

北宜高速公路雪山隧道交通控制與 機電安全系統

李宏徹¹ 楊振忠² 陳憲壬³ 劉志堅⁴ 邱智斌⁵

¹ 國道新建工程局設施組組長

² 國道新建工程局設施組機電科科長

³ 國道新建工程局設施組交控科科長

摘要

北宜高速公路雪山隧道係穿越臺灣北部雪山山脈，長達 12.9 公里之雙孔單向雙車道高速公路隧道，為將來溝通台北到宜蘭之主要交通孔道。雪山隧道內交通控制系統包括車輛偵測器、車道管制號誌、資訊可變標誌、閉路電視、緊急電話、FM 廣播、速限可變標誌、語音廣播、無線電話及交通管理軟體等，機電安全系統包括輸配電系統、照明系統、火警偵測系統、消防系統、通風系統、空調系統及監控系統等，除提供平時用路人於隧道內舒適安全行車環境及營運單位交通管理功能外，更利用壅塞偵測、事件自動偵測及人員通報等方式，極早獲知事故或災害事件，提供緊急人員逃生、交通管理應變及救援之需求。

關鍵詞：北宜高速公路、雪山隧道、交通控制、機電安全

一、前言

隧道土木結構體有如人之形體、肌肉及骨幹，而交通控制及機電安全系統有如人之血脈、感官、神經及思維。雖然以工程建造成本而言，交通控制及機電安全系統遠不及隧道結構體，但完工通車後，用路人於隧道內行車所能感受到的，除路面平整外，最直接便是安裝於隧道上方及兩側壁之交通控制及機電安全設備，這些設備除提供良好行車環境外，對用路人更有建立安全感之作用。另外對營運管理而言，交通控制及機電安全設備自動化運轉，除可提高效率、降低運轉成本及無人化機房，管理及維護單位集中，減少整體營運成本外，並能自動偵知事件發生，提供逃生、應變及救援需求，減少生命財產損失。

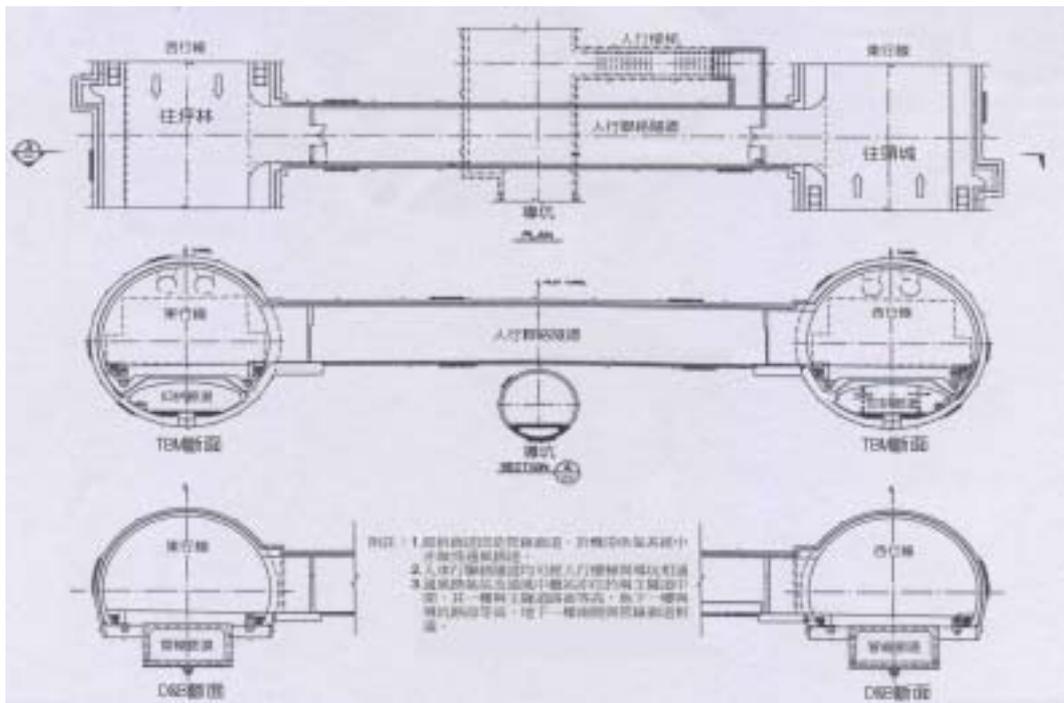
雪山隧道為 12.9 公里長隧道，於規劃設計時，交通控制及機電安全系統亦為設計要項，本報告即針對雪山隧道交通控制及機電安全系統設計概述如下。

