

雪山隧道之調查與設計

國工局 設計組

摘要

全長 12.9 公里的雪山隧道，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，為北宜高速公路的關鍵工程。雪山隧道之難在其地質之複雜多變，斷層及剪裂帶甚多且不斷有大量突發性湧水。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。因其範圍太大並無法完全繞過，又因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，就以交通功能需求為優先考量。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。

一、地質調查

雪山隧道最大覆蓋厚度 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，因此自 72 年規設階段起就依據各階段所需精度，分期、分批進行地質調查，迄至 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。

以上調查數量是當時國內最具規模之地質調查工作。全線岩體品質經推估預行評分及分類，作為設計支撐、襯砌以及編製工程預算之依據。圖一為隧道沿線地質剖面圖，由調查結果可知，地層之出露順序，由東而西依次為始新世四稜砂岩、漸新世之乾溝層、粗窟層、大桶山層及中新世之媽岡層及枋腳層。

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，岩體高度破碎，岩體品質屬差至極差。隧道沿線其餘四分之三長度，岩性主要為砂岩、頁岩及砂

頁岩互層，除靠近石槽斷層及褶皺軸部區段外，岩體品質普遍較佳。

隧道共穿過六條主要斷層，由西向東排列依序為：石槽斷層、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隧道東段約三公里範圍內，形成一組正斷層群。除上述主要斷層構造外，尚有鶯子瀨向斜軸及倒吊子向斜軸二處構造。

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。由於從地表完成的地質調查資料畢竟有限，為彌補此不足，乃設計開關導坑工程，在主隧道開工前直接查明隧道實質路線地質縱剖面及力學行為。施工期間亦編列補充地質調查經費，以資配合。

二、設計重點

一、工程配置

雪山隧道共配置東行線及西行線主坑隧道各乙座，導坑隧道乙座，車行聯絡隧道 8 座，人行聯絡隧道 28 座，垂直通風豎井 3 對，每對各含一進氣井及排氣井。主坑徑寬 11.8 公尺，為車行隧道，導坑徑寬 4.8 公尺，主要為地質調查功能，兼具營運階段之維修及逃生廊道功能，其斷面配置如圖二。車行聯絡道間距 1,400 公尺，人行聯絡道間距 350 公尺，三對通風豎井之深度，依進氣井及排氣井分別為 480 公尺及 501 公尺、238 公尺及 249 公尺、438 公尺及 459 公尺。整座隧道配置及通風系統透視如圖三。

二、工法評估

雪山隧道長達 12.9 公里，由地質調查結果，隧道沿線有將近 10 公里之長度地質情況良好，適合採用 TBM 施工，其施工進度預估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，專家評估先經地質處理後仍可以 TBM 施工。此外 TBM 由東口開挖，對出碴及排水相當有利，對環境影響最少，大部分碴料可直接利用作為頭城交流道之大量填方。

最後考量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。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，決定雪山隧道採用 TBM 工法施工。但東洞口約 700 公尺岩體評分「甚差」之乾溝層硬頁岩不良地質帶，計畫利用 TBM 製造的時間，以鑽炸法開挖，將該段不良地質挖除，以避免 TBM 受困。

三、支撐方式

為因應鑽掘機之快速開挖，隧道開挖支撐採用鋼筋混凝土預鑄環片為原則，於地質弱帶及斷層破碎帶經過處理後，不論岩盤優劣，均以一種支撐型式，以資簡化。環片外

側再以場鑄混凝土打設內襯砌，於環片與內襯砌間並加設防水層，保障隧道頂拱及側壁不受地下水之侵入，並保持隧道內不致潮溼。導坑每環由四片環片所組成，環片之寬度為 1.2m，厚度為 18cm。主坑每環則由六片環片所組成，環片之寬度為 1.5m，厚度為 35cm。鑽炸段支撐工設計則採用新奧工法，以 RMR System 及 Q System 評分，將岩體分成六類，對應六種不同的開挖支撐方式，採用半剛性支撐構件，如噴凝土、鋼絲網、岩栓、型鋼等組合支撐。

四、豎井

因應雪山隧道的通風需求，採用三對進氣井及排氣井分開的方式設計。進氣井與排氣井距離 50 公尺（中心至中心），以避免開挖後彼此產生力學上不良影響。支撐系統原則上採用新奧工法的支撐構件，包括岩栓、噴凝土、鋼線網、鋼肋及支撐鋼管等。

