

長隧道災害應變及救援作業探討 以北宜高速公路雪山隧道為例

李宏徹¹ 簡賢文² 陳發林³ 熊光華⁴

¹國道新建工程局設施組組長

²警察大學消防系教授

³台灣大學應用力學所教授

⁴台北市消防局局長

摘要

本文以火災時消防搶救活動時間之程序，分就進入長隧道途徑與事故救援及分工，建構火災搶救之應變方式，並探討各工作執行單位有效掌握隧道火災發生前、火災初期應變能力與持續擴大時應變能力等不同階段之影響因素。

本文主要以台灣北宜高速公路雪山隧道(長 12.9km)為例，探討其災害應變及救援作業，供營運管理單位於各類災害(特別是火災)發生時，迅速反應、統一指揮及快速救援，以減少人員傷亡及災害擴大。文中並基於長隧道火災境況，提出隧道消防設施設計規劃建議。

關鍵字：雪山隧道、隧道火災、緊急應變、標準作業程序、消防救援

一、前言

公路隧道內因各種事故發生火災時，由於其特殊密閉構造及環境特性，現場火勢溫度往往超過 1000 之高溫，造成部份隧道結構體崩坍及設備毀損，除阻礙初期救災外，更可能引發多數死傷者而發展成重大災害之危險性。發生於 2001 年 10 月瑞士聖哥達(St. Gotthard)隧道、1999 年 3 月歐洲白朗峰公路隧道及 1999 年 5 月阿爾卑斯山區 Tauern 隧道火災所產生之高溫及濃煙，使得消防救災人員無法進入及接近起火點，嚴重影響火勢之控制及救災作業。

台灣地區因地勢多山險峻及各種主觀環境因素的影響，公路隧道已成為無可避免的公路工程設計。長公路隧道因本身結構多具有複雜、密閉及地下化等特殊特性，不僅增加意外事故發生機率，造成人員傷亡、運輸中斷等社會成本重大耗損的潛在危險，一旦發生火災，無論內部人員避難或外部進入搶救均十分困難。因此除了有關隧道之設計、建造、管理、使用等都必須十分重視消防安全設計與要求外，對於興建中之台灣北宜高速公路雪山隧道等長達十公里以上之長隧道火災，更應有未雨綢繆之災害應變及救災規劃準備。

二、公路隧道特性分析

2.1 公路隧道建築構造特性

(a) 因隧道的密閉式結構設計，對內部人員可能造成不安感、壓迫感或恐懼

感等負面心理因素的影響。

- (b) 與大規模地下密閉空間結構相似，同樣具有通達結構外安全開放空間之避難出口個數、位置及大小等明顯受限之情形。
- (c) 因係封閉式密覆構造且外氣通風供給有限，一旦發生火災事故將形同一座天然的大烤爐。
- (d) 因整座隧道沿線內部結構觀景設計雷同，令人難以確切掌握本身所處位置或造成行進方向的混淆。
- (e) 多為無開口設計，自然採光受限，一旦隧道內部發生斷電情形，而緊急照明進行切換瞬間或緊急電源無法有效供電時，將造成隧道全面陷入漆黑情形，增加用路人不安感等心理因素，更因駕駛人瞬間反應時間（如視覺適應等）及所採取之因應作為不同（如緊急剎車或減速急緩等），導致發生重大車禍事故之可能性增高。
- (f) 因無法進行自然通風換氣，易蓄積車輛所排放之廢氣或瀰漫火災所產生之濃煙等有害氣體，故須設置大規模的通風換氣及排煙設備。
- (g) 因受地形、距離及硬體設施等之阻絕，隧道內、外相互間的通訊聯絡及狀況掌握均顯困難。
- (h) 隧道空間狹小侷限，無法同時容納大量人員及器材設備進入內部救災且限制了救災機具於隧道內之操作空間。

2.2 長公路隧道與一般開放路段之特性差異

- (a) 通風：隧道路段車輛排放之廢氣無法直接擴散於大氣中，須藉助通風設備將其排出隧道外，空氣品質較一般開放路段差
- (b) 照明：隧道內須維持常年二十四小時全天性照明。
- (c) 交通容量：駕駛人會因對密閉空間之不安感、壓迫感及寬度等不適性，而降低速度，故隧道路段之交通容量通常較一般路段為低。

