

國道 5 號雪山隧道空氣品質設計與實測

國工局設施組 陳可賀

1、前言

雪山隧道自今年 6 月 16 日開放通車以來，因隧道長達 12.9 公里，隧道行車安全為社會大眾所關注，隧道內空氣品質狀況及塞車時是否形成溫升等均為用路人所切身關心課題，報章媒體亦多所報導，探討是否會影響用路人健康及是否符合行車安全設計要求，造成部分用路人因未明瞭資訊而臆測擔心。本文為將開放通車以來之雪山隧道空氣品質，諸如一氧化碳濃度 (CO)、一氧化氮濃度 (NO)、能見度 (VI) 及溫度 (TM) 等設計及實測作一簡要彙整報告，俾釋用路人疑慮。

2、空氣品質設計

世界道路協會 (PIARC 1995 年) 對公路隧道一氧化碳濃度管制建議值為 100ppm，一氧化氮濃度則建議採日本要求標準，濃度大於 25ppm 以上時進行管制，我國目前並無公路隧道空氣品質標準之一氧化碳及氮氧化物濃度國家管制標準，雪山隧道係參照 PIARC 建議值設計，一氧化碳濃度管制設計值為 75ppm，一氧化氮濃度管制設計值為 25ppm，能見度管制設計值為 $0.007m^{-1}$ ，與先進國家隧道內空氣品質設計標準 (如附表) 相較毫不遜色。

隧道空氣品質設計

(單位: ppm 體積濃度百萬分之一)

	世界道路協會 PIARC	雪山隧道設計	
正常運轉	一氧化碳 CO : 100ppm	75ppm	通風依序運轉
	一氧化氮 NO : 25ppm (日本設計值)	25ppm	
	能見度 VI : $0.007m^{-1}$	$0.007m^{-1}$	
塞車狀況	CO : 150ppm	150ppm	交通管制策略
	VI : $0.009m^{-1}$	$0.009m^{-1}$	
封閉車道	CO : 250ppm	200ppm	達 15 分鐘未改善隧道關閉
	VI : $0.012m^{-1}$	$0.012m^{-1}$	

環保署隧道空氣品質建議值：一氧化碳 (CO) 80ppm、能見度 (VI) 為 $0.009m^{-1}$

雪山隧道通風系統具正常通風及緊急排煙功能，本文僅探討正常通風部分。雪山隧道共設置三組通風豎井將整座隧道分成四個通風區段，軸流式風機採變頻變速控制，每隔 15 分鐘參考值為一運轉週期以計算所需通風量，監控系統可 24 小時監測隧道內空氣品質並紀錄，配合偵測值自動調整所需通風量，以維持隧道