二、雪山隧道概要

2.1 設計概要：

(a) 雪山隧道長度 12.9 公里，為分離之雙孔隧道，每孔隧道為單向雙車道瀝青混凝土柔性路面。

- (b) 坡度由頭城往坪林方向為 1.255%。
- (c) 共設三處通風豎井，每處包含進氣豎井及排氣豎井各乙座。配合通風豎井位置，兩孔隧道間設三處通風換氣站，另為兩主隧道通風循環，設置三處通風中繼站。
- (d) 每一車道寬 3.5 公尺，行車淨高 4.6 公尺。
- (e) 每一主隧道車道下方有一管線廊道（亦為通風廊道），供電力、通訊及控制線路使用及機房供氣系統之風道。
- (f) 兩隧道間下方有一導坑，直徑 4.8 公尺，供維護、救災及逃生等用途，亦為機房供氣系統之風道。
- (g) 兩主隧道間設置橫向聯絡隧道，每 350 公尺設乙座人行聯絡隧道（共 27 座），每 1400 公尺設乙座車行聯絡隧道（共 9 座），供人員緊急避難及車輛緊急疏散用，人 / 車行聯絡隧道並以人行樓梯與導坑銜接，可供人員通達導坑。
- (f) 規劃設置乙座緊急通達隧道，長約 2 公里，可由地方道路（台九線）通達主隧道東行線中點處，做為災害救援及人車疏散之備用通路。
- (g) 雪山隧道採全斷面隧道鑽掘機（TBM）及傳統鑽炸法（D&B）方式開挖。



圖一 雪山隧道斷面圖

三、交通控制系統

長隧道對於用路人而言，經常產生莫名的壓迫感，而災害發生時，其密閉空間造成之危害更是嚴重，且對於救援之施予，其困難度也高，因此對於交通

管理需求及系統的設計要求亦與一般路段有所不同，首先對雪山隧道交通控制系統功能設計考量做一介紹。

3.1 系統功能需求

雪山隧道交通控制系統於設計上應滿足交通管理及緊急救援聯絡兩大需求。

3.1.1 交通管理需求

(a) 旅行者資訊需求：基本上區分成行前旅行與行進間駕駛人資訊等兩方面需求，在行前旅行資訊部分，通常與整體路段之交通資訊整合發佈，在行進間駕駛人資訊，則利用各種無線電台、語音廣播及或路側資訊顯示系統，提供隧道內用路人各種即時之交通、事件及管制資訊。

(b) 事件管理需求：事件發生後對於長隧道之衝擊相當大，如能建立良好的事件管理系統將能有效提供操作與安全上的效益，而事件管理需要組織間的合作與事先擬定周詳的救援計畫，事件發生後以最快速度將事件移除並恢復主線容量。管理系統應可有效偵知或取得事件資訊，並有秩序的提供操作人員必要的指引及系統操作參考，執行必要之車道管制、資訊顯示及速限管制等策略。長隧道之事件除事故、火警外，亦包括維護及通風、電力、照明系統故障等。

3.1.2 緊急救援聯絡需求

由於長隧道封閉的環境，對於聯絡通訊而言將有較多的限制，緊急救援時通常另亦需較多相關單位相互配合，因此，系統設計時應滿足各救援單位聯絡通訊之需求，及用路人求援之通訊需求。

3.2 系統架構及功能

為完成上述系統功能需求擬設計下列系統，各系統間以通訊傳輸系統相連，系統架構如圖二所示。



圖二 交通控制系統架構示意圖

3.2.1 路況監視

為滿足事件管理有效掌握事件發生、結束等，對於隧道內之路況可利用車輛偵測器蒐集交通資訊，並以適當演算法偵知事件之發生，同時利用閉路電視系統監看以有效掌握整個隧道內之各類狀況。

