

國道 5 號高速公路雪山隧道通風系統設計理念簡介

李宏徹¹ 黃奕青²

¹交通部台灣區國道新建工程局設施組 組長

²中興工程顧問股份有限公司機械部

一、 前言

隧道為一半封閉之空間，在正常之交通狀況時，車輛所排放之廢氣如一氧化碳、氮氧化物、粒狀污染物等，一般皆藉由通風之方式將廢氣濃度稀釋到容許之範圍，以保障用路人安全。當隧道發生火災時，必須藉由機械通風之方式來控制濃煙擴散之方向，並將濃煙排至隧道外，以利用路人逃生及救災作業之進行。

由於雪山隧道長達 13 公里，因此必須設置數組通風豎井，方能達到通風及排煙之功能，但豎井之高度動輒數百公尺，且須闢建施工道路，工程造價高，又因廢氣排放之污染問題，常會引起附近居民之抗爭，因此如何減少通風豎井之數量，為隧道通風系統必須考量之重要因素。

二、 雪山隧道基本資料

1. 雙孔、單向行車
2. 總長度：12,930m
3. 坡度：1.25% (由南向北)
4. 每孔 2 車道
5. 隧道斷面積：56.6m²

三、 雪山隧道設計交通量

	北行線交通尖峰		南行線交通尖峰	
	設計交通量	車速	設計交通量	車速
北行線	3700 pcu/hr	50km/hr	2467 pcu/hr	70km/hr
南行線	2467 pcu/hr	70km/hr	3700 pcu/hr	50km/hr

pcu/hr : passenger car unit per hour

1 輛卡車(上坡) = 2 pcu

1 輛卡車(下坡) = 1.5 pcu

1 輛轎車 = 1 pcu

卡車/巴士含量：23%

四、車輛廢氣排放量設計值

1. 一氧化碳

(1) 轎車：0.12 m³/hr-veh

(2) 卡車/巴士：0.08 m³/hr-veh

2. 粒狀污染物

(1) 轎車：0

(2) 卡車/巴士(23 噸)：126 m²/hr-veh

粒狀污染物為柴油引擎車輛所排放，國內轎車皆採用汽油引擎，因此無粒狀污染物排放。

五、雪山隧道空氣品質要求

	一氧化碳濃度	能見度
正常交通狀況	75ppm	0.007m ⁻¹
交通管制	150ppm	0.009m ⁻¹
隧道封閉	200ppm(維持 15 分鐘)	0.012m ⁻¹ (維持 15 分鐘)

六、雪山隧道通風量需求

隧道所需之最大通風量為分別計算下列三種條件所需之通風量，取三者中之較大值。

1. 稀釋一氧化碳濃度達到容許值之通風量需求
2. 稀釋粒狀污染物濃度達到容許值之通風量需求
3. 排煙之通風量需求

雪山隧道於設計目標年預測之卡車/巴士含量高達 23%，經計算得知稀釋粒狀污染物濃度為通風量需求之首要控制因素。雪山隧道係於民國 80 年進行設計，當時國內所訂定之卡車/巴士粒狀污染物排放標準，與歐美先進國家相較，尚屬寬鬆，因此雪山隧道如果採用當時之排放標準，作為計算通風量需求及通風設備選用之基準，當隧道完工通車時，極有可能國內粒狀污染物排放標準已大幅提高，因而將造成通風設備之閒置浪費。

國內柴油引擎車輛粒狀污染物排放標準之測試方法，係採用美國 US-Transient Cycle 行車型態於引擎動力計上測試，雪山隧道於設計階段，國內

環保署所訂定之卡車/巴士粒狀污染物排放標準為 0.7 g/BHP-hr，而當時美國之卡車/巴士粒狀污染物排放標準為 0.25 g/BHP-hr，為瞭解環保署對於卡車/巴士粒狀污染物排放標準之訂定方針，避免通風設備設計過量，造成公帑浪費，中興工程顧問公司特地行文環保署詢問該項事宜，後經環保署告知：「於民國 90 年，國內卡車/巴士粒狀污染物排放標準，應比 0.25 g/BHP-hr 更加嚴格」，因此雪山隧道之卡車/巴士粒狀污染物排放量設計值採用 0.25 g/BHP-hr（約等於 126 m²/hr-veh）。事實上，環保署於民國 88 年公佈施行之卡車/巴士粒狀污染物排放標準已較 0.25 g/BHP-hr 更加嚴格。