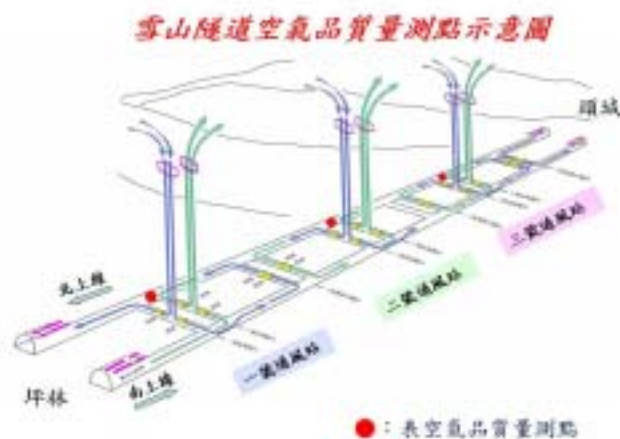
內設定之空氣品質。

雪山隧道位處郊外山區，隧道南北洞口外及各通風豎井所引入隧道內之新鮮空氣品質，相較一般市區隧道清淨良好許多，約 8 分鐘即可將隧道內空氣完全抽換一次。

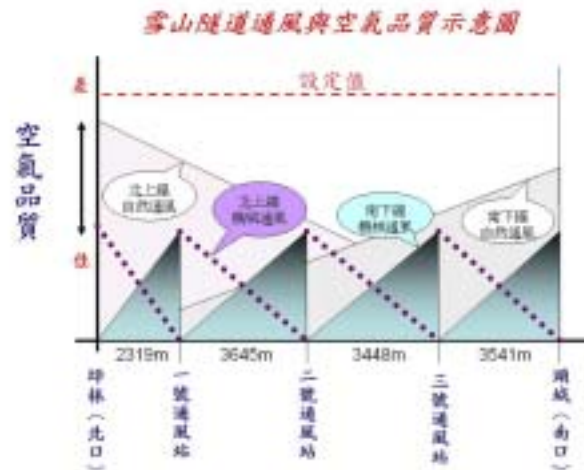
通風系統設計需兼顧行車安全與節能經濟性，如隧道內空氣品質設定值過嚴，則通風機運轉成本即相對提高；雪山隧道另有三座通風中繼站之設計，能將較低交通流量之一孔隧道內較乾淨之空氣引入另一孔隧道內，可提高整體通風系統運轉效益（如下圖）。

3、空氣品質實測

隧道內空氣污染物主要來源為汽車所排放廢氣，與車種、車齡、載重、行駛速率、道路坡度及海拔高度等均有關，雪山隧道坡度由南向北為 1.255%，於相同交通車流條件下，空氣品質實測值均以北上線稍高於南下線，故以北上線偵測值上網應已具指標性。本局網站雪山隧道專區民眾關心議題之空氣品質溫升問題，每週均定期有空氣品質實測數據上網供參。

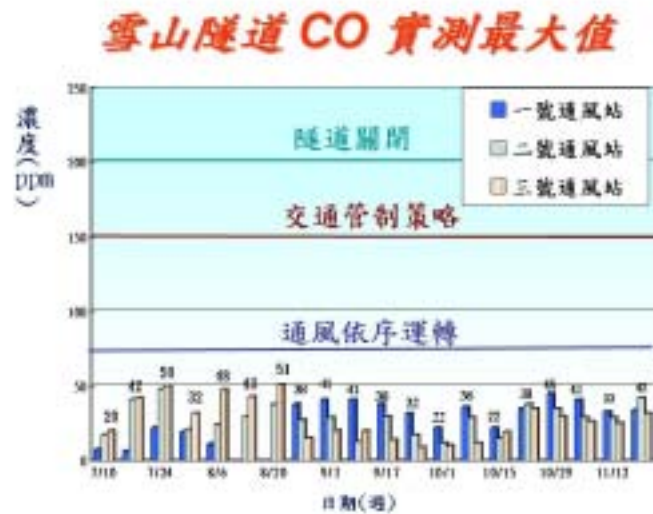


以南下線為例，如隧道空氣品質未達通風機啟動門檻值，僅由各通風排氣豎井之煙囪效應自然排放廢氣，新鮮外氣初始由隧道口隨車流之活塞效應引入，故一號通風站空氣品質最佳，隨行車方向逐漸遞增，即三號通風站空氣品質相對較差；北上線反之亦然。惟如空氣品質達通風系統啟動門檻值，則需採機械強制通風於各通風站進行換補空氣，各通風區段之空氣品質濃度分佈應相類似，不致往下游區段累積（如下圖）。目前實測值均未逾設定門檻值，隧道空氣品質通風狀況多屬自然通風。



3.1 一氧化碳濃度 (CO)

通車迄今，一氧化碳濃度實測最大值約為 20~51ppm (如下圖)，均低於設定值 75ppm。圖示自 7 月 10 日至 8 月 20 日期間為南下線實測數據，8 月 27 日起則為北上線實測數據。因通車期間均尚未達通風機啟動門檻，隧道通風狀況多屬自然通風，故一氧化碳濃度依行車方向遞增，各週實測最高數值態樣極類似。