開挖方式分兩種，一為由上往下一次全斷面開挖的下沉工法。此工法碴料需利用吊桶由豎井口運出，此外若遭遇大量地下湧水時，需有足夠能量的抽水設備，將地下水由開挖面抽至豎井外。另一種為昇井工法，此工法的前提需下方的水平隧道先行打通，再由地表鑽設一直徑約 23 公分的導孔至底部，再由底部以一直徑約 2.5 公尺的鑽頭由下往上擴孔，最後再由上往下一次擴挖至豎井設計斷面（圖四）。由於此時水平隧道已先行到達豎井底部，故開挖的碴料可利用重力經由導孔掉入水平隧道，由水平隧道運出，此外地下水亦可藉由重力由導孔經水平隧道排除。

雪山隧道豎井之施工經考量前述兩種施工方法之特性與優缺點，並參考實際調查後之地質情況綜合評估後，認為昇井工法較為有利。惟為考量施工單位之專業能力與經驗，及導坑是否可如期到達豎井井底位置等因素後，決定兩種施工方法皆可採行，由施工單位做最佳之建議。

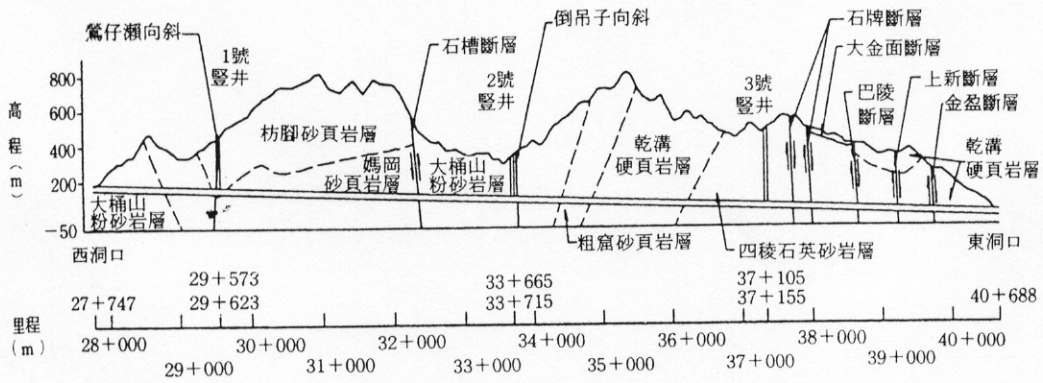
三、回顧與檢討

在隧道全線貫通後，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，經過地盤改良後，目前隧道總滲水量比當初推估值為低，惟湧水區段則如原推估。

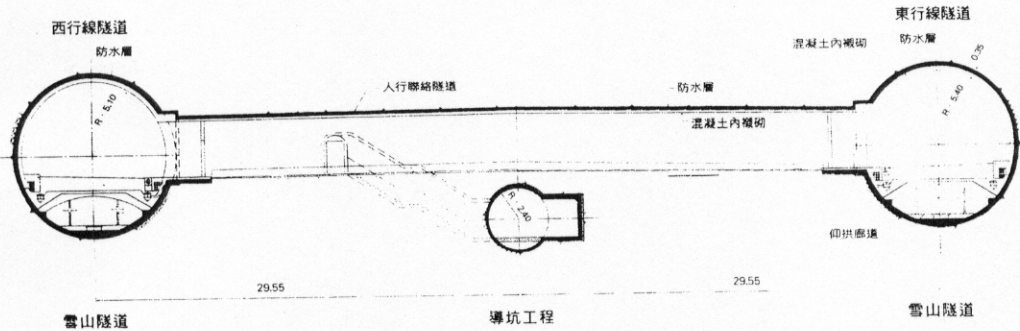
施工初期由於 TBM 甫進場，承商對於 TBM 之操作並不熟練，又逢四稜砂岩地質困難，突發湧水頻仍，是以一直遭遇施工困頓情形。隨著施工團隊不斷嘗試與努力，在困難地質的處理技術較能掌握，TBM 遇困時亦有標準作業程序可以依循，並予迅速脫困。進入四稜砂岩尾段，地質情形如早期地質調查所推測，岩體較佳，破碎情形較少。脫離四稜砂岩後，TBM 更全力飛奔，屢創佳績，單日最佳進度為 24.7 公尺，單月最佳進度