車輛行駛於上坡路段時，排放之廢氣量較高，所須之通風量較大，因此雪山隧道單孔最大通風量需求，係發生在北行線(上坡)交通尖峰時，以 100 表示其通風量，其他交通條件之通風量需求請詳表 1。

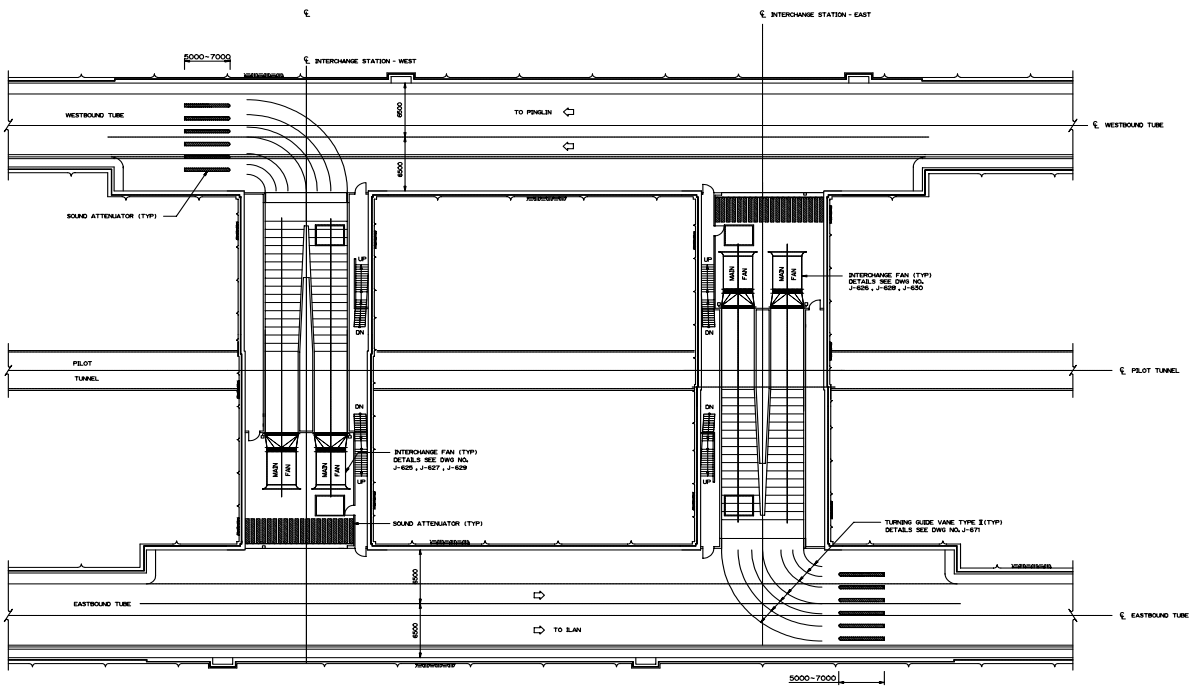
表 1.雪山隧道通風量需求

	通風需求量	
	北行線	100(交通尖峰)
南行線	24(交通非尖峰)	47(交通尖峰)