3.2.2 交通管制

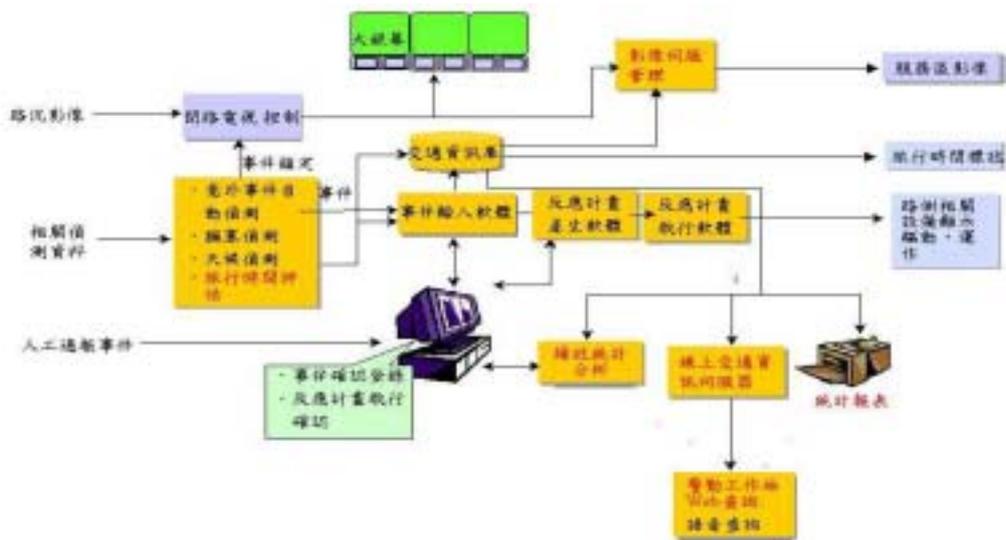
交通管制是有效利用路權範圍內所有能夠行車的路面，以暫時的管制手法達到交通管理的目的，包括車道管制、調撥、速限管制等。

3.2.3 訊息發佈

交控中心根據蒐集的交通狀況加以分析後，透過資訊可變標誌等將特定事件等資訊讓用路人瞭解。在隧道發生緊急事故時，由於資訊可變標誌為點的發佈，資訊無法立即有效傳達給所有駕駛人，因此利用語音廣播系統可有效達成資訊之傳遞功能，使駕駛人有所警覺，並進行緊急應變措施。

3.2.4 中央電腦系統

整合路況監視、交通管制及訊息發佈等系統，並於交控中心內提供一操作管理平台，並供操作人員進行事件管理、監視。除交控系統內各系統之整合外，亦應與隧道機電系統整合，獲取火災、配電、照明、通風等系統異常之事件訊息。系統架構如圖三所示。



圖三 中央電腦系統架構圖

3.2.5 緊急救援聯絡

當隧道內發生事故時，應提供緊急電話系統供用路人使用。另配合消防救援需求，配置消防無線電話系統，供隧道兩端不同轄區之消防隊間相互通信。此外，對於工務勤務等亦配置一無線電話系統，此系統為高速公路專屬使用之系統，可與高速公路內任一單位聯絡使用。

3.3 系統設計考量

本節針對各系統因應雪山隧道長隧道特性於設計時所做之特殊考量。

3.3.1 路況監視

- (a) 車輛偵測器：為使隧道內之事故可及早預知，配合事件自動偵測功能需求，車輛偵測器佈設密度為每 350 公尺一處，並於緊急停車彎裝設長環路線圈偵測器，對於任何車輛停等可有效立即偵知。
- (b) 閉路電視系統：因應長隧道之特殊考量，主線之閉路電視設計以監視無盲點為原則，故每一攝影機監視範圍為頭尾相接，且為固定鏡頭，不具旋轉、俯仰功能。另配合救援需求，於人車行聯絡隧道、導坑亦配有攝影機。系統設計時除滿足功能需求外，為避免隧道火警造成系統全部無法運作，特將系統配合隧道內機房分為三個區，任一區之故障不影響其它區之運作。

3.3.2 交通管制

- (a) 車道管制號誌：於每一車道上方設置一車道管制號誌，設置間距以考量用路人可至少看到一面號誌燈為原則。另由於可能實施單孔雙向通車之調撥行駛需求，內車道之車道管制號誌應為雙面，即順/逆向皆有號誌顯示。