2.3 長公路隧道災害事故特性

聯絡困難、狀況不明、救援急迫性、進入搶救困難、可及性低、濃煙大、溫度高、疏散避難困難及救災不易。

三、雪山隧道概述

3.1 地理位置

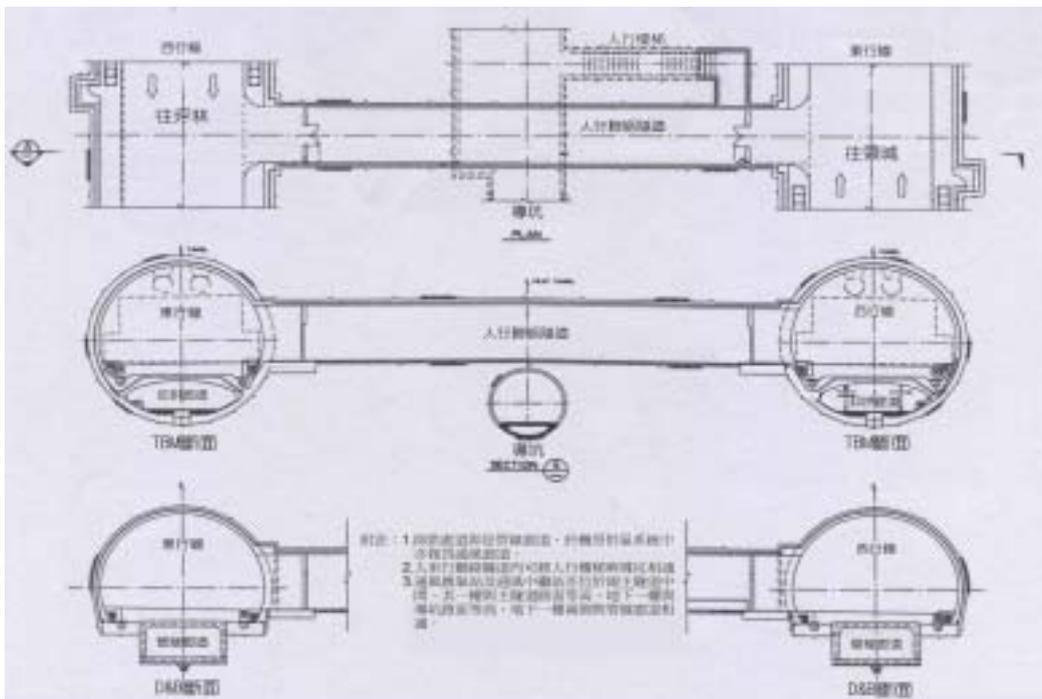
雪山隧道貫穿雪山山脈，隧道西口位於台北縣坪林鄉，洞口附近設置一坪林行控中心專用道，專用道內配置有坪林行控中心，隧道東口則位於宜蘭縣頭城鎮，離東洞口約兩公里處設有頭城交流道，頭城交流道內配置有頭城工務段、頭城收費站及國道公路警察隊部辦公室。導坑東西洞口均與坪林及頭城地方道路相通。

3.2 設計概述

- (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。
- (b) 坡度由頭城往坪林方向為 1.255% 上坡。
- (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。（如圖一所示）
- (d) 每一車道寬 3.5 公尺，行車淨高 4.6 公尺。



圖一 雪山隧道及通風系統透視圖



圖二 雪山隧道斷面圖

- (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。（如圖二所示）
- (h) 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。
- (i) 交通控制及隧道機電系統：交通控制系統設置有閉路電視、緊急電話、車輛偵測器、車道管制號誌、資訊可變標誌、無線電、廣播及中央電腦等子系統，隧道機電系統設置有電力、照明、火警偵測、通風空調、消防及監控等子系統。

3.3 安全設施（如圖三所示）

3.3.1 避難救援通道

雪山隧道為雙孔單向雙車道隧道，兩孔主隧道間以每隔 350 公尺一座人行聯絡隧道及每隔 1400 公尺一座車行聯絡隧道相互銜接；緊急停車彎配合車行聯絡隧道位置，於主隧道車行方向右側每 1400 公尺設置乙處；導坑平行於主隧道，位於兩孔主隧道間與人 / 車行聯絡隧道下方，導坑與人 / 車行聯絡隧道有人行樓梯銜接。車行聯絡隧道斷面足敷各型大小車輛之通行或導流，每座人行聯絡隧道可避難百人以上，導坑可提供最便捷之專用救援路徑。雪山隧道係由雙孔主隧道、人 / 車行聯絡隧道、緊急停車彎及導坑所通連而成的逃生、避難及救援路徑與空間。

