

雪山隧道結構設計與安全設施之探討

劉志堅、尹義松

鑑於隧道之密閉行車空間特性有別於一般開放性路段，其行車視距、空氣品質或事故發生時之搶救與疏散等應變處置均多所限制，且造成之災害亦較一般路段為大，故隧道應依其特性而設置適當之安全設施，以期減少事故發生之機率或降低事故所造成之傷亡損失。

1 雪山隧道之安全設計理念與相關安全設施

國內目前對於各類公路隧道所應設置之安全設施種類與項目，並未有法令明文之規定。僅交通部台灣區國道新建工程局曾委託國立中央大學土木工程研究所於民國八十七年一月研訂有「公路隧道安全設施準則」，該準則雖係以台灣地區國道高速公路隧道為適用對象，亦可供其他各級公路隧道參考使用，然並非硬性之規定，僅係國工局內部有關隧道工程安全設施設計規劃之原則與標準。

依據國道新建工程局「公路隧道安全設施準則」內容，隧道安全設施之種類（如表 4.1.1）與功能如下：¹

1. 機電設施：

設置目的在於提供用路人舒適安全之行車環境、維持隧道內行車順暢，其項目包含有照明設施、通風設施及電力設施三部份。

(1) 照明設施：

提供隧道路段之照明，並緩和用路人進出隧道時視覺之急遽變化，克服「黑洞效應」，以保障行車之安全。此外亦可提供逃生通道、標誌、逃生警示等所需之照明。

(2) 通風設施：

用以稀釋汽車排放之廢氣，維持隧道內空氣品質，並具備火災發生時自動啟動通風機緊急排煙之功能，以利人員逃生與救援行動之進行。

¹交通部台灣區國道新建工程局，「公路隧道安全設施準則研訂 附冊：公路隧道安全設施準則」，中央大學土木工程研究所，民國八十七年一月。

(3)電力設施：

主要提供隧道內各機電及交控設施用電之需，視隧道長短、負載容量與種類等不同需求而進行供電。一般而言，隧道長短、電壓等級及其所需裝置之電力設備如表 4.1.2 所示。

2.交通監控設施：

用以提供隧道內行車之安全、維持交通順暢，並防止事故發生後災害之擴大，其需求取決於端視隧道交通特性及可能發生之狀況所採取之交通控制策略而定。可區分為交通監視設施及交通控制設施兩大類，有關交通監控設施之種類及設置之標準如表 4.1.3 所示。

(1)交通監視設施：

監視隧道交通運行狀況，並蒐集交通資訊，提供管理人員採取交控反應措施之設施。其又分為車輛偵測器與閉路電視監視系統兩個子項目。

(2)交通控制設施：

提供用路人即時、充分與有效之交通與環境資訊，以確保隧道行車之順暢與安全。其子項目包括交通號誌、車道管制號誌、固定交通標誌、速限可變標誌、可變交通標誌與資訊可變標誌。

3.緊急及安全逃生設施：

其設置之目的主要再於確保一旦隧道發生事故或緊急狀況時，提供用路人必要之保障與協助，並提高事故處理之效率，以降低災害之程度，其下又分為工程設施、通信設施、火警通報設施、消防設施以及避難指引設施五大類，並依隧道總長與交通量兩考量因素所區分之隧道等級標準（如圖 4.1.1 及表 4.1.4 所示）分別設置。

(1)工程設施：

提供用人事故發生時避難逃生或維檢人員維檢工作時安全維護之設施。其子項目包括路肩、停車彎、逃生通道、人行步道與高度管制設施。

(2)通信設施：

提供隧道用路人與管理人員間雙向溝通、傳遞訊息之設施。其子項目包括緊急電話、擴音器及無線電廣播裝置。

(3)火警通報設施：

隧道發生火災時能迅速偵測並提供訊息至控制中心，以防止災情

擴大之設施。其下之子項目包括手動火警通報裝置與自動火警通報裝置兩種。

(4)消防設施：

隧道滅火作業可分為用路人初期滅火與消防人員滅火兩階段，消防設施即為提供兩階段滅火作業所需之設備，須具備可迅速、有效滅火或抑制火災之基本功能。消防設施之子項目包括滅火器、消防栓與給水栓。

(5)避難指引設施：

於隧道發生火災或事故時，可迅速引導用路人置安全處所之設施。其項目包括指引標示板、緊急出口指示燈與避難方向指示燈三種。

表 1.1 隧道安全設施分類表

設施分類	設施主項目	設施子項目	設施細項
機電設施	照明設施		
	通風設施		
	電力設施		
交通控制設施	交通監視設施	車輛偵測器	
		閉路電視監視系統	
	交通控制設施	交通號誌	
		車道管制號誌	
		固定交通標誌	速率限制標誌、隧道標誌、注意號誌標誌、禁止超車標誌、開（關）車燈指示標誌
		速限可變標誌	
		可變交通標誌	隧道壅塞訊息、隧道施工訊息、危險警告訊息
資訊可變標誌			
緊急及安全逃生設施	工程設施	路肩	
		停車彎	
		逃生通道	避難坑、人行聯絡隧道、車行聯絡隧道
		人行步道	
		高度管制設施	限高門架、頂蓋、車輛超高偵測器
	通信設施	緊急電話	
		擴音器	
		無線電廣播裝置	
	火警通報設施	手動火警通報裝置	
		自動火警通報裝置	
	消防設施	滅火器	
		消防栓	
		給水栓	
	避難指引設施	指引標示板	
		緊急出口指示燈	
		方向指示燈	

（資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂
附冊：公路隧道安全設施準則」）

表 1.2 隧道長度與所需裝置電力設備對應表

隧道長度	電壓等級	對應之電力設備
500 公尺以下	380/220V	低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
501~5000 公尺	11.4/22.8KV	高壓開關、保護電驛、配電變壓器、低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
5001 公尺以上	69/161KV	特高設備(含 69/161KV GIS 氣體絕緣開關)、特高變壓器、保護電驛、配電變壓器、低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
備註	表列之隧道長度、電壓等級與對應之電力設備並非絕對，應視該隧道實際之負載需求及台電供電系統而定。	

(資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂附冊：公路隧道安全設施準則」)

表 1.1 隧道安全設施分類表

設施分類	設施主項目	設施子項目	設施細項
機電設施	照明設施		
	通風設施		
	電力設施		
交通控制設施	交通監視設施	車輛偵測器	
		閉路電視監視系統	
	交通控制設施	交通號誌	
		車道管制號誌	
		固定交通標誌	速率限制標誌、隧道標誌、注意號誌標誌、禁止超車標誌、開（關）車燈指示標誌
		速限可變標誌	
		可變交通標誌	隧道壅塞訊息、隧道施工訊息、危險警告訊息
資訊可變標誌			
緊急及安全逃生設施	工程設施	路肩	
		停車彎	
		逃生通道	避難坑、人行聯絡隧道、車行聯絡隧道
		人行步道	
		高度管制設施	限高門架、頂蓋、車輛超高偵測器
	通信設施	緊急電話	
		擴音器	
		無線電廣播裝置	
	火警通報設施	手動火警通報裝置	
		自動火警通報裝置	
	消防設施	滅火器	
		消防栓	
		給水栓	
	避難指引設施	指引標示板	
		緊急出口指示燈	
		方向指示燈	

（資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂
附冊：公路隧道安全設施準則」）

表 1.2 隧道長度與所需裝置電力設備對應表

隧道長度	電壓等級	對應之電力設備
500 公尺以下	380/220V	低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
501~5000 公尺	11.4/22.8KV	高壓開關、保護電驛、配電變壓器、低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
5001 公尺以上	69/161KV	特高設備(含 69/161KV GIS 氣體絕緣開關)、特高變壓器、保護電驛、配電變壓器、低壓開關、緊急柴油發電機、不斷電供電系統、直流電源系統
備註	表列之隧道長度、電壓等級與對應之電力設備並非絕對，應視該隧道實際之負載需求及台電供電系統而定。	

(資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂附冊：公路隧道安全設施準則」)