(b)速限可變標誌：於主線兩車道中間上方設置一速限可變標誌牌面，設置間距約 700 1000 公尺，應避免隧道內風機、車道管制號誌等影響視線。

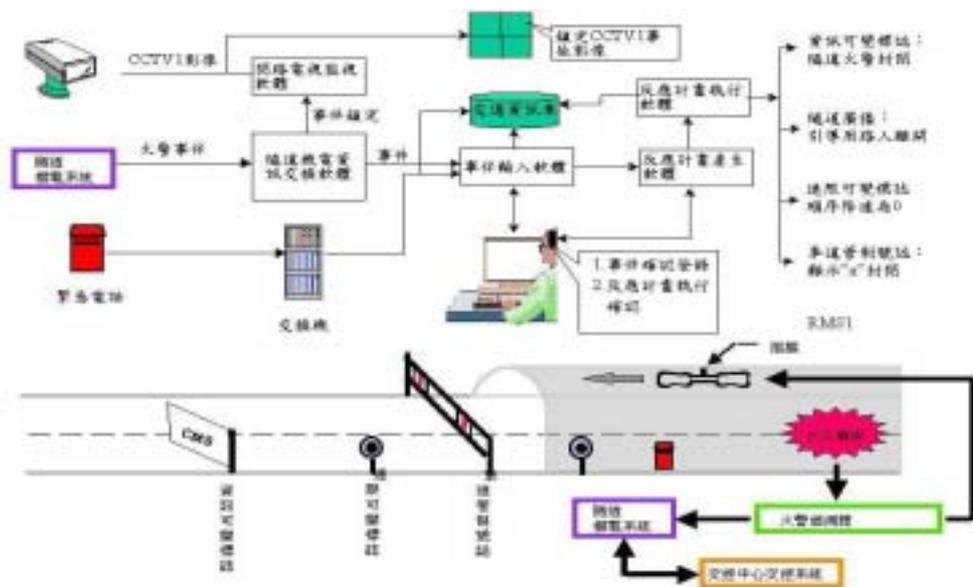
3.3.3 交通資訊

(a)資訊可變標誌：配合隧道斷面空間之不足，原則上僅於緊急停車彎處設置一柱立式資訊可變標誌，提供 6 個字的訊息顯示。

(b)隧道廣播：廣播系統包括語音及調頻廣播，語音廣播應考慮其音壓是否足夠，並設置監聽喇叭可適時監聽播放效果，調頻廣播則納入兩個警察廣播電台頻道，供民眾收聽一般交通資訊，當緊急時，則可強制插入語音廣播內容，確保所有用路人皆可獲得緊急資訊。廣播系統於主線及人、車行聯絡隧道皆應設置，以利逃生引導。另因隧道火警可能破壞系統設備致使系統無法運作，設計時亦將隧道分為六區配置中繼放大設備，任一區之故障不影響其它區之運作，確保緊急時有效運作。

3.3.4 中央電腦系統

考量系統長期穩定運作之需求，系統設計除備援功能外，另提供降級運轉功能，當交控中心無法運作時，可降級至隧道口之區段交控中心繼續運作。另為降低操作人員負荷及增加事件應變能力，其事件自動偵測、確認、事件自動反應建議及反應建議執行等處理流程應予完整檢討提供，運作流程如圖四所示。



圖四 事件管理作業流程圖

3.3.5 緊急救援聯絡系統

(a)緊急電話系統：於主線雙孔每 175 公尺設置一座。另人、車行聯絡

隧道係做為用路人緊急事件發生時避難之用，因此亦於人、車行聯絡隧道內設置緊急電話機。

- (b)消防無線電話系統：由於長隧道內無線電波傳送以漏波電纜較為合適，因此不適合使用傳統單頻單工系統，而採用收發異頻之系統。另配合隧道兩端轄區之消防隊編制，兩消防隊可相互連絡支援，避免救援工作之衝突。於隧道兩端設置中繼設備使隧道內消防人員可相互聯絡外，更可與隊部聯絡協調支援。