3.3.2 通風設施

雪山隧道擁有兩套獨立通風系統，一為供應主隧道車道換氣之加強縱流式通風系統，除平時進行車道換氣外，在火災發生時，依自動控制程序進行火災運轉模式，除避免濃煙擴散至人 / 車行聯絡隧道及對向主隧道外，並控制在適當風速下，提供用路人最佳逃生環境。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，此供氣系統仍由雪山隧道東西洞口機房全天候引入新鮮空氣，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保持正壓，避免隧道火災濃煙由門縫竄入，讓逃生人員可以在聯絡隧道內獲得安全避難。

3.3.3 照明設施

包含主隧道一般照明（內含緊急照明迴路）、火災緊急照明及避難通道照明。

3.3.4 消防、安全及避難設施

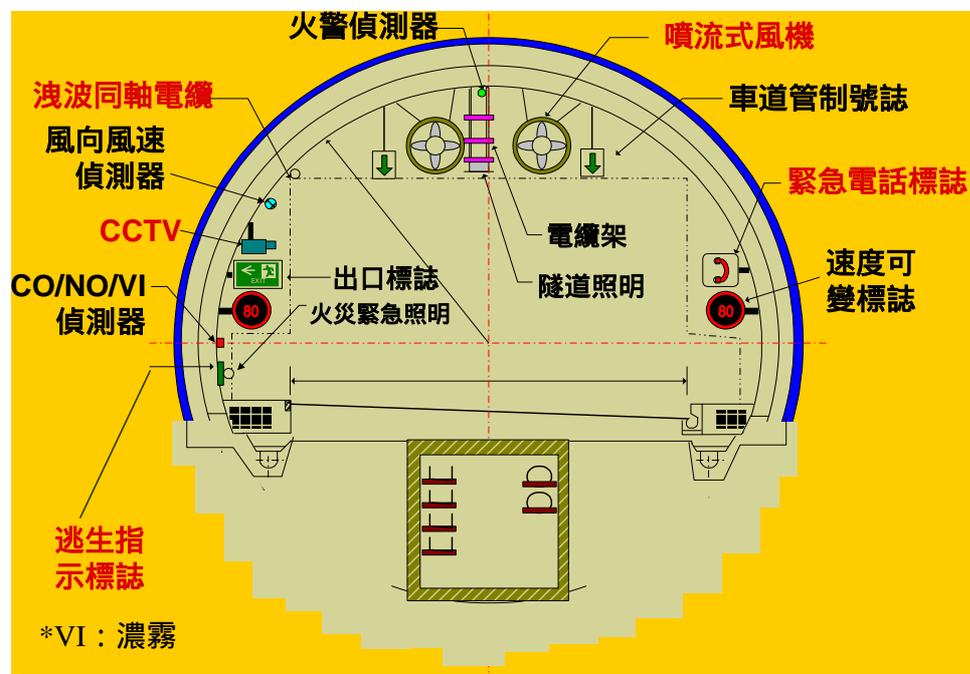
隧道內設置設有自動火警警報設備、手動報警機、緊急電話、消防栓箱、滅火器、避難方向指示燈、出口標示燈、消防送水口及出水口、消防及工務無線電通訊設備、調頻(FM)廣播再播送設備、柴油緊急發電機及不斷電電源設備。

3.3.5 交通管制設施

包含資訊可變標誌、車道管制號誌及速限可變標誌。

3.3.6 路況監測設施

包含中央監視控制中心、閉路電視監視設備、車輛偵測器、隧道內空氣品質偵測器、輝度偵測器。



圖三 隧道安全及防災設施示意圖

四、雪山隧道災害應變及救援作業探討

4.1 雪山隧道災害應變及救援之對策與原則

- 事故的即早偵知與迅速排除
- 對於火災事故的初期應變應採「先反應再確認」方式為之
- 救援及避難疏導路線之選定
- 簡捷、明確引導用路人避難疏散
- 救援安全及人命搶救為首要考量

- (f) 應變救援作業以隧道既設硬體救災設施為主，救災單位裝備為輔
- (g) 應變救援以國道轄屬單位為先，地方單位支援在後
- (h) 確保救災聯絡管道之通暢
- (i) 後勤補給之建立
- (j) 後續車輛進入之禁止
- (k) 妥適規設直昇機停降點