表 1.3 交通監控設施設置標準表

設施分類		隧道長度		300m 以下 (註1)	300~ 2000m	2000m 以上 (註2)	備註	
交通監 視設施	車輛偵測器						依不同方向與車道分別設置	
	閉路電視監視系統						以監視隧道全線交通狀況為原則	
交通控 制設施	交通號誌						隧道入口前 150~300m 迴車道前方	
	車道管制號誌						隧道內設置間距 100~300m 隧道入口前速限 100 km/hr，設置間距 200m， 其餘 100~150m	
	固定交通標誌	速率限制 標誌						隧道內設置間距 400~800m 隧道入口前 200m
		隧道標誌						設於隧道入口處
		注意號誌 標誌						設於隧道入口前交通號誌 上游 200~400m 處
		禁止超車 標誌						設於隧道入口處，隧道內設 置間距 400~800m
		開關車燈 指示標誌						設於隧道入口前
	速限可變標誌						隧道內設置間距 400~800m 隧道入口前 200m	
	可變交通標誌						隧道內設置間距 400~800m 隧道入口前 200m	
	資訊可變標誌						隧道入口前 150~200m 3000m 以上隧道視需要直立 設於停車彎	
備註	(註1) 或低交通量隧道 (註2) 或具有特殊要求之隧道						: 必要設施 : 選擇性設施	

(資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂
附冊：公路隧道安全設施準則」)

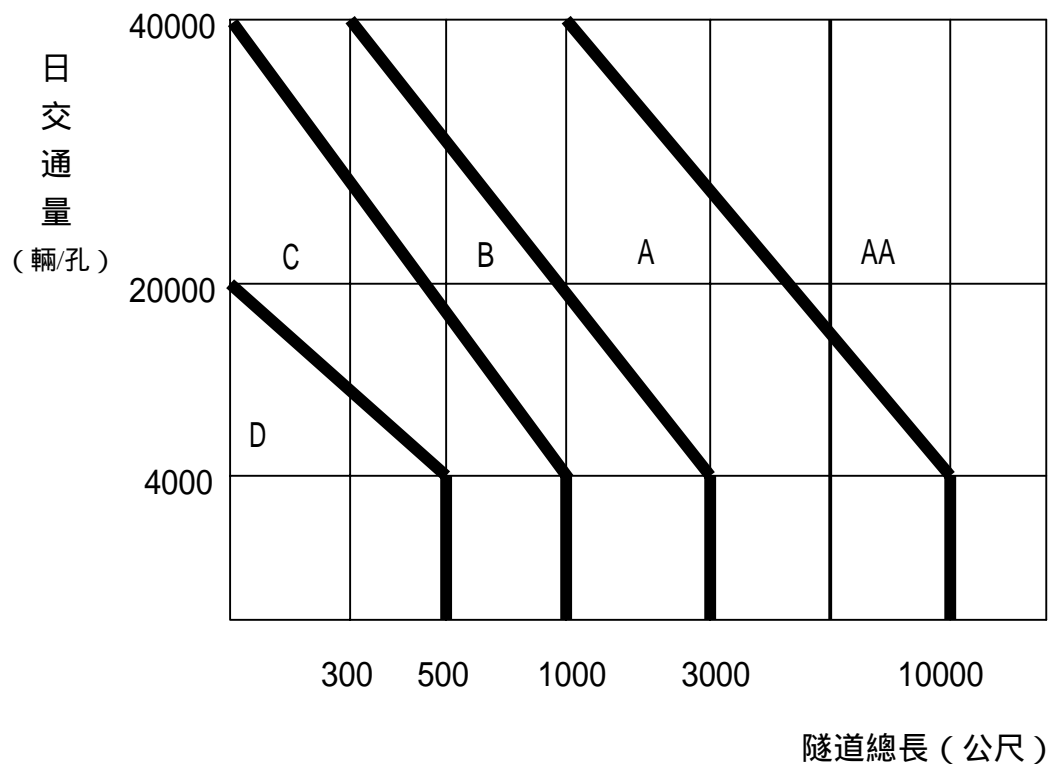


圖 4.1.1 隧道等級區分圖

(資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂 附冊：公路隧道安全設施準則」)

表 1.4 緊急及安全逃生設施設置標準

設施分類	設施子項目	隧道等級					備註
		AA	A	B	C	D	
工程設施	路肩	特定經濟條件下，依交通量、長度與建造方式設置之					
	停車彎						1400 公尺以上隧道應設置
	逃生通道						700 公尺以上隧道應設置
	人行步道						步道高度視實際需求而決定
	高度管制設施	視隧道特殊需求（如交通量大或重型車數量多）設置之					
通信設施	緊急電話						200 公尺以下隧道可省
	擴音器	設有閉路電視攝影機之隧道得配合設置					
	無線電廣播						1000 公尺以上隧道應設置
火警通報設施	手動火警通報裝置						
	自動火警通報裝置						
消防設施	滅火器						
	消防栓						1000 公尺以上 B 級隧道應設置
	給水栓						1000 公尺以上 B 級隧道應設置
避難指引設施	指引標示板	設有逃生通道之隧道使用內照式；其餘使用反射式					
	緊急出口指示燈						
	方向指示燈						350 公尺以下隧道可省略

註： 表隧道必要之設施

（資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「公路隧道安全設施準則研訂
附冊：公路隧道安全設施準則」）

雪山隧道雖非世界排名最長之隧道，然卻是目前世界上規模最大之雙孔結構公路隧道。有關雪山隧道規劃設計單位對於雪山隧道行車安全及防災避難設施之設置，依前章相關之設施(備)系統內容歸納簡述如下：避難安全設施、通風設施、照明設施、消防設備、交通安全管制設施及路況監測設施等項，說明如下：

1. 避難安全設施：

(1) 主隧道：

全長約 12.9 公里，為雙孔隧道(各單向雙車道)，每一孔道直徑為 10.8 公尺，路面寬 7.6 公尺，每一車道寬 3.5 公尺，行車淨高 4.6 公尺，兩側步道各寬 1.0 公尺(供逃生及維修人員步行之用)，緣石高 15 公分，不致妨礙車輛緊急開門逃生。

(2) 車行聯絡隧道：

每間隔 1400 公尺設置一處，全線共設有九處，提供緊急時車輛可於適當管制下經此車行聯絡隧道駛向另一孔隧道疏散，用路人亦可利用此車行聯絡隧道逃至導坑進行避難。

(3) 人行聯絡隧道：

每間隔 350 公尺設置一處，全線共設有二十七處，提供用路人緊急時逃離現場或逃至導坑進行避難。

(4) 緊急停車彎：

配合車行聯絡隧道每間隔 1400 公尺於主線車行方向右側設置一處，提供車輛故障停車、緊急停車、避車等用途。

(5) 導坑：

沿雪山隧道設置一條全長 12.9 公里之導坑，位於兩主隧道中間下方(詳圖 2.3.6)，直徑 4.8 公尺，路面寬 3.0 公尺，淨高 2.9 公尺，單車道(可雙向行駛)，每間隔 350 公尺設避車彎，且設有樓梯與主隧道之人行聯絡隧道及車行聯絡隧道連接，提供緊急時用路人避難逃生、救援人員進入之獨立性通道，但必須注意的是導坑無法提供大型消防救災車輛進入。

2. 通風設施：

(1) 主隧道之通風設施：

雪山隧道設有三組通風豎井、三組通風站及三組通風中繼站，由隧道外引入新鮮空氣以稀釋受污染之空氣，並將隧道內之廢氣排出，

達到行車安全所需之能見度及所要求的空氣品質。此外，並於隧道內車道上方懸掛噴流式風機，提供輔助通風及火災時排煙之用途。

(2)主隧道之排煙設施：

隧道內發生火警時，可利用通風設施之排風機及噴流式風機作為排煙設備，將隧道內之濃煙排出，避免濃煙危害到用路人之安全。

(3)車行及人行聯絡隧道之通風設施：

所需之新鮮空氣係由洞口機房之送風機，經由導坑及隧道底部之管線廊道供應，並與主隧道通風系統分開獨立送風。

(4)導坑之通風設施：

所需之新鮮空氣係由洞口機房之送風機引入，與主隧道通風系統分開獨立送風。

3. 照明設施：

(1)一般照明：

沿主隧道頂部全線裝設日光燈，並於隧道進口與出口適應區加裝高壓鈉氣加強照明，提供行車安全所需之照度，避免眼睛不適。

(2)停電時緊急照明：

當正常電源停電時，由不斷電系統提供緊急照明，繼續提供隧道內行車所必須的最低照明，避免因停電所造成的行車安全問題。

(3)火災時緊急照明：

沿主隧道每間隔約 50 公尺於車行方向左側人行步道上 50 公分處設置一座，於火警發生時自動點亮，提供火警發生時之緊急照明。

(4)避難通道照明：

隧道內之避難通道如人行聯絡隧道、車行聯絡隧道及導坑等均裝設照明，且部份燈具由不斷電電源供電，確保用路人避難逃生所需之照明。

4, 消防設備：

(1) 警報、通報、廣播設備：

- A. 火警自動警報設備：沿主隧道全線，人行/車行聯絡隧道、管線廊道及機房等設置火警探測器，以自動偵測隧道內發生之火災，並將訊號提供給管理單位以迅速採取應變措施。
- B. 手動報警機：沿主隧道每間隔 50 公尺於車行方向右側設置一處(與消防栓箱併設)，提供用路人緊急通報管理單位之用途。
- C. 緊急電話：沿主隧道每間隔 175 公尺於車行方向右側設置一處，提供用路人緊急通報管理單位之用途。
- D. 緊急廣播設備：於各人行/車行聯絡隧道及緊急停車彎處設置號角喇叭一只，供平時及緊急廣播之用途。