四、機電安全系統

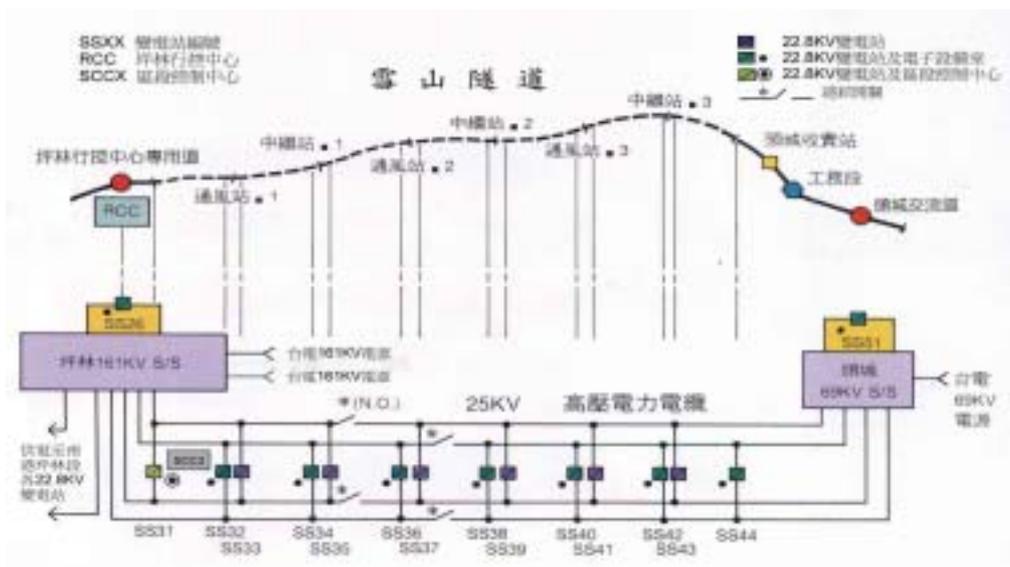
4.1 輸配電系統

為供應雪山隧道大量設備負載及提高電力可靠度，本隧道輸配電系統由乙處 161KV 特高壓變電站、乙處 69KV 特高壓變電站、22.8KV 高壓配電幹線、十四處 22.8KV 變電站、四部 2000KW 緊急柴油發電機、不斷電電源系統及相關高低壓配電設備等構成。

4.1.1 系統架構

雪山隧道內設備所需之電力負載，均由位於坪林行控中心專用道之坪林 161KV 變電站及位於頭城交流道之頭城 69KV 變電站供應。坪林 161KV 變電站由台灣電力公司 161KV 特高壓雙迴路供電，頭城 69KV 變電站由台灣電力公司 69KV 特高壓單迴路供電。為增加供電可靠性，上述二處特高壓變電站規劃為可互相支援之供電系統，即當其中一處變電站發生故障無法供電或台灣電力公司停止供電時，另一處變電站仍可全容量支援其所供電之負載。

平時兩特高壓變電站個別供應雪山隧道一半用電量，分別以兩迴路 22.8KV 配電線路供電至隧道洞口及隧道內各 22.8KV 變電站，22.8KV 變電站降壓至低壓三相四線 380V/220V，供應設備動力及照明等所需。



圖五 輸配電系統架構圖

4.1.2 緊急柴油發電機及不斷電電源系統

當台灣電力公司於坪林兩迴路或頭城一迴路停電時，為供應北宜高速公路緊急設備需要，分別於坪林 161KV 變電站及頭城 69KV 變電站各設置二組 2000KW 可並聯運轉之緊急柴油發電機組，可以緊急支援供電。

當台灣電力公司停電，緊急柴油發電機尚未完成起動供電期間，或進行高壓配電迴路開關切換瞬間，部分重要負載均接至不斷電電源系統，以確保任何時間均不會斷電，而喪失設備功能。

4.2 照明系統

為提供用路人於進出隧道區間及於長隧道內行車之舒適視覺環境，雪山隧道主隧道照明系統設計特別強調照明均勻度及避免產生閃爍上，使駕駛者視覺上易於適應長隧道環境且不易疲勞，以確保行車安全。

4.2.1 主隧道照明系統

主隧道照明設計係依據國際照明協會 (CIE) 建議值辦理，共分為進口區 (Access Zone)、境界區 (Threshold Zone)、漸變區 (Transition Zone)、內部區 (Interior Zone) 及出口區 (Exit Zone) 等五區，採用 40W * 2 日光燈為內部區照明燈具，在境界區及漸變區採用逆照式 (Counter Beam) 高壓鈉氣燈加強照明，逆照式高壓鈉氣燈可降低設計所需之輝度基準，出口區及隧道內緊急停車彎則採用對稱式高壓鈉氣燈加強照明。

照明系統採用回路點減控制方式設計，共分為七個階段控制，白天由機電監控電腦依隧道洞外輝度計值與預設點減範圍值比較，進行各階段自動點減，晚上則由機電監控電腦依內定時間表，點減照明階段。第一階段亦為緊急照明，接至電力系統不斷電電源迴路，不會因台灣電力公司停電而斷電，且採用低煙無毒耐火電纜 (Fire Resistant LSFH Cable)。另當隧道發生火災時，主隧道照明系統受機電監控電腦控制，開啟至第七階段 (全亮)，以充分提供逃生及救災之能見度。