本文主要在探討雪山隧道發生災害事故後所應採取之應變搶救作為，然而，對於災害事故的預防上，周詳的事前預防措施比事故發生後的迅速反應處置，還要重要。故對於隧道事故的防制，仍應力求避免於隧道內發生火災或其他重大事故為首要工作，並加強用路人的安全駕駛宣導與守法觀念，以及對於違規行為的加強取締工作。

4.2 雪山隧道救災限制

- (a) 由於現階段尚未規劃於雪山隧道設置專責救災單位，故災害應變及救援作業係以高速公路配屬之單位（國道高速公路局工務段、交控中心及國道公路警察局）為災害初期應變主力單位，而地方消防單位、拖吊單位及醫療單位則為支援協助單位。
- (b) 雪山隧道僅能實施單向通風及排煙，無法逆轉操作，救災人員在救災路徑選擇上應以由災害現場之上風處接近為優先，以防止受到濃煙與高溫波及，而影響視線及自身安全，另導坑僅能提供小型救災車輛行駛。

4.3 災害通報

雪山隧道長達 12.9 公里以及其密閉空間之危險特性，一旦發生災害其危險性與急迫性將遠高於一般建築空間或開放性道路。而隧道災害事故應變救援成功與否之關鍵在於早期發現、有效管制疏散交通及迅速深入事故現場救援。尤其對於事故發生後的及早偵知察覺，更是啟動後續初期反應、人員避難及救災動員等一連串應變救援作為之觸發點。

災害通報除隧道內機電及交控設施自動偵知外，用路人可利用隧道內緊急電話、消防手動報警機及個人行動電話進行通報，公警單位、養護單位及拖吊單位於巡邏期間回報等，均可獲知災害之發生。故加強自動偵知設備之保養維護、用路人通報宣導及警勤等單位巡邏密度，均可有效加強災害初期通報速度。

目前高速公路災害事故之主體受理報案單位，計有國道高速公路局行控中心及國道公路警察局勤務指揮中心兩單位，事故發生時兩單位彼此間需作相互間通報處理。

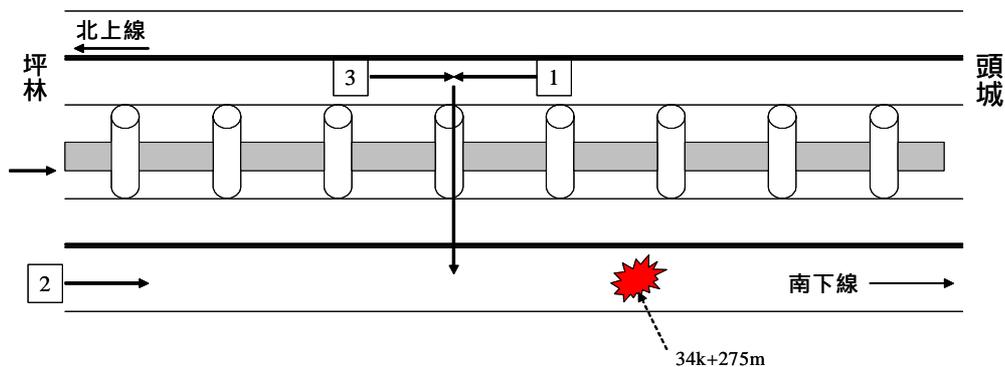
4.4 災害指揮體系建立與運作

目前高速公路災害事故指揮體系之運作，可分為以國道高速公路局為主之行政指揮監督及由國道公路警察局負責執行處理之現場指揮。行政指揮監督方

面主要功能在於充分掌握整體災變管理需求與作為，同時對各項資源提供協調聯繫之協助，故應由隧道管理單位擔任之，並循業務通報及作業程序，層層上報上級主管機關，以求行政體系之一慣性。而現場指揮權之歸屬，其功能主要在於如何有效掌控災害訊息、評估災情及可能引發之問題，並決定完整之因應行動腹案，故於災害發生時，能最先派員趕抵現場了解掌握災情，並具有足夠之訓練與經驗，且有能力判斷災害型態而整合請求所需資源進行救災者，擔任應變初期第一階段之現場指揮，而後隨支援單位及救災資源的後續增加及災情的演變，而將現場指揮權逐步移轉予擁有主要救災資源、人力及專業人才之主管單位，最後一旦中央介入救災指揮，即依「災害防救法」之相關規定辦理指揮權移轉，而達行政指揮及現場指揮合一，由單一機關統籌整體應變救援機制之運作。