(2) 滅火設備：

- A. 消防栓箱：沿主隧道每間隔 50 公尺於車行方向右側及每一人行/車行聯絡隧道內設置一處，提供隧道內發生火災時用路人初期滅火之用途。
- B. 滅火器：於每個消防栓箱內設置二隻 ABC 型乾粉滅火器，提供隧道內發生火災時用路人初期滅火之用途。

(3) 避難指示設備：

- A. 避難方向指示燈：沿主隧道每 100 公尺設置一只避難方向指示燈，提供用路人避難方向指示之用途。
- B. 出口標示燈：於每一人行/車行聯絡隧道入口處設置一只出口標示燈，提供用路人避難出口指示之用途。

(4) 供消防搶救設備：

- A. 送水口及出水口：送水口設於隧道入口前 50 公尺處；出水口設於每只消防栓箱內，均接裝口徑 63mm 快速接頭，提供消防救災車輛連結送水之用。
- B. 無線電通訊設備：隧道內設置二套無線電系統：
 - (A) 高公局之系統：共有五個頻道，屬於同頻共撥式，平時供公警單位、行控中心與養護人員於隧道內通訊聯絡之用途，緊急時可供救災通訊之用途。
 - (B) 消防用無線電系統：提供消防單位於隧道內通訊聯絡之用途。

(5)其他設備：

A. 調頻(FM)廣播再播送設備：隧道內設置漏波電纜，平時供駕駛人收聽 FM 廣播電台節目之用，於緊急狀況時，行控中心人員可透過 FM 頻道，緊急插播相關訊息，引導用路人緊急應變。

B. 緊急供電設備：

(A)緊急發電機設備：設置於坪林 161KV 變電站及頭城 69KV 變電站，供應隧道內緊急照明、通風、交控及通訊設施等用電。

(B)不斷電電源設備：設置於隧道各機房內，供應監控設備、交控設施及緊急照明之用電。

5.交通管制設施：

(1)資訊可變標誌：

設置於隧道入口前約 150~300 公尺迴車道處及緊急停車彎內，提供隧道內之道路交通狀況並引導駕駛者適當行駛，維護行車安全。

(2)車道管制號誌：

設置於隧道進、出口迴車道處及隧道內部約每 350 公尺聯絡隧道處之車道上方，用來管制車道之使用。

(3)速限可變標誌：

設置於隧道內部約每 700 公尺處，可依隧道內之交通狀況變更速限，以控制隧道內行車速率及車流，確保行車安全。

6.路況監測設施：

(1)中央監視控制中心：

於坪林行控中心專用道附近設置一處行控中心作為北宜高速公路全線隧道內通風、照明、警報、一氧化碳濃度及煙霧測定、交通管理及電力供應等設施之管理、監控，使操作人員能掌握全線之機電及交控狀況，災害事故發生時能迅速採取有效的應變措施。

(2)閉路電視監視設備：

於隧道內約每 175 公尺設置一台閉路電視攝影機，平時用以掌握交通狀況，緊急時用以確認通報裝置所接收之火警訊息及監視滅火、避難逃生、搶救行動等狀況。

(3)車輛偵測器：

於隧道每 350 公尺設置一處，用以偵測隧道內之交通狀況，供行控中心人員決策之參考。

(4) 隧道內空氣品質偵測器：

於隧道內設置一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、煙塵濃度偵測器(VI)、風速風向偵測器及溫度/濕度計，作為隧道通風控制之用，確保用路人及行車之安全。

(5) 輝度偵測器：

裝設於隧道洞口前約 150 公尺處，作為隧道內照明控制之用，以提供行車安全所需之照度。

又本研究訪查蒐集雪山隧道之規設及監造單位 台灣區國道新建工程局與中興工程顧問股份有限公司對於雪山隧道所抱持之安全設計理念，概述如下：

1. 興建主管機關安全理念：(國工局)

災害事故發生，除希望避難用路人於狀況許可下採取初期滅火行為外，僅希望避難者棄車逃生避難至車行或人行聯絡隧道內通報行控中心執勤人員報知所在聯絡隧道位置後，即靜待救難人員抵達避難聯絡隧道處進行疏散作為，原設計並不考慮由用路人再自行由相連通之導坑避難。

2. 規設單位安全設計理念與建議：(中興工程顧問股份有限公司)

- (1) 以主線隧道、車行聯絡隧道、人行聯絡隧道及其他相關設施作為逃生疏散及救援之主要路徑。而沿雪山隧道所特設之導坑提供救援車輛及人員於緊急事故發生時另一條安全迅速之通達路徑。
- (2) 雪山隧道沿線現有最近之消防單位分別為北端之坪林消防分隊與南端之頭城消防分隊，因二者間隔甚遠、轄區遼闊，對於隧道事故之救援二者相互協調聯繫工作十分重要。
- (3) 如隧道洞口或台九線上無增設消防站之計畫，則於一般狀況下雪山隧道之事故救援及疏散仍以利用主線車道為主。而當有單向或雙向隧道洞口發生壅塞情形時，救援車輛可經由導坑進行救援，提供人員疏散、事故排除及救援車輛另一條通達事故現場之救援路徑，將有助於強化雪山隧道事故應變能力，減緩災情擴大。
- (4) 經由對雪山隧道各種事故救援車輛路徑分析結果顯示，一般公路警用車輛及人員、傷患救護車輛之行駛路徑以隧道主線為主，導坑為輔。
- (5) 緊急通達隧道之設計規劃係提供發生隧道事故時，救援車輛及人員之迅速搶救途徑，因其路線條件及設施配備等因素，於發生緊急事故時無法供滯留於隧道內之一般車輛駛離，僅於事故狀況獲得控制下，始可經由引導後駛離。
- (6) 雪山隧道係超長隧道，距離長達約十三公里，其內部發生事故之機率相對高增，依目前作業準則，如有一孔因故封閉，而須於另一孔車道實施調撥以維持雙向交通時，鑒於整座隧道長達 12.9 公里，若予全程實施於設施擺設及人力調度，實有執行上之困難，且一般而言車道調撥，通常係屬災後復舊階段中後期之作為，故可考慮開放部分車行聯絡隧道，具備分段調撥功能，供一般車輛於隧道內避開事故區間後可繼續前行。

- (7) 隧道發生如火災等危險事故時，處理原則以保障用路人生命安全為優先考量，故其事件通報、判定之初步反應以「先反應再確認」之方式作業，並透過廣播設備指示，儘速將處於危險範圍內之人員疏散至安全地帶。然對大部分不具立即危險性之事故而言，作業單位仍宜「先透過閉路電視確認判定後再反應」之方式處理。
- (8) 為確實掌握事故現場之處理秩序及救援時效，對於消防、警察及各協力救援單位應做明確之分工，並明定指揮系統，同時劃分責任區域及勤務優先順序，並因應事故地點及性質指定救援路線。另必須確實瞭解並掌握未來雪山隧道事故處理作業及協力單位之確實位置及人力物力規模，俾利訂定雪山隧道緊急事故處理及應變計畫之標準作業程序。

3. 本研究實地踏勘心得

上述有關規設或興建施工單位對於雪山隧道之安全設計理念，雖已將雪山隧道之安全設施採取較佳之功能性利用考量，唯本研究曾於九十年十一月十六日，實地前往雪山隧道踏勘其週邊環境位置與內部設施狀況，且經由研究期間對於規劃設計、營造、管理及救災等相關單位所作之訪談調查發現，雪山隧道之安全及防災避難設施雖尚稱完備，惟仍有部份適用上之限制或應予留意或強化之處，說明如下：