七、 雪山隧道通風系統概述

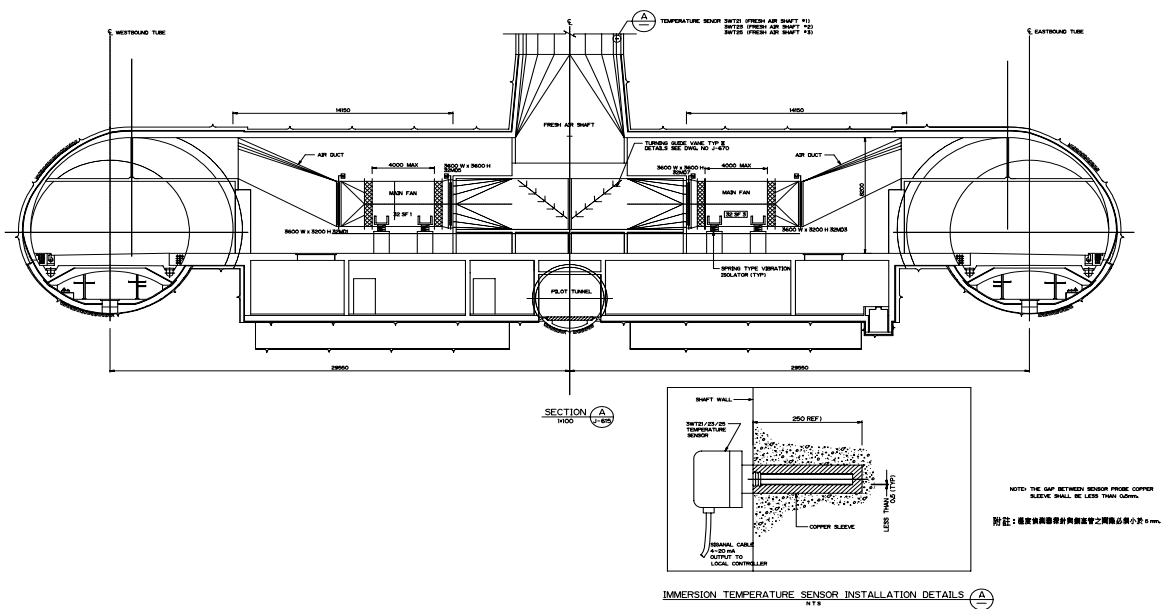
雪山隧道為雙孔、單向行車之隧道，採用縱流式通風系統，共設置三組通風換氣站與三組通風中繼站，通風換氣站之功能為將隧道內污濁之空氣經由排氣豎井排出，新鮮空氣則由進氣豎井引入隧道，作為主要換氣之用。通風中繼站之功能為將其中一孔隧道內較乾淨之空氣引入另一孔隧道內，作為輔助換氣之用。

每組通風換氣站設置進氣豎井與排氣豎井各一座，進氣豎井設置軸流式送風機 4 台（南行線/北行線各 2 台），排氣豎井設置軸流式排風機 4 台（南行線/北行線各 2 台），每組通風中繼站設置軸流式中繼風機 4 台（南行線/北行線各 2 台），總共設置軸流式風機 36 台，隧道內車道上方並設置噴流式風機 112 台（南行線/北行線各 56 台），當隧道因故改為雙向交通或發生塞車、火災之狀況時，噴流式風機可供應隧道通風系統所不足之推力。