4.5 救援路徑選擇

救災車輛雖有優先通行權，然逆向行駛仍有其安全性之疑慮，且一旦發生災害，事故側隧道之順行向車流勢必造成回堵而不利於救災車輛之行進，而非事故側之隧道因實施隧道封閉及上游車流疏導管制，將可提供救災車輛較順暢之行車路徑，故有關救災路線選擇，原則以非事故側隧道之順行路徑並輔以迴車道或車行聯絡隧道為第一優先，事故側隧道之順行路徑為第二，其後再以非事故側隧道之逆行路線輔以迴車道或車行聯絡隧道為第三路線，導坑為接近事故點之輔助路線。(如圖四所示)



圖四 救災路徑優先順序圖

4.6 危險事故救援及疏散路徑

當隧道內發生如火災或危險物品外洩等危險事故時，為便利疏散及救援作業，並避免因事故所產生的濃煙影響至另一孔道，隧道管理單位於事故發生時必須緊急封閉雙孔隧道，而隧道通風模式將由一般模式轉為緊急模式，將濃煙順著車行方向由通風豎井或隧道出口就近排出。此時，接近事故地點之受困車輛駕駛人可視情況，在安全的狀態下，選取自備滅火器或是隧道內每50公尺所設置之消防栓及滅火器等設備，進行初期的滅火及事故排除，若發覺情況已非短期內所能控制，則應儘速離車，選擇就近之聯絡聯絡隧道或洞口進行避難。

在避免內部疏散與外部救援進入路線避免衝突之前提下，則引導內部人員進行疏散避難之路線選擇，應與救災路線呈逆向邏輯選擇模式，可由導坑進行人員之疏散。事故點前之車輛應盡速駛離隧道，而位於事故地點後方之車輛仍可行駛無礙者則應視所在位置聽從救災人員之指揮分由就近之車行聯絡隧道或迴轉車道駛往對向隧道盡速駛離，而尚未進入隧道之兩側車流則經指示利用迴車道折向對向車道迴轉駛離雪山隧道，又遭損無法行駛或塞車無法前進之故障車輛，車輛駕駛人應將鑰匙留於車上啟動插孔，避免將方向盤卡死緊鎖，並儘速前往聯絡隧道由導坑進行疏散避難，俾利救災人員移置車位以供救災車輛通行前進。無論是從隧道內部疏散之車輛或外部前往救援之救災車輛，其欲行駛車行聯絡隧道之前提，均應在交通狀況業已受號誌及現場交管人員控制下為之。

4.7 雪山隧道火災事故作業程序

由於隧道空間之封閉特性，因此對隧道使用者而言，火災所產生之濃煙與高溫將是造成人命傷亡之最大危險因素，是以，如何簡化及加強隧道營運管理單位及支援之地方消防隊、責任醫院之連絡管道，並訓練隧道管理人員充分掌握現有各項火警及消防設施之操作功能，並熟悉火災事故之處理程序，以避免延誤初期救火時機，為研擬火災事件作業程序之重點所在。

4.7.1 一般程序

- (a) 行控中心由閉路電視、火警自動警報設備發現或用路人由消防栓上之緊急按鈕、緊急電話或由公警單位或工務單位巡邏人員通報得知隧道發生火災時，應立即啟動隧道機電及交控火災反應程序，並啟動排煙用通風機，進行緊急通風運轉模式，並緊急封閉雙孔隧道以策安全。
- (b) 除由閉路電視監看得知者外，行控中心應進一步利用閉路電視進行火災狀況之確認，並鎖定火災現場，以便掌握火災狀況。
- (c) 利用緊急廣播指導通知火災事故地點附近之用路人就近利用隧道附設消防設備進行初步滅火，或引導其疏散至就近聯絡隧道避難。
- (d) 執行交控號誌管制及警告模式，以防止後方車輛持續進入，
- (e) 迅速通知最靠近事故端之工務單位或公警單位經由最近或最快之救援路徑出動，進行初期救災與交通管制作業，並通知地方消防單位與責任醫院準備增援。
- (f) 撲滅火勢後，將事故車輛先行推頂至路邊停車彎處或由抵達現場之拖吊車將受損車輛拖離現場，勤務人員並配合清理現場，儘速恢復交通。