- (1) 目前的交控系統設施，一般而言當有事故訊息傳進後，尚須進行人工確認，設施反應亦須經過人工確認之動作。
- (2) 應注意隧道周邊腹地及空地狀況、外環路網銜接情形及坡度對於救災車輛爬坡能力可能造成之影響。此外，對於高速公路主幹道與地區便道因為立體交叉設計，所可能形成之救災馳援困難性亦須加以考量之。
- (3) 隧道內避難方向指示，於外線車道之側壁面，未有告知避難聯絡隧道係位於內線車道側之指示設計，另亦可考量增設至南北兩側洞口距離之指示設計。又鑒於火災所產生之煙霧會阻礙視線，建議可在人行步道地面上增加逃生反光指引標示。
- (4) 一旦發生隧道事故，不同救災單位間之聯繫，通訊的整合最重要。隧道應有多重之通訊設計，如大哥大(已有預留民營業者設備空間)、有線(已設有緊急電話)及無線通訊系統(目前有二套系統可整合)等，以強化通訊功能之確保。
- (5) 隧道或避難聯絡隧道內之照明及標示設備雖有良好之自動感測設計，惟應加強電纜線及防火填塞等防護措施，以確保其功效。尤其對於隧道頂部之電纜，雖採區段式設計並使用低煙無毒材質，然因係開放式佈線，一旦發生火災仍會受到波及燒損，導致起火區段內之機電

功能喪失。

- (6)北二高隧道群之聯絡隧道與主車道係採斜接設計，較易於車輛之駛入；而北宜高速公路隧道內聯絡隧道與主車道係採垂直銜接設計，車輛須有較大之迴轉空間。
- (7)坪林行控中心專用道為坪林地區欲駛入雪山隧道上下行線西洞口之唯一道路。
- (8)位於雪山隧道北端之坪林行控中心與位於隧道南端之頭城工務段腹地廣闊，又隧道洞口前之二線道高架路面與坪林國中之操場等處，均可規劃做為大型災害事故發生時，救災人員及車輛之集結處、傷患初期救治及人員疏散基地，或做為直昇機停降場，以載運人員、物資或設置前進指揮站。
- (9)雪山隧道西洞口機房下規劃設有蓄水池，惟銜接該處之道路狹窄，且為唯一之通達路線，供水救災車輛會車及迴轉不易。
- (10)隧道救災使用隧道內之消防設備為主，則對於機房蓄水池之水源供給與隧道外消防送水口之供水，應予第一梯次之車輛戰力部署規設。
- (11)雪山隧道東西兩側，未有直接通達導坑之路線設計，均須經由地方道路前往。又導坑因侷於空間設計限制，無法提供大型消防車輛及救災機具進入救災，但適合作為對人員疏散及避難進出使用之逃生通道。
- (12)雪山隧道之通風排煙模式分為供人及主隧道供車使用兩獨立系統，但均採單向送風排煙方式，無法操作進行逆轉運作。

同時於訪查過程發現，規劃設計單位於著手規劃設計無線電通訊系統之初，原規設有「同頻共撥式無線電話系統」供隧道內通訊之用，然公警單位基於以往中山高及北二高值勤經驗及任務需求，認為應另於隧道內設置供警用頻道使用之通訊系統；又台北縣、宜蘭縣消防局基於救災需求也認為應於隧道內一併增設可供消防救災頻道使用之無線電通信輔助設備，故未來此三套通訊系統若同時設置於雪山隧道內，當如何整合始能發揮整體救災功效，實有待規設單位與相關救災單位進一步研究整合。

2 雪山隧道與國外長公路隧道安全規設情形之比較

俗語有言「他山之石，可以攻錯」，有關長公路隧道災害事故，國內一方面因長公路隧道之設計施工尚處於發展階段，另一方面國內亦未曾發生過嚴重傷亡情形之公路隧道災害事故，以致對於隧道相關設施之設置或改進，仍存有相當之努力空間。

為瞭解國外對於長公路隧道設施之規劃設計情形，本研究針對以隧道為主要公路連貫結構之歐洲大陸，其幾條主要之公路隧道相關安全設施設置情形（如表 4.2.1 所示），概略介紹說明。

由表 4.2.1 表析可知 St. Gotthard、Frejus 與 Mont Blanc 隧道均設有可提供新鮮空氣之人員避難區，而除 St. Gotthard 隧道外，其餘 5 座隧道(含 Mont Blanc 隧道)均無逃生隧道之設計，故若隧道內發生事故導致交通受阻時，由於缺乏可用之替代路線，將不利於逃生與救災作業之推展。又在隧道通風的處理上，除 Mont Blanc 隧道因岩覆過深而無通風豎井外，其餘隧道均設置有通風豎井，而採縱流式通風系統。至於其他安全設施方面，所有隧道均配置有隧道內號誌、警報系統、監視攝影機、雙向無線通訊、火警偵測系統與行控中心等，其中 Mont Blanc 隧道更具有兩座獨立作業之行控中心。而由上述資料分析比較顯示，我國雪山隧道安全逃生系統之設計實已達一定程度之水準要求。

此外，有關各隧道之危險物品管制措施，有管制運送數量、管制運送時間以及限制隨車護送等不同規定。而須特別留意者係幾座較長隧道包括 St. Gotthard、Frejus 與 Mont Blanc 等隧道，或於兩端或於一端之洞口設有以消防人員為主要成員之常駐應變小組(response team)，其對於該特定長隧道內意外事故搶救時效之掌握有較佳之應變救援能力，值得借鏡參考。

表 2.1 歐洲長度超過八公里之長隧道(均為單孔雙向車道)之安全系統

隧道名稱	國家	長度 M	通車年	平均日旅次	統計年	逃生隧道	避難區	停車彎	照明用電	通風系統	火警偵測系統	管制中心	危險物品管制	緊急應變小組
St-Gotthard	瑞士	16918	1980	21000	1998	有	有	有	單迴路	橫流式	有	兩座	管制數量	洞口消防隊 24 小時待命(各含 4 隊員)
Arlberg	奧地利	13972	1978	5200	1992	無	無	有	單迴路	橫流式	有	一座	離峰時間運送或隨車護送	
Frejus	法國至義大利	12901	1980	3600	1997	無	有	有	雙迴路	橫流式	無	一座	隨車護送	洞口消防隊(各含消防車 1 輛)+作業人員消防編組
Mont Blanc	法國至義大利	11600	1965	5300	1997	無	有	有	雙迴路	橫流式	有	兩座獨立作業	管制數量	法國端消防隊(含消防車)負責隧道全線消防工作
Plabutsch	奧地利	9755	1987	12900	1992	無	無	有	單迴路	橫流式	有	一座	無	
Gleinalm	奧地利	8320	1978	7800	1992	無	無	無	單迴路	橫流式	有	一座	無	

(資料來源：交通部台灣區國道新建工程局「北宜高速公路雪山山隧道增設緊急通達隧道工程設計 細部設計階段緊急事故及意外應變與救災處理程序與措施執行計畫書」(修正稿))

另就其中近年來曾發生多起隧道火災事故或造成重大傷亡之聖哥達隧道及白朗峰隧道與我國雪山隧道作進一步之比較。

有關雪山隧道、瑞士-聖哥達隧道、法國-義大利間白朗峰隧道之災害應變設施及資源，整理如表 4.2.2 所示。

表 2.2 雪山/聖哥達/白朗峰公路隧道災害應變設施及資源之比較

項目 \ 隧道名	雪山隧道(興建中)	聖哥達隧道 (2001 年火災前)	白朗峰隧道 (1999 年火災前)
國家	台灣	瑞士	法國-義大利
長度(km)	12.9	16.9	11.6
類型	雙孔各單向雙車道	單孔雙向單車道	單孔雙向單車道
通車年度	預定 2005	1980	1965
平均日旅次	預估 33995	21000	5300
逃生通道	有(導坑)	有	無
避難區 (供氣)	人行聯絡隧道 (通至導坑)	有 (通至逃生通道)	有
車行聯絡隧道	有	無	無
停車彎	有	有	有
消防栓	有(單邊)	有(單邊)	有(單邊)
照明	有	有	有
電源迴路	雙迴路	單迴路	雙迴路
通風系統	有 (含三組通風豎井)	有 (含六組通風豎井)	有 (但未設通風豎井)
火警系統	有	有	有
管制中心	有一座，但另設有平時無人駐守之次控中心一處	有(兩座)	有(兩座、獨立作業)
危險物品管制	禁止進入	管制數量	管制數量
專責應變小組	研議中	有(洞口消防隊)	有 (法國端設消防隊)