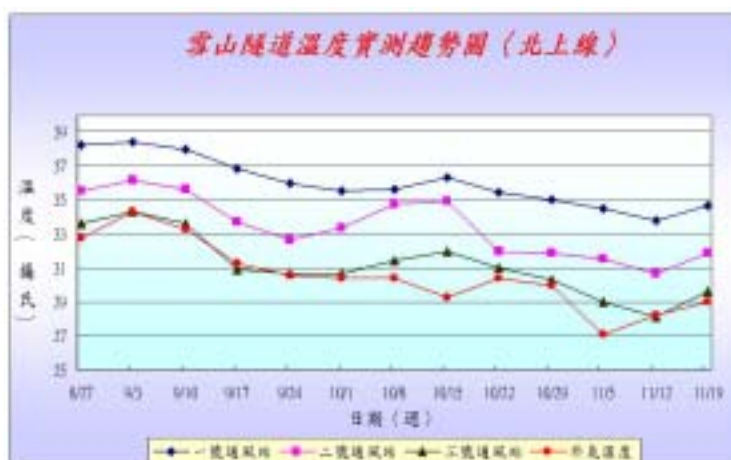
3.2 溫度 (TM)

因國內外尚無公路隧道溫升案例可供參考，本局於 85 年、86 年即委託臺灣大學應力所陳發林教授辦理「長隧道降溫方法評估」及「隧道溫升問題研究」，依該研究報告結論與建議之交通管制方案降溫方法，如將大型車在車流中所佔比例降至 5% 以下 (依北宜高速公路運輸規劃分析報告，目標年民國 100 年大客車約佔 5% 左右)，但總體車流量仍是飽和車流量或塞車的狀況下，此時隧道內的平均溫度可降至 35° C 以下，區段性的高溫也在 40° C 左右。

本議題亦經原設計中興顧問檢討評估，認由豎井送至隧道之空氣，海拔每升高 100 公尺高度之溫度下降值約 0.7°C ，三座豎井之平均高度約 350 公尺，故豎井送入隧道之外氣溫度可比洞口約低 2.5°C ，且經豎井降溫作用概估降低約 1.5°C ，合計約可降低 4°C 。通行小型車階段其發熱量較低，雪山隧道行車間距規定需維持 50 公尺以上，如遇塞車亦需至少維持 20 公尺以上間距，隧道內通行之車輛數較原設計車流量少，廢氣排熱量遠低於原設計數據，通車初期應無溫度過高問題。開放大型車通行階段，行車間距需維持 50 公尺以上，交通量約為原設計之 83%，如隧道四周地下水之狀態達到 0.15g/m-sec 之條件，則正常通車狀況或塞車狀況，隧道內溫度應可控制在容許範圍內。

自今年六月通車以來，盛夏實測最高溫均在 40°C 以下 (如下圖)，近來已進入冬季，與隧道內溫度最有關連之外氣溫度逐漸下降，因隧道內空氣溫度變化較小，不似戶外大氣溫度變化急劇，經長期監控比對相同通車條件之隧道內溫度亦呈等差方式下降，於 11 月 19 日當週監測最高溫已降至 34°C 。

至於長期是否有隧道壁溫蓄積現象，與隧道內溫度、天候、交通條件、地下水活動及隧道通風量等多項因素均有關連，本局與設計顧問將持續監測相關數據，以驗證和比較設計之差異，以維護隧道行車安全。



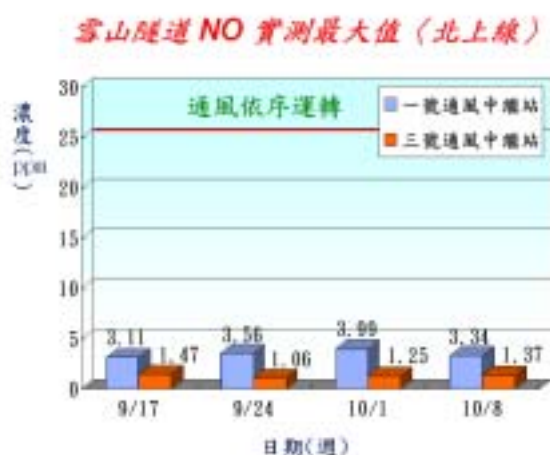
3.3 一氧化氮濃度 (NO)