上述作業程序係火勢僅於初期階段即受控制撲滅之狀況，一旦初期滅火失敗，應立即請求國道轄屬以外之地方救災單位，如地方消防、警察、工務甚至國軍等單位支援協助，如災情仍無法受到控制，即應依災害防救法之相關作業規定，啟動中央災害應變體系。

4.7.2 地區支援單位(消防單位)處理程序

當用路人及國道所屬救災單位於進行初期搶救失敗，於接獲請求協助支援搶救災害時，針對救災救護指揮中心、帶隊指揮官及現場搶救，應考量事項如下：

4.7.2.1 救災救護指揮中心

消防救災指令動作發起乃由救災救護指揮中心為之，因此從支援請求、派遣及各項指揮調度及資訊交換，救災救護指揮中心都居於關鍵性地位。

- (a) 接獲支援請求。
- (b) 派遣時應考量災害地點、種類、規模、出勤單位、車輛數量種類、指揮官律定。
- (c) 應隨時與控制中心保持聯繫，監視災情發展狀況，並針對各項注意事項指示救災單位，並要求回報各種狀況。
- (d) 若災害擴大時，應加強派遣救災單位支援、提高指揮官層級及後勤補給方案規劃。

4.7.2.2 帶隊指揮官：

帶隊指揮官之指揮判斷程序應由接獲派遣開始就展開，在接獲派遣指令時，應決定行進方向，考量火勢發展，抵達現場後，應與高公局管理人員及公警人員保持聯繫，與其成立聯合指揮站，並進一步評估火勢發展、交通管制狀況。在未進入隧道搶救之前，應確定災害狀況是否請求支援，進行安全管理程序，確保通訊中繼體系及水源中繼、供應，決定進入方向應考量各項應變措施。

4.7.2.3 現場搶救應考量事項

必須考量人員安全、不直接進入隧道、順向排煙與順向搶救、雙向部署與單向搶救、接近手段、水源確保、交通管制措施、通訊系統暢通、聯合指揮站設立、及後勤補給等。

五、結論

就台灣北宜高速公路雪山隧道探討結果，對於未來長隧道興建，提出下列幾點建議供爾後長隧道規設單位參考。

- (a) 長公路隧道設計應以雙孔各單向車道為佳，如空間、經費許可情況下仍應保留路肩之設計。
- (b) 應設置一獨立於主線隧道專供疏散避難使用之逃生通道，而其設計原則應採與主線隧道間有以完善規劃之避難安全區間相連結，且符合能往兩方向避難、路徑採直、短且簡單明瞭之設計。
- (c) 長公路隧道救災功效上，事故初期的迅速處置，對於事故的搶救與災情

擴大的防止，具有絕對之影響性，故未來對於長達十公里以上等特長隧道，仍應朝於隧道端設置專責救災單位方向為考量。

- (d) 應利用長公路隧道兩端規劃興建之控制中心、工務段或公警隊等既設建築廳舍，做為救災配置據點。
- (e) 應加強長公路隧道工務管理單位、公警單位及地方救災支援單位現有救災車輛、器材等裝備之種類與數量，或採購特殊救災機具裝備。
- (f) 有鑑於國外隧道重大火災事故之超長救災時間之事實，應妥善規劃建立後勤補給機制。
- (g) 救災單位間之聯繫與通訊的整合最重要，隧道內應有多重通訊設計，如大哥大、有線及無線通訊系統等，以強化通訊功能之確保。除應有一個整合頻道俾利各救災單位間訊息之相互傳達外，並應設有可供單位內部體系通訊聯絡之功能，並應確實保持救災全程之聯絡管道通暢。
- (h) 應全面性禁止載運危險物品車輛行駛長公路隧道。
- (i) 直昇機對於高速公路封閉性之特殊道路設計，有縮短救援人力、物資補給及傷患就醫運送與現場狀況掌控等立即明顯功效，故對於直昇機起降點之規設，亦應事先予以妥適選設。
- (j) 應大量製發長隧道用路人安全宣導手冊，俾使用路人行駛於長隧道時，可以完全掌握相關安全資訊。
- (k) 規設階段應考量整體防救災需求，建立逃生、救援及避難通路，建置隧道安全設施。
- (l) 建立災害應變及救援標準作業程序，平時加強管理單位、公警單位及救災支援單位演訓。
- (m) 預防意外事件發生重於事後搶救，管理單位及公警單位應對隧道內違規駕駛行為（如變換車道、超速等）加強取締，以及加強用路人的安全駕駛宣導與守法觀念。