(資料來源：本研究整理)

由表可看出，歐洲所建之公路隧道大多屬於單孔雙向單車道之結構設計，而雪山隧道則採雙孔單向雙車道設計，唯白朗峰隧道及聖哥達隧道分於 1999 年及去年（2001 年）均曾發生過嚴重之火災事故，也致使歐洲各國對於長公路隧道之安全設計，產生新的安全觀念與改進措施。

1. 1999 年白朗峰(Mont Blanc)隧道火災概要：

(1) 起火原因：

一九九九年三月二十四日，法國-義大利交界處之白朗峰隧道內中間處發生一輛卡車(裝載麵粉及植物性奶油)起火而引發大火，造成 39 人死亡(如圖 4.2.1)。



圖 2.1 白朗峰隧道火災現場

(資料來源：<http://news.bbc.co.uk>)

(2) 火勢延燒及搶救情形：

火災發生當時隧道內溫度超過攝氏一千度，由於隧道內極高的溫度及濃煙阻礙了救災人員進入到事故現場，隧道內一片火海造成道路之柏油融化及部份頂部坍塌，來自於法國、義大利、瑞士的救災單位花了超過五十個小時以上的時間才將火勢控制，也花好幾天的時間才將火勢完全撲滅。

(3) 用路人逃生及傷亡情形：

火災發生當時，由於隧道內溫度超過攝氏一千度以上，大部份的罹難者因火災產生的濃煙及毒氣而窒息死亡，以致於造成三十九人死亡(其中一名為消防人員因吸入濃煙引發心臟病)及約四十部車輛損毀。令人驚訝的是除了二、三位罹難者被發現在避難區(safety bunkers)外，絕大多數的罹難者被發現時仍然坐在駕駛座上，更諷刺的是，肇事者(Gilbert Degrave, 57 歲)竟然參雜在大約一百位順利

逃生的汽車駕駛人中且宣稱乃是因為因油料外漏至排氣管而起火。此外，值得注意的是一名義大利的隧道員工(Pierlucio Tinazzi, 33歲)也死於這場火災，他是以自己的摩托車來回穿梭於隧道之間而拯救了十位用路人，直到不幸罹難。

(4)火災所造成之影響：

本次火災使得隧道被迫關閉，因而中斷了法國及義大利間之主要聯絡道路，關閉時間長達近三年。

(5)火災檢討：

本次火災法國與義大利兩個國家在救災上的協調，以及義大利方面之技術人員將新鮮空氣吹入隧道內(而不以排煙方式)使得火勢更加惡化。報告中也提到隧道內缺少通風豎井、應重新檢討隧道內的通風系統、隧道於一九六五年興建時缺乏一平行之逃生通道、提供更多的防火避難所，同時對於法國、義大利所屬的控制系統亦建議應予統一。此外並建議：

- A. 隧道應由單一管理者來負責。
- B. 加強義大利及法國控制中心的協調聯繫。
- C. 全面重新檢討通風系統。
- D. 重型貨車間保持更大的車距。
- E. 提供更多的防火避難所。

(6)安全改善：

在本次火災發生後，有關當局已經採取一些額外的措施來改善隧道安全，包含：

- A. 一套雷射-雷達系統以偵測交通量等級。
- B. 一套新系統可將事故現場附近的地區關閉。
- C. 一套空氣品質控制系統以監視一氧化碳及需要的話可引進更多的氧氣。
- D. 於路面下設置一條用路人逃生通道。
- E. 卡車只能單向通行。

2. 聖哥達(St. Gotthard)隧道火災概要：²

(1) 起火原因：

二 一年十月二十四日上午九時四十五分，瑞士-聖哥達隧道內距離南端出口約 1.5 公里處發生兩輛卡車(其中一輛卡車突然轉彎迎面撞上另一輛載有輪胎的卡車)對撞意外引發大火並產生大量濃煙，至少造成 11 人死亡(如圖 4.2.2、4.2.3)。



圖 4.2.2 聖哥達隧道火災位置圖

(資料來源：<http://news.bbc.co.uk>)

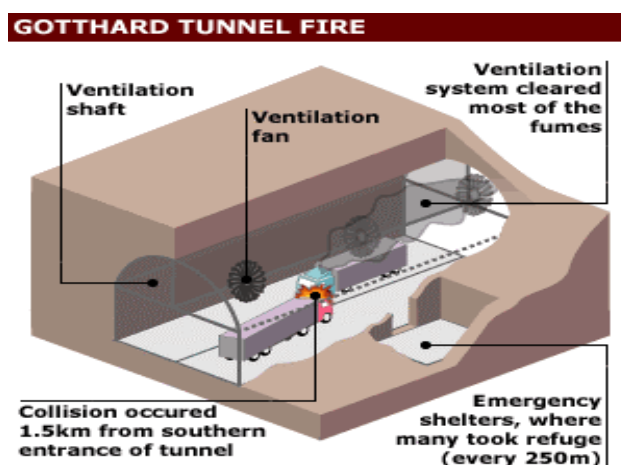


圖 4.2.3 聖哥達隧道火災現場圖

(資料來源：<http://news.bbc.co.uk>)

(2) 火勢延燒及搶救情形：

火災發生當時隧道內最高溫度超過攝氏一千度以上，由於溫度極

²資料來源：<http://news.bbc.co.uk>

高，消防人員無法將消防救災車輛駛入現場，一直到火災發生將近二十四小時後。隧道內的高溫也已將車輛及卡車熔化變成一堆廢鐵，且隧道內極高的溫度及頂部的坍塌亦使得救援工作困難重重，最後雖然消防人員已經將火撲滅，由於隧道內高溫造成約三百公尺長路段的隧道頂部坍塌。

(3) 用路人逃生及傷亡情形：

火災發生當時，許多駕駛人將車輛掉頭並迅速駛離隧道，且一些卡車及遊覽車也後退至隧道外，其他的人則跑至緊急出口利用步行逃生通道逃至安全處。另外，火災造成六位民眾因吸入濃煙而在隧道南端出口的一家醫院接受治療，其中一位卡車司機 (Marco Frischknecht) 被電視台採訪時表示：「突然間濃煙密佈，什麼都看不見，當我試著倒車時，由於有許多人，於是我放棄了。我便沿著牆壁走，直到我到達緊急出口。」一位官員表示：「隧道的安全措施—包括一個沿著主隧道的緊急步行通道(有獨立於主隧道的照明、空氣供給及出口)可以幫助減少人員傷亡。」總統 Moritz Leuenberger 表示：「感謝隧道的通風系統及每 250 公尺設置一個的緊急出口及避難所，使得許多人順利逃生。」，Leuenberger 亦是該國交通部長，負責瑞士隧道系統，表示該隧道安全上的措施使得避免掉更多的罹難者。

本次火災造成十一人死亡，其中一位為發生車禍的卡車(載有輪胎)司機，他被發現死在燒毀的駕駛艙內，另一位為肇事(卡車突然轉彎迎面撞上另一輛載有輪胎的卡車)的司機，他被發現死在距離車禍現場約 300 碼(274 公尺)靠近緊急出口處，其餘的為在車上的幾個人及在柏油路上試圖跑至安全處所的一些人，因火災產生的濃煙及毒氣而窒息死亡。

(4) 火災所造成之影響：

聖哥達隧道之交通量自從一九九九年起因火災造成 39 人死亡的白朗峰(Mont Blanc)隧道關閉而大增，本次火災使隧道被迫關閉，因而中斷了從義大利至北歐地區每天約一萬九千輛車通行之主要聯絡道路，另隧道已於二〇〇一年十二月二十一日重新啟用，關閉時間近二個月。

(5) 火災檢討：

本次火災慘劇促使許多歐洲道路專家要求在歐洲隧道做急迫性的安全改善，並指出隧道興建時乃依據當時之法令，然而隧道的交通

量卻不斷地增加且像這樣的單孔雙向車道容易與對向車輛發生車禍導致像這次不幸事件，他們建議的安全改善其中包括：興建第二條隧道可使車流在各隧道內僅單向通行及興建第三條逃生通道。另聯合國歐洲經濟委員會(ECE)要求一些新的措施以確保隧道更加安全：

