³ 及 MC-2033 約 40kg、MC-208 約 1075kg 化學灌漿。
12	37K+366.0 90.08.25	硬頁岩及其上、下均為中至粗粒石英砂岩，湧水量約 5 l/s。 機頭上方抽坍，渣料擠滿切削頭前方及湧入伸縮盾，致 TBM 切削頭無法運轉。	90.08.25 90.11.17	1. 開挖迂迴隧道 1 道(計 25.07m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 30 m ³ 。 2. 鑽設排水孔。 3. L.W 及水泥固結灌漿約 325 m ³ 。
13	33K+989.7 92.06.10	鶯仔瀨向斜破碎帶。灰黑色細粒砂岩至粉砂岩。 機頭上方抽坍，大量渣料擠滿切削頭前方及湧入伸縮盾，致輸送帶超載無法運轉。	92.06.10 92.07.31 (預定)	1. 開挖迂迴隧道 1 道(預計 25m)及頂導坑清理前方及機身落渣約 30 m ³ 。 2. L.W 及水泥固結灌漿約 228 m ³ 。