400.8 公尺。

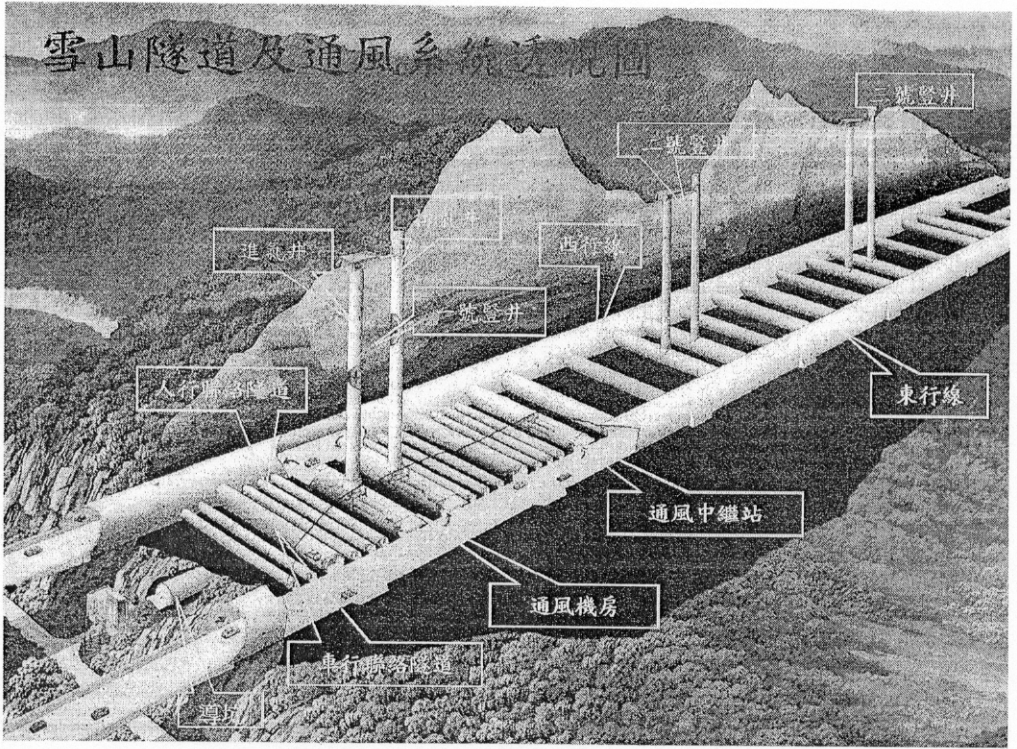
雪山隧道 TBM 之施工不順，主要原因係台灣第一次採用新工法沒有經驗，又從東口惡劣的地質開始開挖，特別是 TBM 的鑽機以及整體設計無法適應東段既堅硬又易脆的破碎四稜石英砂岩。但從導坑 TBM 曾經於事前灌漿三次均安然通過的經驗，証實灌漿只要能有效改善破碎帶的自立性，則 TBM 就能快速的通過。回顧設計過程與工法選擇，TBM 開挖確實有其優越性，也是世界上長隧道開挖採用的趨勢，雪山隧道 TBM 設計與施工得到了許多寶貴的經驗，這些寶貴經驗希望能在國內傳承與生根。



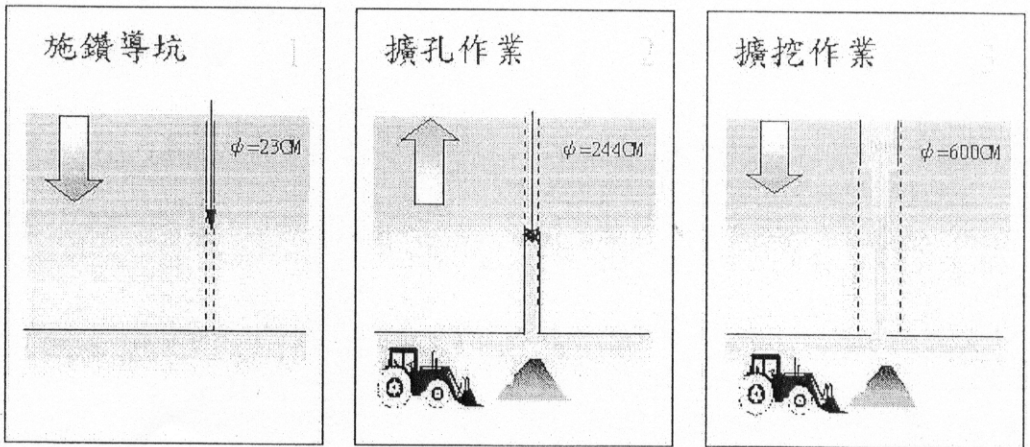
圖一：雪山隧道沿線地質剖面圖



圖二：雪山隧道開挖斷面配置圖(含人行聯絡道)



圖三：雪山隧道透視圖(國工局，2000)



圖四：昇井工法施工示意圖