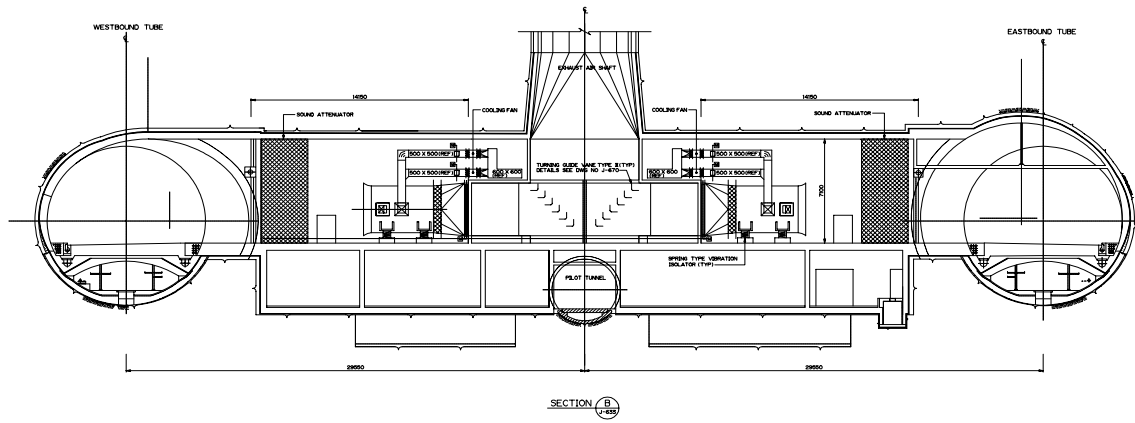


TYPICAL INTERCHANGE STATION PLAN

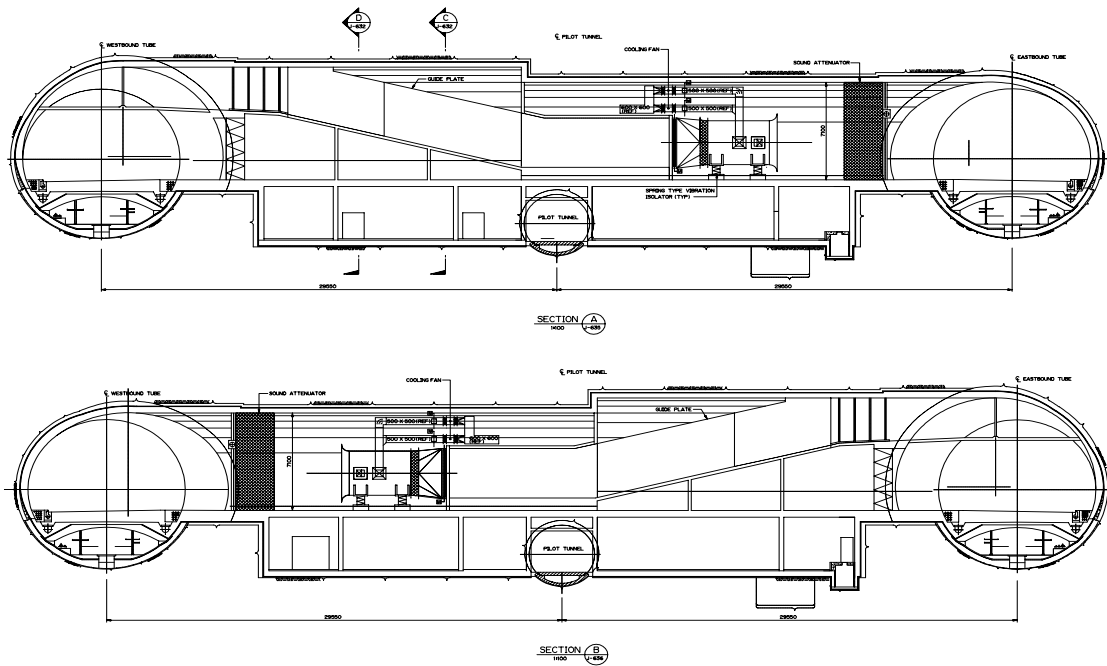
通風中繼站平面配置圖



通風換氣站(送風)剖面圖



通風換氣站(排氣)剖面圖

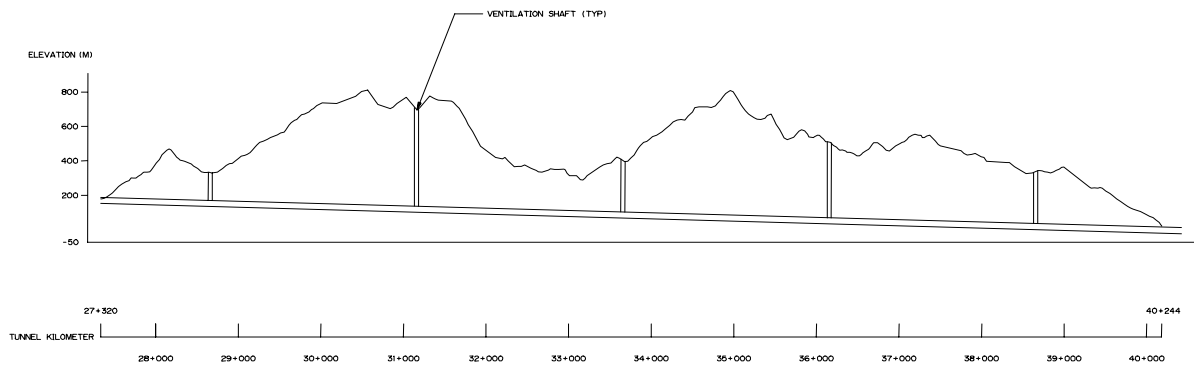


通風中繼站剖面圖

八、 設置通風中繼站之功能

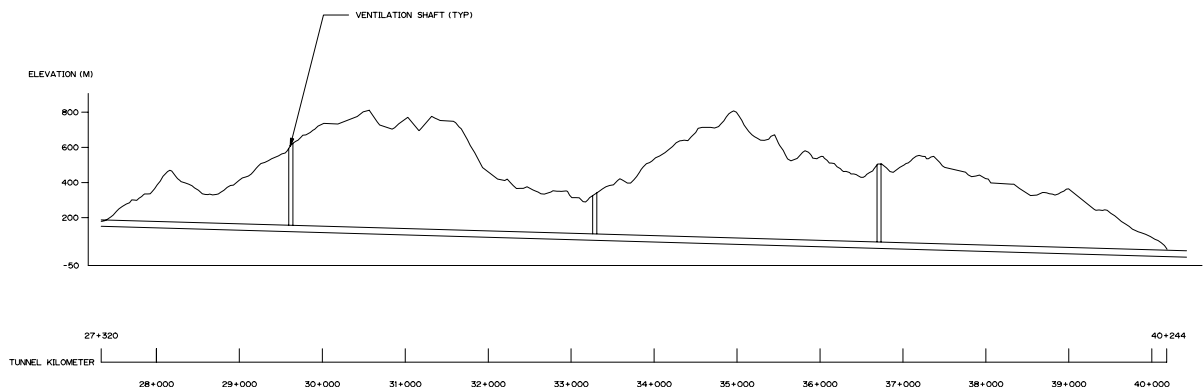
雪山隧道南行線及北行線之尖峰交通量通常不會發生在同一時間，即北行線之交通量為尖峰時，南行線之交通量為非尖峰，利用此一交通特性，雪山隧道除設置三組通風換氣站外，另設置三組通風中繼站，將其中一孔隧道內較乾淨之空氣引入另一孔隧道內，以輔助通風換氣站之換氣功能。