當隧道洞外照度低時，為銜接或延續隧道照明，以利駕駛者視覺適應，於隧道洞外 200 公尺內設置接續道路路燈，由機電監控電腦依輝度計值點減。

4.2.2 主隧道內火警緊急照明

為讓用路人於隧道內發生火災時，能利用步道逃生，故於主隧道左側壁，離步道 50 公分高，每隔 50 公尺安裝乙盞 60W 白熾燈，做為火警緊急照明。

4.2.3 導坑、管線廊道及人 / 車行聯絡隧道照明

導坑及管線廊道採用 40W * 2 日光燈，可由現場手動或遠方遙控點滅照明回路。人 / 車行聯絡隧道採用 40W * 2 日光燈，屬緊急照明，接至不斷電源系統，藉由紅外線偵測器偵測人員或車輛進出時自動點滅。

4.3 火警偵測系統

雪山隧道中主隧道、管線廊道、人 / 車行聯絡隧道、豎井、隧道洞口及隧道內各機房均依相關法規及場所特性設置火警偵測系統。

4.3.1 火警分區原則

主隧道與管線廊道部分，以聯絡隧道間及聯絡隧道與洞口間視為一火警分區，長約 350 公尺。聯絡隧道及機房部分，依據「各類場所消防安全設備設置標準」規定設置。

4.3.2 主隧道火警偵測系統

雪山隧道主隧道內目前設計兩套國內外安裝實績豐富，且使用狀況良好之火警偵測系統，將於施工時由承包商擇一安裝。火警受信總機能自動將警報訊息移報至機電監控電腦，除由機電監控電腦自動進行機電設備之應變措施外，並將火警訊息傳送至交控系統及行控中心，由交控系統自動進行相關交控策略，同時，行控中心管理人員則進行相關通報及救災措施。

4.3.3 管線廊道火警警報設備

採用適用於管線廊道、管道間及電纜架等常用之偵熱式偵測線，以偵測管線廊道內高低壓電力電纜、通訊控制纜線及電氣設備之溫度。

4.3.4 聯絡隧道及機房火警警報設備

依據相關法規規定設計適當火災偵測器，亦由火警受信總機自動將警報訊息移報至機電監控電腦，進行相關通報、應變及救災措施。

4.3.5 通風豎井火警警報設備

雪山隧道共有三座通風豎井，於每座進氣井頂端設置風道用偵煙探測器，避免進氣井附近產生之濃煙吸入隧道內，影響主隧道空氣品質。

4.4 消防系統

當主隧道及隧道機房發生火災時，提供用路人初期滅火及消防單位引接水源滅火使用。

4.4.1 隧道消防系統

隧道內每隔 50 公尺設置乙具消防栓箱，主要內含 2 具 20 磅 ABC 乾粉滅火器、口徑 40mm 消防栓與消防水帶（用路人使用）、口徑 65mm 消防栓（消防隊專用）、火警綜合盤 等。

由於雪山隧道為由坪林往頭城方向下坡路段，故隧道消防用水池設置於雪山隧道西洞口機房內，如此可減少消防泵所需揚程，易達設計消防栓出水壓力。消防用水由坪林行控中心引接自來水幹管，送至雪山隧道西洞口機房消防水池，並由西洞口機房以直徑 150mm 消防幹管經管線廊道輸送至每具消防栓箱附近，再以支管引接。

4.4.2 機房消防系統

依據相關法規設置室內、室外消防栓系統及手提滅火器，另於電氣室、電子設備室、控制室及不斷電電源室等重要設備場所設置二氧化碳自動滅火系統，除可立即滅火外，且不會因滅火而損壞重要設備。

4.5 通風空調系統

雪山隧道共有二套獨立通風系統，一為供應主隧道車道換氣之加強縱流式通風系統，另一為提供導坑、管線廊道、人/車行聯絡隧道及隧道機房內之人員與機房空調用新鮮空氣之供氣系統。機房空調系統目的在維持部分重要設備室及控制室之室內溫溼度，提供設備良好之工作環境。

4.5.1 主隧道通風系統

本加強縱流式通風系統目的在引入新鮮外氣，稀釋車輛廢氣與煙塵，再排放至隧道外，以提供隧道內良好空氣品質及能見度。另於火災發生，有效控制隧道內濃煙及熱氣擴散方向與速度，以利逃生及救災。