- A. 應包括重型貨物車使用較小的油箱，於隧道裝置熱搜尋攝影機並定期測試駕駛人。
- B. 舉行在隧道內用路人如何應變的宣導活動，針對重型貨物車過熱及其他缺失實施路檢，超過一千公尺的隧道設置安全官。
- C. 建議重型貨物車裝載較少的油料。
- D. 重型貨物車間的距離最好應予管制及所有的車輛應備有滅火器。

上述歐洲經濟委員會之相關研究心得(由十五個國家的專家在七月舉行的會議)可能最後變成立法並約束各會員國。

隧道空間因具有密閉之特性，一旦發生火災，往往會造成極大的災害，而事後檢討均會引起一些消防概念上之改進。世界各國隧道消防安全很難有一體適用的標準，其主要原因在於各隧道之特性不盡相同(如類型、交通量、長度等)，且因國情不同及用路人習慣不同，而會有不同的規範或設計。

雖然歐洲公路隧道與雪山隧道之設計因所在位置及結構設計之不同，而存有差異(如雪山隧道為雙孔單向之高速公路隧道，而歐洲隧道多係單孔雙向之一般公路隧道)，然就隧道空間之特殊性，與發生災害事故時之危害性而言，其情境狀況大致相似，故有關國外隧道之災例仍可供研究參考。茲就白朗峰(Mont Blanc)及聖哥達(St. Gotthard)隧道兩長公路隧道火災所暴露出之安全問題，整理分析如下，以供雪山隧道或未來國內續興建長隧道之參考：

1. 長公路隧道之設計應以雙孔各單向車道為佳：

早期歐洲長公路隧道多屬單孔雙向單車道之設計，該設計容易使隧道內行駛之車輛與對向車輛發生對撞而引起火災。若採用雙孔單向車道之設計，將對向車流獨立分開，不但能防止車輛對撞之情形發生且當有一孔隧道內發生災害事故時，救援單位亦可利用另一孔隧道接至車行聯絡隧道以迅速到達災害事故現場進行處理，相對的，災害事故現場之車輛在適當的管制下也可利用車行聯絡隧道接至另一孔隧道迅速駛離災害現場。

2. 長公路隧道應設置獨立的逃生通道：

聖哥達隧道火災雖造成 11 人死亡，然而由於該隧道有設置一條平行於主隧道的緊急步行通道(有獨立於主隧道的照明、空氣供給及出口)，許多用路人得以利用而順利逃生，該次火災也促使許多歐洲道路專家建議在歐洲其他長隧道興建一條逃生通道。此外，白朗峰隧道火災造成 39 人死亡，也由於該隧道在興建時未設置供用路人避難逃生之通道，在火災後的檢討改善中也計劃於隧道路面下設置供用路人逃生的通道，故雪山隧道也應規設一條別於主隧道之逃生通道(目前導坑已規劃成為提供人員疏散避難使用之逃生通道，然當內部人員疏散完畢或當救援及疏散路線未發生衝突時，亦可提供救災輔助功能)。

3. 長公路隧道應設置通風排煙系統及通風豎井：

聖哥達隧道設有通風系統(含六個通風豎井)，而該通風系統及每 250 公尺設置一個的緊急出口及避難所，使得許多人在該次火災中能順利逃生；另白朗峰隧道由於缺少通風豎井且火災發生當時義大利方面之技術人員將新鮮空氣吹入隧道內(而不以排煙方式)使得火勢更加惡化，而在火災檢討中也包含全面檢討該隧道之通風系統。故長公路隧道應設置通風排煙系統及通風豎井(但是否設置仍與通風及路線設計有關)，平時維持隧道內空氣之品質，當火災發生時可將產生之濃煙排出，確保用路人之安全。

4. 加強隧道用路人之安全宣導：

隧道係屬一密閉式空間，一旦發生火災，往往會有逃生不易及救援困難的情形，而人類之避難行為剛開始是偏向於觀察，若能訂定更明確的應變及避難策略將可爭取滅火、逃生之第一時間。聖哥達隧道火災，因濃煙及毒氣使得在車上的幾個人及在柏油路上試圖跑至安全處所的一些人因逃生不及窒息死亡。此外，白朗峰隧道火災，絕大多數的罹難者被發現時仍然坐在駕駛座上，更諷刺的是，肇事者(Gilbert Degrave, 57 歲)竟然參雜在約一百位順利逃生的汽車駕駛人中，這均顯示出隧道火災發生時用路人沒有採取適當的應變措施。故雪山隧道之管理單位應製作「隧道用路人安全宣導須知」，加強對於用路人的宣導工作，使他們知道在隧道內應遵守行車之相關規定及當災害事故發生時應如何應變。

5. 加強相關救援單位之協調及聯繫：

白朗峰隧道分屬於義大利及法國所管理之控制中心由於各自獨立運作且火災發生當時，隧道內之無線電通訊系統因火災燒毀而無法使用，

導致來自於法國、義大利及瑞士等三個國家消防隊間的協調、聯繫困難，而妨礙整體救災工作之進行。故雪山隧道在災害應變上也應加強國道高速公路局、公路警察局及台北縣、宜蘭縣消防局等相關救援單位間之協調、聯繫。

3 雪山隧道避難逃生通道之設計與通風運轉模式探討

基於上述一、二節針對雪山隧道安全設計理念與相關安全設施及其與國外長公路隧道所做之比較結果，整體而言雪山隧道之安全設計與相關設施實已達世界級之水準，唯除上述一、二節所曾論及之加強或建議參考事項外，本研究再提出下列幾點淺見：

1. 避難逃生通道宜採直接、簡明之設計原則：

雪山隧道雖有平行於主隧道之導坑設計，可提供人員疏散避難之途徑，唯其並非如聖哥達隧道般直接穿越安全避難所後，即可通達與主線隧道平行之緊急步行逃生通道設計，而係避難者雖已進入人行或車行聯絡隧道後，尚需輾轉經由樓梯始可抵達導坑位置。且當導坑一旦設定為供用路人避難逃生使用之逃生通道時，除應具有獨立於主隧道的照明、空氣供給及出口外，也應於既有規設之設施項外，增設廣播、逃生標示、緊急電話及無線電通訊等設備，以幫助用路人逃離至隧道外。有關雪山隧道於主隧道、車行（人行）聯絡隧道及導坑內，有關避難逃生之相關安全設施設置規劃情形如表 4.3.1 所示。

表 3.1 雪山隧道避難逃生之相關安全設施

設施 \ 單位	主隧道	人行/車行聯絡隧道	導坑
通風	(由主隧道兩端洞口及通風豎井送風)	(由洞口機房之送風機，經由導坑及隧道底部之管線廊道送風，與主隧道通風系統獨立分開)	
照明			
逃生標示			(應標示距兩端出口之距離)
廣播			
緊急電話			
CCTV			
無線電 (高公局及公警局)			
無線電(消防用)			

2. 雪山隧道火災通風排煙之運轉操控模式： (資料來源：本研究整理)

雪山隧道之通風系統，計有正常運轉、塞車運轉、緊急運轉、停電

運轉及維修運轉等五類運轉狀況。其中，緊急運轉狀況係指隧道發生火災時之狀況，其運轉模式可分為兩個階段，第一階段為逃生模式，而第二階段為排煙模式。分述如下：

(1)逃生模式：

此一模式係為幫助人員逃離發生火災之隧道，其第一個動作是關閉所有中繼風機及其附屬之風門以防止煙霧擴散至相鄰之隧道，送風機、排風機及噴流式風機之啟動或停止，則依照預先設定之通風程式指令，在單向交通運轉狀況時，必須能使發生火災地區之風速維持在 $2\text{m/sec}\sim 4\text{m/sec}$ (參考值)以強迫煙霧向火災下游處漫延，因而可保護陷在火災上游處之用路人，但在火災地點上游 250 公尺內及下游 500 公尺內之風機則不能啟動，以減少對煙層(Smoke Layer)之擾動，同時必須關閉火災下游所有位於隧道與聯絡聯絡隧道相鄰處之防火防煙風門以及火災上游最接近災區之聯絡聯絡隧道與隧道相鄰處之防火防煙風門。在雙向交通運轉狀況時，所有之送風機、排風機及噴流式風機必須停止運轉，以降低煙霧擴散至火災區兩側堵塞之車輛，同時必須關閉所有位於隧道與聯絡聯絡隧道相鄰處之防火防煙風門。