參考表 1，雪山隧道如採用南行線/北行線各自獨立之通風系統，則系統之設計須分別採用南行線及北行線之最大通風需求量，即北行線為 100，南行線為 47，北行線須設置 5 組通風豎井，南行線須設置 2 組通風豎井，豎井最大深度高達 600 公尺(參閱下圖)。



設置通風中繼站，將南行線及北行線之通風系統合併為一，則系統之最大通風需求量為 $100 + 24 = 124$ ，南行線及北行線只須設置 3 組通風豎井即可(參閱下圖)，豎井之數量相對減少，豎井之深度亦相對縮短(最大深度約為 400 公尺)，可大幅降低土木工程費用。

同時由於豎井之數量減少，豎井之深度縮短，可降低風機之總裝置電力，節省通風系統運轉費用。



九、 雪山隧道通風系統運轉模式

1. 正常交通運轉模式

於正常運轉狀況時，隧道通風量須隨著交通量之改變，作適當之調整，以使隧道內之廢氣濃度控制在容許之範圍內(一氧化碳：75ppm 能見度： 0.007m^{-1})。

2. 塞車運轉模式

當隧道內車速減慢或甚至停滯不前時，且所有風機皆已啓動，此時如隧道內之一氧化碳濃度達到 150ppm 或能見度達到 0.009m^{-1} ，則監控系統必須通知交控系統作必要之交通管制。