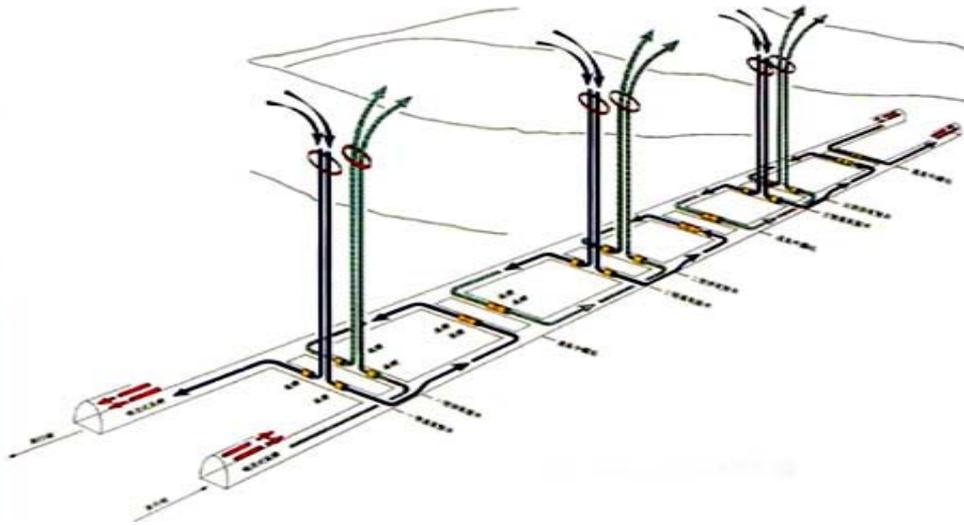
4.5.1.1 系統組成：

於兩孔隧道間設置三組通風換氣站及三組通風中繼站，共裝設 36 台變壓變頻控制轉速（風量）之軸流式風機（Axial Fan），每一通風換氣站包含二座通風豎井，一為進氣豎井，一為排氣豎井。並於隧道洞口、通風換氣站及通風中繼站附近之主隧道車道上方配置 112 台直徑 1 公尺之噴流式風機（Jet Fan），配合軸流式風機運轉，提供維持空氣品質之風量及風速。另外包含通風風門、一氧化碳偵測器、一氧化氮偵測器、能見度偵測器、風向風速計及通風監控軟硬體等，構成一自動運轉的加強縱流式通風系統。

雪山隧道空氣品質必須控制在一氧化碳(CO)濃度 75 ppm，能見度 K 值 0.007 m^{-1} 以下之容許範圍內。

4.5.1.2 一般運轉模式

平時運轉控制係依據隧道內空氣品質量測值、風量、風速、交通資料、通風設備狀態、電源供應狀態 等資料，進行分析比較後，自動化調整通風換氣站軸流式風機風量及車道上噴流式風機開啟台數，將適量的新鮮空氣由進氣豎井及隧道入口引入隧道，順車行方向稀釋車輛廢氣與煙塵，再經排氣豎井及隧道出口，將混合過之空氣排出。



圖六 主隧道通風系統圖

當一孔隧道內污染度高於另一孔隧道很多時，通風中繼站即進行兩孔隧道空氣交換，使新鮮空氣由通風進氣豎井經通風中繼站至通風排氣豎井之路徑中，經過一半污染度高及一半污染度低之隧道環境（如圖六所示）。如此，藉由交換兩孔隧道空氣，可降低單孔隧道通風所需的龐大通風負荷，並減少豎井設置數量。

4.5.1.3 火災運轉模式

首先關閉通風中繼站風機及所屬風門，防止濃霧擴散至另一孔隧道。控制風機運轉，使發生火災地區之風速維持在 2m/sec 4m/sec（參考值），以強迫煙霧向火災下游處漫延，可保護在火災上游處之人員。停止火災點上游 250 公尺及下游 500 公尺內之風機運轉，可避免擾動煙霧，延長煙霧維持在隧道上半部漫延距離，提供火災下游人員逃生空間，另關閉上游鄰近及下游全部聯絡隧道（避難隧道）之防火防煙風門。如為單孔雙向通車時，則停止所有風機，降低煙霧擴散速度。

當受困人員均進入聯絡隧道避難後，由控制室人員啟動所有風機（除中繼站外）進行排煙，以減少高溫對隧道及設備之損害，並利消防人員接近火災點進行滅火及救援。

4.5.2 機房供氣系統

係由兩端隧道洞口機房同時引入新鮮空氣，再經由兩側管線廊道及導坑，供應至人／車行聯絡隧道及隧道內各機房，做為人員及機房空調換氣用之新鮮空氣。

隧道東西洞口機房各裝設兩台軸流式風機，24 小時交換運轉，除提供上述地點新鮮空氣外，由於風機持續加壓供氣，可讓此通風空間保持正壓。當火災發生時，人／車行聯絡隧道內持續正壓，可防止隧道火災濃煙由門縫竄入，使逃生人員可以在聯絡隧道獲得安全避難。