(2)排煙模式：

當陷在煙霧中之人員皆已逃入避難室後，排煙模式必須由控制室人員啟動所有之送風機、排風機及噴流式風機，以產生較高之空氣流速，而將高溫及濃煙迅速排除，以減少高溫對設備所造成之損害並協助消防救災人員進入救災。

由上述緊急運轉狀況之啟動模式可知，無論是火勢初期之逃生模式或後來之排煙模式，其運轉啟動均須先關閉所有之中繼風機及其附屬之風門，以防止煙霧擴散至對向隧道。而其氣流排送方向無論逃生模式或排煙模式亦均係往車流順行方向排送，期間可由隧道內三組通風換氣站之排風機藉由與外界相通之排氣豎井，漸進將高溫及濃煙排出。

雪山隧道通風系統之設計係採單向通風排煙模式，可有效防止火煙及高溫擴展蔓延至對向隧道，亦可有效將高溫及濃煙盡速排出至隧道外。此一設計模式當然可給予救災指揮人員一個明確的排煙風向指示，然由於其單向通風排煙的設計，另一方面也限制了救災車輛所能選擇前往火源地點的接近路線，而僅能利用事故隧道之車流順行方向或藉由對向隧道採順行或逆向接近，再利用靠近事故地點附近之車行

聯絡隧道轉往事故隧道救災。

3. 考慮水霧或撒水設備之設置：

對於引擎等覆蓋物下的火災，水霧或撒水設備之水霧雖無法直抵火源以致無法達到理想的滅火要求，且一旦水霧噴頭開始放水噴灑時，可能因熱氣流被冷卻之影響而使原漂浮於隧道頂部之火煙迅速下降，導致環境惡化而令用路人無法安全避難逃生。然水霧或撒水設備其所噴灑出之微細霧狀水滴，可迅速吸收高溫而有效抑制火災的延燒與擴大，其對於火勢溫度往往高達千度以上之隧道火災，仍有一定之冷卻功效，進而防止隧道結構體因高溫而燒損塌陷，降低搶救之困難與危險性。且水霧設備如能配合手動監視操控裝置而於確認所有人員均已安全離開事故地點，並於疏散進入聯絡隧道及導坑避難後，始開啟噴灑啟動，則應不至危害用路人之安危，且能有效抑制火勢之擴展。³

再者，水霧設備係用於初期滅火或是冷卻火場輔助救災人員進入救災，除牽涉到作動時間問題外，其所需水源亦不相同。一般而言，消防隊到達隧道之時間平均約需二、三十分鐘，故考慮餘裕要求所需四十分鐘的水量係屬正常。日本及歐洲之隧道所設置之水霧設備即是以降低火場溫度為目的。

此外，值得注意的是，排除水霧的優點，基於水霧設置經費上的考量、消防蓄水池水源設置取得不易，亦不支持於隧道內設置水霧設備。美國 NFPA No.502 對於水霧撒水設備之使用與其功效，提出有下列觀點：

- (1) 對於發生於汽車內部或引擎之典型火災，因其具有防水設計，故設計再多的撒水頭亦無法有效發揮其功用。
- (2) 細小的水滴噴撒於非常高溫之火災表面，假如在起燃與撒水頭作動時間發生延遲，將產生大量超高溫之蒸氣，其潛在之傷害力比火災所產生之濃煙嚴重。
- (3) 隧道既窄又長，且常處於斜坡及縱向強力通風下，所以熱氣流通常不會停留於火源上方。
- (4) 由於熱氣煙層係沿著隧道上方開展，故一些作動的撒水頭並非完全位於起火源上方，在許多撒水頭係設於火源外圍之情況下，其冷卻作用將使煙層下降。

³ 簡賢文，公路隧道消防安全設備設置標準之探討，消防月刊，87年5月。

(5) 若撒水頭係於隧道用路人在不知情之狀況下瞬間噴灑，可能引起恐慌，造成交通事故之危險。

(6) 撒水頭之作動，可能造成煙層及空氣擾流，因而危及隧道內部人員之安全。

基於上述於隧道內設置水霧設備，雖有其優缺，然而如美國波士頓的 Central Artery (CANA)、I-90 First Hill Mercer Island 以及 Mt. Baker Ridge Tunnels 等公路隧道皆已有撒水系統設置之實例，故有關撒水滅火系統之設置與否，仍存有討論之空間。

4 雪山隧道應變救援行動與交控、機電整合界面之探討

回顧以往所曾發生之隧道災害事例，其中以一九九一年白朗峰隧道火災事故所造成之死亡人數最多，達 39 人，其主因乃是由於災害發生後，事故後方隧道入口之車輛依然持續進入，導致發生災變擴大的結果。而事故發生時雖於隧道口顯示有禁止進入之警訊，但用路人仍在事故發生後不斷進入，可見隧道安全系統的設計與用路人的駕駛習性，仍可能存有落差。又一九七九年日本東名高速公路日本土反隧道之車禍火災事故，由於起火初期階段無法確認起火位置所在，以致未能於第一時間通報離火點最近之救災單位及時出動，因而延誤救災時效，擴大延燒的結果導致火勢持續燃燒七日，更造成百餘部車輛燒燬以及百餘人傷亡之慘劇。

此外有關隧道的通風排煙方向亦是影響救災行動的重要考量因素。因對搶救行動而言，換氣設備運行方向的變更，可能造成進入隧道救災之人員，因遭受濃煙及熱氣的襲擊，而使生命遭致危害。一九八一年十月六日發生於日本敦賀之車輛火災，即曾一度發生於隧道內正進行救災行動之救災人員因送風機運轉台數增加及逆方向切換運轉，而遭受濃煙及熱氣襲擊，以致急速連同消防車倉皇退出隧道外的危險狀況。

由上可知，隧道交控及機電等硬體系統設施的運作，實與事故發生後一連串事故應變救援活動存有高度而密切之關連性，同時亦直接影響到應變救援行動是否得以順利成功。基於雪山隧道具有超長深度、外圍聯絡道路有限以及僅能進行單方向排煙運轉等事故救援作業限制特性，故應通盤考量有關雪山隧道機電、交控系統與事故救援行動之運作整合，以求能於事故發生時發揮相輔相成之效。

就事件處理程序而論，應變救援能否成功之關鍵在於早期發現、有效管制疏散交通及正確而迅速深入事故現場救援。然欲有效達成前述三目標實賴隧道交控及機電設施的充分協調配合，始能達其功於一役。依隧道事故從事故發生至復原通車之察覺、通報、確認、初期應變指導、判斷評估、決策、派遣、救援路徑決定、事故處置以至事故排除等整體應變處置作業流程來區分，有關各階段所需協調配合連動運作之機電或交控系統設施，如表 4.1 所示：

表 4.1 各階段機電與交控設施所需分配表

時序	演訓步驟	配合運作之交控或機電系統設施	備註
1	事故監控、察覺	車輛偵測器、火警探測器、坍方偵測器、一氧化碳及煙塵濃度等隧道內空氣品質偵測器、閉路電視監視系統、	
2	通報	緊急電話、火警自動警報設備、手動報警機、	
3	系統連動及確認	確認 CCTV 是否作動及鎖定；緊急照明、避難方向指示等連動系統是否作動以及通風系統是否由正常運轉模切換為緊急狀況之逃生運轉模式	* 前述連動系統之作動僅於火災及危險物品事件之偵測，其他事件則僅連動 CCTV 或 CCTV 及緊急照明等設施。 * 自動偵測雖顯示有事故發生，但若經確認無事故時，則進行偵測系統之檢修或重新設定。
4	初步應變及避難指導	閉路電視監視系統、CO 偵測系統、緊急廣播設備、火災警報及消防滅火設備、緊急照明設備、避難指示設施、通風設施之逃生運轉模式 CO 偵測	
5	判斷評估	閉路電視監視系統、CO 偵測系統、緊急廣播設備、火災警報及消防滅火設備、緊急照明設備、避難指示設施、通風設施之逃生運轉模式	
6	決策	閉路電視監視系統、CO 偵測系統、緊急廣播設備、火災警報及消防滅火設備、緊急照明設備、避難指示設施、通風設施之逃生運轉模式	
7	救援派遣及路徑決定	閉路電視監視系統、通信系統、資訊可變標誌、車道管制號誌、速限可變標誌	
8	事故處置	閉路電視監視系統、通信系統、資訊可變標誌、車道管制號誌、速限可變標誌、通風設施之排煙	當確認所有避難人員均已進入導坑避難後，始由行控中心人員手動切換啟動排煙運轉模式。