參考行政院勞工委員會九十二年十二月三十一日修正之「勞工作業環境空氣中有毒物容許濃度標準」，一氧化氮之八小時日時量平均容許濃度為 25ppm，二氧化氮 (NO₂) 容許濃度為 5ppm。目前雪山隧道行車交通管制條件下車行流暢，於隧道內行車時間僅約十餘分鐘，非需長時間停留之處所，故目前雪山隧道設定之一氧化氮濃度標準，對用路人應不致造成危害。

環保署於 7 月 18 日至 10 月 11 日於雪山隧道內進行空氣品質監測，一氧化氮濃度監測值於平日僅 1ppm 以下，偶於例假日交通尖峰時段達 2~4ppm (如

下圖)，遠低於設定值 25ppm，均在安全範圍內。本週 (11 月 19 日) 北上線一氧化氮濃度本局實測最高值，一號、二號及三號通風站分別為 3.44ppm、2.07ppm 及 0.69ppm。

隧道車輛所排放氮氧化物 (NO_x) 包括 NO, NO₂，其產生量視乎溫度、滯留時間及空氣中含氧量而定，常溫不能產生 NO_x，要高至 1200°C 以上，特別是空氣供應過剩時，才可形成 NO 及 NO₂。據環保署雪山隧道監測資料顯示，如 NO 濃度較高時，NO₂ 濃度佔氮氧化物之比率約 1~3%；反之如 NO 濃度較低時，則 NO₂ 濃度所佔氮氧化物之比率約 5%~10%。故隧道內 NO₂ 濃度並未隨氮氧化物濃度以等比率升高，應與隧道內之外部新鮮空氣供應量有關。



3.4 能見度 (VI)

雪山隧道目前僅通行小型車，設計車速 70km/hr，通風系統啓動之能見度設定值為 0.007m⁻¹，即 100m 透光率 50%以上；於能見度為 0.009m⁻¹，即 100m 透光率 40%以上，即進行交通管制；如達 15 分鐘能見度仍超過 0.012m⁻¹未改善，即 100m 透光率 30%以上，則暫時關閉隧道或限制車輛進入。

目前通行小型車期間，空氣品質以一氧化碳濃度為指標值，能見度並非通風系統之控制關鍵值，目前能見度偵測實測值為 0~0.0001m⁻¹，其隧道內能見度均遠低於 0.001m⁻¹，即 100m 透光率可達 90%以上，行車視線極為良好。