4.5.3 機房空調系統

雪山隧道各機房空調均裝設氣冷式中央冰水系統，由氣冷式冰水機製造冰水，送至電氣室、不斷電電源室、通訊與控制室、電子設備室及會議室等之空調箱，供應所需之冷氣，提供設備良好工作環境。

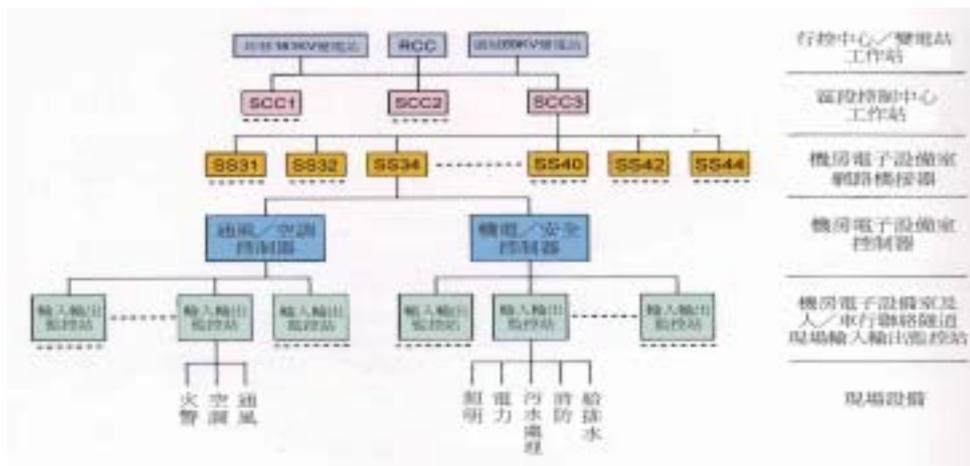
4.6 機電監控系統

為監視及控制雪山隧道內電力、照明、火警偵測、消防、通風空調、門禁安全及給排水等機電設備，確保各設備正常自動化運轉、警報及紀錄，以提供用路人於隧道內安全舒適之行車環境，營運管理單位運轉維護訊息，及隧道災害之機電自動應變措施。

4.6.1 監控系統架構

北宜高速公路南港頭城段機電監控系統共分為三個責任區段，每一區段各設置一處區段控制中心（SCC），三個區段之監控訊息均送至區域行控中心（RCC，即坪林行控中心）集中管理。雪山隧道為第三區段，其區段控制中心（SCC3）設置於雪山隧道西洞口機房。另外於坪林 161KV 變電站及頭城 69KV 變電站內設置電力監控工作站，均能監控北宜高速公路南港頭城段全線電力系統運轉。

硬體設備架構為，於隧道內及洞口機房之電子設備室或通訊控制室裝設重置式（Redundancy）機電 / 安全及通風 / 空調用控制器，接收各輸入 / 輸出監控站之各監控點訊號，再透過高速環形或雙迴路通訊網路，將訊號傳回坪林 161KV 變電站（SS16）、頭城 69KV 變電站（SS69）區段控制中心（SCC3）及區域控制中心（RCC）之重置式工作站。



圖七 機電監控系統架構圖

本監控系統採分散式控制與集中式管理架構，所有網路設備、控制器及工作站均採用重置式或雙備援方式架設，監控程式分散於各控制器及工作站內，管理程式（圖控畫面）則集中於 RCC、SS16、SS69 及

SCC3 之工作站內。本監控系統具有降級獨立運轉功能，在通訊網路中斷或上層控制設備故障時，各控制器均能依程式設定獨立運轉，不致完全中斷監控功能。

4.6.2 一般運轉功能

透過各監視訊號及偵測器量測值進行程式比較及計算後，控制及監視所有隧道機電設備自動化運轉，並提供歷史資料儲存與查詢、日月報表、操作人員密碼管理、參數設定、故障告警、事件告警 等功能。

4.6.3 事件處理功能：

諸如隧道火災事件、空氣品質事件、停復電事件、網路設備故障事件等發生時，監控系統會依軟體設定進行對應應變、通報及運轉策略。

五、結論

綜合上述交通控制及機電安全系統設計，雪山隧道在管理及安全機制上，將建立良好之軟硬體環境。另外對雪山隧道災害應變及救援程序已委託研究單位規劃，預期在災害應變及救援程序、用路人逃生手冊及演訓計劃等方面能有初步成果。加上爾後營運單位良好地運用、操作、維護及宣導，雪山隧道必然能成為世界級之安全隧道。