	模式、消防設施	
--	---------	--

表 4.1 各階段機電與交控設施所需分配表(續)

時序	演訓步驟	配合運作之交控或機電系統設施	備註
9	事故排除 復原通車	廣播、資訊可變標誌、車道管制 號誌、速限可變標誌、通風設施 之正常運轉模式	

(資料來源：本研究整理)

其中，當進行事故應變之判斷評估與決策時，應依事故的性質、衝擊程度及上游車流的狀況，分層決定最適切的交通管制策略，以降低事件對其他車流之影響，並減少社會付出之成本代價。而交控策略係針對路段上可能發生的各種危險狀況預先擬定因應準則，就隧道路段而言，其發生事故時所需採行之交控策略概述如下：

1. 事件警告策略：

係利用交通專業台(FM 無線電插播)或資訊可變標誌等設施，將事故發生之訊息傳達予用路人，讓用路人有充裕的時間來判斷、因應，並適時改道。故未來當隧道路段發生意外事故時，隧道管理單位可利用這些設施給予用路人適當之指示與導引。

2. 速限管制策略：

通常是對天候不良狀況、幾何條件較差路段或交通壅塞車流所採行之限速措施。

3. 車道管制策略：

由於隧道內行車視線受限，較易發生事故且救援、疏散不易，故為加強隧道路段之管制，乃於隧道進口處及隧道內設置車道管制號誌，以便因應隧道內之狀況實施車道管制策略。可資運用的車道管制策略計有：(1)車道封閉策略(2)調撥車道策略(3)隧道封閉策略等。

(1) 上游匝道管制策略：

匝道管制係藉由在上游交流道出、入口匝道處管制車輛之進出，以管制交通流量並確保高速公路能維持某種服務水準，減少或消除因高速公路壅塞所衍生之行車問題。因此若將此策略搭配運用於隧道緊急事件反應計畫，將可有效降低隧道區間交通壓力及其衍生之潛在危險性。本策略可運用之細部策略包括：(1)上游匝道儀控(2)上游匝道封閉(3)平面道路連鎖控制。

(2) 上游路段封閉：

當位處交流道下游路段之隧道發生危險事故而須緊急封閉隧道時，為避免車流繼續湧入事故地點，造成救援作業困擾及危險性，當欲封閉隧道時，交通警察應迅速趕至隧道上游交流道之出口匝道分流點以交通錐封閉該主線路段並引導車流由該出口匝道下高速公路。

(3) 現場交通疏導：

- A. 當隧道封閉欲疏導車輛進行改道時，以已進入隧道之車輛的疏散為優先。
- B. 當隧道內事故引發交通壅塞而須進行交通管制時，應予已行駛於高速公路之車輛優先通行權，而管制欲利用相關匝道進入之車流。
- C. 當隧道進行調撥改道時，除已進入隧道之車輛外，應儘量使隧道外的車輛於開放路段變換。
- D. 為降低事件之衝擊性，應儘速清除某一車道的障礙，開放部份車道通行以疏解交通。

對於事故發生時所採取之應變措施初期係依據事故偵測或通報的內容決定，不同型態之事故其偵測通報方式不盡相同，但可概分為系統自動偵測與人工通報兩大類。

一般當隧道管理單位接獲事故(火警事故除外)發生之訊息時，應先經由閉路電視攝影機或現場回報(報案)等管道確認事故是否確實發生，然後再採取相關因應措施，以避免因監控系統異常、誤測或謊報所造成之困擾。後因各類事故之性質、緊急程度、影響層次、所需支援單位、對應之相關策略等均有所差異，故一旦隧道管理單位確知事故發生後，應立即判定事件的型態(如交通事故或車輛故障或危險物品洩漏或火災等)、事故嚴重等級(如危險事故或重大事故或一般事故或輕微事故)、事故發生區位(如在隧道入口或隧道中段或隧道外)及事故可能持續的時間、衝擊程度等之決策分析，再根據此決策分析之結果，一面操控交控、機電監控等系統採行適當之緊急事件反應計畫，以降低事故之衝擊，另一方面則聯絡相關救災單位迅速趕至現場救援，進行事故緊急救難及排除等作業。最後，鑒於事故之衝擊程度與嚴重等級將隨處置作業之進行與時間之更迭而有所變異，故在事故尚未排除前，隧道管理單位每隔一段時間即應回饋重覆進行決策分析並修正相關應變計畫，以令其處理程序最為經濟、有效。有關事故應變處理程序與隧道交控、機電設施之運作

整合關係如圖 4.1 所示：

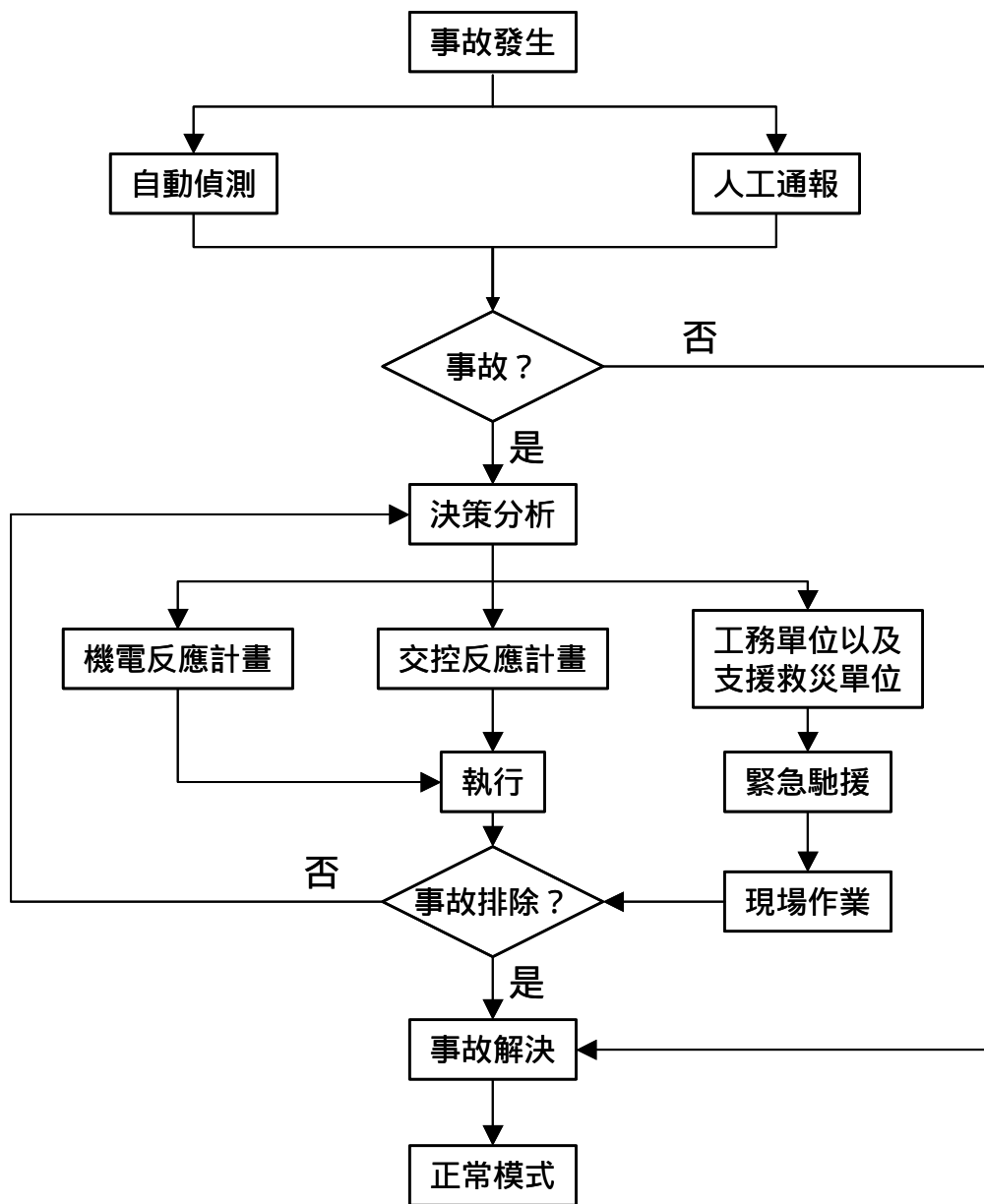


圖 4.1 事故應變處理程序與隧道交控、機電設施運作整合關係圖