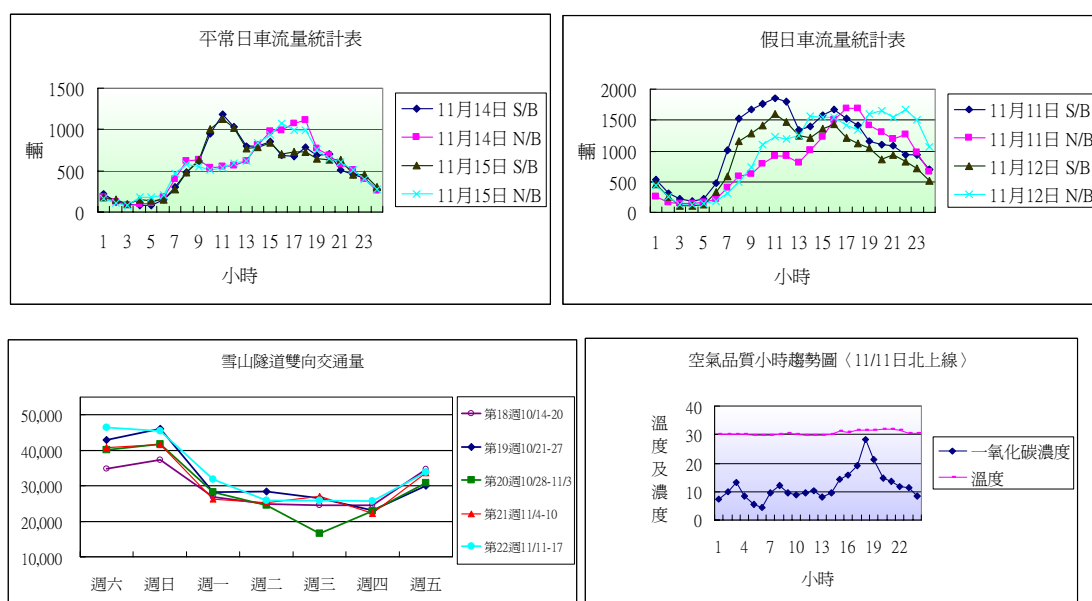
4、車流量與空氣品質

雪山隧道以 11 月 11 日 (週六) 至 15 日 (週三) 偵測資料分析比較每日車流特性，於平常日南下線交通尖峰發生於上午十時至十二時，北上線交通尖峰發生於下午三時至六時。例假日南下線交通尖峰亦發生於上午十時至十二時，北上線交通尖峰則發生於下午三時至十時，於週日更延至夜間十一時。

每週車流特性於週一至週四車流量較低，於週五稍高，週六及週日之車流量

則顯著增加。平常日 (11 月 14 日、15 日) 北上線及南下線車流量約略相近, 總量約為 25,000 輛左右。例假日 (11 月 11 日、12 日) 週六北上線每日為 20,031 輛, 南下線每日高達 26,382 輛, 週日南下線每日為 21,387 輛, 北上線每日高達 24,001 輛, 例假日每日總量約為 40,000 50,000 輛, 應與大眾於例假日至宜蘭東部地區休憩旅次有關。雪山隧道自通車迄 11 月 7 日止, 南北向交通量已逾 500 萬輛車次。

空氣品質之實測數據與車流量有密切關係, 因隧道內之污染物主要來源即為汽車所排放之廢氣, 以 11 月 11 日 (週六) 北上線為例, 隧道內一氧化碳濃度於交通尖峰時段稍偏高, 其溫差則約略高 2° C。



5、結語

因公路隧道為特殊之行車空間場所, 僅供用路人短時間通過性使用, 公路隧道空氣品質管制值係供隧道通風設計用, 一般為 15 分鐘參考週期值, 與需長時間停留之一般開放環境空間所規定之小時平均值空氣品質標準不宜相提並論, 各先進國家之公路隧道空氣品質管制標準, 亦均與一般開放環境之空氣品質標準規定有別。

通車初期僅通行小型車, 於目前通車條件下, 由車流活塞效應及各排氣豎井空氣壓力及溫度差之煙函效應自然排氣, 隧道內風速約可達 1~3m/sec, 隧道內汽車排放之廢氣濃度依車行方向遞增, 惟目前近隧道出口端亦未超過設定值, 隧道內空氣品質未達通風機啟動門檻, 廢氣非完全滯留蓄積於隧道內, 且隧道全線亦非均一濃度, 與各時段之車流量有關。後續配合通風機養護需求之試運轉作業, 適時於車流量大尖峰時段, 輪流啟動通風機運轉, 應可對調節隧道內空氣品

質有額外助益。

未來國內外環保法規對交通工具空氣污染物排放標準日趨嚴格，世界道路協會 1995 年版建議於 2010 年之隧道內 CO 濃度管制值亦將稍予調降，故未來之通風系統空氣品質標準亦需視當時狀況適時配合檢討調整。

附表：國內外公路隧道內空氣品質設計標準 單位：ppm

國家 項目	PIARC	英國	奧地 利	挪威	澳洲	美國	日本	香港	臺灣
CO 濃度	100	200	100	200	100	120	100	100	75
NO 濃度	25	35	25	15 NOx	—	10 NOx	25	—	25

備註：公路隧道空氣品質管制值係為隧道通風設計用，為 15 分鐘參考週期值。

參考資料：陳發林教授，「長隧道降溫方法評估」研究報告，86 年 4 月。

中興工程顧問股份有限公司「北宜高雪山隧道溫升問題評估報告」，
95 年 4 月。

實測資料：本局第三區工程處機電工務所提供。