如一氧化碳濃度超過 200ppm 或者是能見度超過 0.012m^{-1} 達 15 分鐘之久仍未改善，則監控系統必須通知交控系統暫時關閉隧道。

3. 火災運轉模式

當隧道發生火災時，通風系統之功能在控制煙霧擴散之方向，並迅速地將煙排至洞外。不同區域發生火災時之不同通風指令皆儲存於監控系統。

當隧道為單向交通時，火災下游之車輛可繼續向前行駛，逃離現場，火災上游之車輛則無法繼續向前行駛，用路人必須下車逃生，此時隧道內之風速必須維持在 2 ~ 4m/sec (沿車行方向)，以防止煙霧向後蔓延，影響用路人之逃生，且火災上游 250 公尺內及下游 500 公尺內之風機不能啓動，避免擾動飄浮於隧道上方之煙層，同時中繼站之風機必須停止，以防止煙霧進入另一孔隧道。

當隧道為雙向交通時，火災上、下游之車輛皆無法繼續向前行駛，因此所有之風機皆須停止運轉，以降低煙霧蔓延之速度。

4. 停電運轉模式

當正常電源因故中斷時，由於緊急電源之容量有限，無法滿足通風系統之電力需求，因此交控系統必須限制交通流量。

5. 維修運轉模式

當其中一孔隧道在維修時，另一孔隧道將改為雙向交通，由於兩孔隧道所要求之空氣品質要求並不相同，因此中繼風機及其附屬風門必須關閉，兩孔隧道各自為獨立之通風系統。

十、 聯絡隧道通風系統

雪山隧道工程規模龐大，且地質複雜，為充分瞭解沿線地質構造特性，提供主隧道設計及施工參考，並先期排除地下水及處理地質弱帶，以降低主隧道施工

困難度及風險，乃於兩條主隧道間先施築一直徑 4.8 公尺之探查導坑，該導坑除可做為主隧道施工之輔助通道外，完工後尚可供做營運維修，急難救助之用。

雪山隧道每隔 350 公尺設置一人行聯絡隧道，共二十八座，以連接南行線/北行線主隧道，提供人員緊急避難之用，並可通達導坑。每隔 1400 公尺設置一車行聯絡隧道，共八座，以連接南行線/北行線主隧道，提供緊急時車流疏散及救災之用，並可供人員通達導坑。

雪山隧道南北洞口各設置 2 台送風機，引進新鮮空氣經由導坑及主隧道下方管線廊道，供應車行/人行聯絡隧道維持正壓及避難人員所需之新鮮空氣，以及隧道內機房之氣冷式冰水機所需之冷卻空氣，每個車行/人行聯絡隧道內皆裝設加壓風機，以維持其正壓之需求。

十一、 節能措施

雪山隧道通風系統之總通風量約為 2,280 m³/s，軸流式風機總裝置電力約為 17,000kw，運轉電費相當可觀，因此於正常交通狀況時，隧道通風量須隨著交通量之改變，作適當之調整，以節省龐大之運轉電費。

軸流式風機風量調整通常有兩種方式，一種為改變風機葉片之角度，另一種為採用變頻器，改變風機之轉速。兩種方式之效率請參閱下表。

風機負載	風機合併效率(註 1)	
	變頻器之方式	改變風機葉片角度之方式
100%	0.77	0.79
80%	0.77	0.77
60%	0.73	0.65
40%	0.63	0.54

註 1: 風機合併效率包括風機效率、馬達效率、變頻器效率。

由上表得知，當風機負載為 100%時，改變風機葉片角度之效率較佳，其他負載條件時，則以變頻器方式之效率較佳。由於國內目前施行之車輛廢氣排放標準已較設計所採用之車輛廢氣排放量更加嚴格，且風機之設計容量亦已考慮安全因素，除少數特殊狀況外(如嚴重塞車)，風機運轉於 100%負載之機會甚低，大部份時間風機皆運轉於 80%負載以下，因此雪山隧道軸流式風機風量調整採用變頻器之方式。

十二、 結論

通風中繼站之概念只適用於縱流式通風系統，對於橫流式通風系統，則不適用。雪山隧道採用縱流式通風系統，因此納入此一新概念，設置通風中繼站將兩孔隧道之通風系統合併為一，可減少通風豎井之數量，降低豎井之高度，因此除了可大幅降低土木工程費用外，同時亦可降低通風系統之運轉電費。

參考文獻

1. PIARC Committee on Road Tunnels-1995
2. M. A. Berner, J. R. Day, A new concept for ventilating long twin-tube tunnels